



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



**DETERMINACIÓN DE LOS CONTROLES
GEOLÓGICOS QUE INFLUYEN EN LOS PARÁMETROS
METALÚRGICOS DE SEDIMENTACIÓN Y REOLOGÍA
EN EL PROCESO DE ESPESAMIENTO DE RELAVES,
DIVISIÓN EL TENIENTE, CODELCO CHILE**

Memoria para optar al Título de Geólogo

Eduardo Esteban Opazo Manríquez

**Profesor Patrocinante: Dr. Oscar Jerez Riveros
Profesional Guía: Susana Fonseca Ferrada
Profesores Comisión: Dra. Fernanda Álvarez Amado
Dr. Osvaldo Rabbia Dalmasso**

Concepción, 2021

ÍNDICE

Página

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Presentación	1
1.2. Trabajos previos	2
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Ubicación y accesos	4
1.5. Metodología de trabajo	6
1.5.1. Etapa de gabinete 1	6
1.5.2. Etapa de gabinete 2	6
1.5.3. Etapa de gabinete 3	6
1.6. Alcances y limitaciones	7
1.7. Agradecimientos	7
2. MARCO GEOLÓGICO	9
2.1. Marco Geotectónico	9
2.1.1. Evolución geológica de Chile central	9
2.2. Geología regional	10
2.2.1. Estratigrafía	10
2.2.2. Rocas intrusivas	11
2.2.3. Geología estructural	11
2.3. Geología del depósito	12
2.3.1. Unidades litológicas	12
2.3.1.1. Complejo Máfico El Teniente (CMET)	13
2.3.1.2. Complejo Félsico El Teniente	15
2.3.1.3. Brechas	18
2.3.2. Alteración y mineralización	20
2.3.2.1. Etapas de alteración	20
2.3.2.2. Mineralización	22
3. MARCO TEÓRICO	24
3.1. Metalurgia	24
3.1.1. Proceso productivo	24
3.1.1.1. Proceso productivo de planta	24
3.1.1.2. Espesamiento	25
3.1.2. Parámetros metalúrgicos en espesamiento	26
3.1.2.1. Sedimentación	27
3.1.2.2. Factores que controlan los parámetros de sedimentación	29
3.1.2.3. Reología	31
3.1.2.4. Factores que controlan los parámetros de reología	32
3.1.2.5. Ensayos de sedimentación y reología	34

3.1.3. Unidades geometalúrgicas (UGM) de recuperación de cobre de DET.....	35
3.2. Herramientas estadísticas.....	37
3.2.1. Análisis de componentes principales.....	37
3.2.1.1. Gráfica de puntuaciones o <i>Score Plot</i>	38
3.2.1.2. Gráfica de influencias o <i>Loading Plot</i>	39
3.2.1.3. Gráfica de doble proyección.....	40
3.2.2. Correlogramas o matrices de correlación múltiple.....	41
3.2.3. Análisis de diagrama de caja y bigote (<i>boxplot</i>).....	41
4. METODOLOGÍA.....	43
4.1. Bases de datos.....	43
4.2. Análisis para la búsqueda de resultados.....	45
4.2.1. Preparación de los datos.....	45
4.2.1.1. Definición de variables de entrada primarias.....	45
4.2.1.2. Clusterización litológica.....	46
4.2.2. Análisis de cada parámetro de control.....	48
4.2.2.1. Definición de variables influyentes.....	48
4.2.2.2. ACP y análisis univariados.....	48
4.2.2.3. Fenomenología.....	49
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
5.1. Resultados generales.....	50
5.1.1. Correlaciones entre mineralogía y granulometría.....	50
5.1.2. Identificación de variables influyentes.....	51
5.2. Sedimentación: análisis de velocidad de sedimentación.....	53
5.2.1. ACP y análisis univariados.....	53
5.2.1.1. Mineralogía: CMET.....	53
5.2.1.2. Mineralogía: OTRAS LITOLOGÍAS.....	56
5.2.1.3. Mineralogía: Granulometría.....	58
5.2.1.4. ACP compilatorio.....	60
5.2.2. Fenomenología de los resultados.....	62
5.2.3. Variaciones según litología y alteración hidrotermal.....	63
5.2.4. UGM y velocidad de sedimentación.....	64
5.3. Sedimentación: análisis de concentración de sólido final (CV).....	66
5.3.1. ACP y análisis univariados.....	66
5.3.1.1. Mineralogía: CMET.....	66
5.3.1.2. Mineralogía: OTRAS LITOLOGÍAS.....	68
5.3.1.3. Mineralogía: Granulometría.....	70
5.3.1.4. ACP compilatorio.....	72
5.3.2. Fenomenología de los resultados.....	74
5.3.3. Variaciones según litología y alteración hidrotermal.....	76
5.3.4. UGM y concentración de sólido final.....	77
5.4. Sedimentación: análisis de turbidez.....	78
5.5. Reología: análisis de punto de fluencia sin cizalle.....	80
5.5.1. ACP y análisis univariados.....	80
5.5.1.1. Mineralogía: CMET.....	80

5.5.1.2. Mineralogía: OTRAS LITOLOGÍAS.....	82
5.5.1.3. Mineralogía: Granulometría.....	85
5.5.1.4. ACP compilatorio.....	87
5.5.2. Fenomenología de los resultados.....	88
5.5.3. Variaciones según litología y alteración hidrotermal.....	89
5.5.4. UGM y punto de fluencia sin cizalle.....	89
5.6. Reología: análisis de punto de fluencia con cizalle.....	91
5.2.1. ACP y análisis univariantes.....	91
5.2.1.1. Mineralogía: CMET.....	91
5.2.1.2. Mineralogía: OTRAS LITOLOGÍAS.....	93
5.2.1.3. Mineralogía: Granulometría.....	95
5.2.1.4. ACP compilatorio.....	97
5.2.2. Fenomenología de los resultados.....	98
5.2.3. Variaciones según litología y alteración hidrotermal.....	99
5.2.4. UGM y punto de fluencia con cizalle.....	100
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	101
7. REFERENCIAS.....	105
ANEXOS.....	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación y acceso a mina El Teniente	5
2. 1. Unidades litológicas de El Teniente a una cota de 2165 m s.n.m.	14
2. 2. Zonación de la mineralización de El Teniente	23
3. 1. Esquema simplificado de un espesador convencional.....	26
3. 2. Reograma para diferentes tipos de fluidos.....	31
3. 3. Sedimentación <i>batch</i>	34
3. 4. Árbol de decisión utilizado para la confección de las UGM de recuperación de cobre de El Teniente.....	35
3. 5. Vista en planta de muestras por UGM.....	36
3. 6. Ejemplo de gráfica de puntuaciones o <i>Score plot</i>	38
3. 7. Ejemplo de gráfica de influencias o <i>Loading plot</i>	39
3. 8. Ejemplo de gráfica de doble proyección.....	40
3. 9. Ejemplo de diagrama de caja.....	42
4. 1. Cantidad de muestras por litología en la base de datos de mineralogía.....	44
4. 2. Cantidad de muestras por litología en la base de datos de granulometría láser.....	44
4. 3. Gráfica de doble proyección del ACP exploratorio de mineralogía (BD1)...	47
4. 4. Gráfica de doble proyección del ACP exploratorio de granulometría láser (BD2).....	48
4. 5. Diagrama de flujo de obtención de resultados.....	49
5. 1. Correlogramas que indican las relaciones entre la mineralogía y granulometría con los parámetros de sedimentación y reología.....	52
5. 2. Gráfica de doble proyección del ACP de mineralogía-velocidad de sedimentación (CMET).....	54
5. 3. Gráficos de caja de deciles de porcentaje mineral y velocidades de sedimentación (CMET).....	56
5. 4. Gráfica de doble proyección del ACP mineralogía-velocidad de sedimentación (OTRAS LITOLOGÍAS).....	57
5. 5. Gráficos de caja de deciles de porcentaje mineral y velocidades de sedimentación (OTRAS LITOLOGÍAS).....	58
5. 6. Gráfica de doble proyección del ACP granulometría-velocidad de sedimentación.....	59
5. 7. Gráficos de caja de deciles de fracciones granulométricas y velocidad de sedimentación.....	60
5. 8. Gráfica de doble proyección del ACP que conjuga las bases de datos de mineralogía y granulometría láser (BD3) para analizar el parámetro de velocidad de sedimentación.....	61
5. 9. Velocidad de sedimentación en relación a litología y alteración hidrotermal.	63
5. 10. Gráfica de doble proyección del ACP de velocidad de sedimentación que conjuga las bases de datos de mineralogía y granulometría láser (BD3) categorizando las muestras según UGM de recuperación de cobre.....	64
5. 11. Contenido de calcopirita en relación a cada UGM.....	65

5. 12.	Gráfica de doble proyección del ACP de mineralogía-concentración de sólido final (CMET).....	67
5. 13.	Gráficos de caja de deciles de porcentaje mineral y concentración de sólido final (CMET).....	68
5. 14.	Gráfica de doble proyección del ACP mineralogía-concentración de sólido final (OTRAS LITOLOGÍAS).....	69
5. 15.	Gráficos de caja de deciles de porcentaje mineral y concentración de sólido final (OTRAS LITOLOGÍAS).....	70
5. 16.	Gráfica de doble proyección del ACP granulometría-porcentaje de sólido final.....	71
5. 17.	Gráficos de caja de deciles de fracciones granulométricas y concentración de sólido final.....	72
5. 18.	Gráfica de doble proyección del ACP que conjuga las bases de datos de mineralogía y granulometría láser (BD3) para analizar el parámetro de concentración de sólido final.....	73
5. 19.	Influencia de minerales laminares y feldespatos en la concentración de sólido final.....	75
5. 20.	Concentración de sólido final en relación a litología y alteración hidrotermal.....	76
5. 21.	Gráfica de doble proyección del ACP de concentración de sólido final que categoriza las muestras según UGM.....	77
5. 22.	Gráfica de doble proyección del ACP de mineralogía-punto de fluencia sin cizalle (CMET).....	81
5. 23.	Gráficos de caja de deciles de porcentaje mineral y punto de fluencia sin cizalle (CMET).....	82
5. 24.	Gráfica de doble proyección del ACP de mineralogía-punto de fluencia sin cizalle (OTRAS LITOLOGÍAS).....	83
5. 25.	Gráficos de caja de deciles de porcentaje mineral y punto de fluencia sin cizalle (OTRAS LITOLOGÍAS).....	84
5. 26.	Gráfica de doble proyección del ACP de granulometría-punto de fluencia sin cizalle.....	85
5. 27.	Gráficos de caja de deciles de fracciones granulométricas y punto de fluencia sin cizalle.....	86
5. 28.	Gráfica de doble proyección del ACP que conjuga las bases de datos de mineralogía y granulometría láser (BD3) para analizar el parámetro de punto de fluencia sin cizalle.....	87
5. 29.	Punto de fluencia sin cizalle en relación a litología y alteración hidrotermal.	89
5. 30.	Gráfica de doble proyección del ACP de punto de fluencia sin cizalle que categoriza las muestras según UGM.....	90
5. 31.	Gráfica de doble proyección del ACP de mineralogía-punto de fluencia con cizalle (CMET).....	92
5. 32.	Gráficos de caja de deciles de porcentaje mineral y punto de fluencia con cizalle (CMET).....	93
5. 33.	Gráfica de doble proyección del ACP de mineralogía-punto de fluencia con cizalle (OTRAS LITOLOGÍAS).....	94
5. 34.	Gráficos de caja de deciles de porcentaje mineral y punto de fluencia con cizalle (OTRAS LITOLOGÍAS).....	95

5.	35.	Gráfica de doble proyección del ACP de granulometría-punto de fluencia con cizalle.....	96
5.	36.	Gráficos de caja de deciles de fracciones granulométricas y punto de fluencia con cizalle.....	97
5.	37.	Gráfica de doble proyección del ACP que conjuga las bases de datos de mineralogía y granulometría láser (BD3) para analizar el parámetro de punto de fluencia con cizalle.....	98
5.	38.	Punto de fluencia con cizalle en relación a litología y alteración hidrotermal	99
5.	39.	Gráfica de doble proyección del ACP de punto de fluencia con cizalle que categoriza las muestras según UGM.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Figura	Página
3. 1. Velocidades de sedimentación en función de tamaños de partícula.....	29
4. 1. Combinaciones de las bases de datos	45
5. 1. Definición de bases de construcción de ACP de velocidad de sedimentación	53
5. 2. Características que explican las correlaciones minerales con velocidad de sedimentación	62
5. 3. Definición de bases de construcción de ACP de concentración de sólido final.....	66
5. 4. Características que explican las correlaciones minerales con concentración de sólido final.....	75
5. 5. Compilado de tiempos de medición de turbidez posterior a la agitación de la muestra.....	79
5. 6. Definición de bases de construcción de ACP de punto de fluencia sin cizalle.....	80
5. 7. Definición de bases de construcción de ACP de punto de fluencia con cizalle.....	91

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Página
A1 Distribución de los principales cuerpos plutónicos neógenos, asociados al depósito El Teniente	113
A2 Esquema de clasificación de vetillas para El Teniente.....	114
A3 Proceso productivo de planta de la mina El Teniente	115
A4 Dispositivo utilizado en el método de Vane	116
B1 Correlograma mineralogía-granulometría de las muestras del CMET.....	117
B2 Correlogramas mineralogía-granulometría del grupo de muestras de OTRAS LITOLOGÍAS.....	118
B3 Gráfica de doble proyección del ACP mineralogía-velocidad de sedimentación (OTRAS LITOLOGÍAS) con muestras clasificadas según litología.....	119
B4 Gráfica de doble proyección del ACP mineralogía-velocidad de sedimentación de la base de datos de granulometría (BD2) con muestras clasificadas por litología.....	120
B5 Gráfica de doble proyección del ACP de la base de datos de granulometría láser (BD2) con muestras clasificadas por litología.....	121
B6 Gráfica de doble proyección del ACP mineralogía-punto de fluencia sin cizalle (OTRAS LITOLOGÍAS) con las muestras clasificadas por litología.....	122

RESUMEN

Durante los últimos años, el espesamiento de pulpas de relave se ha transformado en una etapa crucial dentro de todo el proceso productivo de una faena minera. La escasez de agua que afecta al país ha hecho necesario que la recuperación de este elemento sea una gran prioridad, dado que beneficia tanto la productividad de la planta como el cuidado del medio ambiente.

Una de las aristas del espesamiento se relaciona con el tipo de material de alimentación asociado estrechamente a las características geológicas que presentan las rocas *in situ* antes de ser extraídas. Estos aspectos que en general son mineralógicos y texturales, pueden actuar como controles del espesado, e identificar cuáles son puede ser una de las claves para aumentar al máximo la eficiencia de este proceso si se mejora su planificación. En este sentido, este trabajo tiene como objetivo identificar los controles geológicos más influyentes, y en base a ello, orientar la alimentación de los espesadores.

Se analizaron bases de datos de parámetros de sedimentación y reología a través de Análisis de Componentes Principales (ACP) y Correlogramas, en busca de la influencia mineralógica, granulométrica, de alteración hidrotermal y litológica que pudiesen controlar este proceso. Se subdividen las muestras en poblaciones litológicas para establecer correlaciones más certeras y se analiza cada una de las variables influyentes mediante métodos univariantes en relación a cada parámetro. Una vez identificados los controles y el grado de influencia que poseen, se determinan tendencias espaciales dentro del yacimiento en relación a los parámetros analizados. Adicionalmente, se sugiere una mejora en la metodología de la toma de datos en el parámetro de turbidez, el cual no fue posible analizar en esta investigación.

En los parámetros de sedimentación (velocidad de sedimentación y concentración de sólido) se determinó una influencia negativa de los minerales con texturas finas y/o morfologías laminares, mientras que la presencia de feldespatos se estableció como favorable para el proceso. Estas características estaban controladas a su vez por el tipo y textura de la roca original y la alteración que la afectaba. Se determinó que en general las zonas centrales del yacimiento (afectadas por una alteración potásica), tienden a obtener mejores rendimientos que los sectores periféricos afectados por alteraciones de menor temperatura.

Los parámetros de reología no se pudieron relacionar directa y contundentemente con las variables geológicas. El punto de fluencia sin cizalle solo pudo ser correlacionado de forma inversa a la concentración de sólido en las pulpas, mientras que para el punto de fluencia con cizalle no se establecieron correlaciones importantes con los factores geológico. Esto imposibilitó la determinación de una tendencia espacial importante en los parámetros de reología.

Los resultados obtenidos indican que la mezcla de material es potencialmente conveniente si se combina alimentación de zonas centrales y periféricas, sin embargo, es necesario aportar más información para generar unidades geometalúrgicas de sedimentación y reología que permitan establecer zonaciones que se ajusten con mayor precisión a las variaciones de estos parámetros metalúrgicos.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación

La escasez de agua debida a la megasequía que está experimentando nuestro país desde hace algunos años, es un serio problema para alcanzar mayores eficiencias en los procesos metalúrgicos. La reutilización de este fluido acelera los procesos de planta, abarata los costos de producción y disminuye el impacto ambiental que implica su utilización.

En el proceso de flotación se mezcla agua con el mineral molido para separar las partículas de cobre sulfurado de la ganga. Los productos de esta etapa son un concentrado de cobre y un relave, ambos con una alta proporción de agua.

Posteriormente, en los espesadores (ya sean de concentrado o de relaves) se lleva a cabo la separación sólido-líquido para recuperar parte del agua y generar una pulpa caracterizada por una alta concentración de sólidos. Dadas las diferencias de volumen entre concentrado y relave (1/25), la mayor cantidad de agua recuperada proviene de este último, radicando allí su importancia.

En la etapa de espesamiento de relaves es necesario recuperar rápidamente la mayor cantidad posible de agua, pero también cuidar que las pulpas resultantes contengan un porcentaje suficiente de agua que les permita fluir y ser transportadas a los tranques de relave.

Los fenómenos físicos que ocurren en el espesamiento son caracterizados por los parámetros metalúrgicos de sedimentación y reología. De manera general, la sedimentación controla la velocidad con la que se separa el agua del mineral, mientras que las características reológicas de las pulpas definen su comportamiento frente a la deformación o flujo en el espesador y posteriormente fuera de este. La reología de las pulpas toma gran relevancia al momento de evitar embancamientos, sucesos que paralizan el proceso e influyen fuertemente en la eficiencia de toda la planta.

En la División El Teniente de Codelco (DET) se busca identificar los controles geológicos que influyen en el comportamiento del material durante el espesado y determinar cómo a partir de ello se puede aumentar la eficiencia de este proceso. Mediante un análisis estadístico multivariado empleando componentes principales y correlogramas, se analizan las influencias litológicas y de alteración hidrotermal, las que a una escala más específica se expresan mediante las características

mineralógicas y granulométricas del material alimentador de todo el proceso metalúrgico. A través de estas herramientas estadísticas es posible analizar una gran cantidad de datos y obtener resultados simples y de rápida interpretación considerando una gran cantidad de variables

Conociendo qué factores son los más influyentes, es posible proyectar el comportamiento de diferentes zonas del yacimiento y mejorar la planificación del proceso, de tal manera que la recuperación de agua sea más eficiente y se eviten problemas mayores en los espesadores.

1.2. Trabajos previos

El análisis de las bases de datos obtenidas en los propios yacimientos mineros ha sido históricamente la fuente para entender el comportamiento de los diferentes procesos metalúrgicos que en ellas se realizan y así generar mejoramientos en dichas tareas. Cuando existen grandes bases de datos con demasiadas variables que inciden en un determinado parámetro de control, es difícil encontrar relaciones con técnicas estadísticas básicas univariadas, ya que los factores influyentes pueden ser numerosos.

En estos casos, los métodos de análisis multivariados son una gran alternativa y se han usado desde varios años en la minería. Spurrell (1963) ya menciona algunas aplicaciones del análisis de componentes principales enfocados en metalurgia y con el correr de los años los usos de estas herramientas se han extendido bastante.

Por otro lado, el estudio de los procesos de sedimentación y reología tienen gran importancia en el funcionamiento de cualquier planta minera, por lo que estos parámetros son manejados de diferentes formas según los requerimientos de cada yacimiento. En DET no se han llevado a cabo trabajos anteriores que relacionen la sedimentación y la reología de las pulpas en los espesadores con los controles geológicos que pudiesen incidir en dicho proceso, por lo que este trabajo crea un punto de partida para posteriores avances. De todas formas, a continuación, se presenta una breve compilación de estudios que analizan el comportamiento sedimentológico y reológico en determinados yacimientos y, además, trabajos que utilizan análisis multivariados con el fin de identificar controles geológicos que inciden sobre alguno de los parámetros metalúrgicos en cuestión.

Merril (2016) analiza las diferentes variables de la composición mineralógica que influyen en la reología de pulpas. A través de pruebas de laboratorio y una caracterización hiper-espectral busca

controlar y predecir el comportamiento de la reología de pulpas. Identifica las primeras variables con incidencia en el esfuerzo de fluencia y viscosidad de una suspensión.

Urrutia (2016) investiga la influencia de la concentración de sólidos en volumen, la granulometría y la cantidad de arcillas y su tipo, sobre el comportamiento reológico en relaves y determina que estos factores son los controles dominantes en este aspecto. Utiliza técnicas de caracterización avanzada en minerales (QXRD, análisis hiperspectral en HyLogger3 y granulometría por difracción láser).

Ravanal (2017) investiga sobre el rol de la caolinita en los desempeños observados en la velocidad de sedimentación y reología en pulpas tratadas con floculantes aniónicos y catiónicos. Concluye que este mineral no afecta considerablemente los parámetros analizados y que, otros factores como el pH pueden ser determinantes.

Copaja (2018) analiza el rol químico y mineralógico en algunos parámetros de los procesos de molienda y flotación a través de análisis de componentes principales y análisis de correlación múltiple, con el fin de generar una sectorización del yacimiento Escondida, relativa a los rendimientos observados. En las observaciones relacionadas a la velocidad de sedimentación, indica que las zonas con mayor cantidad de minerales arcillosos presentan dificultades en este proceso.

Mogollón (2018) realiza una predicción de los resultados de flotación a través de análisis multivariados con análisis de componentes principales y *Machine Learning* utilizando variables químicas, mineralógicas y metalúrgicas.

Urizar (2019) realiza una identificación de los controles mineralógicos que inciden en los comportamientos observados en molienda y recuperación de cobre a través de análisis de componentes principales para ser integrados en la creación de unidades geometalúrgicas en el yacimiento de DET.

Martínez (2020) desarrolla una investigación realizada en División Andina de Codelco que se enfoca en la influencia de las variables mineralógicas y sus respectivas características texturales sobre la ley de recuperación de cobre, analizando los desempeños de las diferentes unidades geometalúrgicas en este aspecto. Utiliza análisis de componentes principales y matrices de correlaciones como medio de búsqueda de resultados.

En los trabajos mencionados el uso de herramientas estadísticas multivariadas es eficaz para abordar parámetros metalúrgicos de interés, ya que es posible determinar dominios espaciales en los yacimientos que representen diferentes comportamientos o rendimientos en relación a algún proceso de planta.

La aplicación de estos métodos estadísticos en el análisis de la sedimentación y la reología de pulpas en espesadores es apropiada, ya que dichos parámetros obedecen a controles geológicos numerosos que se pueden expresar en diferentes alteraciones hidrotermales, litologías y de manera más específica mediante mineralogía y granulometría.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar los controles litológicos, de alteración hidrotermal, mineralógicos y granulométricos que influyen en mayor medida en los parámetros de sedimentación y reología durante la etapa de espesamiento de pulpas de relave y proyectar los comportamientos obtenidos en una mejora de la planificación del proceso.

1.3.2. Objetivos específicos

- 1- Interpretar análisis de componentes principales elaborados a partir de variables mineralógicas y granulométricas.
- 2- Encontrar un sentido fenomenológico que explique los resultados y las correlaciones obtenidas a partir de las características físicas y químicas de cada mineral.
- 3- Relacionar el comportamiento sedimentológico y reológico de cada litología en el proceso de espesamiento con sus características petrológicas y petrográficas.
- 4- Encontrar tendencias espaciales de los parámetros de sedimentación y reología dentro del yacimiento.

1.4. Ubicación y accesos

El yacimiento El Teniente se localiza en vertiente occidental de la Cordillera de los Andes, entre los 2.200 y 3.200 m s.n.m., en la comuna de Machalí, Región del Libertador General Bernardo

O'Higgins. Se ubica a unos 120 km al sureste de Santiago y unos 50 km al noreste de Rancagua (Figura 1.1). Su ubicación exacta está dada por en la intersección de las coordenadas geográficas $34^{\circ}1'$ latitud sur y $70^{\circ}15'$ longitud oeste.

Para acceder al yacimiento es necesario tomar la ruta 5-Sur desde Santiago a Rancagua (86 km) y la ruta del cobre Eduardo Frei Montalva (H-25), desde Rancagua hacia Sewell (62 km). Esta es una ruta asfaltada y de doble sentido.

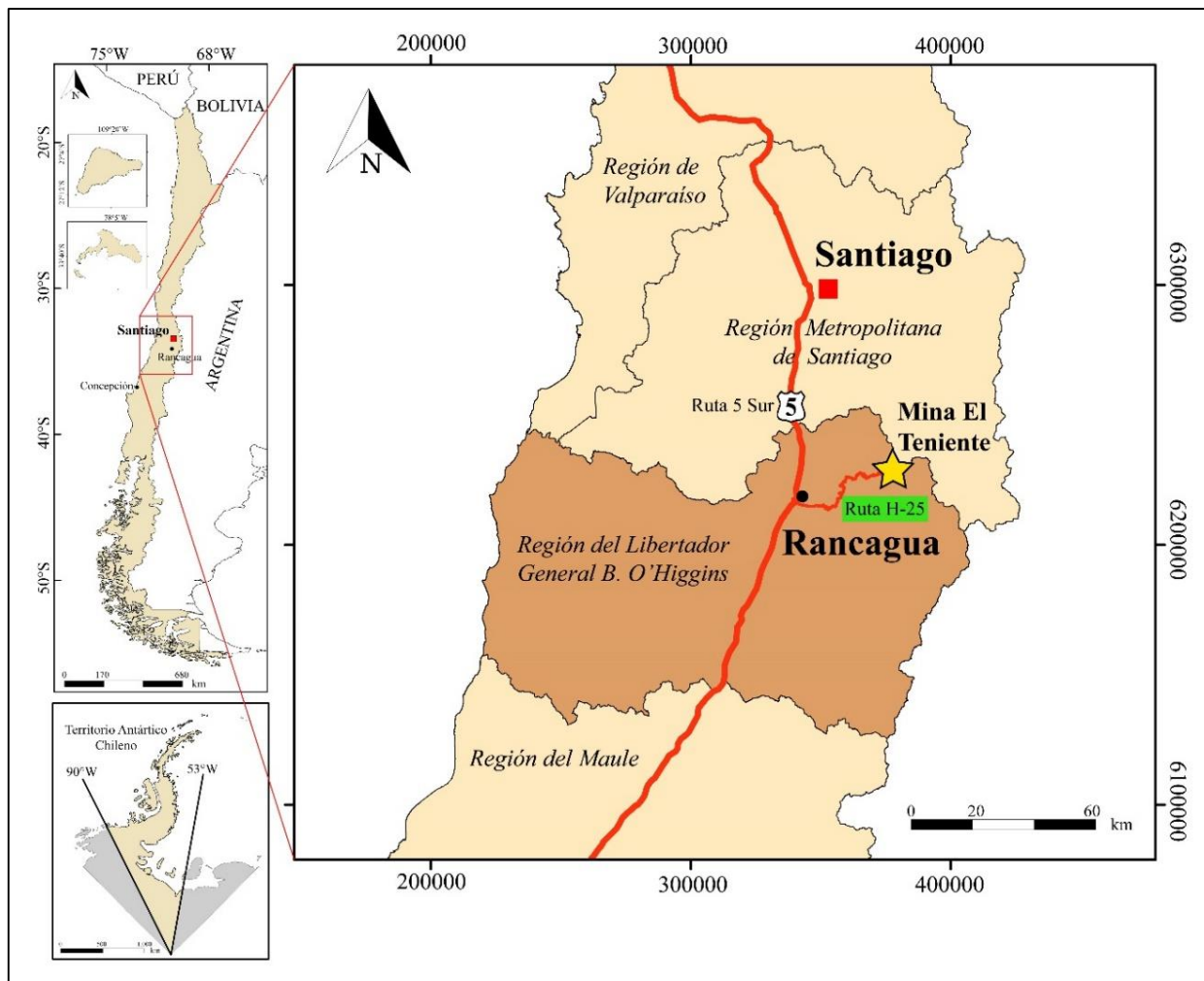


Figura 1.1: Mapa de ubicación y acceso a mina El Teniente.

1.5. Metodología de trabajo

Este trabajo se realiza mediante un análisis estadístico llevado a cabo a través de una base de datos entregada por DET que contiene información mineralógica, granulométrica y geológica de terreno junto con mediciones de los parámetros de sedimentación y reología, obtenidos a partir de ensayos de laboratorio que la propia minera ha desarrollado a lo largo de sus años de funcionamiento.

A continuación, se detallan las etapas de gabinete realizadas en este trabajo.

1.5.1. Etapa de gabinete 1

Recepción y depuración de las bases de datos entregadas por DET. Se procede con el filtrado de la información, de tal manera de compilar datos de las muestras que cumplan con las consideraciones requeridas para este trabajo. Se eliminan las muestras de sectores de poco interés, las analizadas mediante ensayos con metodologías obsoletas y poco confiables o las tratadas bajo condiciones de control diferentes, con el fin de eliminar la mayor cantidad de errores de muestreo. Se imputan de manera confiable ciertos datos faltantes para abarcar la mayor cantidad de muestras con información.

1.5.2. Etapa de gabinete 2

Análisis de las bases de datos y obtención de resultados a través de análisis estadísticos multivariados.

Con la utilización de análisis de componentes principales, correlogramas y algunos gráficos univariados se procede a encontrar los controles geológicos que influyen en los parámetros metalúrgicos que se analizan en este trabajo. Previamente, se estudia los fundamentos necesarios para aplicar las herramientas estadísticas mencionadas y la manera de confeccionar e interpretar estos análisis.

1.5.3. Etapa de gabinete 3

Interpretación de los resultados a través razonamientos con bases geológicas y metalúrgicas, con tal de obtener relaciones con sentido fenomenológico, junto con la ayuda de una revisión bibliográfica acorde con los temas abordados.

1.6. Alcances y limitaciones

Este trabajo analiza de manera amplia las todas las variables geológicas que podrían influir en los parámetros de sedimentación y reología en los espesadores, mostrando las relaciones existentes a través de diferentes escalas (mineralogía, granulometría, alteración y litología) de forma sencilla y de fácil interpretación, considerando la gran cantidad de factores implicados en estos procesos. A partir de aquello, es posible caracterizar el comportamiento de diferentes zonas del yacimiento y mejorar así la eficiencia del proceso. Este estudio se puede considerar como la base para próximos avances en lo que respecta al espesamiento y confección de modelos geometalúrgicos de sedimentación y reología en DET.

Limitaciones observadas en este trabajo apuntan hacia la ausencia de análisis empíricos que sean capaces de mostrar si efectivamente los trasfondos fenomenológicos entregados en ciertas ocasiones poseen verdadera incidencia en las relaciones matemáticas obtenidas. A pesar de que las inferencias mencionadas a lo largo de esta memoria son fundadas y respaldadas mediante bibliografía adecuada, es posible que no siempre una determinada observación se deba a la causa asignada. Por ejemplo, la ausencia de una base de datos que contenga cada mineral con su respectiva granulometría y/o grados de liberación mineral, podría ayudar a minimizar errores al momento de entregar sentido a algunos resultados estadísticos en especial cuando se analiza la relación mineral-granulometría.

1.7. Agradecimientos

Agradezco enormemente a DET por entregarme la posibilidad de desarrollar esta memoria de título. Particularmente, le doy las gracias Susana Fonseca quien fue mi orientadora y tutora durante todo este proceso, entregándome todo el conocimiento necesario, muchos consejos y gran empatía. También agradezco a cada uno de los miembros del grupo de geometalurgia de la mina, quienes amablemente hicieron aportes para la realización y el mejoramiento de este trabajo.

Le doy las gracias a todo el personal del Departamento Ciencias de la Tierra, quienes aportaron a mi formación durante estos años de carrera. De manera particular, le agradezco a mi profesor patrocinante Oscar Jerez, por todo el apoyo y la gran disposición que presentó durante el desarrollo de mi trabajo. Gracias por la buena onda, la empatía y la alegría de siempre. Mis más sinceros

agradecimientos Carolina Rojas por toda la gentileza y amabilidad durante mi paso por la universidad, por la orientación y ayuda entregada en este burocrático camino.

Agradezco enormemente a mis padres Olga y Segundo y a mi hermano Carlos, por hacer posible la realización de mis metas, por la educación y apoyo incondicional que me han brindado durante toda mi vida.

Le doy las gracias a Utreras, Felipe, Daniel, Simón, León, Cami Torres y a todos mis amigos del curso; a Pablo Faúndez, Javier Ubal y Sebastián Chamorro por la compañía durante toda mi estadía en Concepción y a cada persona que haya alegrado mis días en la universidad. A Francisco Cuadra por la compañía, apoyo y trabajo en equipo realizado a lo largo de nuestras memorias de título. De manera especial, agradezco a Bianca, por su apoyo, paciencia, empatía y amor entregado durante estos años, por estar siempre ahí.

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1. Marco geotectónico

El margen continental de Sudamérica se encuentra controlado por la subducción. En Chile, la placa de Nazca y la placa Antártica subductan bajo la placa continental Sudamericana, dando lugar a la Cordillera de los Andes. La actual velocidad de convergencia en el margen chileno es de 7-8 cm/año con una dirección N78°E entre los 5° y 46°S. El arco volcánico actual se ha dividido en cuatro segmentos con volcanismo activo, separados por zonas sin volcanismo, donde la subducción es de bajo ángulo.

Una de esas zonas inactivas se ubica entre los 28° y 33°S, segmento influenciado por la subducción de la dorsal de Juan Fernández. Su presencia engrosa la corteza oceánica, produciendo una zona de subducción plana y un gap en el arco volcánico cuaternario. Ya a los 34°S el ángulo de subducción aumenta y comienza la Zona Volcánica Sur (ZVS).

En el extremo norte de la (ZVS) se encuentra el yacimiento El Teniente (34°04'S), que junto con los yacimientos Río Blanco-Los Brocos (33°08'S) y Los Pelambres (31°43'S), evidencian la presencia de la franja metalogénica del Mio-Plioceno en Chile central. Esta franja de gran importancia presenta mineralización de tipo pórfido cuprífero y se extiende entre los 31°y 36°S en la vertiente occidental de los Andes.

2.2.1. Evolución geológica de Chile central

La evolución del margen continental de Chile central puede ser dividido en tres etapas bien definidas. La primera de ellas (Proterozoico superior-Pérmico inferior), es tradicionalmente explicada con un modelo colisional, en el cual, una sucesión de terrenos alóctonos y parautoctonos, se acrecionaron al borde occidental de Gondwana (Ramos, 1988). Una segunda etapa (Pérmico superior-Jurásico inferior) está ligada al desmembramiento de este supercontinente a través de cuencas extensivas. En este periodo, denominado Ciclo Pre-Andino la subducción se detuvo o por lo menos disminuyó considerablemente (Charrier, 2007). Finalmente, la última etapa (Ciclo Andino), está relacionada con el inicio de la subducción moderna y formación de los Andes actuales (Jurásico Inferior-Reciente). En este contexto el magmatismo del Mio-plioceno, producido

en un escenario de corteza engrosada genera los depósitos tipo pórfido cuprífero de clase mundial de Los Pelambres, de Río Blanco-Los Bronces y El Teniente (Maksaev y otros, 2004).

2.2. Geología regional

2.2.1. Estratigrafía

Formación Coya Machalí (Eoceno Superior-Mioceno inferior)

Fue definida por Klöhn (1960), equivalente a la Formación Abanico (Aguirre, 1960). Es una sucesión de depósitos volcano-sedimentarios exclusivamente terrígenos; fallados, intensamente plegados y afectados por metamorfismo pervasivo de muy bajo grado (Aguirre, 1960; Thiele, 1980; Levi y Aguirre, 1989). La conforman rocas efusivas y piroclásticas de composición andesíticas con intercalaciones de materiales lacustres, basaltos y traquitas, además de intrusiones subvolcánicas de la misma edad (Piquer y otros, 2010).

Aflora en los alrededores del yacimiento y presenta un contacto por falla y por discordancia con las sucesiones mesozoicas y subyace mediante discordancia, pseudoconcordancia, concordancia o falla a la Formación Farellones (Jara y Charrier, 2014). La edad ha sido acotada entre Eoceno superior-Mioceno inferior a través de dataciones radiométricas y fauna fósil (Fock, 2005).

Formación Farellones (Mioceno)

Fue definida por Klöhn (1960) y corresponde a la roca caja de los intrusivos que propiciaron la formación del yacimiento El Teniente. Corresponde a una sucesión de rocas volcánicas de unos ~2500 m de espesor, ligeramente plegada. A base presenta intercalaciones de rocas piroclásticas y depósitos de sedimentos continentales producto de la meteorización de rocas efusivas y sedimentos lagunares. En su porción superior existen lavas básicas a intermedias y domos riolíticos (Thiele y otros, 1980), depositados en un ambiente continental con actividad volcánica mayoritariamente andesíticas (Charrier y Munizaga, 1979). Las rocas de esta formación presentes a nivel mina, reciben el nombre de Complejo Volcánico Teniente (Stern y otros, 2010).

Sobreyace la Formación Coya-Machalí con un contacto concordante a discordante y su techo corresponde a la superficie actual de erosión. Su edad, obtenida a partir de dataciones radiométricas K/Ar, fluctúa entre 4,13 y 13,4 Ma (Charrier, 1973).

Formación Colón Coya (Plioceno-Pleistoceno)

Definida como formación por primera vez por Gómez (2001). Incluye series volcánicas, depósitos laháricos, piroclastos, flujos de ceniza, intercalaciones de lava, escombros de avalanchas y facies fluvio-lacustres, que formaron parte de grandes centros efusivos andesíticos, de carácter calcoalcalino y actividad sin y post-glacial. Dataciones radiométricas K/Ar obtenidas por Charrier y Munizaga (1979), coinciden con los resultados de Cuadra (1986), situando a esta formación en el Plioceno-Pleistoceno (2,3-1,3 Ma). Se localiza al suroeste del yacimiento, en discordancia sobre la formación Farellones, rellenando la paleotopografía del valle y abarcando un área de 160 km².

2.2.2. Rocas intrusivas

Los cuerpos intrusivos presentes en la Cordillera Principal están agrupados en cinco complejos ígneos plutónicos del Paleógeno-Neógeno con edades entre 34,5 y 5,59 Ma (Falcón y Rivera, 1998). Estos se encuentran alojados en las sucesiones cenozoicas de la zona y varían en composición, textura y extensión, siendo principalmente intrusivos de carácter plutónico e hipabisal, en su mayoría granodioritas de hornblenda y biotita, pórfidos dioríticos y andesíticos, monzonitas, monzodioritas y pórfidos dacíticos (Skewes y otros, 2002). Algunos de ellos propiciaron la formación de yacimientos de tipo pórfido de Cu-Mo supergigantes, como Los Pelambres, Río Blanco-Los Bronces y El Teniente, de edades miocenas a pliocenas (Klemm y otros, 2007). Las dataciones realizadas por Kurtz y otros (1997) logran identificar tres franjas de intrusivos en las cercanías de El Teniente, que respaldan esa idea (Anexo A1). Las franjas corresponderían a los arcos magmáticos del Oligoceno-Mioceno inferior, Mioceno medio a superior y Mioceno superior de oeste a este respectivamente.

2.2.3. Geología estructural

El yacimiento se ubica al suroeste de la intersección de dos estructuras mayores que son casi ortogonales entre sí (Falcón y Rivera, 1998). Estas son la falla Codegua (NW-SE) y la falla Agua Amarga (NE-SW). Sumada a ellas se reconoce la Zona de Falla El Teniente, correspondiente a un corredor estructural de fallas anastomosadas, que en superficie posee una dirección N65°E, extendiéndose por alrededor de 14 km de largo y 3 km de ancho. Esta se encuentra entre la falla Agua Amarga y los ríos Teniente y Coya (Garrido y otros, 1994).

La Zona de Falla El Teniente estuvo activa entre los 11 y 4 Ma, propiciando el emplazamiento del intrusivo Sewell (Cannell, 2004). Se describe como una estructura transcurrente dextral, cuyo desplazamiento es de alrededor de 1 km (Garrido y otros, 1994), con un componente normal que alza el bloque sureste (Koeppen y Godoy, 1994).

2.3. Geología del depósito

El Teniente es un yacimiento formado por una serie de stocks y diques, de composición intermedia a ácida, y complejos de brechas magmático-hidrotermales albergados en un complejo intrusivo máfico (Cuadra, 1986; Camus, 2002; Skewes y otros, 2002, 2005) formado por procesos magmáticos-hidrotermales de finales del Mioceno (Cannell y otros, 2005). Se ha estimado que contiene un recurso metálico aproximado de 95 Mt de Cu y 2,5 Mt de Mo (Camus, 2002; Spencer y otros, 2015), del cual un 80% se encuentra hospedado en los intrusivos y un 20% en rocas cajas alteradas.

Los análisis radiométricos llevados a cabo en el yacimiento indican que la actividad magmática se desarrolló de forma continua al menos entre los 8,9 y 3,8 Ma (Cuadra, 1986; Makshev y otros, 2004; Skewes y otros, 2005), aunque en superficie existen unidades volcánicas de hasta 1,8 Ma (Charrier y Munizaga, 1979).

El yacimiento se ha interpretado tradicionalmente como un depósito de pórfido cuprífero producto de varias intrusiones relacionadas genéticamente entre sí, que habrían propiciado la mineralización de los plutones y la alteración concéntrica de la roca hospedante alrededor de estos (Makshev y otros, 2004). Por otro lado, se propone que El Teniente sería un depósito de megabrechas hidrotermales donde la mineralización de ellas sería independiente a la de los plutones (Skewes y otros, 2002). A pesar de las dos posturas, se acepta rotundamente que este yacimiento fue originado por fluidos hidrotermales provenientes de una gran cámara magmática en profundidad.

2.3.1. Unidades litológicas

De manera general, las unidades que se encuentran intruyendo las rocas de la Formación Farellones (Complejo Volcánico El Teniente) se pueden dividir en tres etapas o ciclos intrusivos que se relacionan con la alteración y mineralización del distrito (Pardo y Kovacic, 2012). En primer lugar, dioritas-monzodioritas y monzonita con facies de pórfidos tonalíticos y andesíticos de edades entre 14-7 Ma. Posteriormente, tonalita y facies de pórfidos tonalíticos en el lapso de los 6,5-4,5 Ma y

finalmente diques de lamprófidos post mineralización de 3,9-2,9 Ma. A continuación, se describen las litologías principales del yacimiento.

2.3.1.1. Complejo Máfico El Teniente (CMET)

Definido con ese nombre por Skewes y otros (2002) y anteriormente denominado como “Andesitas de la Mina”, debido a su apariencia extrusiva (Camus, 1975; Cuadra, 1986). Agrupa una serie de rocas de coloración oscura del Mioceno superior (Charrier y otros, 2002), que son la roca caja del depósito y que alojan el 80% de mineralización de cobre (Camus, 1975).

Son un grupo de intrusivos máficos subvolcánicos (Skewes y Arévalo 2000) que incluyen gabros, diabasas y pórfidos basálticos y andesíticos-basálticos (Burgos, 2002), que en conjunto y a gran escala, forman un lacolito que intruye las rocas volcánicas de la Formación Farellones en el Mioceno superior (Figura 2.1). Sus dimensiones son aproximadamente de 2 km de alto, 2,4 km de largo y 1,2 km de ancho.

Dadas las sucesivas intrusiones que lo afectaron, con procesos de alteración, mineralización y brechización, se obliteró la mayor parte de sus texturas y mineralogías originales, por lo que se dificulta reconocer zonaciones. Solo es posible identificar relictos de cristales de plagioclasas cálcicas con porcentajes de anortita entre 41% y 92%, algunos cristales de clinopiroxenos con coronas de reacción de biotita y/o actinolita que junto con una alteración potásica biotítica, le otorgan una coloración gris-pardo a negro. Burgos (2002) indica que este complejo corresponde de forma general a una diabasa porfídica con variaciones en el tamaño de grano de los fenocristales de plagioclasa. En los bordes de este intrusivo existen texturas afaníticas que varían a porfídicas y faneríticas finas hacia sectores centrales.

El mineral dominante es la biotita y de forma subordinada se encuentra anhidrita, cuarzo, clorita, sericita, actinolita y turmalina. Además de un alto grado de alteración, el CMET presenta un intenso vetilleo (*stockwork*) que oblitera aún más la roca original. Según dataciones K/Ar en roca total (Stern y otros, 2010), la intrusión de este lacolito ocurrió a los $8,9 \pm 1,4$ Ma.

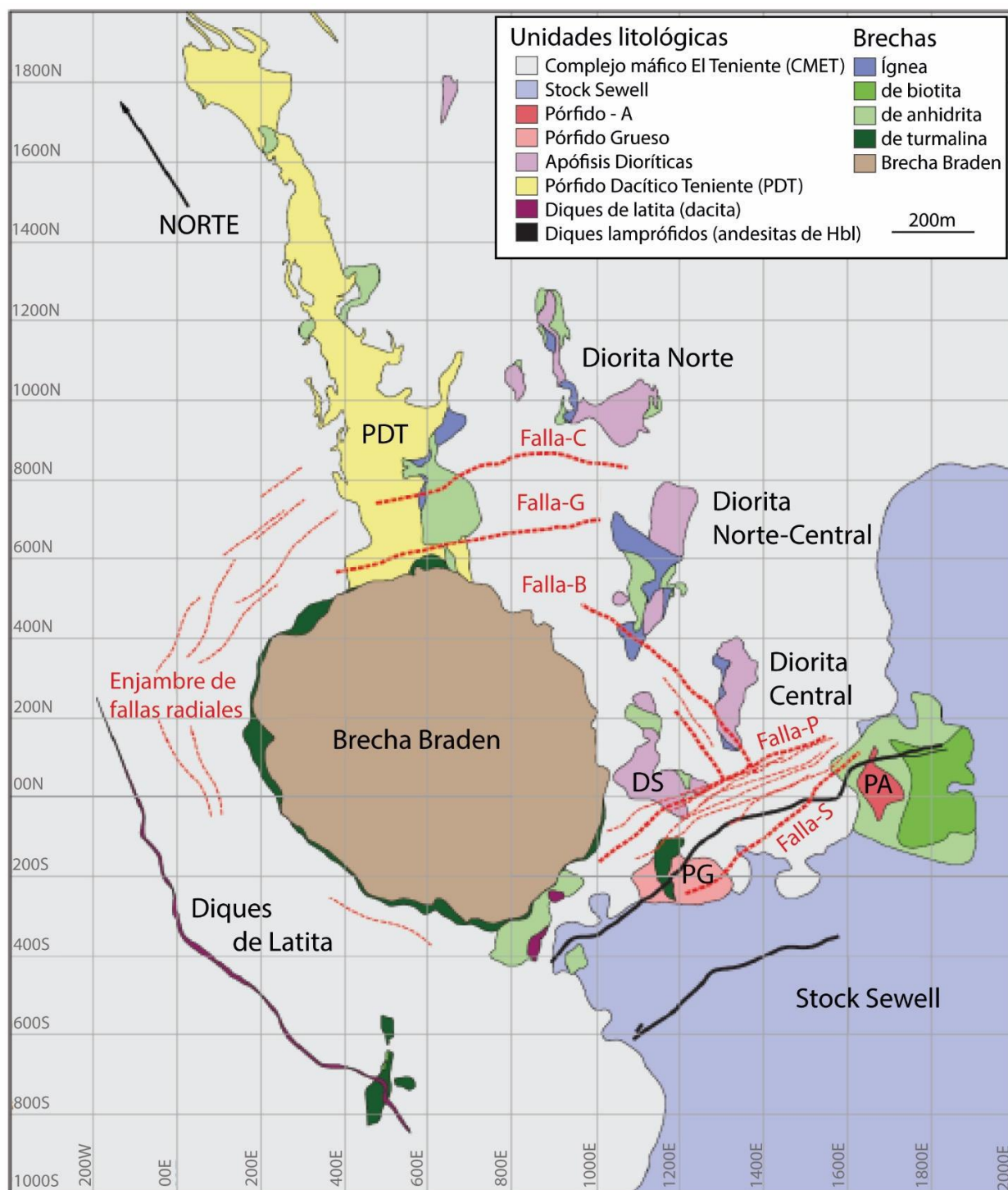


Figura 2.1 Unidades litológicas de El Teniente a una cota de 2165 m s.n.m. Modificado de Spencer (2015).

2.3.1.2. Complejo Félsico El Teniente

Corresponde a un grupo de cuerpos intrusivos subverticales con porcentajes de sílice mayores al 56% (Rabbia y otros, 2000) y de afinidad calcoalcalina con edades miocenas a pliocenas. Presentan formas de apófisis tabulares, stocks y diques.

Tonalita (TO)

También denominado **Stock o Diorita Sewell**, es un intrusivo que aflora en la zona sureste del yacimiento con formas de stocks, masas irregulares, pequeños cuerpos cilíndricos y tabulares emplazados en el CMET, posee una composición intermedia a félsica y es el intrusivo félsico de mayor tamaño y más antiguo en El Teniente (Maksaev y otros, 2004).

Está compuesto por dioritas cuarcíferas a tonalitas, presentando texturas faneríticas en el núcleo, con porciones equigranulares y agregados hipidiomórficos de plagioclasa, biotita y hornblenda parcialmente cloritizada, con cuarzo y feldespato potásico intersticial. En zonas más distales tiene contactos brechosos o transicionales con el CMET y presenta una costra externa de textura porfídica con alteración potásica pervasiva, constituida por fenocristales de plagioclasa, biotita y relictos de anfíbola, en una masa fundamental de cuarzo, microlitos de plagioclasas y feldespato potásico subordinado (Skewes y otros, 2002).

La matriz de las brechas existentes en los contactos con el CMET tiene apariencia pegmatítica, con agregados de anhidrita, biotita, calcopirita y molibdenita (Maksaev y otros, 2004). El límite entre estas dos variedades es transicional y ambas presentan una fuerte alteración cuarzo-sericita-clorita, que se desarrolla a partir de halos de vetillas y oblitera la textura y composición original de la roca (Cuadra 1986). Estas variaciones mineralógicas y texturales en el intrusivo se explican como el resultado de diferentes velocidades de enfriamiento, donde las tonalitas porfídicas corresponderían a los márgenes de enfriamiento (Cuadra, 1986).

Se cree que este intrusivo se emplazó previo a la mineralización del yacimiento (Maksaev y otros, 2004; Vry y otros, 2010), entre los 12,4 y 7,0 Ma (Rivera y Falcón, 1998; Skewes y otros, 2002). Cuadra (1986) mediante dataciones K/Ar en roca total determina una edad de cristalización de $7,1 \pm 1,1$ Ma y $7,4 \pm 1,5$ Ma para las tonalitas porfídicas. Por su parte, Maksaev y otros, (2004) con dataciones U/Pb en circones, indica que su cristalización ocurrió a los $5,28 \pm 0,10$ Ma.

Pórfido Microdiorítico (PMD)

Se le denomina también **Pórfido A** y se ubica en la zona este del depósito en el contacto entre el CMET y la Tonalita. Corresponde a una brecha ígnea (Skewes y otros, 2002), con clastos de las unidades mencionadas anteriormente en una matriz alterada de biotita, feldespato potásico, plagioclasa, anhidrita y cuarzo (Cannell, 2004). A pesar del nombre que recibe esta unidad, no posee rocas con texturas porfídicas y tendría un vínculo genético con las brechas de anhidrita que lo rodean. Dataciones U-Pb indican dos familias de edades de $6,46 \pm 0,11$ Ma y $5,67 \pm 0,19$ Ma, la primera para la edad de los clastos y la más joven para la matriz de la brecha. Estos datos sugieren que esta unidad se podría haber formado a través de múltiples pulsos de intrusión y brechización hace unos 5,7 Ma (Cannell y otros 2005; Stern y otros, 2010).

Pórfido Diorítico (PDI)

También llamado **Chimeneas o Apófisis Dioríticas**. Son una serie de cuerpos porfídicos tubulares con diámetros de alrededor de 200 m observables en todos los niveles de la mina, siendo cuerpos delgados, con forma de dedo y de una extensión vertical significativa (Spencer, 2015). Afloran al este de la Brecha Braden e intruyen al CMET.

Se reconocen 4 cuerpos porfídicos mayores, de tamaños similares identificados según su posición (Diorita Norte, Norte Central, Central y Sur). Poseen entre 30 a 50% de fenocristales de plagioclasa, 5 a 15% de fenocristales de anfíboles y biotita, inmersos en una matriz aplítica de grano fino con cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico. La plagioclasa es albíta a oligoclasa (Vry y otros, 2010), alterados frecuentemente a clorita, sericita y cuarzo (Cannell, 2004).

Dataciones de U-Pb en circones definen edades similares de unos 5,6 Ma para estos cuerpos porfídicos (Maksaev y otros, 2004), formados poco después del Pórfido microdiorítico.

Pórfido diorítico blanco (PDB) y Pórfido diorítico grueso (PDG)

Se ubican en el sector sureste del yacimiento y corresponden a facies de alteración cuarzo-sericita de la Tonalita (Diorita Sewell). Poseen una textura porfídica de grano medio a grueso con un 40% de fenocristales de plagioclasa y una masa fundamental biotitizada y sericitizada.

Vry y otros (2015) describen que el pórfido diorítico grueso posee ojos de cuarzo insertos en una matriz aplítica y presenta un menor grado de alteración en comparación con las otras unidades del

depósito, aunque posee cierta mineralización con un 2-3% de pirita y calcopirita con texturas diseminadas. No se han determinado edades de cristalización para estas unidades.

Pórfido Dacítico (PDA)

Llamado antiguamente **Pórfido Dacítico El Teniente** es un intrusivo de composición dacítica, subvertical y alargado, de unos 200 m de ancho, que se extiende aproximadamente por unos 1.600 m al norte de la Brecha Braden en dirección NNW-SSE. Posee fenocristales de oligoclasa-andesina, biotita, anfíbol y ocasionalmente ojos de cuarzo inmersos en una matriz de cuarzo, albita, feldespato potásico y biotita (Skewes y otros, 2002; Maksaev y otros, 2004). Mayoritariamente presenta alteración potásica, pero sin una marcada biotitización como las demás unidades del yacimiento (Vry y otros, 2010). Por otro lado, los altos contenidos de K_2O y SiO_2 evidencian una alteración cuarzo-sericita abundante en los niveles más altos de la mina a lo largo de los márgenes de esta unidad (Cannell, 2004; Skewes y otros, 2005).

Varios autores (Ossandón, 1974; Duarte, 2000; Rojas, 2003; González, 2006; Hitschfeld, 2006) a través de sus observaciones indican que este cuerpo está formado por varias fases de intrusión debido a variaciones texturales y relaciones de corte. Estas fases se agrupan en dos grupos principales, una fase idiomórfica ubicada en la zona norte del depósito y en el borde oriente del intrusivo y una fase hipidiomórfica localizada en la porción sur de la intrusión.

La fase idiomórfica contiene fenocristales de plagioclasa euhedrales y una masa fundamental aplítica, mientras que la fase hipidiomórfica posee fenocristales de plagioclasa con bordes reabsorbidos y una masa fundamental de grano más grueso (Rojas, 2003). La fase idiomórfica es más joven, ya que presenta xenolitos de la fase hipidiomórfica. Maksaev y otros (2004) a través de dataciones de U-Pb en circones determinaron una edad de formación de $5,25 \pm 0,1$ Ma.

Diques de Latita

Son diques de textura porfídica de 6 a 8 m de ancho que rodean de manera concéntrica a la Brecha Braden e incluyen algunos cuerpos menores al norte que fueron truncados por ésta. Estos cuerpos son irregulares, discontinuos y autobrechizados. Poseen fenocristales de albita fuertemente sericitizados, biotita y anfíboles alterados (Skewes y otros 2002; Cannell y otros, 2005). Dataciones de U-Pb en circones arrojan edades de $4,82 \pm 0,09$ (Maksaev y otros, 2004).

Diques de lamprófidos (LAM)

Denominados como diques de lamprófidos (Skewes y otros, 2002; Rabbia y otros, 2009; Vry y otros, 2010) o diques de andesita ricas en anfíbol (Maksaev y otros, 2004). Cortan a todas las unidades en El Teniente y son posteriores a la mineralización, representando un magmatismo que regresa a composiciones más máficas (Vry y otros, 2010). Tienen orientaciones NE-SW y están compuestos por fenocristales de anfíbol inmersos en una matriz de grano fino de plagioclasa, anfíbol, óxidos de hierro y vidrio (Skewes y otros, 2002). Se clasifican por su composición como andesita (Vry y otros, 2010) poseen edades de $2,9 \pm 0,6$ Ma y $3,8 \pm 0,3$ Ma obtenidas a partir de dataciones de K-Ar en hornblenda y roca total respectivamente (Cuadra, 1986).

2.3.1.3. Brechas

Una serie de brechas magmáticas e hidrotermales existen en El Teniente, las cuales hospedan una buena parte de la mineralización de Cu y Mo (Skewes y otros, 2002). Se identifican 5 tipos de brechas principales: brecha ígnea, de biotita, de anhidrita, de turmalina y de harina de roca. Otras más localizadas incluyen cementos de actinolita, magnetita, feldespatos potásico, cuarzo y yeso (Vry y otros, 2010).

Brechas ígneas (BXI)

Brechas formadas en asociación con las diferentes intrusiones principales (Vry y otros, 2010), de composiciones polimícticas con matriz ígnea alterada de biotita, cuarzo, feldespatos, anhidrita, calcopirita y óxidos de hierro con una textura holocristalina equigranular (Skewes y otros, 2002). Componen material del Pórfido microdiorítico y aparecen en los márgenes del Pórfido dacítico y en varias de las apófisis dacíticas (Skewes y otros, 2002; Cannell y otros, 2007).

Brechas de biotita (BXBI)

Son brechas hidrotermales magmáticas tempranas formadas al inicio de la etapa premineral (Vry y otros, 2010). Asociadas en profundidad con el Pórfido microdiorítico y en los márgenes con el Pórfido dacítico y varias apófisis dacíticas (Cannell y otros, 2007). Consisten en fragmentos de pórfidos y del CMET cementados con biotita gruesa y cuarzo intersticial. Skewes y otros (2002) sugieren que las brechas de biotita se formaron a lo largo del CMET, pero son enmascaradas por la sobreimpresión de eventos hidrotermales, aunque estudios más recientes no encuentran evidencia para apoyar dicha afirmación (Cannell y otros, 2007; Vry y otros, 2010).

Brechas de anhidrita (BXANH)

Brechas polimícticas cementadas con anhidrita hidrotermal y en menor medida turmalina, cuarzo, yeso, apatito, calcopirita y pirita (Skewes y otros, 2002), son asociables a vetas de anhidrita, cuarzo, biotita, feldespatos y sulfuros. Se localizan en los márgenes del Pórfido microdiorítico y Pórfido dacítico. Cannell (2004) sugiere que estas brechas son posteriores a las brechas ígneas y de biotita, y se formaron simultáneamente con el Pórfido dacítico.

Brechas de turmalina (BXTU)

Son brechas mono o polimícticas, con clastos sericitizados, mineralizados o estériles (Skewes y otros, 2002). Están cementadas por turmalina y porciones variables de anhidrita, cuarzo, calcopirita, bornita y pirita. Existen dos tipos de brechas de turmalina (Camus, 1975): brechas tempranas de turmalina asociadas a la parte superior de algunos intrusivos (Pórfido grueso) y están poco mineralizadas formando complejos junto a las brechas de biotita y anhidrita. Por otro lado, las brechas de turmalina tardías forman un anillo alrededor de la Chimenea Braden y se formaron en las últimas etapas de evolución del depósito. Son polimícticas clastosoportadas con 60-90% de clastos angulares inmersos en cemento de turmalina, sulfuros, sulfatos y sulfosales (Skewes y otros, 2002).

Brecha Braden (CBB)

Complejo de brechas hidrotermales ubicada en el centro del depósito. Tiene un diámetro de 1.200 m y una forma circular en superficie. Las paredes orientales de este cuerpo son subverticales y las del lado occidental mantienen entre 60° a 70° hacia el interior (Maksaev y otros, 2004), creando una forma de cono invertido de más de 2.100 m hacia profundidad.

Poseen carácter polimíctico, mal seleccionadas y matriz soportadas con clastos de dioritas, dacitas y otros fragmentos de rocas en una matriz tobácea muy alterada (Sillitoe, 1985, en Maksaev y otros, 2004). Se puede dividir en dos facies (Cuadra, 1986). En la periferia se reconoce un anillo de brechas de turmalina rica en sulfuros denominado brecha marginal y en la parte central un grupo de brechas hidrotermales con matriz de polvo de roca estériles que forman la mayor parte del complejo. La Brecha Braden ha sido interpretada como una diatrema (Maksaev y otros, 2004) generada por una explosión freatomagmática. Dataciones K-Ar en sericitas indica edades de formación de 4,7 y 4,6 Ma (Cuadra, 1986).

2.3.2. Alteración y mineralización

Se han definido 3 esquemas de clasificación de vetillas en base a mineralogía, temporalidad y alteración asociada (Anexo A2). Sin embargo, estas corresponden a un panorama general, ya que existen numerosas evidencias de diferentes procesos de alteración, mineralización y brechización a escala local dentro del yacimiento, siendo esta evolución un tema complejo debido a la sobreimpresión de muchos eventos magmáticos e hidrotermales.

Vry y otros (2010) definen 13 tipos de vetillas separadas en tres etapas: etapa premineral (alteración potásica), etapa de mineralización principal definida por vetillas de cuarzo y/o anhidrita con o sin halos de alteración, que reflejan una alteración potásica incipiente a cuarzo-sericita y una etapa de mineralización tardía con vetillas de turmalina y sulfosales posiblemente vinculadas a la Brecha Braden y sus fases marginales.

La clasificación de Codelco (2003) posee algunas similitudes con lo realizado por Vry y otros (2010) y se documentan 15 generaciones de vetillas distintas también separadas en 3 etapas: una etapa tardimagmática (alteración potásica), una etapa hidrotermal principal (alteración cuarzo-sericita) y una etapa hidrotermal tardía (alteración cuarzo-sericita pervasiva) que afecta los alrededores de la Brecha Braden.

Cannell y otros (2005) mencionan 13 tipos de vetillas agrupadas en cuatro etapas que, a diferencia de los modelos anteriores, agrega una etapa premineral anterior a la etapa tardimagmática que posee vetas asociadas a una alteración potásica intensa.

2.3.2.1. Etapas de alteración

A pesar de los modelos anteriormente descritos, los autores concuerdan de manera general que existen cuatro etapas de alteración hipógena como las propuestas por Cuadra (1986): Tardimagmática, Hidrotermal principal, Hidrotermal tardía y Póstuma.

Etapa Tardimagmática

Está relacionada con la Tonalita (Stock Sewell) y con el Pórfido dacítico, siendo considerada la primera etapa importante de alteración asociada a mineralización. Contiene una etapa temprana de biotitización pervasiva que oblitera las texturas del CMET e incluye la formación de las brechas de biotita. La biotita fina diseminada está acompañada de anhidrita, clorita, magnetita, rutilo,

calcopirita y pirita. Al final de esta etapa, la alteración potásica se expresa en *stockworks* de vetillas de cuarzo, feldespato potásico, anhidrita y sulfuros. En los intrusivos ocurre silicificación y pseudopertitización de las plagioclasas, formación de cúmulos irregulares de biotita en el CMET gradando a clorita hacia sectores periféricos, asociada con epidota y calcita (alteración propilítica). Las zonas de mayor intensidad se ubican en la sección norte en un esquema concéntrico al Pórfido dacítico.

Etapa Hidrotermal Principal

Se sobreimpone a la etapa anterior y es generada por la reacción de fluidos tardimagmáticos con aguas meteóricas. Se caracteriza por una alteración cuarzo-sericita con menores cantidades de clorita y anhidrita que destruye y reemplaza los minerales preexistentes. Se asocia a vetillas de cuarzo y sulfuros con halos de cuarzo, sericita y clorita. Como sulfuros principales aparecen calcopirita y pirita, sin bornita asociada, además de molibdenita subordinada relleno de espacios en vetillas y también diseminada en los halos de alteración. Las zonas de mayor intensidad se localizan en forma simétrica al Pórfido dacítico y aparece también en la Tonalita como vetillas y en forma masiva.

Etapa Hidrotermal Tardía

Se asocia a fluidos hidrotermales relacionados a la brecha marginal de turmalina que rodea a la Brecha Braden. Se expresa como una segunda alteración cuarzo-sericita con vetillas de anhidrita, cuarzo, sericita, turmalina, yeso, ankerita, siderita, baritina, clorita, epidota, calcopirita, bornita, pirita, molibdenita y sulfosales afectando los clastos de la brecha marginal y todo lo que la rodea desde unos 100 a 150 m de manera concéntrica a ésta. Las vetas son similares a las de la etapa anterior, pero de mayor grosor (Zúñiga, 1982). Los halos son más gruesos y se caracterizan por unos agregados de cuarzo, sericita y clorita, obliterando la textura ígnea de la roca original.

Etapa Póstuma

Es el último evento hipógeno que afecta al depósito y se relaciona a fluidos hidrotermales asociados a la Brecha Braden. Se expresa como una alteración sericita-calcita restringida a la parte central de la brecha, como vetillas poco frecuentes y afectando la matriz y los clastos de esta. Los minerales secundarios son clorita, pirita diseminada y localmente calcopirita. También se observa yeso,

carbonatos, cuarzo, apatito, tetraedrita-tenantita, esfalerita y galena, relleno de cavidades dentro de la Brecha Braden.

Alteración Supérgena

La acción de aguas meteóricas lixivia la anhidrita y los sulfuros primarios (bornita, calcopirita y pirita) y desarrolla en niveles inferiores una alteración supérgena (Skewes y otros, 2005). Esta zona está delimitada por la desaparición de la anhidrita y la aparición de calcosina (Camus, 1975). Los minerales más abundantes son caolinita, montmorillonita, alunita y sericita.

2.3.2.2. Mineralización

Hipógena

El 60-80% de la mineralización se encuentra dentro de un *stockwork* de vetillas que rodean los complejos de brechas e intrusivos félsicos (Maksaev y otros, 2004; Vry y otros, 2010), predominando calcopirita, bornita y molibdenita, los cuales existen restringidamente de manera diseminada en el CMET (Camus, 1975; Vry y otros, 2010). El 20-40% restante se encuentran en las intrusiones félsicas y en los cementos de las brechas ígneas e hidrotermales (Skewes y otros, 2002; Cannell y otros, 2005).

Cannell (2004) indica que la mineralización se dispone de manera concéntrica a un núcleo relativamente estéril (Figura 2.2), con una zonación típica de pórfido cuprífero centrada en el Pórfido dacítico (Klemm y otros, 2007).

Alternativamente, se ha sugerido que este intrusivo trunca las brechas anteriormente mineralizadas (Skewes y otros, 2002; 2005; Stern y otros, 2007). Al sur del Pórfido dacítico se ubica un núcleo rico en bornita (1-4%) y menores cantidades de calcopirita. Concéntrica a este núcleo hay una zona de calcopirita que contiene la mayor parte del cobre del yacimiento. Alrededor de ella, existe un segundo anillo de calcopirita y pirita, que grada a un extenso halo de pirita (3-8%) más hacia la periferia.

El contorno de 0,5% de Cu hipógeno tiene forma de cuña de 2,5 km de largo y 1,8 km de ancho, que es interrumpida por la Brecha Braden (zona de baja ley). Fuera de este contorno la abundancia de sulfuros se mantiene, pero aumenta considerablemente la pirita en relación a la calcopirita. El molibdeno se distribuye de forma concéntrica alrededor de la Brecha Braden, cuyos valores más

altos se encuentran a una distancia de 100-250 m del contacto. Otras zonas con más molibdeno se ubican en los contactos de las intrusiones félsicas, asociadas a mayores cantidades de cobre.

Supérgena

Desarrollada entre 100 a 600 m bajo la superficie actual (Cuadra, 1986). En la zona lixiviada abundan limonita y hematita, minerales que reemplazaron a los sulfuros primarios. Bajo esta zona hay un tramo de unos 80 m de espesor con minerales oxidados como crisocola, malaquita, azurita, además de cuprita, cobre nativo y *cooper pitch* (Zuñiga, 1982; Cuadra, 1986). Más abajo se encuentra la zona de enriquecimiento secundario donde la ley de cobre se duplica de manera local y abunda calcosina y covelina (Skewes y otros, 2005).

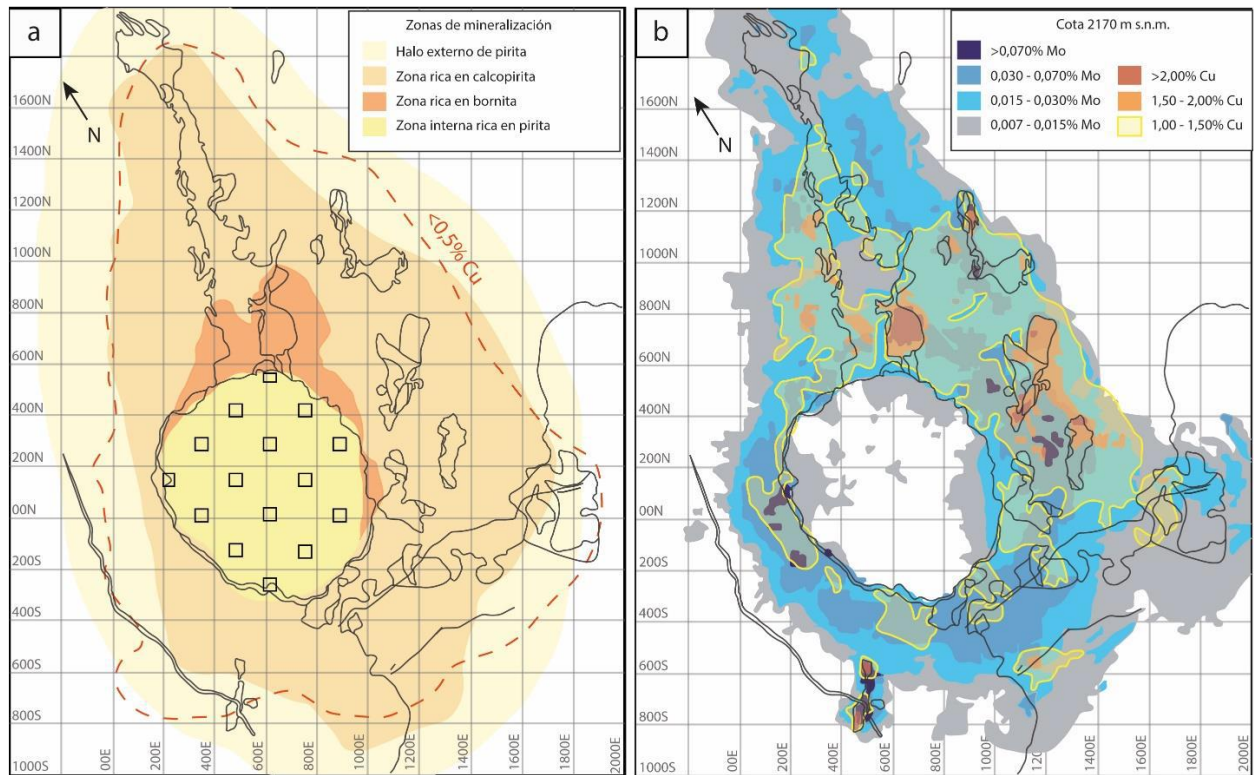


Figura 2.2: Zonación de la mineralización de El Teniente. (a) Distribución de las zonas de sulfuros, basado en Arévalo y Floody (1995), modificado de Cannell (2004). **(b)** Distribución de las leyes de molibdeno y cobre, a una cota de 2170 m s.n.m., modificado de Spencer (2015).

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Metalurgia

3.1.1. Proceso productivo

De manera general, el proceso productivo en División El Teniente consta de tres etapas: extracción, concentración y fundición. En la etapa de extracción se obtiene el material a través del método de explotación por hundimiento, donde grandes columnas de roca son fracturadas mediante detonaciones subterráneas y ayudadas por los mismos esfuerzos internos dentro del macizo rocoso.

En la etapa de concentración, todo este material es llevado a las plantas industriales donde a través de procedimientos físicos y químicos se separa el cobre de los minerales de ganga. Finalmente, en la etapa de fundición, los concentrados obtenidos en planta son secados y sometidos a fusión, para obtener cobre altamente puro.

3.1.1.1. Proceso productivo de planta

Este proceso se lleva a cabo en las áreas industriales de Colón y Sewell. Esencialmente, comienza con la conminución del material extraído a través de chancadores primarios, secundarios y terciarios, donde se disminuye el tamaño de las partículas a niveles centimétricos. Posteriormente, la molienda reduce aún más los tamaños de grano (a menos de un milímetro) para obtener un polvo fino que es mezclado con agua y reactivos químicos en el proceso de flotación. Aquí, la mezcla mencionada forma una pulpa de la que se separan las partículas de cobre y molibdeno adhiriéndose a burbujas de aire, generando una espuma cargada de minerales de cobre, la cual es retirada obteniendo un concentrado rico en el mineral de interés. Tanto el concentrado como el mineral de ganga son llevados hacia la etapa de espesamiento, donde se recupera la fase líquida para recircularla al proceso. El resultado del proceso de espesamiento es una pulpa de minerales de ganga denominada relave, el cual es conducido hacia una zona de depósito de relaves o tranque de relaves, lejos de la planta, que en este caso corresponde al embalse Carén. En el Anexo A3 se muestra un esquema resumen del proceso productivo de planta llevado a cabo en El Teniente.

3.1.1.2. Espesamiento

El espesamiento corresponde a la operación de separación sólido-líquido llevada a cabo después del proceso de flotación. Se realiza tanto para tratar concentrados y relaves desde la planta en forma de pulpas con un 25 a 30% de sólidos. A través del espesado se obtienen pulpas con mayores concentraciones de sólido (sobre 50%) y un flujo de agua clara que sirve para ser utilizada nuevamente en el proceso de planta.

Como la cantidad de relave es mucho mayor que la de concentrado (razón 25/1), el espesamiento de éste ofrece una mayor oportunidad de recuperar agua.

El funcionamiento de los espesadores se basa en la sedimentación de las partículas sólidas. Un cuerpo sólido inmerso en un fluido de menor densidad tiende a caer con una velocidad de sedimentación alcanzada cuando la fuerza de gravedad y la fuerza de resistencia del fluido se equilibran. Esta velocidad de sedimentación depende de varios factores, entre ellos el diámetro de la partícula, la morfología, el peso específico relativo entre el sólido y el fluido, y la viscosidad del fluido, entre otros.

El espesamiento convencional se lleva a cabo en estanques cilíndricos-cónicos que cuenta con rastras (*rake*) que facilitan la descarga del material sólido (*underflow*) en la parte inferior como se observa en la Figura 3.1. La pulpa o el relave de alimentación llega a un pozo circular (*feedwell*) ubicado en el centro del espesador con el fin de evitar una mayor agitación y obtener así, un flujo de agua clara (*overflow*) que rebasa hacia una canaleta localizada en la periferia del estanque.

El mecanismo de rastras normalmente corresponde a dos brazos radiales unidos al eje central que se mueven lentamente gracias a un mecanismo impulsor. El movimiento generado por las rastras promueve la colisión y adhesión de partículas para ser arrastradas hacia la zona de descarga.

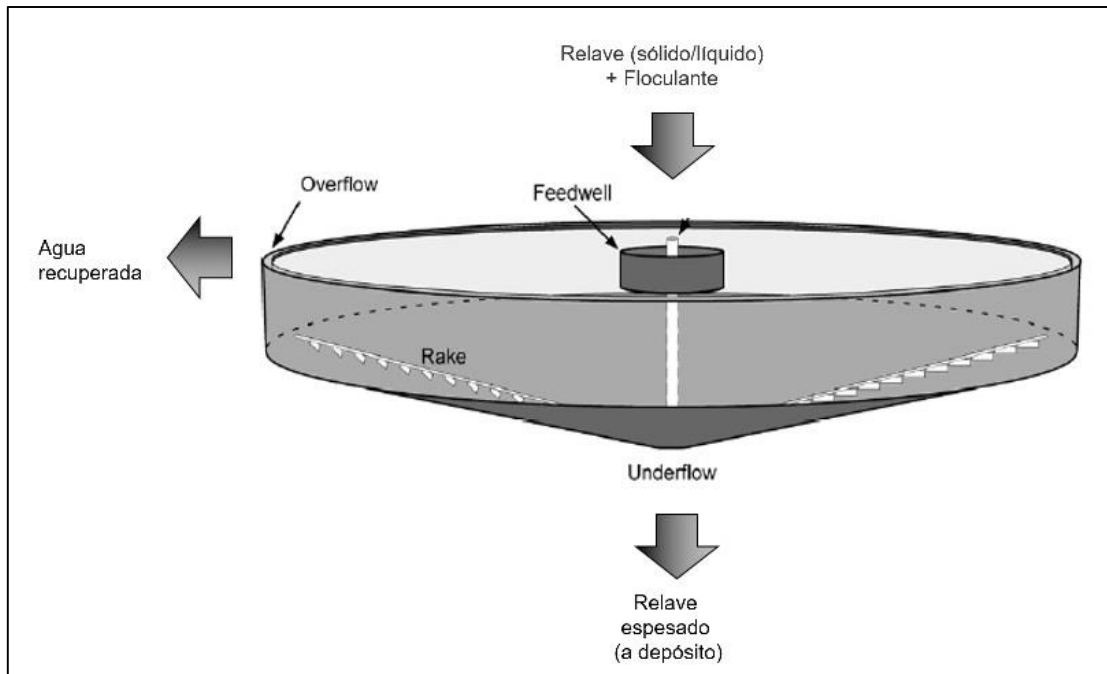


Figura 3.1: Esquema simplificado de un espesador convencional. Extraído de Castillo (2018).

Un buen desempeño del espesamiento está enfocado fundamentalmente en evitar sobrecargas y embancamientos, por los que se requiere controlar la presión hidráulica de giro, amperaje del motor y torque mecánico de las rastras, así como el porcentaje de sólidos en la descarga. Las situaciones anómalas se pueden controlar levantando las rastras o bien modificando la alimentación del espesador. Otro control del buen funcionamiento del espesador radica la claridad que presenta el agua rebosante y su altura en la columna.

Como existen partículas demasiado finas que presentan mucha lentitud en la sedimentación, la adición de coagulantes o floculantes puede lograr mayores velocidades de asentamiento al inducir la unión entre partículas, producido al reducir la carga superficial de las partículas, disminuyendo la repulsión entre ellas.

3.1.2. Parámetros metalúrgicos en espesamiento

Para analizar el funcionamiento de los espesadores de relaves se utilizan algunos parámetros que dan cuenta de la eficiencia de los procesos que allí ocurren. De manera general se pueden separar en dos grupos; parámetros relacionados a la sedimentación y parámetros relativos a la reología de pulpas dentro del espesador.

3.1.2.1. Sedimentación

En este grupo se encuentran los parámetros de velocidad de sedimentación, concentración de sólido final y turbidez del sobrenadante. Con ellos es posible entender el desempeño del proceso y enfocarse en la influencia de la metodología utilizada, ya sea el tipo de floculante, la concentración de sólido de la pulpa de alimentación o incluso su composición mineralógica.

Velocidad de sedimentación

Este parámetro mide la velocidad de asentamiento de las partículas dentro del espesador. De manera general, el comportamiento de una partícula dentro de un fluido homogéneo se rige por la Ley de Stokes. Durante la sedimentación inicial, las partículas sólidas que hay en una solución no turbulenta caen por efecto de la gravedad en relación con el fluido. La velocidad de este movimiento se incrementa hasta que la fuerza de arrastre generada por la viscosidad del líquido iguala la fuerza de gravedad sobre la partícula. A partir de ese momento, estas partículas caerán a velocidad constante, la cual se denomina velocidad terminal o velocidad de asentamiento libre. La magnitud de esta velocidad puede ser obtenida mediante la siguiente fórmula (1):

$$V_t = \frac{2*r^2*g(s-1)}{9*\mu} \quad (1)$$

Donde (V_t) es la velocidad terminal de una partícula esférica, (r) es el radio de dicha esfera, (g) es la aceleración gravitatoria, (s) es la densidad relativa de la partícula esférica, (μ) es la densidad relativa del líquido y (μ) es la viscosidad del fluido.

La medición de la velocidad de sedimentación toma una crucial relevancia en el rendimiento del espesador. Elevadas velocidades de sedimentación permiten tratar mayores cantidades de material y hacer más rápida la recuperación de agua. El tipo de material alimentado puede ser importante considerando posibles variaciones en la composición que deriven en diferentes rendimientos en el proceso. Otro aspecto importante es el uso de floculantes que aceleran la velocidad de sedimentación de manera considerable.

En la práctica, los factores que rigen el comportamiento de una solución durante la sedimentación son variados y amplios, y se mencionan a continuación de manera conjunta para velocidad de sedimentación, concentración de sólido final y turbidez.

Concentración de sólido final en volumen (CV)

Corresponde al porcentaje que tiene el volumen o flujo volumétrico del sólido, respecto del flujo o flujo volumétrico de la pulpa (2). Es decir:

$$CV = \frac{\text{Volumen de sólido}}{\text{Volumen de la pulpa}} * 100\% \quad (2)$$

Este parámetro hace referencia a la concentración de sólido que posee el *underflow*, es decir, la pulpa de relave obtenida después del proceso de espesamiento. Normalmente, una concentración de sólidos elevada es evidencia de un espesamiento satisfactorio, pues implica que la proporción de agua recuperada fue alta. Sin embargo, es importante que este parámetro se analice incluyendo el contexto de la planta en cuestión. Una alta concentración de sólido no siempre es apropiada para faenas que depositan sus relaves en un lugar distante, ya que es necesario transportar este material mediante canaletas o tuberías, y un exceso de sólidos dificulta la fluidez de esta mezcla. El Teniente es uno de estos casos, ya que sus relaves son depositados a 87 km de la planta, en el embalse Carén. Un exceso de material sólido puede significar estancamientos de los relaves y la necesidad de adicionar más agua para aumentar la fluidez, lo que significa un gasto importante de este limitado elemento.

Otras plantas de procesamiento depositan sus relaves cerca y no es necesario que se vigile un máximo de concentración de sólido para garantizar la fluidez de la pulpa espesada, ya que no necesitan mayor transporte.

Turbidez

La turbidez es una característica óptica en la que se cuantifica la transparencia o la claridad de un fluido debido a la presencia de partículas sólidas en suspensión. A mayor cantidad de partículas inmersas en el líquido, mayor será la turbidez. Se mide en NTU (Unidad nefelométrica de turbidez).

En el caso del espesamiento, la turbidez se cuantifica en el agua clara rebalsada u *overflow*, donde es de gran importancia obtener agua con bajos niveles de turbidez. Normalmente, la turbidez se encuentra asociada a la presencia de partículas sólidas muy finas que presentan mucha dificultad para asentarse, o ya sea por poseer bajas densidades o formas desfavorables como en el caso de los minerales laminares.

La calidad del agua recuperada en el espesamiento es crucial para obtener buenos rendimientos en los procesos en que será reutilizada. Por ejemplo, aguas con alta turbidez debido a la presencia de arcillas, presentan resultados desfavorables en el proceso de flotación y mayor gasto de reactivos, debido a que incrementan el fenómeno de *slime coating* (Yu y otros, 2017).

3.1.2.2. Factores que controlan los parámetros de sedimentación

Forma de partícula

Svarovsky (1988) indica que las partículas con forma esférica sedimentan con mayor velocidad que partículas irregulares o con mayor superficie específica. Esto se debe a que mientras mayor superficie de contacto exista entre la partícula y el medio acuoso, habrá mayor roce entre ambos y, por lo tanto, menores velocidades de sedimentación. Las partículas laminares como el caso de los filosilicatos y por sobre todo algunos tipos de arcillas presentan grandes superficies específicas y granulometrías muy finas, por lo que son minerales que tienden a quedarse suspendidos en el medio acuoso por más tiempo.

Tamaño de partícula

Mientras menor tamaño tenga una partícula más tiempo tardará en sedimentar. Pérez (2005) detalla algunas velocidades de sedimentación en función de los tamaños de cada partícula con un peso específico fijo de $2,65 \text{ kg/dm}^3$ y 10°C de temperatura (Tabla 3.1).

Tabla 3.1: Velocidades de sedimentación en función de tamaños de partícula.

D (mm)	Clasificación	Velocidad sedimentación (mm/s)	Tiempo para sedimentar 0,3 m
10	Grava	1.000	0,3 s
1	Grava	100	3,0 s
0,1	Arena gruesa	8	38 s
0,01	Arena fina	0,154	33 min
0,001	Bacterias	0,00154	35 horas
0,001	Coloides	0,0000154	230 días
0,0001	Coloides	0,000000154	63 años

El tamaño también influye en la concentración de sólido final de las pulpas cuando se les adicionan floculantes. En las partículas finas actúa mayoritariamente la floculación, fenómeno que ocurre relativamente rápido, por lo que existe una gran cantidad de agua que queda atrapada en la macroestructura que forman los flóculos (Alejo y Barrientos, 2009; Vera, 2019). Esto culmina en la formación de partículas de baja densidad que disminuyen la concentración de sólido.

Gravedad específica

Partículas con mayores gravedades específicas tienden a sedimentar más favorablemente debido a que presentan mayores densidades.

Características químicas de las partículas

Minerales con cargas iónicas negativas sedimentan a menores velocidades, ya que sus partículas se repelen electrostáticamente entre sí, por lo que no pueden formar agregados de mayor tamaño. Un ejemplo de ello son las arcillas iónicas.

Viscosidad, densidad relativa del líquido, temperatura y pH

El incremento de la viscosidad disminuirá la velocidad de sedimentación. Procurar mantener temperaturas altas será siempre deseable puesto que va a disminuir la viscosidad del agua. A mayor pH se ha demostrado que existe más repulsión entre partículas (Ravanal, 2017).

Concentración de partículas sólidas

Soluciones con mayores proporciones de partículas sólidas experimentan menores velocidades de sedimentación ya que éstas no descienden libremente como si estuviesen en un medio diluido, existiendo choques y obstrucción entre partículas.

Adición de coagulantes y floculantes

Los coagulantes son electrolitos, normalmente sales de hierro o aluminio que liberan iones positivos capaces de atraer a las partículas coloidales y neutralizar su carga o formar compuestos de baja solubilidad.

Los floculantes son compuestos que permiten que disminuya las fuerzas de repulsión entre partículas y se formen agregados de mayor tamaño que sedimenten con más facilidad. Son capaces de lograr la sedimentación de partículas ultrafinas y coloidales. Los floculantes pueden ser de origen orgánico o sintético, y se pueden clasificar como; no aniónicos, aniónicos y catiónicos.

3.1.2.3. Reología

La reología estudia la deformación y el flujo de la materia, enfocándose en dos magnitudes físicas; el esfuerzo de corte y la tasa de deformación (velocidad de corte o velocidad de cizalle).

De manera general, existen dos tipos de fluidos si se considera su comportamiento reológico; los fluidos newtonianos y los no newtonianos. Los fluidos newtonianos presentan una viscosidad constante y la relación entre esfuerzo de corte y tasa de deformación es lineal. Un ejemplo para este tipo de fluidos es el agua. Por otro lado, los fluidos no newtonianos no siguen esta tendencia y su comportamiento es más complejo.

Las pulpas de relave son fluidos no newtonianos, específicamente plásticos de Bingham debido a que comienzan a experimentar deformación sobre cierto valor de esfuerzo, denominado límite de fluencia de corte o punto de fluencia o cedencia (Figura 3.2). Esto indica que, si se les aplica un esfuerzo bajo este valor mínimo, se comportan como sólidos, es decir, presentan una deformación elástica.

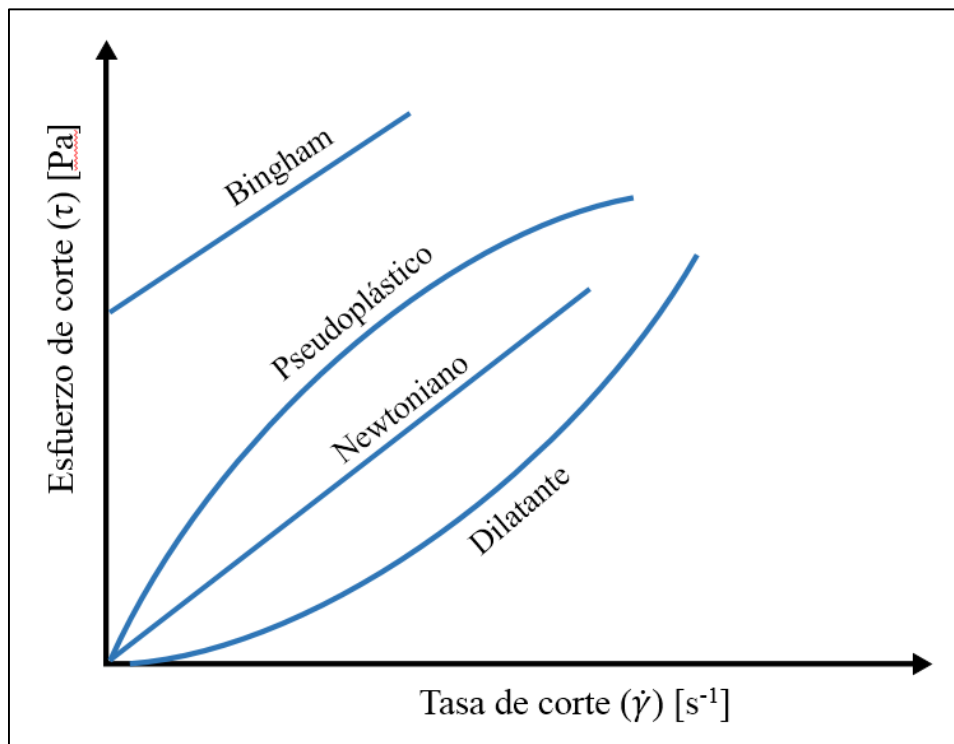


Figura 3.2: Reograma para diferentes tipos de fluidos.

Punto de fluencia sin cizalle (*yield point unshear*)

Corresponde al esfuerzo de corte máximo para que la pulpa comience a experimentar deformación (fluir). Este parámetro se relaciona con la fuerza de torque necesaria que deben realizar las rastras dentro del espesador para comenzar a movilizar la capa de material que ha sedimentado en el fondo. Expone una situación donde el material se encuentra estático (sin cizalle) representando un embancamiento en el espesador.

La obtención de los valores de este parámetro a través de un ensayo de laboratorio es útil para predecir el comportamiento dentro del espesador de pulpas de relave de diferentes composiciones y procedencias.

Punto de fluencia con cizalle (*yield point fully shear*)

Representa el esfuerzo de torque necesario que deben realizar las rastras dentro del espesador para mezclar la pulpa de relave que ya se encuentra en movimiento (con cizalle). Es mucho menor que el punto de fluencia sin cizalle y se obtiene también mediante ensayos de laboratorio aplicados sobre una muestra de pulpa agitada.

3.1.2.4. Factores que controlan los parámetros de reología

Concentración de sólidos en volumen

A medida que aumenta la concentración de sólidos en volumen aumenta la viscosidad de la pulpa debido a que existe un mayor espacio ocupado por sólidos. Esto implica una mayor desviación de las líneas de flujo del medio dispersante y un aumento de la probabilidad de colisión entre partículas, lo que dificulta el movimiento de la mezcla. Al existir un aumento de la viscosidad es necesario aplicar un mayor esfuerzo de corte para deformar la pulpa de relave.

Tamaño de partícula

A medida que las partículas son más pequeñas, el movimiento que experimentan dentro de la fase dispersante es más aleatorio, aumentando la diferencia de velocidad entre la partícula y el medio circundante. Esto implica un aumento de la viscosidad y por consiguiente un aumento en el punto de fluencia.

Distribución granulométrica

Al existir en la mezcla partículas de diferentes tamaños es posible que las más pequeñas puedan ubicarse dentro de los espacios dejados por la más grandes, aumentando así la concentración de sólidos en volumen y por consiguiente una mayor viscosidad y esfuerzo de corte necesario para deformar la pulpa.

Forma de las partículas

Se experimenta un gran aumento de la viscosidad si la forma de las partículas se aleja de la de una esfera, sobre todo a contenidos de sólido mayores a 20%. Barnes y otros (1989) muestran las viscosidades asociadas a diferentes formas de partículas, donde las de forma laminar y de tablas se relacionan a aumentos significativos. Algunos autores como Ndlovu y otros (2011) han encontrado un mayor límite de fluencia cuando la forma de las partículas es de láminas -específicamente vermiculita y muscovita- en comparación a muestras de cuarzo, el cual presenta generalmente forma granular.

Mineralogía

La presencia de minerales laminares se relaciona a un aumento significativo del punto de fluencia (Becker y otros, 2013). Los filosilicatos en general y sobre todo las arcillas, dadas sus granulometrías y tamaños, son considerados minerales que generan un comportamiento reológico desfavorable.

Temperatura y pH

De manera general, un aumento de la temperatura disminuye la viscosidad del medio dispersante, lo cual es favorable para obtener mejores comportamientos en las pulpas. El pH afecta las suspensiones debido a que determina las características de las interacciones electrostáticas entre las partículas. Esto depende de las cargas iónicas del mineral en cuestión, por lo que las tendencias son variadas.

Uso de reactivos

El uso de dispersantes reológicos ayuda a separar las partículas y diluirlas en el medio acuoso para disminuir el contacto entre ellas y por ende la viscosidad de la mezcla. Otros evitan que las partículas sedimenten para que se mantengan en el agua.

3.1.2.5. Ensayos de sedimentación y reología

A continuación, se detallan de manera sintetizada los ensayos empleados para obtener los valores de los parámetros analizados en este trabajo.

Ensayo *batch* o de sedimentación estática

Este ensayo simula el proceso de sedimentación ocurrida en los espesadores con el propósito de medir los parámetros de velocidad de sedimentación, concentración de sólidos final en volumen (*undeflow*) y la turbidez del sobrenadante (*overflow*). En él, se prepara una pulpa con un porcentaje de sólido fijo y se vierte en una probeta graduada donde se mide el descenso de la interface líquido clarificado y pulpa (Figura 3.3.a). Al tener datos de altura y tiempo se obtiene una curva a partir de la cual es posible calcular la velocidad de sedimentación (Figura 3.3.b).

La concentración de sólido final en volumen se obtiene midiendo la altura de la columna de partículas asentadas en el fondo de la probeta en relación con el volumen total de la pulpa después de un tiempo determinado. La medición de la turbidez se realiza una o varias veces para observar su evolución y al igual que el parámetro anterior, los periodos de tiempo de espera posterior a la agitación de la pulpa son variables en función del material y del objetivo.

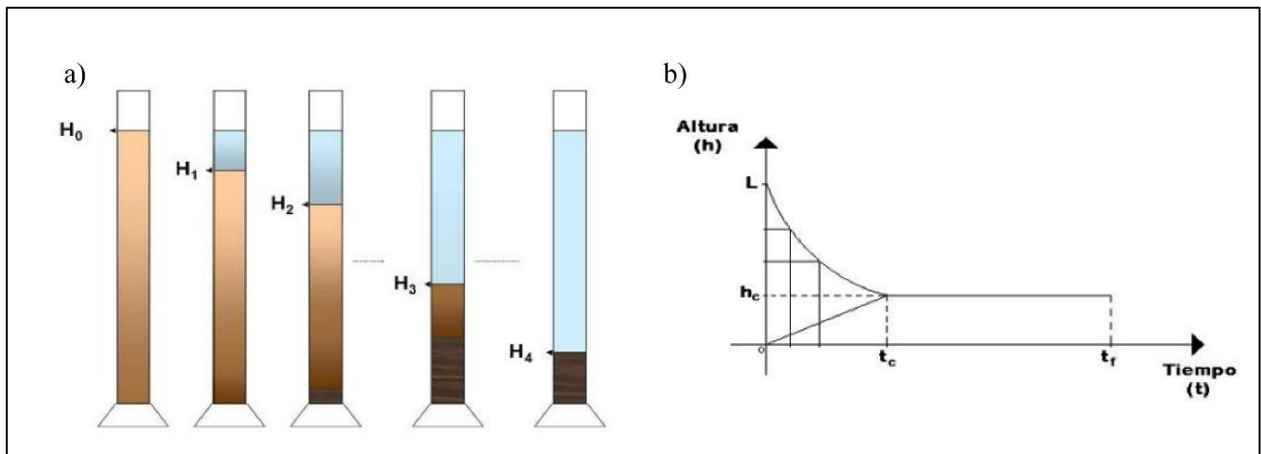


Figura 3.3: Sedimentación *batch*. (a) Esquema del cambio de la altura de la interface agua clara-pulpa. (b) Curva para la obtención de velocidad de sedimentación. Extraídos de Concha, (2001).

Método de Vane (paleta)

Este ensayo mide la tensión de fluencia en suspensiones concentradas (pulpas). El dispositivo consiste en un rotor de paletas que se introduce lentamente en la muestra hasta sumergirlo

completamente en ella (Anexo A4). Allí, se hace rotar lentamente a una velocidad constante, aplicando un torque que es medido en función del tiempo. Cuando se alcanza el torque máximo, la suspensión fluye dentro de un cilindro virtual definido por las aletas del dispositivo. Esto permite relacionar la tensión de fluencia con el torque máximo medido.

Los datos reológicos utilizados en este trabajo se obtuvieron mediante este método, siendo aplicado en pulpas concentradas resultantes de una sedimentación *batch*, primeramente, sin agitación (para punto de fluencia sin cizalle) y luego con agitación (punto de fluencia con cizalle).

3.1.3. Unidades geometalúrgicas (UGM) de recuperación de cobre de DET

Las unidades geometalúrgicas son el resultado de modelos que buscan conocer la distribución espacial de las variables geológicas que influyen directamente en uno o varios procesos metalúrgicos para definir sectorizaciones relativas a los rendimientos en dichos procesos. En el caso de El Teniente se han confeccionado unidades geometalúrgicas de recuperación de cobre rougher, cuyas variables contempladas se resumen en el árbol de decisión de la Figura 3.5. Estas UGM pueden tener o no relación con los parámetros metalúrgicos analizados en este trabajo, por lo que es conveniente conocer que consideraciones se tomaron al momento de su definición.

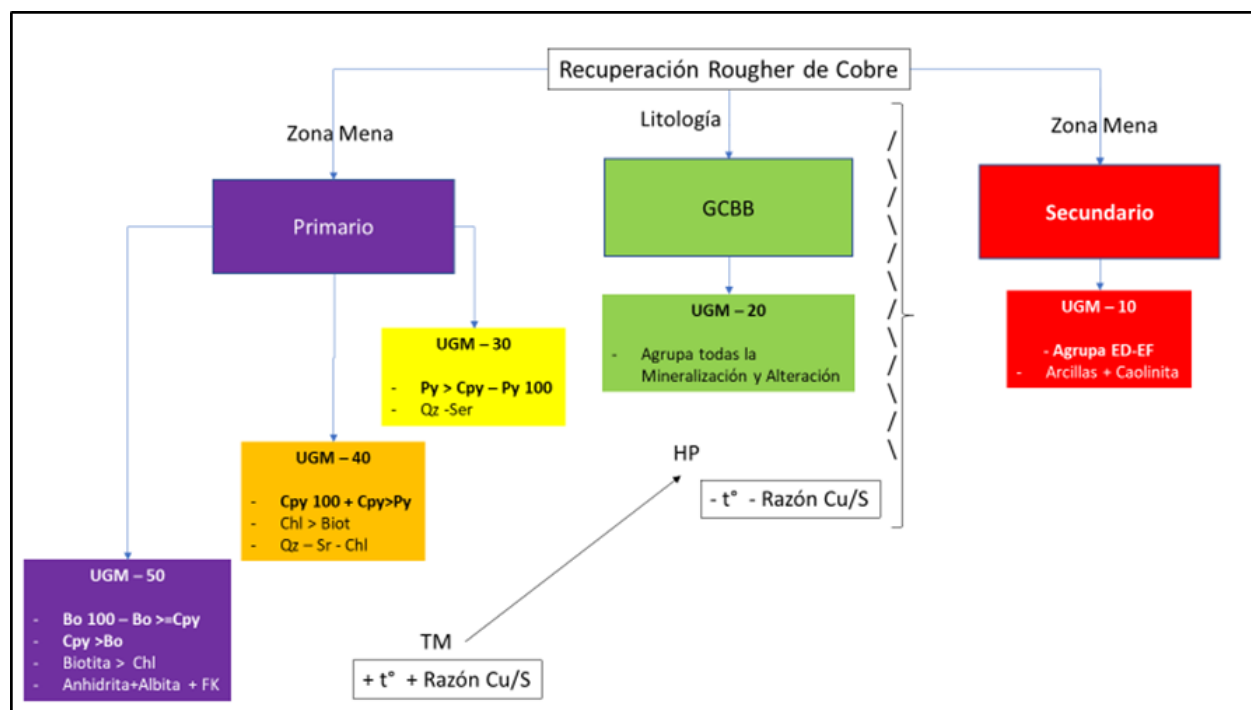


Figura 3.4: Árbol de decisión utilizado para la confección de las UGM de recuperación de cobre de El Teniente. Extraído de informe interno GRMD-SGL-INF-0046-2020.

Las principales variables corresponden a la zona de mena dividida en primaria y secundaria, posteriormente de la cual, se consideran las abundancias de calcopirita, bornita y pirita. También se utilizan algunas asociaciones minerales ligadas a las diferentes alteraciones hidrotermales presentes en el yacimiento y finalmente un factor litológico ligado a la Brecha Braden (UGM-20).

El resultado de estas unidades es un modelo espacial concéntrico a la Brecha Braden en cuyos bordes externos se ubican las UGM menores (10 y 30) y hacia el centro las mayores (40 y 50), como se puede observar en la Figura 3.5.

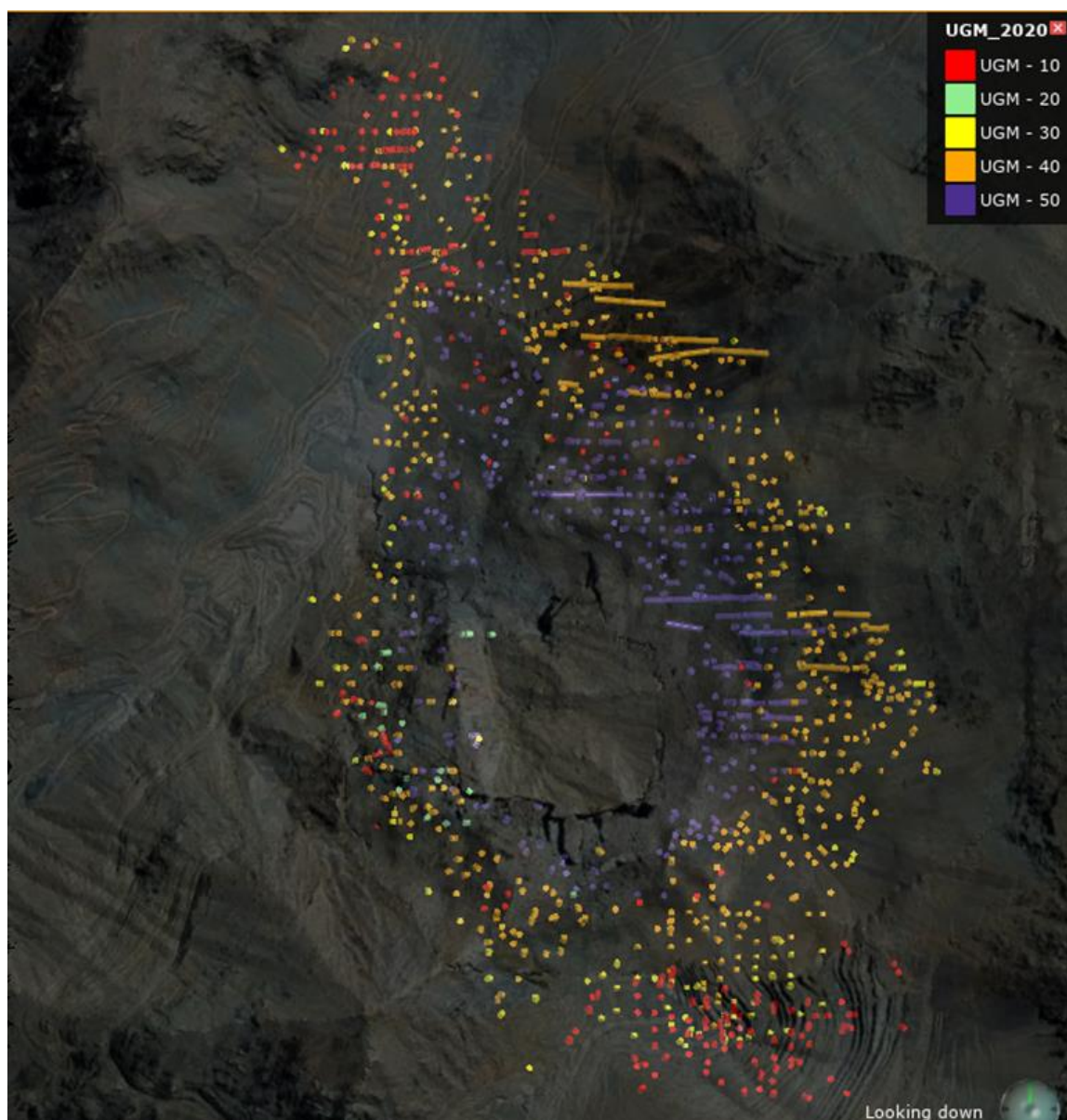


Figura 3.5: Vista en planta de muestras por UGM. Extraído de informe interno GRMD-SGL-INF-0046-2020.

3.2. Herramientas estadísticas

El desarrollo de este trabajo contempla un importante componente estadístico, por lo que es necesario hacer una breve introducción a las herramientas utilizadas para obtener los resultados. La utilización de Análisis de Componentes Principales (ACP) y Correlogramas o Matrices de Correlación obedece a que dichos métodos son adecuados para tratar grandes bases de datos que cuentan con numerosas variables relacionadas entre sí. Estas herramientas permiten analizar de una sola vez muchos factores e identificar los más influyentes.

Una vez que las variables más importantes son identificadas, pueden ser analizadas más a fondo mediante métodos univariados, que en este caso corresponden a gráficos de caja y bigote (*boxplots*).

3.2.1. Análisis de Componentes Principales (ACP)

Corresponde a una técnica estadística multivariable muy efectiva al momento de analizar bases de datos que contemplan diversas variables dependientes, cuantitativas y relacionadas entre sí. Este método rescata la información más importante de una base de datos y la representa mediante un conjunto de nuevas variables denominadas componentes principales, que corresponden a vectores ortogonales entre sí, obtenidos al combinar las variables originales. El patrón de similitud de las observaciones y de las variables se expresa en forma de puntos y vectores en gráficos (Abdi y Williams, 2010).

El objetivo principal del ACP es encontrar una combinación lineal que represente de la mejor forma posible las relaciones entre las variables originales, de tal manera que las variables redundantes o que aportan información muy parecida sean agrupadas para disminuir el número de variables.

La mejor combinación lineal corresponde al Primer Componente Principal (CP1), el cual exhibe la mayor varianza y el menor error asociado. Se entiende como varianza de un componente a la cantidad de información que lleva incorporado, es decir, cuanto mayor varianza, mayor será la cantidad de información explicada por dicho componente. El Segundo Componente Principal (CP2) y los sucesivos componentes se ordenan con respecto a la cantidad de información explicada, por lo tanto, el CP1 y el CP2 son las dos combinaciones que explican mayor cantidad de información y generalmente las más relevantes para llevar a cabo los análisis. Dichos componentes

principales se encuentran estandarizados, ya que de esa manera se le otorga la misma “importancia” a todas las variables originales.

Los resultados de un ACP pueden resumirse de varias maneras. Una de ellas corresponde a una tabla de componentes donde es posible identificar las variables que más influye en cierto componente principal. Otro medio para interpretar los resultados es a través de diferentes gráficas que entregan información acerca de las relaciones entre las variables ingresadas y las observaciones. A continuación, se exponen las gráficas utilizadas para obtener resultados en este trabajo y cómo se interpretan cada una de ellas.

3.2.1.1 Gráfica de Puntaciones o *Score Plot*

Esta gráfica ubica los dos primeros componentes principales (o los que se deseen utilizar) como ejes ortogonales entre sí y distribuye en forma de puntos cada una de las observaciones con respecto a la relación con dichos ejes. De esta manera, es posible evaluar la estructura de los datos y detectar conglomerados, valores atípicos y tendencias. También es posible categorizar las observaciones para evaluar si la clasificación usada crea alguna distribución en la gráfica que pueda ser de utilidad.

En la Figura 3.6 se expone un ejemplo de este tipo de gráfica confeccionado a partir de una base de datos ficticia de 319 muestras de roca obtenidas de dos zonas de mineralización de un yacimiento “X”.

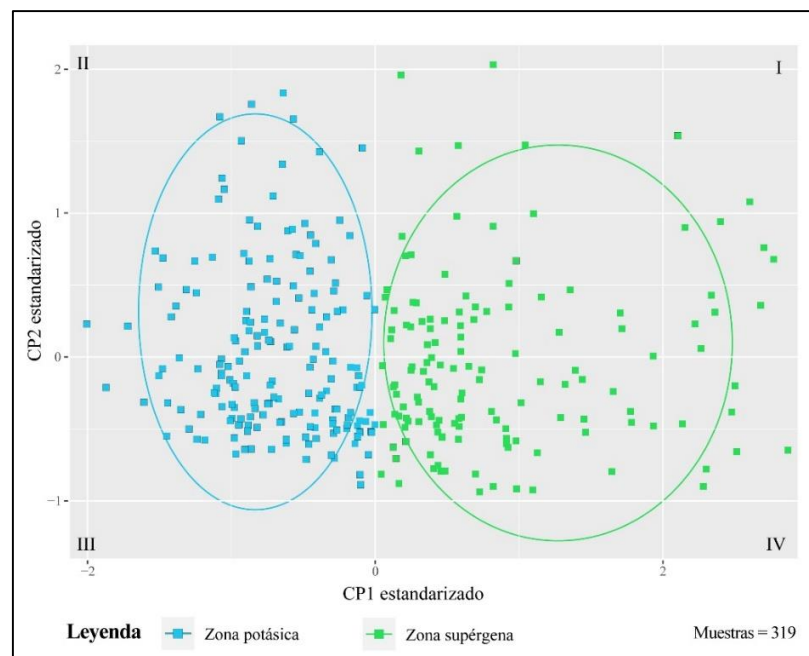


Figura 3.6: Ejemplo de gráfica de puntuaciones o *Score plot*.

Se desea averiguar si las abundancias de las fases minerales ingresadas como variables al ACP sirven para identificar cada una de estas zonas. En la gráfica existen dos grupos o conglomerados muy bien definidos por el CP1 (eje x), de tal manera que las muestras de la zona potásica se encuentran ubicadas en el lado negativo de este eje y las muestras de la zona supérgena en su lado positivo. De esta manera, las fases minerales sí son capaces de identificar a que zona corresponde cada muestra de roca.

Cuando los conglomerados no se logran separar tan claramente, es de utilidad agregar elipses estadísticas (como las de la Figura 3.6), las cuales engloban la tendencia general de las muestras pertenecientes a dichos conglomerados.

3.2.1.2 Gráfica de Influencias o *Loading Plot*

Esta gráfica reordena las variables originales y las representa como vectores cuya proyección sobre cada eje indica que tan importante es sobre el componente principal en cuestión. Los vectores crecen desde el origen y su sentido se determina a partir de un círculo imaginario ubicado allí (Figura 3.7).

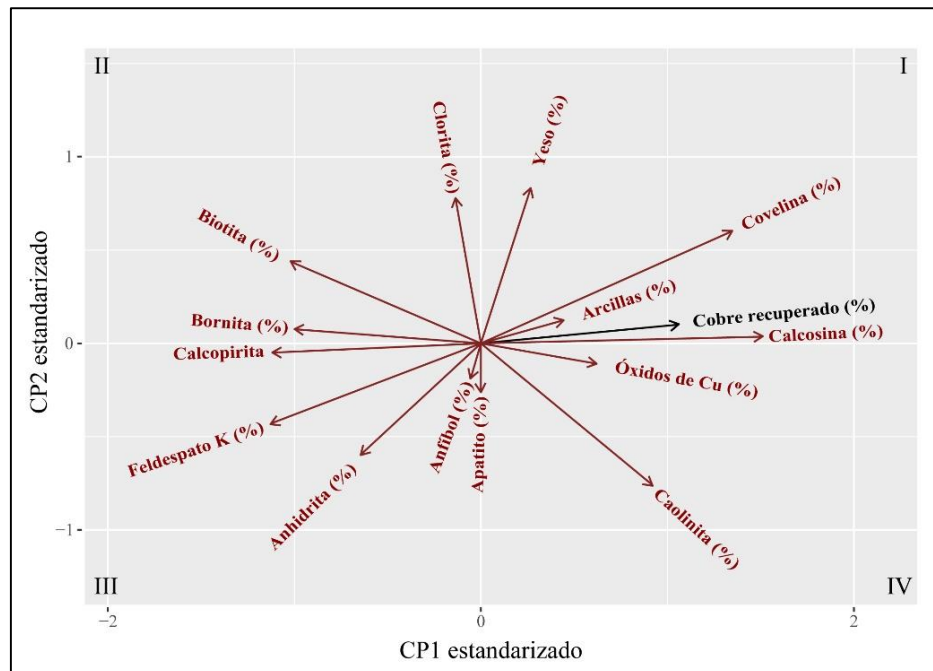


Figura 3.7: Ejemplo de gráfica de influencias o *Loading plot*.

El ángulo existente entre dos vectores indica el grado de correlación que poseen esas variables entre sí. Si el ángulo es próximo a cero la correlación es alta y positiva (ej: calcopirita y bornita),

si el ángulo es cercano 180° la correlación es alta y negativa (ej: covelina y feldespato potásico) y, por último, cuando el ángulo es cercano a 90° , las variables están pobremente relacionadas entre sí (ej: clorita y calcosina). También es importante considerar que, si la longitud de un vector es baja, las correlaciones con otro vector o con los propios componentes principales también lo será (ej: anfíbol y apatito).

Mediante esta gráfica también se puede analizar la relación de las variables de entrada con un determinado parámetro de estudio cuantitativo, en el caso del ejemplo anterior, con la cantidad de cobre recuperado. Así se puede interpretar, por ejemplo, que la cantidad de cobre recuperado se relaciona principalmente a calcosina y covelina, y que probablemente las cantidades de bornita y calcopirita son muy bajas en comparación a estos minerales secundarios.

3.2.1.3. Gráfica de doble proyección

Esta gráfica es una combinación de la gráfica de puntuaciones y de la gráfica de influencias, y es útil para determinar rápida y conjuntamente las observaciones que brindan cada una de ellas. En la Figura 3.8 se muestra un ejemplo que considera la combinación de las figuras 3.6 y 3.7.

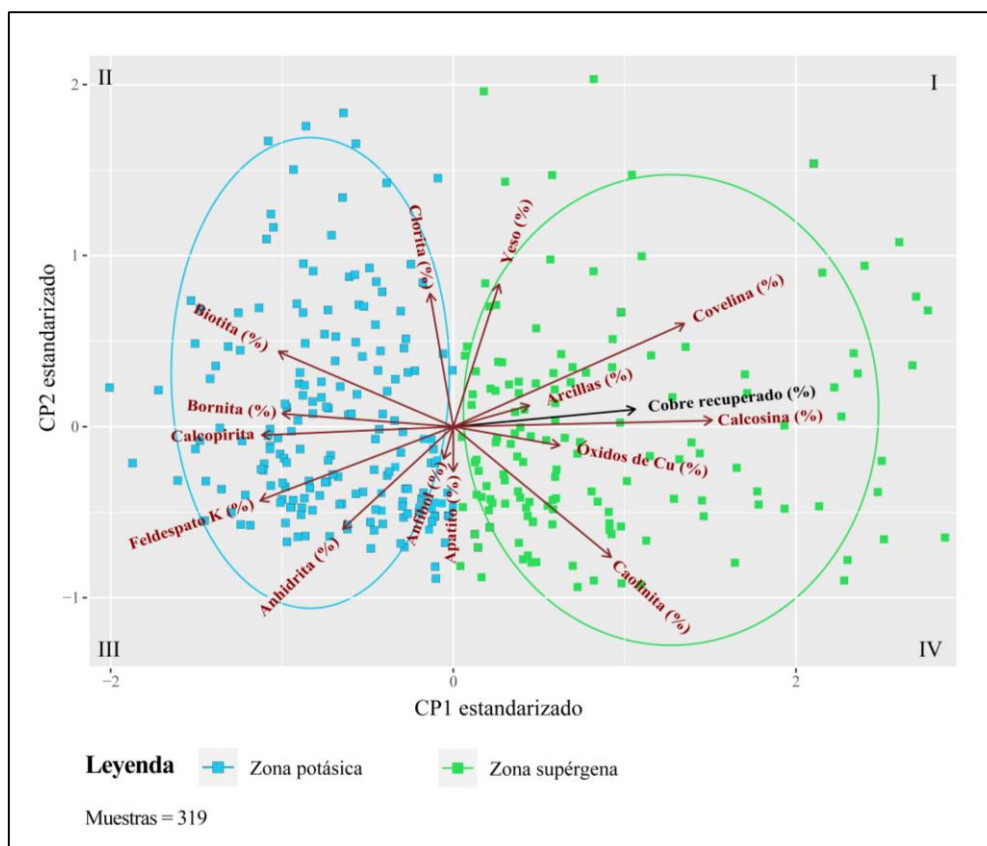


Figura 3.8: Ejemplo de gráfica de doble proyección.

3.2.2. Correlogramas o matrices de correlación múltiple

Esta herramienta estadística cuantifica el grado de asociación lineal entre las variables de una base de datos determinando un coeficiente de correlación. En este trabajo se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson, el cual mide el grado de asociación lineal entre dos variables cualesquiera y se calcula dividiendo la covarianza de ambas variables entre el producto de las desviaciones estándar de cada variable (Reinmann y otros, 2008). Se utiliza debido a la concordancia que posee con el ACP, pues éste extrae los componentes principales desde la matriz de correlaciones lineal de las variables originales.

Así, para un par de variables el coeficiente de correlación de Pearson puede tomar cualquier valor entre -1 y 1, siendo positivo cuando exista correlación directa entre ambas variables y negativo si la relación es inversa. Un valor ± 1 indica una relación lineal perfecta entre ambas variables (ya sea positiva o negativa), mientras que un valor de 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

En general, un coeficiente de correlación de $\pm 0,7$ indica una asociación significativa entre dos variables, no obstante, esto varía según el número de muestras analizadas ya que, al incrementar el número de muestras, los valores absolutos del coeficiente de correlación tienden a disminuir (Reimann y otros, 2008).

3.2.3 Análisis de diagramas de caja y bigote (*boxplot*)

Permite visualizar un conjunto de datos a partir de sus percentiles 25, 50 y 75, denominados también Cuartil Inferior (C1), Mediana (C2) y Cuartil Superior (C3) respectivamente (Krzywinski y Altman, 2014). El gráfico se compone de una caja que representa el rango de los datos comprendidos entre el C1 y el C3, que corresponden al 50% de los datos centrales, y por dos bigotes que representan el 25% superior e inferior de los datos del conjunto. (Figura 3.8).

La línea horizontal corresponde a la mediana, es decir, delimita el 50% de los datos superiores e inferiores, mientras que el círculo representa la media aritmética. Es necesario considerar que la media es un dato sensible ante la presencia de valores anómalos o atípicos, por lo que es conveniente utilizar la mediana.

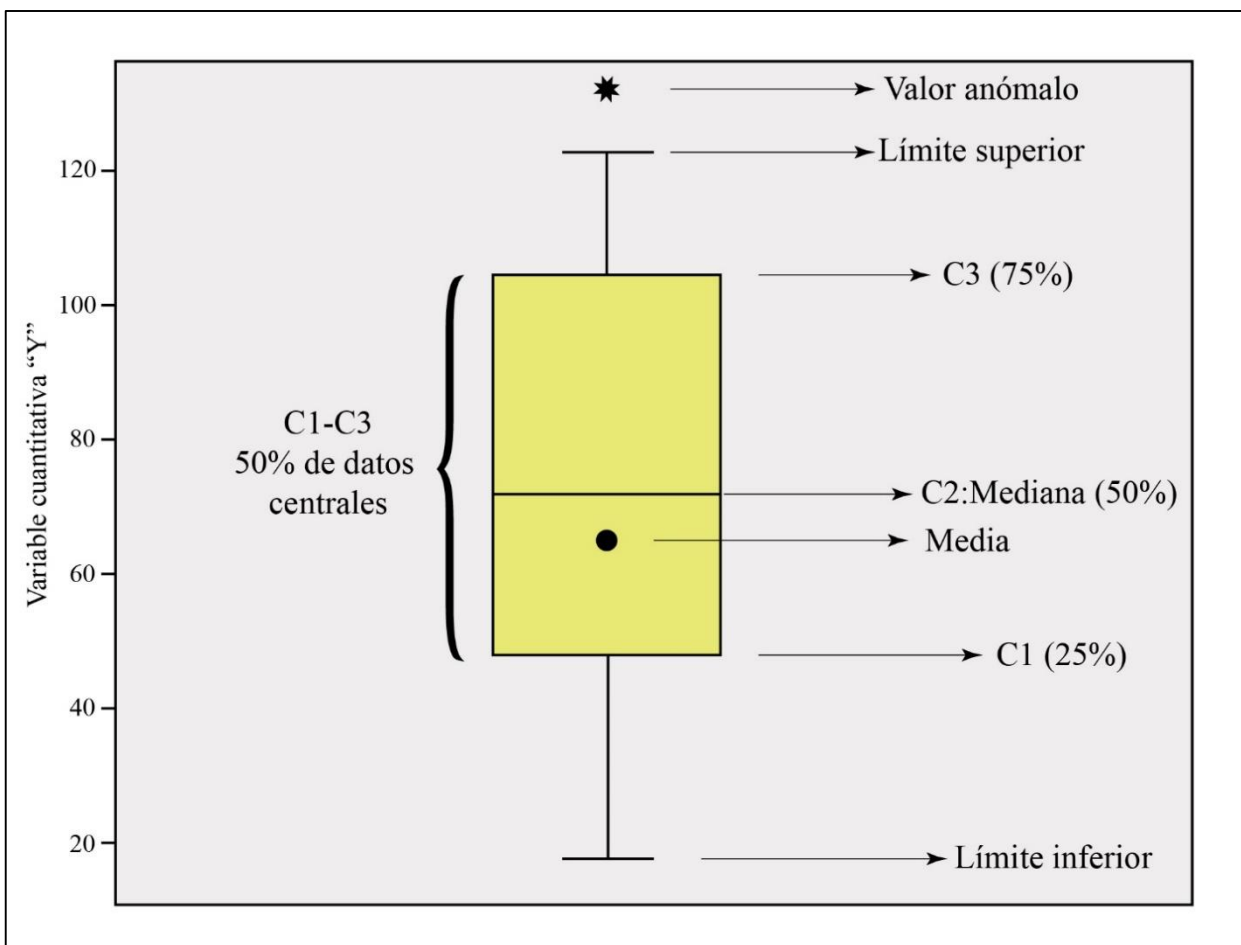


Figura 3.9: Ejemplo de diagrama de caja considerando una variable cuantitativa "Y".

4. METODOLOGÍA

4.1. Bases de datos

La base de datos principal entrega información de los procesos que ocurren en los espesadores de la planta. Esta se divide en dos partes: los parámetros de sedimentación, correspondientes a velocidad de sedimentación, porcentaje de sólido final y turbidez, y los parámetros reológicos de punto de fluencia sin cizalle y con cizalle (*yield point unshear* y *yield point fully shear*, respectivamente). Los datos del proceso de sedimentación corresponden a mediciones realizadas en ensayos de sedimentación estática, mientras que las de reología se obtienen a través del método de Vane. Las muestras utilizadas para estos ensayos fueron tomadas desde relaves *rougher* de flotación alcalina, las cuales poseen un P80 fijo de 150 μm y posteriormente acondicionadas con floculantes para evaluar su comportamiento. Para analizar los parámetros mencionados de la base de datos de **Sedimentación y reología**, se utilizan en conjunto tres bases de datos que se detallan a continuación:

- 1) **Tabla Maestra:** cuenta con datos geológicos de terreno como; litología, tipo de alteración, sectores productivos e información de sondajes, entre otros. Se agrega posteriormente las UGM de recuperación de cobre.
- 2) **Mineralogía:** posee datos de evaluación cuantitativa de minerales mediante mineralogía automatizada (QEMSCAN®).
- 3) **Granulometría Láser:** entrega información granulométrica de las muestras desde 300 a 1 μm y valores de diámetros característicos; P80, P50 y P10.

Las bases de datos de Mineralogía y Granulometría Láser contemplan únicamente muestras de alimentación o cabeza, para analizar de esta manera el material que entra a la planta y en base a éste, observar la respuesta y el comportamiento de los procesos de espesado.

Para conocer cuanta información poseen las bases de datos, se realiza una revisión de las cantidades de muestras por litología. Las Figuras 4.1 y 4.2 exponen los conteos para Mineralogía y Granulometría Láser respectivamente. En ellas es posible observar la existencia de litologías minoritarias que no poseen una cantidad de muestras adecuadas para someter al análisis, por lo que

solo se consideran para este trabajo **CMET**, **TO**, **PDI**, **PDA** y **BXANH**. Se descartan las muestras de BXPDI debido a que es una litología de brecha ígnea que no presenta mayor alteración hidrotermal.

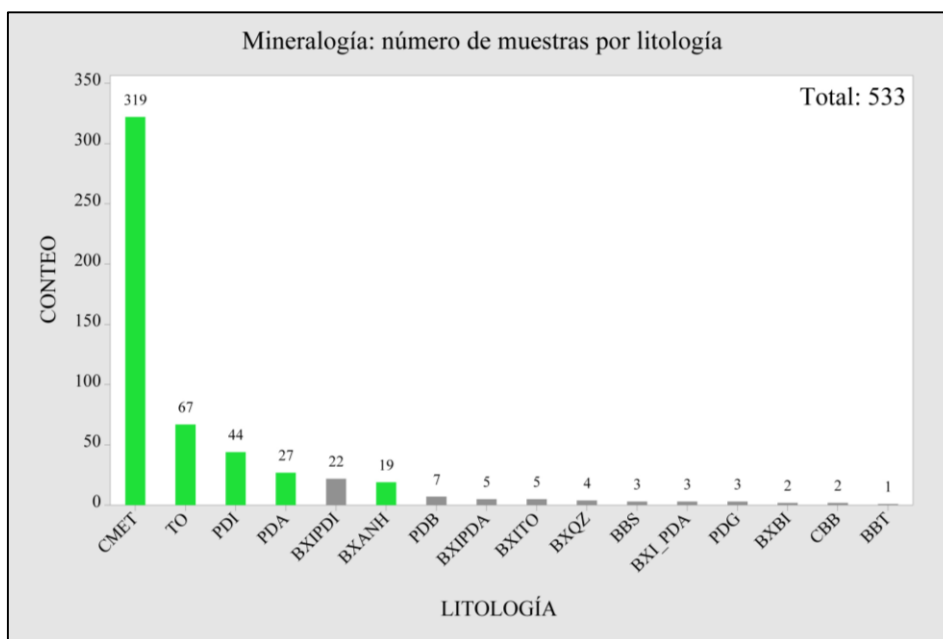


Figura 4.1: Cantidad de muestras por litología en la base de datos de mineralogía. Las barras verdes indican las litologías que son consideradas en los análisis. Se utilizan 476 muestras de un total de 533.

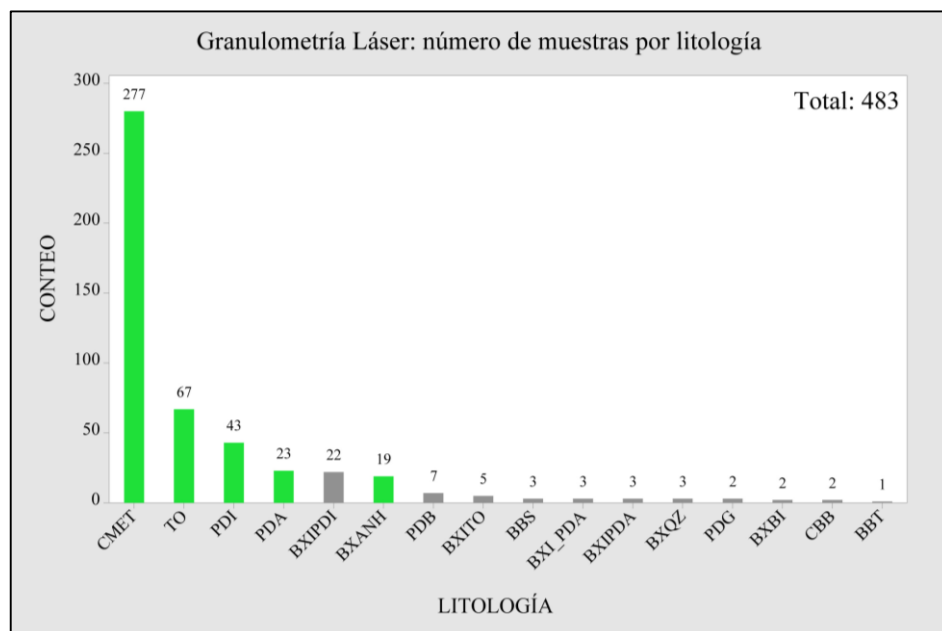


Figura 4.2: Cantidad de muestras por litología en la base de datos de granulometría láser. Las barras verdes indican las litologías que son consideradas en los análisis. Se utilizan 429 muestras de un total de 483.

Bajo estas consideraciones, se concatenan las bases de datos de la manera indicada en la Tabla 4.1, donde se detalla la cantidad de muestras existente para cada una de estas combinaciones y la finalidad que poseen.

Tabla 4.1: Combinaciones de las bases de datos. BD: base de datos.

Concatenaciones	Combinaciones	Número de muestras con información	Finalidad
BD1	Sedimentación y Reología + Mineralogía + Tabla Maestra	476	Análisis de influencia mineralógica
BD2	Sedimentación y Reología + Granulometría láser + Tabla Maestra	429	Análisis de influencia granulométrica
BD3	Sedimentación y Reología + Mineralogía + Granulometría láser + Tabla Maestra	429	Influencia conjunta de mineralogía y granulometría

4.2. Análisis para la búsqueda de resultados

El análisis utilizado en este trabajo es aplicado sobre cuatro de los cinco parámetros metalúrgicos de estudio, ya que los datos de turbidez con los que se cuenta no son confiables (detalles en apartado 5.4). Para identificar los controles geológicos de estos parámetros, se utilizan correlogramas y sucesivos ACP con la metodología que se expone a continuación.

4.2.1. Preparación de los datos

Es el paso previo a la obtención de resultados y consiste en organizar y preparar las bases de datos definiendo las variables de entrada y posibles *clusters* litológicos. Los pasos son los siguientes:

4.2.1.1. Definición de variables de entrada primarias

Las variables de entrada primarias corresponden a los minerales y fracciones granulométricas (en BD1 y BD2 respectivamente) que de forma inicial pueden ser potencialmente relevantes para los fines de esta investigación. Se deben identificar las variables que no presentan importancia para excluirlas de los análisis. De estas variables primarias se seleccionan posteriormente las más influyentes sobre cada parámetro metalúrgico.

Mineralogía (BD1)

Se seleccionan como variables de entrada primaria los minerales mayor abundancia relativa en las muestras. Se excluye cualquier fase que en promedio se encuentre bajo el 2%, ya que la influencia

que ejercen sobre el proceso de espesamiento es muy baja. De esta manera se seleccionan 8 minerales principales: **cuarzo, feldespato potásico, muscovita-sericita-illita, biotita, clorita, anhidrita-yeso, albita y plagioclasas** (referente a las plagioclasas cálcicas).

A ellos se adicionan **bornita, calcopirita y pirita**, que a pesar de ser minerales minoritarios y de poca relevancia en el proceso mismo, pueden ser utilizados como minerales *proxy* de los parámetros metalúrgicos analizados. Por último, tomando en cuenta la gran influencia de los minerales arcillosos sobre la sedimentación y reología, se consideran también, a pesar de sus bajas concentraciones; **caolinita** y el grupo conformado por fases arcillosas indiferenciadas, denominado desde ahora como **arcillas**.

La sumatoria de los porcentajes de estos 13 minerales posee un promedio del 95% del total, por lo tanto, la pérdida de información es mínima. De esta forma, considerando solo los minerales mayoritarios y potencialmente más influyentes, se logran resultados más “limpios” y de fácil interpretación en comparación con un análisis que considere todos los minerales presentes.

Granulometría Láser (BD2)

La base de datos de granulometría cuenta con 14 variables, por lo que se consideran todas ellas como variables de entrada primarias. Las fracciones granulométricas presentes son las de **300, 150, 75, 45, 38, 20, 12, 10, 5, 2 y 1 μm** , junto con los diámetros característicos de **P10, P50 y P80**.

4.2.1.2. Clusterización litológica

Al tener definidas las variables de entrada para cada base de datos, es conveniente buscar *clusters* o grupos de muestras que posean comportamientos similares, debido a posibles controles litológicos. Para ello se realizan ACP exploratorios en las BD1 y BD2, clasificando las muestras en los gráficos de doble proyección según la litología a la que pertenecen, con el fin de encontrar aglomerados que faciliten los análisis posteriores.

Mineralogía (BD1)

Esta base de datos presenta dos grandes aglomerados separados por el primer componente principal (Figura 4.3). En su extremo negativo se ubican prácticamente todas las muestras del CMET, mientras que en el positivo se localizan las muestras de TO, PDI y PDA y la mayoría de las muestras de BXANH. Esto representa diferencias importantes en base a mineralogía entre el CMET

y las demás litologías, por lo que se definen dos poblaciones litológicas. La primera de ellas conformada por todas las muestras del CMET y la segunda por las litologías restantes (TO, PDI, PDA y BXANH), denominadas para este trabajo como OTRAS LITOLOGÍAS.

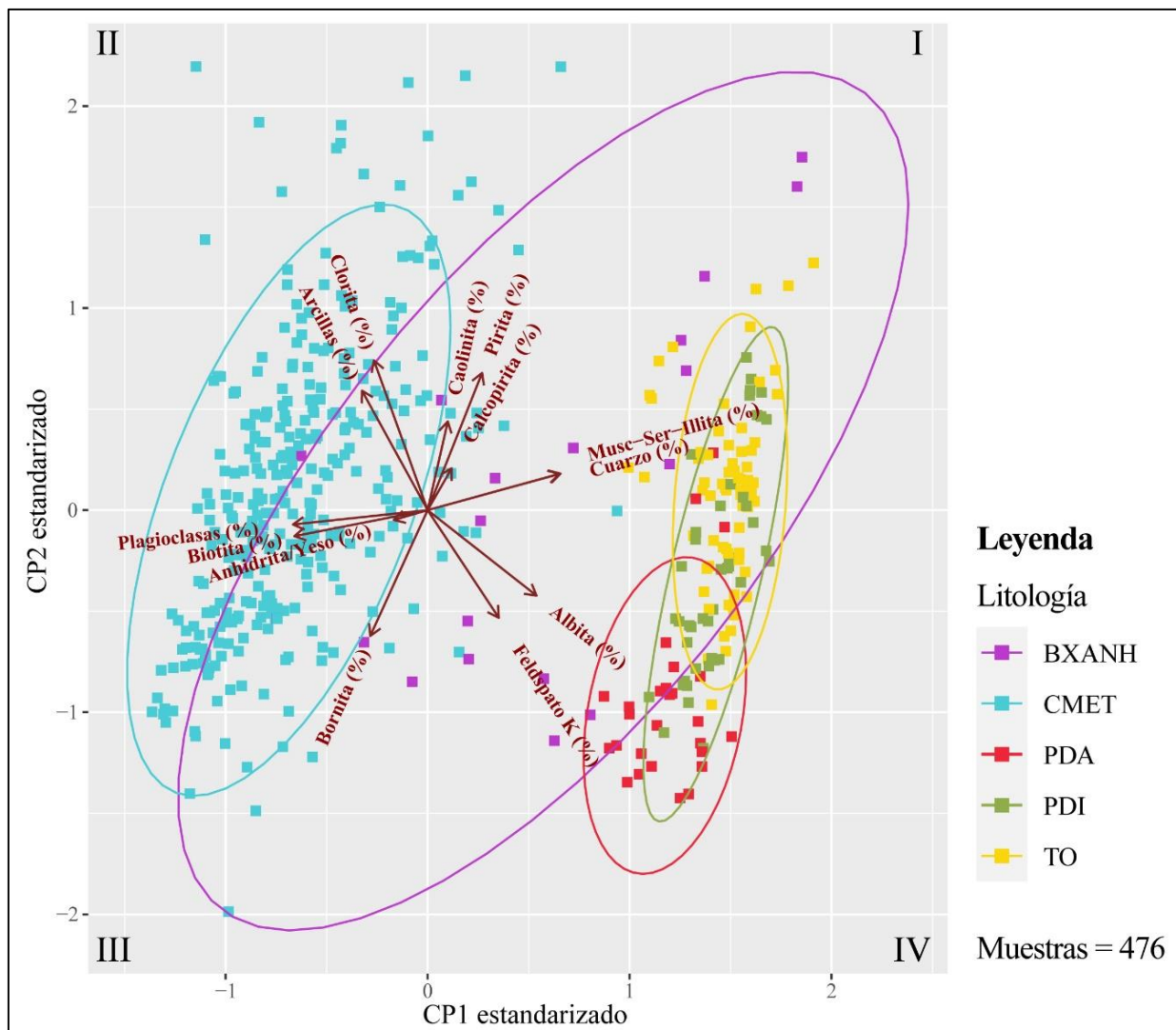


Figura 4.3: Gráfica de doble proyección del ACP exploratorio de mineralogía (BD1).

Granulometría Láser (BD2)

El ACP de esta base de datos (Figura 4.4) no arroja aglomerados claros. Solo las muestras del PDA poseen una leve distinción, ubicándose en el lado negativo del primer componente principal, pero no hay una separación contundente entre ésta y las demás litologías. Por esta razón, se decide agrupar a todas las muestras de la base de datos de granulometría en una sola gran población.

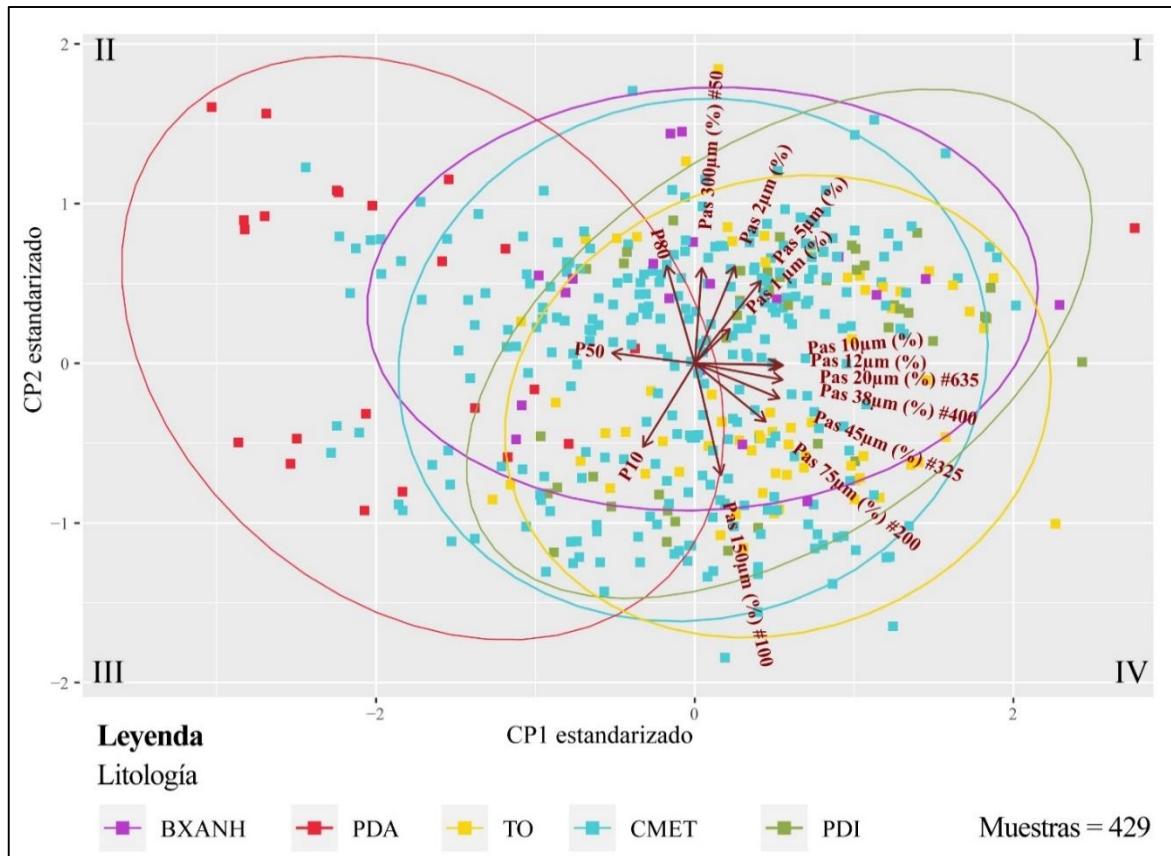


Figura 4.4: Gráfica de doble proyección del ACP exploratorio de granulometría láser (BD2).

4.2.2. Análisis de cada parámetro de control

Corresponde a la obtención de resultados propiamente tales y consiste en identificar las variables mineralógicas y granulométricas que mayor control ejercen sobre cada uno de los parámetros de sedimentación y reología. Para la obtención de estos resultados se utiliza la siguiente metodología.

4.2.2.1. Definición de variables influyentes

En la etapa de preparación de datos se definieron las variables de entrada potencialmente influyentes, pero es necesario identificar cuáles de ellas efectivamente lo son y para qué parámetro. Esto se realiza mediante correlogramas efectuados para cada una de las poblaciones litológicas definidas anteriormente en cada base de datos.

4.2.2.2. ACP y análisis univariados

Los minerales y las granulometrías que posean mayores correlaciones son usadas como variables de entrada finales en los ACP que corresponda. Además, son sometidas a un análisis univariable

de *boxplot* para visualizar en detalle qué tipo de relación poseen con el parámetro de control en cuestión.

4.2.2.3. Fenomenología

Los resultados son discutidos y asociados a un sentido fenomenológico, considerando las implicancias de cada mineral, granulometría, litología y alteración hidrotermal. Finalmente, los resultados son enfocados a proyectar el comportamiento en los espesadores y mejorar la planificación en base a los principales controles geológicos. En la Figura 4.5 se resume la metodología descrita anteriormente, la que se expone de forma más detallada en el siguiente capítulo junto con los resultados obtenidos.

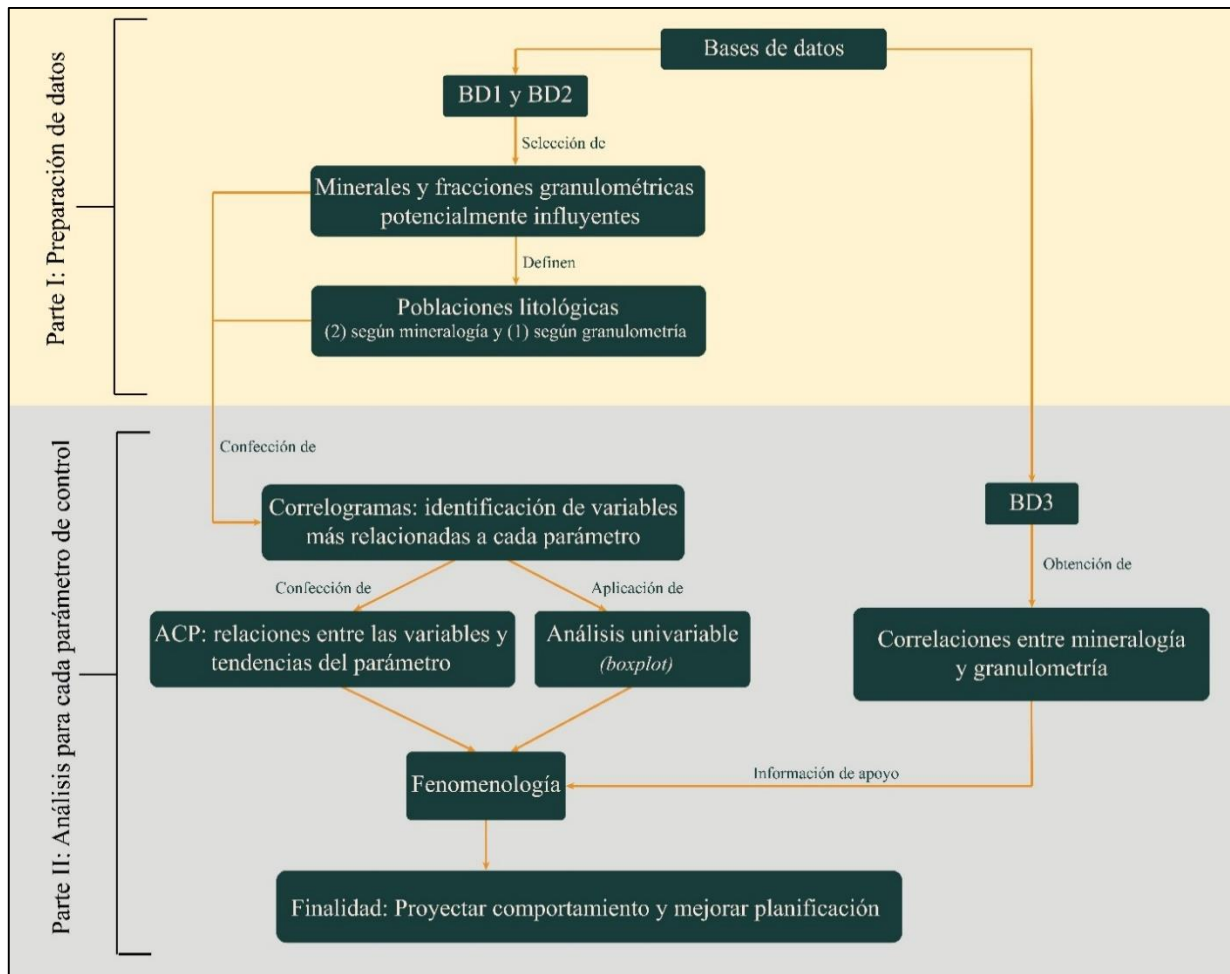


Figura 4.5: Diagrama de flujo de obtención de resultados. Los parámetros de estudio corresponden a velocidad de sedimentación, porcentaje de sólido final, punto de fluencia sin cizalle y punto de fluencia con cizalle. La primera parte del diagrama es un análisis general de los datos que permite trabajar con cada uno de ellos en la segunda parte de búsqueda de resultados.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Resultados generales

5.1.1. Correlaciones entre mineralogía y granulometría

Como información de apoyo, es útil conocer la relación existente entre las variables mineralógicas y granulométricas en cada una de las litologías abarcadas en este trabajo. Por esta razón, utilizando la BD3, se confeccionan correlogramas que representen dichas relaciones (Anexos B1 y B2).

Es importante mencionar que no existe una base de datos que entregue el grado de liberación para minerales de ganga, por lo tanto, las relaciones establecidas cada vez que se asocie mineralogía con granulometría son un tanto especulativas y se debe evaluar su validez con juicios geológicos y metalúrgicos. Esto se debe a que muchas partículas son poliminerales y no monominerales, por ende, no se puede asumir un grado de liberación del 100% donde el tamaño de partícula sea igual al tamaño del mineral.

Considerando lo anterior, las acotaciones más importantes obtenidas de este análisis son las siguientes:

- 1) En todas las litologías se evidencia que la asociación de cuarzo y muscovita-sericita-illita posee estrecha relación con fracciones finas (rango de 75 a 5 μm), siendo esto concordante con la alteración fílica presente en el yacimiento. Sin embargo, las litologías félsicas también poseen cuarzo asociado a granulometrías gruesas que podría relacionarse al cuarzo primario.
- 2) Los feldespatos (plagioclasas Ca, albita y feldespato potásico) muestran en todas litologías correlaciones negativas con las fracciones finas (rango de 75 a 2 μm), lo cual indica que estos minerales no forman parte de ellas (en demasía).
- 3) El PDA se distingue de las demás litologías, pues sus minerales poseen menores correlaciones con las granulometrías finas, lo cual concuerda con las características texturales descritas.
- 4) Los minerales asociados a una suite potásica presenta correlaciones negativas con las fracciones más finas, lo cual indica que esta paragénesis se asocia a texturas generalmente más gruesas.

5) Clorita, caolinita y las arcillas indiferenciadas poseen correlaciones positivas con las granulometrías ultrafinas (rango de 10 a 1 μm), comportamiento concordante con los tamaños característicos de estos minerales.

5.1.2. Identificación de variables influyentes

En los correlogramas de la Figura 5.1 se identifican las variables que poseen mayores correlaciones con los parámetros metalúrgicos en cada una de las poblaciones litológicas definidas anteriormente (con tonos azules si la correlación es positiva o con tonos rojos si la correlación es negativa).

Estas variables destacadas son las que finalmente serán consideradas en los ACP confeccionados para analizar cada parámetro en los siguientes subcapítulos.

Para velocidad de sedimentación se consideran las correlaciones con valores absolutos mayores a 0,17, para concentración de sólidos final mayores a 0,09, para *yield point unshear* y *yield point fully shear* mayores a 0,07. Independiente de los valores de correlación se incluyen siempre caolinita y arcillas indiferenciadas.

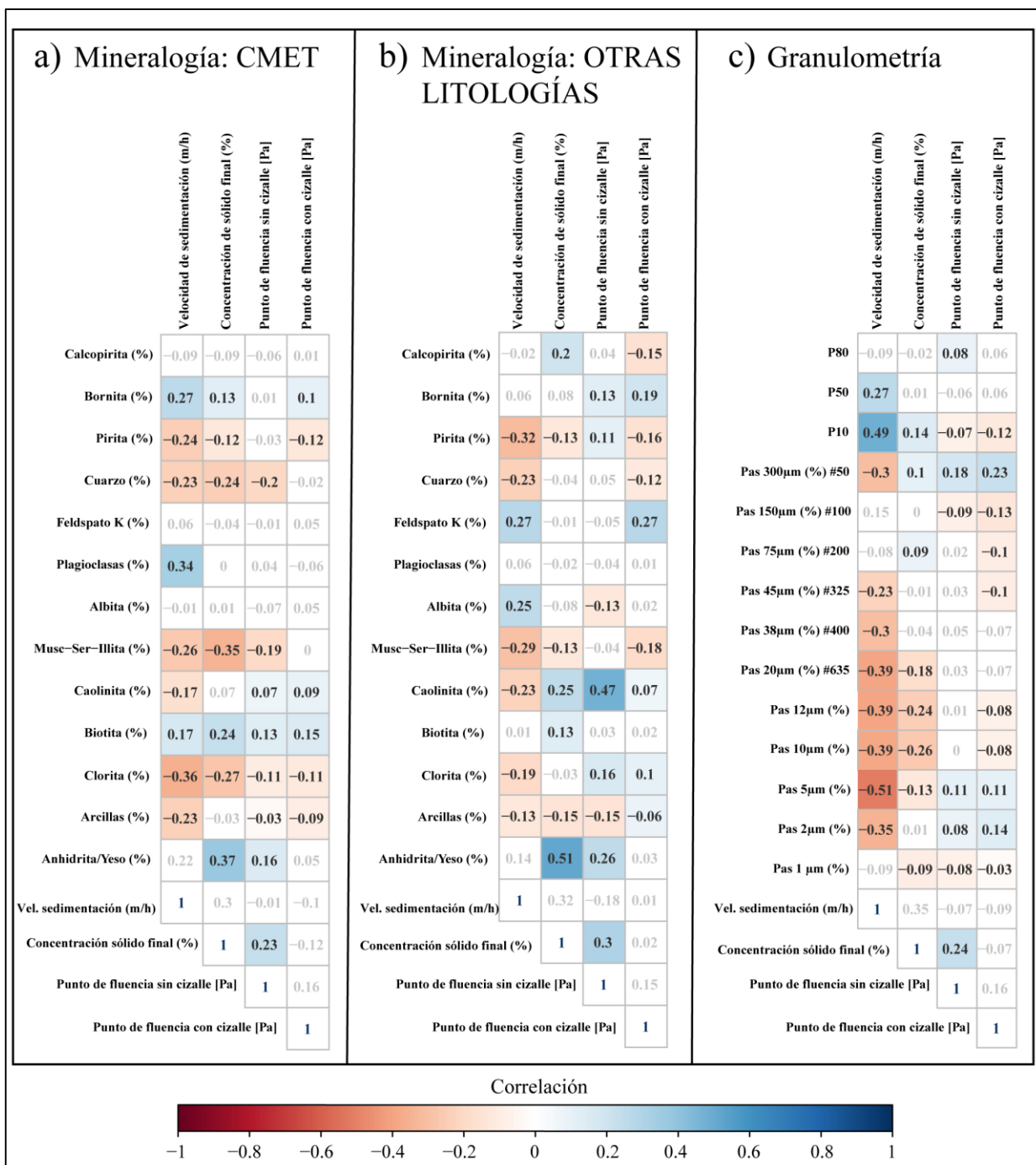


Figura 5.1: Correlogramas que indican las relaciones entre la mineralogía y granulometría con los parámetros de sedimentación y reología. (a) Correlograma de mineralogía de la población de muestras del CMET (n=319 muestras). (b) Correlograma de mineralogía de la población de muestras de OTRAS LITOLOGÍAS (n=157 muestras). (c) Correlograma de granulometría (n=429 muestras). Mientras más intensos los tonos de azul y rojo, mayor es la correlación existente.

5.2. Sedimentación: análisis de velocidad de sedimentación

5.2.1. ACP y análisis univariables

A continuación, se detallan las consideraciones utilizadas para confeccionar los ACP del parámetro de velocidad de sedimentación (Tabla 5.1).

Tabla 5.1: Definición de bases de construcción de ACP de velocidad de sedimentación. La clasificación de las muestras en quintiles es arbitraria y sus rangos de valores son incluidos en cada gráfica. Las variables de entrada son obtenidas de los correlogramas de la Figura 5.1.

Parámetro analizado	Base de datos	Población litológica	Clasificación de muestras en ACP	Variables de entrada y sus correlaciones con el parámetro analizado
Velocidad de sedimentación	Mineralogía (BD1)	CMET	Quintiles de velocidad de sedimentación	Clorita (-0,36), plagioclasas Ca (0,34), bornita (0,27), muscovita-sericita-illita (-0,26), pirita (-0,24) y cuarzo (-0,23), arcillas (-0,23), biotita (0,17) y caolinita (-0,17)
	Mineralogía (BD1)	OTRAS LITOLOGÍAS		Pirita (-0,32), muscovita-sericita-illita (-0,29), feldespato potásico (0,27), albita (0,25), cuarzo (-0,23) y caolinita (-0,23), clorita (-0,19) y arcillas (-0,13)
	Granulometría (BD2)	Todas las litologías		5 μm (-0,51), P10 (0,49), 20, 12 y 10 μm (-0,39), 2 μm (-0,35), 300 y 38 μm (-0,30), P50 (0,27) y 45 μm (-0,23)
	Mineralogía y Granulometría (BD3)	Todas las litologías		La combinación de las variables utilizadas en los análisis anteriores

5.2.1.1. Mineralogía: CMET

En la Figura 5.2 se observa que la velocidad de sedimentación aumenta desde el cuadrante I al II, tendencia controlada mayormente por el CP1, el cual separa los minerales según el signo de correlación. A la izquierda las fases con correlaciones positivas y a la derecha los minerales con correlaciones negativas.

El aumento de la velocidad de sedimentación es gradual, ya que las elipses estadísticas van mostrando un desplazamiento leve hacia la izquierda a medida que se avanza de quintil y están solapadas entre sí. Es posible interpretar algunas paragénesis de alteración observando la correlación entre minerales. Por ejemplo, el sector izquierdo de la gráfica donde se ubican las muestras con altos niveles de biotita y bornita (más anhidrita que no se incluyó), calza con una alteración potásica en que la velocidad de sedimentación es mayor. En el extremo contrario también

es posible ver la correlación entre cuarzo y muscovita-sericita-illita, concordante con la alteración fílica presente en el yacimiento.

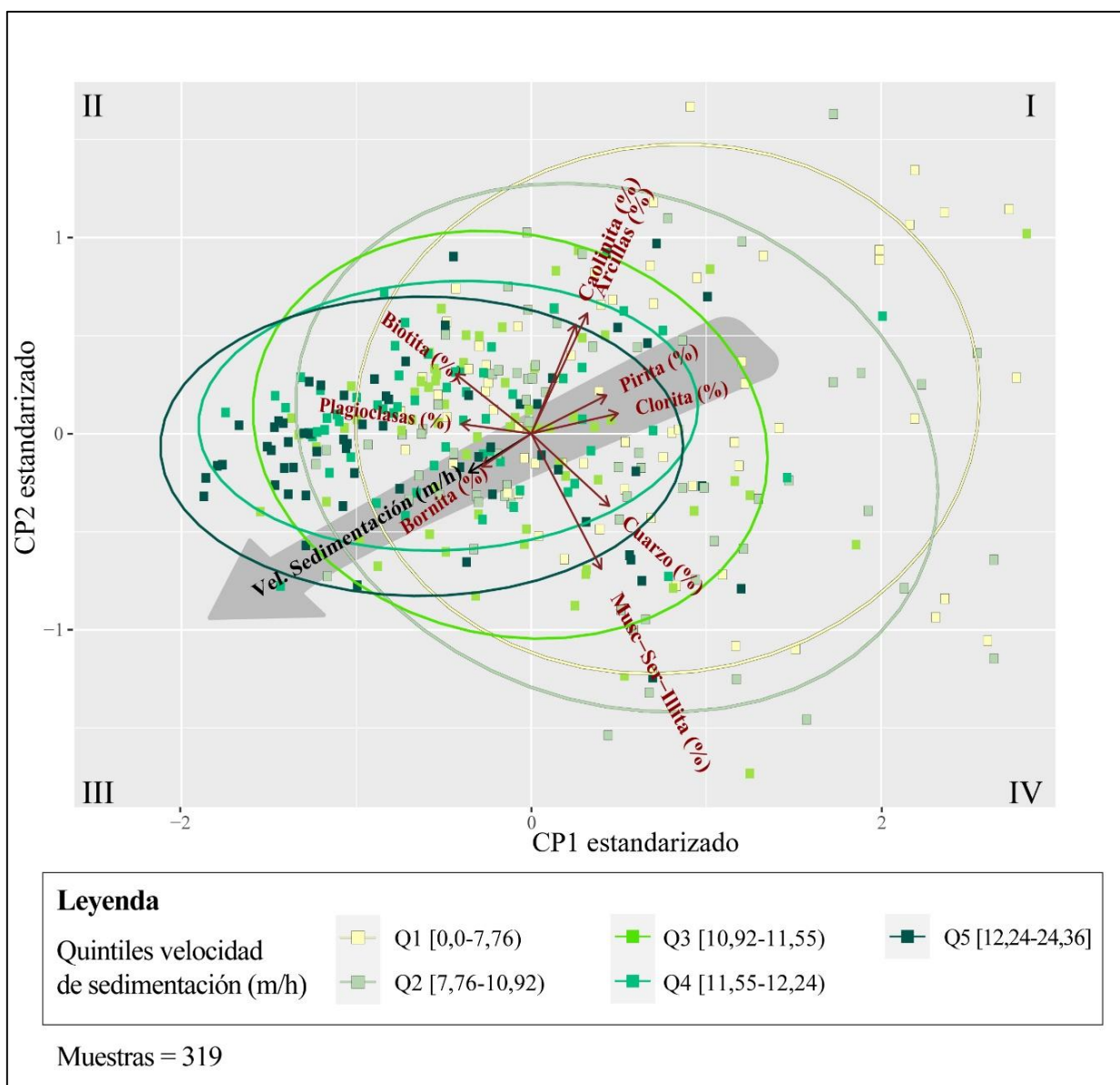


Figura 5.2: Gráfica de doble proyección del ACP de mineralogía-velocidad de sedimentación (CMET). El vector de velocidad de sedimentación del ACP está coloreado en negro. La flecha gris representa la tendencia general del aumento de la velocidad de sedimentación. Los rangos de valores de cada quintil son expuestos en la leyenda de la gráfica.

Con el análisis anterior no se determina claramente el rol de cada fase mineral. Es posible que la presencia o ausencia, el aumento o la disminución de uno o de varios minerales controle la variación gradual de la velocidad de sedimentación. Por ello se confeccionan gráficos de caja y bigotes con deciles de porcentaje de abundancia mineral versus velocidad de sedimentación. De

esta manera, es posible identificar la existencia de posibles puntos de inflexión o gradientes continuos que obedezcan al aumento o disminución de los distintos minerales considerados en el ACP.

Los gráficos de la Figura 5.3 están ordenados de forma descendente según correlación (valor absoluto) y en ellos, es posible visualizar que no existen quiebres importantes en la evolución de las medianas de cada decil en la mayoría de los minerales.

La línea roja que indica la tendencia de las medianas, se manifiesta como un gradiente ascendente o descendente según el mineral en cuestión. Esto indica que, por ejemplo, conforme aumenta la cantidad de plagioclasa y bornita, los valores de velocidad de sedimentación tienden a aumentar gradualmente. Por el contrario, el aumento de los minerales como clorita y muscovita-sericita-illita se relaciona a una disminución paulatina en los valores de este parámetro. En arcillas indiferenciadas y caolinita se observan quiebres en los deciles 7 y 8 respectivamente, mientras que en biotita existe un quiebre en el tercer decil lo cual es consistente con la alteración potásica.

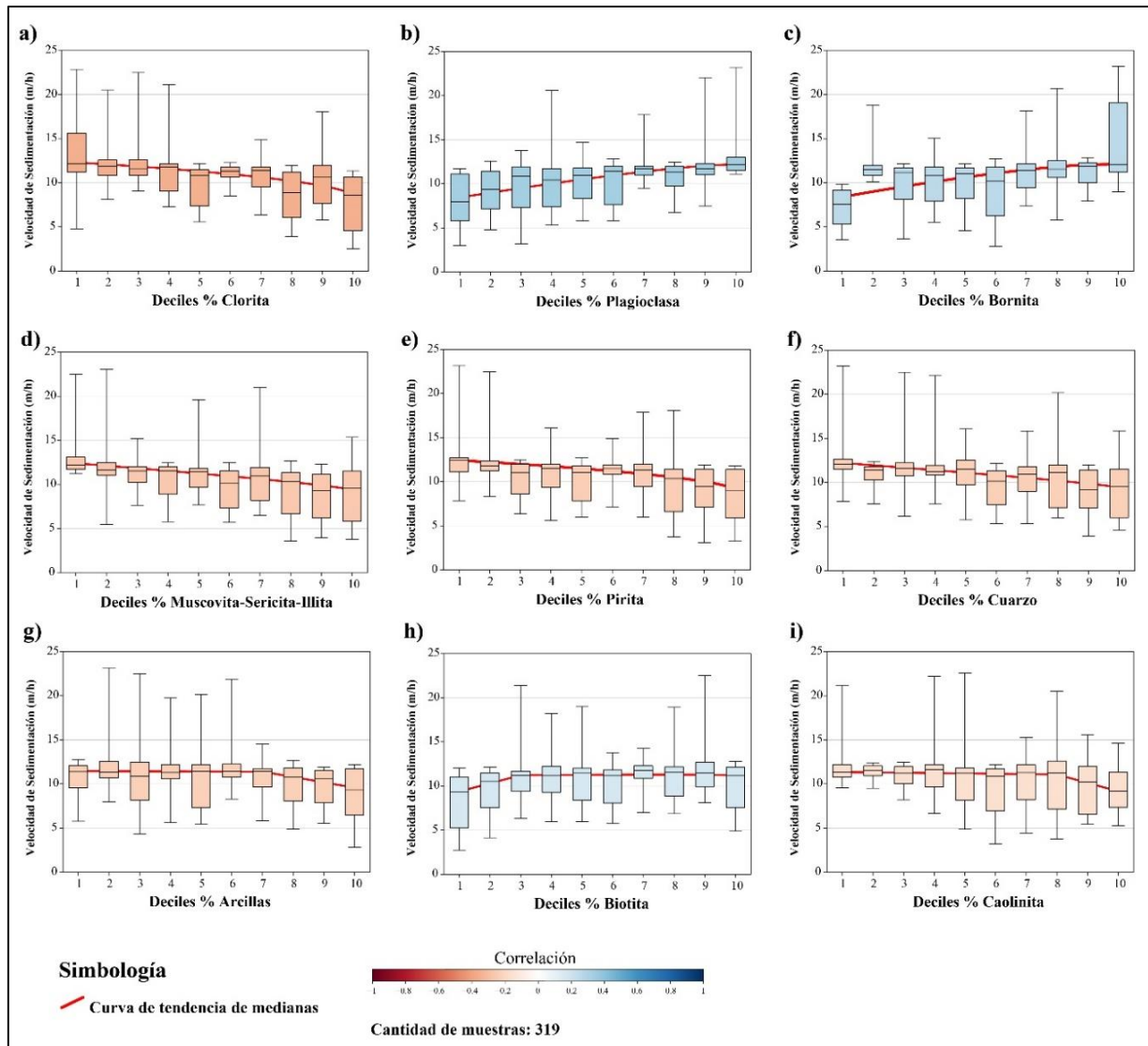


Figura 5.3: Gráficos de caja de deciles de porcentaje mineral y velocidades de sedimentación (CMET).

5.2.1.2. Mineralogía: OTRAS LITOLOGÍAS

El gráfico de doble proyección de la Figura 5.4 muestra que la velocidad de sedimentación aumenta desde el cuadrante I al III. Nuevamente el aumento de la velocidad es gradual, pues las elipses estadísticas se desplazan levemente, solapándose entre sí. Mayores cantidades de feldespato potásico y albita se relacionan con elevados valores de velocidad de sedimentación. Como se puede observar en el Anexo B3, estos minerales se encuentran asociados estrechamente con el PDA, litología que está afectada en su mayoría por una alteración potásica ácida (con feldespato potásico, pero sin biotitización). Los demás minerales, en su mayoría laminares con excepción del cuarzo y

pirita, están asociados a menores velocidades de sedimentación y la fuerte correlación entre cuarzo y muscovita-sericita-illita, nuevamente hace alusión a una alteración fílica característica en la mayoría de las litologías pertenecientes a esta población de muestras.

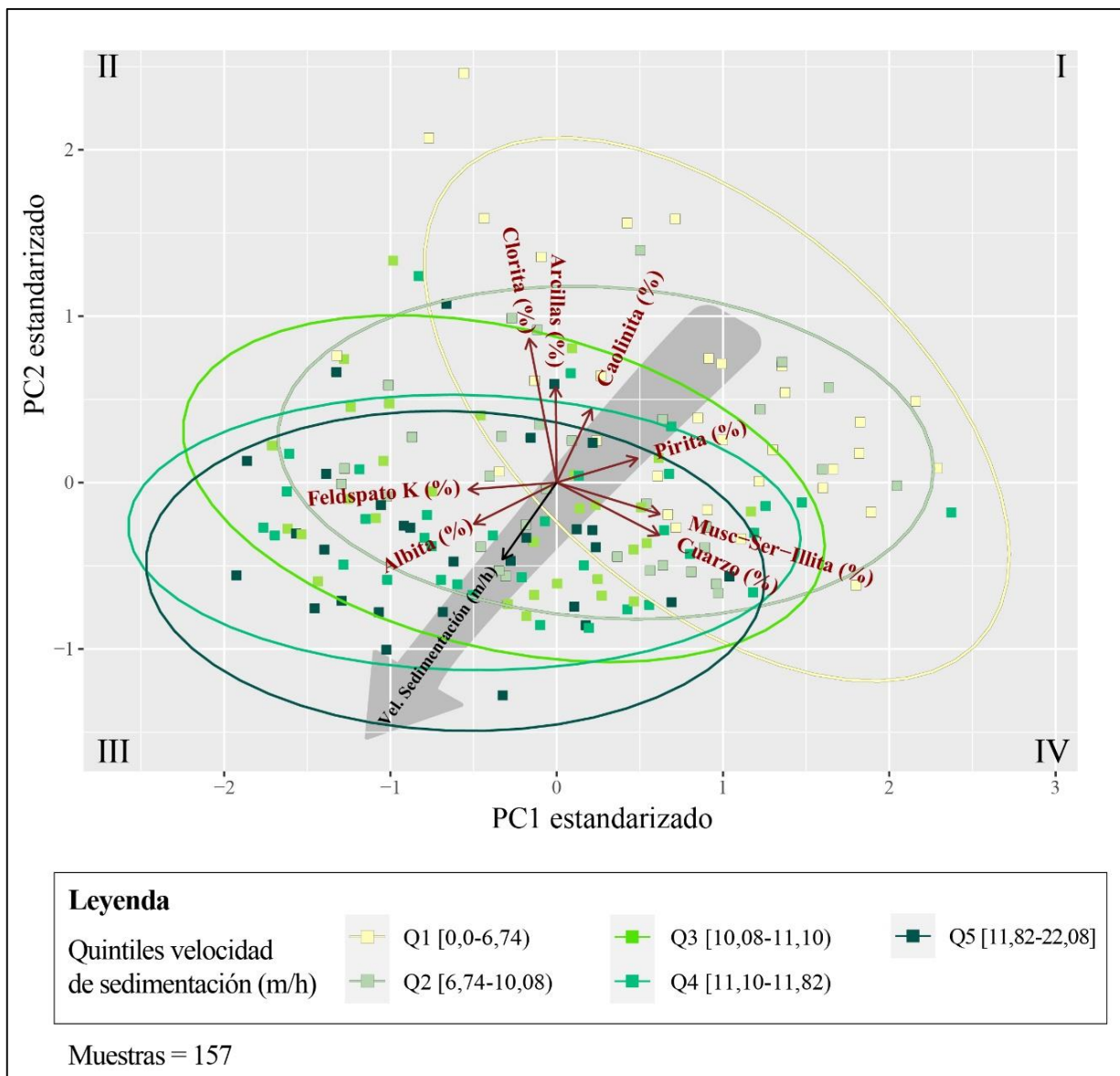


Figura 5.4: Gráfica de doble proyección del ACP mineralogía-velocidad de sedimentación (OTRAS LITOLOGÍAS).

Los gráficos de esta población litológica muestran que la curva de tendencia de las medianas de cada decil experimenta disminuciones o aumentos graduales en la velocidad de sedimentación, de manera similar a lo ocurrido en el CMET (Figura 5.5). Para muscovita-sericita-illita, cuarzo y clorita, se experimenta un quiebre en el decil 8, lo cual es concordante con la alteración fílica.

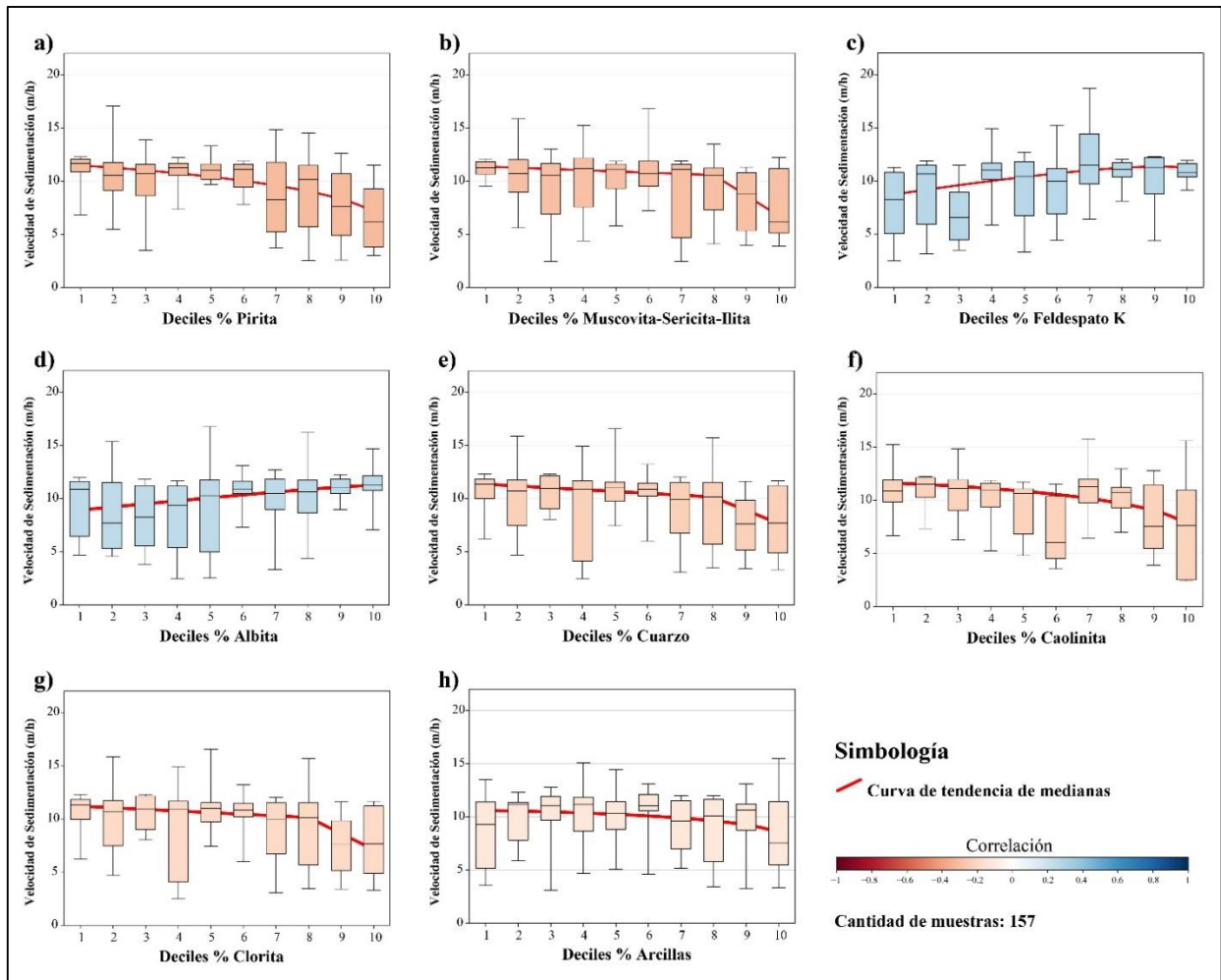


Figura 5.5: Gráficos de caja de deciles de porcentaje mineral y velocidades de sedimentación (OTRAS LITOLOGÍAS).

5.2.1.3. Granulometría

En el gráfico de doble proyección de la Figura 5.6 se observa que la tendencia de la velocidad de sedimentación en relación a las diferentes fracciones granulométricas, aumenta desde el cuadrante IV al II. A velocidades menores se encuentran asociados fuertemente los tamaños de 5 y 2 μm , a velocidades medias los de 45, 38, 20, 12 y 10 μm y solo altos valores de P10 aparecen muy correlacionados a elevados valores de velocidad. El tamaño de 300 μm sorpresivamente se correlaciona con bajas velocidades de sedimentación

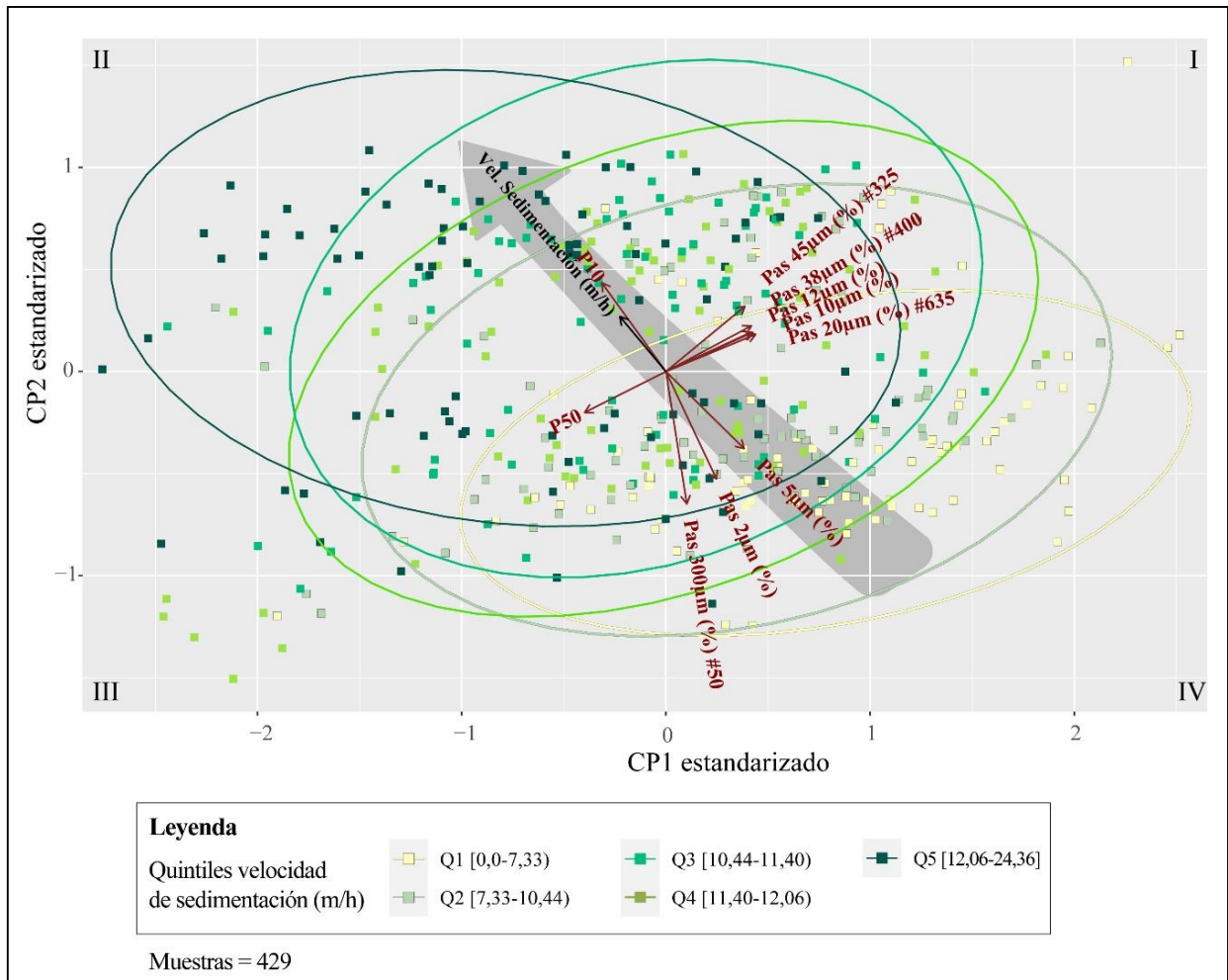


Figura 5.6: Gráfica de doble proyección del ACP granulometría-velocidad de sedimentación.

La tendencia general indica que la velocidad de sedimentación aumenta gradualmente a medida que disminuye el porcentaje de granulometrías finas, con excepción de la fracción de 300 μm .

En la gráfica de doble proyección del Anexo B4, donde las muestras son clasificadas por litología, es posible determinar que el PDA posee generalmente velocidades de sedimentación más altas que las demás litologías.

Por su parte, los gráficos de caja (Figura 5.7) muestran en general variaciones graduales de la velocidad de sedimentación en relación con los tamaños de manera similar a lo visto en mineralogía. Cabe destacar que los tamaños de 2, 10, 12 y 20 μm poseen quiebres claros en los últimos deciles, evidenciando que las granulometrías finas al ser abundantes, disminuyen considerablemente la velocidad de sedimentación.

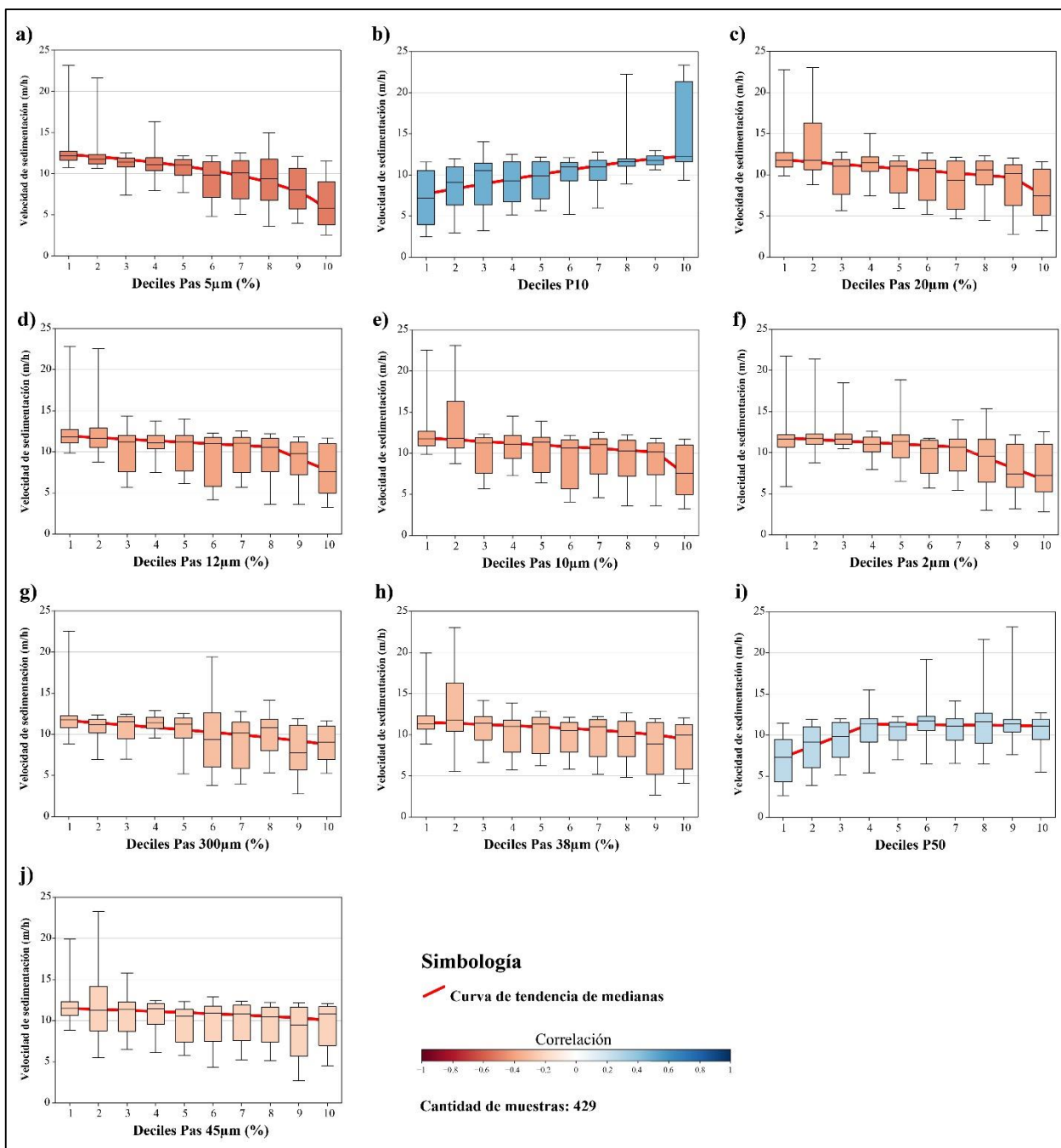


Figura 5.7: Gráficos de caja de deciles de fracciones granulométricas y velocidad de sedimentación.

5.2.1.4. ACP compilatorio

El ACP de la Figura 5.8 tiene como finalidad entregar una visualización de las relaciones existentes entre las variables mineralógicas y granulométricas. Se confecciona mediante la BD3, que abarca todas las muestras disponibles y utiliza como variables de entrada cada mineral y cada tamaño

granulométrico usado por lo menos una vez en los ACP anteriores. Se agrega a estas variables la fracción de 1 μm y se utilizan el CP1 y CP4 como ejes de la gráfica.

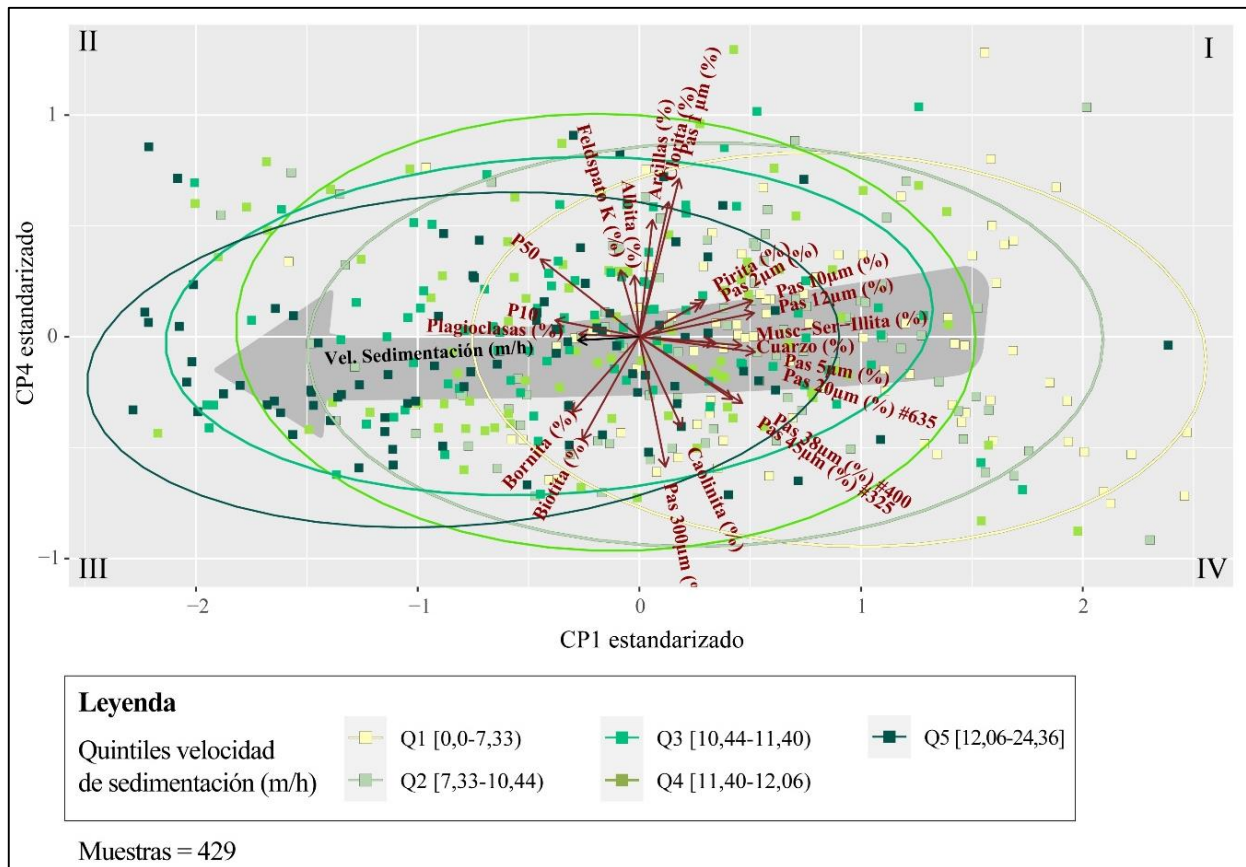


Figura 5.8: Gráfica de doble proyección del ACP que conjuga las bases de datos de mineralogía y granulometría láser (BD3) para analizar el parámetro de velocidad de sedimentación.

La velocidad de sedimentación aumenta de derecha a izquierda a lo largo del CP1. Sus valores más bajos se asocian mayoritariamente a la paragénesis de cuarzo y muscovita-sericita-illita, ligada al rango de tamaños de 45 a 2 μm . Menos evidente en este caso es el rol de la clorita, que es minimizado al considerar todas las litologías en este análisis, ya que solo en el CMET su influencia es elevada, cuestión que podría estar ligada al tamaño de la clorita, más gruesa en las litologías félsicas y más fina en el CMET.

Por otro lado, los valores más elevados de este parámetro se relacionan a los feldespatos, a la presencia de biotita, a anhidrita-yeso y a las fracciones más gruesas.

5.2.2. Fenomenología de los resultados

Las variables geológicas a escala mineralógica y granulométrica que resultaron más influyentes coinciden, la mayoría de las veces, con lo teóricamente esperado considerando los factores que controlan la velocidad de sedimentación de partículas sólidas. Por un lado, las muestras con mayor porcentaje de fracciones granulométricas finas se correlacionaron con menores velocidades de sedimentación, debido a que mientras más pequeño sea el tamaño de la partícula, mayor es el tiempo necesario para sedimentar. La tendencia opuesta se observó en las muestras que presentan mayor proporción de partículas gruesas, pues esa característica otorga un tiempo de sedimentación más corto.

La granulometría de las muestras de roca está directamente asociada con los minerales presentes en ellas y con sus características texturales. A pesar que es erróneo asumir en cada mineral un grado de liberación del 100%, las correlaciones han demostrado que es posible encontrar un vínculo entre cada fase y algunos tamaños granulométricos.

Independiente del tamaño de sus partículas, los minerales poseen otras características intrínsecas que afectan su comportamiento ante la sedimentación y de cierta manera, explican parte de los resultados obtenidos para cada uno. A continuación, en la Tabla 5.2 se detalla la fenomenología que explica lo observado en cada fase mineral.

Tabla 5.2: Características que explican las correlaciones minerales con velocidad de sedimentación.

Minerales	Correlación con velocidad de sedimentación	Posible fenomenología tras comportamiento ante sedimentación
Feldespatos (plagioclasas Ca, albita y feldespato potásico)	Positiva	-Tectosilicatos con forma cristalina favorable para sedimentar -Resultados e información de terreno indican expresión mediante texturas faneríticas (mayoritariamente)
Muscovita-sericita-illita y clorita	Negativa	-Filosilicatos con formas cristalinas laminares (alto roce con el medio acuoso) - Granulometrías finas ($< 45 \mu\text{m}$)
Biotita	Positiva	-Forma laminar y granulometría fina (difícil sedimentación) -En contraste, su asociación a una alteración potásica central podría explicar su correlación positiva, donde su paragénesis y textura de roca original propician una rápida sedimentación.
Cuarzo	Negativa	-Resultados indican que se expresa mayormente en texturas finas, lo que lo hace un mineral desfavorable para obtener altas velocidades de sedimentación
Caolinita y arcillas (indiferenciadas)	Negativa	-Minerales de granulometrías ultrafinas ($< 2 \mu\text{m}$) -Formas cristalográfica laminar -Algunas arcillas pueden presentar desbalance eléctrico -En conclusión, son minerales desfavorables pese a sus bajas abundancias ($< 5\%$)

Los minerales metálicos como calcopirita, bornita y pirita muestran correlaciones claras con la velocidad de sedimentación y podrían ser considerados como minerales *proxy* de este parámetro, pues están asociados a las alteraciones hidrotermales y a las variaciones de los minerales de ganga. Sin embargo, se encuentran en bajas cantidades en los relaves, por lo que no tienen una influencia real en este parámetro metalúrgico. Mucho menor es su significancia si se considera que ya fueron recuperadas por flotación (por lo menos bornita y calcopirita).

5.2.3. Variaciones según litología y alteración hidrotermal

El PDA es la única litología que de manera general posee velocidades de sedimentación mayores (Figura 5.9.a). El CMET, al presentar una composición mineralógica y textural variable, tiene un amplio rango de velocidades de sedimentación (gran cantidad de valores anómalos). Finalmente, el PDI, TO y BXANH poseen distribuciones de valores similares entre sí y levemente menores a lo observado en el CMET.

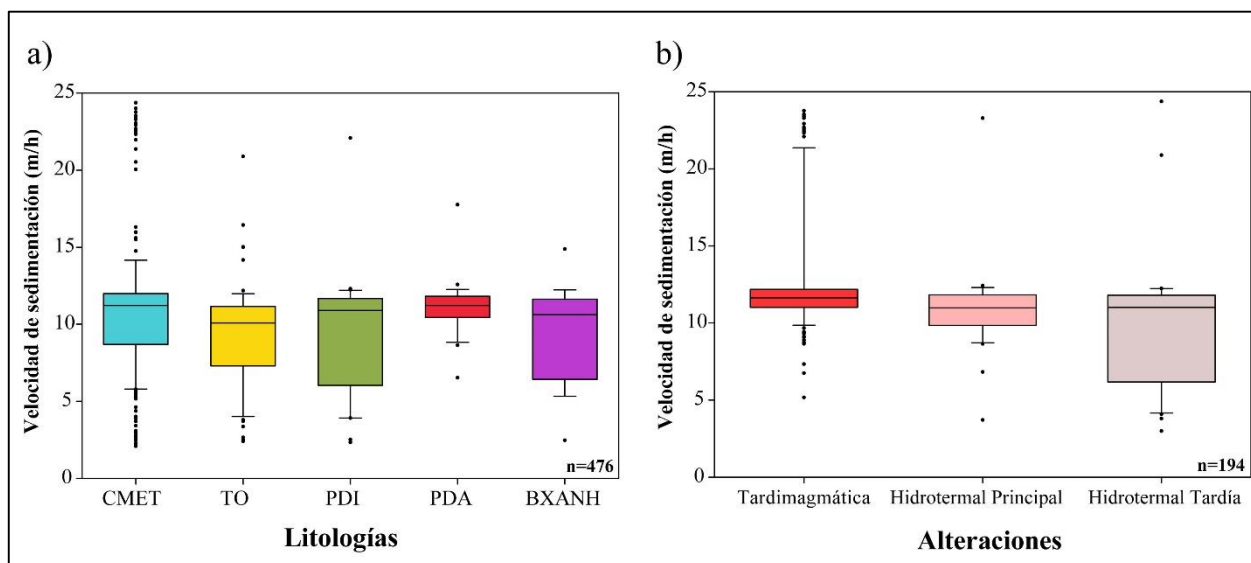


Figura 5.9: Velocidad de sedimentación en relación con la litología y alteración hidrotermal. (a) y (b) respectivamente.

La alteración tardimagnética muestra velocidades de sedimentación mayores (Figura 5.9.b), debido a que no posee una gran proporción de minerales de alteración desfavorables para este proceso (solo biotita y algo de clorita) y, además, al ser una alteración de carácter central, afecta a rocas originales con texturas más gruesas. Esto concuerda con los valores asociados al CMET y PDA, litologías afectadas por esta alteración.

Las alteraciones hidrotermal principal y tardía, muestran similares valores de velocidad de sedimentación. Éstos son notablemente más bajos que en el CMET, sobre todo en sus cuartiles inferiores y concuerdan con los valores observados en la TO, PDI y BXANH (donde mayormente se expresan estas alteraciones). Zonas de contacto del CMET también se ven influenciadas por ellas, lo cual podría explicar la amplia variación de la velocidad en esta litología.

5.2.4. UGM y velocidad de sedimentación

Para analizar la relación entre estas divisiones espaciales del yacimiento y la velocidad de sedimentación, se realiza un ACP con 194 muestras que contaban con la categorización por UGM. En la Figura 5.10 existe un aumento gradual de la velocidad de sedimentación desde la UGM 30 hacia la UGM 50, es decir, el centro del cuerpo mineralizado posee en general mejores rendimientos en este proceso que la periferia. Sin embargo, esta tendencia no se cumple en todos los casos posibles, pudiendo haber ejemplares de la UGM 30 con mayores velocidades que ciertas muestras de la UGM 50.

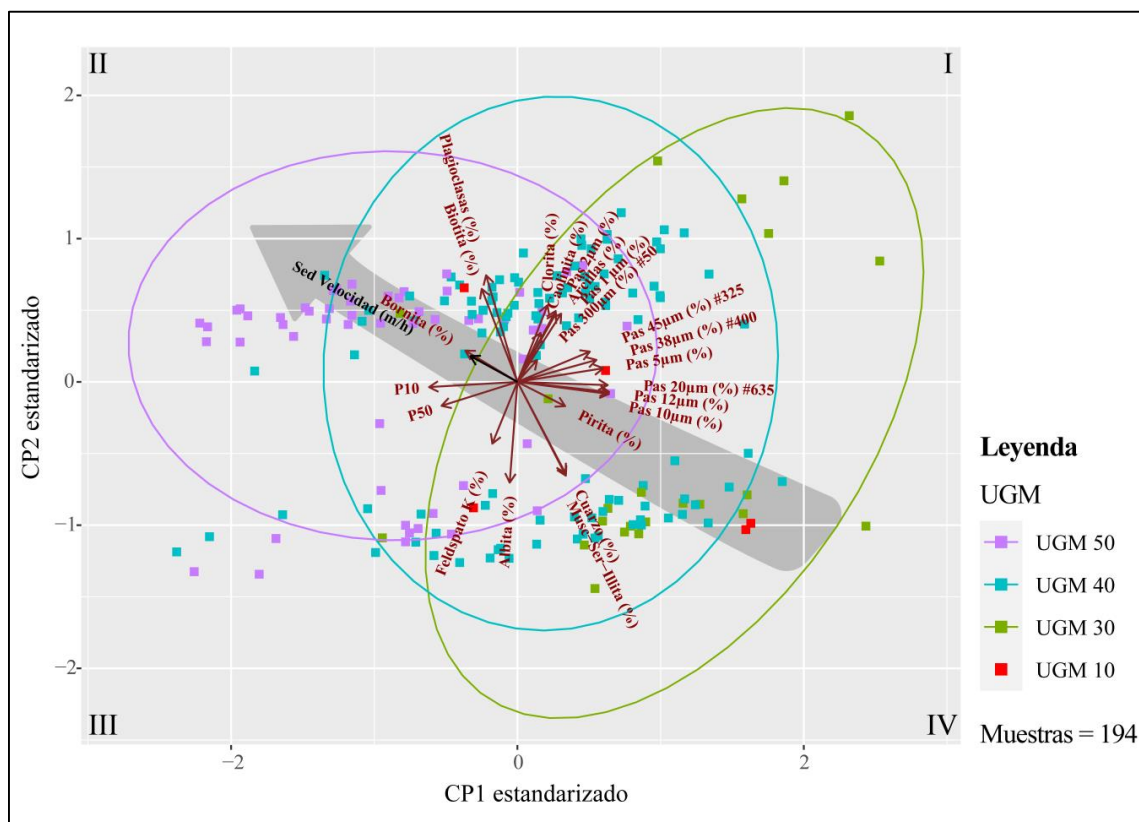


Figura 5.10: Gráfica de doble proyección del ACP de velocidad de sedimentación que conjuga las bases de datos de mineralogía y granulometría láser (BD3) categorizando las muestras según UGM de recuperación de cobre. La elipse estadística de la UGM 10 no se incluye debido a que las muestras son pocas y están muy dispersas en la gráfica.

La confección de las UGM tiene un importante componente que considera las abundancias de bornita, calcopirita y pirita, cuyos valores cambian dependiendo de la zona del yacimiento. La bornita, característica de la UGM 50 (centro del yacimiento) demuestra tener correlaciones positivas con la velocidad de sedimentación, al contrario de la pirita con correlaciones negativas y más abundante en zonas periféricas.

La calcopirita, cuya relación con la velocidad de sedimentación no era clara, experimenta un alza desde la UGM 50 hasta la UGM 40, después de la cual baja su abundancia. Esta tendencia negativa en un intervalo y positiva en otro (Figura 5.11), explica la baja correlación obtenida en resultados anteriores.

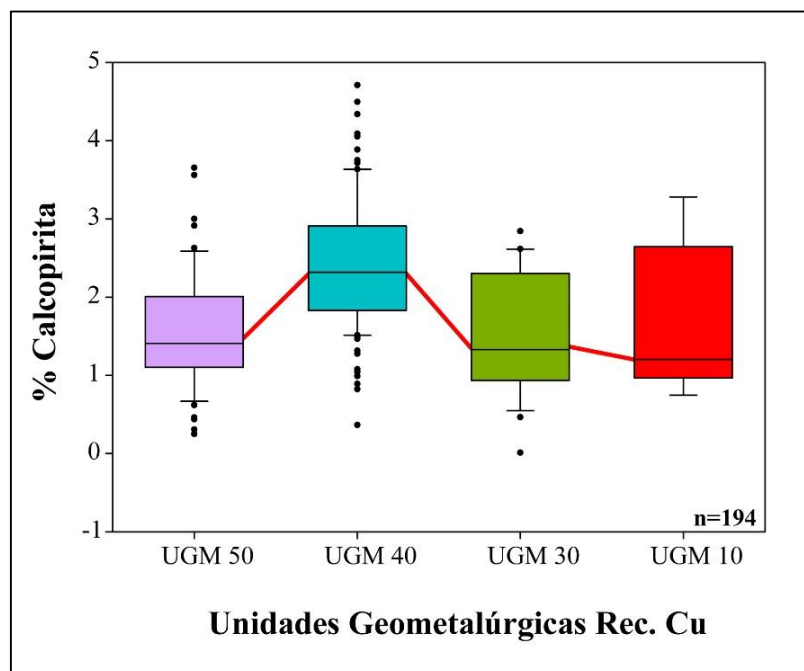


Figura 5.11: Contenido de calcopirita en relación con cada UGM.

5.3. Sedimentación: Análisis de concentración de sólidos final (CV)

5.3.1. ACP y análisis univariantes

En la Tabla 5.3 se exponen las consideraciones para los ACP realizados para el análisis de este parámetro metalúrgico.

Tabla 5.3: Definición de bases de construcción de ACP de concentración de sólido final. La clasificación de las muestras en quintiles es arbitraria y sus rangos de valores incluidos en cada gráfica. Las variables de entrada son obtenidas de los correlogramas de la Figura 5.1.

Parámetro analizado	Base de datos	Población litológica	Clasificación de muestras en ACP	Variables de entrada y sus correlaciones con el parámetro de estudio analizado
Concentración de sólido final	Mineralogía (BD1)	CMET	Quintiles de concentración de sólido final	Anhidrita-yeso (0,37), muscovita-sericita-illita (-0,35), clorita (-0,27), cuarzo (-0,24), biotita (0,24), bornita (0,13) y pirita (-0,12)
	Mineralogía (BD1)	OTRAS LITOLÓGÍAS		Anhidrita-yeso (0,51), caolinita (0,25), calcopirita (0,20), arcillas (-0,15), pirita (-0,13), muscovita-sericita-illita (-0,13), y biotita (0,13)
	Granulometría (BD2)	Todas las litologías		10 μm (-0,26), 12 μm (-0,24), 20 μm (-0,18), P10 (0,14), 5 μm (-0,13), 300 μm (0,10), y 75 y 1 μm (0,09)
	Mineralogía y Granulometría (BD3)	Todas las litologías		La combinación de las variables utilizadas en los análisis anteriores

5.3.1.1. Mineralogía: CMET

Los valores de concentración de sólidos final aumentan desde la zona inferior del gráfico hacia la zona superior, con fuerte influencia el CP2 (Figura 5.12). Altos porcentajes de cuarzo y muscovita-sericita-illita se relacionan a las muestras con los valores más bajos de este parámetro, mientras que la anhidrita-yeso y en menor grado biotita y bornita, a valores más elevados. Al igual que con la velocidad de sedimentación, las elipses se traslapan considerablemente, indicando que el aumento es gradual conforme varían la concentración de estos minerales. No existe una clusterización, pero se evidencia una tendencia clara

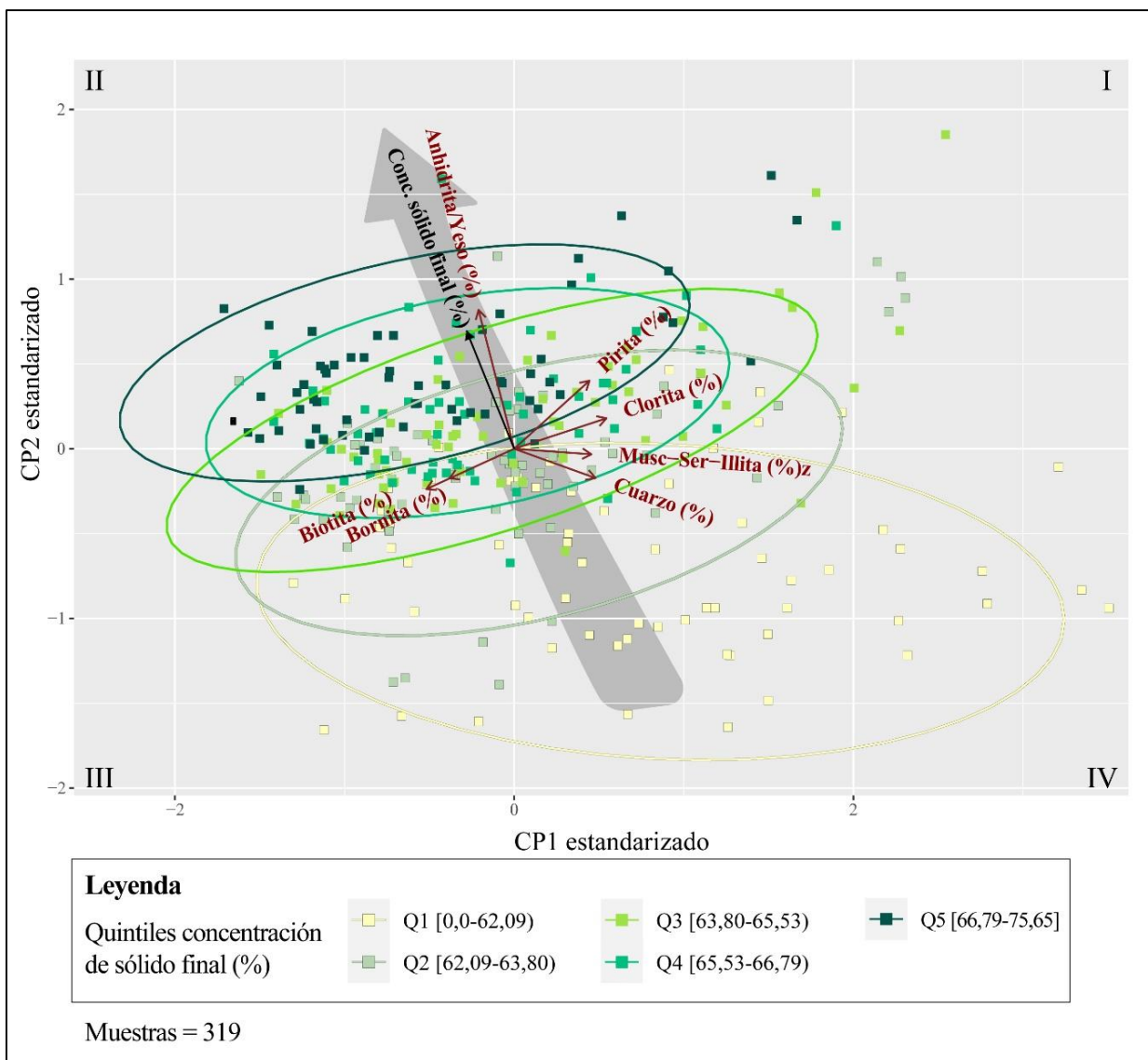


Figura 5.12: Gráfica de doble proyección del ACP de mineralogía-concentración de sólido final (CMET).

En los gráficos de caja existe una disminución o un aumento gradual de la concentración de sólido dependiendo del mineral en cuestión (Figura 5.13). Solo en los primeros quintiles de anhidrita-yeso existe un quiebre significativo en la tendencia de las medianas asociado con las zonas centrales del yacimiento (alteración potásica), después del cual, el aumento de este parámetro es muy discreto.

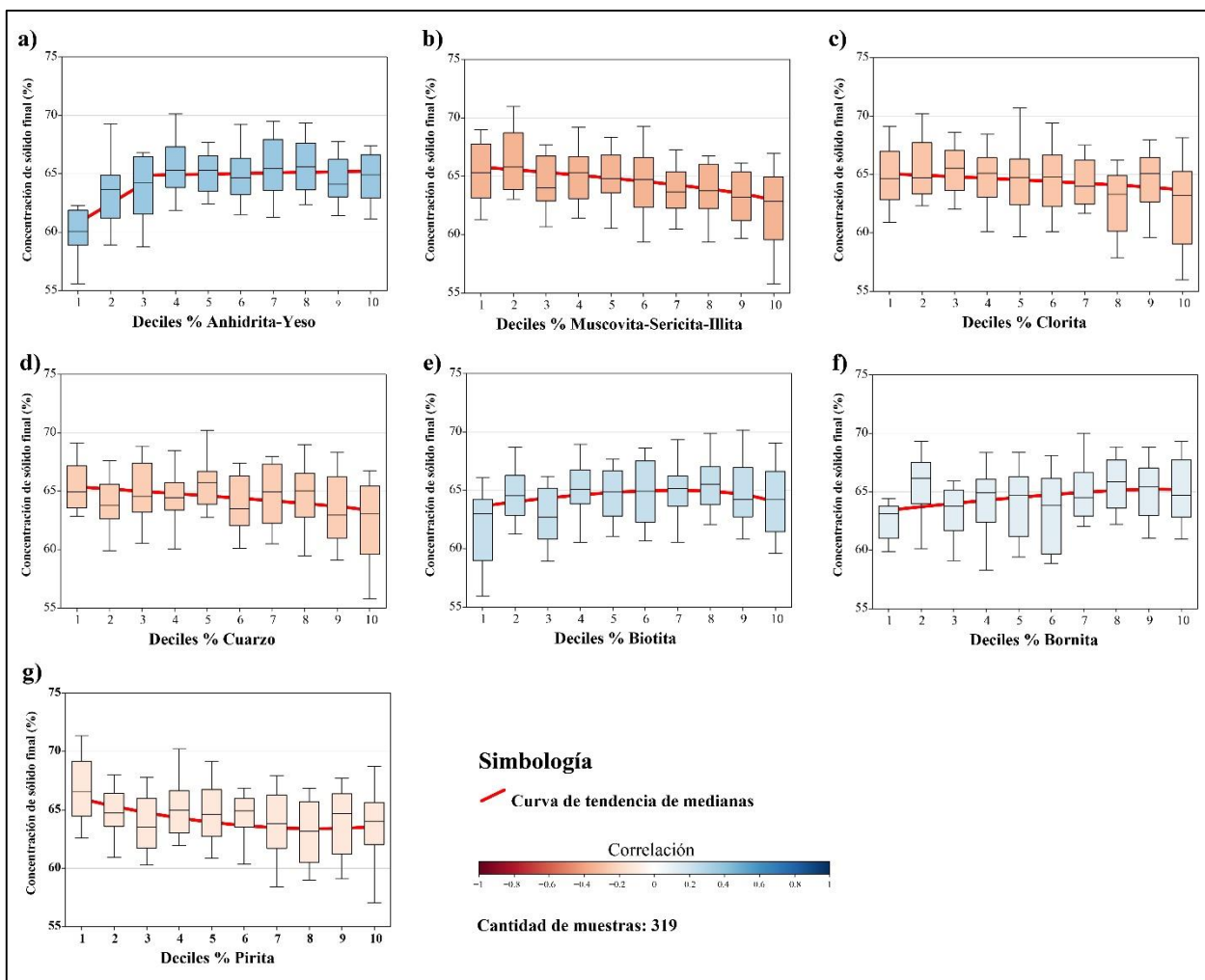


Figura 5.13: Gráficos de caja de deciles de porcentaje mineral y concentración de sólido final (CMET).

5.3.1.2. Mineralogía: OTRAS LITOLOGÍAS

En este caso, la concentración de sólido final aumenta desde el cuadrante II al IV (Figura 5.14). Las muestras con altas cantidades de muscovita-sericita-illita, arcillas y pirita se correlacionan con menores valores, mientras que en los demás minerales con valores más elevados de este parámetro las elipses estadísticas se solapan entre sí, por lo tanto, la variación de la concentración de sólido final es un gradiente al igual que el observado con el CMET, pero con influencias minerales un tanto diferentes.

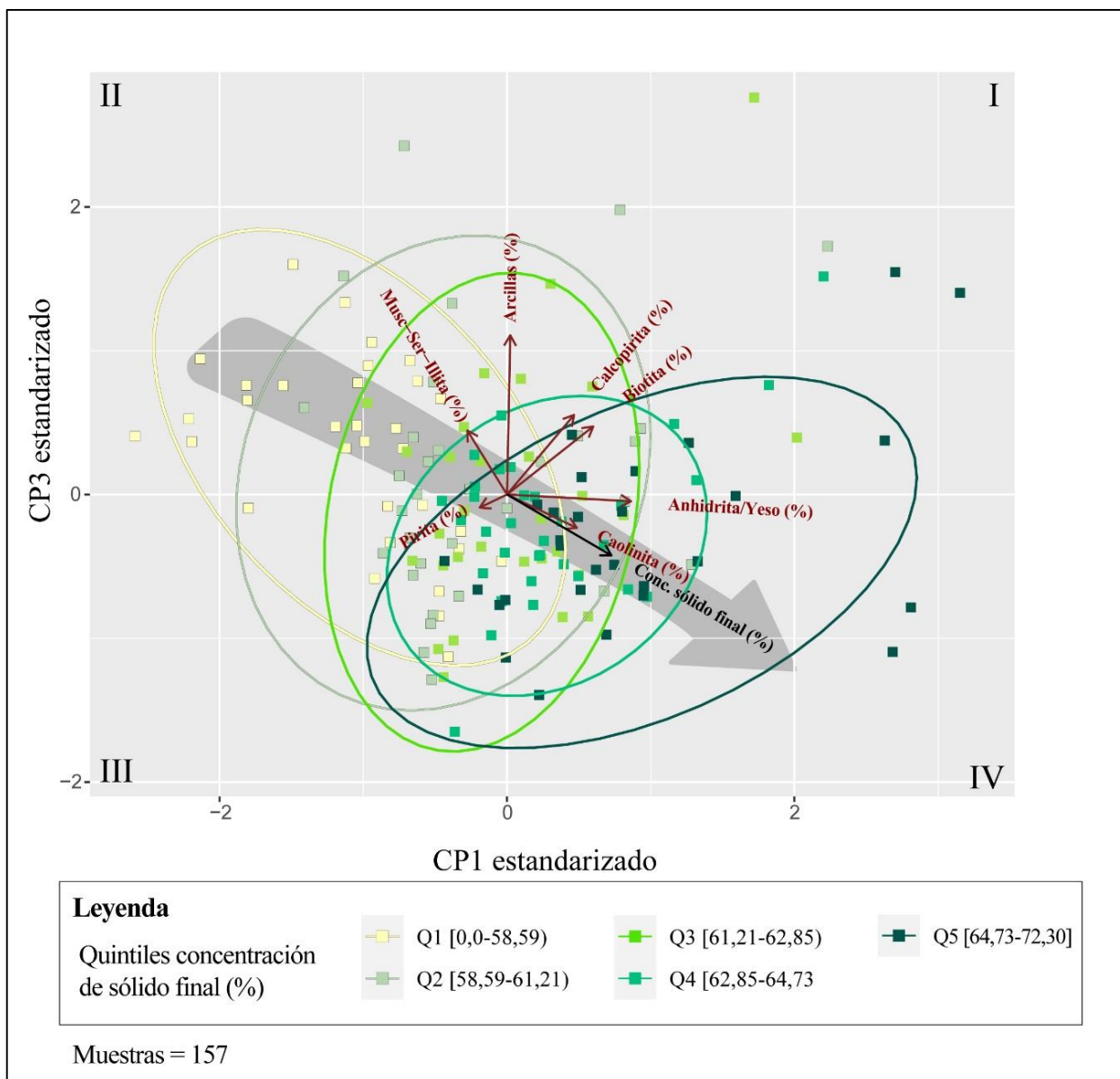


Figura 5.14: Gráfica de doble proyección del ACP mineralogía-concentración de sólido final (OTRAS LITOLOGÍAS).

Los gráficos de caja revelan que las variaciones de la concentración de sólido final son nuevamente graduales y poco marcadas. Sólo la caolinita muestra una tendencia a la baja hasta el quinto decil, después del cual, los valores crecen nuevamente y en biotita existe un quiebre en el decil 4 a partir del cual la curva se mantiene prácticamente constante. El resto de los minerales muestra un leve gradiente positivo o negativo según sea el caso (Figura 5.15).

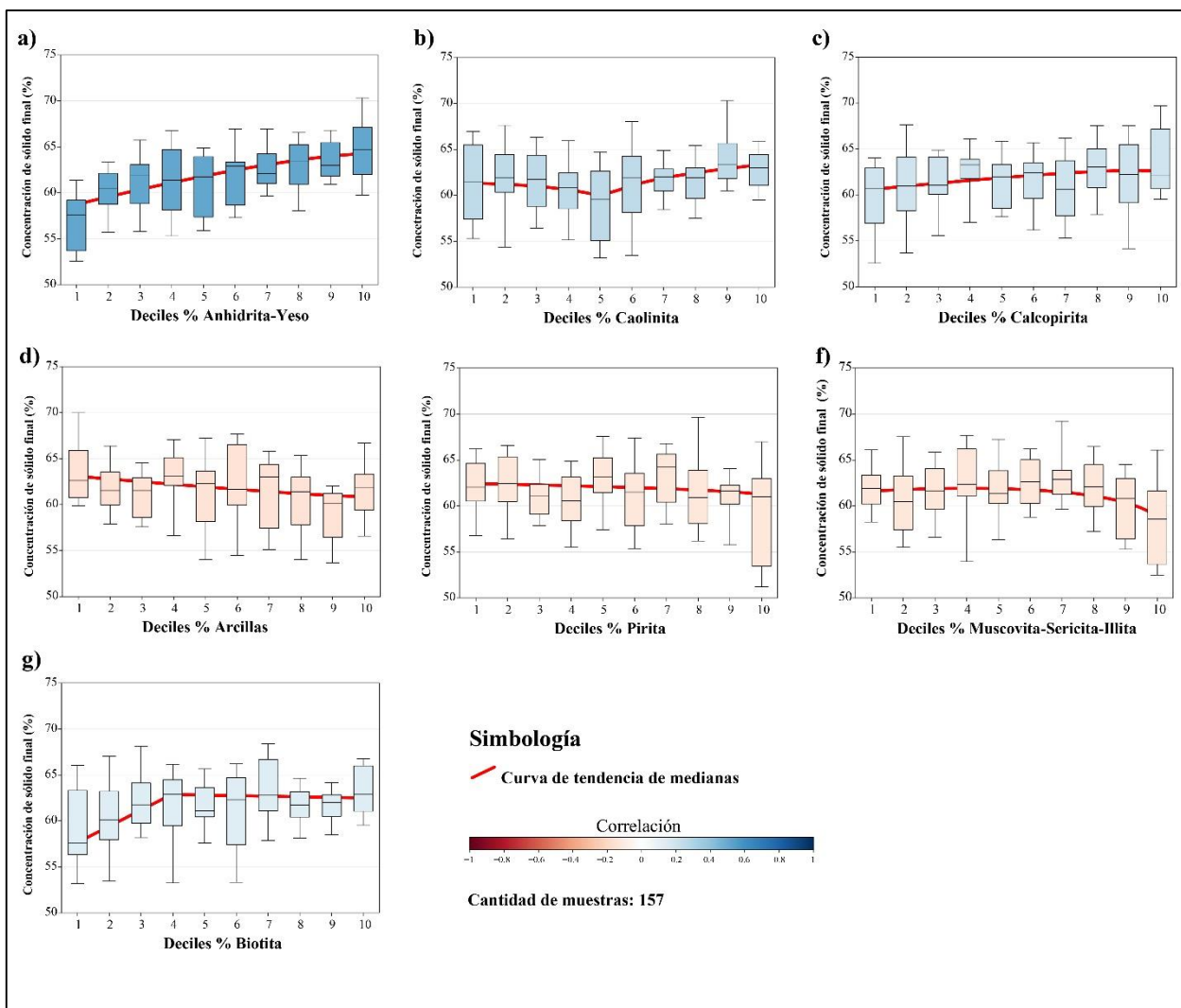


Figura 5.15: Gráficos de caja de deciles de porcentaje mineral y concentración de sólido final (OTRAS LITOLOGÍAS).

5.3.1.3. Granulometría

La tendencia de la concentración de sólido final con respecto a las diferentes fracciones granulométrica es menos evidente que lo observado en mineralogía (Figura 5.16). Las elipses estadísticas se desplazan levemente de derecha a izquierda y es posible interpretar que a mayor proporción de finos las concentraciones de sólido final son menores. El vector de este parámetro de estudio tiene muy poca longitud, lo que también indica que la variación es pequeña.

Además, es posible observar dos grupos de muestras separados por el CP2, aglomerados que no obedecen a variaciones litológicas, pues en ambos grupos se distribuyen muestras de todas las litologías analizadas (Anexo B5).

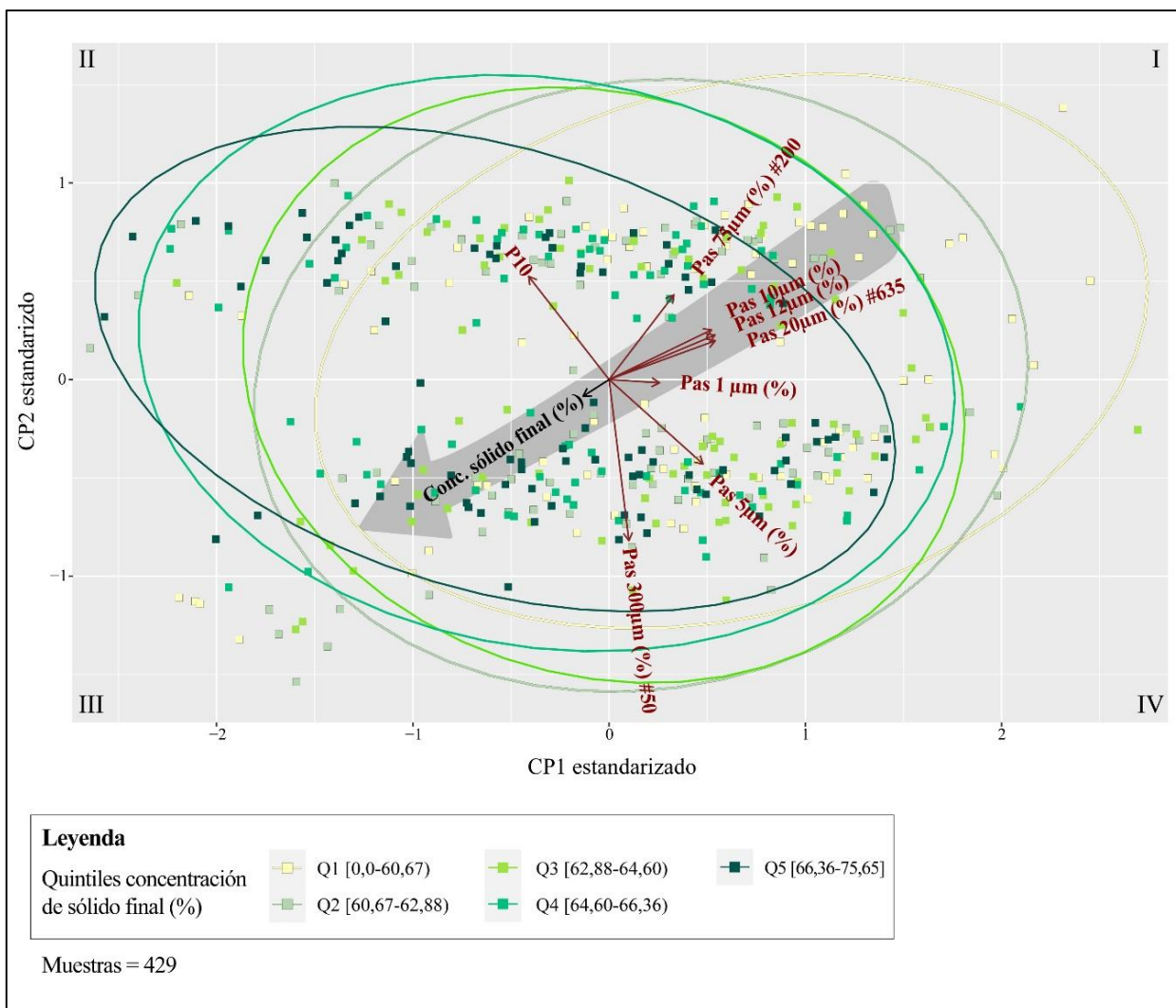


Figura 5.16: Gráfica de doble proyección del ACP granulometría-porcentaje de sólido final.

En los gráficos de la Figura 5.17, nuevamente las variaciones (positivas o negativas) de la concentración de sólido final son graduales a medida que aumentan los deciles de las distintas fracciones granulométricas. No hay quiebres importantes en las curvas de tendencia de las medianas de los deciles. En este caso las correlaciones son significativamente menores a las observadas con velocidad de sedimentación.

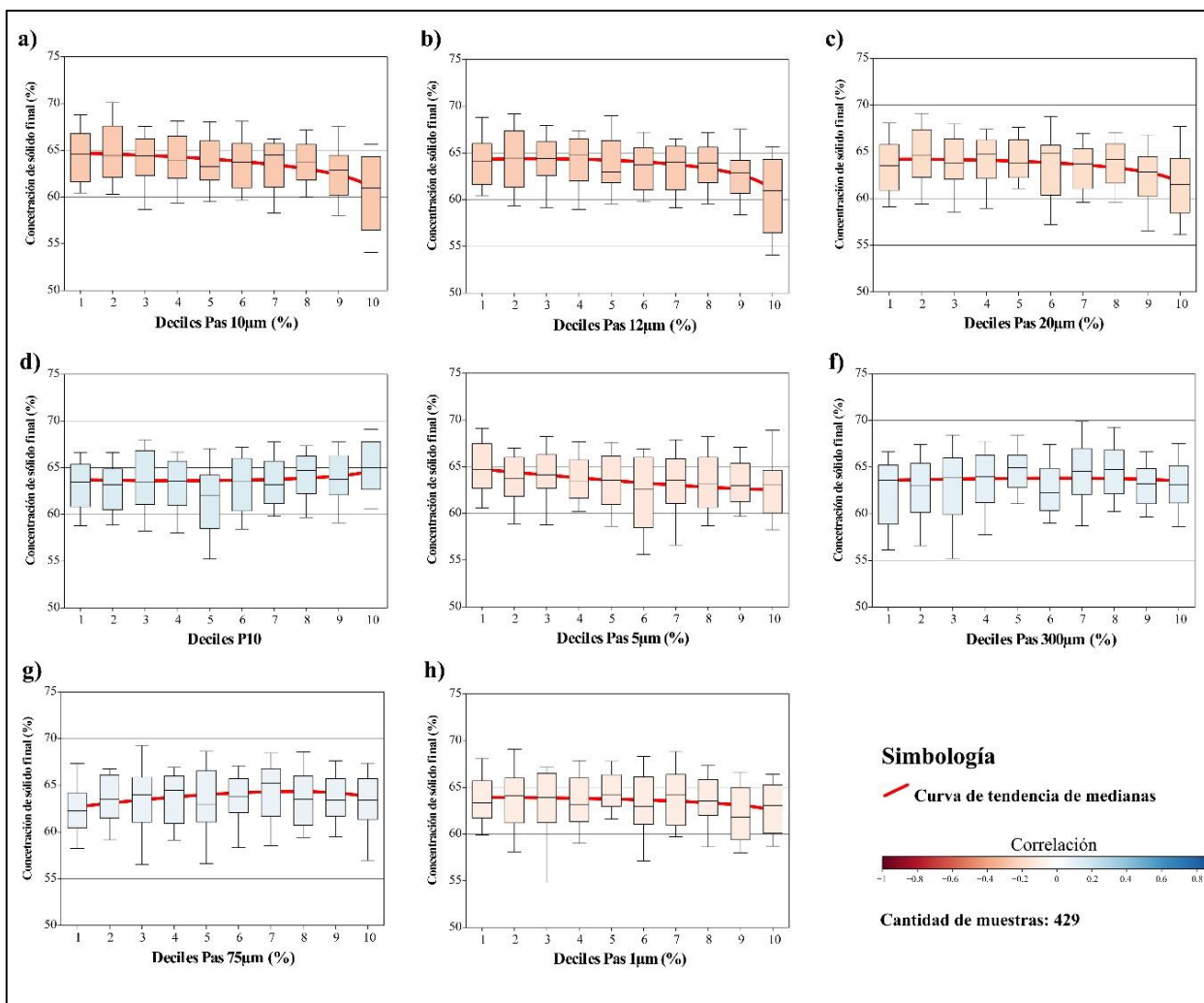


Figura 5.17: Gráficos de caja de deciles de fracciones granulométricas y concentración de sólido final.

5.3.1.4. ACP compilatorio

Al igual que en velocidad de sedimentación, se confecciona una ACP que compile todas las variables mineralógicas y granulométricas analizadas anteriormente (Figura 5.18). En él es posible observar que existen relaciones similares a las observadas en velocidad de sedimentación, con cuarzo, muscovita-sericita-illita asociados a granulometrías finas ($<20\ \mu\text{m}$), de la misma manera que los demás minerales laminares (clorita, caolinita y arcillas indiferenciadas). Correlacionados de manera positiva solo destaca anhidrita-yeso y en menor medida biotita y bornita. Una diferencia importante con respecto a velocidad de sedimentación, es la ausencia de los feldespatos como minerales de importancia tanto para el CMET como para OTRAS LITOLOGÍAS.

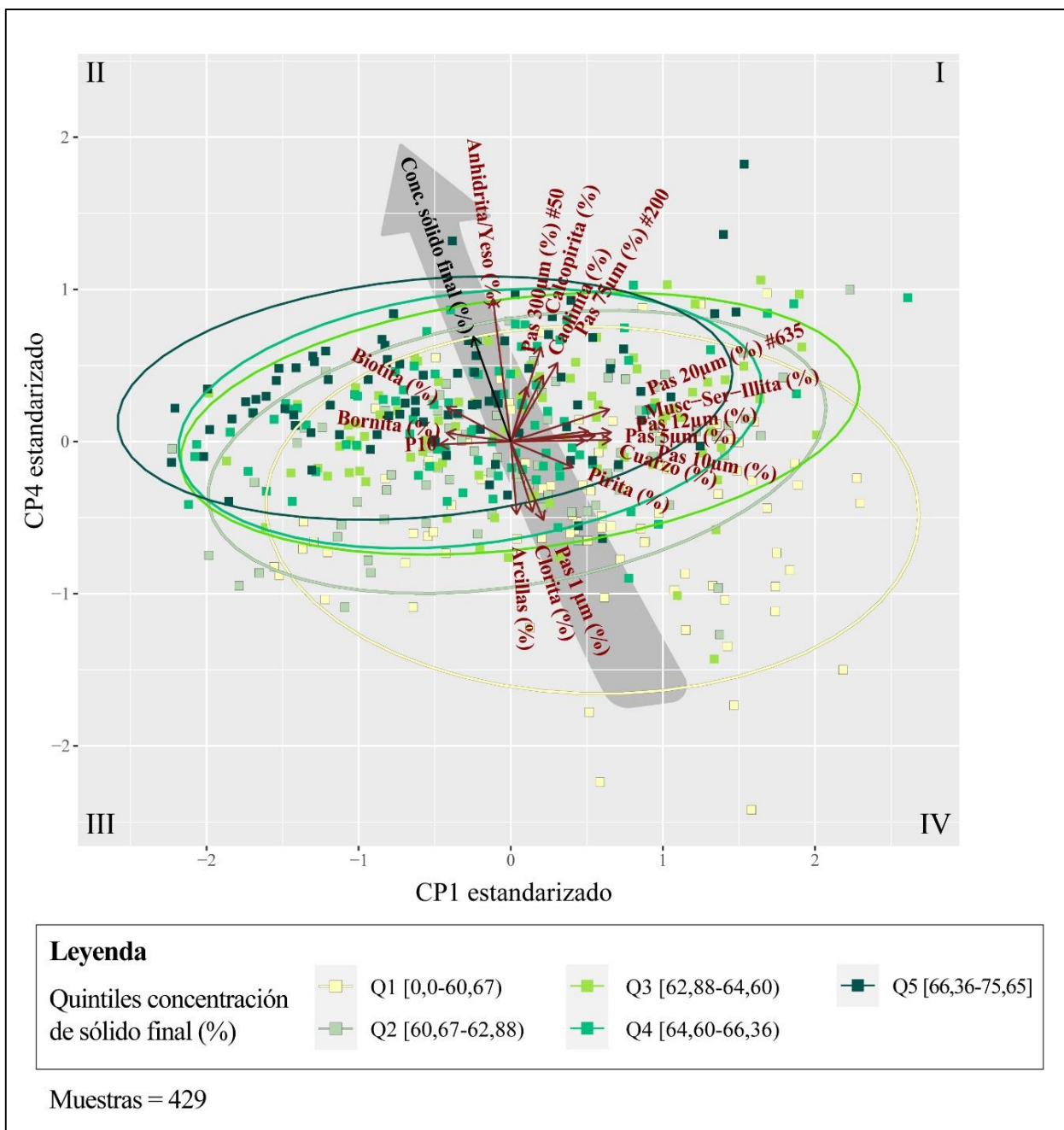


Figura 5.18: Gráfica de doble proyección del ACP que conjuga las bases de datos de mineralogía y granulometría láser (BD3) para analizar el parámetro de concentración de sólido final.

5.3.2. Fenomenología de los resultados

En la sedimentación estática se forma una columna de sólidos granodecreciente originada por los diferentes tiempos de sedimentación de las partículas como lo indica la ley de Stokes. El peso de esta columna permite que el agua se “exprima” y aumente el contenido de sólidos. Sin embargo, a mayores proporciones de partículas finas se forman flóculos de baja densidad (con agua intersticial) que disminuyen el peso de la columna y por ende la concentración de sólidos final. Esto concuerda con lo observado en las variables granulométricas analizadas, ya que si se consideran los minerales asociados a las fracciones finas (minerales laminares: clorita, muscovita-sericita-illita, biotita, arcillas y caolinita), es posible observar una tendencia a la baja en la concentración de sólido final a medida que estas fases son más abundantes. Sumado a estas fases laminares, el cuarzo contribuye de forma considerable al aumento de la pendiente de la regresión de la Figura 5.19.a, lo que podría estar asociado a la granulometría fina con la que también se expresaría este silicato en el yacimiento.

Lo contrario ocurre con los minerales asociados a las fracciones más gruesas (feldespatos), donde la sumatoria de ellos presenta una correlación positiva con el parámetro analizado (Figura 5.19.b). Esta última relación no había sido detectada al obtener las correlaciones de cada feldespato por separado, lo que indica que dichos minerales pierden importancia en comparación a lo visto en velocidad de sedimentación. Sin embargo, esta leve correlación podría estar relacionada a que las partículas de mayor tamaño dejan espacios que pueden ser rellenados por las más pequeñas y además incrementan considerablemente el peso de la columna, por lo que la concentración de sólidos aumenta si los minerales se expresan con texturas más gruesas.

Nuevamente, aunque se desconoce los grados de liberación de los minerales de ganga, las correlaciones observadas responden bien a lo teóricamente esperado, evidenciándose un vínculo mineral-granulometría.

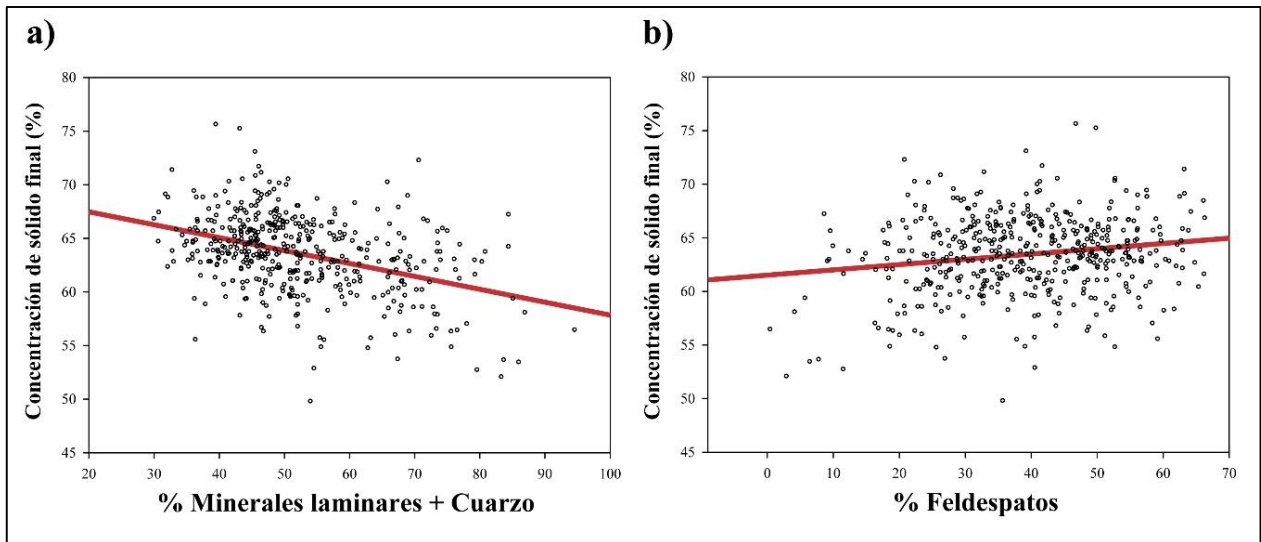


Figura 5.19: Influencia de minerales laminares y feldespatos en la concentración de sólido final. a) CV final vs % de minerales laminares + cuarzo. En este caso se utilizan 449 muestras excluyendo al PDA debido a que en esta litología el cuarzo posee mayor tamaño de grano. La correlación entre ambos ejes es de **-0,4**. b) CV final vs % feldespatos (plagioclasa, albita y feldespato potásico). Se utilizan 476 muestras incluyendo las del PDA. La influencia de estos minerales es menor teniendo una correlación positiva de **0,17**.

A modo de resumen, la Tabla 5.4 expone la fenomenología tras las correlaciones de las variables mineralógicas analizadas, considerando las implicancias de la granulometría anteriormente mencionadas.

Tabla 5.4: Características que explican las correlaciones mineral-granulometría con concentración de sólido final.

Minerales	Correlación con velocidad de sedimentación	Posible fenomenología tras correlación con concentración de sólido final en volumen
Feldespatos (plagioclasa, albita y feldespato potásico)	Positiva (al agruparse)	-Asociados a granulometrías generalmente más gruesas.
Muscovita-sericita-illita y clorita	Negativa	-Asociados a fracciones finas
Biotita	Positiva	-A pesar de estar asociada a granulometrías pequeñas (biotitización de grano fino) su paragénesis de alteración y textura de roca original le otorgan una correlación positiva
Cuarzo	Negativa	-Se expresa mayormente en texturas finas (excepto en el PDA)
Caolinita y arcillas (indiferenciadas)	Negativa	-Minerales de granulometrías ultrafinas (< 2 μm)
Anhidrita-yeso	Positiva	-Mineral asociado a una alteración potásica cuya mineralogía y textura es favorable para obtener concentraciones de sólido mayores -Posible mineral <i>proxy</i>

5.3.3. Variaciones según litología y alteración hidrotermal

Litológicamente, en el caso de la concentración de sólidos final hay diferencias más notorias en comparación a velocidad de sedimentación. Nuevamente el CMET posee la mediana más alta con muchos valores anómalos, tanto altos como bajos (Figura 5.20.a). Le sigue la BXAHN y finalmente más abajo PDI, TO y PDA.

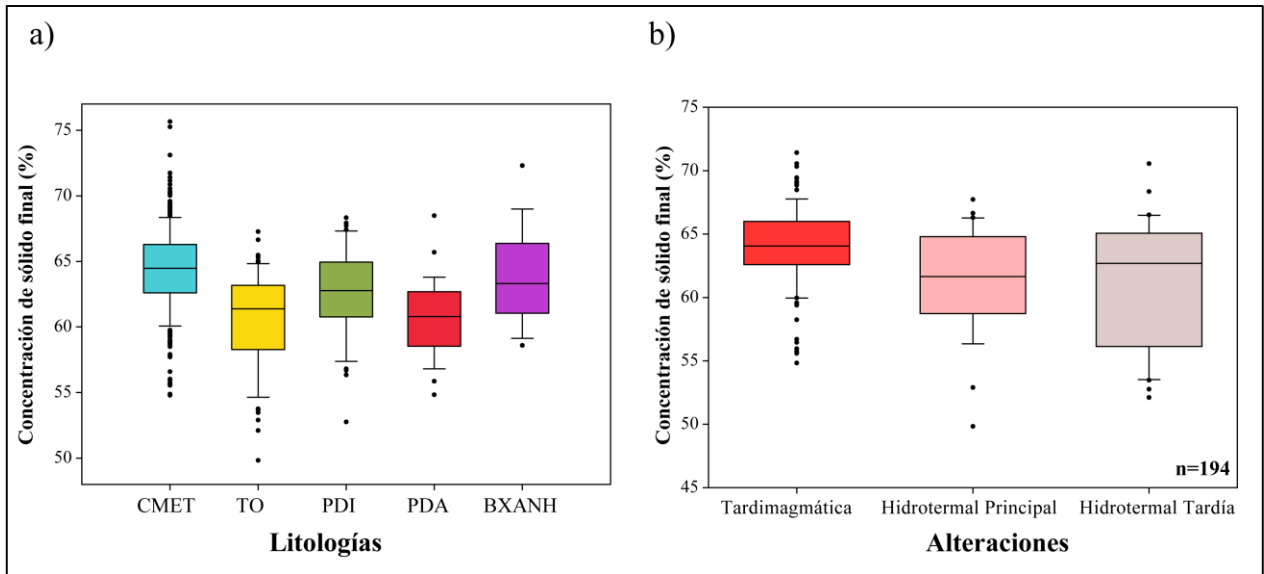


Figura 5.20: Concentración de sólido final con relación a litología y alteración hidrotermal. (a) y (b) respectivamente.

La alteración tardimagmática que afecta al CMET posee en el papel una mineralogía y textura más favorable para obtener mayores valores de concentración de sólido, por lo que presenta la mediana más elevada (Figura 5.20.b.) Sin embargo, posee sectores con texturas más finas (biotitización pervasiva) y con alteración hidrotermal principal y tardía que disminuyen los valores de este parámetro de estudio. El PDA también es afectado por las alteraciones mencionadas, pero la mediana que posee es la más baja entre todas las litologías. En TO, PDI y BXANH predominan las alteraciones hidrotermal principal y tardía con abundantes minerales laminares y de grano fino, principalmente cuarzo, muscovita-sericita-illita y clorita, razón por la cual estas alteraciones presentan medianas más bajas. A pesar de esto, el grado de liberación mineral podría entregar mayores distinciones.

5.3.4. UGM y concentración de sólido final

La tendencia mostrada en este parámetro es similar a la vista en velocidad de sedimentación, aunque menos evidente, es decir, generalmente la concentración de sólido final aumenta desde la periferia hacia la zona central del yacimiento (Figura 5.21).

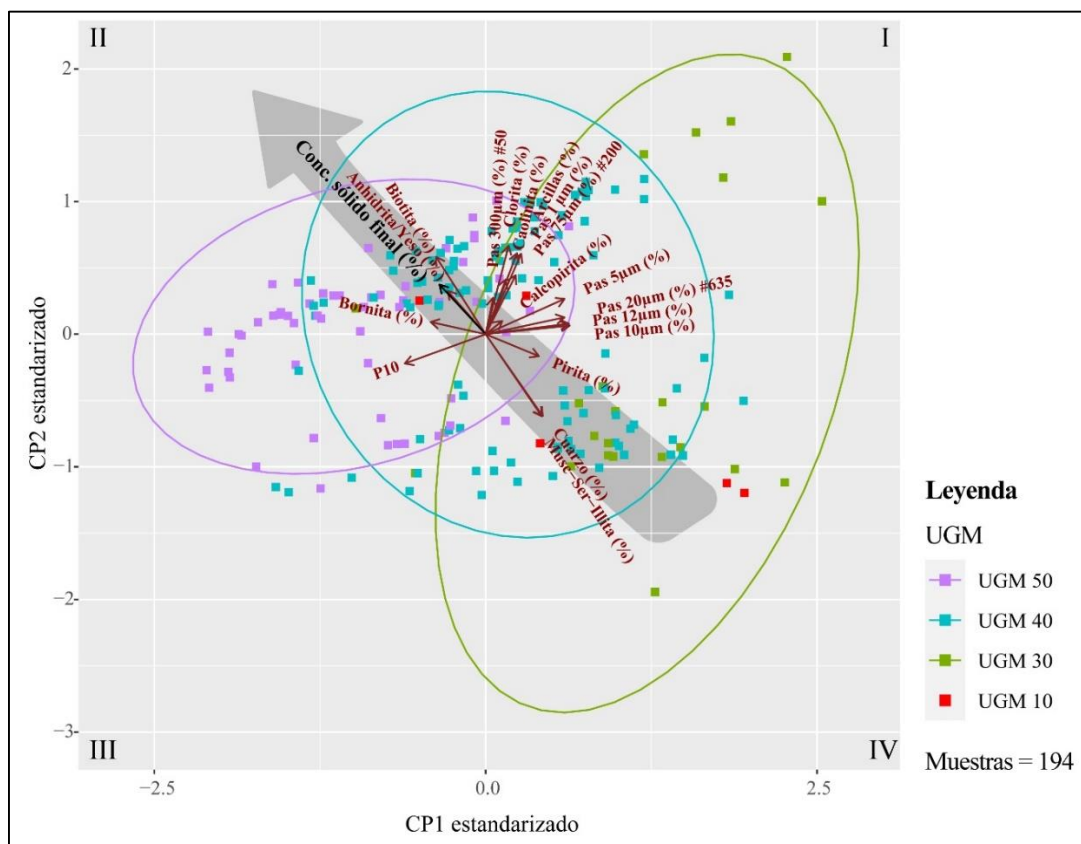


Figura 5.21: Gráfica de doble proyección del ACP de concentración de sólido final que categoriza las muestras según UGM. La elipse estadística de la UGM 10 no se incluye debido a que las muestras son pocas y están muy dispersas en la gráfica.

5.4. Sedimentación: análisis de turbidez

La medición de la turbidez adquiere una gran importancia para la recuperación de agua clarificada con la menor cantidad de material sólido en suspensión. Para obtener datos representativos de los fenómenos que afectan este parámetro metalúrgico, es necesario realizar las mediciones con la metodología correcta.

En los ensayos de sedimentación *batch* realizados para El Teniente, los análisis de turbidez son realizados tras 24 horas de decantación estática, a partir de los cuales, mediante revisiones preliminares, no fue posible encontrar los resultados esperados. En general, tiempos prolongados de espera no permiten observar la evolución de la turbidez, la cual varía instantáneamente después de la agitación.

Poppe y otros (1988), mencionan que granos de cuarzo (gravedad específica: 2,65) de 4 μm demoran 2 horas y 3 minutos en sedimentar en 10 cm de agua a 20°C. Por su parte, el mismo tipo de partícula de 1 y 0,5 μm demoran 31 y 124 horas respectivamente, bajo las mismas condiciones. Estos valores corresponden a tiempos de sedimentación de partículas en ausencia de floclantes. Con el uso de este tipo de sustancias las velocidades de sedimentación son mucho mayores. En la propia base de datos entregada para este trabajo existen diferencias de alrededor de 10 veces en las magnitudes de la velocidad de sedimentación en relación a mediciones realizadas con y sin floclantes.

En una breve investigación bibliográfica, las mediciones de la turbidez se realizan desde por lo menos 2 minutos después de la agitación, hasta 2 horas en ciertos casos. Las metodologías varían considerando los objetivos de cada ensayo y el material analizado.

En la Tabla 5.5 se detallan los tiempos utilizados para la obtención de los datos de turbidez, detallándose también el autor y el material de análisis. En todos los casos hubo utilización de floclantes.

Tabla 5.5: Compilado de tiempos de medición de turbidez posterior a la agitación de la muestra.

Autor	Tiempo	Tipo de material
Abuzaid y otros (1988)	20 minutos	Relaves con bentonita
Arjmand y otros (2019)	2 minutos	Relaves de hierro
Betancourt y otros (2020)	2 horas	Relaves de cuarzo
Castillo (2018)	5 minutos	Relaves de cobre y caolinita
Eriksson y otros (1992)	1 hora	Lodos activados
Ghafari y otros (2009)	30 minutos	Muestras de lixiviado
Gregor y otros (1997)	30 minutos	Agua con materia orgánica
Nguyen,y otros (2007)	1 hora	Lodos sintéticos activados
Sabah y otros (2006)	15 minutos	Relaves de carbón
Wu y otros (2020)	5 minutos	Relaves de níquel

Otro aspecto importante en las metodologías revisadas trata de mediciones sucesivas a lo largo de cierto periodo de tiempo, de manera que sea posible visualizar la evolución de los valores de turbidez.

Según los antecedentes expuestos anteriormente, la medición de la turbidez debe ser realizada luego de algunos minutos o como máximo, después de un par de horas; protocolo del que está muy alejada la metodología utilizada en El Teniente. Por esta razón, los datos de este parámetro no fueron analizados en este trabajo, pues no representan los fenómenos de interés que establecen la relación entre las variables geológicas y la turbidez del agua.

5.5. Reología: Análisis de punto de fluencia sin cizalle

5.5.1. ACP y análisis univariantes

A continuación, se detallan las consideraciones utilizadas para confeccionar los ACP del parámetro de punto de fluencia sin cizalle (Tabla 5.6).

Tabla 5.6: Definición de bases de construcción de ACP de punto de fluencia sin cizalle. La clasificación de las muestras en quintiles es arbitraria y sus rangos de valores incluidos en cada gráfica. Las variables de entrada son obtenidas de los correlogramas de la Figura 5.1.

Parámetro analizado	Base de datos	Población litológica	Clasificación de muestras en ACP	Variables de entrada y sus correlaciones con el parámetro de estudio analizado
Punto de fluencia sin cizalle	Mineralogía (BD1)	CMET	Quintiles de punto de fluencia sin cizalle	Cuarzo (-0,20), muscovita-sericita-illita (-0,19), anhidrita-yeso (0,16), biotita (0,13) y clorita (-0,11), caolinita (0,07) y arcillas (-0,03) y concentración de sólido final (0,23)
	Mineralogía (BD1)	OTRAS LITOLOGÍAS		Caolinita (0,47), anhidrita-yeso (0,26), clorita (0,16), arcillas (-0,15), bornita (0,13), albita (-0,13) y pirita (0,11) y concentración de sólido final (0,30)
	Granulometría (BD2)	Todas las litologías		300 μm (0,18), 5 μm (0,11), 150 μm (0,09), P80 (0,08), 2 μm (0,08), 1 μm (-0,08) y P10 (0,07) y concentración de sólido final (0,24)
	Mineralogía y Granulometría (BD3)	Todas las litologías		La combinación de las variables utilizadas en los análisis anteriores

5.5.1.1. Mineralogía: CMET

Los valores del punto de fluencia sin cizalle aumentan desde la zona inferior hacia la zona superior de la gráfica (Figura 5.22). Altos contenidos de cuarzo, muscovita-sericita-illita, clorita y arcillas se correlacionan con menores valores de este parámetro reológico, mientras que, a mayores cantidades de biotita, anhidrita-yeso, caolinita y concentración de sólido final (CV), los valores son elevados.

Nuevamente existe un traslape en las elipses estadísticas de los quintiles, lo que indica una variación gradual en los valores de este parámetro a medida que cambian las cantidades de los minerales considerados en el ACP. Cabe destacar que las correlaciones existentes con los minerales presentes son considerablemente menores en comparación a las vistas en velocidad de sedimentación y concentración de sólido final.

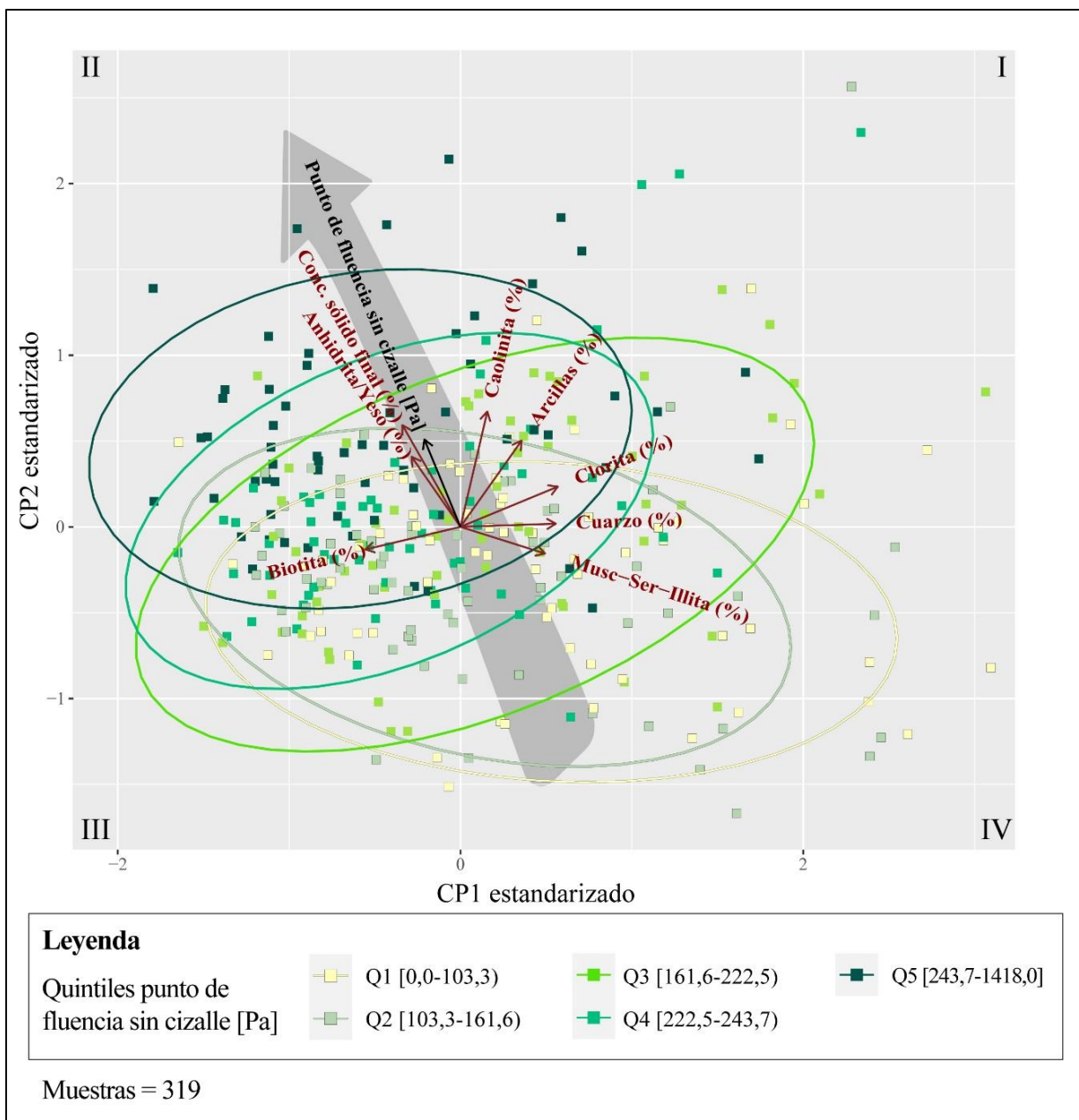


Figura 5.22: Gráfica de doble proyección del ACP de mineralogía-punto de fluencia sin cizalle (CMET).

Las curvas de las medianas presentan aumentos o disminuciones graduales, solo con excepción de la clorita que experimenta una disminución y un posterior aumento después del decil número 5 (Figura 5.23). En general, las pendientes de las curvas de tendencia son poco pronunciadas.

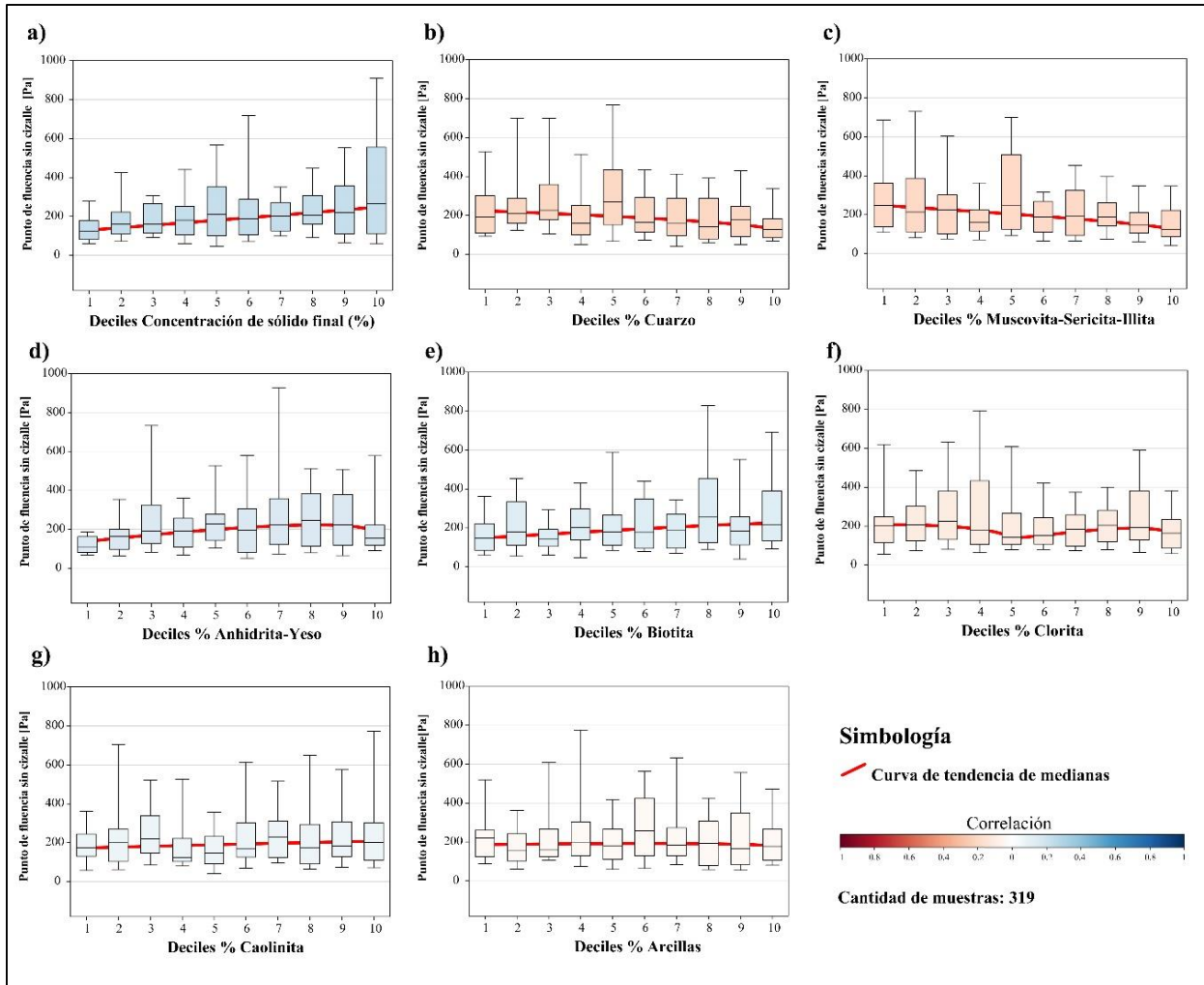


Figura 5.23: Gráficos de caja de deciles de porcentaje mineral y punto de fluencia sin cizalle (CMET).

5.5.1.2. Mineralogía: OTRAS LITOLOGÍAS

El punto de fluencia sin cizalle aumenta de manera subhorizontal desde el extremo izquierdo al extremo derecho de la gráfica de doble proyección (Figura 5.24). El CP1 divide los minerales según el signo de su correlación. Solo la albita y las arcillas ubicadas en el sector izquierdo de la figura poseen correlaciones negativas, mientras que los minerales restantes tienen correlaciones positivas con el punto de fluencia sin cizalle y se ubican en el sector derecho. Altos valores de anhidrita-yeso, caolinita y concentración de sólido final se correlacionan fuertemente con mayores valores del punto de fluencia.

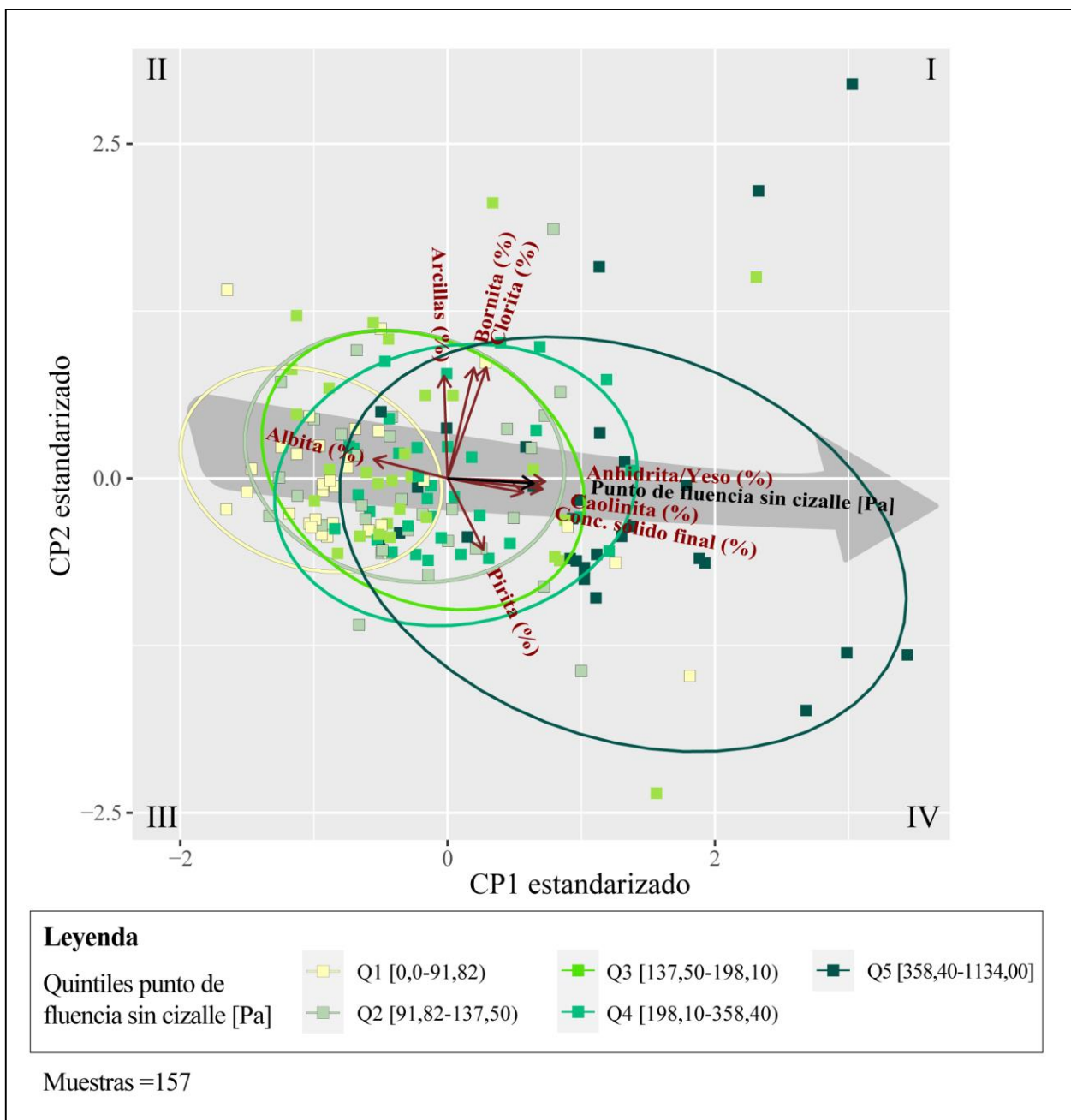


Figura 5.24: Gráfica de doble proyección del ACP de mineralogía-punto de fluencia sin cizalle (OTRAS LITOLOGÍAS).

El gradiente mostrado a través de las elipses estadísticas indica una evolución gradual del punto de fluencia sin cizalle a medida que cambia la mineralogía. Solo el último quintil expresa valores con un rango mayor, donde existen datos con valores anómalos importantes (muestras ubicadas en la esquina inferior derecha del cuadrante IV). En el Anexo B6 se expone la misma gráfica de doble proyección anterior con las muestras clasificadas por litología, donde es posible observar que el

PDA posee de forma general, menores valores de punto de fluencia sin cizalle en comparación a las demás litologías que presentan rangos de valores mucho más amplios.

En la Figura 5.25 se detallan las relaciones entre el punto de fluencia sin cizalle y los deciles de abundancia de cada mineral. Solo caolinita, anhidrita-yeso, piritita y concentración de sólido final muestran las típicas variaciones graduales vistas hasta este momento, mientras que clorita, arcillas, bornita y albita poseen curvas de tendencias de medianas con disminuciones y aumentos con una gradualidad poco clara. Es importante recalcar la influencia mostrada por la caolinita, en cuyos últimos deciles (mayores cantidades de este mineral) existe un alza importante de los valores del punto de fluencia.

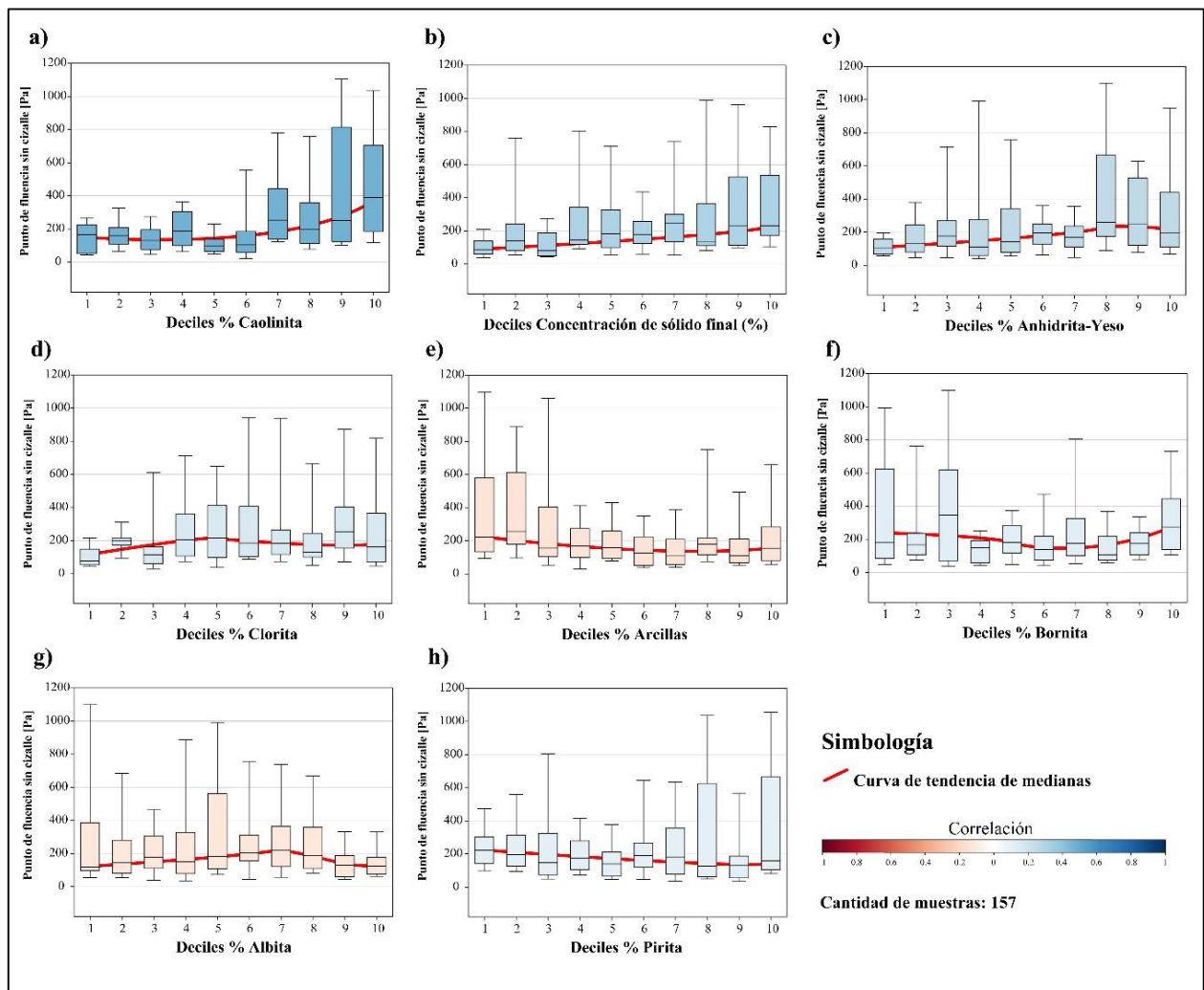


Figura 5.25: Gráficos de caja de deciles de porcentaje mineral y punto de fluencia sin cizalle (OTRAS LITOLÓGÍAS).

5.5.1.3. Granulometría

El punto de fluencia sin cizalle aumenta desde la zona superior hasta la zona inferior de la gráfica de doble proyección (Figura 5.26). No es posible interpretar una tendencia general con respecto al comportamiento de las variables granulométricas, es decir, no se evidencia si son las granulometrías más gruesas o las más finas las que determinan mayores o menores valores del punto de fluencia. Independiente de ello, el aumento de este parámetro es gradual y casi invariable, ya que las elipses estadísticas se solapan de forma importante y el vector que lo representa posee poca longitud.

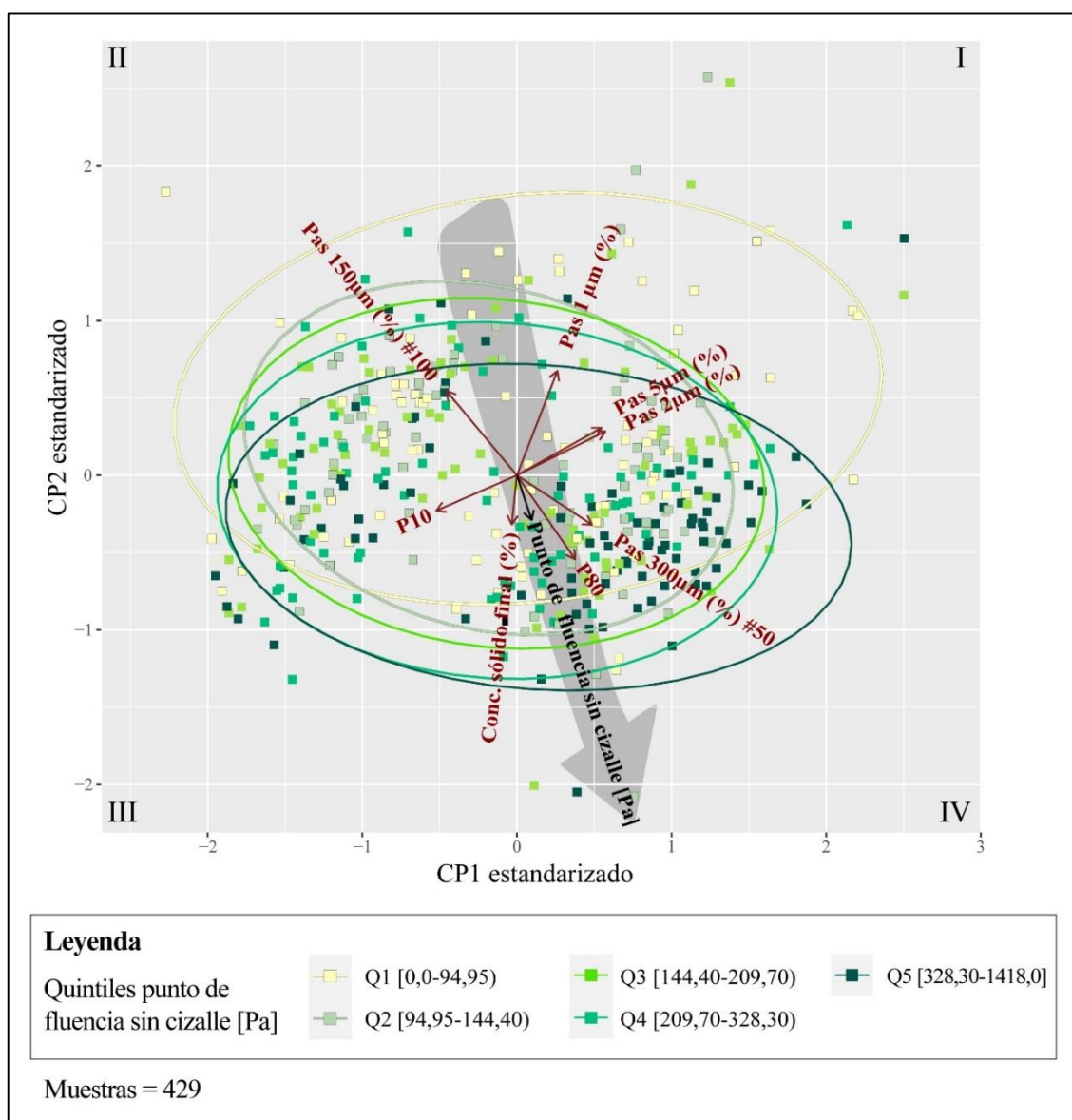


Figura 5.26: Gráfica de doble proyección del ACP de granulometría-punto de fluencia sin cizalle.

En los gráficos de caja se observa que las variaciones experimentadas por este parámetro metalúrgico son bajas también con respecto a cada mineral (Figura 5.27). Solo la concentración de sólido final (que no es una variable granulométrica) se ve correlacionada a un cambio significativo de valores, mientras que las demás variables poseen tendencias poco significativas y cambiantes.

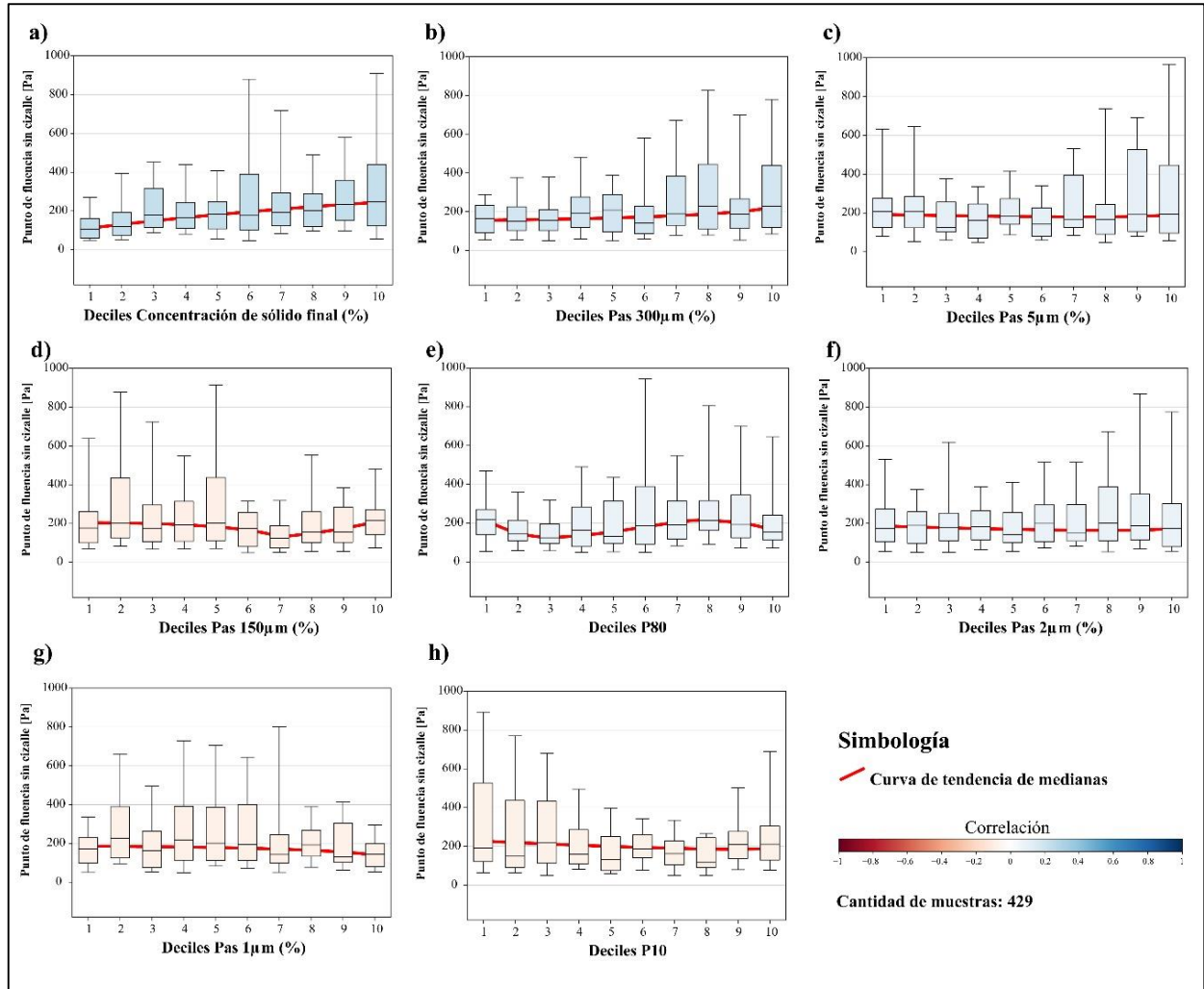


Figura 5.27: Gráficos de caja de deciles de fracciones granulométricas y punto de fluencia sin cizalle.

Las fracciones más gruesas (300 μm) y más finas (5 y 2 μm) están relacionadas a mayores valores de este parámetro reológico. Dado que las correlaciones son muy bajas es necesario considerar estos resultados con mesura, ya que el signo de la correlación puede cambiar con una pequeña variación de valores y las influencias existentes probablemente son muy ínfimas.

5.5.1.4. ACP compilatorio

Este ACP muestra las mismas relaciones entre mineralogía y granulometría observadas en los parámetros ya analizados (Figura 5.28). Persiste la estrecha relación entre el cuarzo y muscovita-sericita-illita con las granulometrías finas más incidentes (fracciones de 5 y 2 μm). Clorita y arcillas siguen asociadas a los tamaños ultrafinos ($<1 \mu\text{m}$). Sin embargo, al conjugar ambos grupos de variables, la tendencia del punto de fluencia se hace menos evidente, indicativo de las bajas relaciones que posee este parámetro con los controles geológicos ingresados.

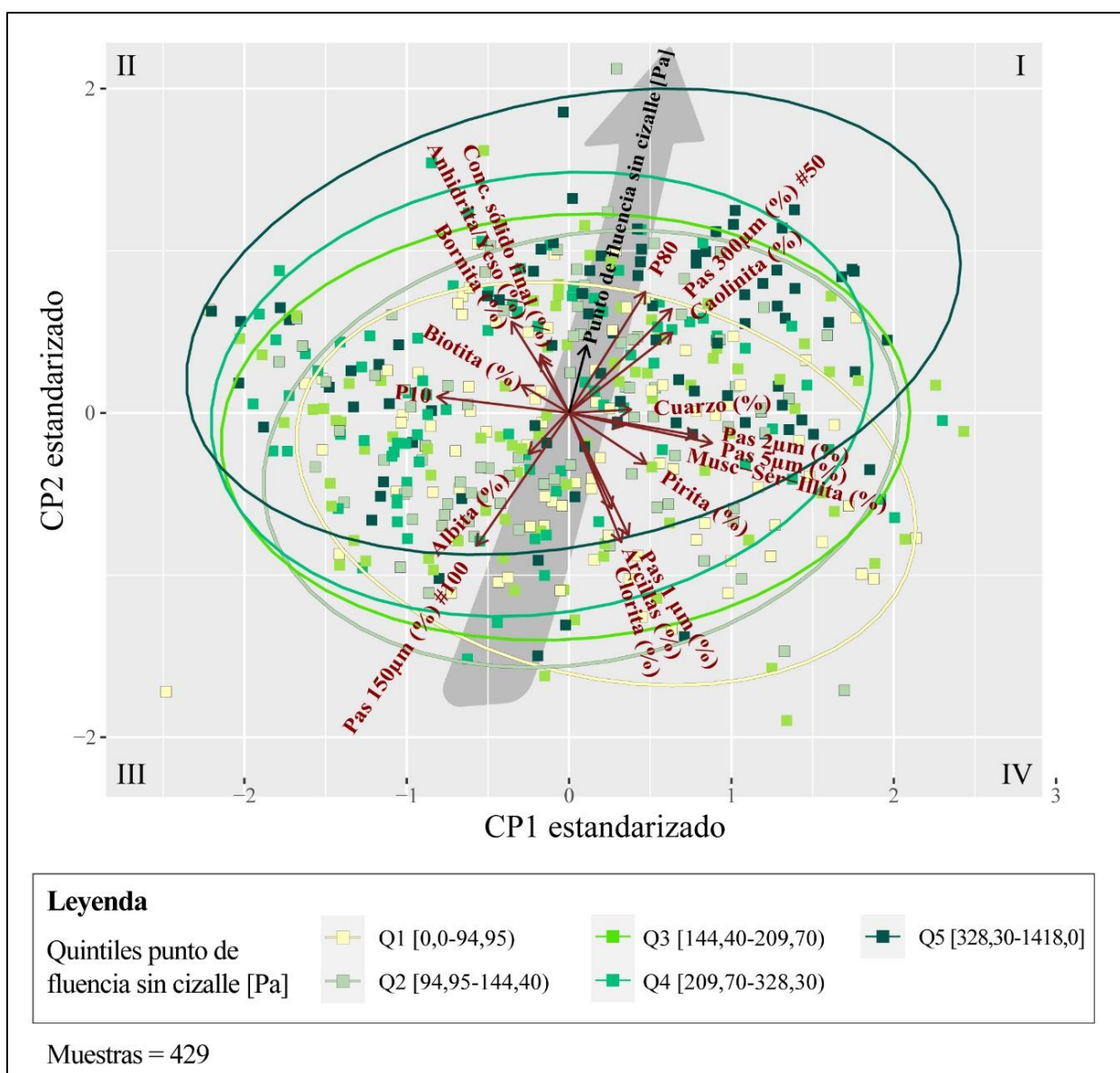


Figura 5.28: Gráfica de doble proyección del ACP que conjuga las bases de datos de mineralogía y granulometría láser (BD3) para analizar el parámetro de punto de fluencia sin cizalle.

5.5.2. Fenomenología de los resultados

A diferencia de los resultados obtenidos en los parámetros de sedimentación, el punto de fluencia sin cizalle presenta tendencias y correlaciones poco evidentes. El factor más influyente corresponde a la concentración de sólidos, variable heredada del ensayo de sedimentación estática y que muestra correlaciones positivas con el punto de fluencia sin cizalle.

En relación con la granulometría existe un comportamiento dual, donde tanto tamaños finos como gruesos se correlacionan positivamente con este parámetro. Las partículas finas aumentan considerablemente la viscosidad de las pulpas, mientras que las más gruesas ayudan a aumentar la concentración de sólido final, por lo que ambas fracciones pueden incrementar el punto de fluencia sin cizalle.

Las variables mineralógicas presentan correlaciones que se ajustan poco al comportamiento teóricamente esperado; más bien solo muestran relaciones ligadas a la concentración de sólido final. Por ejemplo, los minerales laminares, dadas sus características granulométricas y cristalográficas deberían presentar correlaciones positivas con el punto de fluencia sin cizalle, pero ocurre lo contrario. Mantienen correlaciones similares a las vistas con concentración de sólido, lo que indica que este factor primaría por sobre los controles que puedan ejercer cada mineral por sí solo. Otro ejemplo ocurre con los minerales ligados a una alteración potásica (anhidrita-yeso, biotita y bornita), los cuales, al haber mostrado estrechas relaciones con la concentración de sólido, se ven asociados de forma similar al punto de fluencia sin cizalle (aunque con correlaciones mucho más bajas). Otra posible causa de estos resultados podría relacionarse a que el grado de liberación de los minerales no fue considerado en este trabajo.

Gladman y otros (2006) señalan que la predicción de los modelos reológicos es pobre y poco cercana a la realidad y que solo aplican para el yacimiento en cuestión. Solo se han podido comprobar satisfactoriamente de manera global las influencias de la concentración de sólidos y la acción de los diferentes floclulantes. También remarca que un factor crítico corresponde a las condiciones en las que son llevados a cabo los ensayos y el propio espesamiento, por ejemplo, la capacidad de reestructuración de los flóculos bajo cizalle, aspecto muy complejo de entender y modelar.

5.5.3. Variaciones según litología y alteración hidrotermal

En la Figura 5.29.a, las medianas de cada litología mantienen relación con las tendencias observadas en concentración de sólido final, es decir las litologías con mayores o menores medianas coinciden en ambos parámetros, ratificando la relación entre ellos. Por otro lado, las alteraciones hidrotermales ya no evidencian medianas tan diferentes y el comportamiento es similar en las tres (Figura 5.29.b).

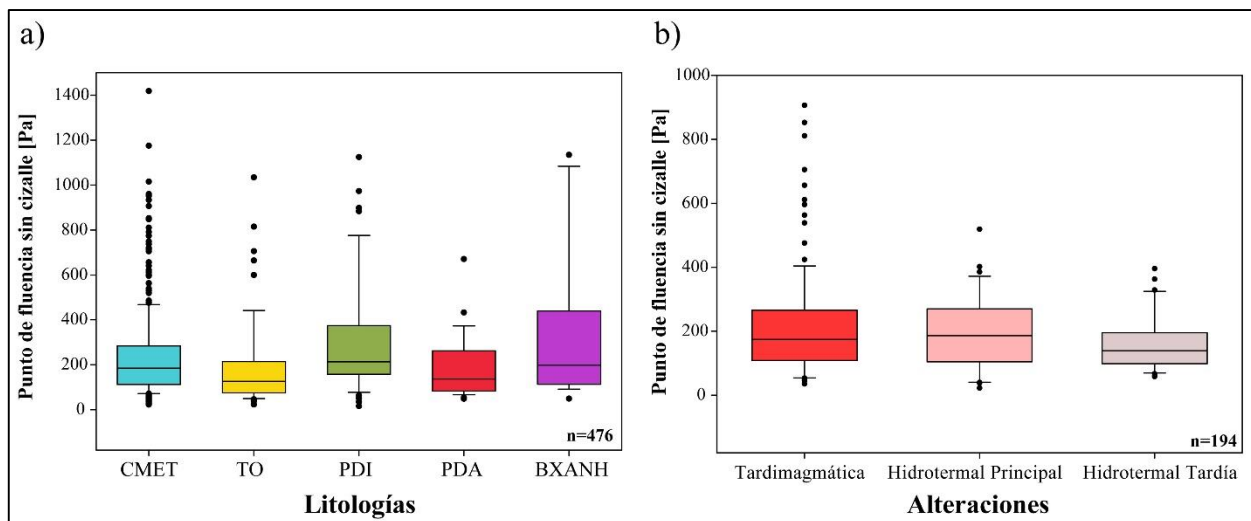


Figura 5.29: Punto de fluencia sin cizalle en relación a litología y alteración hidrotermal. (a) y (b) respectivamente.

5.5.4. UGM y punto de fluencia sin cizalle

A pesar de que las correlaciones observadas anteriormente son pequeñas, es posible observar una cierta tendencia de este parámetro en relación con las UGM. Éste aumenta desde la periferia hacia la zona central del yacimiento, de manera similar a lo visto en velocidad de sedimentación y concentración de sólido final (Figura 5.30), sin embargo, en este caso la tendencia es muy leve. Esto se evidencia al observar la reducida longitud del vector (de color negro) del punto de fluencia sin cizalle ubicado cerca del origen.

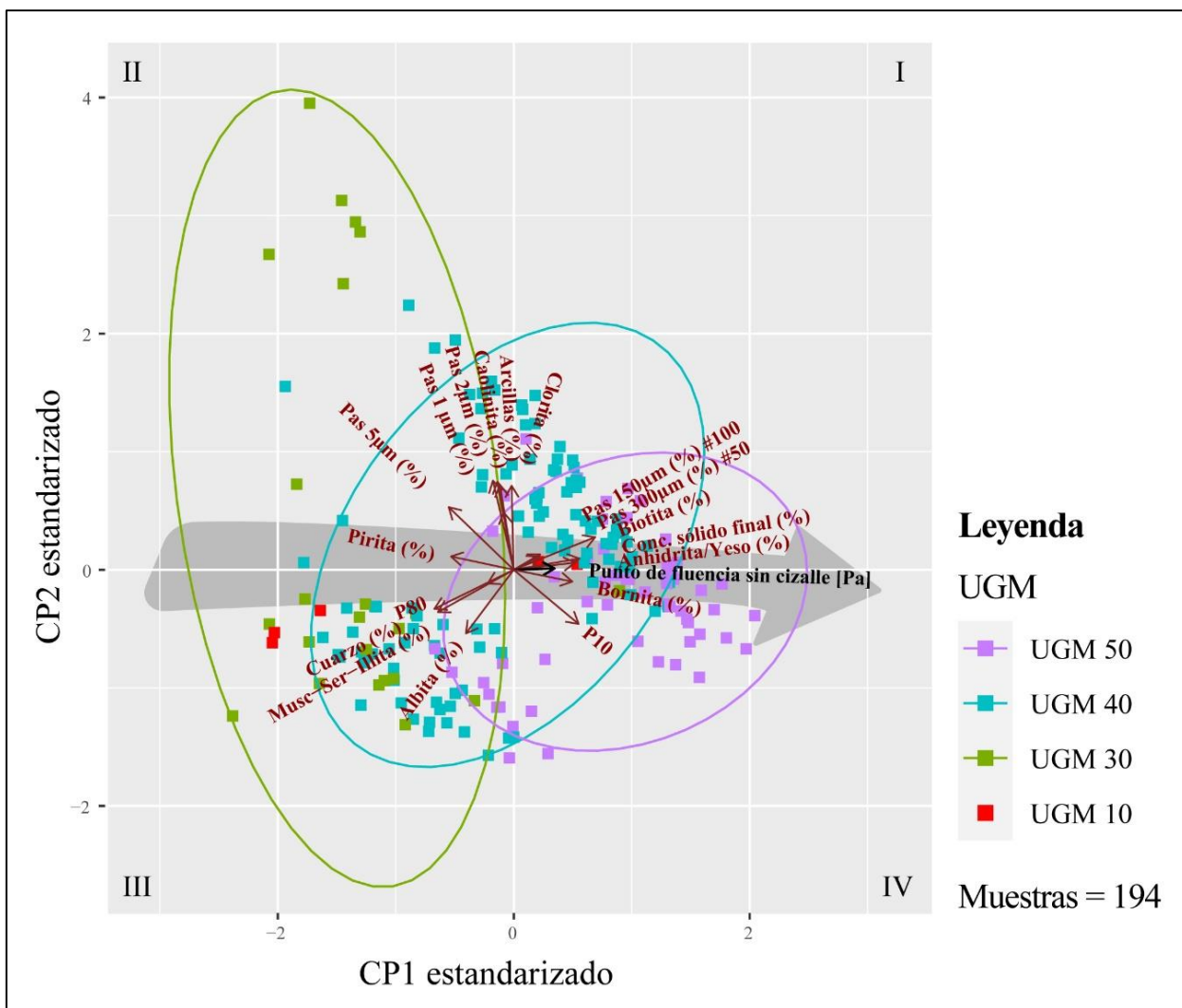


Figura 5.30: Gráfica de doble proyección del ACP de punto de fluencia sin cizalle que categoriza las muestras según UGM. La elipse estadística de la UGM 10 no se incluye debido a que las muestras son pocas y están muy dispersas en la gráfica.

5.6. Reología: Análisis de punto de fluencia con cizalle

5.6.1. ACP y análisis univariantes

Las consideraciones de cada ACP realizado en este subcapítulo se muestran a continuación (Tabla 5.7).

Tabla 5.7: Definición de bases de construcción de ACP de punto de fluencia con cizalle. La clasificación de las muestras en quintiles es arbitraria y sus rangos de valores son incluidos en cada gráfica. Las variables de entrada son obtenidas de los correlogramas de la Figura 5.1.

Parámetro analizado	Base de datos	Población litológica	Clasificación de muestras en ACP	Variables de entrada y sus correlaciones con el parámetro de estudio analizado
Punto de fluencia con cizalle	Mineralogía (BD1)	CMET	Quintiles de punto de fluencia con cizalle	Biotita (0,15), pirita (-0,12), clorita (-0,11), bornita (0,10), caolinita (0,09) y arcillas (-0,09)
	Mineralogía (BD1)	OTRAS LITOLÓGÍAS		Feldespato potásico (0,27), bornita (0,19), muscovita-sericita-illita (-0,18), pirita (-0,16), calcopirita (-0,15), cuarzo (-0,12), clorita (-0,10), caolinita (0,07) y arcillas (0,06)
	Granulometría (BD2)	Todas las litologías		300 μm (0,23), 2 μm (0,14), 150 μm (-0,13), P10 (-0,12), 5 μm (0,11), 75 y 45 μm (-0,10), 12 y 10 μm (-0,08)
	Mineralogía y Granulometría (BD3)	Todas las litologías		La combinación de las variables utilizadas en los análisis anteriores

5.6.1.1. Mineralogía: CMET

Los valores del punto de fluencia con cizalle aumentan desde la zona inferior hacia la zona superior de la gráfica, de forma casi paralela al CP2 (Figura 5.31). Mayores valores de este parámetro se relacionan a mayores cantidades de biotita, caolinita y bornita, mientras valores más bajos a pirita, arcillas y clorita.

Las elipses estadísticas de los quintiles muestran un traslape importante, por lo que el aumento del punto de fluencia con cizalle en relación con la mineralogía es gradual y poco evidente. Cabe destacar que las correlaciones son muy bajas y que la mayoría de los minerales incluidos son laminares.

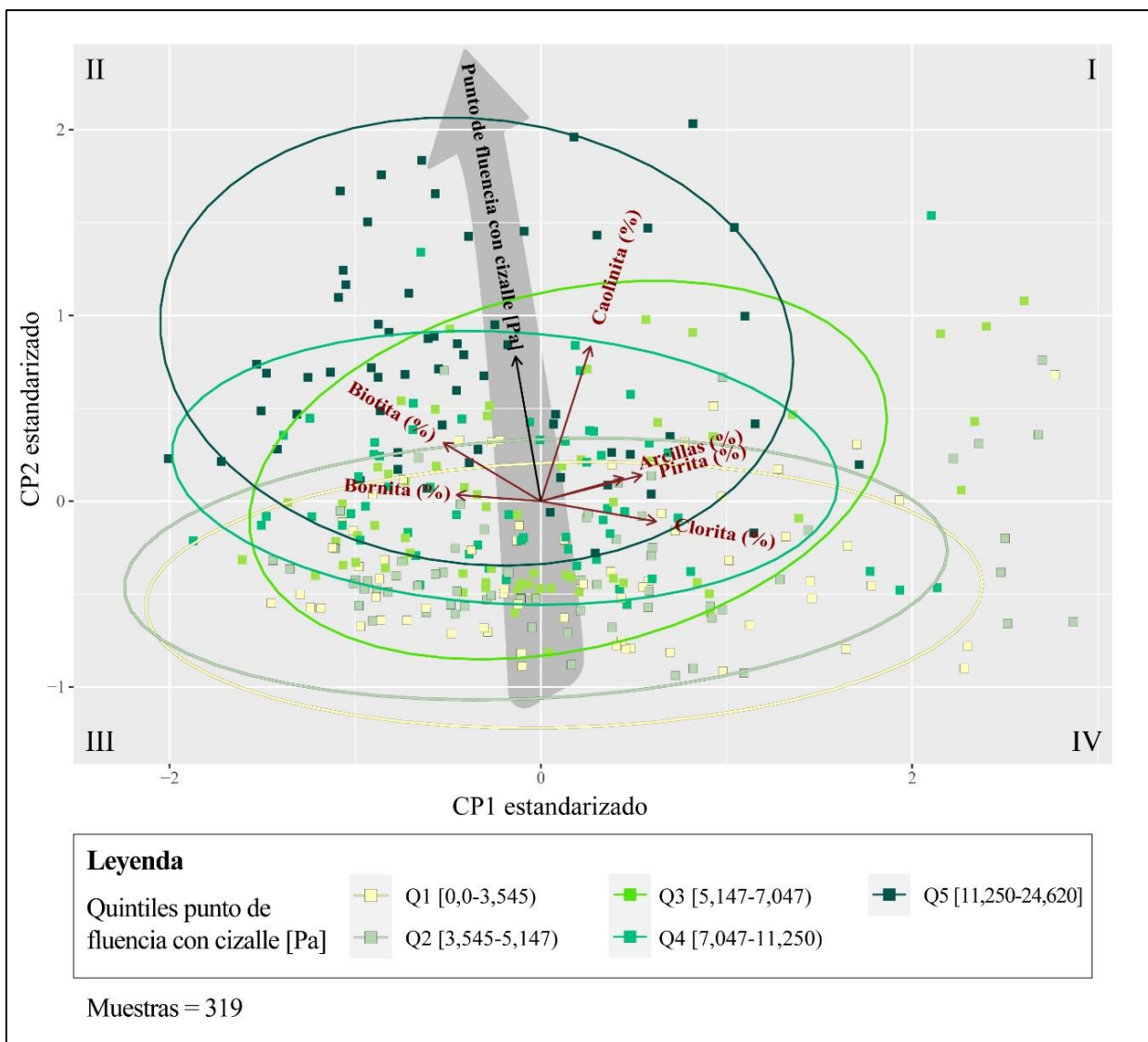


Figura 5.31: Gráfica de doble proyección del ACP de mineralogía-punto de fluencia con cizalle (CMET).

En los gráficos de caja (Figura 5.32) las curvas de tendencia de las medianas indican variaciones prácticamente lineales y con pendientes muy bajas, por lo que la influencia mineral es casi imperceptible en esta población de muestras.

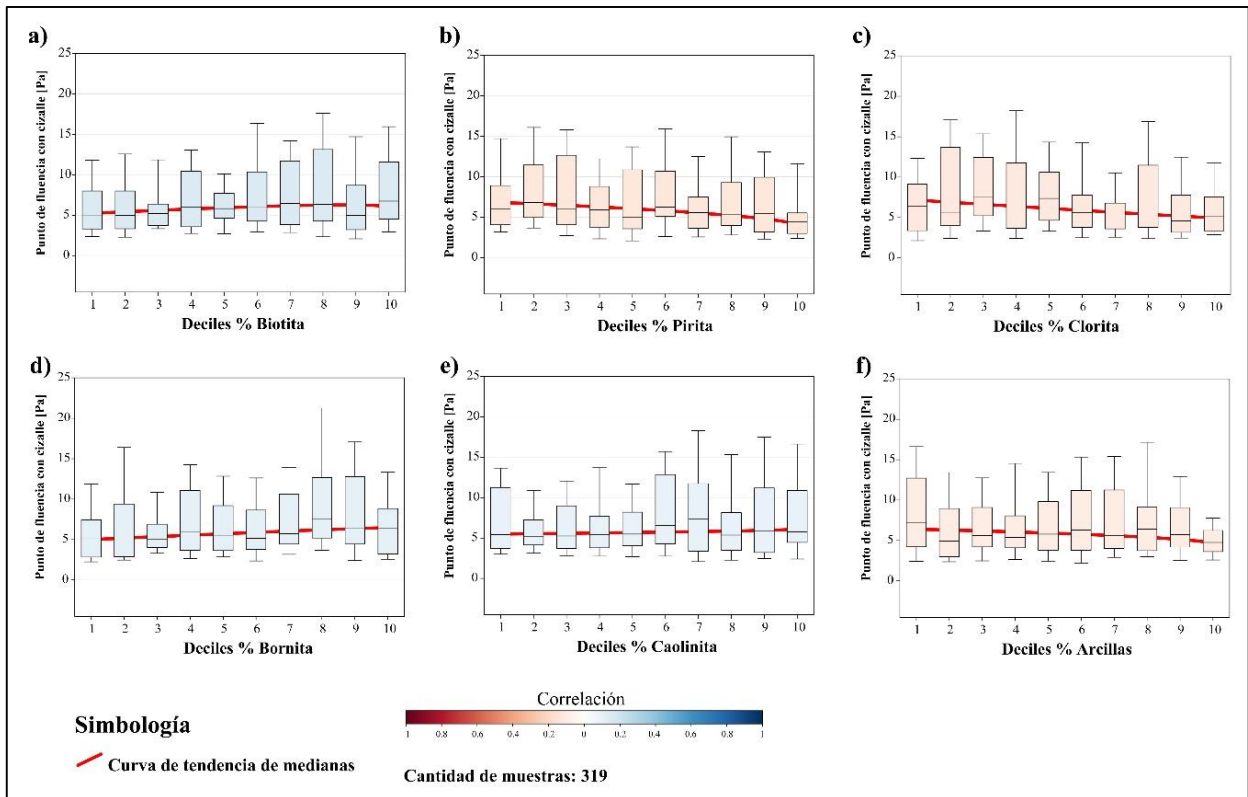


Figura 5.32: Gráficos de caja de deciles de porcentaje mineral y punto de fluencia con cizalle (CMET).

5.6.1.2. Mineralogía: OTRAS LITOLOGÍAS

En la gráfica de doble proyección de la Figura 5.33 el punto de fluencia con cizalle aumenta desde el cuadrante IV al II de manera subvertical y con un mayor control del CP3. La utilización de los componentes 1 y 3 da con la mejor representación y distribución de las correlaciones existentes, a pesar de que el vector del feldespato potásico (mineral con mayor correlación) no sea tan paralelo al vector del punto de fluencia con cizalle.

En el sector inferior derecho de la gráfica se ubican los minerales con correlaciones negativas (cuarzo, muscovita-sericita-illita, calcopirita y pirita), mientras que los demás (con correlaciones positivas) se distribuyen por el resto de los sectores. Las elipses estadísticas de los primeros cuatro quintiles se ubican prácticamente en la misma posición con un leve desplazamiento que sigue la tendencia del aumento de este parámetro. Solo la elipse del último quintil se separa de manera más notoria.

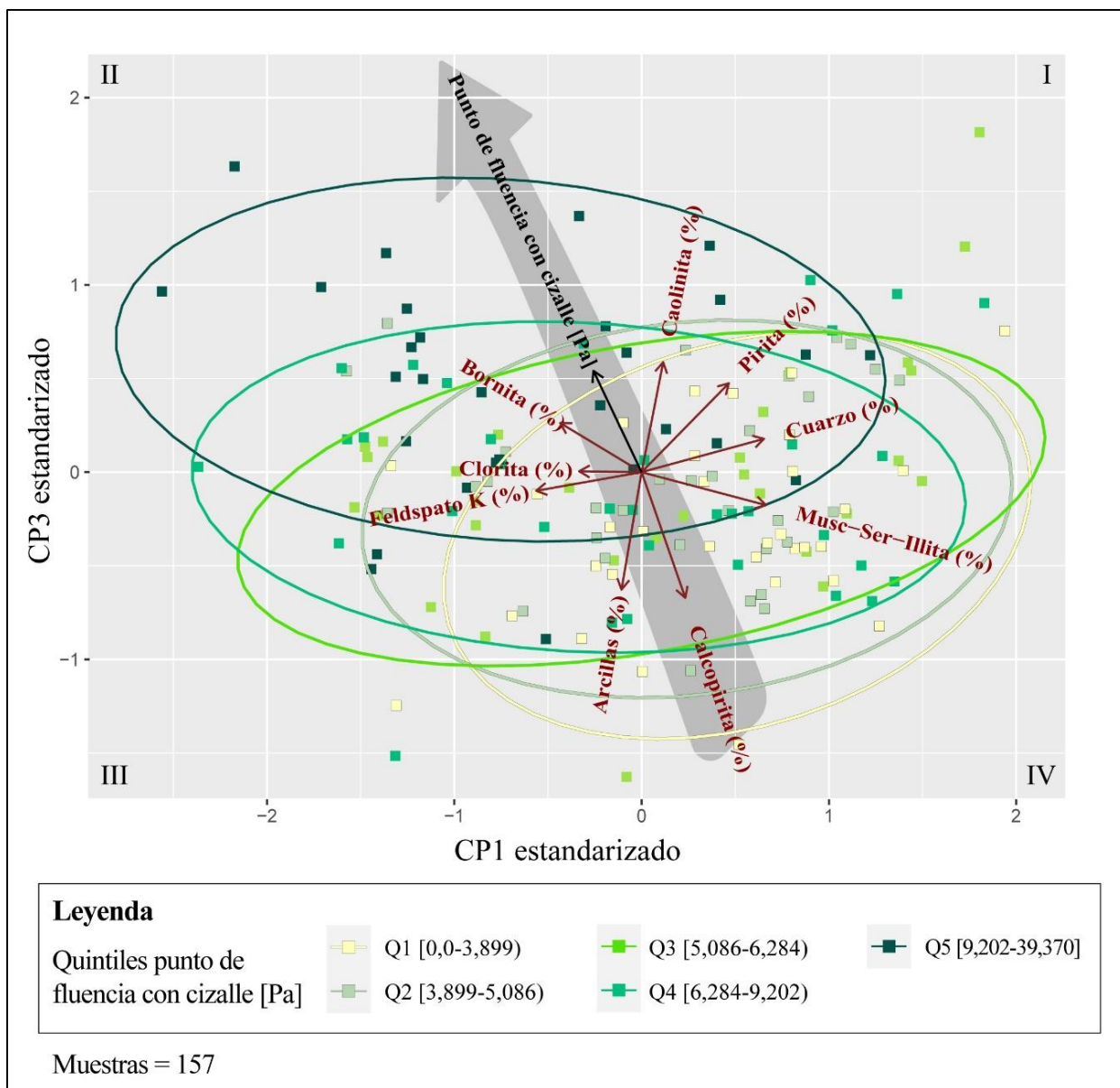


Figura 5.33: Gráfica de doble proyección del ACP de mineralogía-punto de fluencia con cizalle (OTRAS LITOLOGÍAS).

Los gráficos de caja (Figura 5.34) muestran que gran parte de las relaciones mineral-punto de fluencia con cizalle no son graduales como en los parámetros anteriores. Solo los gráficos de cuarzo, clorita, calcopirita y arcillas muestran tendencias de medianas relativamente lineales, mientras que para los minerales restantes se evidencian disminuciones y aumentos del punto de fluencia con cizalle a medida que cambian los deciles minerales. Esto indica que las correlaciones en este grupo litológico son complicadas de analizar en comparación con lo visto anteriormente en el CMET, donde las correlaciones eran pequeñas, pero había tendencias lineales claras. Esto podría

estar ligado a la menor cantidad de muestras existentes en este caso a diferencia del CMET, sumada a la mayor variabilidad mineralógica que posee este grupo litológico.

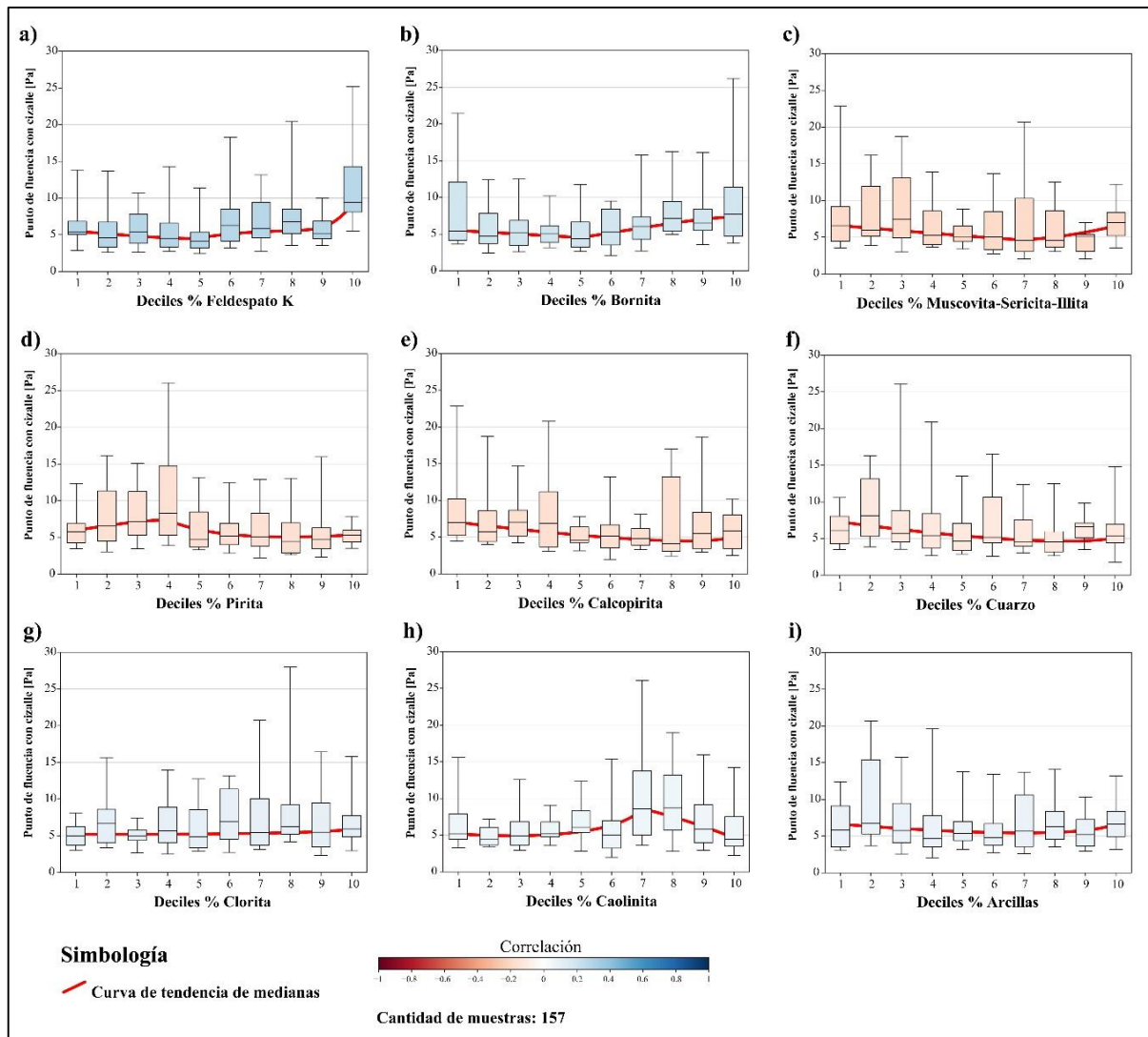


Figura 5.34: Gráficos de caja de deciles de porcentaje mineral y punto de fluencia con cizalle (OTRAS LITOLOGÍAS).

5.6.1.3. Granulometría

El punto de fluencia con cizalle aumenta desde la zona superior hacia la zona inferior de la gráfica paralelamente al CP2 (Figura 5.35). Las fracciones de 300, 5 y 2 μm se relacionan a mayores valores de punto de fluencia con cizalle, mientras que los demás tamaños granulométricos a valores menores. Las elipses estadísticas de los primeros cuatro quintiles se localizan en el mismo sector con un leve desplazamiento y solo la elipse del último quintil se separa de ellas. Esto indica que la

variación de valores de este parámetro es leve, tal cual como también lo señala su vector de poca longitud. Es importante recalcar que gran parte de las correlaciones que presentaron las variables ingresadas al ACP tienen valores cercanos a cero.

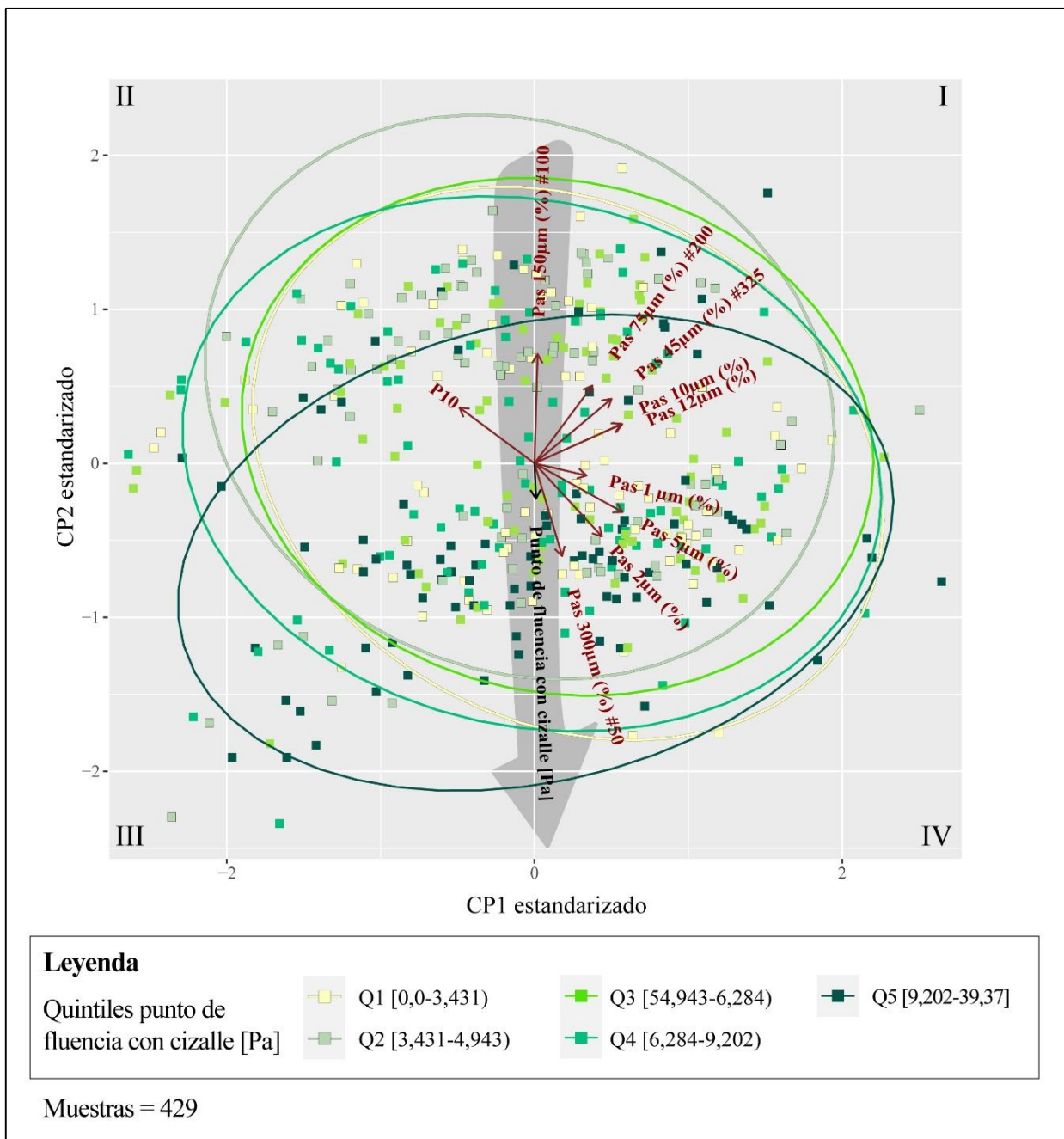


Figura 5.35: Gráfica de doble proyección del ACP de granulometría-punto de fluencia con cizalle.

Por otro lado, los gráficos de caja de la Figura 5.36 indican que el punto de fluencia con cizalle presenta una variación gradual y con baja pendiente con respecto a las variables granulométricas

utilizadas en el ACP. Solo la fracción de 300 μm muestra correlaciones importantes dadas principalmente por los altos valores presentes en las cajas de los deciles 5 a 10 (Figura 5.42.a).

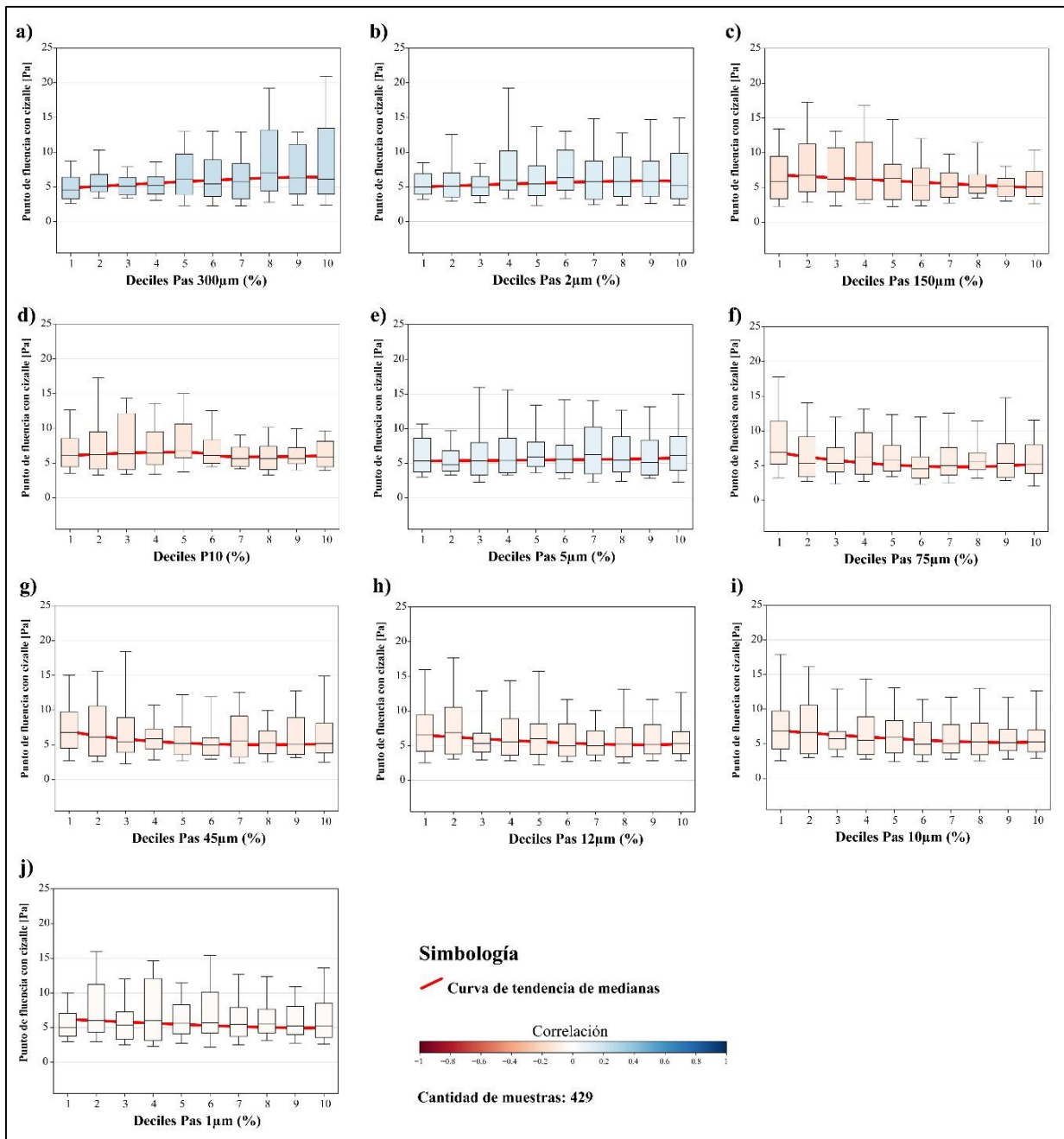


Figura 5.36: Gráficos de caja de deciles de fracciones granulométricas y punto de fluencia con cizalle.

5.6.1.4. ACP compilatorio

Al conjugar las variables granulométricas y mineralógicas (Figura 5.37) es posible visualizar las relaciones existentes entre ellas, pero no así la tendencia del punto de fluencia con cizalle. El vector

Una de las discrepancias más marcadas entre estos parámetros reológicos, radica en la influencia de la concentración de sólido final; factor relevante para el punto de fluencia sin cizalle, pero pobremente relacionada con su análogo con cizalle. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Vera (2019), donde el punto de fluencia sin cizalle aumenta en muestras con mayores concentraciones de sólido, mientras que el punto de fluencia con cizalle no evidencia una relación clara con este factor. Esto indica que el ordenamiento de las partículas posee un cierto grado de influencia en la reología, el cual cambia al agitar la pulpa para obtener las mediciones de este último parámetro.

Al perder importancia la concentración de sólido, lo hacen también los minerales asociados a ella (positiva o negativamente), razón por la cual no se ven tan asociados al punto de fluencia con cizalle. Esto y las mínimas correlaciones mostradas por las variables mineralógicas hace complejo encontrar una fenomenología tras lo observado. Por otro lado, las variables granulométricas mantienen las relaciones vistas en el parámetro anterior, por lo que el trasfondo puede ser similar.

5.6.3. Variaciones según litología y alteración hidrotermal

Tanto las litologías como las alteraciones hidrotermales no muestran diferencias entre sí, teniendo medianas muy similares sin una lógica clara (Figura 5.38).

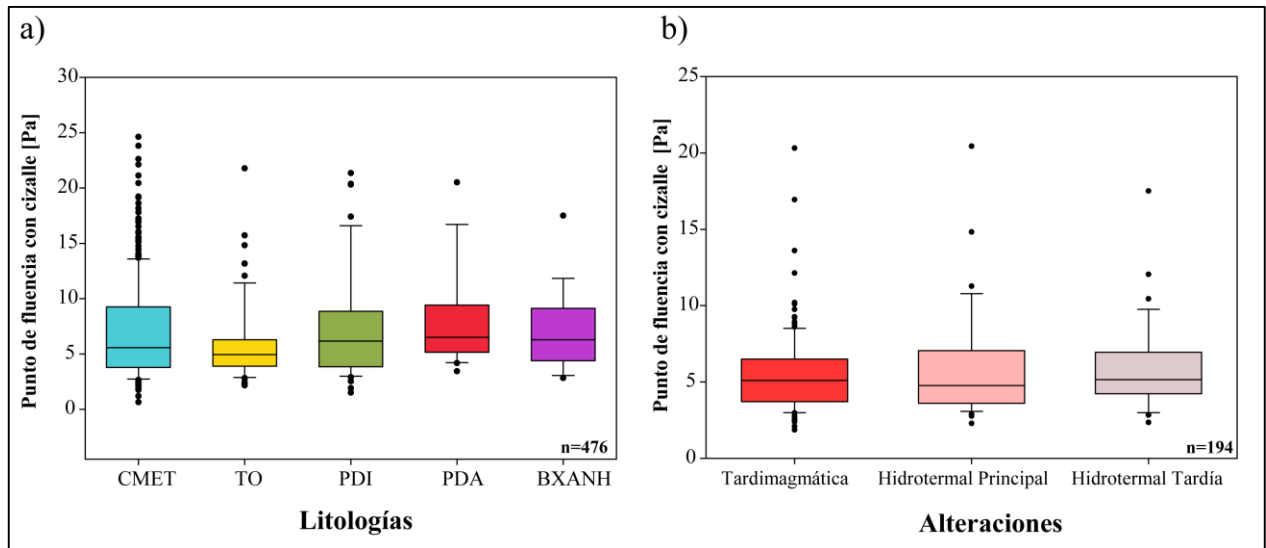


Figura 5.38: Punto de fluencia con cizalle en relación con litología y alteración hidrotermal. (a) y (b) respectivamente.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo aporta las bases para comprender el rol que poseen los controles geológicos sobre esta temática, siendo el punto de partida para futuras investigaciones que tengan como fin la generación de unidades geometalúrgicas de sedimentación y reología en DET.

Los valores de los parámetros de velocidad de sedimentación y concentración de sólido final tienden a aumentar hacia las zonas centrales del yacimiento. En general, estos aumentos son graduales, sin presentar cambios abruptos.

Esto se relacionó a las variaciones mineralógicas y texturales existentes, que a su vez dependen de la alteración hidrotermal y litología. Las zonas periféricas, asociadas a alteraciones fílicas, mostraron mayor presencia de minerales de granulometría fina y/o laminares, los cuales se asociaron estrechamente a disminuciones en los valores de estos parámetros. Entre ellos destacan muscovita-sericita-illita en casi todas las litologías y clorita en el CMET. El cuarzo también mostró correlaciones negativas dada la relación que posee en ciertos casos con las granulometrías finas. Las arcillas, en general, también presentaron influencias negativas, aunque subordinadas producto de sus bajas abundancias.

A medida que se avanza hacia zonas más centrales del depósito, las texturas de los intrusivos se hacen más gruesas y la suite de minerales de alteración cambia, predominando una asociación potásica. En estos sectores, el aumento de los feldespatos y la disminución de los minerales laminares permite que los valores de estos parámetros aumenten. Es importante recalcar que todos los minerales y granulometrías poseen una cierta influencia sobre ellos y las tendencias observadas son la sumatoria de todos estos factores.

Los minerales metálicos como calcopirita, bornita o pirita podrían ser considerados minerales *proxy* de los parámetros evaluados dadas las relaciones obtenidas, pues se puede cuantificar y contrastar sus concentraciones en prácticamente todo el yacimiento, no, así la biotita o la anhidrita ligadas solo a las zonas centrales.

Litológicamente, el PDA mostró los mejores rendimientos y se puede considerar un cuerpo que presentará resultados favorables en los procesos de sedimentación. El CMET también manifiesta buenos rendimientos, pero sólo en zonas centrales. Esto se relaciona a que ambas litologías están asociadas en ciertos casos a la alteración tardimagmática (potásica). Las demás litologías afectadas

por alteraciones fílicas poseen mayores cantidades de minerales laminares y de grano fino, por lo que mostraron menores valores.

Si bien existe una tendencia espacial en estos parámetros, la amplia variabilidad textural, mineralógica y litológica del yacimiento no permite predecir satisfactoriamente en todos los casos el comportamiento de los procesos de sedimentación en los espesadores.

En los parámetros reológicos de punto de fluencia sin cizalle y con cizalle, la influencia geológica fue menos clara. En primer lugar, en el punto de fluencia sin cizalle se acentuó la influencia de la concentración de sólidos final y los factores mineralógicos y granulométricos tomaron una importancia secundaria. Se evidencia que las muestras con mayor concentración de sólido tienden a presentar mayor punto de fluencia sin cizalle, es decir, un comportamiento reológico más desfavorable. Tanto las granulometrías finas como gruesas promovieron aumentos en este parámetro y la influencia mineralógica solo pudo asociarse de manera indirecta a través de la concentración de sólido final. Para ambos tipos de variables las tendencias de aumento o disminución en este parámetro son graduales.

Las litologías también se vieron asociadas con el punto de fluencia sin cizalle de forma indirecta, de tal manera que las con mayor concentración de sólidos, presentaron en general valores más altos en este parámetro (CMET y PDA en menor grado). Con las alteraciones hidrotermales ocurrió lo mismo, lo que indica que las zonas que poseen buenos rendimientos en sedimentación no poseen tan buenas cualidades reológicas, haciendo aún más complejo la predicción general de los procesos que ocurren en los espesadores. Independiente de ello, es posible determinar que este parámetro aumenta hacia las zonas centrales del yacimiento, aunque es una tendencia mucho menos marcada que para velocidad de sedimentación y concentración de sólido final.

Por otro lado, en el punto de fluencia con cizalle existen tendencias muy mínimas y correlaciones poco significativas con los controles geológicos. No se pudo determinar una variación espacial que sirva para predecir el comportamiento de este parámetro. A diferencia de su análogo sin cizalle, no mostró relación estrecha con la concentración de sólido final, lo que indica que existen muchos otros factores dentro del propio espesador que pueden superponerse sobre los controles geológicos, debido principalmente a la agitación, mezclas de las pulpas y ordenamiento de las partículas sólidas.

Tampoco fue posible observar diferencias en base a la litología o con respecto a las alteraciones hidrotermales, lo cual confirma la complejidad de los modelos de predicción reológica denotada en bibliografía.

De manera preliminar, se recomienda tener en cuenta que las zonas con buenos rendimientos en sedimentación tendrán resultados desfavorables en reología debido al aumento de la concentración de sólido y viceversa. Para obtener resultados favorables en el espesamiento es conveniente tratar mezclar la alimentación de las zonas de UGM 50 con UGM inferiores a ésta, de tal manera de homogenizar las velocidades de sedimentación y a la vez evitar embancamientos.

A pesar de lo anterior, las UGM de recuperación no representan adecuadamente la variación de las propiedades de sedimentación y reología, pues solo entregan tendencias generales y no zonaciones espaciales definidas. Por ello, es necesario aportar más información para generar unidades que clasifiquen de mejor manera los comportamientos de estos parámetros y mejorar la planificación del espesamiento. Se puede mencionar lo siguiente:

- Un modelo de alteración hidrotermal específico para cada intrusivo y los principales cuerpos de brechas con tal de entender de mejor manera la secuencia evolutiva del yacimiento y las variaciones espaciales de cada mineral.
- Una base de datos que aporte los grados de liberación de cada mineral de ganga para esclarecer más aun la influencia real que posee cada fase.
- Una base de datos de difracción de rayos X (DRX) que facilite el análisis cualitativo y cuantitativo de los minerales de granulometrías ultrafinas.
- Distinguir entre fases de origen primario y secundario (por ejemplo, cuarzo, clorita, muscovita etc.)
- Mayor cantidad de muestras para generar un análisis más robusto estadísticamente, en especial para los intrusivos félsicos para disminuir el desbalance de datos.

Por otra parte, la imposibilidad de analizar los datos de turbidez apunta hacia la necesidad de cambiar las metodologías utilizadas en la toma de datos, específicamente en una reducción del tiempo de espera posterior a la agitación de las muestras.

Finalmente, de forma general, se concluye que este trabajo aporta las bases para comprender el rol que poseen los controles geológicos sobre esta temática, siendo el punto de partida para futuras investigaciones en DET, que tengan como fin la generación de unidades geometalúrgicas de sedimentación y reología.

7. REFERENCIAS

- ABDI, H. & WILLIAMS, L. 2010. Principal component analysis. *Computational Statistics*. N°4, Vol. 2: 433-459.
- ABUZAID, N. S.; BUKHARI, A. A. & AL-HAMOUZ, Z. M. 1998. Removal of bentonite causing turbidity by electro-coagulation. *Journal of Environmental Science & Health Part A*. N°7, Vol. 33: 1341-1358.
- AGUIRRE, L. 1960. Geología de Los Andes de Chile Central. Provincia de Aconcagua. *Instituto de Investigaciones Geológicas*, Chile. N°9: 60 pp. Santiago.
- ARÉVALO, A. y FLOODY, R. 1995, Estudio Geometalúrgico del mineral a explotar a mediano y largo plazo. Capítulo 1, Modelo Global de Alteración y Mineralización: Internal report, Superintendencia de Geología, El Teniente, CODELCO-Chile. 16pp.
- ARJMAND, R.; MASSINAEI, M. & BENHNAMFARD, A. 2019. Improving flocculation and dewatering performance of iron tailings thickeners. *Journal of Water Process Engineering*. Vol. 31: 100873
- BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K 1989. An introduction to rheology, vol. 3 Amsterdam. *The Netherlands: Elsevier Science BV*. Vol. 3. Amsterdam.
- BECKER, M.; YORATH, G.; NDLOVU, B.; HARRIS, M.; DEGLON, D. & FRANZIDIS, J. P. 2013. A rheological investigation of the behaviour of two Southern African platinum ores. *Minerals Engineering*. Vol. 49: 92-97.
- BETANCOURT, F.; CELI, D.; CORNEJO, P.; DEL RÍO, M.; MACERA, L.; PEREIRA, A. & RULYOV, N. 2020. Comparison of ultra-flocculation reactors applied to fine quartz slurries. *Minerals Engineering*. Vol. 148: 106074.
- BURGOS, L. 2002. Petrografía y Geoquímica de la Diabasa y Diques Basálticos que constituyen las “Andesitas de la Mina” en el yacimiento El Teniente, VI región, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 108 pp. Concepción.
- CAMUS, F. 1975. Geology of the El Teniente Orebody with Emphasis on Wall-Rock Alteration. *Economic Geology*. N°8, Vol. 70: 1.341-1.372.
- CAMUS, F. 2002. The Andean porphyry systems. *Giant ore deposits: characteristics, genesis and exploration. CODES Special Publication*. Vol, 4: 5-22.
- CANNELL, J. 2004. El Teniente Porphyry Copper-molybdenum Deposit, Central Chile. Degree of Ph.D. University of Tasmania: 317 pp. Hobart.
- CANNELL, J.; COOKE, D.; WALSHE, J. y STEIN, H. 2005. Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu-Mo deposit. *Economic Geology*. N°5, Vol. 100: 979–1003.

CANNELL, J.; COOKE, D.; WALSH, J. y STEIN, H. 2007. Geology, mineralization, alteration and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu-Mo deposit - a reply: *Economic Geology*. N°6, Vol. **102**: 1171–1180.

CASTILLO, C. 2018. Estudio del efecto de las condiciones hidrodinámicas, la presencia de iones y de arcilla, en el proceso de floculación de un relave de sulfuro de cobre. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Metalurgia Extractiva. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas: 114 pp., Santiago.

CHARRIER, R.; 1973. Geología de las Provincias O'Higgins y Colchagua. Instituto de Investigación de Recursos Naturales (IREN). Publicación N° 7. Santiago.

CHARRIER, R. y MUNIZAGA, F. 1979. Edades K/Ar de volcanitas cenozoicas del sector cordillerano del Río Cachapoal, Chile (34°15' Lat. Sur). *Revista Geológica de Chile*. N°2, Vol. **46**: 41-51.

CHARRIER, R.; BAEZA, O.; ELGUETA, S.; FLYNN, J.; GANA, P.; KAY, S.; MUÑOZ, N.; WYSS, A. y 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*. N°1, Vol. **15**: 117-139.

CHARRIER, R.; PINTO, L. & RODRIGUEZ, M. 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. The Geology of Chile. *The Geological Society*: 21-114. London.

CODELCO 2003. Estándares y Metodologías de Trabajo para Geología de Minas, Capítulo 2. Superintendencia de Geología, CODELCO Chile, División El Teniente (Inédito): 1-25. Rancagua.

CODELCO 2011. El Teniente, minería del futuro. Dirección de comunicaciones, Gerencia de sustentabilidad y asuntos externos.

CONCHA, F. (2001). Manual de filtración & separación. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

COPAJA, C. 2018. Correlación entre variables químicas y espectrales con el comportamiento metalúrgico en el yacimiento Escondida, Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 98 pp. Concepción.

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

DUARTE, P. 2000. Caracterización geológica y geotécnica del pórfido dacítico El Teniente: Unpublished Honours thesis. Universidad de Chile (Inédito). 80pp. Santiago, Chile.

ERIKSSON, L.; STEEN, I. & TENDAJ, M. 1992. Evaluation of sludge properties at an activated sludge plant. *Water science and technology*. Vol. **25**(6), 251-265.

FALCÓN, M. y RIVERA, O. 1998. Estudio geológico distrital de la División El Teniente de CODELCO-Chile, escala 1:25.000. Informe inédito. Vicepresidencia de Exploraciones y Asociaciones Mineras, CODELCO Chile, 108 pp. Santiago, Chile.

- FOCK, A. 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile central entre los 33° y los 34°S. Tesis de Ms.C., Universidad de Chile, Departamento de Geología. (Inédito): 179 pp. Santiago.
- GARRIDO, I.; RIVEROS, M.; CLADOUHOS, T.; ESPINEIRA, D. y ALLMENDINGER, R. 1994. Modelo geológico estructural del yacimiento El Teniente. Congreso Geológico Chileno. N°7, Vol. 2, 1553-1558. Concepción.
- GHAFARI, S.; AZIZ, H. A.; ISA, M. H. & ZINATIZADEH, A. A. 2009. Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation–flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum. *Journal of hazardous materials*. Vol. **163**(2-3), 650-656.
- GLADMAN, B. J.; USHER, S. P. & SCALES, P. J. 2006. Understanding the thickening process. *Proceedings of the Ninth International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Australian Centre for Geomechanics*. Vol. **1**: 5-12.
- GÓMEZ, R. 2001. Geología de las unidades volcanogénicas cenozoicas del área industrial de El Teniente, entre Colón y Coya, Cordillera Principal de Rancagua, VI Región, Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 143 pp. Santiago.
- GONZALEZ, R. 2006. Petrografía, geoquímica y microtermometría de los intrusivos félsicos del sector norte del yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 149 pp. Concepción.
- GREGOR, J. E.; NOKES, C. J. & FENTON, E. 1997. Optimising natural organic matter removal from low turbidity waters by controlled pH adjustment of aluminium coagulation. *Water Research*, N°12, Vol. **31**: 2949-2958.
- HITSCHFELD, M. 2006. Petrografía y geoquímica de los intrusivos leucocráticos del sector sur este del yacimiento El Teniente, VI Región, Chile. Tesis de Título, Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción (Inédito). 129 pp., Concepción.
- JARA, P. y CHARRIER, R. 2014. Nuevos antecedentes estratigráficos y geocronológicos para el Meso-Cenozoico de la Cordillera Principal de Chile entre 32° y 32° 30'S: Implicancias estructurales y paleogeográficas. *Andean Geology*. N°1, Vol. **41**: 174-209. Santiago.
- JEWELL, R. J. & FOURIE, A. B. 2006. Paste and thickened tailings: a guide. *Australian Centre for Geomechanics*. The University of Western Australia.
- KLEMM, L. M.; PETTKE, T.; HEINRICH, C. y CAMPOS, E. 2007. Hydrothermal evolution of the El Teniente deposit, Chile: Porphyry Cu-Mo ore deposition from low-salinity magmatic fluids. *Economic Geology*. N°6, Vol. **102**: 1021-1045.
- 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, Chile*. Vol. **8**: 95 pp., Santiago.
- KOEPPEN, R. y GODOY, E. 1994. Volcanic geology at El Teniente study area, Chile. CODELCO - Chile - SERNAGEOMIN, 111 pp.
- KRZYWINSKI M. & ALTMAN N. 2014. Points of significance: visualizing samples with box plots. *Nature Methods*. Vol. **11**: 119–120.

- KURTZ, A.; KAY, S.; CHARRIER, R. & FARRAR, E. 1997. Geochronology of Miocene plutons and exhumation history of the El Teniente region, central Chile (34-35°S), *Revista Geológica de Chile*. N°1, Vol. **24**: 73-90. Santiago.
- LEVI, B. y AGUIRRE, L. 1981. Enialic spreading subsidence in the Mesozoic and Paleogene Andes of Central Chile. *Journal of the Geological Society of London*. N°1, Vol. **138**: 75-81.
- MAKSAEV, V.; MUNIZAGA, F.; MCWILLIAMS, M.; FANNING, M.; MATHUR, R.; RUIZ, J. & ZENTILLI, M. 2004. New Chronology for El Teniente, Chilean Andes, from U-Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Re-Os, and Fission-Track Dating: Implications for the Evolution of a Supergiant Porphyry Cu-Mo Deposit. *Society of Economic Geologists, Special Publication*. Vol. **11**: 15-54.
- MARTÍNEZ, C. 2020. Influencia de las variables mineralógicas y texturales sobre la ley de cobre en concentrados rougher, División Andina, Codelco-Chile. Trabajo Integrativo Final para optar al grado de Magíster en Mineralogía Aplicada a la Geometalurgia. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería (Inédito): 68 pp., Concepción.
- MERRIL, J. 2016. Estudio del efecto de la composición mineralógica en la reología de pulpas basado en técnicas de caracterización avanzada. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Metalurgia Extractiva. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (Inédito): 198 pp., Santiago.
- MOGOLLÓN, C. 2018. Predicción de Resultados Metalúrgicos en Flotación de Minerales mediante Análisis Multivariante y Aprendizaje Automático. Tesis para optar al Grado de Máster Universitario en Ingeniería de Análisis de Datos, Mejora de Procesos y Toma de Decisiones. Dpto. de Estadística e Investigación Operativa Aplicadas y Calidad, Universitat Politècnica de Valencia: 87 pp., Valencia.
- NDLOVU, B.; BECKER, M.; FORBES, E.; DEGLON, D.; & FRANZIDIS, J. P. 2011. The influence of phyllosilicate mineralogy on the rheology of mineral slurries. *Minerals engineering*. N°12, Vol. **24**: 1314-1322.
- NGUYEN, T. P.; HANKINS N. P.; & HILAL, N. 2007. Effect of chemical composition on the flocculation dynamics of latex-based synthetic activated sludge. *Journal of hazardous materials*. Vol. **139**(2), 265-274.
- OSSANDÓN, G. 1974. Petrografía y Alteración del Pórfido Dacítico, Yacimiento El Teniente. Memoria de Título, Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile.
- PARDO, R. & KOVACIC, P. 2012. Geología y potencial de exploración del distrito El Teniente. Andes Centrales, VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile. Congreso Geológico Chileno N°13. Vol.1: 10-12. Antofagasta.
- PÉREZ, L. 2005. Cátedra de hidráulica aplicada a ingeniería sanitaria. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería: 25 pp., Buenos Aires.
- PIQUER, J.; CASTELLI, J.; CHARRIER, R. & YÁÑEZ, G. 2010. El Cenozoico del alto río Teno, Cordillera Principal, Chile central: estratigrafía, plutonismo y su relación con estructuras profundas. *Andean Geology*. N°1, Vol. **37**: 32-53. Santiago.
- RAVANAL, J. 2017. Estudio del efecto de la arcilla caolinita en la velocidad de sedimentación y yield stress empleando floculante aniónico y catiónico en pulpas de cuarzo. Tesis de Memoria

para optar al Título Ingeniero Civil Metalúrgico. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica (Inédito): 72 pp., Concepción.

RABBIA, O., HERNÁNDEZ, L., FRENCH, D., KING, R. & AYERS, J. 2009. The El Teniente porphyry Cu–Mo deposit from a hydrothermal rutile perspective. *Mineralium Deposita*. N°. 44: 849-866.

RABBIA, O.; REICH, M.; HERNÁNDEZ, L.; KING, R.; y LÓPEZ-ESCOBAR, L. 2000. High-Al TTG-like suite at the El Teniente porphyry copper deposit. Congreso Geológico Chileno N°9. Vol. 1: 326-330. Puerto Varas.

RAMOS, V. 1988. The tectonics of the Central Andes; 30 to 33 S latitude. *Processes in continental lithospheric deformation*. Vol. 218: 31pp.

REIMANN, C.; FILZMOSER, P.; GARRET, R.; DUTTER, R. 2008. *Statistical data analysis explained: Applied environmental statistics with R*. John Wiley & Sons, Ltd: 343 pp.

ROJAS, A. 2003. Petrografía y geoquímica del Pórfido Teniente, ubicado en el sector norte del yacimiento El Teniente, Provincia de Cachapoal, VI Región, Chile. Memoria de Título, Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción (Inédito). 133 pp. Concepción.

SABAH, E. & ERKAN, Z. E. 2006. Interaction mechanism of flocculants with coal waste slurry. *Fuel*. N°3, Vol. 85: 350-359.

SCHULZ, C. 2020. Química mineral de las cloritas hidrotermales del yacimiento El Teniente, Chile Central. Implicancias en la exploración de pórfidos de cobre. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 152 pp. Concepción.

SKEWES, M. y ARÉVALO, A. 2000. El complejo de gabros y diabasas que hospedan a las Brechas mineralizadas del depósito de cobre El Teniente, Chile Central. Congreso Geológico Chileno N° 9, Vol. 1: 380-384.

SKEWES, M.; ARÉVALO, A.; FLOODY, R.; ZUÑIGA, P. & STERN, C. 2002. The giant El Teniente breccia deposit: hypogene copper distribution and emplacement. Society of Economic Geologists, Special Publication. Vol. 9: 299-332.

SKEWES, M.; ARÉVALO, A.; FLOODY, R.; ZUÑIGA, P. & STERN, C. 2005. The El Teniente megabreccia deposit, the world's largest copper deposit. *Super Porphyry Copper & Gold Deposits - A Global Perspective. Volume 1. Porter, T. M. PGC Publishing*. Vol.1, 183-114. Adelaide.

SPENCER, E. 2015. The Transport and Deposition of Molybdenum in Porphyry Ore Systems. PhD thesis. Department of Earth Science and Engineering Imperial College London (inédito).

SPENCER, E.; VRY, V.; WILKINSON, J.; CREASER, R.; y SEGUEL, J. 2015, The Distribution and Timing of Molybdenite Mineralization at the El Teniente Cu-Mo Porphyry Deposit, Chile. *Economic Geology*. N°2, Vol. 110: 387-421.

SPURREL, D. J. 1963. Some metallurgical applications of principal components. *Journal of the Royal Statistical Society*. N°12, Vol 3: 180-188

STERN, C.; FUNK, J.; SKEWES, M. y ARÉVALO, A. 2007. Magmatic Anhydrite in Plutonic Rocks at El Teniente Cu-Mo Deposit, Chile, and the role of sulfur- and copper-rich magmas in its Formation. *Economic Geology*. N°7, Vol. **102**: 1335-1344.

STERN C.; SKEWES, M & ARÉVALO A. 2010. Magmatic Evolution of the Giant El Teniente Cu-Mo Deposit, Central Chile. *Journal of Petrology*. N°7-8, Vol. 52: 1.591-1.617.

SVAROVSKY, L. 1988. Solid Liquid Separations. *Editorial Butterworths*. Vol. **2**. Londres.

THIELE, R. 1980, Hoja Santiago, Región Metropolitana, Servicio Nacional de Geología y Minería, *Carta Geológica de Chile* N°29: 51pp.

URÍZAR, G. 2019. Determinación de controles mineralógicos para modelos geometalúrgicos in situ, División El Teniente-Codelco Chile. Trabajo Integrativo Final para optar al grado de Magíster en Mineralogía Aplicada a la Geometalurgia. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería (Inédito): 109 pp., Concepción.

URRUTIA, N., 2016. Estudio reológico de relaves basado en técnicas de caracterización avanzada de minerales. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Metalurgia Extractiva. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas: 199 pp., Santiago.

VERA, F. 2019. Aumento de porcentaje de sólido de descarga de los espesadores de relave a través de la metodología full potencial en Minera Los Pelambres. Memoria de Título para optar al Grado de Ingeniero Civil Metalúrgico. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica (Inédito): 119 pp., Concepción.

VRY, V.; WILKINSON, J.; SEGUEL, J. & MILLÁN, J. 2010. Multistage Intrusion, Brecciation, and Veining at El Teniente, Chile: Evolution of a Nested Porphyry System. *Economic Geology*. N°1, Vol. **105**: 119-153.

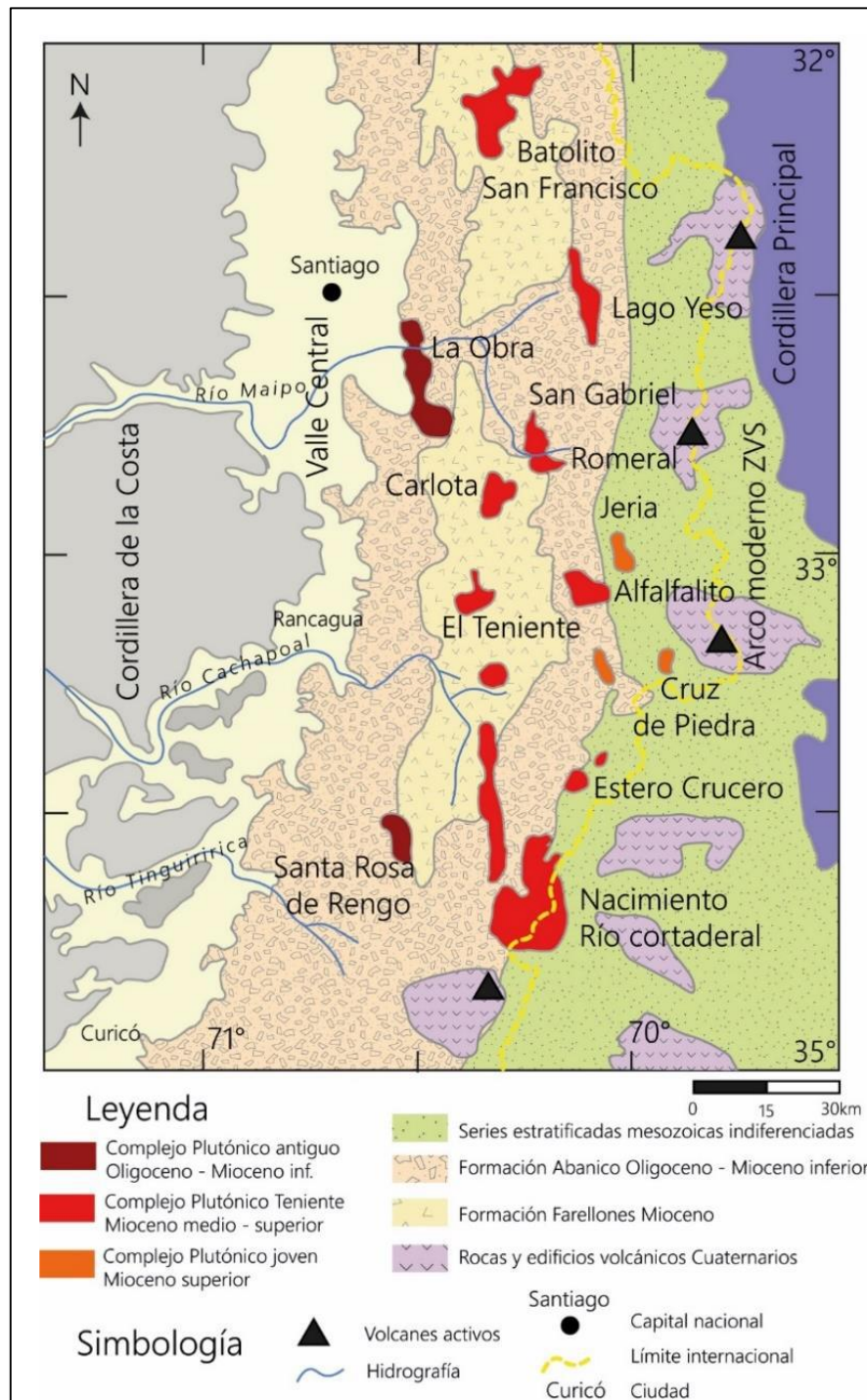
WU, A.; RUAN, Z.; BÜRGER, R.; YIN, S.; WANG, J. & WANG, Y. 2020. Optimization of flocculation and settling parameters of tailings slurry by response surface methodology. *Minerals Engineering*. Vol. **156**: 106488.

YU, Y.; Ma, L.; Cao, M. & Liu, Q. 2017. Slime coatings in froth flotation: A review. *Minerals Engineering*. N° 3-4, Vol. **17**: 225-242.

ZÚÑIGA, P. 1982. Alteración y Mineralización Hipógenas en el Sector Oeste del Yacimiento El Teniente. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile. 107 pp.

ANEXOS

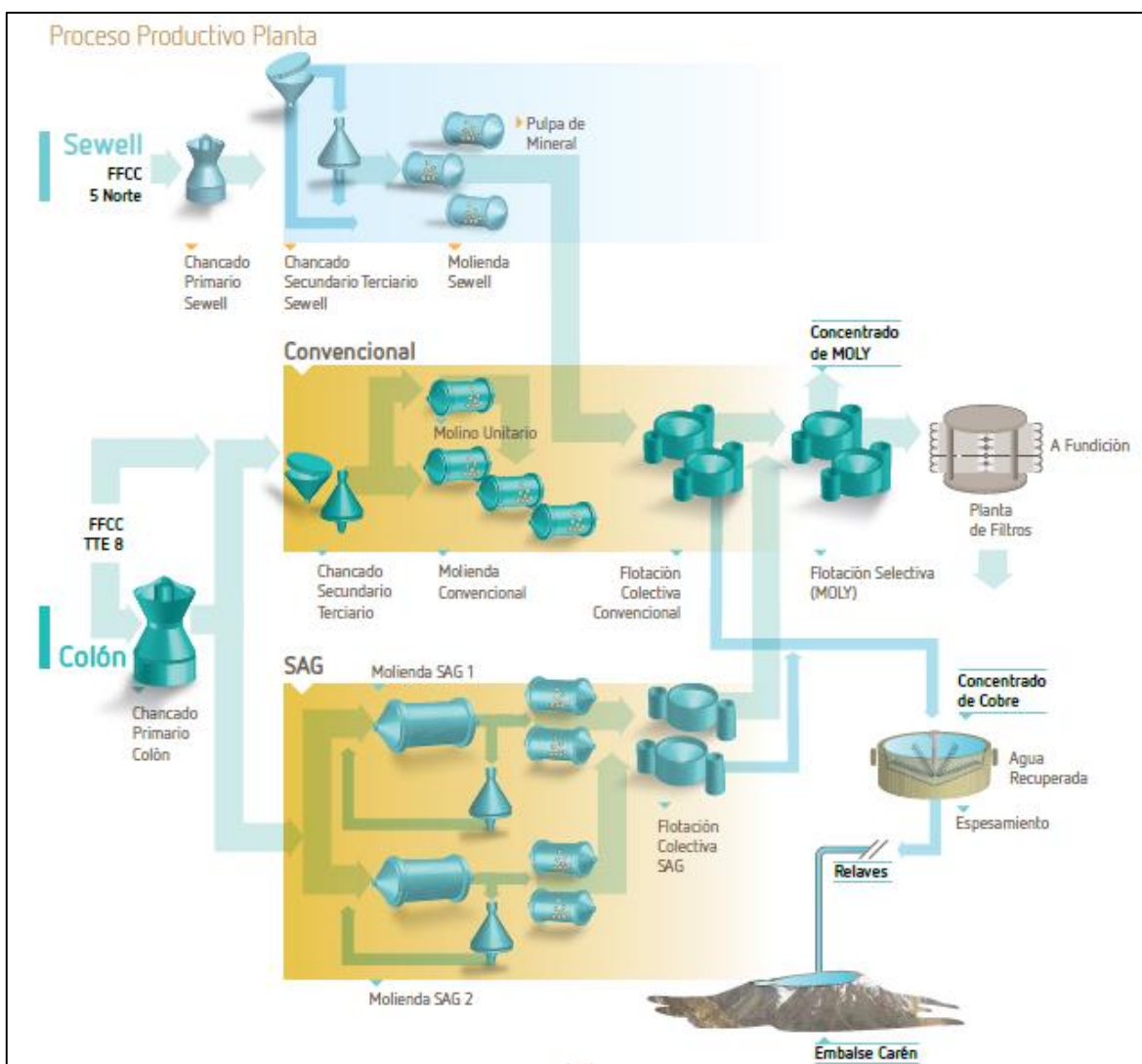
Anexo A: Marco geológico y teórico



Anexo A1: Distribución de los principales cuerpos plutónicos neógenos, asociados al depósito El Teniente. Modificado de Kurtz y otros (1997).

A	Vry et al. (2010)	B	CODELCO (2003)	C	Cannell et al. (2005)
1	bt-act±chl-cpy) Halo de bt	V1	mt±qz±bt±(anh)±(cpy)±(chl) Halo de qz	1a	mt-pl-qz-act-anh Halo de mt
2	mt±qz±anh-(cpy-py) Halo original no preservado	V2	qz-bt-anh-chl±cpy±py±bn±(mo) Sin halo	1b	qz-tur±ser±chl±anh Halo filico-turmalina
3	bt-qz±anh-(chl-cpy-py-mo) Halo de qz-pl	V3	qz-bt-chl-anh±cpy±py±bn Halo de qz±bt	Anh Bt	anh±bt±tur±cpy±fk Sin halo
4a	qz-fk±anh-(ap-bt) Halo de bt	V4	anh±bt±cpy±(mo)±(bn)±(qz) Halo de qz-bt	2a	qz±cpy±bn±anh Sin halo
4b	fk-ep-anh-chl±qz Halo local de ep	V5	qz±anh±bt±cpy±mo±bn±(py)±(chl) Sin halo	2b	qz-fk-sulf-chl±bt±anh Halo de fk-qz
5	anh-qz±cpy-py-(bn-mo) Halo de bt en CMET/ fs en pórfidos	V6	anh±qz±bt±cpy±mo±bn±(py)±(chl) Sin halo	2c	qz-anh-sulf-fk±chl Halo local de bt
6a	qz-anh-fk±mo-bn-py Sin halo en CMET/ fs en pórfidos	V7	cpy-bn-py-mo±anh±qz±bt Sin halo	2d	Brecha de anhidrita Halo de bt-fk
6b	qz-cpy-anh-fk±mo-bn-py Sin halo en CMET/ fs en pórfidos	V8	tur±anh±qz±(cpy)±(mo)±(bn)±(py) Sin halo	2e	qz-sulf±anh Sin halo (a veces bt-fs/filico)
7a	mo±(qz-anh) Sin halo	V9	mt±cpy±py±mo±qz±anh Halo de ser-chl	2f	sulf-chl-qz-ser±bt Halo de chl-ser
7b	cpy±qz-anh Sin halo	V10	cpy-py±qz±anh±mo Halo de ser-chl-cpy	3	qz-anh-sulf (sin mo) Halo de ser-chl-qz
8	cpy-py-qz-anh halo de ser-chl-qz	V11	cpy-py±qz±anh±mo Halo de ser-chl	4a	tur-anh-sulf-ys±qz Halo de ser
9	tur-cb-anh±cpy-py-bn-mo Halo de ser-chl-qz	V12	cpy-py±qz±anh±mo Halo de qz-ser-chl	4b	anh-cpy-bn-ys±qz±tur Halo de ser
10	cb-anh-ys±ten-cpy-py-bn-mo Halo de ser-chl-qz	V13	cpy-bn-mo-ten-py±qz±anh±cb±tur±(ys)±(chl) Halo de qz-ser-chl	4c	cb-anh±ys±qz±sulf Halo de ser-chl
		V14	cb-ys-anh±cpy±chl±bn±mo±(ten)±(qz) Halo de qz-ser-chl	4d	ys-chl Halo de ser-chl
		V15	tur±anh±cpy±cb±ys±qz±py±ep±(bn)±(mo)±(ten) Halo de qz-ser-chl		

Anexo A2 : Esquema de clasificación de vetillas para El Teniente. Extraído de Schulz (2020). (a) Clasificación definida por Vry y otros (2010). (b) Clasificación usada por geólogos de la Mina El Teniente, realizada por Codeco (2003). (c) Clasificación definida por Cannell y otros (2005). Los diferentes colores indican las diferentes paragénesis formadas en cada etapa de alteración. En rojo vetillas premineralización, en verde vetillas de la etapa tardímagmática (para B y C), en amarillo etapa hidrotermal principal y en azul etapa hidrotermal tardía.



Anexo A3: Proceso productivo de planta de la mina El Teniente. Extraído de El Teniente, minería del futuro, 2011 Dirección de comunicaciones, Gerencia de sustentabilidad y asuntos externos, 2011.

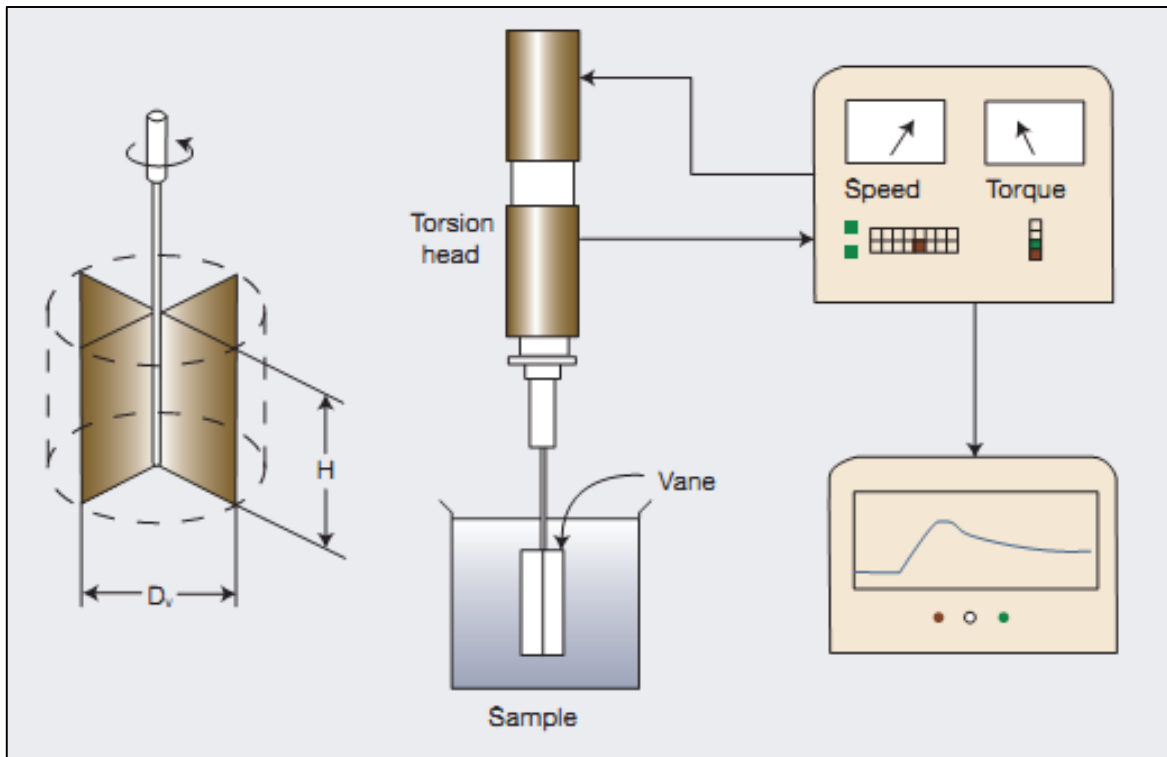
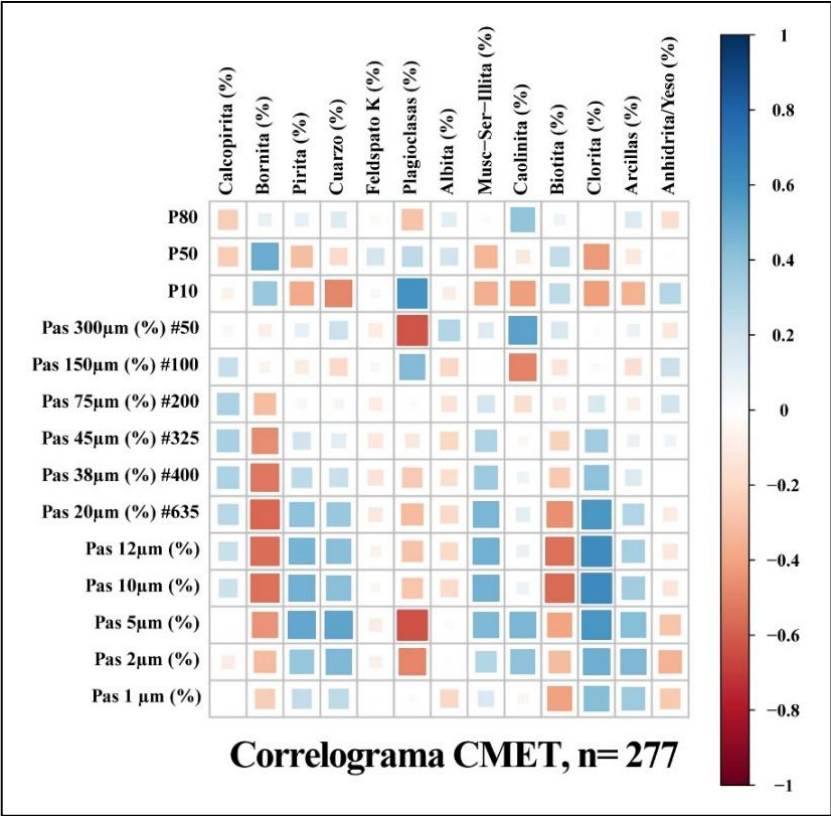
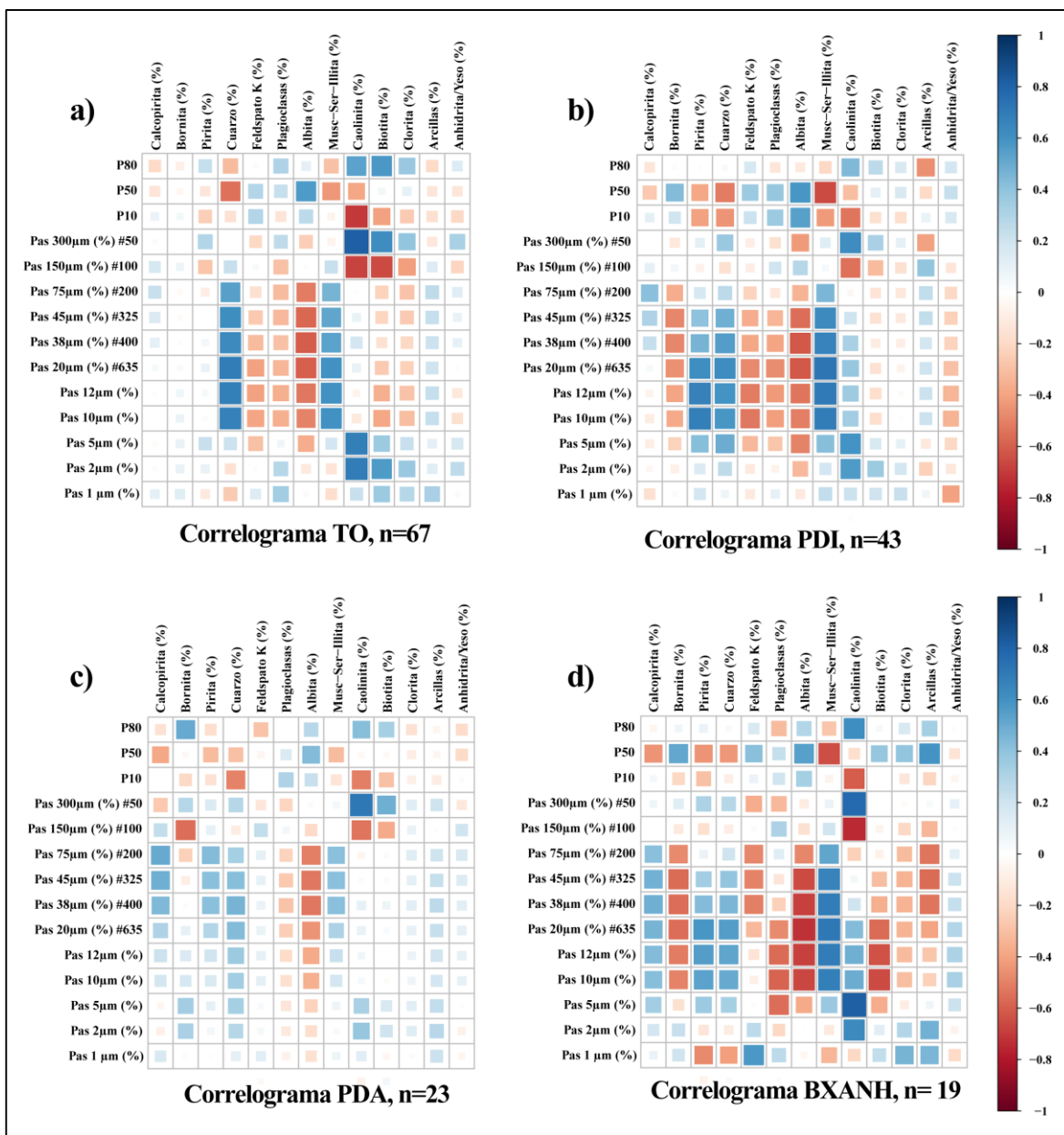


Figura A4: Dispositivo utilizado en el método de Vane. Extraído de Jewell (2006).

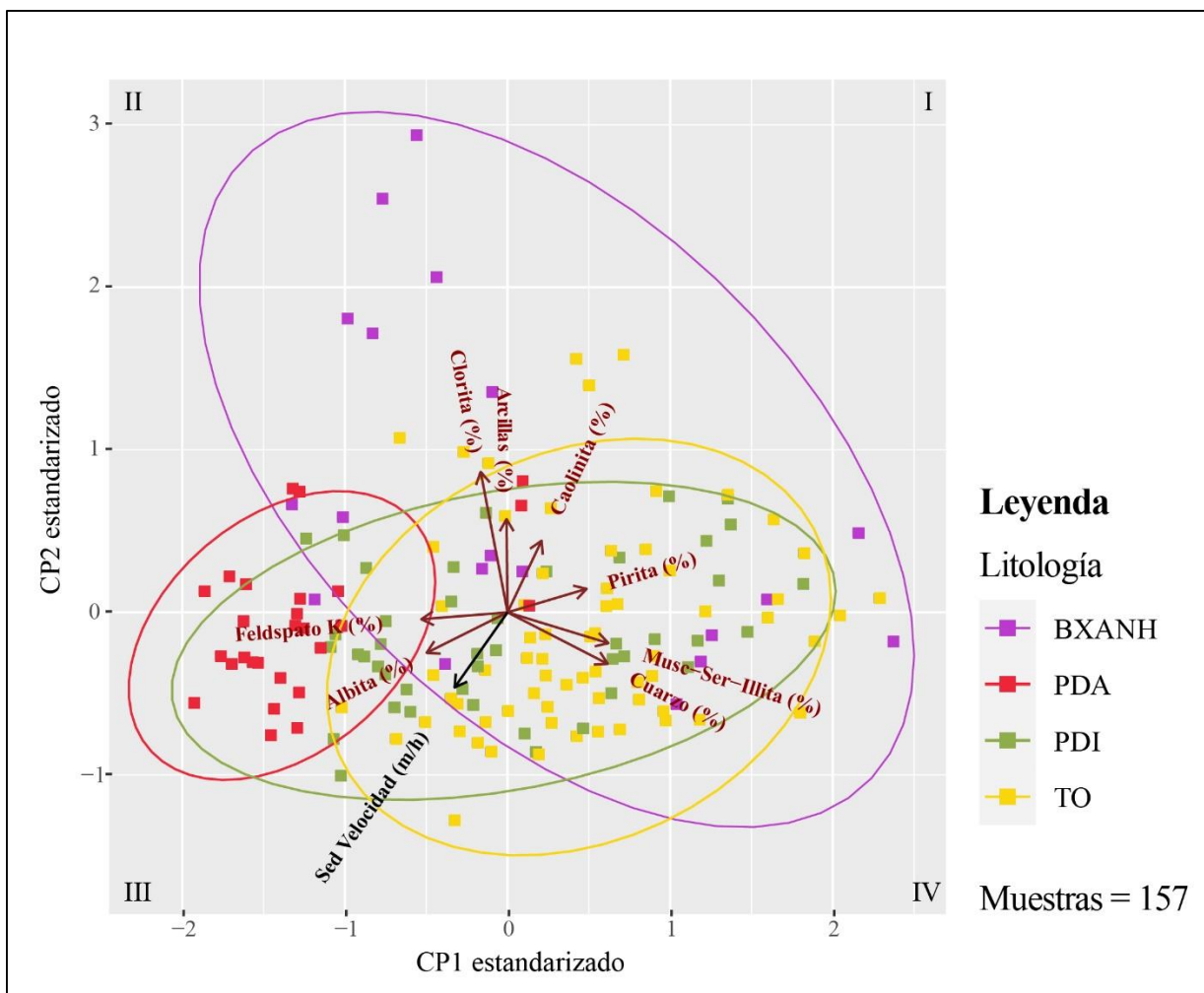
Anexo B: Resultados complementarios



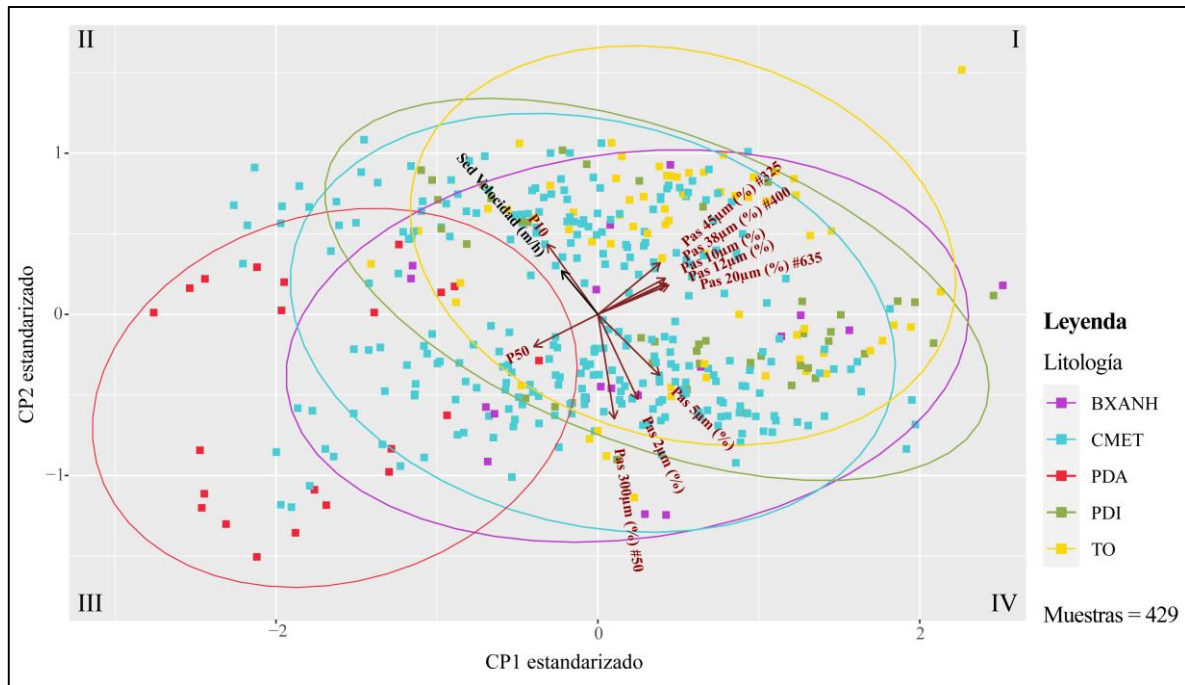
Anexo B1: Correlograma mineralogía-granulometría de las muestras del CMET. A la derecha de la matriz se expone una escala de los valores de correlación asociados a los diferentes tonos de azul (correlación positiva) y rojo (correlación negativa).



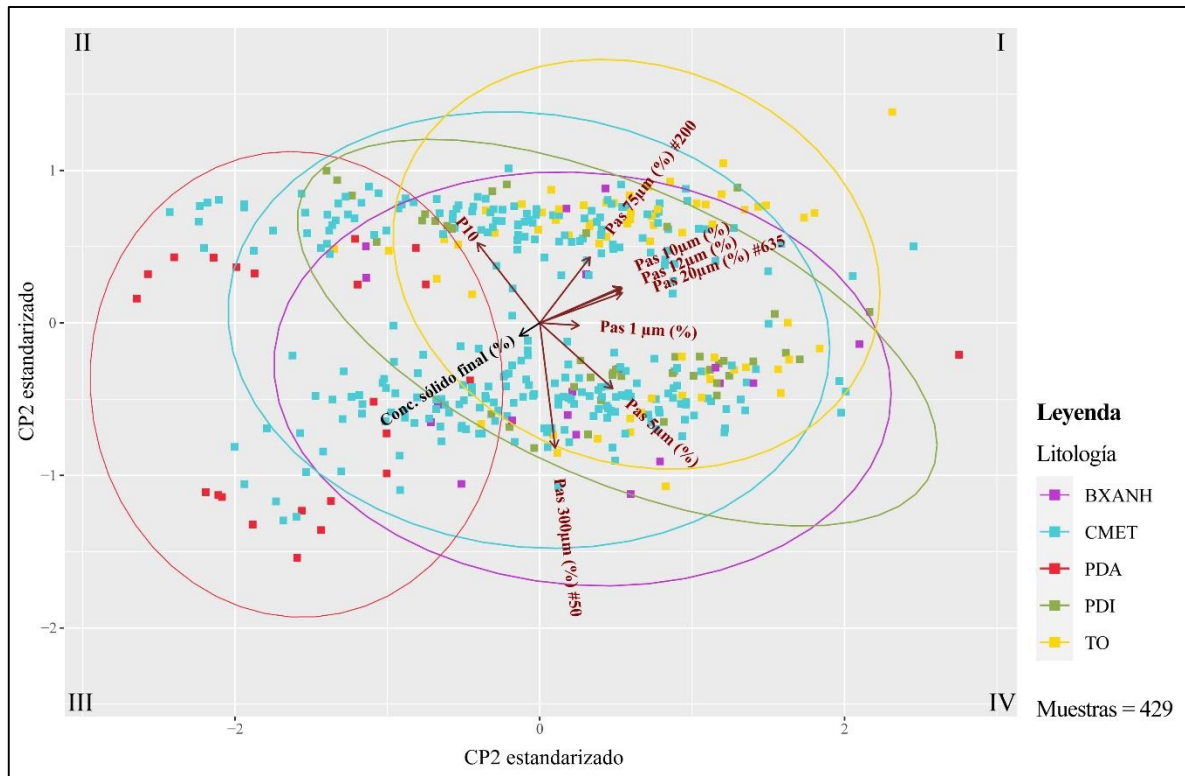
Anexo B2: Correlogramas mineralogía-granulometría del grupo de muestras de OTRAS LITOLOGÍAS. A la derecha de las matrices se exponen escalas de los valores de correlación asociados a los diferentes tonos de azul (correlación positiva) y rojo (correlación negativa). **a)** Correlograma Tonalita **b)** Correlograma Pórfido dacítico **c)** Correlograma Pórfido diorítico **d)** Correlograma Brecha de anhidrita.



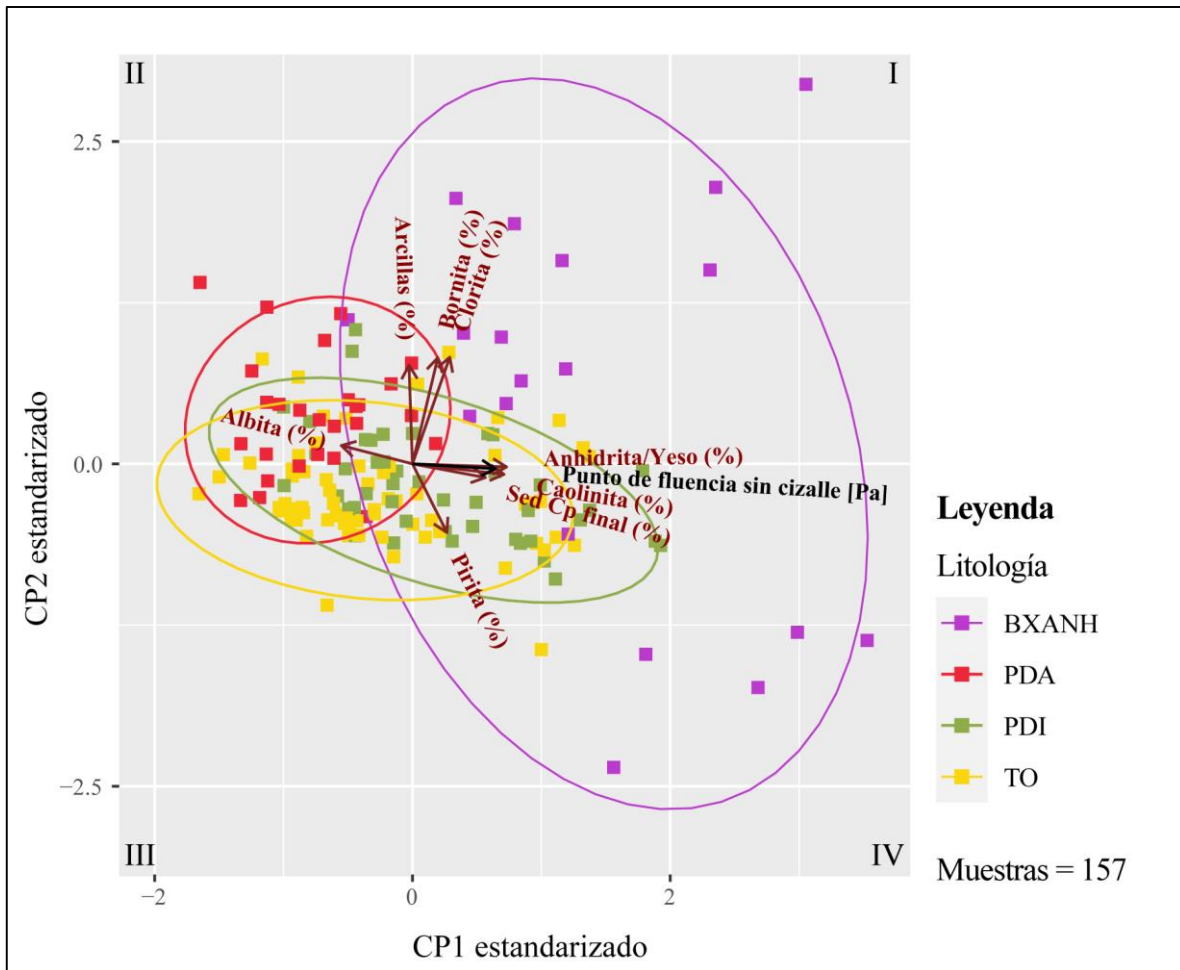
Anexo B3: Gráfica de doble proyección del ACP mineralogía-velocidad de sedimentación (OTRAS LITOLOGÍAS) con muestras clasificadas según litología.



Anexo B4: Gráfica de doble proyección del ACP mineralogía-velocidad de sedimentación de la base de datos de granulometría (BD2) con muestras clasificadas por litología.



Anexo B5: Gráfica de doble proyección del ACP de la base de datos de granulometría láser (BD2) con muestras clasificadas por litología.



Anexo B6: Gráfica de doble proyección del ACP mineralogía-punto de fluencia sin cizalle (OTRAS LITOLOGÍAS) con las muestras clasificadas por litología.