



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

**CARACTERIZACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTERMALES
SEGÚN: GEOQUÍMICA Y MAPEO GEOLÓGICO DE
SONDAJES, DEL YACIMIENTO VETIFORME DE Cu-Co DEL
PROYECTO MINERO LAS COBALTERAS, REGIÓN DE
ATACAMA, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

NICOLÁS MAURICIO ORELLANA RODRÍGUEZ

PROFESOR GUÍA

BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

PROFESOR CO-GUÍA

MAURICIO GARRIDO PALMA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

KATJA DECKART

SANTIAGO DE CHILE

2022

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Geólogo
POR: Nicolás Mauricio Orellana Rodríguez
FECHA: 2022
PROFESOR GUÍA: Brian Keith Townley Callejas

**CARACTERIZACIÓN DE ALTERACIONES HIDROTERMALES SEGÚN:
GEOQUÍMICA Y MAPEO GEOLÓGICO DE SONDAJES, DEL YACIMIENTO
VETIFORME DE Cu-Co DEL PROYECTO MINERO LAS COBALTERAS, REGIÓN DE
ATACAMA, CHILE**

Actualmente el cobalto es un metal estratégico con una alta demanda. En los siglos XIX y XX se explotaron yacimientos de cobalto en Chile, siendo el Distrito San Juan (Región de Atacama) uno de los más importantes. Es en este antiguo distrito minero donde se ubica el proyecto de exploración de Co-Cu, Las Cobalteras. La mineralización se presenta en brechas hidrotermales y vetas, encontrándose el cobalto principalmente en forma de sulfosales, con un horizonte superior oxidado. Las brechas y vetas se encuentran hospedadas en rocas metamórficas del basamento Paleozoico y en rocas intrusivas de edad Jurásico y Cretácico que cortan el basamento metamórfico.

Con el objetivo de distinguir y generar una clasificación de las alteraciones hidrotermales presentes en las rocas de Las Cobalteras, es que, se emplean criterios de clasificación mediante geoquímica multielemento por digestión en agua regia, calibrado en base al mapeo geológico de sondajes y caracterización mineral del yacimiento. La metodología se adapta a la información disponible y geología presente, por lo que existen muchas limitantes y la clasificación no es absoluta, sino más bien general, logrando una caracterización de las alteraciones hidrotermales que se dan en la zona de estudio. Debido a que el método de disolución por agua regia fue utilizado en la obtención de la base de datos geoquímicos, se define todo en función de la mineralogía que es capaz de disolver este ácido.

El cruce entre la información de mineralogía, geoquímica, logueo de sondajes y solubilidad de minerales en agua regia, mostraría que las alteraciones hidrotermales tendrían un control litológico, es decir, la composición mineralógica previa de las rocas sería un factor importante en el control de la alteración hidrotermal y las asociaciones minerales generadas. Por su parte, los diagramas de clasificación distinguen entre tres zonas de alteración hidrotermal en función de la mineralogía soluble dominante, en donde casi la totalidad de las muestras clasifican en las zonas de control mineral de biotita-clorita, incluyendo a las rocas sin registros de alteración de biotita y clorita. Además, la alteración de calcita es la única que se distingue geoquímicamente con facilidad y en cada una de las unidades litológicas, abarcando toda de la zona de estudio.

Los resultados pueden ser utilizados para obtener una primera clasificación de las alteraciones hidrotermales presentes, donde el metamorfismo puede jugar un rol importante en el origen de ciertos minerales categorizados de alteración, mientras que, las brechas hidrotermales no tienden a desarrollar un halo de alteración fácilmente reconocible en la roca caja, solo en los diques con las alteraciones del tipo propilítica.

A mis padres, Sandra y Eduardo
A mi hermana, Rocío
A mis abuelas y abuelos

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que me han acompañado a lo largo de esta etapa universitaria, gracias por todo el tiempo compartido durante estos años.

A los y las profesoras de Geología, en particular a mi profesor guía Brian Townley y a los miembros de mi comisión. También a los profesores que confiaron en mí para las labores de profesor auxiliar y ayudante de sus cursos. A los y las funcionarias del Departamento de Geología, especialmente a Blanca, Rosita y Mariela, con quienes compartí un poco más dentro de mi labor como encargado de la sala de memoristas. A los tíos y tías del área de aseo y ornato, gracias por su labor.

A Baltum y a todas las personas que lo conformaron, gracias por la confianza, conocimientos y buena onda. Esta memoria de título se llevó a cabo con el apoyo e información entregada por Baltum.

A mis amigos y amigas, los que estuvieron en un comienzo de la carrera cuando cursábamos Plan Común, a quienes estuvieron durante los años de Geología y los que están en esta etapa de titulación. También a los y las que siempre han estado ahí, en las buenas y en las malas, en especial a Nicole.

A mi familia, Sandra, Eduardo y Rocío, por estar presente en cada paso, por quererme, comprenderme, aconsejarme, aguantarme, ayudarme y por siempre creer en mí. A la familia de Estefanía y Fernando, por ser siempre ese apoyo familiar desde que llegue a estudiar a Santiago.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Formulación del problema.....	2
1.3	Hipótesis de trabajo.....	3
1.4	Ubicación y vías de acceso.....	3
1.5	Objetivo general y específicos.....	4
1.6	Metodología de estudio.....	5
2	MARCO GEOLÓGICO.....	6
2.1	Generalidades Geología Regional.....	6
2.2	Geología Estructural Regional.....	9
2.3	Recursos Minerales.....	10
2.4	Marco Geológico Local.....	11
2.4.1	Unidades litológicas.....	11
2.4.2	Alteración hidrotermal.....	17
2.4.3	Mineralización.....	19
2.4.4	Geología Estructural Local.....	22
3	MARCO TEÓRICO.....	25
3.1	Alteración hidrotermal.....	25
3.2	Métodos analíticos: ICP-MS e ICP-AES.....	28
3.3	Disolución por Agua Regia.....	29
4	ANÁLISIS DE DATOS.....	34
4.1	Mineralogía de cortes transparentes y pulidos de sondajes.....	34
4.2	Mapeo geológico de sondajes.....	47
4.3	Preparación de muestras y análisis geoquímico de sondajes.....	50
4.4	Procedimientos de aseguramiento de la calidad y control de calidad (QA/QC).....	53
4.5	Definición de sistema.....	55
4.5.1	Porcentaje de disolución.....	60
4.5.2	Abundancia de minerales.....	63
4.6	Análisis univariable.....	69
4.6.1	Análisis univariable por unidades litológicas.....	69
4.6.2	Análisis univariable por unidades geológicas.....	72
4.7	Análisis de componentes principales.....	76
4.7.1	Elementos mayores.....	77

4.7.2	Elementos traza.....	84
4.8	Mineralogía automatizada TIMA-TESCAN.....	88
4.8.1	Depuración de base de datos TIMA-TESCAN	88
4.8.2	Mineralogía soluble y geoquímica	89
5	ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE VARIABLES DE INTERÉS.....	92
5.1	Selección mineralogía soluble y elementos	93
5.2	Geoquímica y logueo de sondajes.....	96
5.2.1	Alteración hidrotermal.....	96
5.2.2	Mineralización de interés.....	106
5.3	Gráficos de clasificación y control mineral	111
6	DISCUSIÓN Y LIMITANTES	115
6.1	Discusión	115
6.2	Limitantes	125
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	126
8	BIBLIOGRAFÍA	130
	ANEXOS	133
	Anexo A.....	133
	Anexo B.....	137
	Anexo C.....	155
	Anexo D.....	192

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1. Mapa de ubicación y acceso al antiguo Distrito Minero San Juan (Townley et al., 2017 B), actualmente Las Cobalteras. Rectángulo rojo indica ubicación aproximada. 4
- Figura 2.1. Mapa geológico distrital (1:100.000) que muestra las principales estructuras de escala regional y las principales minas históricas de la zona. Rectángulo rojo representa la zona de estudio del sistema de vetas Rosa Amelia-Farellón (Elaboración: Equipo de geología Baltum, 2019). 8
- Figura 2.2. Esquema estructural de la parte suroccidental de la Región de Atacama (Welkner et al., 2006). Rectángulo negro delimita área de la Carta Freirina-El Morado. Cuadrado rojo indica ubicación aproximada de Las Cobalteras – Distrito Minero San Juan. 10
- Figura 2.3. Fotografía de esquisto brechoso (DDH-17; 58,0-58,30 m). Roca metamórfica que presenta textura brechosa, a partir de una matriz fina de color gris (metapelita) y cúmulos de composición más gruesos e irregulares (metarenisca) incluyendo cuarzo de segregación. 12
- Figura 2.4. Fotografía de esquisto bandeado irregular (DDH-29; 59,70-60,0 m). Esquisto caracterizado por su textura predominantemente bandeada de forma irregular, entre bandas de material fino de color gris (metapelita) y material de grano más grueso de color gris claro (metapsamita) 13
- Figura 2.5. Fotografía de diorita de grano fino, microdiorita (DDH-15; 249,45-249,60 m). Roca intrusiva de color gris verdoso, de textura fanerítica inequigranular, presenta fenocristales de plagioclasa, en la muestra se observan vetillas milimétricas de carbonato. 13
- Figura 2.6. Fotografía de diorita de grano medio a grueso (DDH-17; 47,0-47,20 m). Roca intrusiva color gris verdoso, de textura fanerítica equigranular, con abundante presencia de minerales ferromagnesianos, se observan cúmulos de carbonato en la muestra. 14
- Figura 2.7. Fotografía de roca andesítica (DDH-21; 144,0-144,20 m). Roca ígnea de color gris verdoso más oscura, de textura porfídica, con pequeños fenocristales de plagioclasa y una masa fundamental afanítica. 15
- Figura 2.8. Fotografía de roca andesítica (DDH-21; 72,40-72,90 m). Roca ígnea de color gris verdoso, textura porfídica, presenta una abundante presencia fenocristales de plagioclasa, con intensidad de alteración variable, en una masa fundamental afanítica En la muestra se observan vetillas de carbonato y cuarzo, en las fracturas presencia de patinas de óxidos de hierro. 15
- Figura 2.9. Fotografía de tramo de brecha hidrotermal (DDH-05; 65,40-65,60 m). Roca con textura brechosa con predominio de cuarzo en masa fundamental, la muestra presenta fragmentos de roca caja color gris oscuro (roca metamórfica). 16
- Figura 2.10. Fotografía de tramo de brecha hidrotermal (DDH-02; 198,50-198,70 m). Roca con textura brechosa y predominio de carbonato en la masa fundamental, la muestra presenta fragmentos de roca caja gris oscuro y mineralización de calcopirita (cemento). 16
- Figura 2.11. Fotografía de tramo de brecha hidrotermal (DDH-15; 119,90-120,50 m). Roca con predominio de turmalina en la masa fundamental, la muestra presenta fragmentos angulosos de

roca metamórfica, vetillas de carbonato y mineralización de cobalto en la masa fundamental. ... 17

Figura 2.12. Mapa del Sistema Rosa Amelia-Farellón (1:1.000), con las estructuras reconocidas y la Unidad Metamórfica, así como los depósitos aluviales recientes en las quebradas (Elaboración: Equipo de geología Baltum, 2019). 24

Figura 2.13. Sección geológica del sistema Rosa Amelia-Farellón. Hacia el oeste se presenta la veta Rosa Amelia y, más al este, la veta Farellón. Los diques siguen el mismo sistema estructural (Elaboración: Equipo de geología Baltum, 2019). 24

Figura 3.1. Asociaciones de minerales de alteración común en sistemas hidrotermales (Corbett & Leach, 1997). 26

Figura 3.2. Porcentaje de minerales disueltos según el procedimiento consecutivo de ácido oxálico y agua regia. El grosor de la barra representa el número de muestras utilizada para el estudio (Church et al., 1987). 30

Figura 3.3. Porcentaje de disolución de varios minerales, obtenidos al comparar digestión por agua regia relativa la digestión por HF-HNO₃-HClO₄ (Church et al., 1987). 31

Figura 3.4. Porcentaje de recuperación de elementos mayores por mineral y granulometría de la muestra (Snäll & Liljefors, 2000). Figura elaborada por Cárdenas (2015). 33

Figura 4.1. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455313 (esquisto psamopelítico). A: Matriz granoblástica de cuarzo fino y microcristales orientados de sericita y clorita-esmectita (20X/NC). B: Microvetilla de cuarzo con halo de biotita oxidada, cortando bandas de minerales opacos con cuerpos lenticulares de ilmenita (2X/NC). C: Bandas de minerales opacos lenticulares, en matriz granoblástica de cuarzo fino y microcristales orientados de sericita y clorita-esmectita (5X/NC). D: Detalle de fotografía anterior, mostrando opacos lenticulares (ilmenita) bordeada por agregado de cuarzo anhedral y microcristales de sericita bien desarrollada (20X/NC). 36

Figura 4.2. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455315 (esquisto psamopelítico). A: Aspecto general del corte en donde se observa el clivaje de crenulación constituido por lentes de minerales opacos y granos de cuarzo junto a biotita secundaria diseminada (2X/NC). B: Detalle de estructuras vetiformes compuestas por biotita secundaria (2X/NC). 37

Figura 4.3. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455316 (metapsamopelita). A: Lente de cuarzo y sericita entre planos de foliación subhorizontal (clivaje de crenulación); presencia de vetilla sinuosa de cuarzo con bordes suturados, cortada por planos de foliación (2X/NC). B: Matriz granolepidoblástica con microcristales de sericita, biotita e inclusiones de minerales opacos; relación de corte entre microvetillas de cuarzo con y sin biotita, esta última a favor del plano de foliación (2X/NC). 37

Figura 4.4. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455311 (diorita porfídica). A: Aspecto general del corte, en donde se observan fenocristales de plagioclasa inmersos en una masa fundamental, presencia de sericita reemplazando fenocristales de plagioclasa y diseminada en masa fundamental, microvetilla de cuarzo localizada en el costado derecho (2X, NC). B: Detalle de pseudomorfos de clorita (2X, NP). C: Contacto de vetilla rellena de borde a centro por: epidota junto a diseminados de actinolita y opacos; y carbonatos (2X, NC). D: Fotografía anterior a nicoles paralelos, se aprecian minerales ferromagnesianos reemplazados por clorita (2X, NP). 38

Figura 4.5. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455312 (diorita de anfíbola). A: Detalle de agregados de epidota y clorita junto a glomero-cristales de anfíbola (5X/NC). B: Detalle de agregados de clorita aciculares en abanico junto a minerales opacos (20X/NC). 39

Figura 4.6. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455314 (andesita porfídica). A: Pseudomorfo de sericita con hábito rombohédrico (5X/NC). B: Detalle de agregados en abanico de clorita en la masa fundamental, junto a agregados finos de cuarzo anhedral. (20X/NC). C: Microvetilla de bordes sinuosos, rellena de turmalina, minerales opacos masivos y cuarzo granular fino (5X/NC). D: Amígdala con cristal acicular radial de turmalina, cuarzo granular y actinolita acicular con orientación aleatoria incluida dentro del cuarzo (20X/NC). 40

Figura 4.7. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455308 (veta de turmalinita). A: Detalle de opacos euhedrales y subhedrales con algunos cristales anhedrales diseminados. Cristales de opacos de mayor tamaño, presentan inclusiones de turmalina, las que también se encuentran distribuidas en el resto de la muestra, siendo rodeada por cuarzo, sericita y clorita-esmectita intersticial. Las turmalinas se encuentran zonadas y parcialmente impregnadas por oxi-hidróxidos de Fe (2X/NC). B: Fotomicrografía anterior a nicoles paralelos, se aprecian cristales de turmalina con oxi-hidróxidos de Fe (2X/NP). C: Dominio de cuarzo anhedral fino y turmalina. El cuarzo presenta textura granoblástica y contactos suturados, y se encuentra bordeando turmalina. La turmalina corresponde a los cristales amarillos prismáticos, aunque en sectores ocurre como un agregado masivo (20X/NC). D: dominio de cuarzo anhedral grueso y turmalina. El cuarzo presenta textura granoblástica y contactos poligonales a suturados, y se encuentra bordeando turmalina. La turmalina corresponde a los cristales prismáticos de menor tamaño (5X/NC). 42

Figura 4.8. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455309 (veta de cuarzo). A: Aspecto general de la muestra, en donde se observan cristales granoblásticos de cuarzo con bordes suturados, junto a mineralización de opacos relleno intersticios. En sectores se encuentran trazas de clorita diseminada junto a sericita (2X, NC). B: Cristales granoblásticos de cuarzo con bordes suturados. Minerales opacos se encuentran entre los intersticios (2X, NC). C: Detalle de bandas fibrosas de clorita levemente pleocroica junto a sericita diseminada (20X, NC). 43

Figura 4.9. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455310 (veta de cuarzo). A: Aspecto general de la roca, en donde se observan cuarzo granular muy grueso y brechizado por microvetillas de minerales opacos. También se distinguen algunas microvetillas de carbonatos, entre los cristales de cuarzo (2X, NC). B: Cuarzo granular muy grueso cortado por microvetillas de turmalina y minerales opacos. También se distingue agregado fino de cuarzo suturado en la esquina inferior derecha (5X, NC). C: Cuarzo granular muy grueso cortado por microvetilla bifurcada de carbonato, clorita-esmectita y minerales opacos. Se aprecian inclusiones de microcristales de minerales opacos diseminados en cuarzo (20X, NC). D: Vetilla de cuarzo fino cortada por microvetilla de carbonato y minerales opacos. También se distingue agregado fino de cuarzo relleno espacios en el cuarzo de mayor tamaño (2X, NC). 44

Figura 4.10. Fotografías de cortes pulidos de la muestra 455308 (veta de turmalinita). A: Agregado de cristales de pirita euhedral y subhedral inmersos en veta de silicatos (5X/NP). B: Cristales de rutilo anhedral diseminados (20X/NC). 45

Figura 4.11. Fotografías de cortes pulidos de la muestra 455309 (veta de cuarzo). A: Pirrotina con calcopirita (5X/NC). B: Vetilla de pirrotina con reemplazo de calcopirita (5X/NC). 45

Figura 4.12. Fotografías de cortes pulidos de la muestra 455310 (veta de cuarzo). A: Cristales de piritita euhedral con fractura rellena con calcopirita (20X/NP). B: Piritita en bordes de calcopirita (5X/NP).	46
Figura 4.13. Gráfico de torta con la cantidad de muestras seleccionadas por litología (3421 muestras).....	56
Figura 4.14. Histograma con la frecuencia total del registro de minerales de alteración y su intensidad relativa en colores (3421 muestras).....	56
Figura 4.15. Histograma con la frecuencia total del registro de minerales de alteración por litología (3421 muestras).	57
Figura 4.16. Cantidad de muestras por litología y tipo de mineralización presente (S/MIN: sin mineralización mapeada).....	57
Figura 4.17. Cantidad de datos por tipo de mineralización presente (S/MIN: sin mineralización mapeada).....	58
Figura 4.18. Distribución espacial de las 3421 muestras con su litología en colores (vista de planta).	59
Figura 4.19. Distribución espacial de las 3421 muestras con su litología en colores (vista de perfil).	59
Figura 4.20. Distribución espacial de las 3421 muestras con su tipo de mineralización en colores (vista de perfil y hacia el norte).	60
Figura 4.21. Boxplot de disolución total, en porcentaje, calculada para elementos mayores.	61
Figura 4.22. Porcentaje relativo promedio de los elementos mayores disueltos por litología.	62
Figura 4.23. Disolución y concentración promedio de elementos traza y elementos con límite de detección superior de 10.000 ppm (1%).....	62
Figura 4.24. Disolución relativa promedio por litología de los elementos traza que tienen una media de disolución total mayor a 10 ppm y elementos mayores de concentraciones bajas.	63
Figura 4.25. Abundancia relativa de minerales de alteración en cada litología (datos del mapeo geológico de Baltum).	65
Figura 4.26. Abundancia relativa de todos los minerales de alteración por litología (datos de mapeo geológico de Baltum).	67
Figura 4.27. Histogramas [log] de elementos mayores y de interés, por litología.	70
Figura 4.28. Boxplots (con eje logarítmico) de elementos mayores y de interés, por litología. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.....	72
Figura 4.29. Gráficos circulares con la clasificación litológica de las muestras que conforman las	

unidades geológicas Halo (izquierda) y Veta (derecha).....	73
Figura 4.30. Histogramas [log] de elementos mayores y de interés, por unidad geológica.	74
Figura 4.31. Boxplots (con eje logarítmico) de elementos mayores y de interés, por unidad geológica. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.	76
Figura 4.32. Varianza acumulada según ACP de elementos mayores y de interés.....	78
Figura 4.33. Círculos de correlación para elementos mayores y de interés, en todas las muestras (todas las unidades litológicas).....	80
Figura 4.34. Diagramas de dispersión entre los componentes PC1, PC2, PC3 y PC4 del ACP de elementos mayores y de interés. Los colores indican su clasificación litológica del mapeo geológico.	82
Figura 4.35. Diagramas de dispersión entre los componentes PC1, PC2, PC3 y PC4 del ACP de elementos mayores y de interés. Los colores indican su clasificación por unidades geológicas. .	84
Figura 4.36. Varianza acumulada según ACP de elementos traza.	85
Figura 4.37. Círculos de correlación para elementos traza en todas las muestras (todas las unidades litológicas).	86
Figura 4.38. Diagramas de dispersión entre los componentes PC1, PC2, PC3 y PC4 del ACP de elementos traza. Los colores indican su clasificación litológica del mapeo geológico.....	87
Figura 4.39. Concentraciones promedio de minerales (presentes en la planilla de mapeo de sondajes) del análisis TIMA-TESCAN por litología del logueo de sondajes.	90
Figura 4.40. Proporciones relativas de minerales solubles y parcialmente solubles por muestra. Minerales de interés para alteración y mineralización con promedios de concentración >0,1% entre las seis muestras.	91
Figura 5.1. Gráficos circulares con el registro de nueve minerales de alteración del logueo de sondajes en 3603 muestras (S/alt: 182 muestras que no presentan registros de minerales de alteración. S/minX: muestras que no presentan registros de mapeo del mineral de alteración respectivo).	97
Figura 5.2. Histogramas y boxplots de K, Mg, Fe y Al, con los datos del mapeo de biotita en las muestras de brechas hidrotermales (B.H.Qz y B.H.Bt). Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de brechas hidrotermales de las distintas clases, respectivamente.....	99
Figura 5.3. Histogramas y boxplots de Na, Al, Fe, Mg y Li, con los datos del mapeo de turmalina en las muestras de brechas hidrotermales (B.H.Qz y B.H.Bt). Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de brechas hidrotermales de las distintas clases, respectivamente.	100
Figura 5.4. Histogramas y boxplots de Mg, Fe y Al, con los datos del mapeo de clorita en toda la población de muestras. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases,	

respectivamente.	101
Figura 5.5. Histogramas y boxplots de Ca, Fe y Al, con los datos del mapeo de epidota en las muestras de diorita/microdiorita (D/M) y pórfido andesítico (P.A). Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de D/M y P.A de las distintas clases, respectivamente.....	102
Figura 5.6. Histogramas y boxplots de Ca, Mg y Fe, con los datos del mapeo de actinolita en las muestras de diorita/microdiorita (D/M) y pórfido andesítico (P.A). Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de D/M y P.A de las distintas clases, respectivamente.....	103
Figura 5.7. Histogramas y boxplots de K y Al, con los datos del mapeo de sericita en toda la población de muestras. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.	104
Figura 5.8. Histograma y boxplot de Al, con los datos del mapeo de arcillas en toda la población de muestras. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.	104
Figura 5.9. Histograma y boxplot de Ca, con los datos del mapeo de calcita (Cc) en toda la población de muestras. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.	105
Figura 5.10. Histograma y boxplot de Fe, con los datos del mapeo de óxidos de hierro en toda la población de muestras. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.	106
Figura 5.11. Gráficos circulares con los registros de mineralización del logeo de sondajes en 3603 muestras, en donde 182 corresponden a muestras que no presentan registros de minerales de alteración (S/M.Co: muestras que no presentan registros de mapeo de minerales de Co. S/M.Cu: muestras que no presentan registros de mapeo de minerales de Cu. S/S.Fe: muestras que no presentan registros de mapeo de sulfuros de Fe).....	107
Figura 5.12. Histogramas y boxplots de Co, As, Fe, S, Cu, Mn y Ni, con los datos del mapeo de sulfuros y oxidados de cobalto en toda la población de muestras. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.	109
Figura 5.13. Histogramas y boxplots de Cu, Fe y S, con los datos del mapeo de sulfuros y oxidados de cobre en toda la población de muestras. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.	110
Figura 5.14. Histogramas y boxplots de Fe, S y As, con los datos del mapeo de sulfuros de hierro en toda la población de muestras. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.	111
Figura 5.15. Diagrama de clasificación Al-Fe-Mg (Townley et al., 2012) con base de datos geoquímicos de Las Cobalteras. A la derecha se muestra la densidad de puntos (muestras) en colores, con un foco principal en la Zona 1.....	112
Figura 5.16. Diagrama de clasificación Mg-Fe-S (Cárdenas, 2015) con base de datos geoquímicos de Las Cobalteras. A la derecha se muestra la densidad de puntos (muestras) en colores, con un	

foco principal en la zona de Control biotita-clorita.....	113
Figura 5.17. Diagrama de clasificación Mg-K-Ca (Cárdenas, 2015) con base de datos geoquímicos de Las Cobalteras. A la derecha se muestra la densidad de puntos (muestras) en colores, con un foco principal y otros más pequeños en la zona de Control biotita-clorita. Se observa extensión del foco principal hacia la zona de Control sericita.	113
Figura 5.18. Diagramas ternarios CuT-Fe-S y CoT-Fe-S (cobre y cobalto total) con base de datos geoquímicos de Las Cobalteras. Basados en el diagrama CuT-Fe-S de Cárdenas (2015), indicando zonas de pirita-sulfuros de Cu y enriquecimiento de Fe y S.	115
Figura 6.1. Diagramas ternarios de clasificación Al-Fe-Mg y Mg-K-Ca con la población de muestras sin registros de alteración de biotita y clorita. Datos con atributo color para el mapeo de sericita.....	117
Figura 6.2. Diagramas ternarios de clasificación Al-Fe-Mg y Mg-K-Ca con la población de muestras sin registros de alteración de biotita y clorita. Datos con atributo color para el mapeo de arcillas.....	117
Figura 6.3. Boxplots (con eje logarítmico) de elementos mayores: Al, Ca, Fe, K, Mg y Na, con atributo color para el mapeo de alteración de sericita (gráficos superiores) y arcillas (gráficos inferiores).....	118
Figura 6.4. Histograma y boxplot de Na con los datos del mapeo de arcillas en las muestras de diorita/microdiorita (D/M) y pórfido andesítico (P.A).....	119
Figura 6.5. Diagrama ternario de clasificación Mg-K-Ca con toda la población de muestras. Datos con atributo color para el mapeo de calcita.	120
Figura 6.6. Diagrama ternario Mg-K-S, propuesto para clasificación de las muestras analizadas (3421). Diagrama de la izquierda presenta los datos con atributo color para las litologías y el de la derecha con atributo color para las unidades geológicas. Atributo para el tamaño de la figura de los datos según concentración de Co en ppm (análisis ME-MS41).....	122
Figura 6.7. Diagrama ternario Mg-K-S, propuesto para clasificación de las muestras analizadas (3421). Diagrama de la izquierda presenta los datos con atributo color para las litologías y el de la derecha con atributo color para las unidades geológicas. Atributo para el tamaño de la figura de los datos según concentración de Cu en ppm (análisis ME-MS41).....	122

Tabla 4.1. Tramos de sondajes con estudios de petrografía y calcografía.	34
Tabla 4.2. Asociaciones de minerales y minerales de alteración del mapeo geológico de sondajes (tercera columna corresponde al nuevo código de minerales de alteración a utilizar).....	49
Tabla 4.3. Opciones de litologías en el mapeo geológico de sondajes (tercera columna corresponde a los nombres litológicos a utilizar).....	50
Tabla 4.4. Grupos mineralógicos que representan a los minerales metálicos y de mena mapeados.	50
Tabla 4.5. Límites de detección para análisis con digestión de agua regia y determinaciones mediante ICP-AES e ICP-MS.	52
Tabla 4.6 Detalle de muestras enviadas y analizadas en los distintos laboratorios.....	53
Tabla 4.7. Estadígrafos de porcentaje de disolución calculada.	61
Tabla 4.8. Pares de elementos, entre mayores y de interés, con coeficientes de correlación superiores a 0,5, en orden decreciente.....	78
Tabla 4.9. Minerales* por grupo mineral identificados en la base de datos TIMA-TESCAN.	89
Tabla 4.10. Cantidad de muestras con análisis TIMA-TESCAN por litología del logueo de sondajes.	89
Tabla 4.11. Fórmula estructural de los minerales analizados por TIMA-TESCAN. Minerales de interés para alteración y mineralización, solubles y parcialmente solubles.	92
Tabla 5.1. Minerales por grupo mineral identificados en los cortes transparentes y pulidos (Anexo A: Petrografía y calcografía).	93
Tabla 5.2. Fórmula estructural de la mineralogía soluble en agua regia recopilada. Minerales de interés para alteración y mineralización, solubles y parcialmente solubles.	94
Tabla 6.1. Muestras con análisis TIMA-TESCAN y la información del mapeo geológico del tramo de sondaje respectivo.....	123
Tabla 6.2. Muestras con análisis TIMA-TESCAN y la información de mineralogía cuantitativa, en porcentaje, de los minerales del logueo de sondajes (mapeo de alteración y mineralización)....	123

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El cobalto es un metal estratégico utilizado en muchas aplicaciones comerciales, industriales y tecnológicas. La alta demanda en la actualidad se debe a su uso en baterías recargables y superaleaciones asociadas con aplicaciones aeroespaciales y de turbinas de gas (Wilburn, 2012). CRU Group (Commodities Research Unit) estimó en 2017 que la demanda de Co para baterías pasará de 44.000 Ton a casi 80.000 Ton para 2025 y es por lejos el material más caro en su fabricación.

Debido a esta masificación de tecnologías de baterías de litio-níquel, litio-cobalto y litio-cobalto-manganeso, es que se imprime una demanda en aumento creciente por estos metales, sobre todo por el cobalto, aspecto que abre una ventana de oportunidad real para una diversificación de la producción minera chilena, que se caracteriza por el enfoque monoprodutor de cobre al poseer los principales recursos cupríferos del mundo, pero no implica que en Chile no existan otros recursos minerales metálicos, como ya lo son las producciones de oro, plata y hierro (Townley et al., 2017 A). Es así como, actualmente, el cobalto es considerado un mineral metálico clave en las exploraciones mineras en territorio chileno.

En el pasado se explotaron yacimientos de cobalto en Chile. Esto ocurrió desde mediados del siglo XIX hasta 1944 de forma intermitente, entre la III Región de Atacama y la IV Región de Coquimbo, principalmente. Los distritos mineros de mayor producción en el mencionado periodo de explotación, con el cobalto como mena primaria junto con el cobre, fueron los distritos de San Juan, Región de Atacama, y Tambillos, Región de Coquimbo. En el primero de estos, Distrito San Juan, la mineralización se presenta en sistemas de vetas de cuarzo, la mineralización de cobalto principalmente en forma de sulfosales (cobaltita), con un horizonte superior oxidado, con ocurrencias de eritrina (arsenato de cobalto) (Townley et al., 2017 A). Los cuerpos de vetas se encuentran hospedados en rocas metamórficas del basamento de edad Paleozoico y en las rocas intrusivas de edad Jurásico y Cretácico que cortan el basamento (Welkner et al., 2006).

En el Distrito San Juan las actividades de explotación de cobalto han estado largamente cerradas (desde 1944), pero los yacimientos ahí presentes pueden presentar algún potencial remanente por cobalto como mena primaria, debido a que las explotaciones pasadas llegaron cerca de los 100 m de profundidad, por lo que una exploración mediante perforación a niveles más profundos pudiera levantar recursos no explotados (Townley et al., 2017 A). De esta manera, es en este distrito donde se ha desarrollado, desde 2018, un proyecto de exploración minera por cobre y cobalto, de nombre Las Cobalteras, llevado a cabo por Baltum Minería SPA. Es en este proyecto brownfield en el cual se enmarca el trabajo de esta memoria de título.

1.2 Formulación del problema

El depósito mineral de Las Cobalteras corresponde a un sistema vetiforme de cobre-cobalto que está emplazado en una secuencia metamórfica y se dispone preferencialmente a lo largo del contacto entre la caja metamórfica y filones intrusivos dioríticos. La morfología de los cuerpos de veta presenta un fuerte control estructural de orientaciones principalmente NNW y NE.

Durante la campaña principal de perforación en Las Cobalteras, entre junio de 2018 y septiembre de 2019, de las vetas Rosa Amelia y Farellón, se realizaron 68 sondajes diamantina de diámetro NQ, denominados DDH-01 a DDH-49 para los exploratorios de la veta Rosa Amelia y FAR-01 a FAR-19 para los de la veta Farellón, los cuales varían sus largos desde los 76,10 metros hasta los 350,00 metros, con un promedio de 206,20 metros por sondaje. Estas 68 perforaciones corresponden a la fuente de información a utilizar, por una parte, el mapeo geológico realizado por el equipo de geología Baltum y por otra, la geoquímica de los sondajes, donde se utilizó un método de digestión parcial en las muestras (disolución por agua regia). Además, se suma la información disponible de petrografía, calcografía y mineralogía automatizada TIMA-TESCAN.

El fin de una campaña de exploración es la búsqueda de los minerales de mena, que en este caso corresponden a minerales de cobre y cobalto, pero para esto los demás minerales coexistentes también son relevantes, sobre todo las asociaciones de minerales de alteración hidrotermal, ya que registran y dan información de los procesos que han afectado a la roca. Así, se hace fundamental el estudio de las alteraciones hidrotermales, dado que estas están relacionadas directamente con procesos mineralizadores.

Un trabajo anterior ha demostrado realizar una clasificación de alteraciones hidrotermales de un yacimiento tipo pórfido cuprífero en función de la geoquímica, donde igualmente se utilizó un método de digestión parcial con agua regia, el mapeo geológico de sondajes, más los datos de la intensidad de alteración para cada muestra (leve, moderada e intensa) y la información de mineralogía automatizada obtenida por análisis Qemscan (Cárdenas, 2015). De esta manera, el presente estudio pretende emplear y adaptar la metodología de dicho trabajo para caracterizar y clasificar las alteraciones hidrotermales asociadas a las vetas Rosa Amelia y Farellón.

Un problema que se debe mencionar es que, para estudiar la mineralogía de alteración hidrotermal a través de una base de datos geoquímicos obtenida con el método de disolución por agua regia de las muestras, no es la ideal, ya que la disolución de la roca es parcial y no total. El agua regia solo disuelve sulfuros, algunos sulfatos, óxidos de Fe-Mn, carbonatos, entre otros minerales, pero no es capaz de disolver la mayoría de los silicatos (Chao, 1984; Chao & Sanzalone, 1992; Church, et al., 1987; Hall, 1999; Snäll & Liljefors, 2000). Este problema fue la razón principal para seguir el modelo de clasificación de Cárdenas (2015), ya que en dicho trabajo la base de datos geoquímica se obtuvo por el mismo método de digestión parcial.

Por lo tanto, a través de las bases de datos geoquímicos, mineralógicos y de mapeo de sondajes, se

busca generar una caracterización y clasificación de las alteraciones hidrotermales de las vetas Rosa Amelia y Farellón de Las Cobalteras.

1.3 Hipótesis de trabajo

La hipótesis de este trabajo postula que, es posible determinar la presencia y caracterizar las alteraciones hidrotermales de las vetas Rosa Amelia y Farellón, esto mediante la unión y correlación de la información de mapeo de sondajes, la base de datos geoquímicos y la información de mineralogía disponible (muestras con petrografía, calcografía y mineralogía automatizada).

Las alteraciones hidrotermales se clasifican por las asociaciones de minerales de alteración presentes, quedando un registro físico y químico que las caracteriza en las rocas. Por lo tanto, correlacionando la información de mapeo y la base de datos geoquímicos de los sondajes, más el estudio de la mineralogía de algunas muestras, se pretende reconocer asociaciones minerales que determinen los tipos de alteración hidrotermal presentes, tal como fue hecho por Cárdenas (2015) en un yacimiento de pórfido cuprífero.

1.4 Ubicación y vías de acceso

El proyecto de exploración Las Cobalteras se ubica en el antiguo distrito minero San Juan, en el sector sur occidental de la Región de Atacama, en la Cordillera de la Costa de la Provincia de Huasco.

Se accede por el camino que une la ciudad de Vallenar con Huasco C-462, desviándose hacia el sur en la localidad de Freirina por el camino C-494 que une la ciudad de Freirina y la localidad de Quebradita, pasando las cuestas La Totorá y Arco Molle, hasta llegar a la entrada de Las Cobalteras en las coordenadas geográficas 28°42'00'' latitud sur y 71°12'43'' longitud oeste, aproximadamente (ver Figura 1.1).

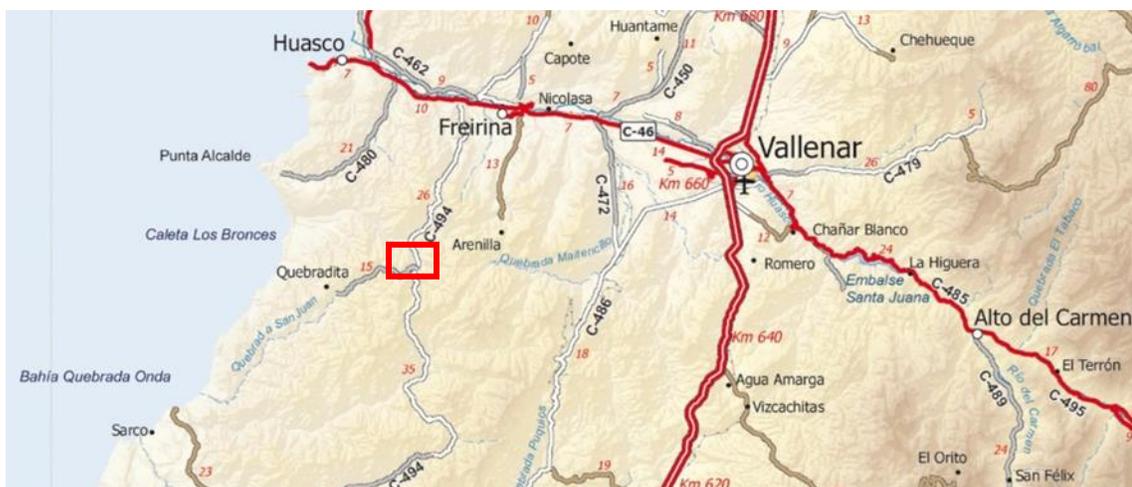


Figura 1.1. Mapa de ubicación y acceso al antiguo Distrito Minero San Juan (Townley et al., 2017 B), actualmente Las Cobalteras. Rectángulo rojo indica ubicación aproximada.

1.5 Objetivo general y específicos

El objetivo general de este trabajo de título es encontrar criterios y parámetros, entre datos geoquímicos y la información de mapeo geológico de sondajes, que permitan identificar la presencia y, posteriormente, definir una clasificación de los tipos de alteración hidrotermal presentes en un depósito mineral vetiforme de cobre-cobalto. A su vez, se busca que la nueva información levantada sirva para etapas posteriores de exploración y en el desarrollo de un modelo de alteración hidrotermal del depósito.

Para cumplir con el objetivo general se deben cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Corroborar y seleccionar los datos geoquímicos y del mapeo geológico de sondajes
- Analizar y correlacionar los datos de mineralogía, geoquímica y mapeo de los tramos de sondajes seleccionados.
- Definir la mineralogía y geoquímica de las muestras con potencial presencia de alteración hidrotermal.
- Usar criterios y parámetros que permitan clasificar las alteraciones hidrotermales.
- Analizar la clasificación de las muestras.

Los alcances están sujetos al nivel de información disponible que ha sido generada hasta diciembre de 2019. Este informe está orientado a la generación de la primera clasificación de alteración hidrotermal de las vetas de cobre-cobalto Rosa Amelia y Farellón en base a la geoquímica de 68 sondajes exploratorios: DDH-01 al DDH-49 (Veta Rosa Amelia) y FAR-01 al FAR-19 (Veta Farellón).

1.6 Metodología de estudio

La presente memoria de título se llevó a cabo desde finales de 2019, en etapas separadas de trabajo de gabinete y terreno. Este último correspondiendo a los viajes desde Santiago a Las Cobalteras, con estadía en la residencia para el equipo de geología e ingeniería en la comuna de Huasco.

Para cumplir con los objetivos anteriormente planteados, se prosigue con la siguiente metodología:

- Selección de información para confección de base de datos general: Un factor importante al comenzar es tener conocimiento de toda la información que se tiene para llevar a cabo el estudio planteado. Recopilar y asociar los datos bajo un mismo código, tanto para las variables discretas, continuas y categóricas, además, disminuir lo más posible la cantidad de variables a trabajar.
- Caracterización mineralógica de las muestras de sondajes: El análisis de los informes de petrografía y calcografía permitirá definir probables asociaciones minerales de los tipos de alteración hidrotermal presentes en las rocas, junto a otras características, como procesos de reemplazo mineral y depositación directa. Por su parte, los datos disponibles de mineralogía automatizada TIMA-TESCAN posibilitarán la comparación con los registros mineralógicos del logueo de sondajes. Además, se analizarán los registros del mapeo geológico bajo estadística de variables categóricas.
- Caracterización geoquímica de las muestras de sondajes: Se debe definir la mineralogía fuente de los elementos químicos, lo que consiste en una revisión bibliográfica acerca de la solubilidad de los minerales en agua regia. El análisis estadístico de los datos geoquímicos permitirá determinar los elementos que presentan una distribución preferencial según características de las muestras, como su clasificación litológica, o si existe más de una población de datos dentro de las distribuciones. Se hace la distinción entre elementos mayores y traza, ya que los primeros se relacionan con la presencia de minerales.
- Correlación de geoquímica y mapeo geológico de sondajes: Considerando la mineralogía y geoquímica de la población de muestras, se estudia el comportamiento conjunto de los elementos mayores y su correlación con los registros del mapeo de minerales de alteración y de mena. De esta manera, se obtendrá una aproximación de los minerales que tengan un control en la geoquímica de las rocas y, así, intentar diferenciar las muestras según los elementos químicos asociados a los minerales del logueo de sondajes.
- Clasificación de muestras a partir de datos geoquímicos: Considerando la información bibliográfica y la selección de elementos químicos asociados a la presencia de la mineralogía soluble, se utilizan diagramas ternarios de modelos de clasificación de alteraciones hidrotermales de otros trabajos de investigación (Cárdenas, 2015; Townley et.

al, 2012). Posteriormente, se compara la clasificación con los datos del mapeo de sondajes y se analiza sobre posibles errores, junto con las limitantes y recomendaciones.

2 MARCO GEOLÓGICO

2.1 Generalidades Geología Regional

El proyecto minero Las Cobalteras se ubica dentro de la Cordillera de la Costa de la Región de Atacama. La geología en la que se encuentra la zona de estudio y sus alrededores está cubierta por la carta Geología del Área Freirina-El Morado escala 1:100.000 del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (Welkner et al., 2006), siendo la fuente de información para las distintas litologías y estructuras a escala regional.

La Cordillera de la Costa por estos paralelos aparece disectada por el Sistema de Fallas de Atacama (SFA), que en esta zona está constituido por tres ramas que de oeste a este son: Zona de Cizalle Infiernillo (ZCI), Faja Plegada y Corrida Los Colorados (FPCC) Y Zona de Cizalle Algarrobo (ZCA). Al oeste de la ZCI afloran las rocas más antiguas, siendo las del Complejo Epimetamórfico Chañaral las que hospedan las vetas mineralizadas de Las Cobalteras. El Complejo Epimetamórfico Chañaral (DCCh en Figura 2.1), de edad Devónico-Carbonífero Inferior, es definido como un conjunto de rocas metasedimentarias con intercalaciones de mármoles, metacherts y metabasaltos almohadillados. Estas rocas metamórficas están intruidas por el Complejo Plutónico Infiernillo hacia el oriente y por la Diorita Cuarcifera San Juan hacia el sur.

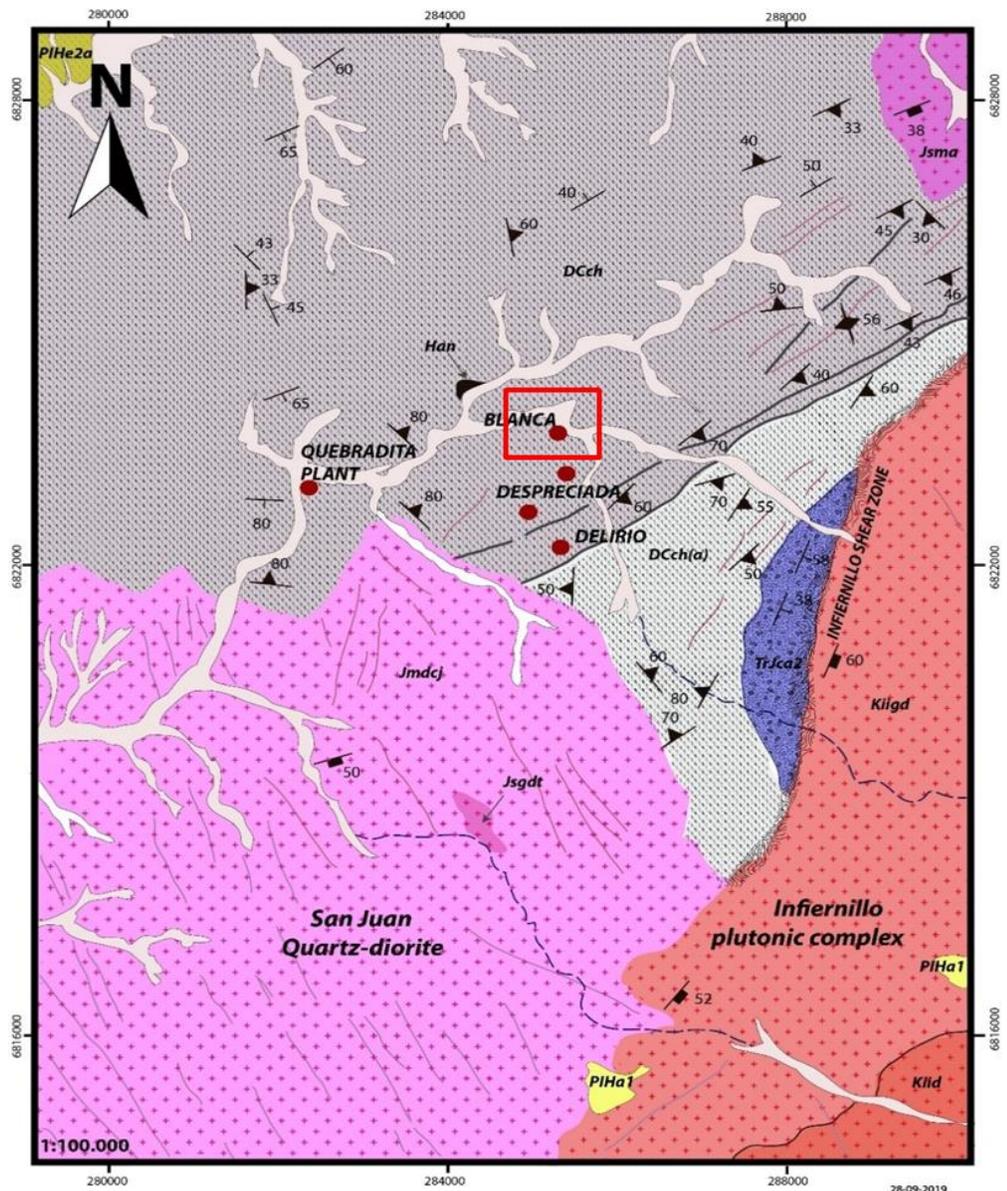
A las rocas del complejo epimetamórfico le sobreyace a través de una discordancia angular en el borde este del área, la Formación Canto del Agua (TrJca en Figura 2.1), de edad Anísico-Sinemuriano, la cual es una secuencia sedimentaria marina, clástica y volcánica, formada por conglomerados y areniscas arcósicas, lutitas, calizas con tobas riolíticas y basaltos intercalados. Es el Miembro Medio de la Fm. Canto del Agua (TrJca2 en Figura 2.1) el que aflora al este de la zona de estudio.

Al sur, intruye al basamento metamórfico de forma subvertical, con leve inclinación al norte, la Diorita Cuarcifera San Juan (ca. 174 Ma), que corresponde a un cuerpo de composición diorítica cuarcifera a diorítica, caracterizado por, dioritas cuarciferas de anfíbola y biotita de grano medio con variaciones litológicas a dioritas de anfíbolos y piroxeno y monzodioritas cuarciferas de anfíbola y biotita (Jmdcj en Figura 2.1).

Al noreste de la zona del proyecto aflora la Monzodiorita La Arena (ca. 157 Ma), que limita al oeste con rocas del Complejo Epimetamórfico Chañaral, mediante una franja de milonitas. El plutón está compuesto por monzodioritas cuarciferas inequigranulares con cristales mayores de plagioclasa, piroxenos, anfíbolos y biotita pseudomorfa de piroxeno y anfíbola (Jsma en Figura 2.1).

Hacia el oeste del área de estudio se encuentra la Granodiorita La Totora (ca. 152-151 Ma), cuerpo intrusivo granodiorítico de pequeñas dimensiones ($<16 \text{ km}^2$) que aflora en el cordón La Totora. Este plutón está compuesto por granodioritas de biotita y anfíbola y, en menor proporción, monzogranitos de anfíbola y biotita (Jsgdt en Figura 2.1). Además, existen cuerpos satélites granodioríticos de biotita y anfíbola en otras litologías, como se observa en la Figura 2.1 con un cuerpo satélite de Jsgdt dentro de la Diorita Cuarcífera San Juan.

En la parte este del área, al este de la Zona de Cizalle Infiernillo, aflora el Complejo Plutónico Infiernillo (ca. 131-129 Ma), que corresponde al cuerpo plutónico con la mayor superficie de exposición en la región (ca. 320 km^2). Está compuesto por granitoides y dioritas que se distribuyen en una franja noreste de afloramiento de 40 km (Kii en Figura 2.1). Limita al oeste con rocas volcanoclásticas y volcánicas de la Fm. Canto del Agua y con rocas metamórficas del Complejo Epimetamórfico Chañaral, a través de la franja de milonitas y migmatitas sinplutónicas de la ZCI, siendo considerada esta franja de deformación dúctil, de 63 km de largo, como la rama más occidental del Sistema de Falla de Atacama (Arévalo et al., 2003).



- | | | |
|---|---|---|
| <p>DCch
(a)</p> <p>Jmdcj</p> <p>Jsgdt</p> <p>TrJca2</p> <p>Jsma</p> <p>Kii
(gd) (d)</p> | <p>Chañaral epimetamorphic complex (Devonian-Lower Carboniferous)
Metasediments, partly microconglomeratic, with angular to sub-rounded clasts and metapelites; these last bearer of albite, white mica and chlorite.
(a) Schists, metabasite (green schist with albite nodules), marble and rocks composed by tremolite.</p> <p>San Juan Quartz-diorite (174 Ma)
Medium grain amphibole and biotite quartz-diorites, with variations to amphibole and biotite monzodiorites. In general, the mafic are presented replacing chlorite and / or actinolite and the argillized feldspars.</p> <p>La Titora Granodiorite (152-151 Ma)
Granodiorite of biotite and amphibole and, to a lesser extent, monzogranites of amphibole and biotite. It has two granodioritic bodies.</p> <p>Canto del Agua Formation (Anísic-Sinemurian)
Medium to fine conglomerates, supported matrix, with centimeter lithic clasts, medium to thick quartz-feldspathic sandstones and medium to fine litarenite and shales.</p> <p>La Arena Monzodiorite (157 Ma)
Monzodiorites of plagioclase, pyroxene, amphibole.</p> <p>Infernillo plutonic complex (131-129 Ma)
(gd) Granodiorites, tonalites and monzodiorite of amphibole, biotite and pyroxene. Occasionally present porphyry to poikilitic textures and features of crystalloplastic deformation, fracturing, dislocation and recrystallization of minerals.
(g) Diorites and quartziferous diorite of medium to fine grain, with amphibole and pyroxene with main mafic.</p> | <p>— Geological contact, inferred and observed</p> <p>— Observed and inferred fault</p> <p>↘ Strike and dip of strata</p> <p>↘₅₂ Strike and dip of the foliation</p> <p>↘₅₂ Strike and dip of the magmatic foliation</p> <p>▲ Antropic deposits (Han)</p> <p>☞ Milonites</p> <p>— Dikes</p> <p>■ Alluvial and eolic deposits (Pleistocene-Holocene)</p> <p>— Dry creek or intermittent course</p> <p>● Reference sites of the Cobaltera project</p> |
|---|---|---|

Figura 2.1. Mapa geológico distrital 1:100.000 que muestra las principales estructuras regionales y las principales minas históricas de la zona. Rectángulo rojo representa la zona de estudio del sistema de vetas Rosa Amelia-Farellón (Elaboración: Equipo de geología Baltum, 2019).

2.2 Geología Estructural Regional

Los rasgos estructurales de la zona donde se ubica Las Cobalteras, a escala regional, son el resultado de diferentes eventos deformacionales sobrepuestos desde el Paleozoico tardío hasta el Neógeno (Welkner et al., 2006). La información que a continuación se presentará corresponde a la geología estructural de la carta Geología del Área Freirina-El Morado escala 1:100.000 del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, elaborada por Welkner et al. (2006).

El rasgo estructural más antiguo corresponde a la deformación polifásica, de intensidad variable, y que afecta solo al basamento metamórfico (Complejo Epimetamórfico Chañaral) y no a las secuencias triásico-cretácicas que constituyen su cobertura. Consiste en una foliación de plano axial, moderadamente inclinada al sureste, penetrativa y de segunda generación, que afecta a metaareniscas cuarcíferas, metawackas, metabasitas y mármoles. Donde es posible observar charnelas, la asimetría de los limbos indica vergencia general hacia el oeste y los ejes mantienen suave a moderadamente hacia el nornoroeste, si bien algunos lo hacen hacia el suroeste. Anfibolitas, esquistos cuarzo-micáceos y esquistos nodulares de albita, de protolito básico, se concentran en los sectores más occidentales y orientales del basamento. El marcado contraste, en protolito, entre estas rocas y las rocas metasedimentarias que los separan, y la existencia de interfases estructurales miloníticas entre estos dominios, se interpretaron que estos segmentos de protolito básico representan bloques de corteza oceánica, exhumados tectónicamente desde niveles profundos de un prisma de acreción devónico-carbonífero.

Las secuencias y rocas plutónicas mesozoicas aparecen disectadas y deformadas por tres sistemas estructurales mayores, de orientación nornoroeste que, en conjunto, constituyen parte del segmento El Salado del Sistema de Fallas de Atacama (SFA; Brown et al., 1993) en estas latitudes. De oeste a este estas tres partes son: la Zona de Cizalle Infiernillo, la Faja Plegada y Corrida Los Colorados, y la Zona de Cizalle Algarrobo (Arévalo et al., 2003). El antiguo distrito minero San Juan, donde se ubica el actual proyecto de exploración Las Cobalteras y que es el lugar de trabajo de esta memoria, se encuentra al oeste de la Zona de Cizalle Infiernillo (ver Figura 2.2).

La Zona de Cizalle Infiernillo (ZCI) representa la rama más occidental del SFA. Corresponde a una banda de milonitas y migmatitas sinplutónicas de orientación NE a NNE, cuyas rocas dúctiles representan desde facies anfibolita a esquistos verdes. Esta franja se extiende por 43 km marcando el contacto entre el Complejo Plutónico Infiernillo (ca. 130 Ma) y rocas metamórficas y volcanoclásticas del Complejo Epimetamórfico Chañaral y la Formación Canto del Agua, respectivamente. La franja aparece discontinuada solo por unos 10 km en el tramo que coincide con el borde oriental de la Diorita Cuarcífera San Juan. La foliación en la ZCI está definida por bandas subverticales de cuarzo y feldespato alternadas con láminas lepidoblásticas de biotita y anfíbola. El alineamiento de estos minerales define direcciones de estiramiento mineral verticales. Indicadores cinemáticos de tipo σ , a lo largo de estas direcciones, indican sentido de cizalle en el manto con descenso del bloque oriental. Venas granodioríticas cizalladas y no cizalladas que coexisten en estas rocas, indican que las milonitas son sinplutónicas respecto a las granodioritas del Complejo Plutónico Infiernillo. Hacia el este, la foliación milonítica pasa, de manera coplanar y gradual, a una foliación magmática desarrollada en granodioritas y se pierde finalmente en

granodioritas isotropas. La banda milonítica-migmatítica de Infiernillo correspondería a una zona de cizalle, activa durante el emplazamiento del Complejo Plutónico Infiernillo, cuyo sentido de cizalle ‘plutón hacia abajo’ es consistente con un emplazamiento por descenso del piso plutónico a lo largo de una falla normal. Zonas de cizalle como esta, contemporáneas con el emplazamiento de plutones adyacentes, han sido documentadas en la Cordillera de la Costa de la Región de Atacama (Cruden, 1998; Grocott y Taylor, 2002; Arévalo et al., 2002) e indican que estos sistemas estructurales facilitaron el emplazamiento de plutones tabulares más bien por creación de espacio a través de descenso de pisos o ascenso de techos plutónicos por canalización de los magmas a lo largo de las mismas trazas.

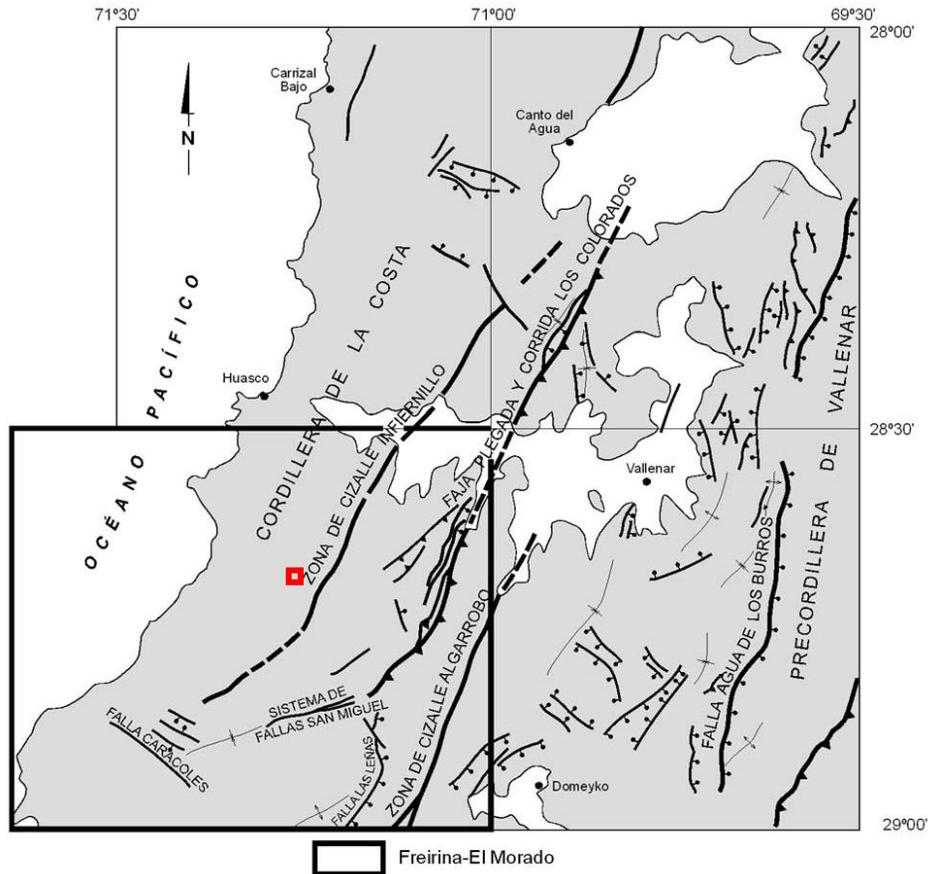


Figura 2.2. Esquema estructural de la parte suroccidental de la Región de Atacama (Welkner et al., 2006). Rectángulo negro delimita área de la Carta Freirina-El Morado. Cuadrado rojo indica ubicación aproximada de Las Cobalteras – Distrito Minero San Juan.

2.3 Recursos Minerales

En Welkner et al. (2006) se describen los tipos de depósitos minerales y eventos de mineralización de los distintos periodos que se encuentran registrados en la geología del área Freirina-El Morado. De los depósitos que se nombran, son las vetas del Jurásico Medio las que importan, dado que Las Cobalteras abarca parte de estas vetas con mineralización de Co y Cu-Co.

Las vetas que corresponden a las del Jurásico Medio son de: Cu, Cu-Au, Co y Cu-Co. Están alojadas en rocas metamórficas del basamento e intrusivas pertenecientes a la Diorita Cuarcifera San Juan. La distribución de la mineralización en estas vetas, restringidas tanto a la unidad San Juan como al basamento metamórfico, permitió proponer a la Diorita Cuarcifera San Juan como unidad mineralizadora y, por tanto, asignar una edad Jurásico Medio a estos depósitos (Welkner et al., 2006). Sin embargo, cabe recalcar que, si bien todas las vetas se asocian al mismo evento mineralizador, la roca de caja condiciona de manera efectiva el tipo de mineralización, como es el caso del Co que se reconoce exclusivamente en rocas del basamento metamórfico (los depósitos de Co y Cu-Co se encuentran solo en el basamento metamórfico).

2.4 Marco Geológico Local

El equipo de geología de Las Cobalteras realizó un trabajo de campo en la zona del proyecto entre octubre y noviembre de 2018, con el objetivo de levantar la información de la geología de superficie para elaborar un mapa geológico de la fase 1 en escala 1:1.000, definiendo unidades litológicas, alteración y mineralización. Para la obtención de esto, el equipo de geología recolectó muestras de mano y muestras para análisis geoquímico, a partir de las cuales se describieron las unidades litológicas identificadas, más la alteración y mineralización observada. Se contó con análisis de petrografía y calcografía de algunas muestras, sumado a la descripción de testigos de sondajes disponibles en ese momento.

Se reconocieron cuatro unidades litológicas: Unidad Metamórfica, Unidad Pórfido Andesítico, Unidad Diorita y Unidad Brecha Hidrotermal. En cuanto a las alteraciones observadas, estas se agruparon en 4 alteraciones predominantes: epidotización, calcitización, cuarzo-biotita y supérgena. Además, fue posible describir la mineralización de cobalto y cobre, que se asocia a estructuras vetiformes en el área de estudio.

2.4.1 Unidades litológicas

2.4.1.1 Unidad Metamórfica

La Unidad Metamórfica, descrita por el equipo de geología de Las Cobalteras, corresponde a la roca caja de la zona, compuesta principalmente por metapelitas de edad paleozoica, en facies de esquistos cuarzo-micáceos, presentes en sucesiones texturales derivadas del protolito pelítico, que incluyen metalutita, metareniscas y metaconglomerados, todas con cuarzo de segregación. Predominan metareniscas cuarcíferas, en parte microconglomerádicas, con clastos angulosos a subredondeados; metapelitas portadoras de albita, mica blanca y clorita, los porfiroblastos reconocidos localmente en estas metapelitas, corresponden a cristales de cordierita, parcialmente reemplazados por pinnita y con numerosas inclusiones de biotita microcristalina. La matriz granoblástica está constituida por un agregado microcristalino de cuarzo, plagioclasa y microcristales de biotita, con una orientación preferencial en el sentido del bandeamiento

macroscópico. El metamorfismo prógrado se muestra en las fases de biotita, cordierita, plagioclasa; mientras que el metamorfismo retrógrado está representado por fases como mica blanca y pinnita. Se encuentra, además, metandesita de biotita que corresponde a una metabasita compuesta por porfidoblastos de cuarzo, plagioclasa y biotita conformando una textura porfidoblástica, junto a una matriz compuesta por cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, biotita, mica blanca, sericita y arcillas, donde texturalmente, el cuarzo desarrolla una textura granoblástica y las micas una lepidoblástica, lo que da una foliación a la roca. En ocasiones, las micas se pueden ver rodeando a los porfidoblastos de plagioclasa.

En esta unidad también se encuentran hornfels de piroxeno, compuesta por cuarzo, wollastonita, piroxeno, prehnita, epidota, clorita y calcita. Los cristales de cuarzo se presentan distribuidos en bandas, recristalizados, formando puntos triples entre ellos y, en ocasiones, formas poligonales, los cristales de piroxeno acompañan a los cristales de cuarzo en las bandas, aunque también se observan en el resto de la roca, en su mayoría granulares y con formas anhedrales a subhedrales, sin alteración evidente, la wollastonita se observa como agregado fibroso, en ocasiones, aciculares y radiales junto a cristales de piroxeno y epidotas (entre ellas zoisita), las epidotas están junto a la wollastonita, dentro de este grupo se registra zoisita, además de cristales de prehnita junto a wollastonita, epidotas y piroxeno con habito fibroso.

Por último, la unidad presenta rocas metaígneas en donde aún es posible reconocer el protolito asociado a plagioclasas euhedrales con textura seriada, en las cuales se identifican maclas de carlsbad y polisintética, todo con alteración pervasiva a sericita, arcillas, epidotas y calcita, en estas, las epidotas reemplazan a las plagioclasas y junto a la calcita, forman una asociación que se desarrolla a temperatura y presión similar que el proceso de metamorfismo prógrado, en cambio, las arcillas y sericita se asocian al proceso de metamorfismo retrógrado, vinculado a la exhumación de la roca, ya que son minerales estables a presiones y temperaturas inferiores.

La mineralización primaria comprende pirita diagenética, mientras que en la zona supérgena se encuentran óxidos de hierro. Además, la roca actúa como huésped de la mineralización secundaria, tanto de minerales de cobre como de cobalto.



Figura 2.3. Fotografía de esquistos brechoso (DDH-17; 58,0-58,30 m). Roca metamórfica que presenta textura brechosa, a partir de una matriz fina de color gris (metapelita) y cúmulos de composición más gruesos e irregulares (metarenisca) incluyendo cuarzo de segregación.



Figura 2.4. Fotografía de esquistó bandeado irregular (DDH-29; 59,70-60,0 m). Esquistó caracterizado por su textura predominantemente bandeada de forma irregular, entre bandas de material fino de color gris (metapelita) y material de grano más grueso de color gris claro (metapsamita)

2.4.1.2 Unidad Diorita

La Unidad Diorita, descrita por el equipo de geología de Las Cobalteras, corresponde a una familia de cuerpos tabulares que afloran de manera continua desde sur a norte de la zona de estudio, con rumbos que van desde N15°W a N40°E, con manteo variable al oeste (50° a 70°), de composición andesítica, con texturas que varían de porfídicas a microgranulares, incluyendo algunas zonas faneríticas. Caracterizan a esta unidad, dioritas cuarcíferas de anfíbola y biotita de grano medio con variaciones litológicas a dioritas de anfíbola y piroxeno.

La roca está alterada a calcita en vetillas y cúmulos, mientras que en algunas zonas presentan una intensa alteración a clorita-epidota. Los silicatos ferromagnesianos (anfíbola y posiblemente piroxeno) se encuentran reemplazados parcial o totalmente por actinolita. Las anfíbolas muestran agregados de clorita que preservan relictos de biotita microcristalina, la que podría corresponder a una fase de alteración tardía (tardimagnética posiblemente) que posteriormente fue obliterada por la formación de clorita. La plagioclasa está albitizada y muestra una alteración leve a moderada a sericita, clorita, epidota y en ocasiones argílica. La alteración se representa por la asociación actinolita-epidota-clorita-albita con proporciones variables de titanita, sericita (restringida a cristales de plagioclasa) y prehnita. Lo anterior podría deberse a modificaciones en la composición de fluidos magmático-hidrotermales durante el enfriamiento del cuerpo intrusivo.



Figura 2.5. Fotografía de diorita de grano fino, microdiorita (DDH-15; 249,45-249,60 m). Roca intrusiva de color gris verdoso, de textura fanerítica inequigranular, presenta fenocristales de plagioclasa, en la muestra se observan vetillas milimétricas de carbonato.

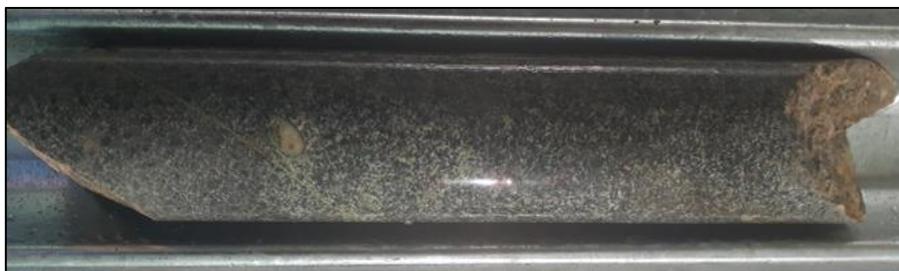


Figura 2.6. Fotografía de diorita de grano medio a grueso (DDH-17; 47,0-47,20 m). Roca intrusiva color gris verdoso, de textura fanerítica equigranular, con abundante presencia de minerales ferromagnesianos, se observan cúmulos de carbonato en la muestra.

2.4.1.3 Unidad Pórfido Andesítico

La Unidad Pórfido Andesítico, descrita por el equipo de geología de Las Cobalteras, corresponde a una familia de cuerpos ígneos intrusivos, de carácter hipabisal y composición andesítica con fenocristales de plagioclasa junto a cristales menores de anfíboles y piroxeno, inmersos en una masa fundamental microcristalina a afanítica melanocrática. Texturalmente, las rocas son porfídicas, traquíticas e intergranulares, con piroxenos uralitizados, presentando un reemplazo total o parcial por actinolita, y con textura poikilítica o glomeroporfirica. La geometría de estos cuerpos es principalmente tabular, de contactos cuasi rectos a irregulares, y cortados frecuentemente por cuerpos dioríticos tabulares.

En particular, existe un cuerpo principal que recorre toda la zona de estudio, con rumbo principal norte-sur (tendiendo a N15°E) y manteo variable al oeste (entre 45° a 70°), con importantes variaciones en su espesor, que van desde los 8 metros hasta superar los 30 metros. En la zona, hay un segundo cuerpo andesítico masivo, con geometría de pequeño stock irregular, del cual nace otro cuerpo tabular de orientación N15°E hacia el norte. Además, aparecen distintos diques pertenecientes a la misma familia, de rumbo N10°W a N15°E, con manteo variable al oeste (45° a 70°) y de espesor métrico, con un máximo de 4 metros.

La roca presenta una alteración propilítica moderada a intensa, evidenciada en la presencia de vetillas y pátinas de epidota milimétricas a centimétricas, junto a epidota±clorita generalizada. Esta última varía desde muy débil a intensa en distintas zonas de la unidad, alterando a clorita los cristales máficos. Los cristales de biotita se observan reemplazando fenocristales relictos de máficos primarios que, posiblemente, corresponderían a hornblenda y también a los minerales máficos de la masa fundamental. Además, hay sericitización parcial de las plagioclasas, así como relleno de sericita en fracturas, junto a óxidos de hierro en la zona supérgena. Adicionalmente, están presentes algunas vetillas de cuarzo±biotita, generalmente milimétricas, y vetillas de calcita proximales a los contactos con los cuerpos dioríticos. En las zonas más cercanas a las vetas principales (Rosa Amelia y Farellón), la unidad andesítica en superficie se encuentra medianamente argilizada, con abundantes óxidos de hierro en fracturas y vetillas, y ocasionales óxidos de manganeso±cobalto en pátinas.



Figura 2.7. Fotografía de roca andesítica (DDH-21; 144,0-144,20 m). Roca ígnea de color gris verdoso más oscura, de textura porfídica, con pequeños fenocristales de plagioclasa y una masa fundamental afanítica.



Figura 2.8. Fotografía de roca andesítica (DDH-21; 72,40-72,90 m). Roca ígnea de color gris verdoso, textura porfídica, presenta una abundante presencia fenocristales de plagioclasa, con intensidad de alteración variable, en una masa fundamental afanítica. En la muestra se observan vetillas de carbonato y cuarzo, en las fracturas presencia de patinas de óxidos de hierro.

2.4.1.4 Unidad Brecha Hidrotermal

La Unidad Brecha Hidrotermal, descrita por el equipo de geología de Las Cobalteras, corresponde a una familia de rocas brechozas, que se presentan a lo largo de las vetas en la zona de estudio, con geometrías tabulares irregulares, generalmente en, o a distancias métricas del contacto entre los cuerpos ígneos y la unidad metamórfica. Tienen espesores que van desde los 30 cm a 1 metro. Presentan clastos angulosos, subesféricos a no esféricos, de entre 2 mm a 6 cm, principalmente de la unidad metamórfica. El cemento de la brecha generalmente está en menor proporción con respecto a los clastos, siendo más frecuente un stockwork de vetillas de algunos milímetros de espesor, cuya composición corresponde a cuarzo, turmalinas y biotita, en proporciones variables, siendo dominante el cuarzo en la mayoría de las muestras observadas, a excepción de aquellas brechas donde el cemento es mayor a los clastos, en cuyo caso la turmalina es dominante.

La alteración predominante, en la zona supérgena corresponde a óxidos de hierro, presentes en el cemento de las brechas, en vetillas y en el relleno de fracturas. Tanto en la zona supérgena como en la hipógena, la alteración clorita-epidota aparece en las brechas asociadas principalmente al pórfido andesítico, y, en algunas ocasiones, se muestra en brechas cercanas a diques dioríticos; mientras que la alteración a calcita es frecuente en las brechas asociadas a los cuerpos dioríticos.

Todas las brechas exhiben alteración a cuarzo±biotita, en forma de vetillas y/o cúmulos. En algunas brechas se produce una silicificación intensa, indistintamente del tipo de cuerpo ígneo asociado a la brecha, esto se evidencia por la presencia de afloramientos de roca muy competente vistos como farellones en superficie.

En la brecha existe mineralización de oxidados de color negro en todas las muestras estudiadas, los cuales varían en su contenido de cobalto desde 200 a 10.000 ppm, de acuerdo con mediciones puntuales realizadas con equipo de XRF portátil. En las zonas de vetas principales, la roca está mineralizada con abundantes oxidados verdes de Cu, en ocasiones asbolana, eritrina y cobaltita. En los testigos de sondajes se constató, en la zona hipógena, mineralización de sulfoarseniuros de cobalto asociados al cemento de turmalina, y mineralización de pirita y calcopirita en vetillas y diseminada, frecuentemente asociadas a calcita de alteración.



Figura 2.9. Fotografía de tramo de brecha hidrotermal (DDH-05; 65,40-65,60 m). Roca con textura brechosa con predominio de cuarzo en masa fundamental, la muestra presenta fragmentos de roca caja color gris oscuro (roca metamórfica).



Figura 2.10. Fotografía de tramo de brecha hidrotermal (DDH-02; 198,50-198,70 m). Roca con textura brechosa y predominio de carbonato en la masa fundamental, la muestra presenta fragmentos de roca caja gris oscuro y mineralización de calcopirita (cemento).



Figura 2.11. Fotografía de tramo de brecha hidrotermal (DDH-15; 119,90-120,50 m). Roca con predominio de turmalina en la masa fundamental, la muestra presenta fragmentos angulosos de roca metamórfica, vetillas de carbonato y mineralización de cobalto en la masa fundamental.

2.4.2 Alteración hidrotermal

La información, recabada por el equipo de geología de Las Cobalteras, relacionada a los minerales de alteración presentes en los primeros 10.000 metros perforados entre los sondajes DDH (veta Rosa Amelia) y FAR (veta Farellón), concluye que las alteraciones se pueden describir en base a la presencia mayoritaria de 8 minerales de alteración (o grupo mineral en el caso de las arcillas), más una alteración supérgena caracterizada por oxi-hidróxidos de hierro y arcillas. Los 8 minerales de alteración son: biotita, turmalina, clorita, epidota, calcita, sericita, arcillas, cuarzo/silicificación. En la geología de superficie también pueden ser claramente reconocidas algunas de las alteraciones recién mencionadas, por ejemplo: biotitización en vetas con rumbo NS; epidotización en la zona asociada a los cuerpos de la unidad andesítica; calcitización predominante en toda el área de estudio (encontrándose labores de caliza en la zona sureste); alteración supérgena con óxidos e hidróxidos de Fe y presencia de arcillas asociada a esta alteración y a zonas de falla.

A continuación, se describen las ocurrencias de los 8 minerales de alteración antes mencionados.

- Biotita/biotitización (cuarzo-biotita): alteración dominante en vetas/vetillas. Las vetas son rectas, en otros casos irregulares, de tamaños que varían desde milímetros hasta centímetros y algunas con decenas de centímetros. En general, se reconoce mayor proporción de cuarzo y la biotita crece dentro de las vetas rellenoando cúmulos o guías irregulares. Se reconoce que una alteración posterior de estas vetas produce clorita y/o sericita como reemplazo de la biotita que le da tonalidades verdosas.
- Turmalina/turmalinización: esta alteración es descrita aparte para distinguir vetas con predominio de turmalina. Si bien en los sondajes no ha sido tan evidente la acción de esta alteración, en los cortes transparentes de una veta, de nombre La Negra, ha sido utilizada como diagnóstico para identificar vetas mineralizadas (el hecho es que la mayoría de los minerales negros correspondían a turmalina). La turmalina ocurre como cristales prismáticos y aciculares que varían de tamaño entre los 0.05-2 mm, se desarrolla con cuarzo intersticial o también puede encontrarse con carbonatos.

- Clorita/cloritización: el mineral de clorita se presenta en las distintas unidades litológicas. Por una parte, se asocia como mineral de alteración en los intrusivos dioríticos, en forma de vetillas, en ciertos casos como cúmulos y en otros como reemplazo selectivo de los minerales ferromagnesianos. Además, se ha reconocido como componente de alteración de las vetas de cuarzo-biotita, o en paragénesis con vetas de calcita.
- Epidota/epidotización: esta alteración es exclusiva de las rocas intrusivas (preferente de las rocas de la unidad andesítica). Predomina como alteración selectiva, en vetillas y en cúmulos.
- Calcita/calcitización: esta alteración es reconocida ampliamente en los sondeos y se asocia con casi todos los otros minerales de alteración (puede presentarse de forma aislada), siendo uno de los minerales de alteración de mayor abundancia. La aparición de calcita se da principalmente en vetillas y relleno de fracturas. La intensidad de vetillas de calcita es variable, algunos casos con baja frecuencia de vetillas de espesor milimétrico, otros casos con alta frecuencia y espesores que llegan a la decena de centímetros y otras zonas con stockwork de calcita.
- Sericita/sericitización: esta alteración se presenta como agregado en las vetas de cuarzo, cuarzo-biotita y sericita sola. Se caracteriza por una tonalidad verdosa de micas microcristalinas y se observa principalmente en las vetas de cuarzo-biotita, generalmente como alteración posterior sobre minerales de biotita. También, se presenta reemplazando plagioclasas en las litologías de las unidades intrusivas (sericita de tonalidades blanquecinas).
- Acillas/Argilización: esta alteración se define por la alta presencia de arcillas y se produce, principalmente, en las zonas de falla y alto fracturamiento. Se han observado arcillas de colores grisáceas, gris verdosas y en algunos casos anaranjadas cuando están en la zona oxidada. Las zonas argilizadas afectan a las unidades litológicas intrusivas como también a las rocas de la unidad metamórfica.
- Silicificación: alteración reconocida en menor medida en los sondeos, pero no deja de tener relevancia en algunos tramos alterados que llegan desde las decenas de centímetros a algunos metros. La inyección de sílice les da tonalidades grisáceas-blanquecinas a los testigos y, en general, su ocurrencia se tiende a asociar a un alto vetilleo de cuarzo y cuarzo-biotita en los tramos afectados por esta alteración. Se ha identificado silicificación en tramos aislados y no relacionados con la mineralización de cobalto, pudiendo tratarse de algún evento hidrotermal distinto.

En cuanto a la alteración supérgena, esta no es muy desarrollada y, en general, los sondeos han evidenciado zonas con signos de esta alteración desde los 10 hasta los 100 metros. La alteración

de la zona supérgena (zona oxidada) se representa por una serie de minerales de óxidos e hidróxidos y arcillas que, a su vez, dependen de las unidades litológicas involucradas.

Las unidades intrusivas al sufrir alteración supérgena tienden a argilizarse, por lo que abundan minerales del grupo de las arcillas, lo que le da tonalidades verdosas y grises a la roca. También está la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro alterando minerales ferromagnesianos de la roca, junto a la ocurrencia de dendritas de óxido de manganeso. En los casos que se presentan vetillas de calcita, estas tienden a rellenarse con óxidos-hidróxidos de hierro.

En la unidad metamórfica las rocas tienden a sufrir bajos grados de alteración supérgena, con excepción de los primeros 10 a 20 metros donde es mayor, caracterizándose por abundantes óxidos-hidróxidos de hierro y arcillas en planos de foliación. Un ejemplo es la oxidación de la piritita diagenética del metamorfismo en los planos de foliación de esquistos. También se ha observado minerales oxidados dentro de cuarzos (o cúmulo de cuarzo) en ciertas facies ricas en cuarzo.

En las vetas y/o zonas de vetas la alteración supérgena es más diversa, abundan tanto los óxidos e hidróxidos de hierro y limonitas, reconociéndose tonalidades rojizas, amarillentas y blanquecinas (por presencia de arcillas) en algunos casos. Los entornos de las vetas no muestran grandes extensiones de alteración supérgena (de 1 a 2 metros), y los grados de intensidad en general no son muy altos, con excepción de algunos tramos de veta en las que se reconoce una alta lixiviación (con ocurrencia de estructuras de boxwork) y destrucción de la mineralogía primaria. En algunos casos, cuando las zonas de vetas presentan alto vetilleo de calcita, se produce una gran intensidad de alteración, siendo estas vetillas rellenas por óxidos de hierro y arcillas. También se observan texturas de relleno de espacios, lugares dejados libres por efecto de la alteración (proceso de lixiviación) y posteriormente rellenos con, por ejemplo, óxidos-hidróxidos de hierro, óxidos de cobalto, óxidos de manganeso, oxidados de cobre y arcillas. Por otra parte, el entorno de las vetas, en la mayoría de los casos, presenta fracturas donde se evidencia relleno de oxidados verdes de cobre, posiblemente transportados desde la veta.

Por último, el equipo de geología de Las Cobalteras agrega que no se han observado halos de alteración evidentes fuera de las vetas que poseen minerales de Co, indicando que la interacción fluido-roca caja no ha sido muy penetrativa ni tampoco intensa, posiblemente asociado a un bajo volumen de fluidos, o también a una baja reactividad de la roca de caja con los fluidos mineralizadores de cobalto. Hasta el momento no es posible esclarecer si las alteraciones o qué alteración tiene algún grado de control sobre la mineralización de cobalto.

2.4.3 Mineralización

La información de mineralización de Co y Cu presentes en los primeros 10.000 metros perforados entre los sondajes DDH (veta Rosa Amelia) y FAR (veta Farellón), recabada por el equipo de geología para la fase 1 de Las Cobalteras, incorpora información visual de carácter macroscópico, la cual también es complementada con estudios de petrografía y calcografía realizados en algunos

tramos. Además, se suman los ensayos con pistola XRF portable, que da sustento a la mineralogía de mena en función de las proporciones de elementos que entrega.

La mineralización de interés primario corresponde principalmente a sulfoarseniuros de cobalto, aunque también existen ocasiones donde ocurre la mezcla de mineralización de cobalto con sulfuros de cobre, y otros minerales como pirita y pirrotina, sin dejar de lado la opción de presencia de pirita cobaltífera y arsenopirita. En la zona oxidada se han reconocido otros minerales con contenidos metálicos como oxidados verdes de cobre, óxidos negros de Cu, óxido de Co (asbolana) y arseniato de cobalto (eritrina).

El control de la mineralización de cobalto se asocia a estructuras vetiformes, que en general tienen una relación espacial muy cercana a los diques presentes en la zona de estudio. Las morfologías de vetas dan cuenta de distintos eventos de circulación de fluidos, y posiblemente de mineralización, reconociéndose también otros estilos como vetillas, stockwork y brechas, asociados a zonas de ocurrencia mineral (zonas de vetas). Todos estos estilos son de naturaleza concordante con potencias centimétricas a métricas en algunos casos, siendo catalogadas como vetas angostas. Una característica notoria a lo largo del trayecto de las vetas, en superficie, son contactos bien delimitadas con la roca caja que corresponde a la unidad metamórfica, con escasa alteración visible (halo de alteración y de mineralización). La mineralización se emplaza a lo largo del rumbo de las vetas NS y N30°E con manteo subvertical hasta 55° al W. Los tramos mineralizados de los sondajes dan cuenta de una relación entre mineralización de cobalto y el relleno de vetas de cuarzo±biotita±turmalina.

De acuerdo con lo observado en la campaña de sondajes de la fase 1 del proyecto Las Cobalteras, se pueden describir las distintas zonas de mineralización de cobre y cobalto presentes a lo largo de la traza de la veta Rosa-Amelia. Estas se dividen en: zona oxidada, zona mixta y zona hipógena.

La zona oxidada comprende una mineralización de cobre y de cobalto, caracterizada por la presencia de minerales oxidados de cobre (malaquita, azurita, atacamita y crisocola) ±asbolana±chenevixita±óxidos negros de cobre±eritrina, junto a óxidos e hidróxidos de hierro, manganeso y limonitas. La mineralogía oxidada de hierro y manganeso se dispone principalmente en las primeras decenas de metros de cada sondaje y se observa como relleno de fracturas o cavidades, en las vetillas de cuarzo, cuarzo-biotita y calcita, como pátinas, y en algunos casos también se desarrollan vetillas milimétricas a centimétricas de óxidos de hierro.

En general la cantidad de minerales oxidados de cobre es baja, siendo habitual su presencia en trazas. Entre oxidados verdes y negros de cobre presentes en los testigos, los más habituales son los oxidados verdes de cobre, asociados en su mayoría a vetillas milimétricas a centimétricas de cuarzo, cuarzo-biotita y calcita, y de manera menos frecuente se disponen junto a vetillas milimétricas a centimétricas de óxidos-hidróxidos de hierro, biotita o en stockwork milimétricos de calcita o cuarzo. Su estilo de ocurrencia más común es como vetillas milimétricas cortas y en menor grado se observan como relleno de fracturas, diseminados o formando cúmulos milimétricos en la roca. Por otro lado, la chenevixita y los óxidos negros de cobre tienen una participación más

reducida. Se relacionan a vetillas milimétricas a centimétricas de cuarzo, cuarzo-biotita, óxidos-hidróxidos de hierro y calcita, con una ocurrencia en la mayoría de los casos en forma de vetillas milimétricas o rellenando fracturas, pero también diseminados en la roca.

En cuanto a los minerales de cobalto, la asbolana es el más abundante. Se asocia a vetillas milimétricas a decimétricas de cuarzo, cuarzo-biotita, stockwork de cuarzo y vetillas de óxidos-hidróxidos de hierro. Normalmente se dispone como vetillas milimétricas, relleno de fracturas, formando cúmulos o diseminada en la roca. Por último, la presencia de eritrina es más bien escasa en los sondajes, a pesar de que localmente puede alcanzar mayor porcentaje. Normalmente se relaciona a vetillas milimétricas a decimétricas de cuarzo o stockwork de cuarzo-biotita, en los cuales se muestra de manera diseminada o como relleno de fracturas.

La zona mixta puede alcanzar las decenas de metros de espesor y a lo largo de ella se evidencia la presencia de mineralización de oxidados verdes y negros de cobre, asbolana, chenevixita y eritrina junto a sulfuros hipógenos como pirita, calcopirita, cobaltita y pirrotina. Ambos tipos de mineralización se asocian a sus respectivas vetillas milimétricas a centimétricas de cuarzo, cuarzo-biotita y calcita, stockwork de cuarzo o calcita o, en el menor de casos, junto a vetillas milimétricas a centimétricas de óxidos-hidróxidos de hierro o conformando vetillas milimétricas de sulfuros. En dichas asociaciones, los minerales ocurren principalmente en vetillas, como relleno de fracturas o diseminados en la roca.

La zona de mineralización hipógena se caracteriza por el inicio de la aparición de sulfuros en los testigos de sondajes, y tal mineralización está dominada por la presencia de pirita±calcopirita±cobaltita±pirrotina. La pirita es el más abundante de los sulfuros presentes. Está comúnmente asociada a vetillas milimétricas hasta métricas de cuarzo y cuarzo-biotita, y en menor medida se relaciona a vetillas milimétricas a centimétricas de calcita, stockworks de cuarzo, cuarzo-biotita y calcita. Su principal ocurrencia es como vetillas milimétricas a centimétricas, diseminada o como relleno de fracturas en la roca y, secundariamente como stockwork, cúmulos, masiva o formando vetillas milimétricas a centimétricas de sulfuros. Ocasionalmente se ha descrito la presencia de pirita con hábito acicular radial, por lo cual se propone que parte de esa pirita, cuyo origen se presume metamórfico, pueda ser marcasita.

La calcopirita es el segundo sulfuro más recurrente que varía sus contenidos desde trazas hasta mayores porcentajes en algunos testigos de sondaje. Este mineral se asocia tanto a vetillas milimétricas a centimétricas de calcita o a vetillas milimétricas a métricas de cuarzo-biotita o cuarzo, y recurrentemente está en paragénesis con pirita±pirrotina. Sus principales estilos de ocurrencia son como vetillas milimétricas, diseminada o como relleno de fracturas en la roca y, en ocasiones más acotadas se observa masiva, en cúmulos o constituyendo vetillas milimétricas a centimétricas de sulfuros. La pirrotina es el sulfuro menos abundante de todos, generalmente en paragénesis con pirita y calcopirita, se asocia a vetillas milimétricas a métricas de cuarzo o cuarzo-biotita, vetillas milimétricas a centimétricas de calcita y vetillas milimétricas de clorita-epidota. Su ocurrencia principal es como vetillas milimétricas o diseminada en la roca, y con menor frecuencia como cúmulos o rellenando fracturas.

El principal mineral de cobalto estudiado es la cobaltita (sulfoarseniuro de cobalto), la cual generalmente está como traza en los sondajes, aunque puede alcanzar localmente mayor porcentaje, comúnmente asociada biotita y turmalina, junto con otros sulfuros como pirita y calcopirita. La mineralización de cobalto se relaciona a vetillas milimétricas a centimétricas de cuarzo o cuarzo-biotita, a stockwork de cuarzo-biotita o de sulfuros. Generalmente está diseminada, como vetillas, en cúmulos milimétricos a centimétricos o como cemento de brecha.

2.4.4 Geología Estructural Local

El equipo de geología de Las Cobalteras desarrolló 6 mapas estructurales a escala 1:1.000 correspondientes a distintos sectores del proyecto, siendo abarcada el área de estudio con las vetas Rosa Amelia-Farellón (Figura 2.14). Asimismo, todas las áreas prospectadas fueron unidas en un mapa estructural general a escala 1:5.000 y acompañadas de un respectivo informe, del cual se obtuvieron los datos a continuación presentados.

El área de estudio total (incluyendo los demás sistemas de vetas) se caracteriza por la existencia de estructuras de orientación predominante NS y noreste, y estructuras menores con orientación noroeste, en un rango delimitado por $N40^{\circ}W$ a $N60^{\circ}E$, con manteo hacia el oeste y algunas con manteo al este. Las rocas huéspedes de estas estructuras corresponden a las de la unidad metamórfica, cuya foliación preferente buza hacia el este y tiene una orientación NS con zonas de mayor deformación, donde es posible observar pliegues a mesoescala y cambios abruptos de azimut.

Conforme al mapeo geológico, el equipo de geología reconoció 3 estructuras principales: cuerpos ígneos subvolcánicos o hipabisales (diques de las unidades intrusivas), fallas y vetas (vetas principales y secundarias), que pueden o no presentar mineralización. Todas estas estructuras exhiben variabilidad en sus rumbos y manteos, así como también en sus espesores.

Los cuerpos ígneos de composición andesítica o diorítica son de geometría tabular subregular compleja, con espesores variables en un mismo cuerpo y entre distintos cuerpos, de contactos secos e irregulares y con frecuentes ramificaciones. Se observan grandes cambios en el manteo para una misma estructura, que pueden ir desde los 40° a los 80° al oeste, marcando una tendencia principal de 65° al oeste. Mientras, los cambios en el rumbo son de menor rango (no mayores a 20°) y ocurren de manera abrupta. Los contactos irregulares y las ramificaciones sugieren la existencia de zonas de fractura o fallas previas a la intrusión, las cuales habrían facilitado el ascenso magmático y ayudarían a explicar la geometría compleja de los cuerpos.

Las fallas en la zona se presentan fuertemente argilizadas, su manteo, siempre hacia el oeste, varía de forma abrupta en rangos que van desde los 40° a subvertical. El rumbo de las fallas coincide con el del resto de las estructuras principales, siendo predominante el NNE. Son generalmente de espesores decimétricos, rara vez superando los 0,5 metros de espesor. En casos puntuales,

principalmente en las trazas de las vetas principales, se observan conjuntos de pequeñas fallas paralelas a la falla principal, con zonas muy fracturadas entre una y otra, generando zonas de falla que pueden alcanzar los 15 metros de espesor. Se han observado fallas de cinemática normal y/o de rumbo, sin descartar la existencia de eventos compresivos anteriores o posteriores en ellas.

Las vetas corresponden a cuerpos de geometría tabular irregular y espesor muy variable, brechizados con clastos generalmente de esquisto (unidad metamórfica) y en algunas ocasiones de diques (unidades intrusivas), donde es posible diferenciar zonas de alta mineralización y zonas de mineralización escasa a no visible. En el caso específico de las vetas ricas en cobaltita, se presentan al interior de las zonas de veta como cuerpos brechizados con cemento de turmalina-biotita±cuarzo o como vetas de cuarzo-biotita-turmalina. Dichas vetas ricas en cobaltita presentan bolsones de geometría lenticular que pueden alcanzar espesores decimétricos, luego acuñarse hasta alcanzar espesores menores a un centímetro y continuar en forma de vetillas o cerrarse.

Se observa una estrecha relación espacial entre los distintos tipos de estructuras, en particular, entre las vetas principales y las fallas, donde estas últimas generalmente se ubican hacia el footwall de la zona de veta, aunque, se observaron fallas cortando las vetas o limitando la mineralización hacia el hangingwall. Agregar que, en algunos tramos la mineralización de las vetas disminuye, o incluso desaparece, y la falla asociada (o cercana) aumenta de espesor; un ejemplo de esto es lo que ocurre en el sector norte de la veta Farellón, donde la mineralización decrece drásticamente y la falla principal alcanza un espesor cercano a un metro, mientras que una serie de fallas menores aparecen de forma paralela, generando una zona de falla de 15 metros de espesor. Por otra parte, los diques también aparecen relacionados espacialmente a las vetas, en ocasiones contiguas a éstas y en otras a distancias métricas

2.4.4.1 Sistema de vetas Rosa Amelia-Farellón

El sistema de la veta Rosa Amelia corresponde a una veta de orientación NS, con un manteo promedio de 53° hacia el oeste, donde las variaciones del ángulo de buzamiento van entre 35° a 60° y pequeñas variaciones en su rumbo, entre N5°E y N10°W. Hacia la parte norte de la veta hay una disminución en el manteo y un ligero cambio del rumbo hacia el oeste. Mientras que, la veta Farellón posee una orientación principal N30°E, se cruza con la veta Rosa Amelia y comparte características litológicas con esta, pero Farellón se “acuña” y no muestra continuidad hacia el norte como si lo hace la veta Rosa Amelia (ver Figura 2.13 y Figura 2.14).

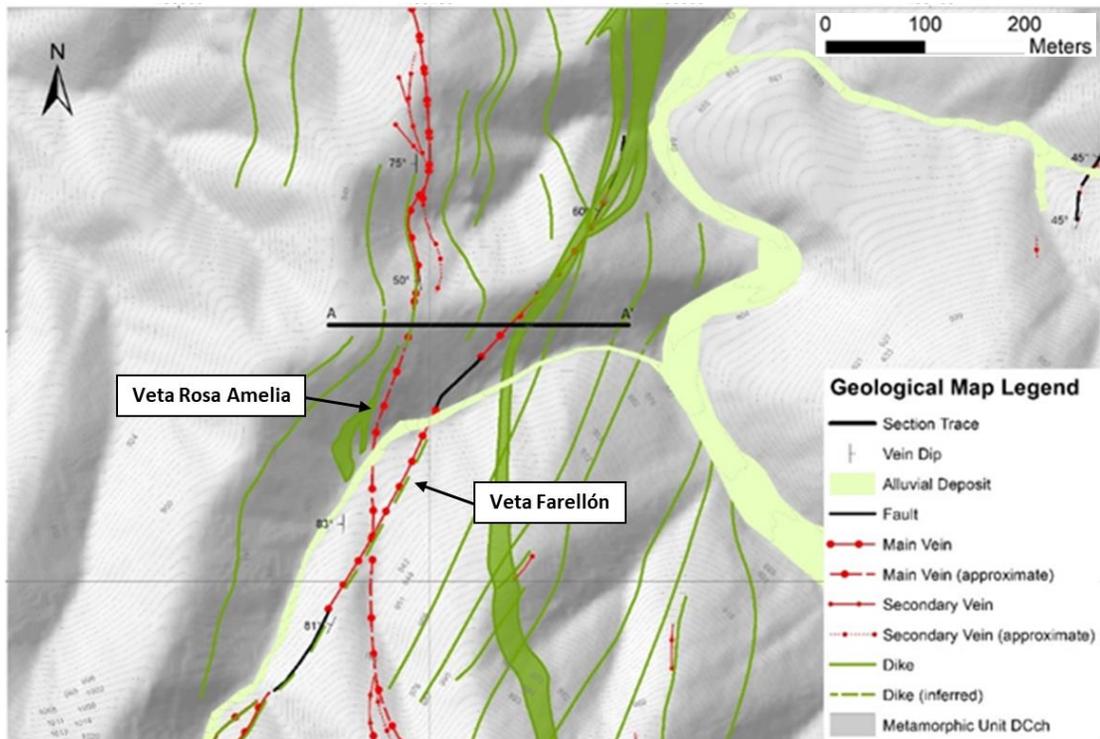


Figura 2.12. Mapa del Sistema Rosa Amelia-Farellón (1:1.000), con las estructuras reconocidas y la Unidad Metamórfica, así como los depósitos aluviales recientes en las quebradas (Elaboración: Equipo de geología Baltum, 2019).

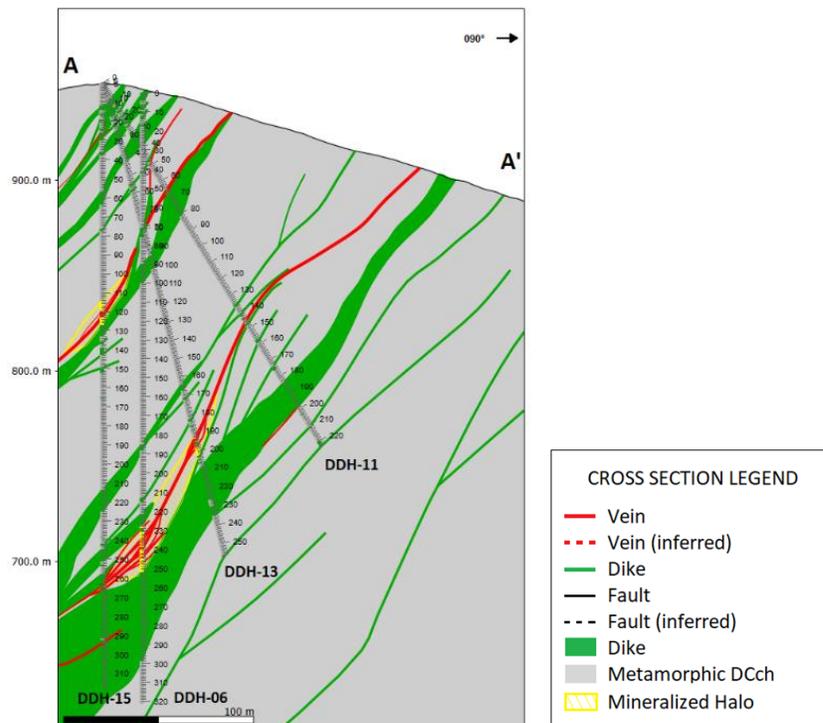


Figura 2.13. Sección geológica del sistema Rosa Amelia-Farellón. Hacia el oeste se presenta la veta Rosa Amelia y, más al este, la veta Farellón. Los diques siguen el mismo sistema estructural (Elaboración: Equipo de geología Baltum, 2019).

La roca caja corresponde a la unidad metamórfica y las vetas corresponden a brechas hidrotermales con cemento de cuarzo-biotita-turmalina o arcillas de falla mineralizadas (tramos de vetas con falla). Además, para el sistema de vetas Rosa Amelia-Farellón, el equipo de geología observó formas sigmoidales (lenticulares, con mayor potencia) que presentan cambios drásticos (pero suaves a mesoescala) en su buzamiento.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Alteración hidrotermal

La alteración hidrotermal es un término general que incluye la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas a un cambio ambiental, en términos químicos y termales, en la presencia de agua caliente, vapor o gas (Maksaev, 2001). Es el producto de un proceso metasomático que ocurre a través de la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos minerales, disolución de minerales y/o precipitación, y reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente (fluido hidrotermal) que circuló por la misma (sistema termodinámico abierto).

Las nuevas características mineralógicas, químicas y morfológicas producto del proceso de alteración, entregan información acerca de las condiciones termodinámicas del fluido hidrotermal que las generó. Permiten conocer sobre los factores que influyen en la intensidad y los tipos de alteración, como, la composición del fluido hidrotermal, composición de la roca huésped, temperatura, pH, Eh, razón agua/roca y tiempo de interacción (Townley, 2006).

En la geología se reconocen variados tipos de alteración hidrotermal, caracterizados y clasificados por asociaciones de minerales específicos. Una asociación de minerales de alteración puede reflejar las condiciones de temperatura, presión, composición química del fluido hidrotermal, mineralogía de la roca original y el tiempo que tomó para lograr un equilibrio termodinámico entre la roca y el fluido. Por lo mismo es que se requiere una observación detallada de los minerales, su química y sus texturas para identificar la asociación de minerales correcta.

Corbett & Leach (1997) presentaron un diagrama de clasificación de los principales tipos de alteración en sistemas hidrotermales, donde las asociaciones minerales para cada alteración hidrotermal se ordenan en función del pH del fluido, de la temperatura y profundidad del sistema (ver Figura 3.1). Estos autores separaron además el diagrama en columnas, definidas por grupos caracterizados por ciertos minerales estables y dominantes en un cierto rango de pH.

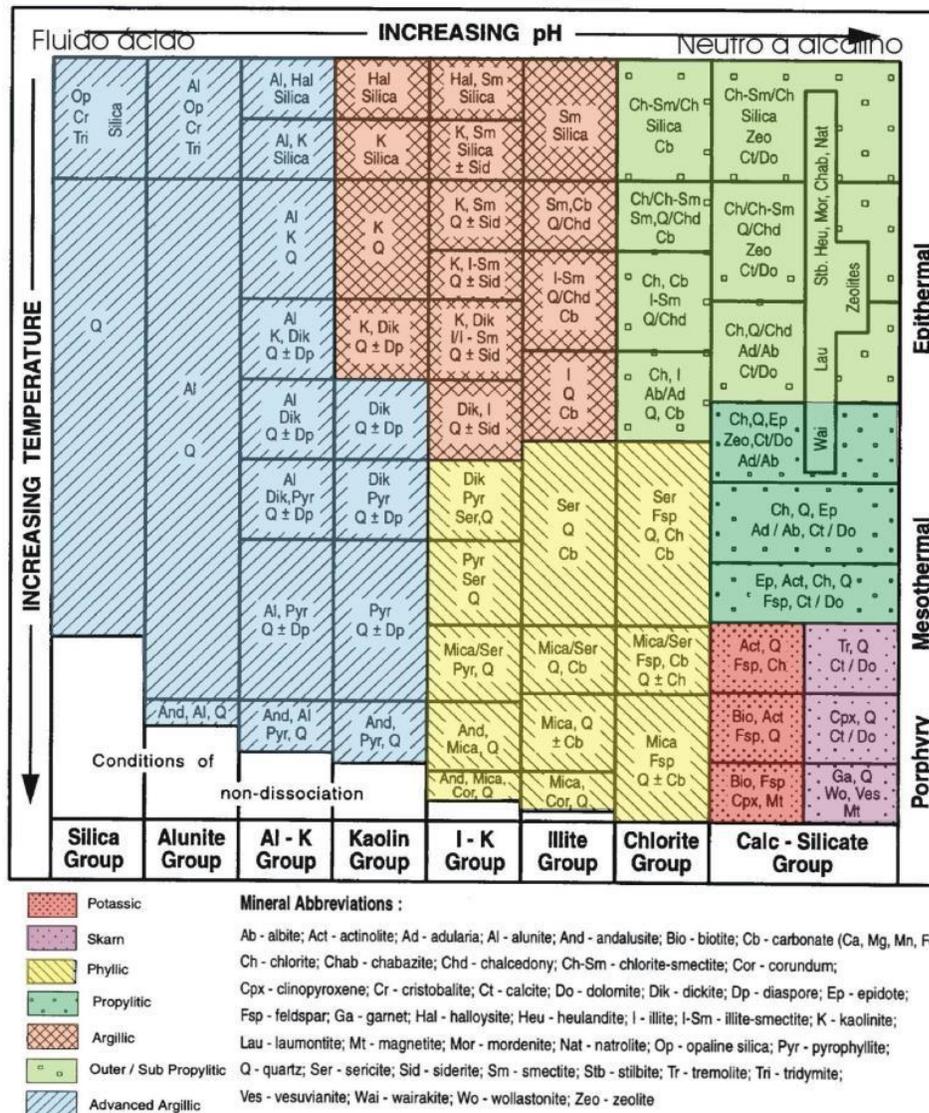


Figura 3.1. Asociaciones de minerales de alteración común en sistemas hidrotermales (Corbett & Leach, 1997).

A continuación, basado en los tipos de alteración hidrotermal clasificados por Meyer & Hemley (1967), se indican las respectivas asociaciones mineralógicas, junto a sus rangos de pH y temperatura, y otras características importantes mencionadas en Corbett & Leach (1997), Reed (1997) y Rose & Burt (1979):

- Alteración potásica: caracterizada principalmente por feldespato potásico y/o biotita, con minerales accesorios como cuarzo, magnetita, sericita, clorita. Esta alteración corresponde a un intercambio catiónico con la adición de K a las rocas, alterando, por ejemplo, a las plagioclasas a feldespato potásico y los minerales máficos a biotita. Ocurre en condiciones de pH neutro o alcalino a altas temperaturas (principalmente en el rango 350°-550°C). La alteración potásica de alta temperatura (400°-800°C) se caracteriza por una alteración selectiva y penetrativa. Biotita en vetillas ocurre principalmente en el rango 350°-400°C, y feldespato potásico en vetillas en el rango 300°-350°C.

- Alteración propilítica: caracterizada principalmente por la asociación clorita-epidota con o sin albita, calcita, actinolita, pirita, con minerales accesorios como cuarzo, magnetita e illita. Esta alteración representa un grado bajo de hidrólisis de los minerales de la roca y ausencia de un apreciable metasomatismo catiónico (metasomatismo de Na-Mg-Ca en esta alteración). La alteración propilítica ocurre por lo general como halo gradacional y distal de una alteración potásica, gradando desde actinolita-biotita a actinolita-epidota, y en zonas más distales se observan asociaciones de epidota-clorita-albita-carbonatos gradando a zonas progresivamente más ricas en clorita y zeolitas hidratadas formadas a bajas condiciones de temperatura (gradiente termal decreciente). Se forma en condiciones de pH neutro a alcalino a rangos de temperatura bajo (200°-250°C), la presencia de actinolita indica un grado de temperatura un poco mayor (280°-300°C).

- Alteración sericítica o cuarzo-sericita (fílica): caracterizada principalmente por cuarzo y sericita (también micas blancas a mayor profundidad), con minerales accesorios como clorita, illita y pirita. Feldespatos, como las plagioclasas y feldespato potásico, se alteran a sericita y cuarzo. Normalmente los minerales máficos también están completamente destruidos en este tipo de alteración. Esta alteración ocurre en un rango de pH 5 a 6 a temperaturas sobre los 250°C. A temperaturas más bajas se da illita (200°-250°C) o illita-esmectita (100°-200°C). A temperaturas sobre los 450°C, corindón aparece en asociación con sericita y andalucita.

- Alteración argílica intermedia/moderada: caracterizada principalmente por arcillas (caolinita, montmorillonita, esmectita o arcillas amorfas) y mayor o menor cuarzo, puede haber sericita acompañando a las arcillas. Arcillas reemplazan principalmente a plagioclasas. Hay una significativa lixiviación de Ca, Na y Mg de las rocas, la alteración argílica intermedia representa un grado más alto de hidrólisis. Ocurre en rango de pH entre 4 y 5, y puede coexistir con la alunita en un rango transicional de pH entre 3 y 4. En cuanto a los rangos de temperatura, la caolinita se forma a temperaturas bajo 300°C, típicamente en el rango <150°-200°C, sobre los 300°C la fase estable es la pirofilita.

- Alteración argílica avanzada: caracterizada principalmente por cuarzo residual (cuarzo oqueroso o “vuggy sílica”) con o sin presencia de alunita, jarosita, caolinita, pirofilita y pirita. Este tipo de alteración representa un ataque hidrolítico extremo de las rocas, en que incluso se rompen los fuertes enlaces del aluminio en los silicatos, pudiendo originar sulfato de Al (alunita) y óxidos de Al (diásporo). El caso más extremo es cuando la roca es transformada a una masa de sílice oqueroso residual tras una fuerte lixiviación. Ocurre dentro de un amplio rango de temperatura, pero a condiciones de pH entre 1 y 3,5. A alta temperatura (sobre 350°C) puede ocurrir con andalucita además de cuarzo. Bajo pH 2 domina el cuarzo, mientras que la alunita ocurre a pH sobre 2.

3.2 Métodos analíticos: ICP-MS e ICP-AES

La base de datos geoquímicos de las vetas Rosa Amelia y Farellón fue generada por análisis ICP-AES (Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectrometry) e ICP-MS (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry), esto para ampliar los límites de detección de los distintos elementos químicos, y como método de digestión se utilizó agua regia para las muestras de sondajes. El agua regia disuelve parcialmente la roca (método de disolución parcial), dado que no es capaz de romper el tetraedro de silicio, el cual constituye la estructura fundamental de los silicatos, a diferencia de otras técnicas de disolución total como la digestión por ácido fluorhídrico o por fusión.

La espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), es una de las técnicas de análisis elemental e isotópico capaz de determinar de forma cuantitativa la mayoría de los elementos de la tabla periódica en una amplia variedad de muestras líquidas y sólidas, pudiendo hacer un análisis multielemental a concentraciones muy bajas (ng/L o ppb-ppt), lo que lo hace ideal para identificar elementos traza, además de poder llevar a cabo la cuantificación de la composición isotópica de la muestra. Se basa en el acoplamiento de un método para generar iones (plasma acoplado inductivamente) y un método para separar y detectar los iones (espectrómetro de masas). La muestra, en forma líquida, es transportada por medio de una bomba peristáltica hasta el sistema nebulizador donde es transformada en aerosol gracias a la acción de gas argón. Dicho aerosol es conducido a la zona de ionización que consiste en un plasma generado al someter un flujo de gas argón a la acción de un campo magnético oscilante inducido por una corriente de alta frecuencia. En el interior del plasma se llegan a alcanzar muy altas temperaturas (de 6000° a 8000° K). En estas condiciones, los átomos presentes en la muestra son ionizados. Los iones pasan al interior del filtro cuadrupolar a través de una interfase de vacío creciente, allí son separados según su relación de masa y carga. Cada una de las masas sintonizadas llegan al detector donde se evalúa su abundancia en la muestra.

La espectrometría de emisión atómica por plasma acoplado inductivamente (ICP-AES), es una técnica para el análisis simultáneo de muchos elementos químicos y en concentraciones tan bajas como 1-10 partes por mil millones (ppb). De igual forma que en el ICP-MS, se utiliza plasma de argón en el que se inyecta la muestra líquida atomizada. Pero, en esta técnica la muestra se ioniza en el plasma y los iones resultantes emiten luz a diferentes longitudes de onda e intensidad, características que posteriormente se miden para determinar el elemento y su cantidad en la muestra. La longitud de onda es característica de la línea espectral atómica y determina la identidad del elemento, mientras que la intensidad de la luz emitida es proporcional a la cantidad de átomos del elemento.

La aplicación de ICP-MS e ICP-AES dependen directamente de la preparación de las muestras previa al análisis. En el caso de muestras de rocas, la disolución de la muestra puede ser selectiva, parcial o total dependiendo del reactivo y/o método de digestión que se utilice (acetato de amonio, agua regia, ácido sulfúrico, digestión de 4 ácidos, digestión por fusión, etc.).

3.3 Disolución por Agua Regia

La información referenciada respecto al método de disolución de minerales utilizando agua regia, y a continuación presentada, fue obtenida y modificada de Cárdenas (2015).

El agua regia consiste en una mezcla de ácido clorhídrico (HCl) y ácido nítrico (HNO₃) en razón 3:1 en volumen. Según procedimientos estándar para la disolución de fases minerales, las muestras son tratadas por un período entre 1 y 3 horas a una temperatura entre 80°C y 95°C (Gill, 1997). Sin embargo, el protocolo de análisis varía para cada laboratorio, siendo en este caso llevado a cabo por el laboratorio ALS, en donde el procedimiento de la digestión con agua regia es reservado, por lo que no es posible detallarlo específicamente.

El método de disolución por agua regia es parcial, ya que no afecta a la mayoría de los silicatos (no es capaz de romper el tetraedro de silicio, el cual constituye la estructura fundamental de los silicatos). Sin embargo, la digestión es cercana a la total para algunos minerales solubles en agua, carbonatos, sulfuros, arsenuros, selenuros, telurios, oxi-hidróxidos de Fe y Mn, sales, y algunas micas, sulfatos (a excepción de la barita) y aluminosilicatos como las arcillas, además de elementos intercambiables (Chao, 1984; Chao & Sanzalone, 1992; Hall & Cameron, 2001; Klassen, 2001; Hall, 1999; Xu et al., 2012). ALS describe la disolución por agua regia como un excelente método de digestión para variados tipos de depósitos que poseen oro, plata y metales bases hospedados en sulfuros, carbonatos y óxidos.

Las estructuras cristalinas que contienen sitios con altos números de coordinación acomodan a los cationes de mayor radio iónico con mayor facilidad. Sin embargo, estos se encuentran débilmente enlazados a la estructura del mineral, por lo que tienden a entrar en solución fácilmente, como es el caso de los elementos traza (Church et al., 1987). Además, el agua regia tiende a disolver metales presentes en los silicatos que se encuentren en coordinación VI o superior (VIII, IX, X y XII), lo que es común en inosilicatos y filosilicatos máficos.

Church et al. (1987) realiza un estudio de disolución por ácido oxálico (H₂C₂O₄, es un ácido dicarboxílico) y agua regia en distintos grupos minerales, donde se comparan los resultados obtenidos con los de digestión total por HF-HNO₃-HClO₄ (ácido fluorhídrico-ácido nítrico-ácido perclórico, respectivamente). Los resultados para la disolución con agua regia muestran que es cercana a la total para el caso de los sulfuros, carbonatos, algunos óxidos de Fe, Mg, Al y Mn, y algunas micas y sulfatos (ver Figura 3.2).

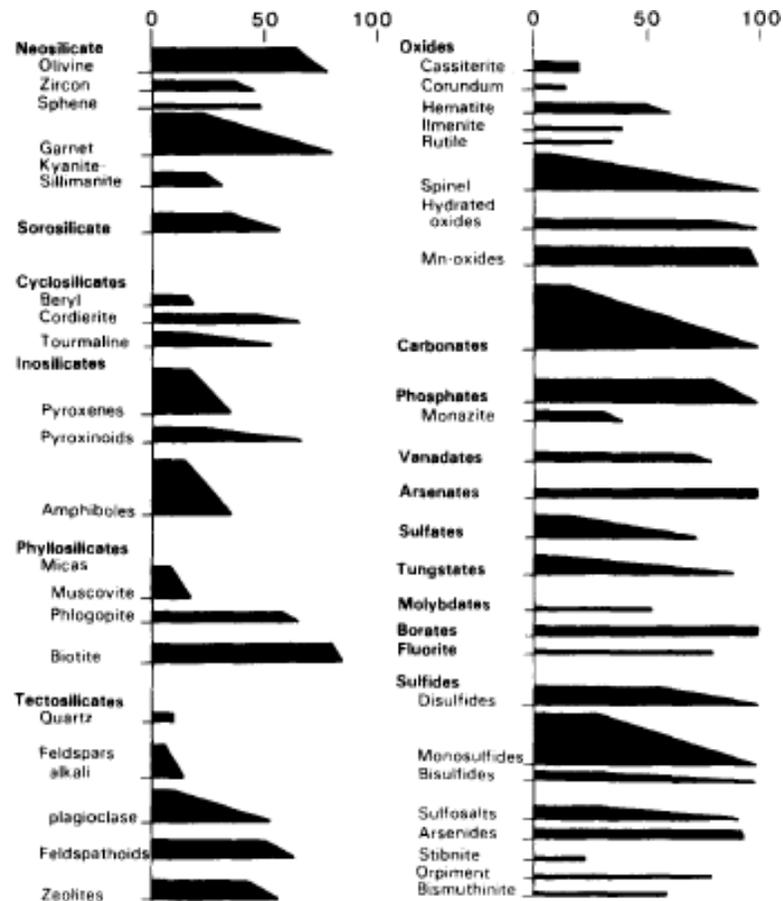


Figura 3.2. Porcentaje de minerales disueltos según el procedimiento consecutivo de ácido oxálico y agua regia. El grosor de la barra representa el número de muestras utilizada para el estudio (Church et al., 1987).

Los feldespatos alcalinos (feldespatos con una composición entre feldespato potásico y albita), corindón, moscovita y cuarzo prácticamente no fueron atacados por el agua regia. Sin embargo, otros minerales como el olivino poseen recuperaciones mayores al 90% para Fe, Mg y elementos traza en posición octaédrica (número de coordinación 6), al contrario del diópsido y hornblenda que presentan porcentajes bajo el 50%. Mientras que los resultados para magnetita y biotita muestran que su disolución es cercana a la total para los siguientes grupos de elementos Fe-Mg-Mn-V-Cu-Zn-Ti-Ba-Ce y K-Fe-Mg-Mn-Al-Ti-Cr-Li-Cu-Zn-Ni-Co-V-Ba-Y-Ce-P-Be, respectivamente (ver Figura 3.3).

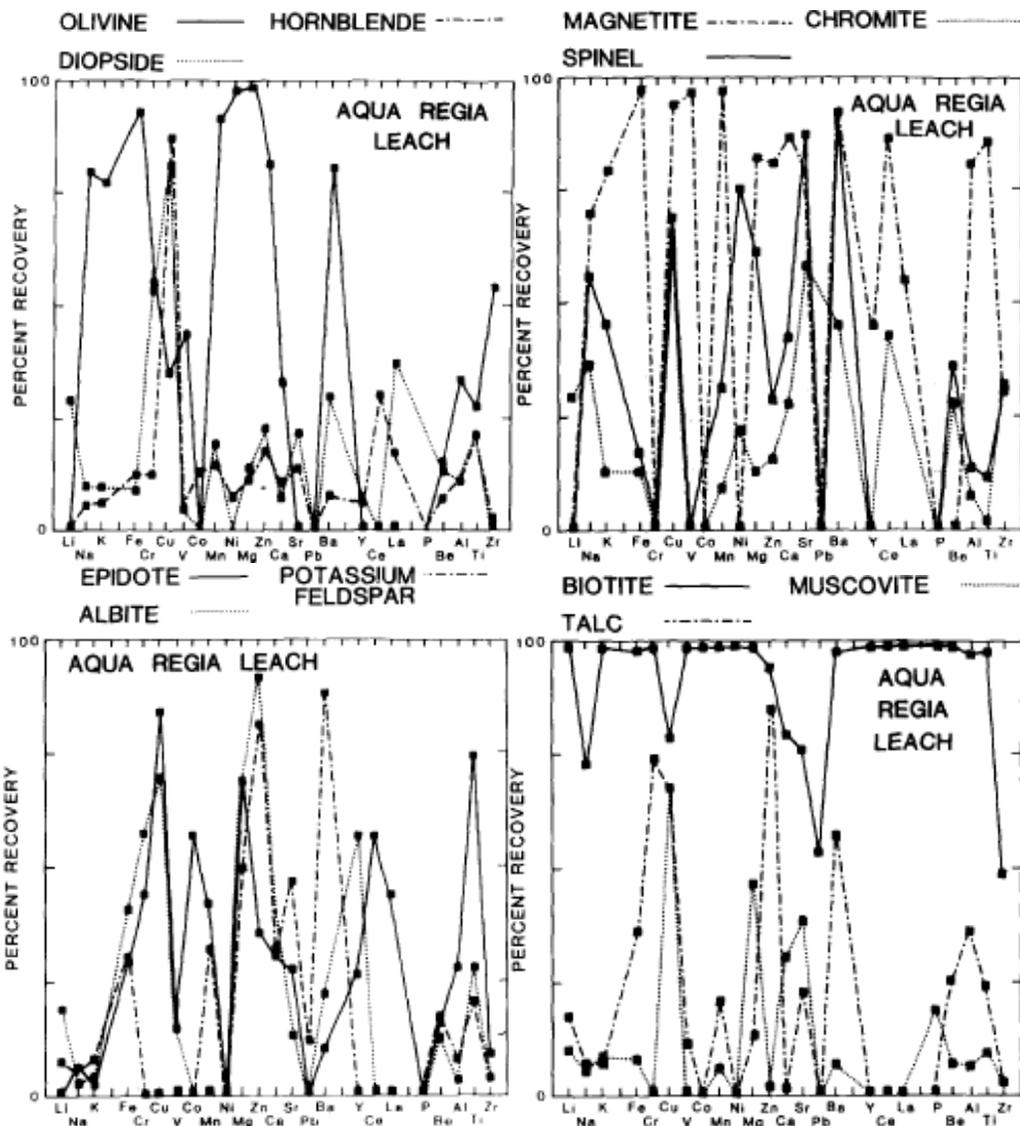


Figura 3.3. Porcentaje de disolución de varios minerales, obtenidos al comparar digestión por agua regia relativa la digestión por HF-HNO₃-HClO₄ (Church et al., 1987).

Snäll & Liljefors (2000) realizaron un estudio similar para elementos mayores presentes en los minerales de depósitos de tills. Se analizaron las solubilidades de los minerales en agua regia y se comparó con la disolución total de la muestra en HF y HNO₃ caliente. Además, se estudió la dependencia de los porcentajes de disolución alcanzados con la granulometría de la muestra, usando tamaños de <2mm, <63 μm y polvo (<10-20 μm), concluyendo que a medida que la fracción analizada es más fina, la recuperación de los elementos aumenta.

A tamaños del orden de micrones (μm), las partículas tienen importantes propiedades de superficie. Estas propiedades tienen consecuencias como un aumento considerable de la solubilidad y un desbalance de la carga superficial, lo que las convierte en potenciales sorbentes (solubles) para especies disueltas. La importancia de las propiedades de superficie aumenta proporcionalmente con el área del material y a su densidad de carga superficial o número de sitios con carga por unidad de superficie. Por ejemplo, las arcillas poseen una alta razón de área/volumen, debido a su tamaño

de orden de micrones, lo que favorece las reacciones con soluciones acuosas. Además, a medida que disminuye el tamaño de las arcillas, la ionización de la superficie aumenta debido al desbalance de cargas ocasionado por la ruptura de enlaces que exponen O^{2-} y OH^- , junto a otras razones de la carga neta negativa como son las sustituciones isomorfas e imperfecciones de la red cristalina. Esta propiedad hace que algunas arcillas reaccionen rápidamente con las soluciones con las que interactúan, haciéndolas solubles en agua regia (Langmuir, 1997).

Las micas y arcillas pertenecientes al grupo de los filosilicatos presentan una estructura cristalina consistente en capas de cationes coordinados con O^{2-} y/u OH^- . Estas capas son tetraédricas y octaédricas. Las tetraédricas consisten en Si^{4+} o Al^{3+} en coordinación tetraédrica con O^{2-} u OH^- . Las octaédricas corresponden a cationes, típicamente a Al, Fe o Mg, en coordinación octaédrica con O^{2-} u OH^- . Entre las capas, pueden encontrarse por cationes adsorbidos o moléculas de agua. Las micas pueden ser clasificadas en función de la proporción de los sitios octaédricos ocupados. Si 2 de cada 3 sitios octaédricos están ocupados se dice que la mica es dioctaédrica, y si se encuentran totalmente ocupados, entonces se denomina trioctaédrica (Langmuir, 1997).

A partir de los resultados obtenidos por Snäll & Liljefors (2000), se concluye que la solubilidad de algunos elementos mayores es cercana a la total en las micas trioctaédricas: biotita y clorita. Estos elementos corresponderían a K, Mg, Fe, Ti y Al para biotita y Mg, Fe y Al para clorita. Cabe destacar la solubilidad de Ca y Ti en titanita, y de Fe y Ti en ilmenita, las cuales son cercanas al 60% en ambos casos. Para todos los demás minerales, feldespatos, epidota, hornblenda y mica blanca, el porcentaje de recuperación de los elementos es inferior al 35% por lo que se consideran prácticamente insolubles en agua regia (ver Figura 3.4). Los errores en sus resultados varían entre un 10% y un 15% debido a variaciones composicionales de las muestras analizadas. Se recalca la diferencia entre los porcentajes de recuperación entre moscovita, biotita y clorita, ya que a pesar de que los tres son filosilicatos, difieren en su estructura (biotita y clorita son trioctaédricas y la moscovita es dioctaédrica), lo que afecta la capacidad de disolución del agua regia.

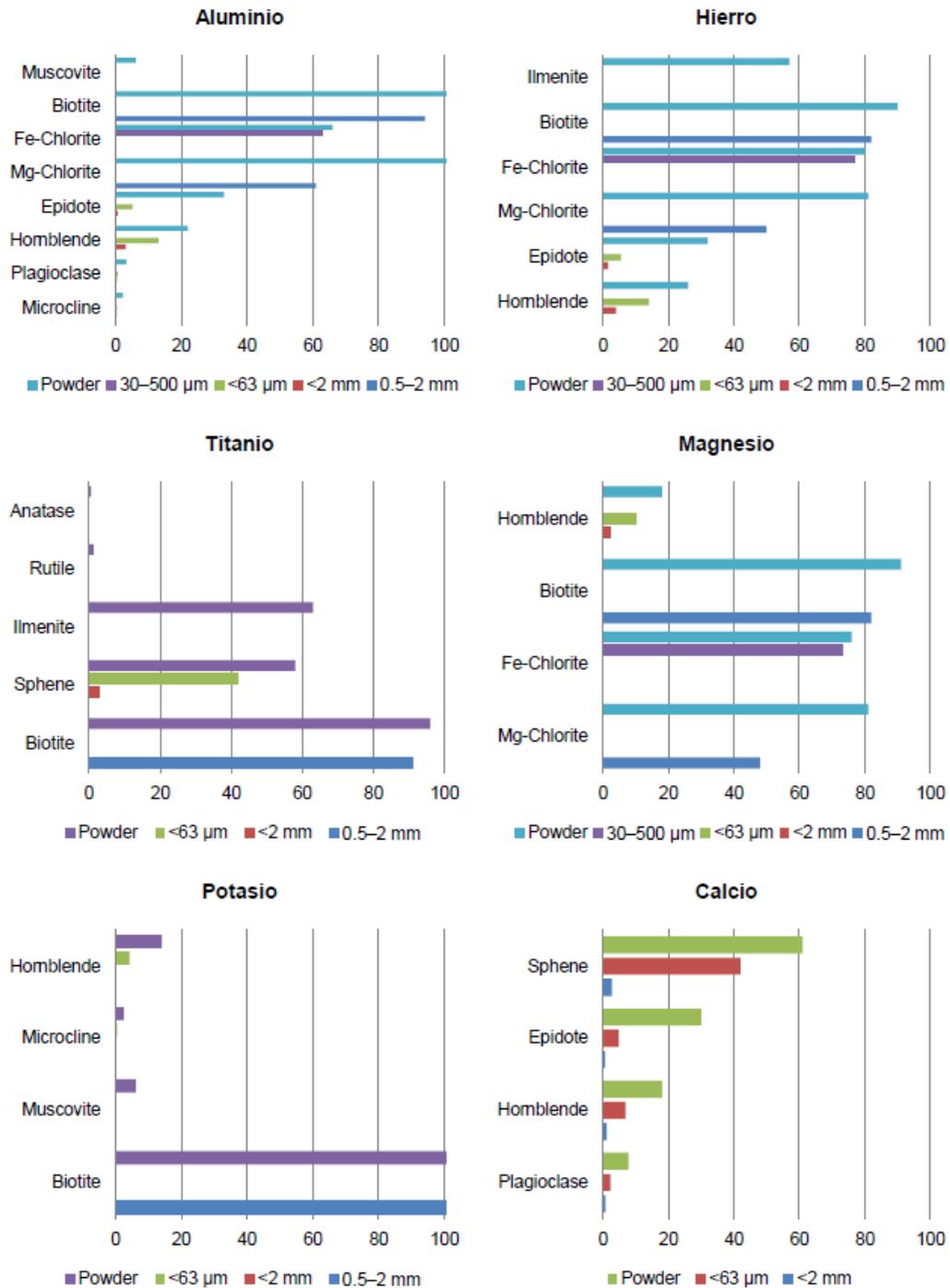


Figura 3.4. Porcentaje de recuperación de elementos mayores por mineral y granulometría de la muestra (Snäll & Liljefors, 2000). Figura elaborada por Cárdenas (2015).

Estudios de disolución en agua regia más recientes, realizados en lutitas, indican que disuelve casi la totalidad de Mg y Fe, mientras que solo una fracción muy baja de Al y K, debido a que se encuentran en fases con poca solubilidad como arcillas, micas y feldespatos. Además, concluye que las fases residuales no disueltas por agua regia corresponden principalmente a silicatos, entre otros minerales (Xu et al., 2012).

4 ANÁLISIS DE DATOS

4.1 Mineralogía de cortes transparentes y pulidos de sondajes

Se realizaron distintos cortes transparentes y pulidos con el servicio prestado por MCGEOSCIENCIAS. El equipo de Baltum envió muestras de sondajes, superficie e interior mina de las distintas zonas de exploración, abarcando muestras de unidades intrusivas, metamórficas y de vetas. Las muestras analizadas que fueron consideradas corresponden a las hechas en testigos de sondajes seleccionados para este trabajo, estando disponibles 9 tramos con estudios de petrografía y calcografía (ver Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Tramos de sondajes con estudios de petrografía y calcografía.

Muestra	Clasificación petrográfica	Sondaje	From [m]	To [m]
455308	Veta de turmalinita	DDH-06	237.80	237.90
455309	Veta de cuarzo	DDH-03	69.95	70.00
455310	Veta de cuarzo	DDH-02	93.20	93.35
455311	Diorita porfídica	DDH-02	209.00	209.10
455312	Diorita de anfíbola	DDH-02	221.00	221.10
455313	Esquisto psamopelítico	DDH-01	63.10	63.20
455314	Andesita porfídica	DDH-01	55.35	55.45
455315	Esquisto psamopelítico	DDH-02	298.40	298.60
455316	Metapsamopelita	DDH-02	320.80	320.90

Las 9 muestras mencionadas describen en detalle la mineralogía constituyente de las distintas unidades litológicas reconocidas en sondajes y terreno (brechas/vetas hidrotermales, diorita, pórfido andesítico, rocas metamórficas). En el Anexo A se encuentran tablas resumen con la información más importante a destacar (mineralogía, alteración y mineralización) por cada una de las muestras, considerando la petrografía y calcografía de estas.

Se realiza una observación y descripción de las similitudes y diferencias observadas en cuanto a la mineralogía de alteración de las muestras, que es el foco de este estudio, pero éstas serán agrupadas por su clasificación petrográfica y su símil de las unidades litológicas, es decir, un análisis de la mineralogía de alteración y de mena de las 3 muestras de rocas metamórficas (455313, 455315, 455316), de las 2 muestras correspondientes a diorita (455311, 455312), de la única muestra de roca andesítica (455314) y, por último, de las 3 muestras de vetas mineralizadas (455308, 455309, 455310).

Por lo observado en los cortes de las rocas metamórficas se reconocen como posibles minerales de alteración a la sericita, clorita (clorita-esmectita) y biotita, no descartando que los cristales de alguno de estos minerales sean de origen metamórfico y no por alteración hidrotermal o proceso

posterior. La unidad litológica presenta la mineralogía de alteración más compleja a estudiar, no por el reconocimiento de los minerales, sino por determinar su génesis. En las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se exhiben fotografías de los cortes transparentes de las muestras 455313, 455315 y 455316, respectivamente

La sericita se puede presentar como: microcristales orientados en matriz granoblástica y granolepidoblástica, probablemente formados durante fases de metamorfismo y deformación (muestras 455313, 455316); alterando a microcristales de mica blanca orientados, formados en las fases de metamorfismo y deformación, en matriz granoblástica y granolepidoblástica (muestra 455315); microcristales en lentes de cuarzo-sericita entre planos de foliación (muestra 455316); microcristales relleno sectores de microvetillas post deformacionales de Bt-Chl-Ser y en algunos casos como halo de microvetillas de cuarzo (muestra 455316). La clorita se puede presentar como: agregados microcristalinos orientados de Chl-Sme, que se encuentran diseminados de manera heterogénea en matriz granoblástica de cuarzo (muestra 455313); cristales relleno sectores de microvetillas post deformacionales de Bt-Chl-Ser (muestra 455316). La biotita se puede presentar como: cristales (oxidados) de biotita secundaria fina junto a minerales opacos finos en el clivaje de crenulación (muestras 455313, 455315, 455316); cristales oxidados masivos que son halo de microvetillas de minerales opacos (a favor de la foliación principal de la roca) y de microvetillas post deformacionales de cuarzo (muestra 455313); cristales de biotita secundaria con habito hojoso relleno microvetillas o en sectores aislados entre la foliación principal (muestras 455315, 455316).

En las muestras de roca metamórfica también se presentan microvetillas sin participación de los minerales antes nombrados. Microvetillas de cuarzo (sin halo de alteración) post deformacionales, es decir, cortan la foliación (muestra 455313) y vetillas de cuarzo suturado que son cortadas por la foliación de la roca metamórfica (muestra 455316). Microvetillas post deformacionales de carbonato (calcita), cortan tanto la foliación como a microvetillas de cuarzo (muestra 455316).

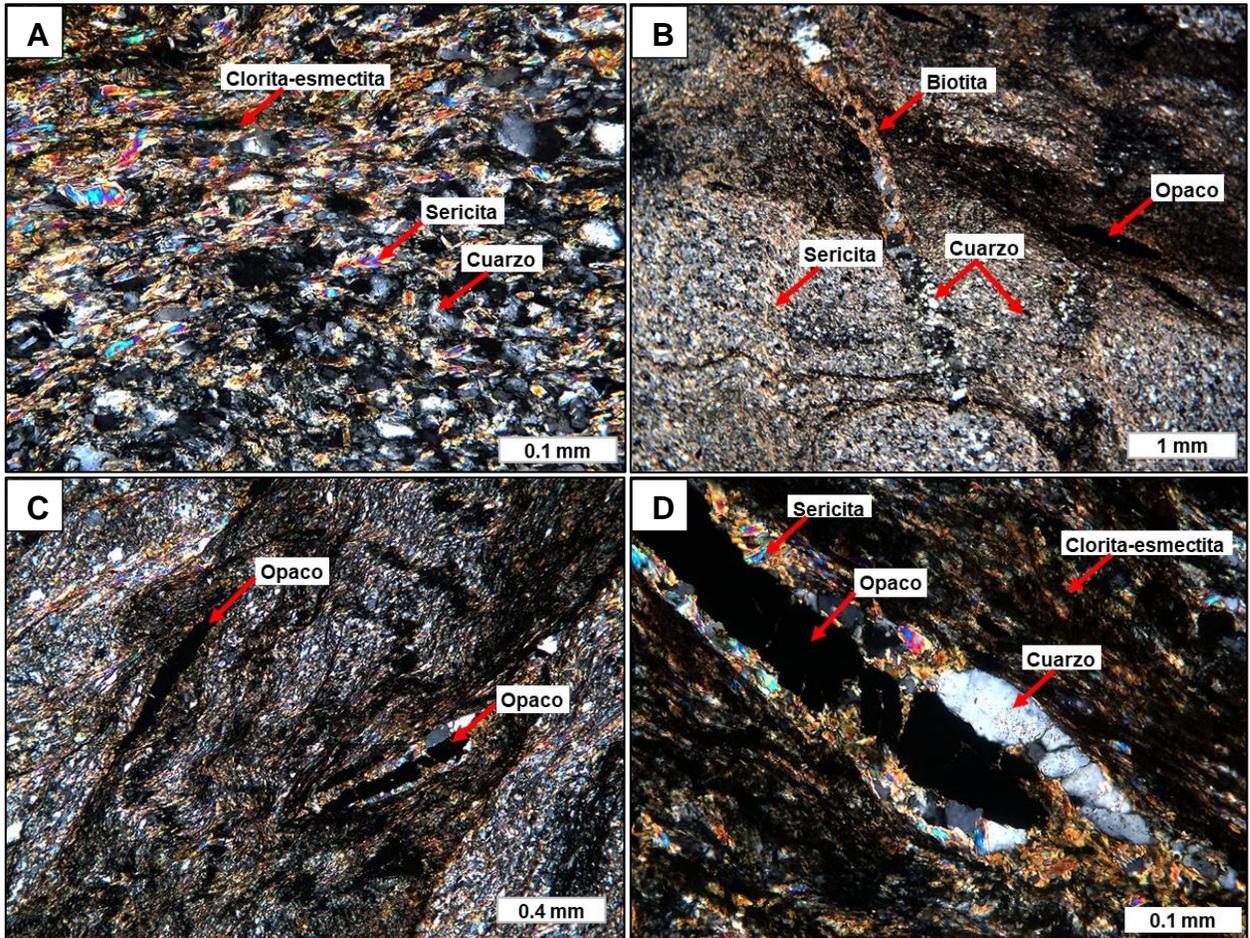


Figura 4.1. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455313 (esquisto psamopelítico). A: Matriz granoblástica de cuarzo fino y microcristales orientados de sericita y clorita-esmectita (20X/NC). B: Microvetilla de cuarzo con halo de biotita oxidada, cortando bandas de minerales opacos con cuerpos lenticulares de ilmenita (2X/NC). C: Bandas de minerales opacos lenticulares, en matriz granoblástica de cuarzo fino y microcristales orientados de sericita y clorita-esmectita (5X/NC). D: Detalle de fotografía anterior, mostrando opacos lenticulares (ilmenita) bordeada por agregado de cuarzo anhedral y microcristales de sericita bien desarrollada (20X/NC).

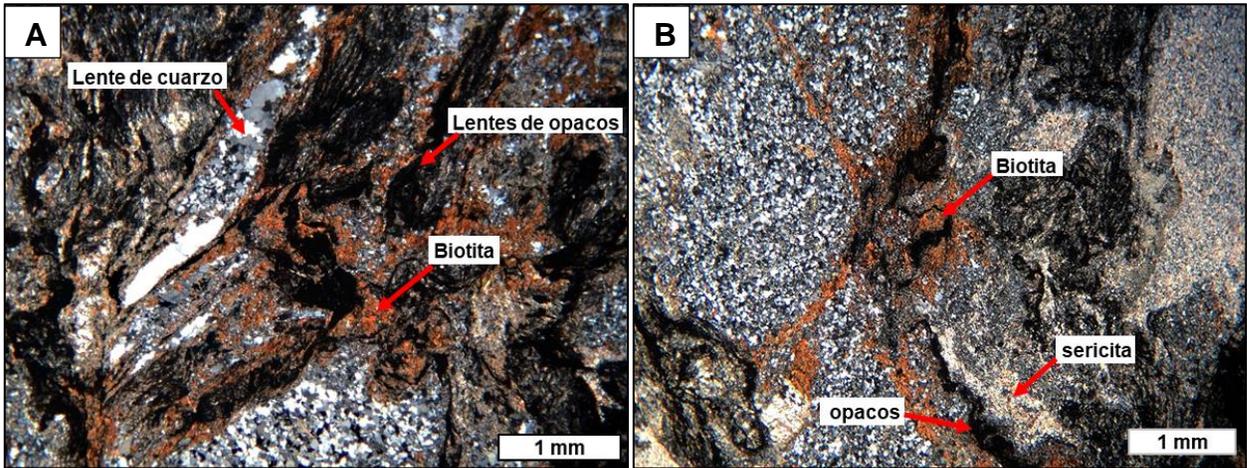


Figura 4.2. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455315 (esquisto psamopelítico). A: Aspecto general del corte en donde se observa el clivaje de crenulación constituido por lentes de minerales opacos y granos de cuarzo junto a biotita secundaria diseminada (2X/NC). B: Detalle de estructuras vetiformes compuestas por biotita secundaria (2X/NC).

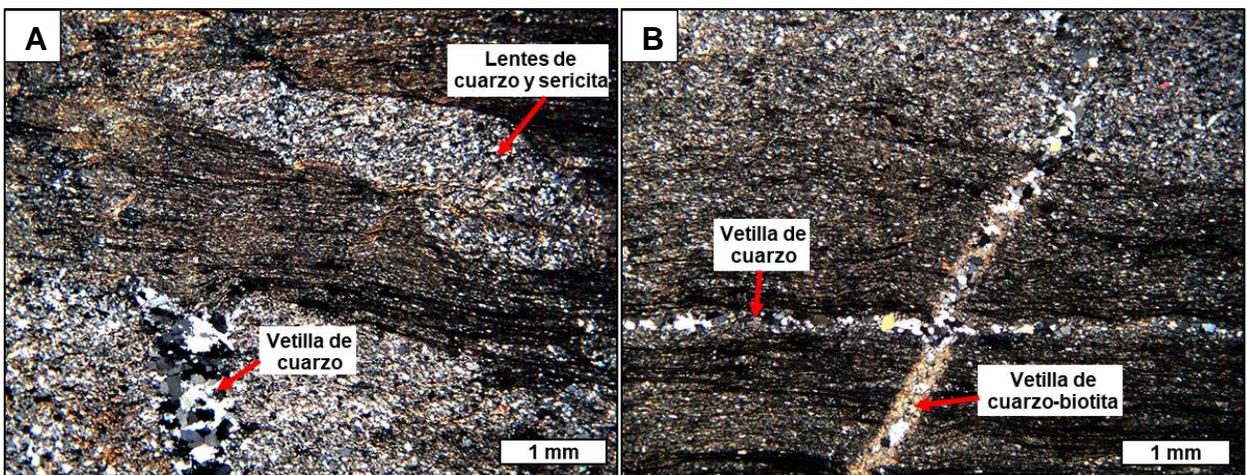


Figura 4.3. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455316 (metapsamopelita). A: Lente de cuarzo y sericita entre planos de foliación subhorizontal (clivaje de crenulación); presencia de vetilla sinuosa de cuarzo con bordes suturados, cortada por planos de foliación (2X/NC). B: Matriz granolepidoblástica con microcristales de sericita, biotita e inclusiones de minerales opacos; relación de corte entre microvetillas de cuarzo con y sin biotita, esta última a favor del plano de foliación (2X/NC).

En los cortes de las rocas intrusivas dioríticas se reconocen como minerales de alteración a la actinolita (actinolita-tremolita), epidota, clorita, albita, sericita (o arcillas), carbonato (calcita), biotita. En las Figuras 4.4 y 4.5 se exhiben fotografías de los cortes transparentes de las muestras 455311 y 455312, respectivamente

La actinolita se puede presentar como: cristales aciculares y fibrosos alterando parcial o totalmente a cristales de anfíbola (muestras 455311, 455312); relleno en vetillas de Carb-Ep-Act, con bordes

de epidota-actinolita y parte central de carbonato (muestra 455311). La epidota se puede presentar como: cristales o agregados cristalinos que reemplazan a anfíbolos y plagioclasas (muestras 455311, 455312); relleno en vetillas de Carb-Ep-Act (muestra 455311). La clorita se puede presentar como cristales en abanico alterando a anfíbola y en algunos cristales de plagioclasa (muestra 455311). La albita se puede presentar como alteración a cristales primarios de plagioclasa, donde posteriormente pudieron ser parcialmente sericitizados o argilizados (muestras 455311, 455312). La sericita y arcillas se pueden presentar como microcristales alterando a plagioclasas (muestras 455311, 455312). La calcita o carbonato se pueden presentar como: relleno de vetillas, solo de carbonato, o con epidota y actinolita en los bordes, o con cuarzo (muestras 455311, 455312); reemplazo en algunos cristales de anfíbola y de plagioclasa (muestra 455312). La biotita se puede presentar como: microcristales relictos en agregados de clorita que están reemplazando a anfíbolos, biotita que posiblemente corresponda a una fase temprana de reemplazo a anfíbola o que sean inclusiones que no fueron alteradas por clorita posteriormente (muestras 455311, 455312). También se observa una microvetilla de cuarzo granular que presenta bifurcaciones en los bordes y es paralela a la vetilla zonada de Carb-Ep-Act (muestra 455311).

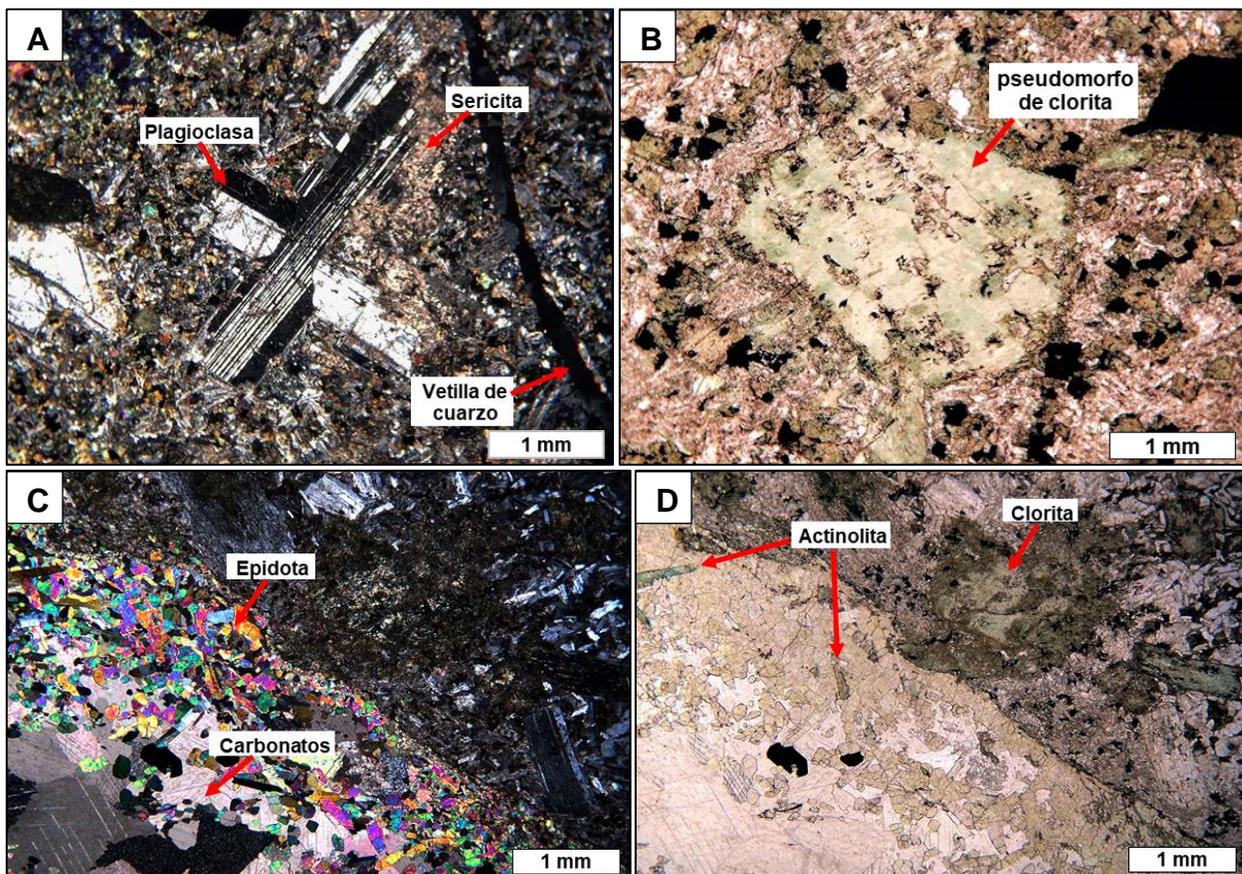


Figura 4.4. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455311 (diorita porfídica). A: Aspecto general del corte, en donde se observan fenocristales de plagioclasa inmersos en una masa fundamental, presencia de sericita reemplazando fenocristales de plagioclasa y diseminada en masa fundamental, microvetilla de cuarzo localizada en el costado derecho (2X, NC). B: Detalle de pseudomorfos de clorita (2X, NP). C: Contacto de vetilla rellena de borde a centro por: epidota, diseminados de actinolita y opacos; carbonatos (2X, NC). D: Fotografía anterior a nicules paralelos, se aprecian minerales ferromagnesianos reemplazados por clorita (2X, NP).

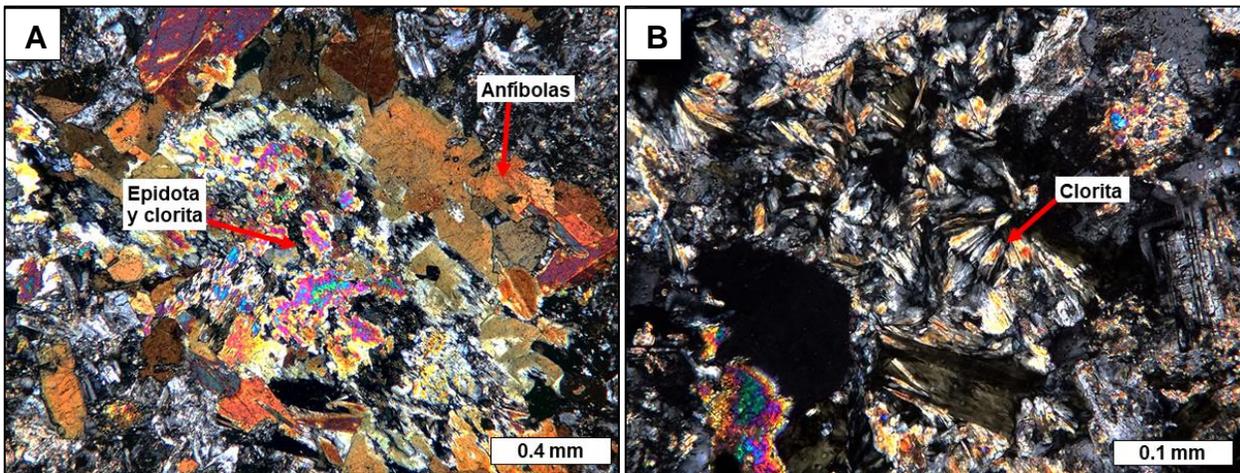


Figura 4.5. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455312 (diorita de anfíbola). A: Detalle de agregados de epidota y clorita junto a glomerocristales de anfíbola (5X/NC). B: Detalle de agregados de clorita aciculares en abanico junto a minerales opacos (20X/NC).

En los cortes de la muestra de andesita se reconocen como minerales de alteración a la actinolita, clorita, esmectita (clorita-esmectita), sericita y cuarzo. En la Figura 4.6 se exhiben fotografías de los cortes transparentes de la muestra 455314.

La actinolita se puede presentar como: cristales prismáticos reemplazando a fenocristales de silicatos ferromagnesianos (piroxeno y hornblenda) y a algunos piroxenos de la masa fundamental; cristales aciculares al interior de relictos de piroxeno y en algunas amígdalas como microlitos aciculares incluidos dentro de cuarzo granular. La clorita se puede presentar como: cristales en abanico reemplazando fenocristales de plagioclasa; agregados cristalinos en la masa fundamental reemplazando a plagioclasa y piroxeno. La esmectita se presenta frecuentemente intercrecida con clorita, alterando a fenocristales de plagioclasa y a cristales de la masa fundamental (piroxeno y plagioclasa). La sericita se presenta como agregados finos diseminados alterando a algunos fenocristales de plagioclasa y de minerales ferromagnesianos. El cuarzo se presenta como agregados granulares gruesos relleno amígdalas (en los bordes o totalmente) y reemplazando a algunos piroxenos, junto con actinolita.

En la muestra de roca andesítica también se observa la presencia de turmalina en una microvetilla sinuosa y en amígdala. La microvetilla se compone de agregados microgranulares de cuarzo al centro, por minerales opacos masivos y una franja fina de cristales de turmalina en el borde. La amígdala esta rellena de turmalina acicular radial, cuarzo granular y actinolita acicular, esta última dentro del cuarzo.

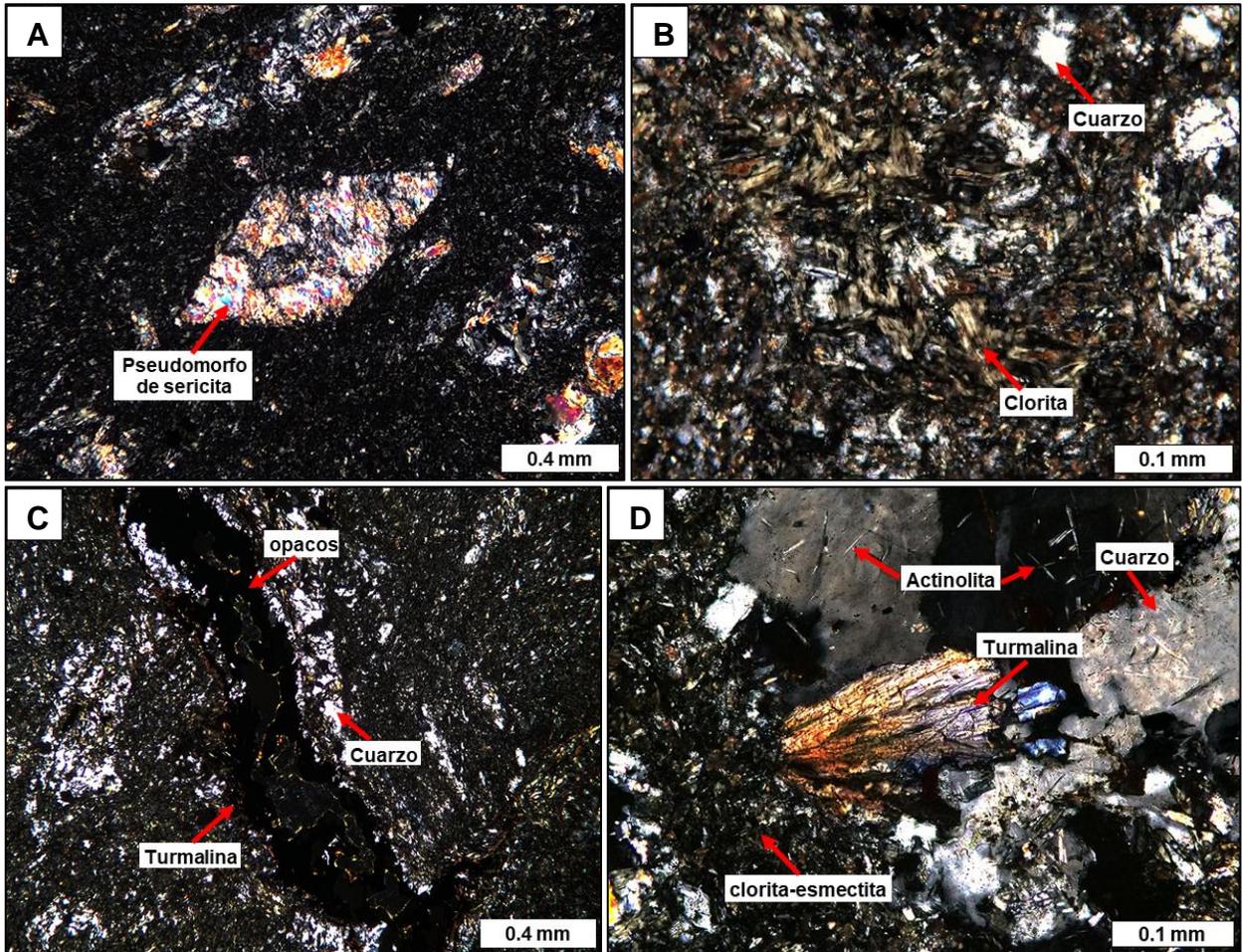


Figura 4.6. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455314 (andesita porfídica). A: Pseudomorfo de sericita con hábito rombohédrico (5X/NC). B: Detalle de agregados en abanico de clorita en la masa fundamental, junto a agregados finos de cuarzo anhedral. (20X/NC). C: Microvetilla de bordes sinuosos, rellena de turmalina, minerales opacos masivos y cuarzo granular fino (5X/NC). D: Amígdala con cristal acicular radial de turmalina, cuarzo granular y actinolita acicular con orientación aleatoria incluida dentro del cuarzo (20X/NC).

En cuanto a lo observado en los cortes de las muestras de vetas mineralizadas, se reconocen como minerales de alteración al cuarzo, turmalina, clorita (clorita-esmectita), sericita y carbonato (calcita). Esta asociación corresponde a los minerales que componen las vetas analizadas (estando no necesariamente todos los minerales presentes en la mismo tramo o veta), que tendrían un origen por procesos metasomáticos. En las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se exhiben fotografías de los cortes transparentes de las muestras 455308, 455309 y 455310, respectivamente.

El cuarzo se puede presentar como: cristales granulares, algunos con bordes suturados (455308); microvetillas de cuarzo masivo sin halo de reacción (455308); agregado granoblástico, algunos cristales con bordes suturados (455309); agregado granular muy grueso y elongado, también se presenta como agregado granular más fino relleno de espacios entre los cristales más grandes (455310); microvetillas de cuarzo granular fino y relleno de intersticios entre cristales de turmalina en microvetillas de Tur-Qz (455310); agregado microcristalino de cuarzo-clorita-sericita que

compone el halo de microvetillas de turmalina (455308). La turmalina se puede presentar como: cristales prismáticos, muchos de los cuales presentan zonación en el centro de la variedad dravita o elbaita (ricas en Mg o Li) y en los bordes schorlita (rica en Fe), además de que los cristales pueden estar impregnados parcialmente por oxi-hidróxidos de Fe (455308, 455310); agregado masivo cristalino en zonas de mayor concentración, pudiendo formar franjas de cristales a favor del bandeamiento de la veta (455308); microvetillas de cristales prismáticos, con halo de agregado microcristalino de Qz-Ser-Chl (455308); agregados prismáticos relleno microvetillas, junto a cuarzo granular fino en los intersticios, turmalina parcialmente alterada a oxi-hidróxidos de Fe (455310). La clorita se puede presentar como: cristales diseminados, agregado microcristalino masivo o agregado laminar en algunos sectores entre cristales de cuarzo y en la veta de turmalininita, generalmente junto a sericita (455308, 455309); agregado microcristalino de cuarzo-clorita-sericita que compone el halo de microvetillas de turmalina (455308); agregado microcristalino masivo relleno microvetillas (clorita-esmectita), junto a minerales opacos y carbonato masivo (455310). La sericita se puede presentar como: agregado microcristalino de cuarzo-clorita-sericita que compone el halo de microvetillas de turmalina (455308); agregado microcristalino o diseminada en algunos sectores de las vetas, generalmente junto a clorita (455308, 455309). La calcita o carbonato en general, se presenta como agregado masivo relleno microvetillas, las que pueden ser solo de carbonato o junto a minerales opacos y clorita microcristalina (455309, 455310).

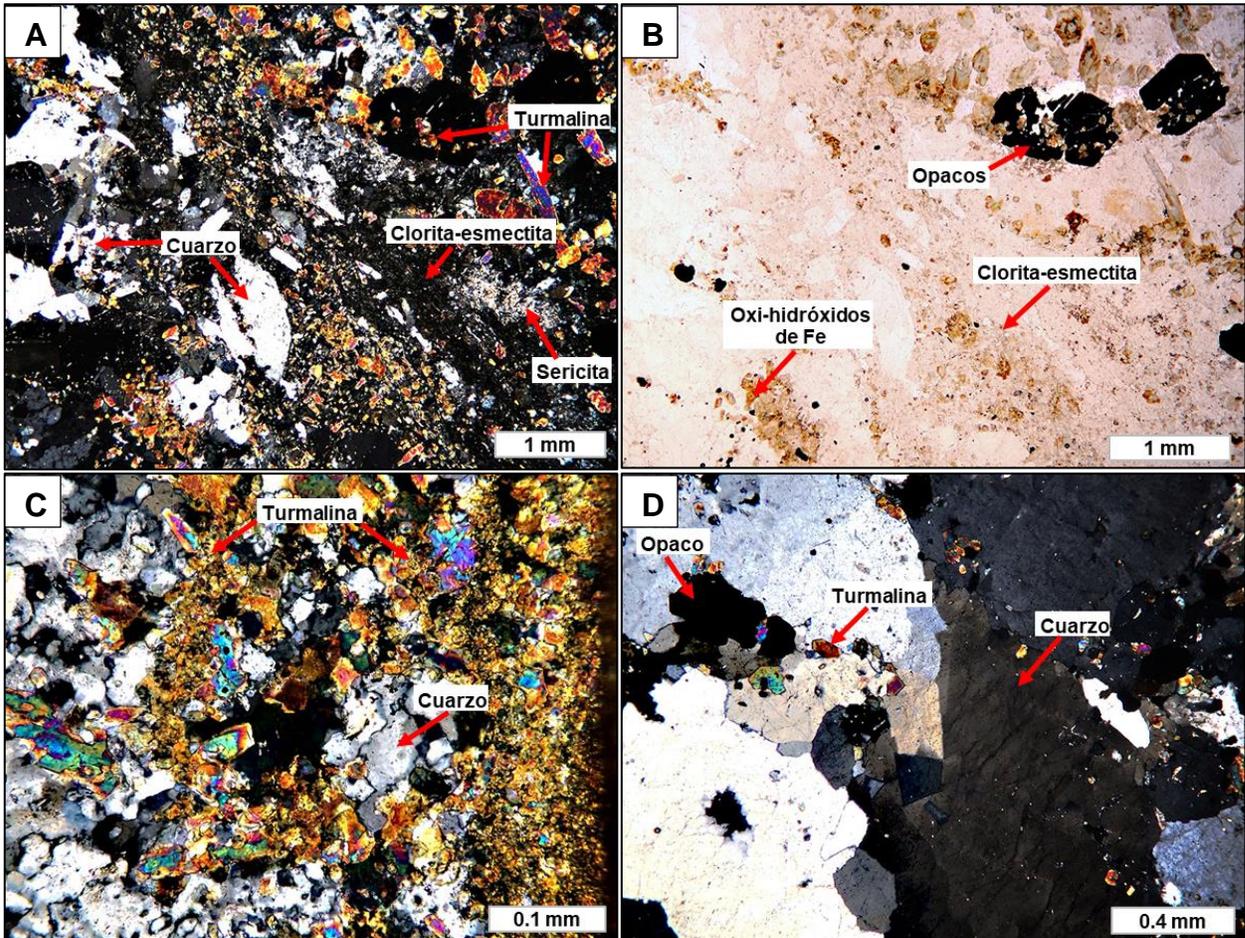


Figura 4.7. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455308 (veta de turmalinita). A: Detalle de opacos euhedrales y subhedrales con algunos cristales anhedrales diseminados. Cristales de opacos de mayor tamaño, presentan inclusiones de turmalina, las que también se encuentran distribuidas en el resto de la muestra, siendo rodeada por cuarzo, sericita y clorita-esmectita intersticial. Las turmalinas se encuentran zonadas y parcialmente impregnadas por oxi-hidróxidos de Fe (2X/NC). B: Fotomicrografía anterior a nicoles paralelos, se aprecian cristales de turmalina con oxi-hidróxidos de Fe (2X/NP). C: Dominio de cuarzo anhedral fino y turmalina. El cuarzo presenta textura granoblástica y contactos suturados, y se encuentra bordeando turmalina. La turmalina corresponde a los cristales amarillos prismáticos, aunque en sectores ocurre como un agregado masivo (20X/NC). D: dominio de cuarzo anhedral grueso y turmalina. El cuarzo presenta textura granoblástica y contactos poligonales a suturados, y se encuentra bordeando turmalina. La turmalina corresponde a los cristales prismáticos de menor tamaño (5X/NC).

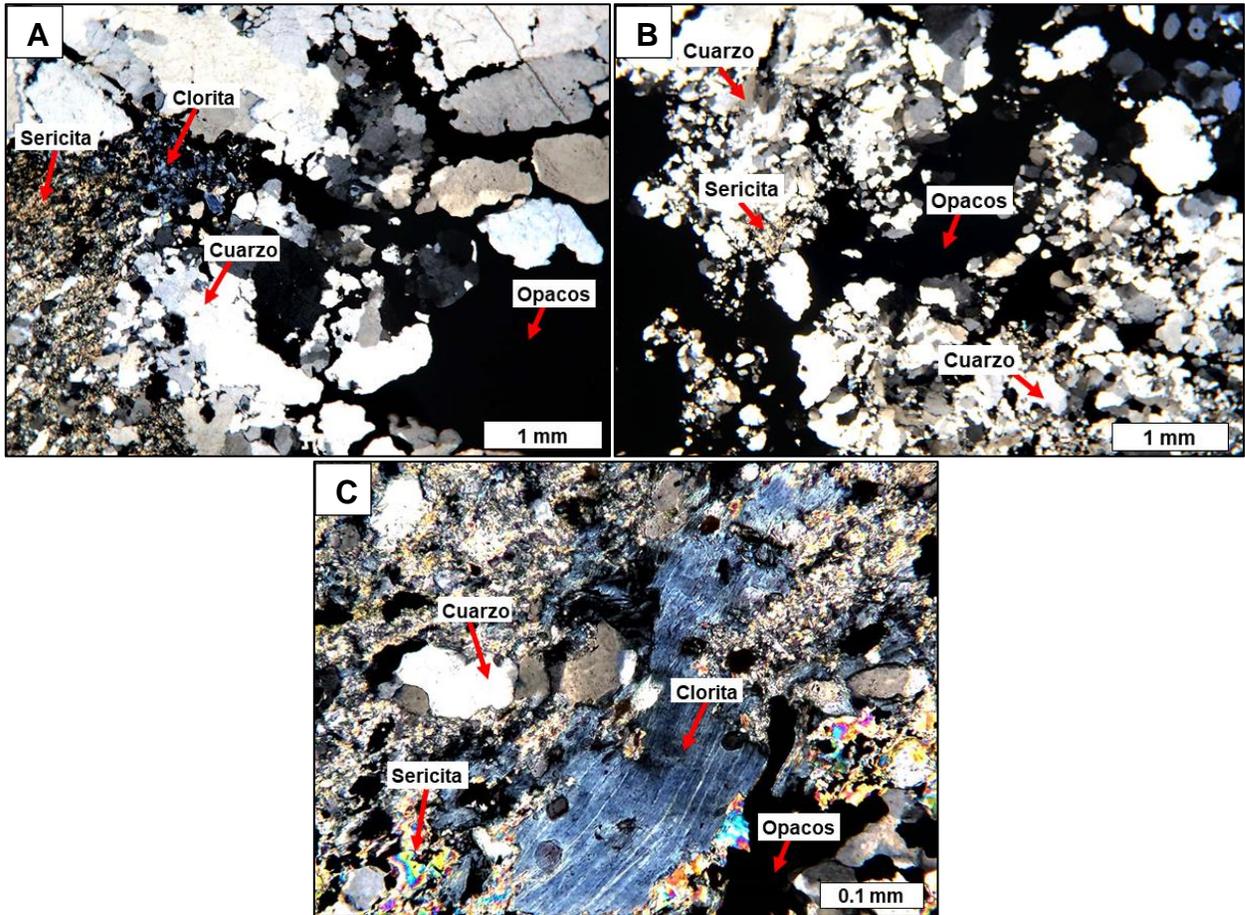


Figura 4.8. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455309 (veta de cuarzo). A: Aspecto general de la muestra, en donde se observan cristales granoblásticos de cuarzo con bordes suturados, junto a mineralización de opacos rellenando intersticios. En sectores se encuentran trazas de clorita diseminada junto a sericita (2X, NC). B: Cristales granoblásticos de cuarzo con bordes suturados. Minerales opacos se encuentran entre los intersticios (2X, NC). C: Detalle de bandas fibrosas de clorita levemente pleocroica junto a sericita diseminada (20X, NC).

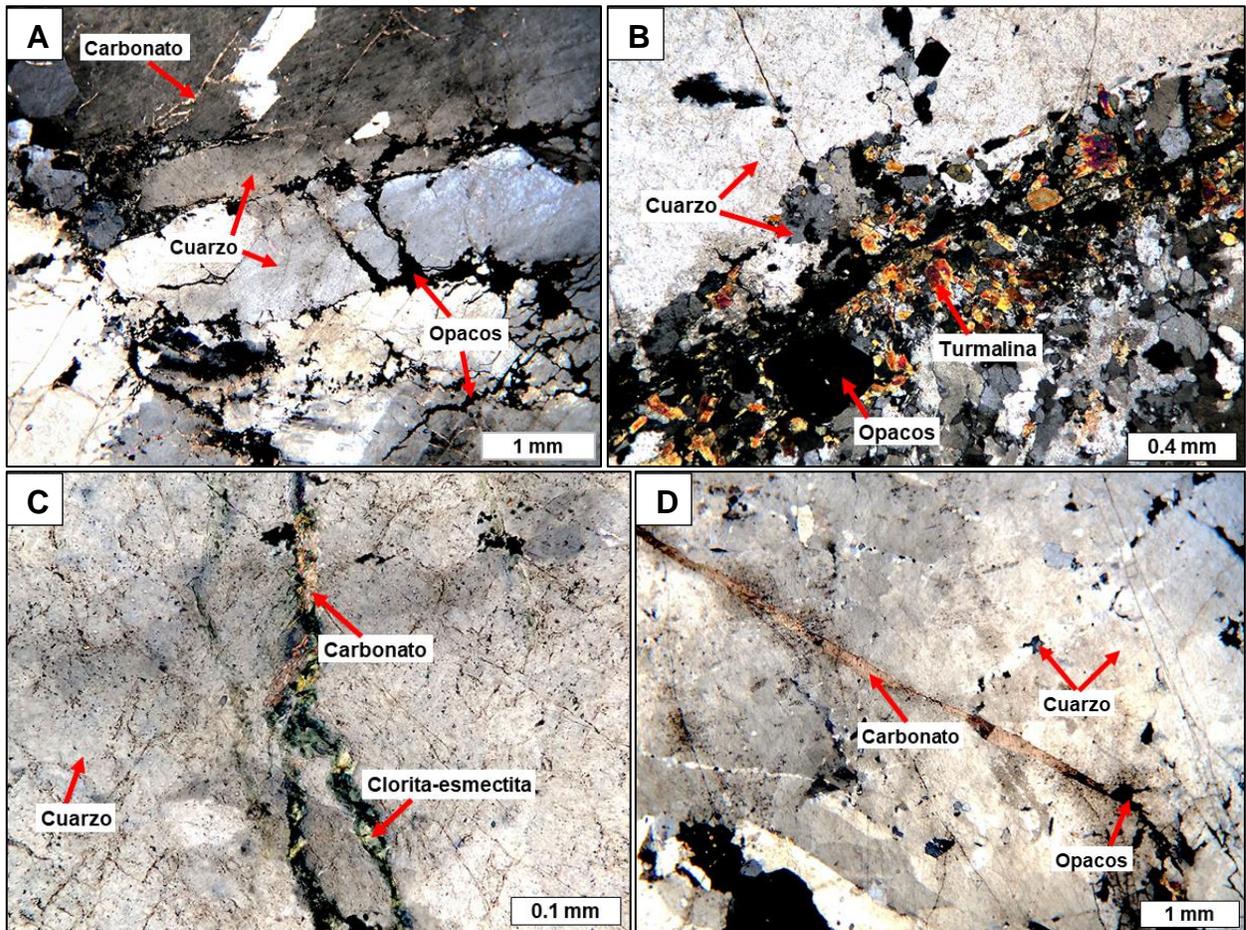


Figura 4.9. Fotografías de cortes transparentes de la muestra 455310 (veta de cuarzo). A: Aspecto general de la roca, en donde se observan cuarzo granular muy grueso y brechizado por microvetillas de minerales opacos. También se distinguen algunas microvetillas de carbonatos, entre los cristales de cuarzo (2X, NC). B: Cuarzo granular muy grueso cortado por microvetillas de turmalina y minerales opacos. También se distingue agregado fino de cuarzo suturado en la esquina inferior derecha (5X, NC). C: Cuarzo granular muy grueso cortado por microvetilla bifurcada de carbonato, clorita-esmectita y minerales opacos. Se aprecian inclusiones de microcristales de minerales opacos diseminados en cuarzo (20X, NC). D: Vetilla de cuarzo fino cortada por microvetilla de carbonato y minerales opacos. También se distingue agregado fino de cuarzo relleno de espacios en el cuarzo de mayor tamaño (2X, NC).

La ocurrencia de minerales opacos en los cortes de las muestras de veta mineralizada se da en forma de agregados cristalinos masivos relleno de vetillas y microvetillas, también como cristales pequeños subhedrales a anhedrales diseminados en la veta y relleno de intersticios (por ejemplo, espacios entre cristales de cuarzo). Los minerales opacos que se reconocen mediante la calcografía de las muestras de vetas son: pirita, cristales euhedrales a subhedrales con leve anisotropía que puede deberse a concentraciones variables de Co y/o As, algunos cristales presentan similitudes ópticas con el mineral de hierro-cobalto glaucodot (Co,Fe)AsS (ver Figura 4.10 y Figura 4.12); pirrotina, cristales anhedrales y se puede encontrar intercrecida con calcopirita (ver Figura 4.11); calcopirita, cristales anhedrales, se puede presentar sola o en bordes de cristales de pirrotina y pirita, y en fracturas de pirita euhedral (ver Figura 4.11 y Figura 4.12); rutilo, cristales anhedrales con bordes fibrosos (ver Figura 4.10).

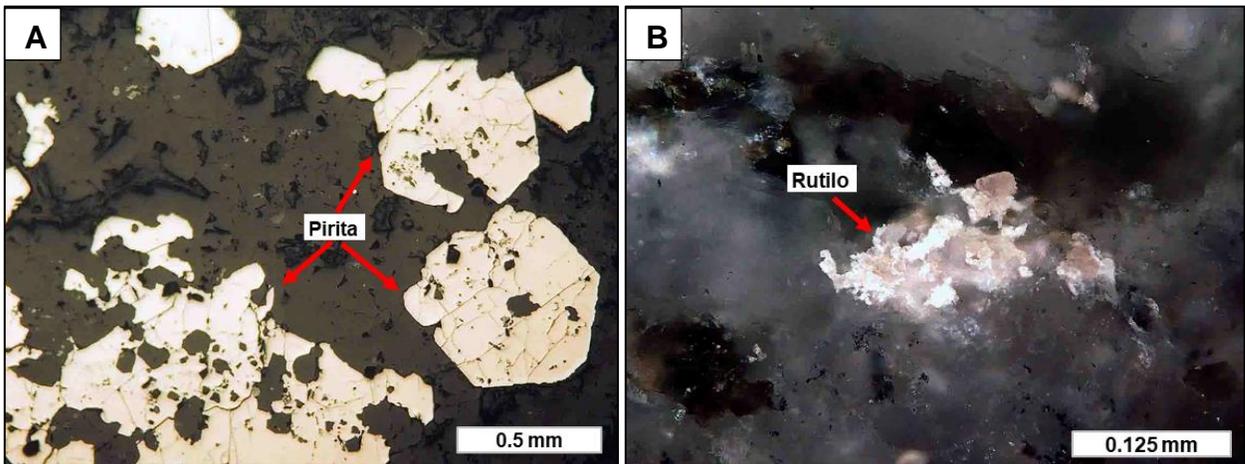


Figura 4.10. Fotografías de cortes pulidos de la muestra 455308 (veta de turmalinita). A: Agregado de cristales de pirita euhedral y subhedral inmersos en veta de silicatos (5X/NP). B: Cristales de rutilo anhedral diseminados (20X/NC).

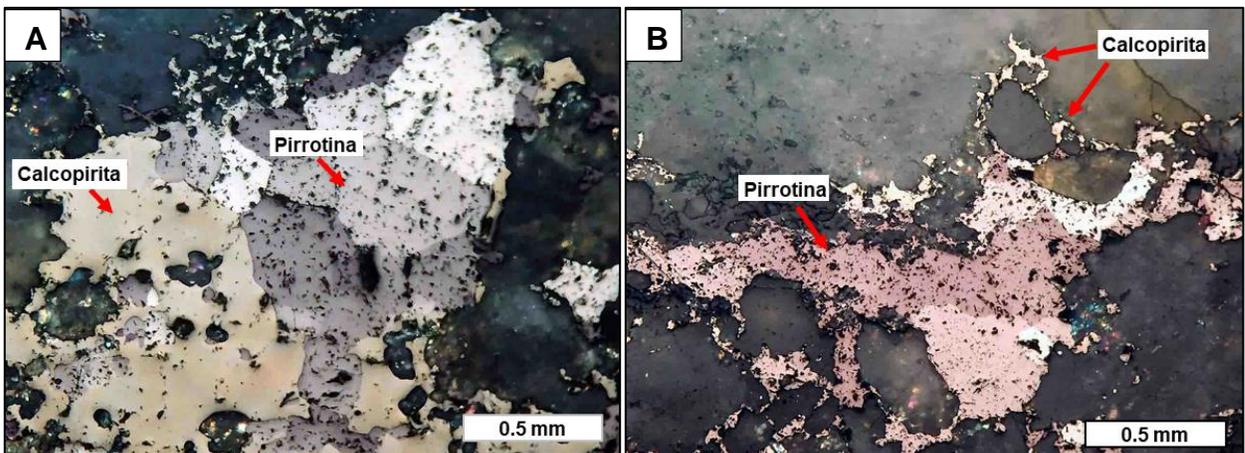


Figura 4.11. Fotografías de cortes pulidos de la muestra 455309 (veta de cuarzo). A: Pirrotina con calcopirita (5X/NC). B: Vetilla de pirrotina con reemplazo de calcopirita (5X/NC).

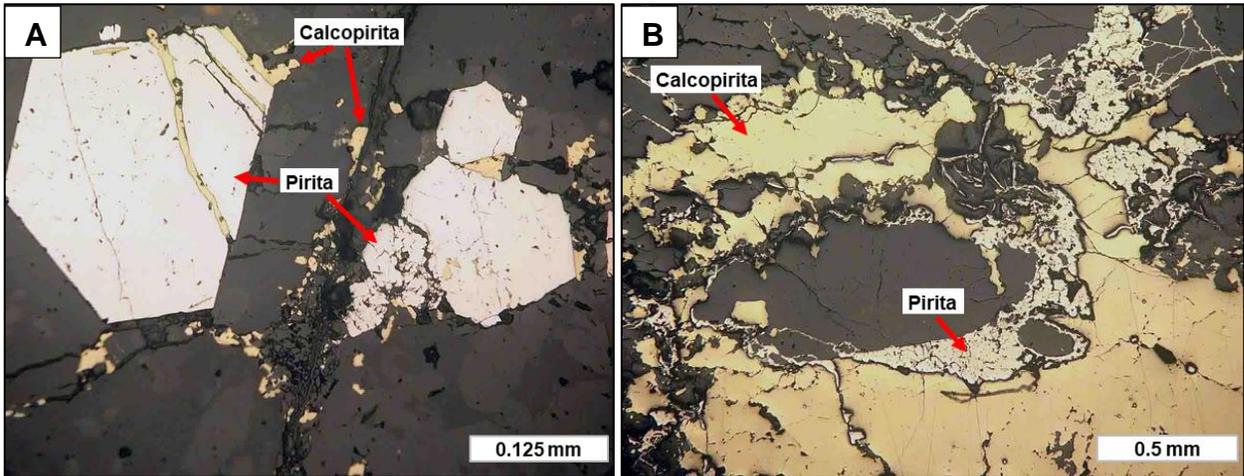


Figura 4.12. Fotografías de cortes pulidos de la muestra 455310 (veta de cuarzo). A: Cristales de pirita euhedral con fractura rellena con calcopirita (20X/NP). B: Pirita en bordes de calcopirita (5X/NP).

Es importante mencionar la presencia de minerales opacos en las demás muestras, ya sea para diferenciar posibles génesis y/o para tener en cuenta la mineralización fuera de los tramos de sondajes mapeados como “veta”. En las muestras de la Unidad Metamórfica los minerales opacos corresponden principalmente a agregados lenticulares de ilmenita orientada según bandeamiento de la roca. En cuanto a los sulfuros, el con mayor presencia es la pirita, dándose como cristales anhedrales a subhedrales diseminados, existiendo cristales con una génesis metamórfica o asociada a eventos hidrotermales posteriores. Presencia de trazas diseminadas de sulfuros de Cu, posiblemente calcopirita, y granos diseminados de pirrotina, donde algunos cristales presentan bordes de calcopirita. También se distinguen oxi-hidróxidos de Fe en fracturas, planos de foliación y como pátinas en bordes de vetillas de silicatos. En las muestras de la Unidad Diorita los minerales opacos corresponden principalmente a pirita diseminada en masa fundamental, donde algunos cristales se pueden encontrar asociados a calcopirita. Esta misma asociación, de granos de pirita con menor calcopirita, se presenta en bordes de vetilla de silicatos (con presencia de patinas de oxi-hidróxidos de Fe). Los cristales, tanto de pirita como de calcopirita, son de mayor tamaño en los bordes de la vetilla de silicatos que en la masa fundamental. En la muestra de la Unidad Pórfido Andesítico los minerales opacos ocurren de modo diseminado y corresponden principalmente a hematita asociada con oxi-hidróxidos de Fe, el leve magnetismo sugiere la presencia de relictos de magnetita en los granos de hematita.

En las muestras 455308 y 455309, de vetas mineralizadas, aparecen fracciones de roca metamórfica, es decir, las muestras enviadas incluían roca de caja de las vetas. Esto es muy útil, ya que entrega información respecto a una posible alteración por parte de los fluidos que generaron las vetas hacia la roca huésped, que en su mayoría corresponde a litologías de roca metamórfica. En ambas muestras mencionadas, la roca metamórfica de caja es una metapsamopelita, compuesta por: agregados granoblásticos de cuarzo; sericita microcristalina diseminada a lo largo de todo el dominio y en agregados; cristales en abanico de clorita (clorita-esmectita) que se disponen de manera vetiforme a favor de la foliación principal de la roca, también se presenta como agregados aislados y en algunos sectores forma intercrecimientos microcristalinos con cuarzo y sericita; además, algunos cristales (subhedrales a euhedrales y anhedrales subordinados) diseminados de

minerales opacos. En el informe de análisis de la muestra 455308 se menciona que parte de la sericita reemplaza a feldespatos del protolito psamopelítico, junto con atribuir una alteración sericítica a la roca metamórfica en contacto con la veta mineralizada, esto último corre para la roca metamórfica de ambas muestras.

En todas las muestras se observan evidencias de proceso de oxidación por parte de algunos silicatos ferromagnesianos (observado en biotita y turmalina) y minerales opacos (observado en magnetita y hematita) de las distintas litologías, generándose principalmente óxidos e hidróxidos de hierro. Esta alteración se da a través de: oxi-hidróxidos de Fe en bordes de cristales y bordes de vetillas; oxi-hidróxidos de Fe rellenando fracturas; hematita con oxi-hidróxidos de Fe reemplazando a magnetita en muestra de roca andesítica; oxi-hidróxidos de Fe en planos de bandeamiento de rocas metamórficas.

Con toda la información desplegada respecto a la probable mineralogía de alteración, considerando los distintos estilos de ocurrencia (diseminada, agregados, vetillas, microvetillas, etc.), pero sin relación temporal, y teniendo en cuenta que la cantidad de muestras vistas bajo el microscopio no es numerosa, se proponen posibles asociaciones de minerales de alteración para las distintas litologías. Así, para las muestras de roca metamórfica se plantea la asociación sericita±clorita±esmectita±biotita±carbonato, con bastante incertidumbre dada la opción de un eventual origen metamórfico para algunos de estos minerales. En cuanto a las muestras de roca diorítica y roca andesítica, se sugieren las asociaciones clorita-epidota±actinolita ±albita±sericita±carbonato±biotita y clorita-actinolita±esmectita±sericita±cuarzo, respectivamente. Mientras que, para las muestras de vetas mineralizadas se menciona la asociación cuarzo±turmalina±sericita±clorita±esmectita±carbonato. Finalmente, estas asociaciones previas tienen el fin de dar una noción y vislumbrar las asociaciones a encontrar en el mapeo geológico de los sondajes.

4.2 Mapeo geológico de sondajes

En el mapeo geológico de los sondajes seleccionados se emplearon dos formatos de planillas de logueo, por lo que se debe generar la unión de la información registrada en ambas versiones. Esta combinación debe mantener la total representatividad de las características geológicas a utilizar, ya que las planillas poseen todas las opciones de litologías, minerales de alteración y de mena que pueden llegar a ser registradas en el mapeo de los testigos.

Para la descripción litológica de sondajes del primer formato de planilla, se disponía de las siguientes opciones de litologías: esquisto; metarenisca; granitoides; riolita; andesita; brecha hidrotermal; brecha de falla; milonita; diorita; indeterminada. En la segunda versión de la planilla, las opciones son: riolita; esquisto; metarenisca; brecha hidrotermal de biotita; brecha hidrotermal de cuarzo; brecha de falla; pórfido andesítico; pórfido microdiorítico. La litología observada se acompaña con la textura de la roca (afanítica, fanerítica, grano fino o grueso, foliada, brechosa, entre otras). En cuanto a las unidades geológicas de ambos procedimientos de mapeo, en el primer formato se clasifican en: Sobrecarga; Metamórfica; Intrusivo; Zona de veta; Indeterminado. En el

segundo formato se dividen en: Sobrecarga; Roca metamórfica; Pórfido andesítico; Microdiorita o Pórfido microdiorítico; Halo; Veta; Indeterminado.

En la planilla del primer procedimiento, la mineralogía metálica y de mena es registrada con un rango porcentual observado, estimado respecto al tramo total o indicar en caso de hacerlo respecto a alguna estructura, lo que se complementa con el estilo de mineralización (diseminado, vetillas, cemento de brecha, etc.). La mineralogía de alteración se hace a través del registro de ciertos minerales o asociaciones de minerales observados, indicando con un número el grado de intensidad con que se presentan en la roca (1 si es débil, 2 si es moderada y 3 cuando es intensa) y estilo de ocurrencia (reemplazo selectivo, generalizado, vetillas, relleno de espacios, etc.). Las opciones que se tenían para el registro de la mineralogía de alteración son: cuarzo-biotita; sericita; epidota-clorita-actinolita; silicificación; calcita; arcillas; óxi-hidróxidos de hierro; clorita; epidota; otra.

En la planilla del segundo procedimiento de mapeo, la mineralogía de mena, sean óxidos o sulfuros, se deben cuantificar en porcentaje observado, estimado respecto al metro o tramo que este mapeado, indicando si el estilo de mineralización es en vetillas o diseminado (diseminado, en cúmulos, patinas u otro). En el caso de haber distinguido mineralización de Co gracias al analizador FRX portátil, pero sin lograr determinar visualmente a que mineral de cobalto corresponde, se utiliza el término “óxido de cobalto” o “sulfuro de cobalto”, según corresponda. La mineralogía de alteración se registra a través de minerales individuales observados, que son: sílice; calcita; biotita; turmalina; clorita; epidota; actinolita; sericita; arcillas; óxi-hidróxidos de hierro, que se pueden dividir en hematita, goethita y jarosita. Estos minerales mencionados se indican acompañados de un número según intensidad (1 débil. 2 moderado y 3 intenso) y con una letra para la forma de ocurrencia (“v” para vetillas o relleno de fracturas y “d” de diseminado para otro caso). También existen recuadros para la cuantificación, según estimación visual, de vetillas de cuarzo, calcita y cuarzo-biotita.

En vista de las diferencias antes mencionadas, es necesario unir la información de mapeo de ambas planillas en un solo código, con el cuidado de mantener todo el registro de la mineralogía observada y así, poder generar asociaciones de minerales de alteración representativas. En la Tabla 4.2 se compara las asociaciones y minerales de alteración del mapeo geológico de sondajes hecho con los dos formatos de planillas y el nuevo código de minerales de alteración, el cual será usado en adelante.

Tabla 4.2. Asociaciones de minerales y minerales de alteración del mapeo geológico de sondajes (tercera columna corresponde al nuevo código de minerales de alteración a utilizar).

Alteraciones planilla primera versión	Alteraciones planilla segunda versión	Base de datos de alteración conjunta
Cuarzo-biotita (qz-bt)	Sílice (sil)	Sílice/Cuarzo (sil)
Sericita (ser)	Calcita (cc)	Biotita (bt)
Epidota-clorita-actinolita (ep-chl-act)	Biotita (bt)	Turmalina (tur)
Silicificación (sil)	Turmalina (turm)	Clorita (chl)
Calcita (cc)	Clorita (chl)	Epidota (ep)
Arcillas (arc)	Epidota (ep)	Actinolita (act)
Oxi-hidróxidos de hierro (oxfe)	Actinolita (act)	Sericita (ser)
Clorita (chl)	Sericita (ser)	Calcita (cc)
Epidota (ep)	Arcillas (arc)	Arcillas (arc)
Otra (otra)	Hematita (hem)	Oxi-hidróxidos de hierro (oxfe)
	Goethita (goet)	
	Jarosita (jar)	
	Oxi-hidróxidos de hierro (oxfe)	

Los cambios realizados, se deben principalmente por la inexistencia de asociaciones de minerales en el código de mapeo de alteración de la segunda planilla, versus la repetición de minerales de alteración en el código de la primera planilla, pudiéndose registrar dentro de una asociación o no, como ocurre con el cuarzo, epidota y clorita. Por ejemplo, la presencia de la asociación cuarzo-biotita equivale a la presencia de cuarzo y biotita, por tanto, es posible separar por mineral para asimilar los registros con la segunda versión de planilla. Esto mismo es aplicable para la asociación epidota-clorita-actinolita. En cuanto al mapeo de hematita (óxido de hierro), goethita (hidróxido de hierro) y jarosita (sulfato de hierro), estas se dejaron bajo la descripción de óxidos e hidróxidos de Fe en la unión de las bases de datos, dado que no existe la misma especificación de minerales oxidados de hierro en la versión de la primera planilla de mapeo.

Algo similar ocurre con las litologías de logueo, debido a que se tienen algunas opciones litológicas diferentes entre una planilla y la otra, pero que en el fondo describen a la misma roca. Por ejemplo, agregar una característica textural en el nombre litológico, como ocurre con “diorita”, “microdiorita” y “pórfido microdiorítico”. Existen 11 muestras que se encuentran descritas por una litología que no es definida en la geología local del proyecto, como ocurre con las opciones litológicas “dique afanítico” (3 muestras) y “riolita” (8 muestras). Para estos casos se mantuvo la litología mapeada, ya que no es posible agruparlas con otras. Por consiguiente, de tener las muestras agrupadas en 13 litologías, se pasa a 10 litologías (ver Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Opciones de litologías en el mapeo geológico de sondajes (tercera columna corresponde a los nombres litológicos a utilizar).

Litologías planilla primera versión	Litologías planilla segunda versión	Base de datos de litología conjunta
Esquisto	Riolita	Brecha de falla
Metarenisca	Esquisto	Brecha hidrotermal
Granitoides	Metarenisca	Brecha hidrotermal de biotita
Riolita	Brecha hidrotermal de biotita	Brecha hidrotermal de cuarzo
Andesita	Brecha hidrotermal de cuarzo	Diorita/microdiorita
Brecha hidrotermal	Brecha de falla	Dique afanítico
Brecha de falla	Pórfido andesítico	Esquisto
Milonita	Pórfido microdiorítico	Metarenisca
Diorita		Pórfido andesítico
Indeterminada		Riolita

En cambio, la unión de la información de logueo de la mineralogía metálica y de mena de ambas planillas, es un poco más compleja. Esto debido a que la mineralización de Co y Cu se da principalmente en vetas y vetillas angostas, donde muchas veces estas estructuras, sobre todo las milimétricas o de pocos centímetros, están incluidas dentro de tramos de logueo de mayores longitudes y al momento de la cuantificación porcentual estimada de la mineralización, esta es en base a la estructura en sí y no respecto al tramo. Al no contar con la ubicación exacta de todas las estructuras mineralizadas que fueron registradas en las planillas de mapeo, no es posible tomar en cuenta los datos porcentuales de la estimación visual de los minerales metálicos y de mena. Lo anterior se refuerza con las distancias de los cortes realizados en los testigos para los análisis químicos, ya que, al tener muestras entre 0,5 y 2 m de sondaje y límites o largos de tramos de logueo superiores, las estructuras mineralizadas pueden quedar en un corte de muestra o en otro. En consecuencia, se decide crear un código para los tramos mineralizados (Tabla 4.4), el cual indica la existencia, o su potencial presencia, de mineralización metálica y de mena, diferenciando por elemento (Cu, Co y Fe) y si la mineralogía es oxidada o de sulfuros.

Tabla 4.4. Grupos mineralógicos que representan a los minerales metálicos y de mena mapeados.

Grupos mineralógicos para mineralización	Minerales metálicos y de mena mapeados
Oxidados de cobalto (OxCo)	Asbolana; Eritrina; Óxidos de cobalto (no identificado)
Oxidados de cobre (OxCu)	Azurita; Crisocola; Malaquita; Copper wad; Chenevixita; Oxidados negros y verdes de cobre (no identificados)
Sulfuros de cobalto (SulfCo)	Cobaltita; Sulfuros de cobalto (no identificado)
Sulfuros de cobre (SulfCu)	Calcopirita
Sulfuros de hierro (SulfFe)	Arsenopirita; Pirrotina; Pirita

4.3 Preparación de muestras y análisis geoquímico de sondajes

Una vez está terminado el mapeo geológico de los testigos, el equipo de geología realiza marcas, basadas en criterios geológicos, para el posterior corte de estos. Las muestras que se encuentran en

zona mineralizada se marcan cada 0.5 m y las zonas de halo cada 1 m (algunas fueron marcadas cada 2 m). Este tipo de muestreo permite identificar y obtener las leyes de los minerales de mena en las zonas mineralizadas, así también, determinar la presencia de anomalías geoquímicas y verificar el grado de disolución de la mena hacia el halo de las estructuras mineralizadas de cada sondaje.

Una vez que las muestras de sondajes han sido cortadas en las zonas indicadas, se embolsan y etiquetan, indicando el pozo de perforación y el largo de muestra. En los casos que la roca se encuentre intensamente fracturada, el procedimiento consiste en chancar y cuartear la muestra para obtener una fracción representativa para el análisis. Luego, las muestras se llevan a los laboratorios de ALS Global en Coquimbo.

Con el propósito de producir un submuestreo homogéneo y representativo, la muestra que se lleva a laboratorio pasa por una preparación mecánica, donde es pesada y chancada a #9 Ty (70% <2 mm), luego se cuartea 1 kg del chancado que es pulverizado a #200 Ty (85% <75 μ m), obteniéndose así un sobre de roca pulverizada. Posteriormente, el sobre es enviado a análisis.

Los análisis químicos aplicados a las muestras fueron realizados por el laboratorio ALS Global. Cabe destacar que no todos los lotes poseen la misma batería de análisis, el total de análisis realizados corresponden a 4 tipos, los cuales son: Determinación de Cu soluble por medio lixiviación (Cu-AA05); Determinación de Co soluble por ácido (Co-AAAS); Evaluación de minerales de mena (ME-AA62); Método de nivel ultra traza con ICP-AES e ICP-MS (ME-MS41). Para este trabajo de título, se utiliza la base datos obtenida mediante el análisis químico ME-MS41. Además, se consideran los datos de los análisis químicos de Cu total (Cu-AA62) y Co total (Co-AA62) para cálculos específicos de la mineralización de mena en la población de muestras.

El método de nivel ultra traza con ICP-AES e ICP-MS (ME-MS41) cuantifica una batería amplia de elementos, tanto mayores como trazas (51 elementos). La descomposición parcial de la muestra es por digestión con agua regia (HNO_3 y HCl) y se utilizan los métodos analíticos espectrometría de emisión atómica de plasma acoplada inductivamente (ICP-AES) y espectrometría de masas de plasma acoplada inductivamente (ICP-MS). En este ensayo de ALS, una muestra preparada (0,50 g) se digiere con agua regia en un bloque calefactor de grafito. Después de enfriar, la solución resultante se diluye con agua desionizada, se mezcla y se analiza mediante ICP-AES. Con los resultados de este análisis, se revisa la presencia de altas concentraciones de bismuto, mercurio, molibdeno, plata y tungsteno. Luego, se prosigue con el análisis de la muestra aplicando ICP-MS para el resto de los elementos. Por último, los resultados analíticos se corrigen por interferencias espectrales entre elementos. En la Tabla 4.5 se presentan los límites de detección de los 51 elementos que se pueden analizar con esta técnica.

Tabla 4.5. Límites de detección para análisis con digestión de agua regia y determinaciones mediante ICP-AES e ICP-MS.

Elemento	Símbolo	Unidad	Límite inferior	Límite superior
Plata	Ag	ppm	0,01	100
Aluminio	Al	%	0,01	25
Arsénico	As	ppm	0,1	10.000
Oro	Au*	ppm	0,02	25
Boro	B	ppm	10	10.000
Bario	Ba	ppm	10	10.000
Berilio	Be	ppm	0,05	1.000
Bismuto	Bi	ppm	0,01	10.000
Calcio	Ca	%	0,01	25
Cadmio	Cd	ppm	0,01	1.000
Cerio	Ce	ppm	0,02	500
Cobalto	Co	ppm	0,1	10.000
Cromo	Cr	ppm	1	10.000
Cesio	Cs	ppm	0,05	500
Cobre	Cu	ppm	0,2	10.000
Hierro	Fe	%	0,01	50
Galio	Ga	ppm	0,05	10.000
Germanio	Ge	ppm	0,05	500
Hafnio	Hf	ppm	0,02	500
Mercurio	Hg	ppm	0,01	10.000
Indio	In	ppm	0,005	500
Potasio	K	%	0,01	10
Lantano	La	ppm	0,2	10.000
Litio	Li	ppm	0,1	10.000
Magnesio	Mg	%	0,01	25
Manganeso	Mn	ppm	5	50.000
Molibdeno	Mo	ppm	0,05	10.000
Sodio	Na	%	0,01	10
Niobio	Nb	ppm	0,05	500
Níquel	Ni	ppm	0,2	10.000
Fósforo	P	ppm	10	10.000
Plomo	Pb	ppm	0,2	10.000
Rubidio	Rb	ppm	0,1	10.000
Renio	Re	ppm	0,001	50
Azufre	S	%	0,01	10
Antimonio	Sb	ppm	0,05	10.000
Escandio	Sc	ppm	0,1	10.000
Selenio	Se	ppm	0,2	1.000
Estaño	Sn	ppm	0,2	500
Estroncio	Sr	ppm	0,2	10.000
Tantalio	Ta	ppm	0,01	500
Telurio	Te	ppm	0,01	500
Torio	Th	ppm	0,2	10.000
Titanio	Ti	%	0,005	10
Talio	Tl	ppm	0,02	10.000
Uranio	U	ppm	0,05	10.000
Vanadio	V	ppm	1	10.000
Wolframio	W	ppm	0,05	10.000
Itrio	Y	ppm	0,05	500
Zinc	Zn	ppm	2	10.000
Circonio	Zr	ppm	0,5	500

*Las determinaciones de oro por este método son semicuantitativas debido al pequeño peso de la muestra utilizada. Para Au con elemento múltiple se usa una carga de 25g o 50g.

La base de datos geoquímicos, obtenida mediante el análisis ME-MS41 de ALS, corresponde a 4443 muestras (de testigos de sondajes) georreferenciadas con concentraciones de 51 elementos mayores y traza, la que posteriormente se cruza con la información del logueo de sondajes, de tal manera de contar con características geológicas como: litología, alteración, mineralización y abundancia relativa de minerales de alteración.

4.4 Procedimientos de aseguramiento de la calidad y control de calidad (QA/QC)

Según el informe técnico, elaborado en 2019 por el equipo de geología de Las Cobalteras, del programa de aseguramiento de la calidad en la preparación y los análisis químicos cobalto y cobre de las muestras de sondajes diamantinos e interior mina tomadas, preparadas y analizadas, contempla principalmente cuatro tipos de control:

- Muestras Blancos
- Muestras duplicadas
- Materiales Estándares de Referencia
- 5% duplicados entre laboratorios

Este programa de aseguramiento de calidad se complementa con un análisis de los controles internos de los laboratorios (réplicas y estándares analíticos) con los que se trabajó entre 2018 y 2019.

Los análisis químicos realizados, los llevo a cabo como laboratorio principal ALS Global. A través de 43 lotes enviados, se realizó la entrega de un total de 9783 muestras, las que incluían 1911 muestras de control. Como segundo laboratorio, Andes Analytical Assay realizó los análisis de 428 muestras, con 96 muestras de control insertadas. En la Tabla 4.6 se resume toda la campaña de muestreo de sondajes (86 sondajes), indicando el total de muestras enviadas a los distintos laboratorios, así como la cantidad de muestras de control utilizadas para dicho procedimiento y en la cantidad de sondajes que fue realizada.

Tabla 4.6 Detalle de muestras enviadas y analizadas en los distintos laboratorios.

Laboratorio	Muestras de rutina	Muestras de control	Sondajes
ALS	9783	1911	86
AAA	428	96	63

Son dos los laboratorios que realizaron análisis químicos en muestras de sondajes, esto debido a que existió validación de resultados mediante análisis cruzado entre laboratorios. Esta metodología busca llevar a cabo el control de la precisión y la exactitud del laboratorio oficial que realiza los análisis químicos (ALS Coquimbo), a través del envío de muestras ya analizadas a un laboratorio

independiente del que realiza el trabajo, en este caso Andes Analytical Assay Copiapó (AAA).

Para los controles correspondientes, debido a la variabilidad de volumen de los lotes que se enviaron, se definió que, para cada uno, indistinto de la población que sea, como mínimo debían estar contenidas las siguientes cantidades porcentuales:

- 2% Blanco Fino
- 2% Blanco Grueso
- 3% Duplicado Fino
- 3% Duplicado Grueso
- 5% Duplicado de Campo
- 2% Estándar de Alta
- 2% Estándar de Media
- 2% Estándar de Baja
- Dos blancos de control, sin considerar el número de muestras enviadas a laboratorio. Uno al inicio y otro al final de cada lote.

La asignación de las muestras de control en los lotes despachados fue realizada generalmente de forma aleatoria y manual, exceptuando los duplicados finos y gruesos los cuales se pusieron principalmente cercanos o dentro de las zonas mineralizadas. Además, se puso énfasis en que los compósitos de 0.5 m (tramos de sondajes mineralizados) tuvieran control con blancos.

A continuación, se presentan algunas conclusiones del “Informe técnico del programa de aseguramiento del control de calidad de la preparación y análisis de cobalto y cobre, de las muestras de los sondajes diamantino e interior mina de la campaña de sondajes 2018-2019, Proyecto Las Cobalteras 2019”:

En los blancos insertados en la campaña de sondajes, en general, se observó una contaminación marginal de forma transversal a los métodos analíticos y las muestras de control. La cantidad de muestras contaminadas fue mínima, no superando el 5% encontrándose dentro de los márgenes aceptables. Se destaca una contaminación de Cu para los blancos analíticos analizados con el método ME-AA62 (Cu-AA62 y Co-AA6), presentando un 6,57% de contaminación, superando levemente los márgenes. A pesar de lo anterior, se puede concluir que no existe un mayor impacto en la validez del proceso.

En los duplicados utilizados para la campaña de sondajes, se observó dispersión en los porcentajes de error en los valores muy bajos (cerca al límite de detección). Además, se destaca que el ensayo de laboratorio ME-AA62, en comparación con el ME-MS41, presenta mayor cantidad de pares fuera de los límites de aceptación para todos los tipos de duplicados.

Los estándares de referencia, en general, mostraron un comportamiento coherente con los límites

de control establecidos por el certificado, si bien en varios casos y para los distintos tipos de estándares, es posible evidenciar la presencia de un sesgo positivo o negativo en las gráficas, lo que genera que los datos se sitúen sobre o bajo el valor esperado. Esta situación es más marcada para el análisis ME-AA62 para Cu (Cu-AA62), Co (Co-AA62) y As en los estándares de alta ley. En el caso particular del Co-AA62, hubo un problema de resolución de la técnica analítica para el estándar de baja ley, donde las concentraciones son cercanas al límite de detección y los resultados muestran mucha aleatoriedad y sesgo. El análisis ME-MS41, en general, tiene un buen comportamiento para el Co y As en los estándares de mediana y baja ley, pero para los estándares de alta ley no fue efectivo, ya que las concentraciones excedían el límite de detección de la técnica (que es 10.000 ppm o 1%).

Finalmente, el 5% de muestras enviadas a Andes Analytical Assay mostraron una excelente correlación respecto a las muestras originales analizadas por ALS, agregando confiabilidad al proceso desarrollado por este último.

4.5 Definición de sistema

Con la finalidad de acotar las variables del sistema, se definen las características geológicas necesarias que deben tener las muestras con análisis geoquímicos para poder ser trabajadas. Como criterio general, cada muestra a utilizar debe contar con la información de litología y mineralogía de alteración del logueo, mientras que la de mineralización de mena va a depender de cada tramo, dada su presencia o ausencia.

Los tramos de corte de testigos definidos para los análisis químicos no se ajustan con los límites de mapeo, ya que el logueo de sondajes no considera longitudes constantes en la descripción. Por lo tanto, se debe realizar un compósito de la información categórica y ajustarla a los tramos con análisis geoquímicos.

Este compósito de información categórica se realiza considerando que cada tramo con data geoquímica debe estar descrito por una sola litología, es decir, las muestras que coincidan con límites de cambios litológicos dentro del tramo no serán incluidas en el estudio, esto con el objetivo de disminuir la mezcla de información geoquímica. Además, si existe variación en el mapeo de la mineralogía de alteración, se considerará la que represente un porcentaje mayor al 80% del tramo definido. Al contar con tramos cortos por los análisis químicos (0,5 m; 1 m; 2m) y considerando muestras que presentan una sola litología mapeada, la mineralogía de alteración, en la mayoría de los casos, no varía dentro de los tramos definidos. Hay que recordar que el logueo de alteración está hecho en base al registro de minerales de alteración observados y no de asociaciones o tipos de alteración predeterminadas

Existen algunas muestras clasificadas en litologías no definidas en los informes de Baltum, 3 muestras como “dique afanítico” y otras 8 como “riolita”, por lo que se decide sacarlas del análisis. También se restan 24 muestras más, 9 mapeadas como “brecha hidrotermal” y 15 como “brecha de

falla”, ya que presentan una descripción poco precisa y una minoría frente a las demás litologías, perdiéndose al momento de entablar relaciones. Así, de las 4443 muestras iniciales se pasa a 3421 muestras a trabajar, quedando agrupadas en 6 litologías (ver Figura 4.13): brecha hidrotermal de cuarzo (B.H.Qz); brecha hidrotermal de biotita (B.H.Bt); diorita/microdiorita (D/M); pórfido andesítico (P.A); esquistos (Esq); metarenisca (Mta).

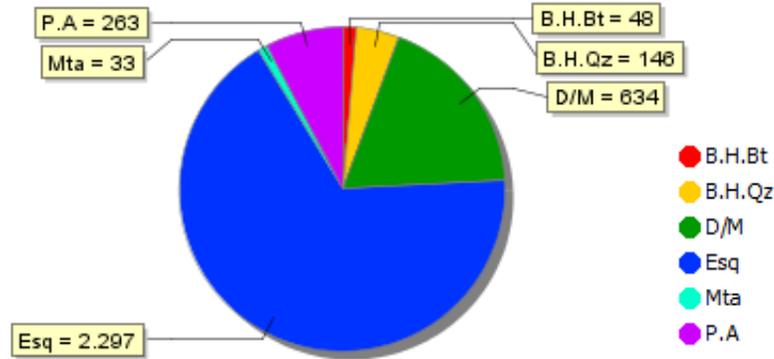


Figura 4.13. Gráfico de torta con la cantidad de muestras seleccionadas por litología (3421 muestras).

Respecto a la mineralogía de alteración, no existe ningún tipo o asociación de alteración que describa cada muestra, esto debido a que el logueo realizado por Baltum fue por mineral de alteración observado y su intensidad relativa (1, débil; 2, moderada; 3, intensa). Por lo mencionado en la sección de Mapeo geológico de sondajes, se cuenta con 10 “minerales” de alteración: sílice/cuarzo (Sil); biotita (Bt); turmalina (Tur); clorita (Chl); epidota (Ep); actinolita (Act); sericita (Ser); calcita (Cc); arcillas (Arc); oxi-hidróxidos de hierro (OxFe). En la Figura 4.14 se observa un histograma con la cantidad de registros por mineral de alteración, con su intensidad relativa, en la población de 3421 muestras. Mismo histograma se observa en la Figura 4.15, pero esta muestra la información de litología de las muestras.

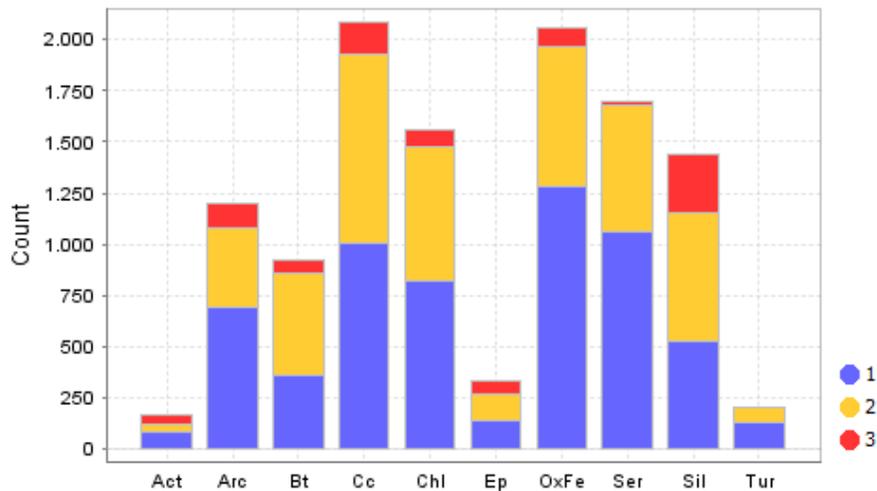


Figura 4.14. Histograma con la frecuencia total del registro de minerales de alteración y su intensidad relativa en colores (3421 muestras).

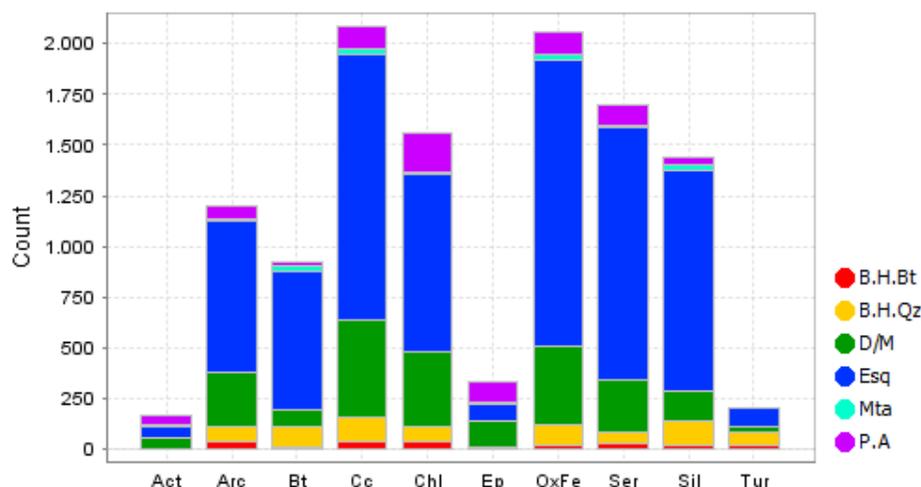


Figura 4.15. Histograma con la frecuencia total del registro de minerales de alteración por litología (3421 muestras).

Otro parámetro importante al momento de definir el sistema en el que se trabajará es la mineralización. En vista de lo mencionado en la sección de mapeo geológico de sondajes, no es factible trabajar con las estimaciones porcentuales de mineralización del logueo, que en su mayoría es traza respecto al tramo definido para la muestra. Por ende, se decide utilizar el logueo de mineralización para representar zonas mineralizadas en base a la presencia de mineralogía de mena y metálica, agrupándose en 3 categorías: mineralización de oxidados (OXS); mineralización mixta (MIX); mineralización de sulfuros (SULF). La mineralización de mena (oxidados y sulfuros) corresponde a minerales de cobalto y cobre, junto a pirita por el reemplazo de Co en su estructura cristalina (pirita cobaltífera). En el logueo también se considera la presencia de pirrotina y pirita/arsenopirita. En la Figura 4.16 se observa un histograma por litología de las muestras con análisis geoquímico, donde se diferencia en colores la presencia o ausencia de mineralización y el tipo de esta.

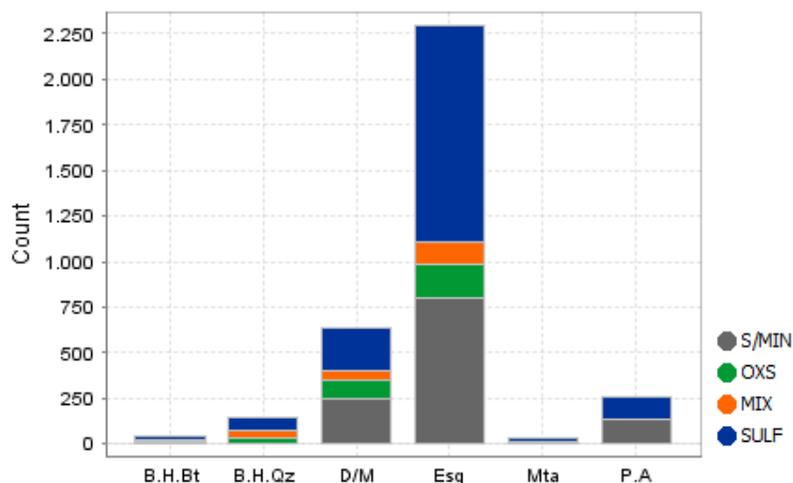


Figura 4.16. Cantidad de muestras por litología y tipo de mineralización presente (S/MIN: sin mineralización mapeada).

En la zona de mineralización de oxidados (OXS) se da la presencia de: asbolana (u oxidado negro rico en cobalto, no identificado); eritrina; azurita; crisocola; malaquita; copper wad (u oxidado negro rico en cobre, no identificado); chenevixita. En la zona de sulfuros (SULF) se da: cobaltita; calcopirita; pirita (cobaltífera, metamórfica, arsenopirita); pirrotina. La zona mixta (MIX) se caracteriza por presentar tanto mineralogía de oxidados como de sulfuros. Es importante mencionar la existencia de pirita de origen metamórfico, la cual es considerada en el logueo de mineralización. En la Figura 4.17 es posible apreciar el amplio rango de muestras que presentan sulfuros de hierro, donde la presencia de pirita es mucho mayor a la de pirrotina.

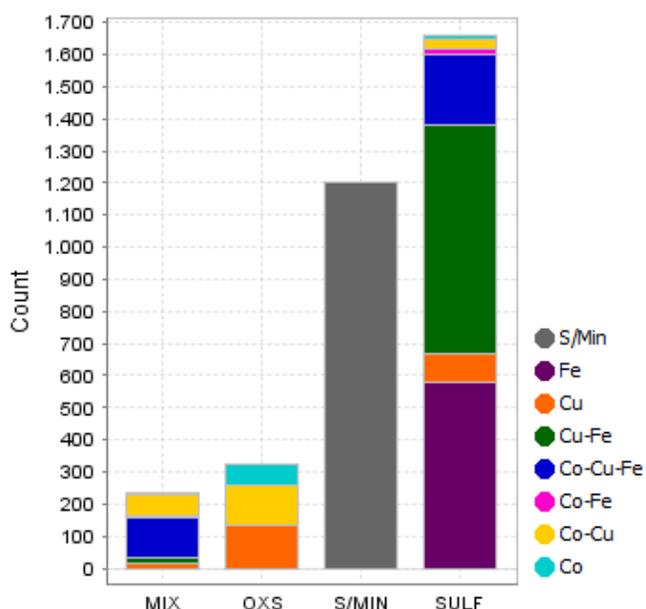


Figura 4.17. Cantidad de datos por tipo de mineralización presente (S/MIN: sin mineralización mapeada).

De esta manera, a partir de las 4443 muestras recibidas, que representan 4443 tramos de testigos con análisis químicos, considerando los criterios de selección anteriormente descritos, se obtiene la base de datos a trabajar con un total de 3421 muestras ubicadas espacialmente siguiendo las vetas Rosa Amelia-Farellón de Las Cobalteras. La base de datos lograda incluye la información de logueo (litología, alteración y mineralización) y la de 51 elementos analizados para cada muestra.

La distribución espacial de los datos exhibe claramente el predominio de muestras con litología metamórfica (ver Figura 4.18 y Figura 4.19), siendo la roca de caja de las muestras de brechas hidrotermales de cuarzo y biotita (muestras de vetas). También se aprecian varias muestras de diorita y pórfido andesítico, correspondientes a los diques que cortan la roca metamórfica. Al mostrar las zonas mineralizadas (ver Figura 4.20), se observa en general, que las muestras con mineralización de oxidados (OXS) y mixta (MIX) se ubican más cerca de la superficie, por encima de las muestras con mineralización de sulfuros (SULF).

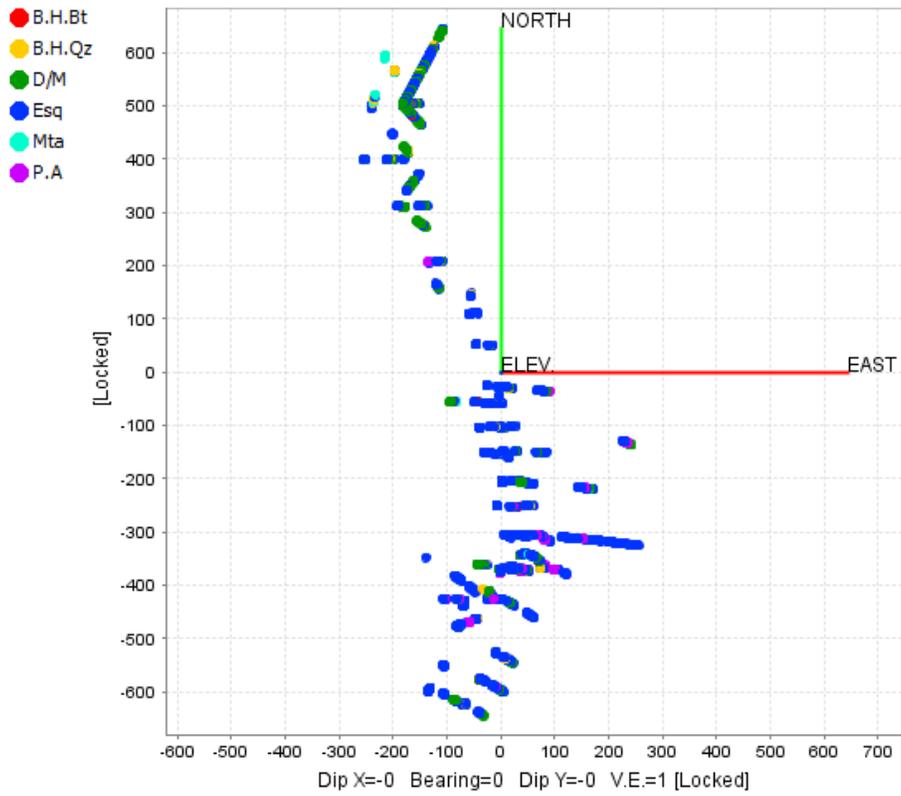


Figura 4.18. Distribución espacial de las 3421 muestras con su litología en colores (vista de planta).

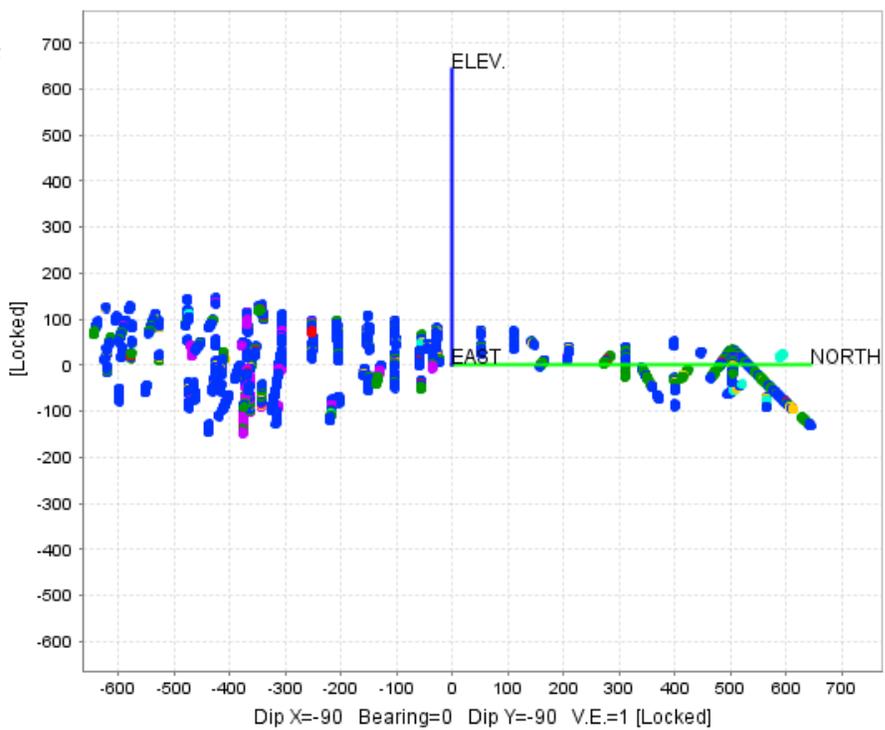


Figura 4.19. Distribución espacial de las 3421 muestras con su litología en colores (vista de perfil).

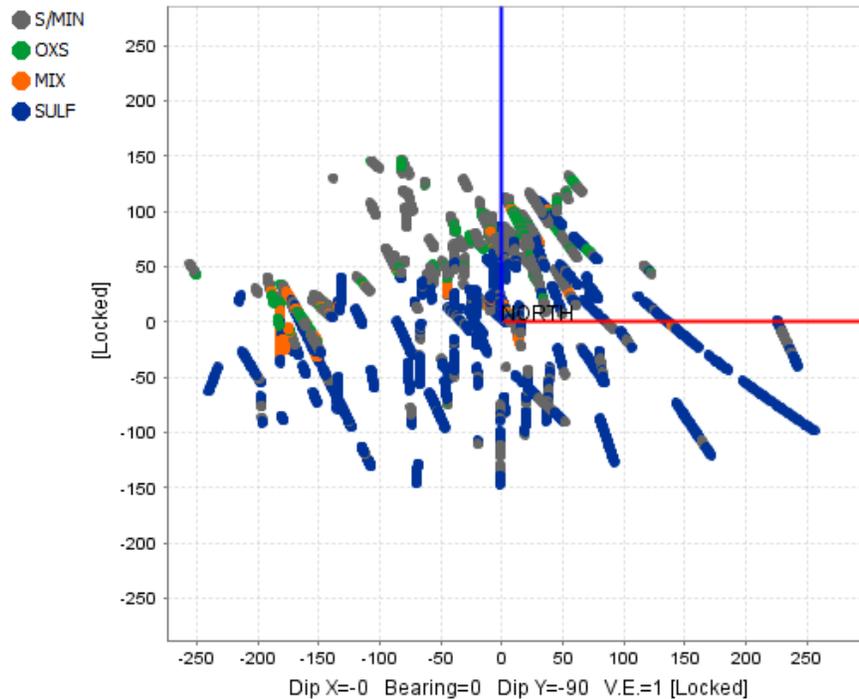


Figura 4.20. Distribución espacial de las 3421 muestras con su tipo de mineralización en colores (vista de perfil y hacia el norte).

4.5.1 Porcentaje de disolución

Los valores calculados de la disolución de las muestras indican que en promedio se disuelve tan solo un 9,14% de la roca, pudiendo llegar hasta 40% en algunos casos (ver Tabla 4.7). Es decir, la suma de las concentraciones de elementos mayores y traza no corresponde a un 100%, o un porcentaje más alto, como en el caso de los análisis de roca total utilizando ácidos más fuertes como el ácido fluorhídrico u otros métodos como el de fusión.

Cabe señalar la pequeña diferencia que existe en el porcentaje de disolución al considerar los 51 elementos del análisis, entre mayores y traza, o solo los elementos mayores (ver Tabla 4.7). Los elementos que constituyen minerales que conforman una roca dentro de un sistema particular, corresponden a los mayores. Por otro lado, los elementos traza son aquellos que pueden reemplazar a los elementos mayores en la estructura cristalina sin afectar significativamente las fases. Además, se destaca que algunos elementos pueden comportarse como mayores o traza dependiendo el sistema que se defina (Hofmann, 2003). Para este caso en particular, dado el método de digestión en agua regia y análisis químico por ICP-AES e ICP-MS, el grupo de los elementos mayores corresponde a: Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, S, Ti. La selección del grupo es en base a que estos elementos tienen límites de detección superior mayores a 1% (10.000 ppm) en el análisis químico ME-MS41 de ALS. Los elementos P y Mn al constituir parte de la mineralogía presente en el sistema pudiesen ser considerados dentro del conjunto de elementos mayores, ya que, a pesar de que sus límites de detección superior son del 1%, sus concentraciones son del orden de ppm (<10.000 ppm). Diferente ocurre con los elementos Co, Cu y As. Aunque son constituyentes principales de minerales de mena presentes, sus concentraciones están restringidas por los límites de detección de los análisis

químicos, siendo 10.000 ppm (1%) el límite de detección superior, el cual ocurre en algunas muestras. Por esto hay que destacar que, de los 51 elementos analizados, solo 3 tienen concentraciones medias que superan el 1%, siendo el aluminio (Al), hierro (Fe) y magnesio (Mg).

Tabla 4.7. Estadígrafos de porcentaje de disolución calculada.

Estadígrafo	% Total disuelto	% Total disuelto elementos mayores
Media	9,14	8,92
Desviación Estándar	4,27	4,21
Mínimo	1,19	1,09
Máximo	44,10	43,45

En la Figura 4.21. se muestran los boxplots de la disolución total calculada para elementos mayores por litología, evidenciando que el porcentaje de disolución parece no estar controlado por el tipo de litología asociada, ya que los rangos de variación se sobreponen casi totalmente, aunque se podría decir que las muestras descritas como diorita/microdiorita presentan, levemente, mayores porcentajes de disolución.

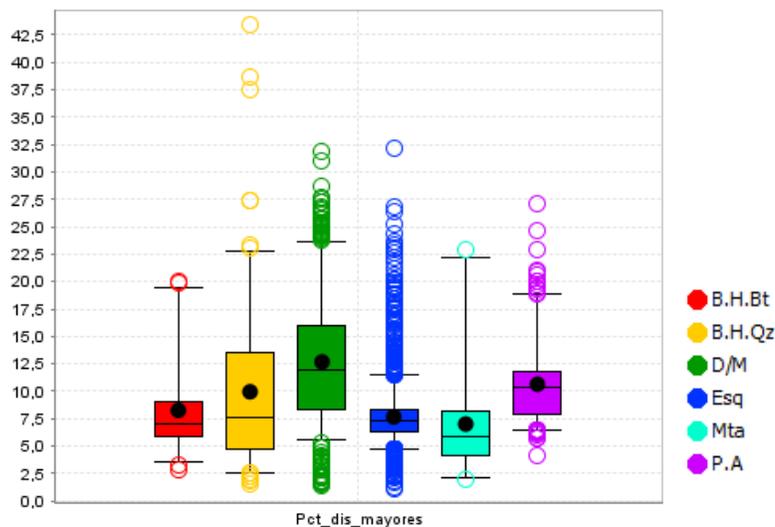


Figura 4.21. Boxplot de disolución total, en porcentaje, calculada para elementos mayores.

Los elementos que representan un mayor porcentaje relativo de disolución en orden decreciente son Fe, Al, Mg, Ca, K, S, Ti y Na. Tener presente que el orden de las concentraciones de estos elementos en la roca puede ser distinta, dependiendo de la estructura mineral de la que forman parte y su respectivo grado de disolución en agua regia. Para el caso del Al y Mg, el porcentaje de disolución es mayor para las muestras mapeadas como diorita y pórfido andesítico (D/M y P.A, respectivamente) y menor para las muestras de roca metamórfica (Esq y Mta) y brecha hidrotermal (B.H.Bt y B.H.Qz). Ocurre de manera similar para los elementos Ti y Na, pero a concentraciones de disolución en ppm. Respecto al Ca, los porcentajes de disolución más bajos se presentan en las muestras de roca metamórfica, mientras que el más alto se da en las muestras mapeadas como brecha hidrotermal de biotita (B.H.Bt). En cuanto al azufre, las muestras de brecha hidrotermal de

cuarzo (B.H.Qz) presentan marcadamente el porcentaje de disolución más alto (ver Figura 4.22).

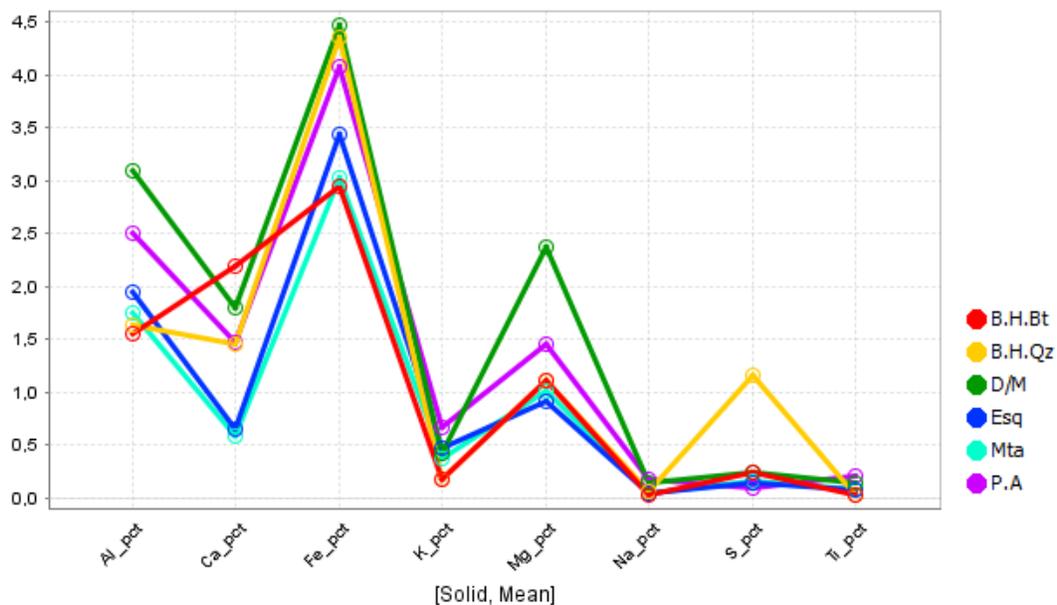


Figura 4.22. Porcentaje relativo promedio de los elementos mayores disueltos por litología.

La Figura 4.23 muestra que los elementos traza que presentan una mayor disolución y concentración promedio corresponden a P, Cu, As, Mn y Co lo que puede deberse a la presencia de minerales altamente solubles en agua regia como fosfatos y óxidos de manganeso para el caso de los elementos P y Mn, mientras que para los elementos Cu, As y Co pueda deberse a la presencia de sulfuros y óxidos relacionados a la mineralogía de mena. Esto último se complementa con la Figura 4.24, que muestra que las disoluciones más altas para los elementos Cu, As y Co se dan en las muestras de brecha hidrotermal.

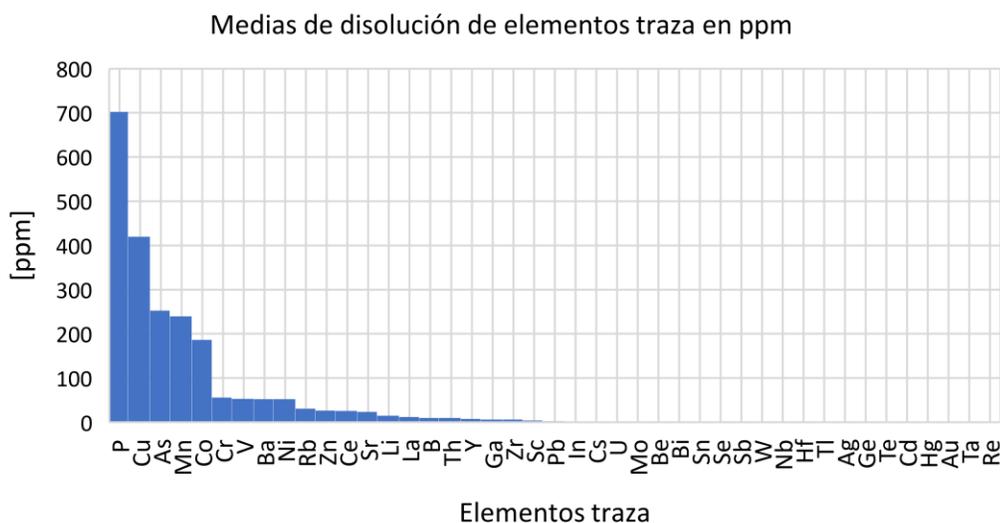


Figura 4.23. Disolución y concentración promedio de elementos traza y elementos con límite de detección superior de 10.000 ppm (1%).

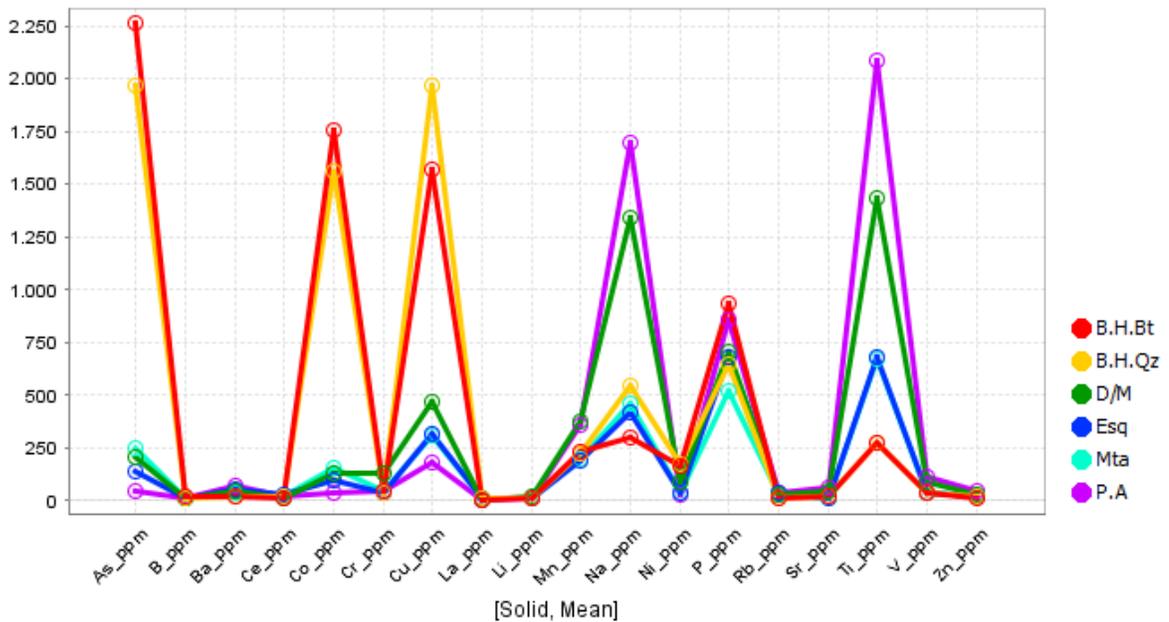


Figura 4.24. Disolución relativa promedio por litología de los elementos traza que tienen una media de disolución total mayor a 10 ppm y elementos mayores de concentraciones bajas.

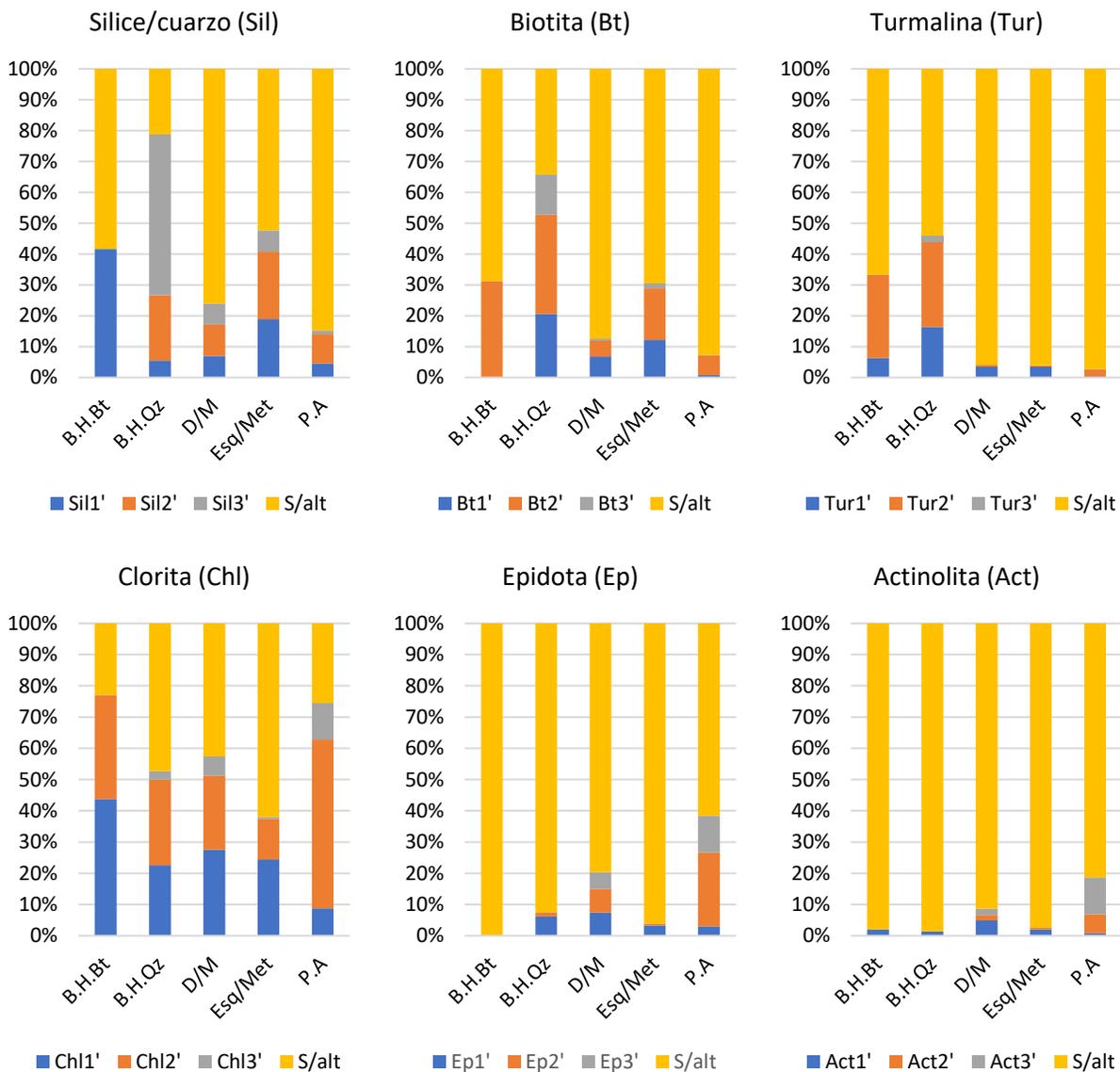
Las diferencias en algunos elementos entre los porcentajes de disolución calculados por litología se deberían al uso de un método de digestión parcial, ya que el agua regia disuelve a ciertos minerales y en distinto grado, y a las distintas proporciones de estos minerales en cada una de las litologías (o unidades litológicas). Siguiendo esta línea, se decide agrupar, dada la similitud en los porcentajes de disolución, las 2 litologías de roca metamórfica (esquisto y metarenisca) en una sola, imponiéndose el nombre de Esquisto/Metamórfica (Esq/Met), ya que el 98% de las muestras de roca metamórfica están mapeadas como esquisto. En consecuencia, las muestras quedan agrupadas en 5 litologías.

4.5.2 Abundancia de minerales

La cartilla de logueo de sondajes de Baltum cuenta con una sección en la cual se debe entregar un índice de intensidad de presencia para los minerales de alteración. La escala consiste en los valores nominales 1, 2 y 3 que indican intensidad débil, moderada e intensa, respectivamente. Para el caso de los minerales de alteración no registrados en un tramo de logueo, se utiliza “S/alt” para indicar la ausencia o la no observación del mineral de alteración respectivo en dicho tramo. Esta sección del mapeo de sondajes representa la abundancia relativa entre los minerales de alteración y en ningún caso la intensidad de un tipo de alteración en particular. Por ejemplo, la intensidad de sílice puede representar la generada por silicificación, cuarzo-sericita, alta presencia de vetillas de cuarzo, entre otras.

En la Figura 4.25 se muestran las abundancias minerales mapeadas para un total de 3421 muestras.

Hay que recordar que esa cantidad se debe a que el mapeo no es por tramos de longitud constante y, por lo tanto, se hizo un compósito de las variables categóricas para hacer coincidir las longitudes del mapeo con las de la base de datos geoquímicos. En los gráficos, la intensidad (abundancia relativa) de minerales de alteración por litología se normaliza por la cantidad de datos, para así llevar todo a escala porcentual de 0% a 100%.



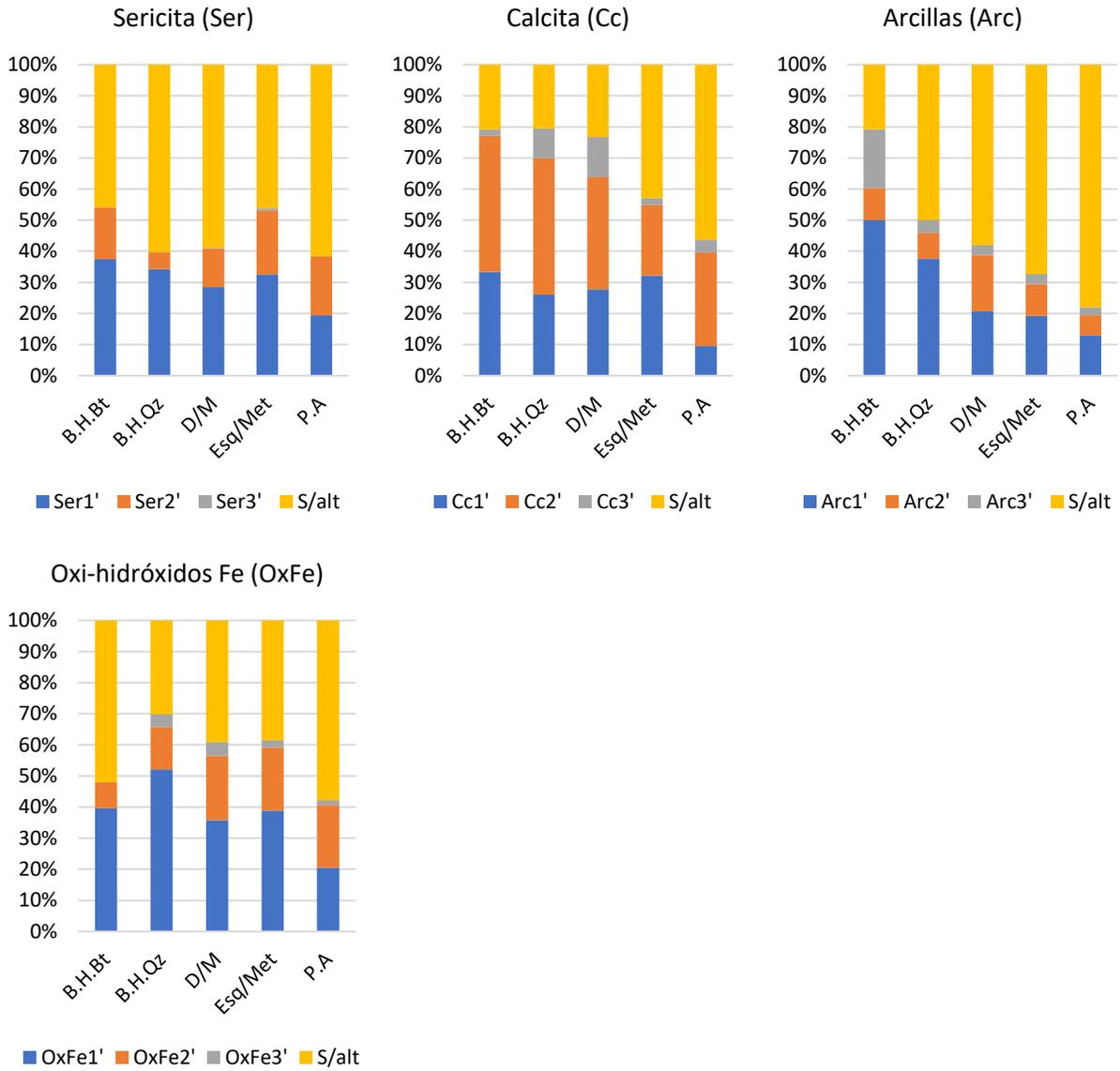


Figura 4.25. Abundancia relativa de minerales de alteración en cada litología (datos del mapeo geológico de Baltum).

La sílice presenta un mapeo de abundancia media a alta preferentemente en la litología B.H.Qz, concordante con el nombre de la litología (brecha hidrotermal de cuarzo), mientras que en las litologías de diorita (D/M) y pórfido andesítico (P.A) es donde se presenta menos. Notar el mapeo de solo intensidad débil para la sílice en la litología de brecha hidrotermal de biotita (B.H.Bt), aun así, esta pasa el 40% de las muestras.

La biotita y turmalina tienen un mapeo de intensidad algo similar, a exceptuar en la litología de las rocas metamórficas (Esq/Met). Los mayores porcentajes de muestras con registro de estos minerales y, con abundancias media a alta, se dan en las litologías de brecha hidrotermal, siendo mayor en la B.H.Qz. La turmalina tiene un registro inferior al 5% de las muestras en las demás litologías, mientras que la biotita tiene un registro superior al 5%, incluso llegando al 30% de las

muestras en la litología de rocas metamórficas

La clorita presenta un mapeo de abundancia moderada a alta preferentemente en la litología pórfido andesítico, seguida de las litologías de diorita y brecha hidrotermal de cuarzo, mientras que el mayor porcentaje de muestras con registro de este mineral de alteración se da en la litología de brecha hidrotermal de biotita. De todas maneras, la clorita posee una alta presencia como mineral de alteración, superando el 35% de muestras en todas las litologías.

La epidota y actinolita tienen un mapeo de intensidad bastante similar, solo que la epidota posee un mayor registro porcentual de muestras. En ambos minerales de alteración el mapeo de abundancia media a alta se da preferentemente en las litologías de pórfido andesítico y diorita, en respectivo orden. Siendo minerales de alteración de ocurrencia preferente en las rocas de las unidades intrusivas, ya que en las demás litologías no superan el 5% de muestras.

La sericita no presenta un mapeo de intensidad preferente por alguna litología, incluso los porcentajes de muestras con registro de sericita no son tan diferentes, variando entre 40% (B.H.Qz, D/M y P.A) y 55% (B.H.Bt y Esq/Met) aproximadamente. La intensidad 3, es decir, abundancia alta de sericita, solo se registra en algunas muestras de la litología de rocas metamórficas. De todas maneras, al igual que con la clorita, la sericita posee una alta presencia como mineral de alteración, superando el 35% (~40%) de muestras en todas las litologías.

La calcita y los oxi-hidróxidos de Fe no presentan un mapeo de intensidades preferente por alguna litología, solo diferencias entre los porcentajes de muestras con registro de estos minerales de alteración por litología, pero aun así no tan marcadas como en el mapeo de otros minerales de alteración. Ambos minerales se registran en gran parte de las muestras y al parecer no están controladas por algún grupo litológico, aunque en el caso de la calcita, las muestras de las litologías de brecha hidrotermal (B.H.Bt y B.H.Qz) llegan a un 80% con mapeo de este mineral.

Las arcillas presentan un mapeo de intensidad bastante similar en cuanto a la distribución de abundancias en cada litología, variando el porcentaje total de muestras con registro de arcillas entre litologías, pudiéndose ordenar porcentualmente de forma decreciente: B.H.Bt (~80%); B.H.Qz (~50%); D/M (~40%); Esq/Met (~30%); P.A (~20%).

En la Figura 4.26 se muestran las abundancias relativas de los 10 minerales de alteración del mapeo geológico en cada unidad litológica, permitiendo comparar la ocurrencia de los minerales dentro de cada una y entre ellas, bajo la incertidumbre de si hay o no un control litológico ante las abundancias de estos.

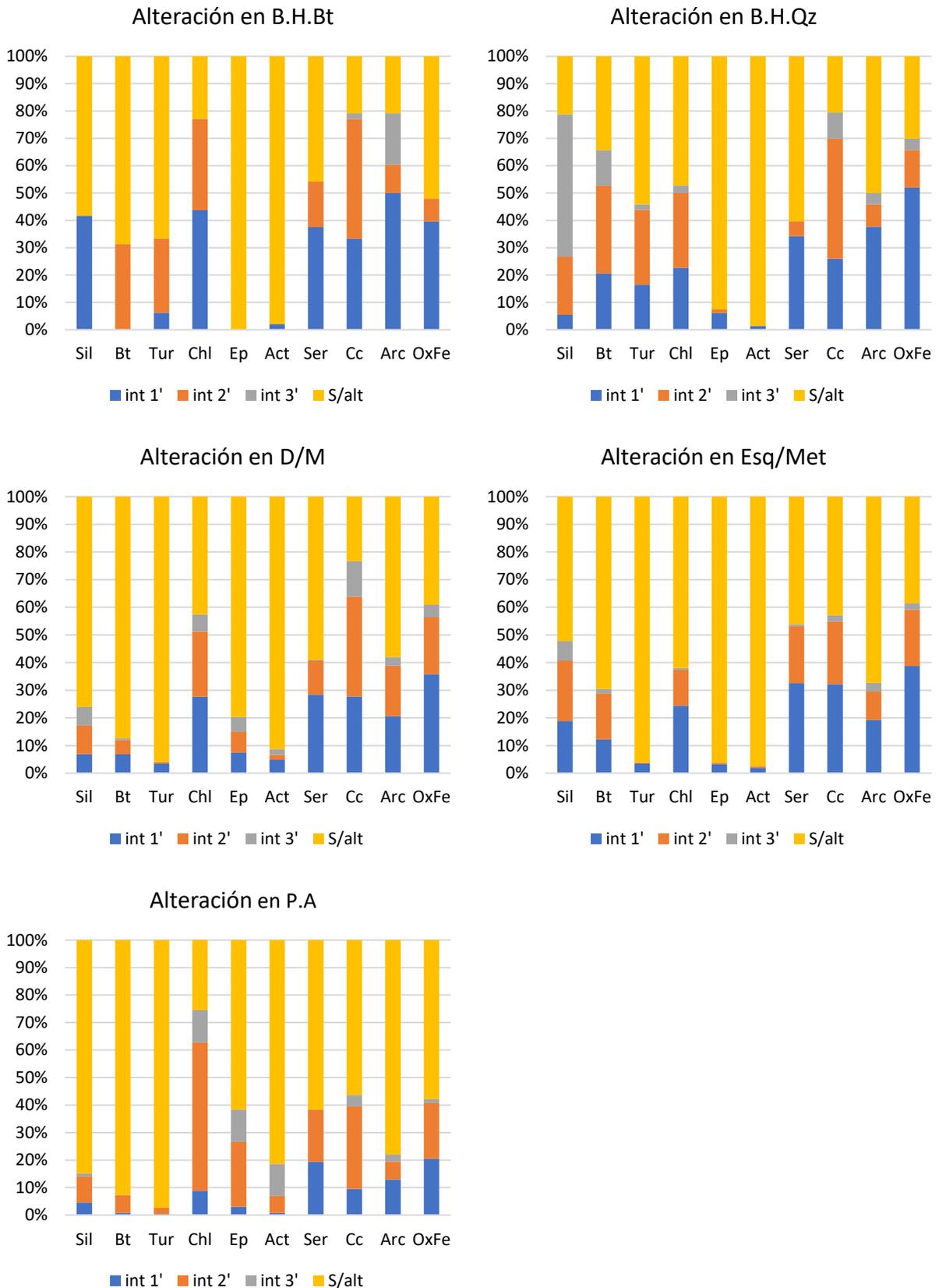


Figura 4.26. Abundancia relativa de todos los minerales de alteración por litología (datos de mapeo geológico de Baltum).

El mapeo de alteración en la unidad litológica de brecha hidrotermal de biotita (B.H.Bt) muestra que la clorita, calcita y arcillas son los minerales con mayor registro, llegando a un 80% de las muestras aproximadamente. Le siguen en porcentaje el mapeo de sericita, oxi-hidróxidos de Fe, sílice, biotita y turmalina. Mientras que los minerales, epidota y actinolita, están prácticamente ausentes. Llama la atención el mayor porcentaje de la clorita ante la biotita, dada la litología que se mapea, pero esto, quizás, pueda deberse a una cloritización posterior de la biotita del cemento de la brecha (ver Figura 4.26).

En la unidad litológica de brecha hidrotermal de cuarzo (B.H.Qz) los minerales con mayor registro en el mapeo de alteración son la sílice (cuarzo) y calcita, con 80% de las muestras aproximadamente. Le siguen los minerales oxi-hidróxidos de Fe, biotita, clorita, arcillas, turmalina y sericita. En esta litología la turmalina tiene el porcentaje de mapeo de muestras más alto, cercano al 45% de muestras, seguido por la B.H.Bt con un 35% de las muestras aproximadamente. Al igual que en su semejante de biotita, en esta litología la epidota y actinolita poseen un registro de ocurrencia muy bajo (ver Figura 4.26).

En la unidad litológica diorítica (D/M), dioritas y microdioritas, el mineral con mayor porcentaje (77% aprox.) de muestras en el mapeo de alteración es la calcita. Le siguen los minerales de oxi-hidróxidos de Fe y clorita, con registros cercanos al 60% de las muestras, y la sericita y arcillas, con registros en el 40% de las muestras. Por debajo está el mapeo de la sílice, epidota, biotita, actinolita y turmalina. Se debe señalar que los mapeos de intensidad (abundancia relativa) de la epidota y actinolita, al igual que los porcentajes de muestras con registro de estos minerales, son mayores en esta litología que en las de brecha hidrotermal y de rocas metamórficas (ver Figura 4.26).

En la unidad litológica de rocas metamórficas (Esq/Met) los minerales con los menores porcentajes, inferiores al 5%, en el mapeo de alteración y de intensidades mayormente débiles, son la actinolita, turmalina y epidota. Por el contrario, los minerales con los mayores porcentajes, superiores al 50% de las muestras, son los oxi-hidróxidos de Fe, calcita y sericita. La ocurrencia en el mapeo de los demás minerales de alteración (sílice, clorita, arcillas y biotita) se encuentra entre los dos grupos minerales antes mencionados (ver Figura 4.26).

En la unidad litológica de pórfido andesítico (P.A), el mapeo de alteración presenta a la clorita como el mineral dominante en cuanto al porcentaje de registro en las muestras (75% aprox.), además, tener un mapeo de abundancia relativa de media a alta mayormente. Los minerales que le siguen porcentualmente son la calcita, oxi-hidróxidos de Fe, sericita, epidota, arcillas, actinolita, sílice, biotita y turmalina. En esta litología la epidota y actinolita tienen los porcentajes de mapeo de muestras más altos, y con abundancias relativas de media a alta en casi la totalidad de los registros.

4.6 Análisis univariable

Los histogramas son una herramienta útil para representar gráficamente la variabilidad de los datos y obtener una estimación gráfica del “centro” y la forma de su distribución de frecuencia. Además, al fraccionar los datos en grupos o clases, es posible visualizar si existe una o más poblaciones. Por otra parte, dentro del estudio exploratorio de datos también están los diagramas de caja (boxplot), que permiten resumir algunas características de la distribución, tal como su simetría y su dispersión.

El análisis se realiza por elemento con las muestras de la base de datos según su clasificación litológica del logueo de sondajes y según su clasificación de las unidades del modelo geológico de Las Cobalteras.

4.6.1 Análisis univariable por unidades litológicas

Los histogramas (ver Anexo B: Histogramas por litología para los elementos mayores y traza) muestran que la distribución de los elementos es variada, en algunos elementos se asemeja a una distribución lognormal y en otros a una distribución asimétrica. Los elementos que presentan asimetría en sus distribuciones, ya sea positiva o negativa, la justificarían por diferencias litológicas, es decir, la distribución de un elemento en cierta unidad litológica estaría más a la izquierda o derecha de la distribución de otra unidad litológica. Esto último puede tratarse como la existencia de más de una población en la distribución de ciertos elementos, las que coincidirían con las unidades litológicas, por un lado, la población de las rocas metamórficas (Esq/Met) y por el otro, el de las unidades intrusivas (D/M y P.A).

Entre los elementos que destacan diferencias en sus distribuciones por la litología de las muestras, están, en los mayores, Ca, K, Mg, Na, Ti (ver Figura 4.27) y, en los traza, Be, Bi, Ce, Cr, Ga, La, Mn, Sc, Sr, Th, U y V. Dado que la cantidad de muestras de brecha hidrotermal es menor versus las demás litologías, no es evidente su distribución, pero los elementos que más diferenciación reflejan en la distribución para esta unidad litológica, respecto a las otras unidades, son As y Co.

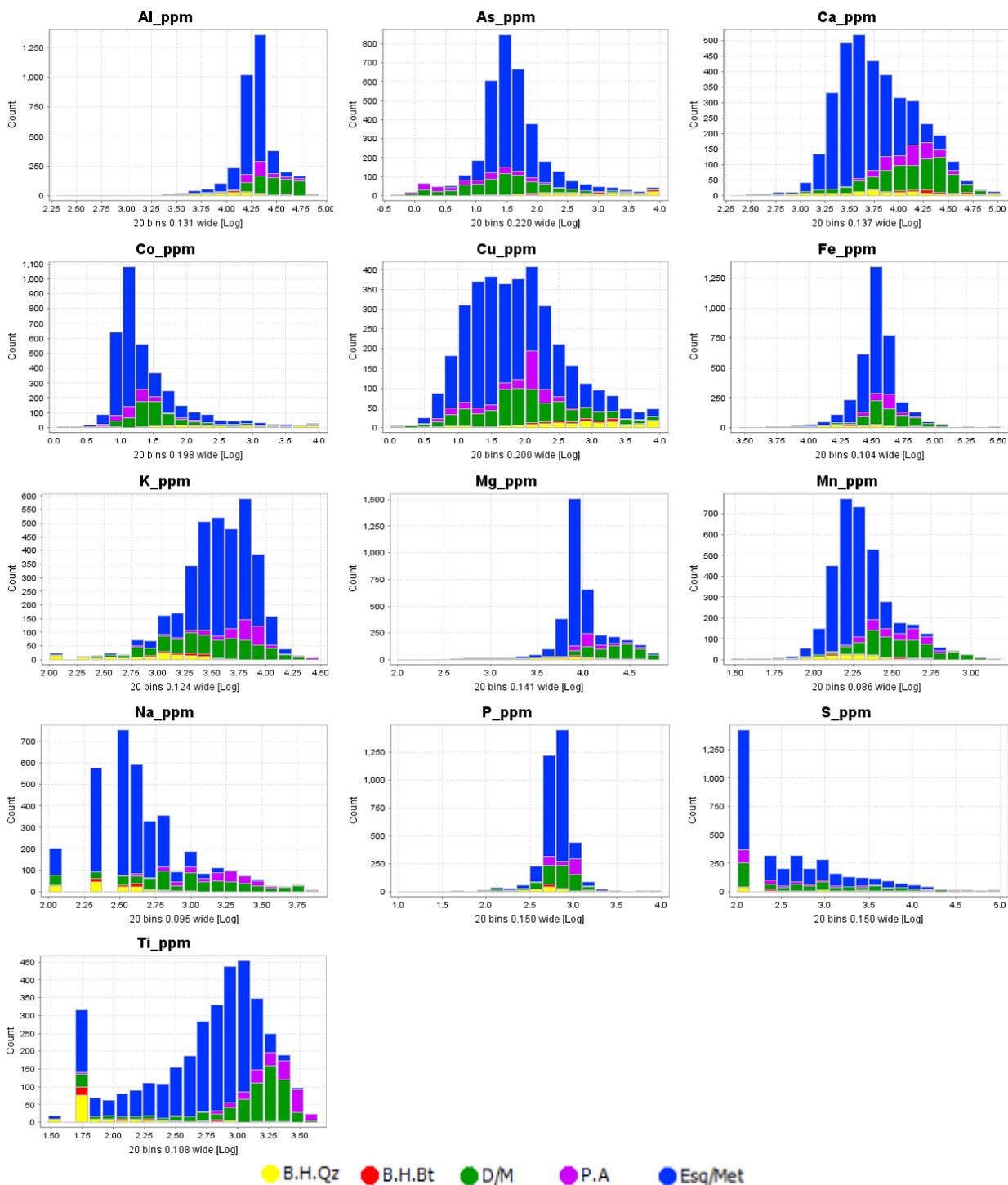


Figura 4.27. Histogramas [log] de elementos mayores y de interés, por litología.

Los gráficos de caja (boxplot) se caracterizan por mostrar una caja, una línea, un punto y dos bigotes, uno inferior y otro superior. Dentro de la caja se encuentran los valores entre el primer cuartil y el tercero (Q1 a Q3), la línea corresponde a la mediana, el punto es la media, el bigote inferior parte del 5% de los datos, y el bigote superior al 95% de estos (percentile mode). Los datos graficados como círculos son aquellos que se encuentran fuera del rango entre 5% y 95%, serían los outliers. Mientras más alargada la caja y los bigotes, más dispersa es la distribución de los datos.

Los boxplots (ver Anexo B: Boxplots por litología para los elementos mayores y traza) muestran que en todos los elementos existe algún grado de traslape entre las concentraciones de las muestras por cada litología, esto considerando los bigotes superior e inferior de las cajas, que corresponde al 90% de los datos para cada clase. La diferencia en las cantidades de muestras para cada litología de la clasificación puede influir en la distancia de los bigotes y outliers. Para visualizar una diferenciación en las concentraciones de los elementos entre las clases litológicas, se priorizará la media y el rango intercuartil ($IQR = Q3 - Q1$), correspondiente a la caja, y luego los respectivos bigotes.

Las muestras clasificadas como B.H.Qz y B.H.Bt, correspondientes a las brechas hidrotermales, presentan mayores concentraciones de As, Co y Cu, en los elementos mayores, y de Ag, Bi, Mo y U, en los elementos traza. Comparando los diagramas de caja de este grupo frente a los de las demás clases litológicas, las brechas hidrotermales presentan las concentraciones más bajas en varios de los elementos mayores: Al, K, Mg, Na y Ti (ver Figura 4.28). Por otra parte, Los diagramas de caja de las rocas intrusivas se diferencian de las rocas metamórficas en el Ca, Na, Ti, Mg, Mn, Sr, V, donde presentan mayores valores las muestras de D/M y P.A. Mientras que, en el Be, Ce, La, Th y U, son las muestras de Esq/Met las que presentan mayores concentraciones.

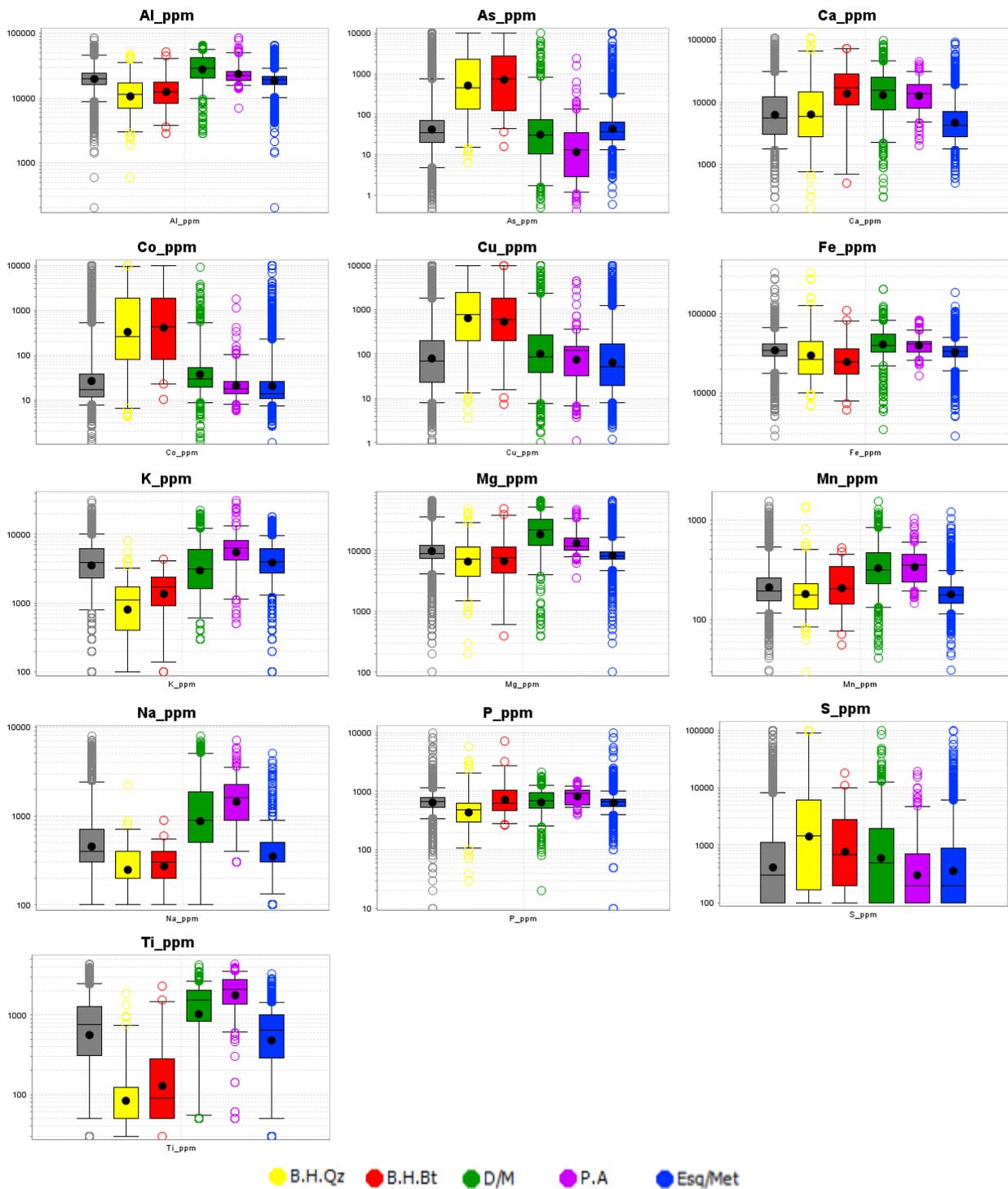


Figura 4.28. Boxplots (con eje logarítmico) de elementos mayores y de interés, por litología. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.

4.6.2 Análisis univariable por unidades geológicas

Teniendo en cuenta el análisis univariable de la base de datos geoquímicos usando la información

de las litologías del logueo de sondajes, se hace mismo análisis con la información de las unidades geológicas del modelo geológico tridimensional. Las clases para los histogramas y boxplots son las siguientes unidades geológicas: Veta, Halo, Diques y Metamórfico (Met). No se consideraron las unidades “Fault” y “OV”, debido a sus bajos números de muestras, 22 y 11, respectivamente, lo que las hace poco funcionales en este estudio.

La distribución de los elementos en estos histogramas y gráficos de caja (ver Anexo B: Histogramas y boxplots por unidad geológica para los elementos mayores y traza) es similar a los del análisis por unidades litológicas, puesto que las unidades geológicas Diques y Metamórfico coinciden, en gran parte, con las unidades litológicas Diorita (D/M), Pórfido andesítico (P.A) y Metamórfica (Esq/Met). En cuanto a las unidades geológicas Veta y Halo, la primera comparte muestras principalmente con la unidad litológica Brecha Hidrotermal (B.H.Qz y B.H.Bt) y representa, en su mayoría, a los tramos de sondajes con altas concentraciones de Cu y/o C, mientras que la segunda lo hace con muestras de las otras litologías (D/M, P.A y Esq/Met), las que se caracterizan por estar en contacto o próximas a los tramos de brechas hidrotermales y/o vetas, es decir, las rocas cercanas a las de la unidad Veta. De esta manera, el propósito mayor de usar la clasificación de las unidades geológicas recae en observar y describir la distribución de la unidad Halo respecto a las demás.

En la Figura 4.29 se presentan dos gráficos circulares con la clasificación litológica de las muestras que conforman las unidades geológicas Halo y Veta, respectivamente. Como se mencionó, la unidad Halo está compuesta, en su mayoría, por muestras de las tres litologías que no son brechas hidrotermales, principalmente por rocas dioríticas y metamórficas. A su vez, la unidad Veta está compuesta por casi la totalidad de las muestras de brechas hidrotermales, aunque una fracción considerable corresponde a muestras con litologías de las unidades intrusivas y metamórfica. Esto último se puede deber a las concentraciones en los elementos de interés (cobalto y cobre) de esos tramos de sondajes o continuidad espacial de tramos con brecha hidrotermal. Según la información del logueo de sondajes, la mineralización de cobre y cobalto, tanto sulfuros como oxidados, se puede encontrar en tramos de todas las litologías.

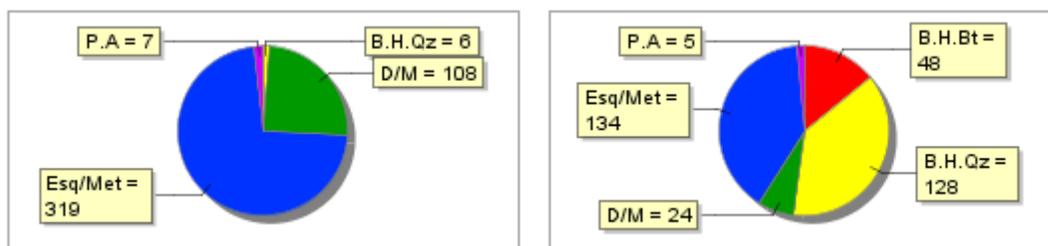


Figura 4.29. Gráficos circulares con la clasificación litológica de las muestras que conforman las unidades geológicas Halo (izquierda) y Veta (derecha).

Los histogramas de la Figura 4.30 muestran que la distribución de la unidad Halo se asemeja a la de la unidad Veta, pero con una forma menos platicúrtica, con centros más a la derecha (valores más altos) en elementos mayores como el Al, K y Mg, y con centros más a la izquierda (valores más bajos) en elementos como el Co y As.

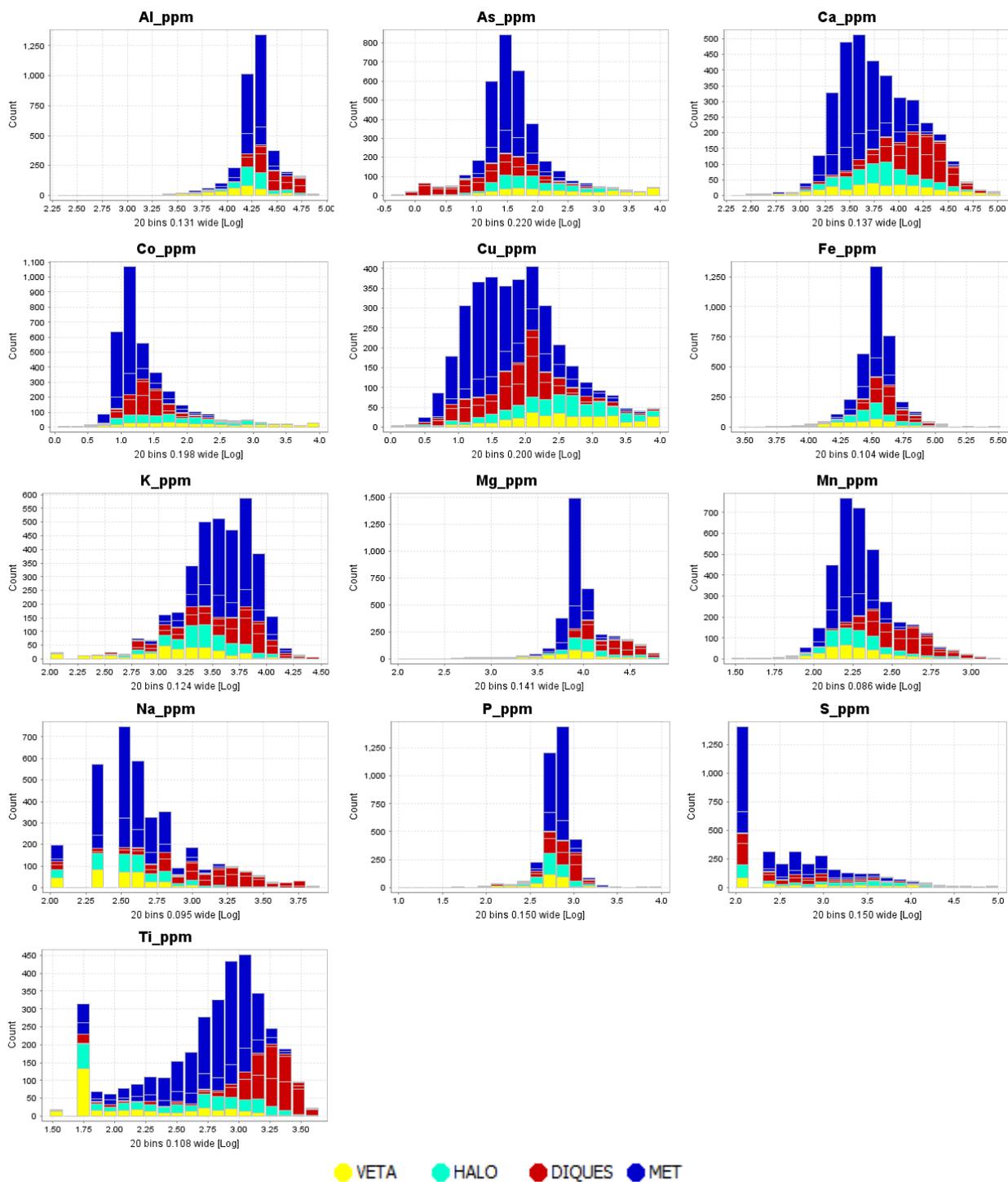


Figura 4.30. Histogramas [log] de elementos mayores y de interés, por unidad geológica.

Al igual que con los boxplots por unidad litológica, existe traslape entre los diagramas de caja de todas las unidades geológicas, de modo que, al momento de comparar las concentraciones entre unidades, se priorizará la media y el rango intercuartil ($IQR = Q3 - Q1$), correspondiente a la caja, y luego los respectivos bigotes.

Los boxplots de la Figura 4.31 muestran que, en varios elementos, la unidad Halo presenta concentraciones intermedias entre la unidad Veta y las demás (Diques y Metamórfico). La unidad Veta se caracteriza por concentraciones altas de Co, Cu y As, y concentraciones bajas de Al, K, Mg, Na y Ti. La unidad Diques presenta concentraciones altas de Al, Ca, K, Mg, Mn, Na y Ti, y bajas concentraciones de Co, Cu y As, mientras que, la unidad Metamórfico le sigue en las concentraciones altas de Al, K, Na y Ti, y en las bajas de Co, Cu y As. De esta manera, la unidad Halo se distingue por sus valores de Co, Cu y As, más altos que los de las unidades Diques y Metamórfico, pero más bajos que los de la unidad Veta. En cambio, con los elementos de Al, K, Na y Ti, la unidad Halo tiene medias más altas que las de la unidad Veta, pero más bajas que las de las unidades Diques y Metamórfico.

cumplir ciertas condiciones propicias para el análisis.

Los histogramas de frecuencia (ver Anexo B) evidencian que existen ciertos elementos cuyas concentraciones son casi constantes, es decir, la mayoría de las muestras recae en un solo rango del eje de la abscisa, que representa los porcentajes de concentración en logaritmo de los elementos. Esto también se puede observar en los estadígrafos de rango y rango intercuartil cercanos a cero de los gráficos de caja (ver Anexo B). De esta manera, se descarta el primer grupo de elementos conformado por Au, B, Re y Ta. Este grupo representa a los elementos que tienen la mayor cantidad de datos de concentraciones iguales al límite de detección inferior, superándose el 90% de muestras en cada elemento, lo cual explicaría lo que se observa en sus histogramas y boxplots. Además, algunos elementos no tienen datos muy útiles para ser considerados en este estudio, ya que más de la mitad (>56%) de ellos tienen concentraciones que coinciden con su límite de detección inferior siendo descartados los siguientes elementos: Cd, Hg y Se.

De este modo, la base de datos geoquímicos para el análisis de componentes principales (ACP) consta de un total de 44 elementos (por cada muestra), 13 serán considerados en el grupo de elementos mayores y de interés (Al, As, Ca, Co, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S, Ti), y, el resto en el grupo de elementos traza.

El ACP es una técnica multivariable que busca reducir el número de variables observadas en un número menor de variables artificiales (componentes principales) que representan la mayor parte de la varianza en un conjunto de datos determinado. Asimismo, permite describir y analizar las relaciones entre varias variables, jerarquizando la información en factores ortogonales.

Los componentes principales son transformaciones lineales del grupo de variables correlacionadas y se denominan PC1, PC2, PC3, etc., con el número de componentes principales que pueden calcularse igual al número de variables seleccionadas. El PC1 es el componente principal que más varianza abarca del conjunto de datos, decreciendo el porcentaje de varianza a medida que avanza el número del componente principal.

4.7.1 Elementos mayores

En la Figura 4.32 se muestra que los 4 primeros componentes principales (PC1, PC2, PC3 y PC4) explican un 72,9% de la varianza. Mismos PC son los que tienen valores propios asociados mayores a 1 (eigenvalues mayores a 1), mientras que en los demás son inferiores a 1. A mayor eigenvalue, mayor es la proporción de varianza que representa el componente principal (ver Anexo: Análisis de componentes principales).

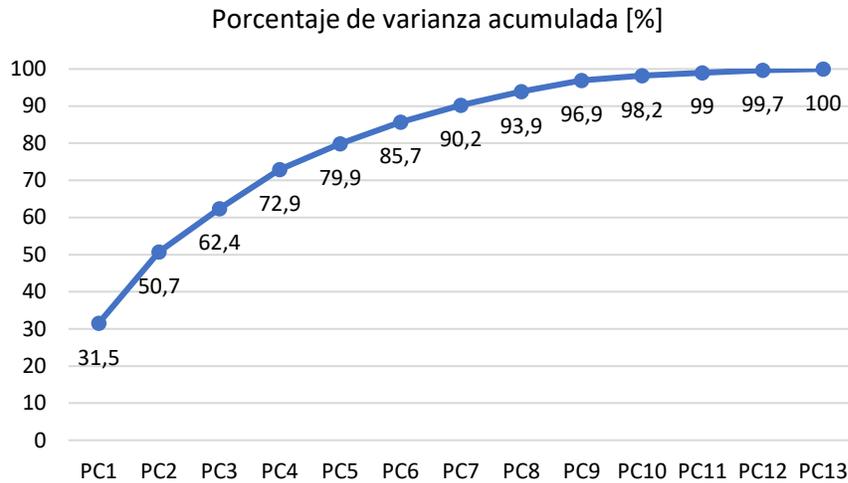


Figura 4.32. Varianza acumulada según ACP de elementos mayores y de interés.

Los coeficientes de correlación entre los elementos mayores indican que no existe una fuerte correlación que permita agrupar elementos fácilmente (ver Anexo: Análisis de componentes principales), sino más bien son algunos pares de elementos que resaltan frente a la mayoría de los coeficientes de correlación que no superan el $|0,5|$ (ver Tabla 4.8). El par de elementos que presenta la mayor correlación corresponde a As-Co, con un coeficiente de 0,91. Los siguen los pares de Al-Mg y Mg-Mn, con coeficientes de correlación de 0,83 y 0,76, respectivamente. El primer par (As-Co) se correlaciona con el PC2, mientras que los otros 2 pares o 3 elementos (Al, Mg y Mn) se correlacionan con el PC1.

Tabla 4.8. Pares de elementos, entre mayores y de interés, con coeficientes de correlación superiores a 0,5, en orden decreciente.

Elementos	Coefficiente de correlación
As-Co	0,91
Al-Mg	0,83
Mg-Mn	0,76
Ca-Mn	0,67
Al-Mn	0,61
K-Ti	0,59
Na-Ti	0,59
Al-Fe	0,58
Mn-Ti	0,58
Al-Na	0,57
Al-Ti	0,55
Ca-Mg	0,54
Cu-S	0,54
Fe-Mg	0,53
Fe-S	0,53

Los círculos de correlación muestran una proyección de la esfera de las variables en dos componentes principales, representadas por un punto dentro de un círculo unitario. Si la distancia entre la proyección de las variables es baja entonces su correlación es alta, sin embargo, no siempre la proximidad en las proyecciones implica una proximidad en la esfera, a menos que las proyecciones se encuentren cerca de la circunferencia del círculo.

En la Figura 4.33 se presentan los círculos de correlación de los cuatro primeros componentes principales en sus ejes. Se destaca el grupo de elementos conformado por As, Co, Cu y S, los cuales muestran una relación positiva con el PC2, pero diferente con el PC3, separándose en parejas, As-Co y Cu-S, con un comportamiento contrario entre los dos. El grupo de Al, Mg, Mn, Ti, Na, Ca, Fe y K tiene una correlación baja con el grupo anterior y se asocian más con el PC1, sobre todo el Al que está fuertemente correlacionando con el primer componente. Los elementos Mg y Mn muestran un comportamiento conjunto en los distintos círculos de correlación, manteniendo sus proyecciones muy cercanas. Por su parte, el P parece no tener un comportamiento claro y no se correlaciona con ninguno de los 4 factores, solo cercanía con las proyecciones de Na en los círculos de correlación de los componentes PC2-PC4 y PC3-PC4.

Dentro del grupo de Al, Mg, Mn, Ti, Na, Ca, Fe y K, al observar sus comportamientos con los otros componentes, se pueden diferenciar con el PC4, por una parte, la relación positiva de K, Na y Ti, y por otra, la relación inversa de Ca, Mg y Mn con el cuarto componente. El Al se muestra ajeno con los otros factores y proyecciones, manteniendo su fuerte correlación con el PC1. A su vez, el Fe se asocia con el Cu y S al observar sus relaciones con el PC3 (ver Figura 4.33).

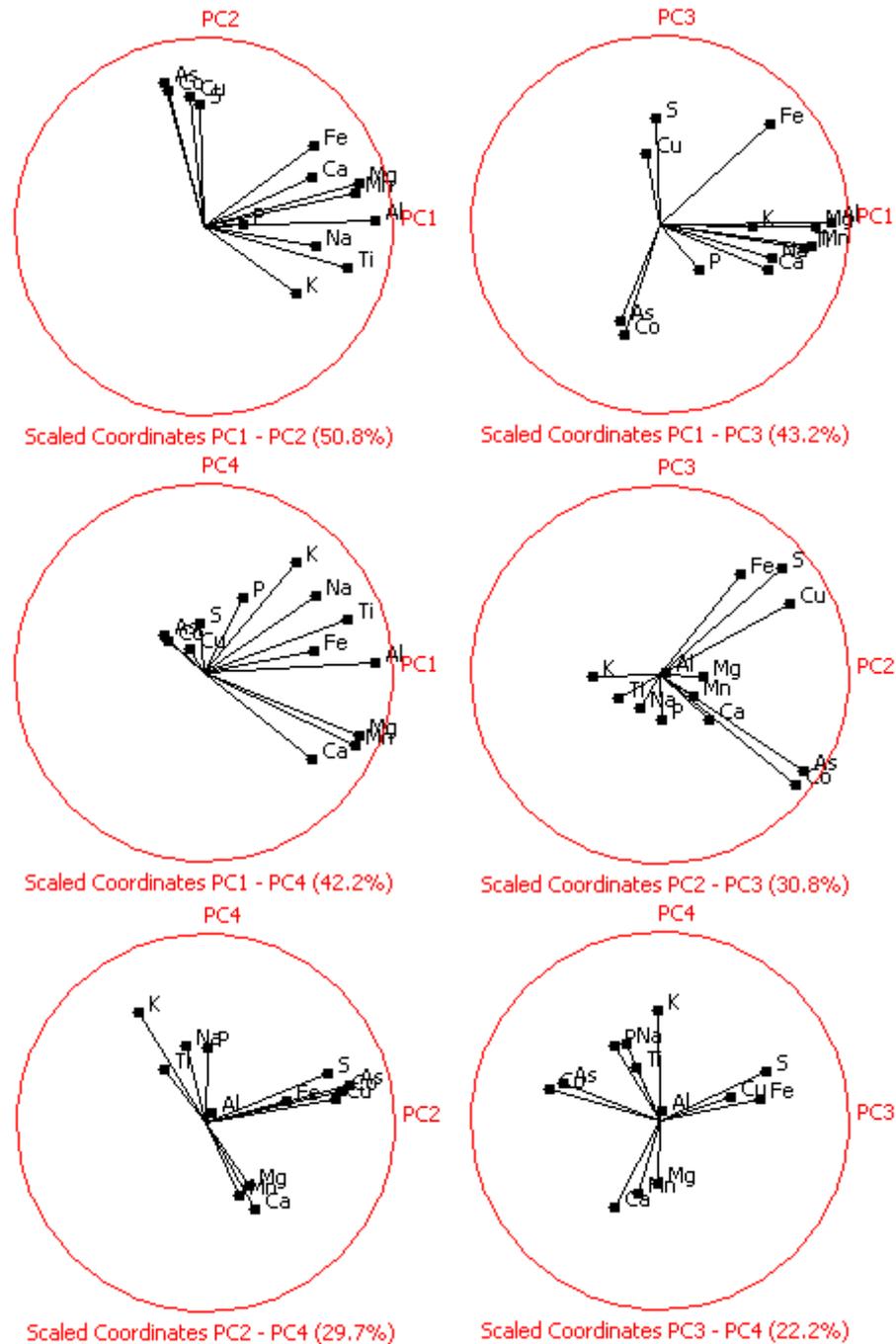


Figura 4.33. Círculos de correlación para elementos mayores y de interés, en todas las muestras (todas las unidades litológicas).

Los diagramas de dispersión (ver Figura 4.34) entre los primeros cuatro factores resaltan que la separación de las muestras es gran parte por su litología, es decir, el comportamiento que tienen las muestras con los componentes principales se da en grupos que coinciden con las unidades litológicas mapeadas. Las muestras de brechas hidrotermales son las que presentan mayor dispersión en los distintos gráficos de dos ejes, seguidas por las muestras de la unidad diorita.

El grupo que presenta los valores más altos dentro del PC1 corresponde principalmente a las unidades diorita y pórfido andesítico, las que abarcan la mayor parte de las muestras ubicadas en los valores superiores a cero de PC1 (ver Figura 4.34). Mientras que el grupo que corresponde a los valores bajo cero de PC1 se caracteriza mayormente por la unidad metamórfica, ya que las muestras de brechas hidrotermales, que también se ubican en los valores bajos y negativos de PC1, se ven distanciadas por la segunda componente, teniendo valores altos de PC2. Algunas muestras de la unidad metamórfica y diorita también presentan valores altos de PC2, asociándose al grupo de las brechas hidrotermales.

El tercer componente, como fue mencionado más atrás, separa al grupo de elementos (As, Co, Cu y S) que se correlacionan con el PC2, por lo tanto, los datos con valores altos de PC2, que son principalmente de brechas hidrotermales, se dividen con el PC3. Una parte del grupo toma valores sobre cero y otra toma valores bajo cero de PC3. Por su parte, el cuarto componente hace algo similar sobre los datos con valores positivos de PC1, que mayormente son muestras de D/M y P.A, y una parte de Esq/Met. Una parte de esos datos presenta valores sobre cero de PC4 y la otra, bajo cero (ver Figura 4.34).

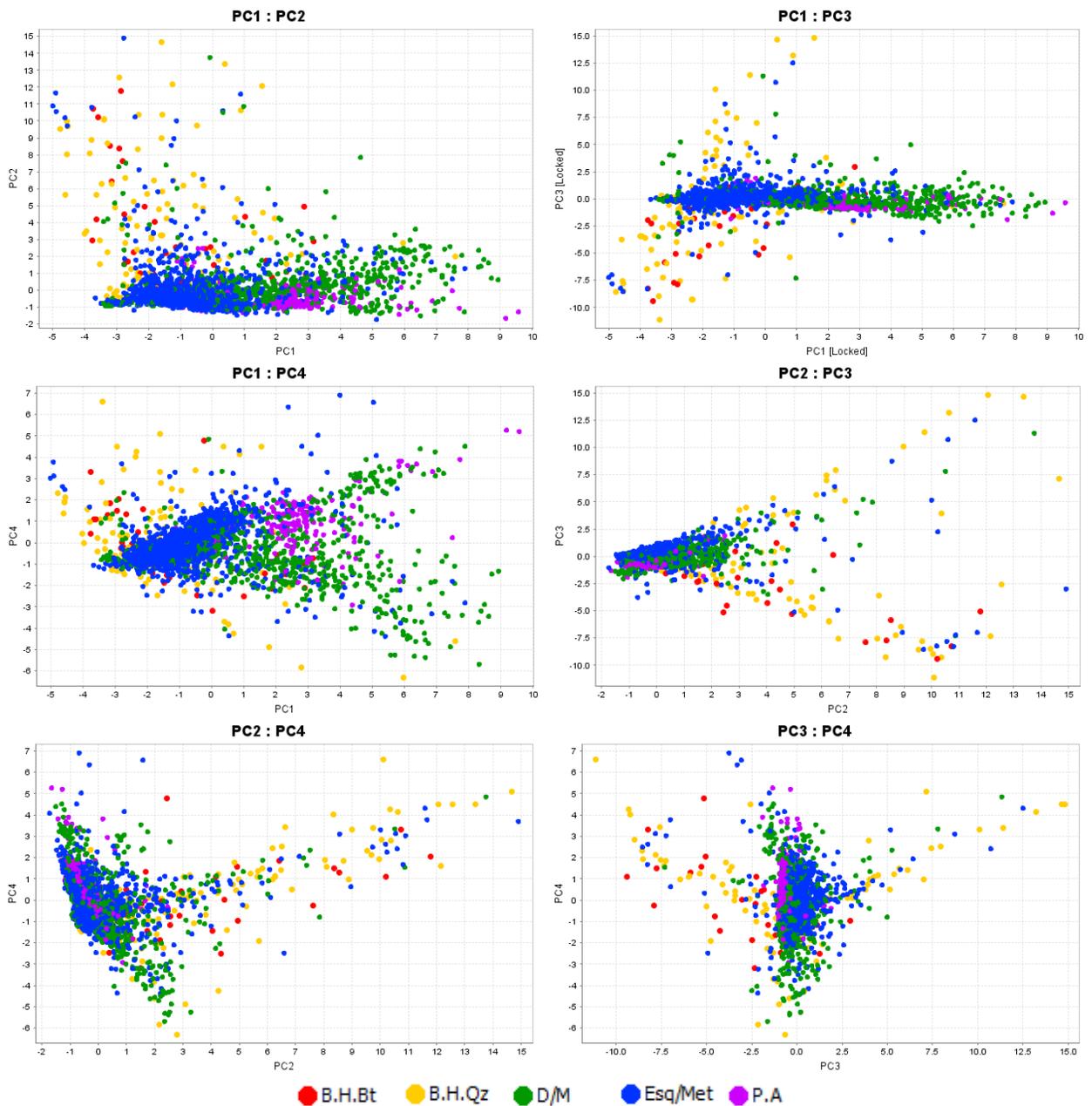


Figura 4.34. Diagramas de dispersión entre los componentes PC1, PC2, PC3 y PC4 del ACP de elementos mayores y de interés. Los colores indican su clasificación litológica del mapeo geológico.

Según Cárdenas (2015), el comportamiento conjunto de los elementos mayores puede reflejar directamente la mineralogía de la cual provienen. Por tanto, en este estudio se relacionaría con la composición de aquellos minerales que son disueltos por agua regia.

El grupo de elementos Co, As, Cu y S, asociados con el segundo factor, es capaz de separar las muestras en dos grupos: las que son ricas en los elementos de interés y las que son pobres. Esto puede reflejar el control mineralógico que ejercería la mineralogía de mena que es altamente

soluble en agua regia: sulfuros de cobre, sulfoarseniuros cobalto, oxidados de cobre y de cobalto. Además, la separación de los datos ricos en Co-Cu (elementos correlacionados con el PC2) coincide justamente con la clasificación de las unidades geológicas, siendo Veta y Halo como las principales unidades con valores sobre cero de PC2, donde a medida que aumentan los valores de PC2, aumenta la proporción de muestras clasificadas como veta sobre las de halo (ver Figura 4.35).

Para el grupo de elementos Al, Mg, Mn, Ti, Na, Ca, Fe y K, asociados con el primer factor es más complicado encontrar un comportamiento que divida a las muestras más allá de su propia clasificación litológica y de las proporciones de Al, que es elemento con mayor correlación (0,94) con el PC1, pero que no permite vincular a una mineralogía más específica. Esto se explicaría por las múltiples proveniencias de estos elementos, como los distintos silicatos solubles (total o parcialmente) en agua regia, carbonatos, óxidos e hidróxidos, entre otros. Sin embargo, el cuarto componente al tener asociado sus valores sobre cero con los elementos K, Ti y Na, y sus valores bajo cero con los elementos Ca, Mg y Mn, puede entregar información de un posible control mineralógico en los datos más altos y bajos, respectivamente. De esta manera, el grupo de K, Ti y Na podría reflejar un control de minerales como biotita, micablanca (solución solida moscovita-paragonita) y/o sericita, óxidos de titanio como ilmenita y rutilo. Por otro lado, el grupo de Ca, Mg y Mn puede reflejar un control de minerales como carbonatos de Ca y Mg, clorita y óxidos de Mn. Para el caso de Fe, cuando su proyección en los círculos de correlación se asocia con la de S y Cu, puede estar reflejando un control mineralógico que ejercerían sulfuros como la calcopirita y pirita. En cambio, cuando la proyección de Fe no se asocia a S y Cu, sino que más cercana al grupo de K, Ti y Na, puede deberse más a un control de minerales como los óxidos e hidróxidos de hierro (magnetita, hematita y goethita), o de silicatos solubles en agua regia, como la biotita y clorita, más ricos en Fe que en Mg.

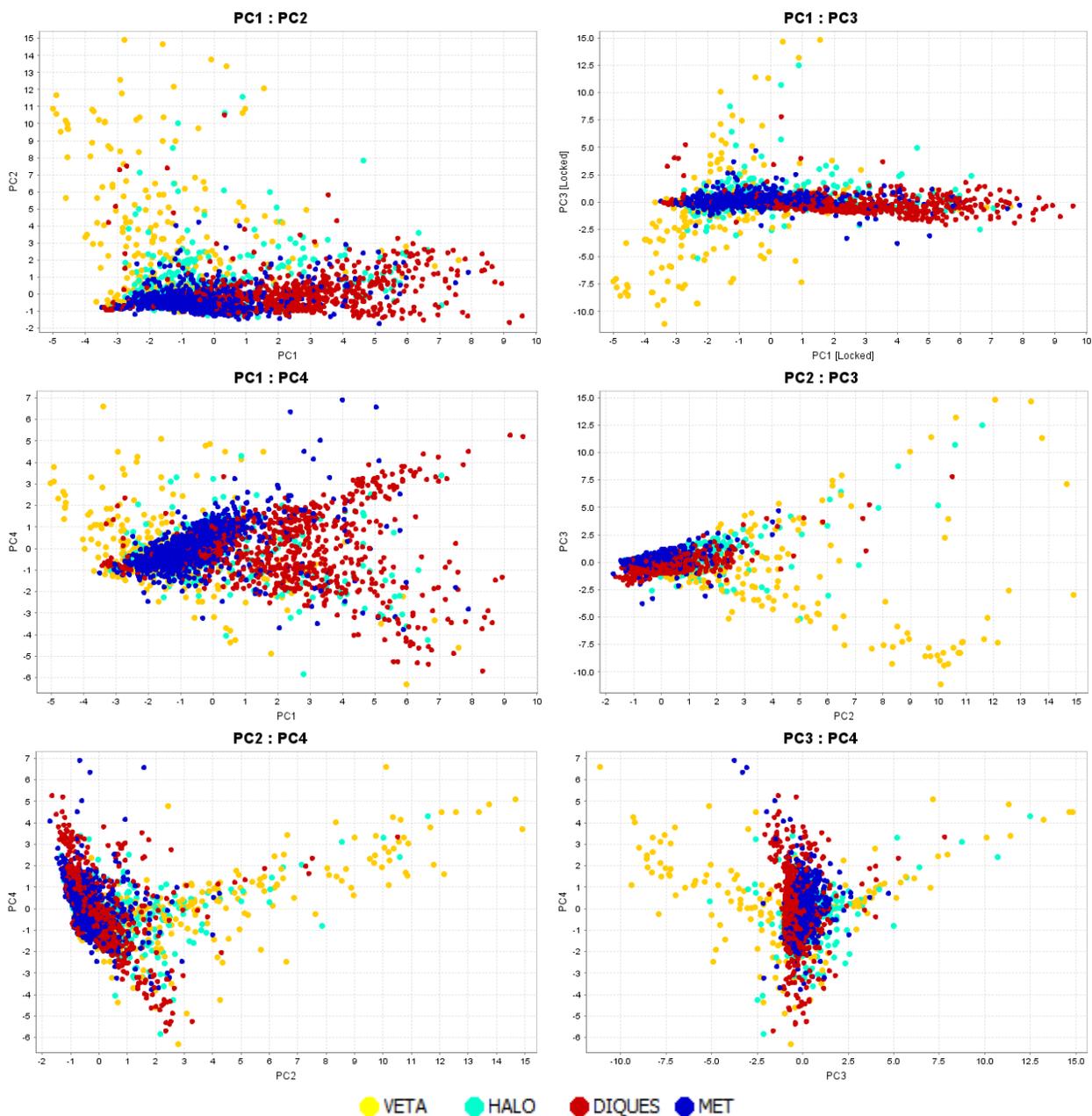


Figura 4.35. Diagramas de dispersión entre los componentes PC1, PC2, PC3 y PC4 del ACP de elementos mayores y de interés. Los colores indican su clasificación por unidades geológicas.

4.7.2 Elementos traza

El análisis de componentes principales de elementos traza cuenta con los datos geoquímicos de 31 elementos. Gran parte de estos elementos parecen distribuirse de forma más aleatoria, no siendo correlacionables fácilmente, aunque algunos componentes permiten mayor separación y/o agrupación de las muestras. El comportamiento errático de la mayoría de los elementos traza se ve reflejado en la cantidad de factores necesarios para explicar la varianza. En la Figura 4.36 se muestra que el porcentaje de varianza acumulada por las primeras 4 componentes principales solo

alcanza el 52,3%. Además, los valores propios de los componentes (eigenvalues) son mayores a 1 desde el primer al noveno factor y solo pasan a estar bajo la unidad a partir del décimo factor. Hay que recordar que la cantidad de componentes es igual al número de variables seleccionadas para el análisis.

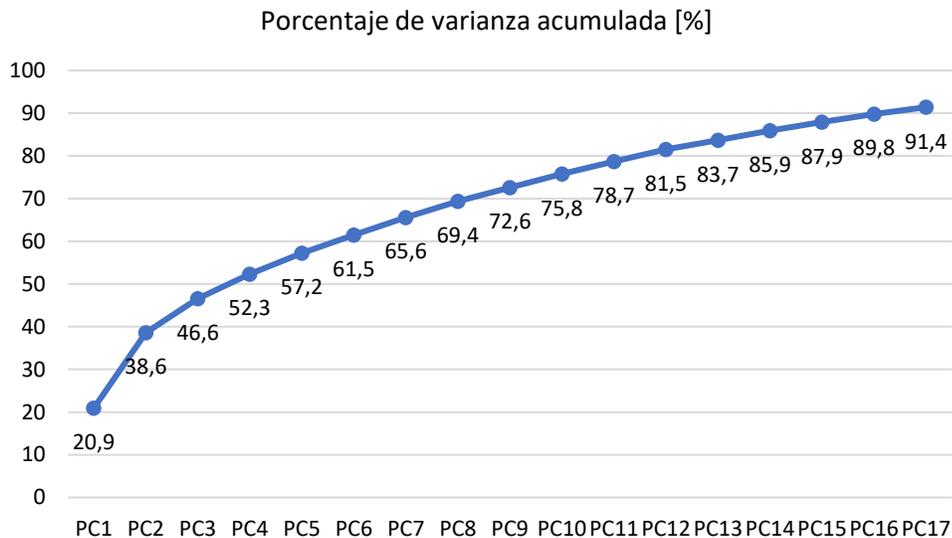


Figura 4.36. Varianza acumulada según ACP de elementos traza.

En la Figura 4.37 se presentan los círculos de correlación de los cuatro primeros componentes principales en sus ejes. A pesar de la gran cantidad de variables, existen elementos que se relacionan entre sí y con los primeros factores. Sobresale la ausencia de un grupo de elementos que se asocie directamente con el PC1, sin embargo, existe el grupo conformado por Cs, Rb, Tl, Ba y Sn, que muestran una relación fuertemente inversa con el PC1. El segundo factor muestra una relación positiva con el grupo de Ga, Sc, V, Cr, Ge y Sr, y una relación negativa con el grupo de Th, Ce, La y Be. Por su parte, el tercer componente se asocia con los elementos Te, Ni y Ag. Los demás elementos se relacionan levemente con uno o más factores, lo que hace difícil asociarlos a alguno de los grupos de elementos que presentan mayores correlaciones con los primeros componentes.

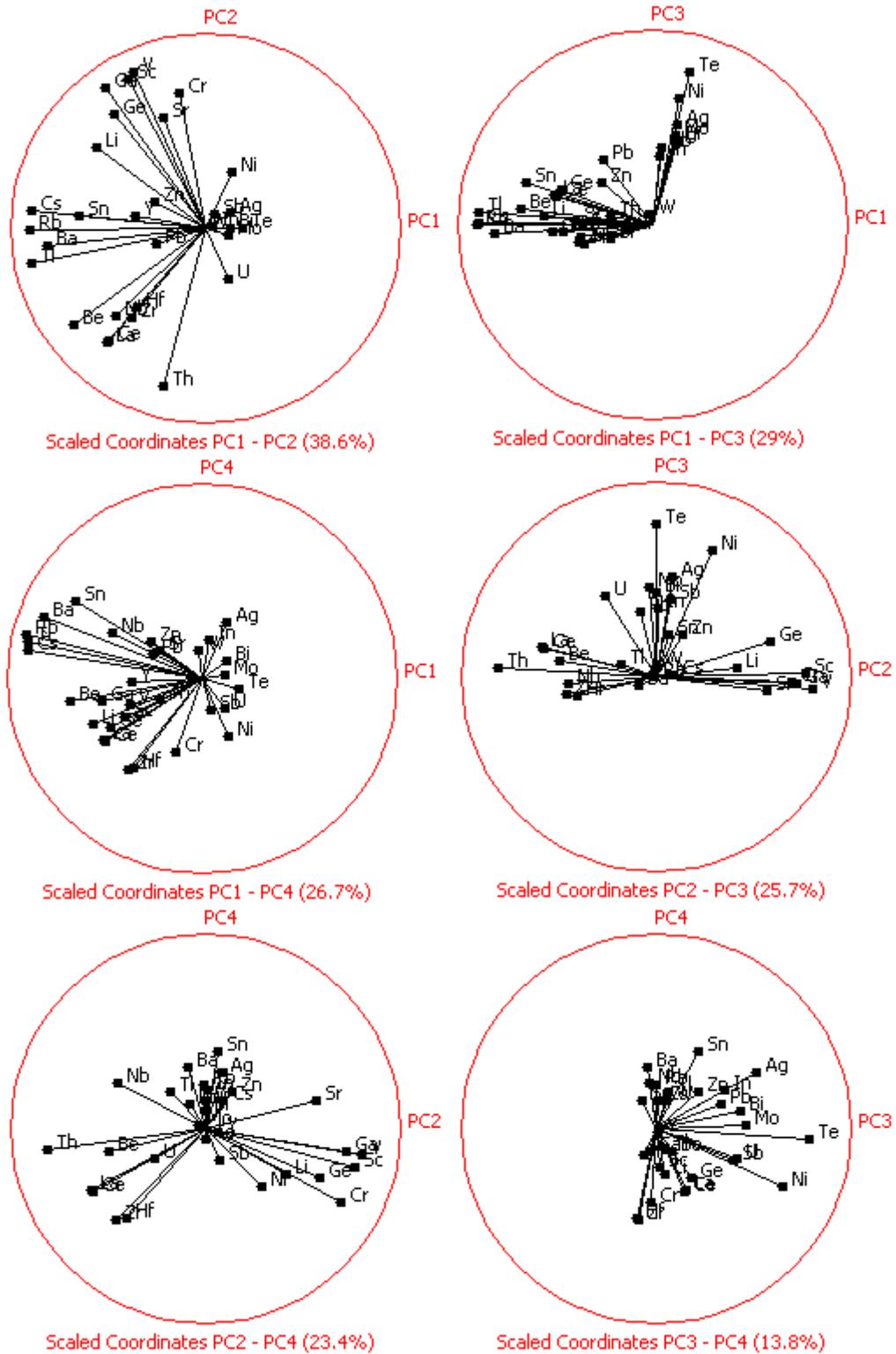


Figura 4.37. Círculos de correlación para elementos traza en todas las muestras (todas las unidades litológicas).

Los diagramas de dispersión de la Figura 4.38 enseñan que la separación de las muestras se puede dar en grupos que coinciden con las litologías del mapeo de sondajes, sin embargo, el

comportamiento entre los componentes principales y la litología de los datos es mucho más aleatorio que en el ACP de elementos mayores. Ningún factor por sí solo es capaz de clasificar los datos por unidad litológica, incluso ya el cuarto factor no muestra ninguna correlación con la litología de las muestras, lo que habla de la aleatoriedad y dispersión de los elementos traza. No obstante, al utilizar los dos componentes que abarcan la mayor proporción de variabilidad del conjunto de datos, es posible tener una clasificación según la litología mapeada. Los valores más altos de PC1 corresponden a las brechas hidrotermales, mientras que el resto a las unidades intrusivas y metamórfica. Por su parte, los valores de PC2 sobre cero corresponden principalmente a los diques de diorita y pórfido andesítico, y los valores bajo cero a las muestras de roca metamórfica (ver Figura 4.38).

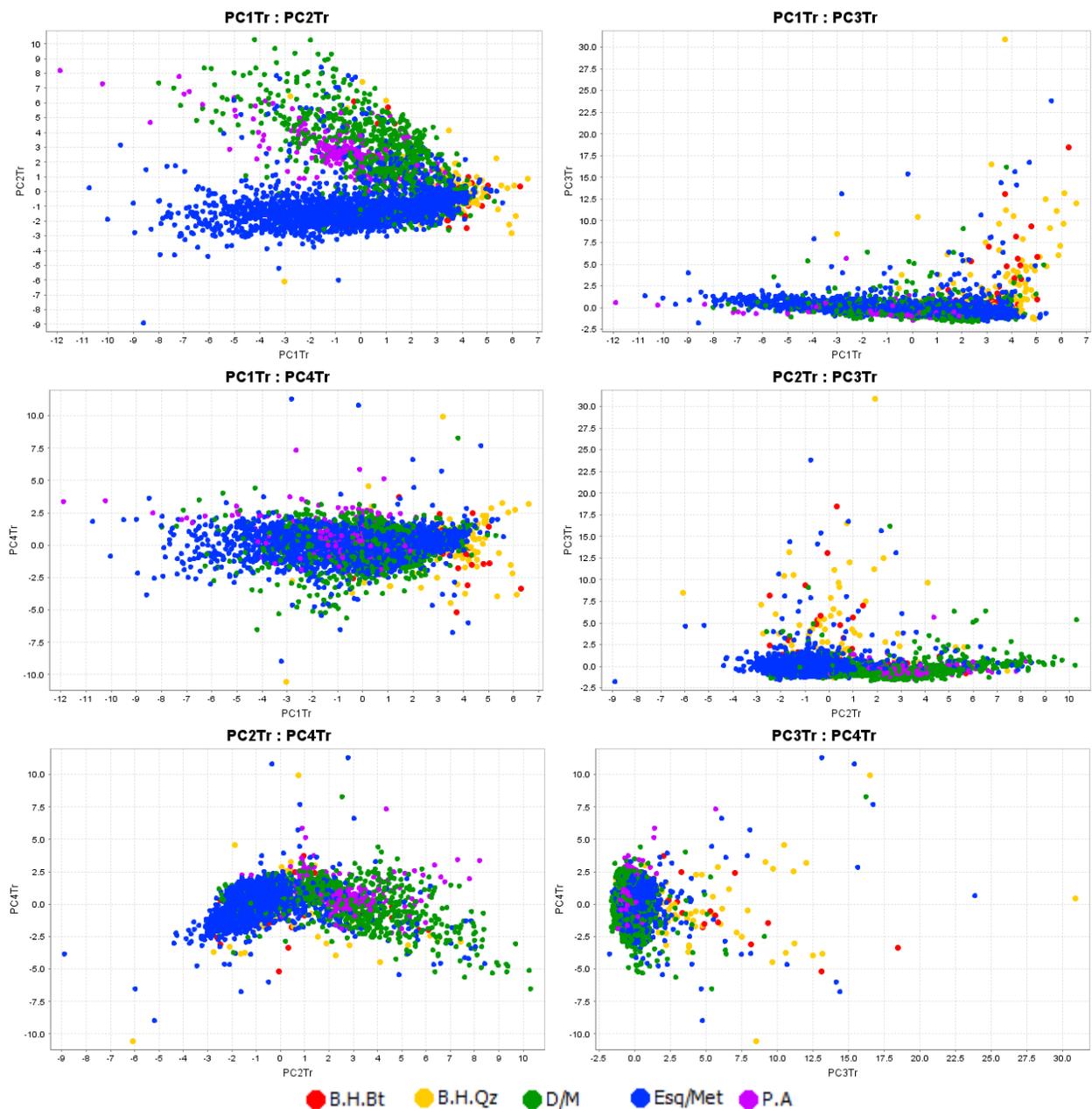


Figura 4.38. Diagramas de dispersión entre los componentes PC1, PC2, PC3 y PC4 del ACP de elementos traza. Los colores indican su clasificación litológica del mapeo geológico.

4.8 Mineralogía automatizada TIMA-TESCAN

El análisis de mineralogía automatizada y cuantitativa fue realizado por el Centro de Estudios Mineralógicos Geoatacama (CEM Geoatacama). Este centro cuenta con un microscopio electrónico de barrido (SEM por sus siglas en inglés, Scanning Electron Microscopes) marca TESCAN con el software mineralógico TIMA (TESCAN Integrated Mineral Analyzer) incorporado, que permite realizar barridos completos o puntuales, e identificar todas las fases minerales que constituyen la muestra, ya sea de roca o pulverizadas.

Un SEM es un tipo de microscopio electrónico que produce imágenes de una muestra escaneando la superficie con un haz de electrones enfocado. El equipo cuenta con diferentes detectores que recogen los electrones generados de la interacción con la superficie de la muestra para crear una imagen que refleja las características superficiales de la misma, pudiendo proporcionar información de las formas, texturas y composición química de sus constituyentes.

Las muestras de testigos que cuentan con análisis de mineralogía TIMA-TESCAN son pocas, siendo siete en total. Sin embargo, para este estudio se utilizan seis, debido a que una de las muestras corresponde a un tramo de sondaje con contacto de litologías diferentes, es decir, cuenta con dos litologías mapeadas y, por la definición del sistema, solo se consideran las muestras con una sola litología del logueo de sondajes.

Cada muestra (pulverizada) cuenta con información para dos rangos de tamaño de partícula, dados por las mallas de tamizaje <#70 y <#100. Se utilizan los datos del análisis en partículas con tamaño <#70 (tamaño de grano <210 μm).

4.8.1 Depuración de base de datos TIMA-TESCAN

Al igual que en la base de datos geoquímicos, en la base de datos de mineralogía TIMA-TESCAN se eliminaron los minerales que, en todos sus registros, este fuese cercano a cero (<0,1%), si en alguna muestra registraba sobre 0,1%, no se eliminaba. De esta manera, nueve minerales fueron eliminados: anortita; silicato-Fe; circón; epidota; (Co,Ni,Fe)AsS; arsenopirita; crisocola; titanita; calcosina/digenita.

De esta manera, la base de datos mineralógica consta de 6 muestras con datos de concentración para 25 minerales pertenecientes a 9 grupos (ver Tabla 4.9), cruzados con la base de datos geoquímicos del análisis ME-MS41 e información de mapeo: litología, alteración, zona mineral e intensidad de presencia de minerales

Tabla 4.9. Minerales* por grupo mineral identificados en la base de datos TIMA-TESCAN.

Grupo	Minerales
Tectosilicatos	cuarzo, albita, andesina, feldespato-K, oligoclasa
Filosilicatos	clorita, moscovita/illita, arcillas de Al, biotita
Inosilicatos	piroxeno, anfíbol
Ciclosilicatos	turmalina
Sorosilicatos	allanita (Ce)
Silicatos	silicato Cu-Fe
Sulfuros	pirita, calcopirita, cobaltita
Óxidos	rutilo/anatasa, hematita/magnetita, ilmenita, Ox Co (Mn,As), (Cu,Co)(As,Ca)O
Carbonatos	calcita, ankerita/siderita
Fosfatos	apatito, conicalcita

*Minerales que tengan porcentajes >0,1 en al menos una muestra.

Existen minerales que poseen porcentajes <0,1 en alguna de las muestras, pero se conservaron para el análisis puesto que en otras registran porcentajes >0,1. Estos minerales son: arcillas de Al; hematita/magnetita; apatito; calcita; cobaltita; ankerita/siderita; biotita; piroxeno; anfíbol; andesina; feldespato-K; oligoclasa; ilmenita; allanita (Ce). Por otro lado, hay minerales que no tienen presencia en todas las muestras, pero de igual forma se consideraron para el análisis por sus porcentajes >0,1. Estos minerales son: Ox Co(Mn,As); silicato Cu-Fe; pirita; calcopirita; ankerita/siderita; biotita; piroxeno; feldespato-K; allanita (Ce); (Cu,Co)(As,Ca)O.

Sumado a la baja cantidad de muestras con análisis mineralógico, la distribución de estas por litología no es homogénea (ver Tabla 4.10). Las litologías del logueo de sondajes, diorita/microdiorita y brecha hidrotermal de biotita, no presentan muestras con datos de mineralogía automatizada.

Tabla 4.10. Cantidad de muestras con análisis TIMA-TESCAN por litología del logueo de sondajes.

Litología	Nº muestras TESCOAN	Códigos muestras
Esquisto/Metamórfico	3	825, 923, 1302
Pórfido andesítico	2	952, 2884
Brecha hidrotermal de cuarzo	1	19

4.8.2 Mineralogía soluble y geoquímica

De los grupos minerales que aparecen en la Tabla 4.8, los tectosilicatos serán considerados como no solubles en agua regia debido a sus bajísimos porcentajes de disolución en este tipo de digestión (Church et al., 1987; Snäll & Liljefors, 2000). Por ejemplo, las plagioclasas pueden tener, en muestras pulverizadas con tamaño de grano <10-20 µm, porcentajes de disolución de 4,5% para Na, 7,8% para Ca y 3,3% para Al. Por su parte la microclina (feldespato potásico) puede tener,

también en muestras pulverizadas con tamaño de grano <10-20 μm , porcentajes de 2,5% para K y 2,2% para Al. No obstante, la disolución en agua regia de estos mismos minerales se ve fuertemente disminuida al aumentar el tamaño de grano de las muestras pulverizadas. En las muestras con tamaño de grano <63 μm , las plagioclasas tienen porcentajes de disolución de 0,9% para Na, 2,3% para Ca y 0,7% para Al, mientras que la microclina tiene porcentajes de 0,5% para K y 0,5% para Al (Snäll & Liljefors, 2000). Por consiguiente, al comparar la granulometría de las muestras analizadas por Snäll & Liljefors y la granulometría de las muestras del análisis químico ME-MS41 (análisis del que se obtiene la principal base de datos geoquímicos para este trabajo), se concluye que el aporte de los tectosilicatos en las concentraciones de los elementos es muy bajo y este subgrupo de los silicatos será considerado como no soluble en agua regia. La preparación mecánica del análisis ME-MS41 pulveriza las muestras hasta que el 85% de las mismas tenga un tamaño de grano <75 μm , siendo esta medida superior a la de las muestras con tamaño de grano <63 μm del estudio de Snäll & Liljefors (2000).

Dado que la presencia de los tectosilicatos no se verá reflejada en la geoquímica de los análisis con digestión de agua regia, los datos de mineralogía automatizada que correspondan a este grupo mineral no se considerarán. De esta manera, la abundancia de minerales en las seis muestras con análisis TIMA-TESCAN destaca una mayoría de la turmalina y filosilicatos (clorita y mica blanca/illita) por sobre los demás minerales (ver Figura 4.39).

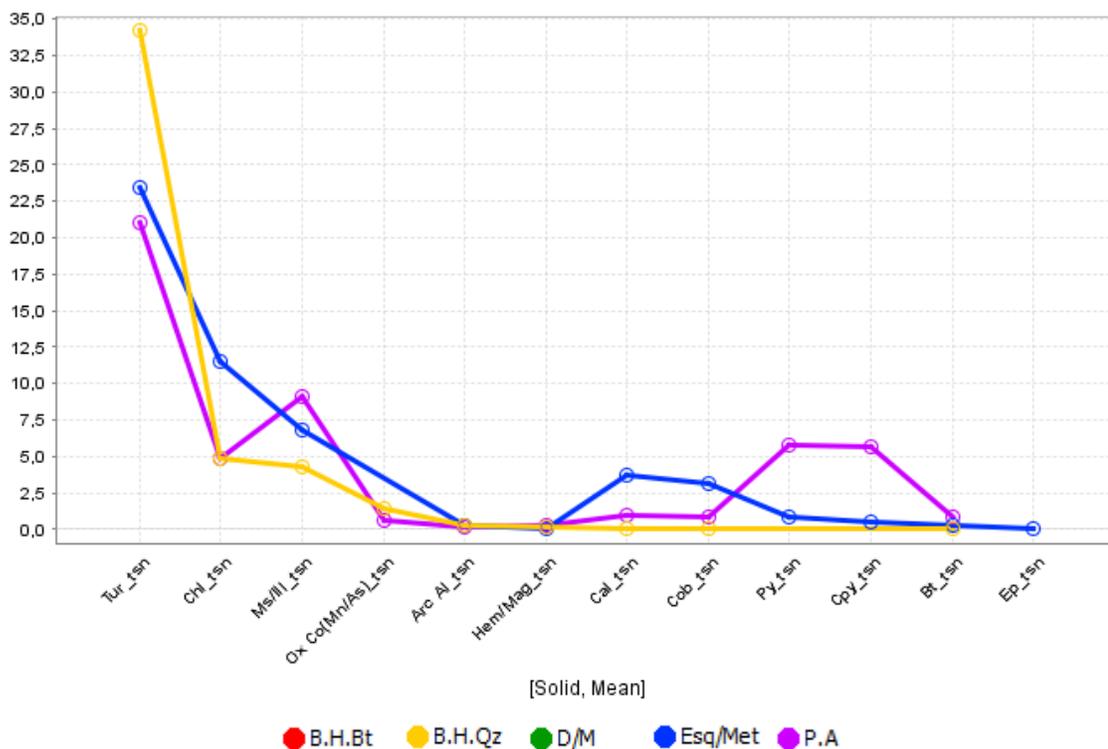


Figura 4.39. Concentraciones promedio de minerales (presentes en la planilla de mapeo de sondajes) del análisis TIMA-TESCAN por litología del logueo de sondajes.

En la Figura 4.40 se observan las proporciones minerales de las seis muestras. Los minerales que se muestran corresponden a los de interés para la alteración hidrotermal y mineralización de mena

(según los informes y planillas de logueo de Baltum). También se incluyen otros minerales solubles en agua regia como ilmenita y rutilo por ser fuentes de Ti. Por último, se agrega a la albita (tectosilicato) en este grupo de minerales debido a que está presente en todas las muestras y con concentraciones a considerar (concentración promedio de 5,99%, con un valor mínimo de 1,67% en la muestra 952 y máximo de 20,22% en la muestra 1302). Los minerales más abundantes, que superan el 1% de concentración entre todas las muestras, son, en orden decreciente, turmalina, clorita, moscovita/illita, albita y calcita, seguidos por los sulfuros, cobaltita, pirita y calcopirita (py y cpy no aparecen en todas las muestras). El único mineral que también tiene una media de concentración >1% y no aparece en la Figura 4.40, es el cuarzo, mineral que es totalmente insoluble en agua regia y que, además, corresponde al más abundante en las 6 muestras con un 44,16% de concentración promedio.

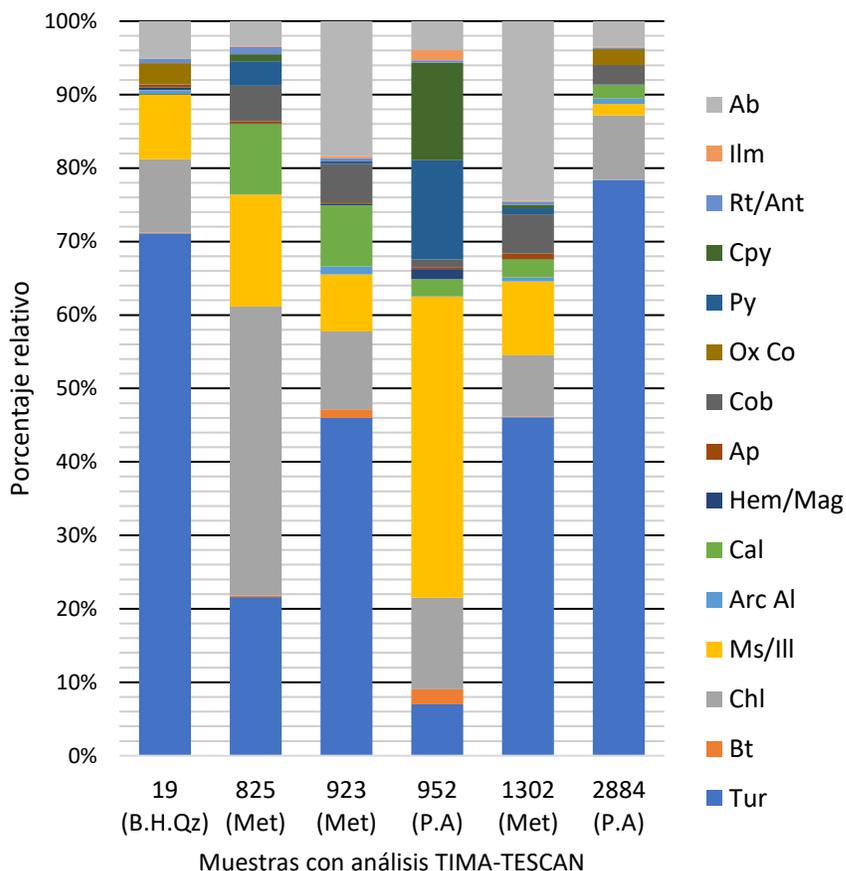


Figura 4.40. Proporciones relativas de minerales solubles y parcialmente solubles por muestra. Minerales de interés para alteración y mineralización con promedios de concentración >0,1% entre las seis muestras.

La turmalina es un mineral del que no se tiene mucha información sobre su grado de disolución en agua regia, solo en el trabajo de Church et al. (1987) aparece en un diagrama, donde señala que, en algunas de las muestras analizadas la turmalina llegó a un máximo de 50% de disolución aproximada, pero no se detalla si existen diferencias porcentuales entre los elementos que la componen. Por lo tanto, la turmalina no es muy correlacionable con la base de datos del análisis

ME-MS41, aunque sea uno de los minerales más importantes a estudiar por su posible relación con la mineralización de cobalto.

En la Tabla 4.11, se muestra la estequiometría de los 15 minerales de la Figura 4.40, con 13 de ellos solubles en agua regia, excepto la albita y turmalina. Como se observa, los elementos pueden encontrarse en más de una especie mineral, como el caso del aluminio y hierro. De esta manera, para analizar la geoquímica, y la base de datos geoquímicos en general, se debe estudiar el comportamiento conjunto de los elementos mayores que componen los minerales solubles en agua regia, sin descartar el aporte en la concentración de los elementos que componen los minerales parcialmente solubles.

Tabla 4.11. Fórmula estructural de los minerales analizados por TIMA-TESCAN. Minerales de interés para alteración y mineralización, solubles y parcialmente solubles.

Mineral	Fórmula
Turmalina (tur)	$(\text{Na,Ca})(\text{Al,Fe,Li})(\text{Al,Mg,Mn})_6(\text{BO}_3)_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})\cdot(\text{OH,F})_4$
Biotita (bt)	$\text{K}(\text{Mg,Fe}^{2+})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Clorita (chl)	$(\text{Mg,Fe}^{2+})_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
Muscovita/Illita (ms/ill)	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Arcillas de Al (arc Al)	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Calcita (cal)	CaCO_3
Hematita/Magnetita (hem/mag)	$\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_3\text{O}_4$
Apatito (ap)	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$
Cobaltita (cob)	CoAsS
Óxidos de cobalto (ox Co)	$\text{Ox Co}(\text{Mn,As}) / (\text{Cu,Co})(\text{As,Ca})\text{O}$
Pirita (py)	FeS_2
Calcopirita (cpy)	CuFeS_2
Rutilo/Anatasa (rt/ant)	TiO_2
Ilmenita (ilm)	FeTiO_3
Albita (ab)	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$

5 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE VARIABLES DE INTERÉS

En el trabajo de Cárdenas (2015) se indica que, aunque se utilice la digestión con agua regia en un análisis geoquímico, existen minerales cuya química se ve reflejada en las concentraciones de los elementos. Los minerales con mayor probabilidad de presentar un control en la base de datos geoquímicos del análisis ME-MS41 son los solubles en agua regia y que representen parte importante de la mineralogía de las muestras, como por ejemplo la clorita y biotita. Sin embargo, estos dos minerales se encuentran en muestras de todas las litologías del logueo de sondajes, pudiendo ser primarios o secundarios (origen por procesos posteriores, como, por alteración hidrotermal), lo que dificulta la clasificación.

En esta sección, se seleccionan los elementos que pueden presentar y significar una mayor diferenciación para las muestras, con el objetivo de determinar si existen alteraciones hidrotermales

asociadas a la mineralización de cobre-cobalto y que sean geoquímicamente correlacionables con el mapeo de alteración de los sondajes.

5.1 Selección mineralogía soluble y elementos

Para la selección de la mineralogía soluble presente en los sondajes, se considerarán los minerales del logueo, petrografía de cortes transparentes, calcografía de cortes pulidos y mineralogía automatizada TIMA-TESCAN. En el capítulo de mineralogía automatizada se nombran y cuantifican los minerales identificados en seis muestras, por lo que, para complementar la población mineralógica que es posible encontrar, también se consideran los minerales observados y descritos en los estudios de petrografía y calcografía de nueve muestras (ver Tabla 5.1).

Tabla 5.1. Minerales por grupo mineral identificados en los cortes transparentes y pulidos (Anexo A: Petrografía y calcografía).

Grupo	Minerales
Tectosilicatos	Cuarzo, plagioclasa, albita, feldespato-K
Filosilicatos	Clorita, arcillas, biotita, mica blanca, sericita (moscovita/illita)
Inosilicatos	Piroxeno, anfíbol, actinolita, hornblenda
Ciclosilicatos	Turmalina
Sorosilicatos	Epidota
Nesosilicatos	Zircón, titanita
Sulfuros	Pirita, calcopirita, pirrotina, glaucodot*, gersdorffita*
Óxidos	Rutilo, hematita, magnetita, ilmenita, óxidos e hidróxidos de Fe
Carbonatos	Carbonato
Fosfatos	Apatito

*No es segura su identificación, por la similitud en propiedades microscópicas con otros sulfuros.

La petrografía y calcografía disponible, identifica minerales de forma más general y no tan precisa como la mineralogía automatizada. Por ejemplo, se reconocen micas blancas en los cortes transparentes versus moscovita/illita con el SEM, lo mismo para carbonato y calcita, respectivamente. Hay minerales de la Tabla 5.1 que no se reconocieron en las muestras con análisis TIMA-TESCAN, como la actinolita, hornblenda y pirrotina (pueden incluirse los sulfuros glaucodot y gersdorffita) y, por otro lado, hay minerales que fueron eliminados de la base de datos de la mineralogía automatizada por concentraciones muy bajas (<0,1%) y, que, si se reconocen en los cortes transparentes, como la epidota y titanita.

La epidota y actinolita son minerales que están en la planilla de logueo de alteración, de modo que, se deben considerar sus solubilidades en agua regia y el aporte que pueden llegar a significar en las concentraciones de los elementos que las componen y forman parte de la base de datos geoquímicos. Según Church et al. (1987), los sorosilicatos (grupo de los silicatos al que pertenece la epidota) son más solubles que los anfíboles (conjunto de minerales al que pertenece la actinolita) y, por Snäll & Liljefors (2000), la epidota puede alcanzar, para los elementos Ca, Fe y Al, porcentajes de disolución del 30-33% en muestras pulverizadas (tamaño de grano <10-20 µm). Sin

embargo, en muestras con tamaño de grano $<63 \mu\text{m}$ y $<2 \text{mm}$, la disolución baja a 4,8-5% y 0,6-1,6%, respectivamente. Se cuenta con información de los porcentajes de disolución en agua regia de la hornblenda que, al igual que la actinolita, es un anfíbol y, en ninguna muestra, considerando los tres tamaños de grano ($<10\text{-}20 \mu\text{m}$, $<63 \mu\text{m}$ y $<2 \text{mm}$), alcanza o supera los porcentajes de la epidota. De esta manera, la epidota y actinolita se consideran escasamente solubles en agua regia, siendo minerales no influyentes en las concentraciones de los elementos correspondientes a sus fórmulas químicas.

La estequiometría de la mineralogía soluble recopilada, tanto de alteración y de mena, se muestra en la Tabla 5.2, donde se agrupa a minerales composicionalmente semejantes como, por ejemplo, las micas blancas potásicas y los óxidos de hierro. Se agregan minerales solubles compuestos por elementos mayores que no se encuentran en las demás fases minerales, como lo son el Ti y P.

Tabla 5.2. Fórmula estructural de la mineralogía soluble en agua regia recopilada. Minerales de interés para alteración y mineralización, solubles y parcialmente solubles.

Mineral	Fórmula
Turmalina	$(\text{Na,Ca})(\text{Al,Fe,Li})(\text{Al,Mg,Mn})_6(\text{BO}_3)_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})\cdot(\text{OH,F})_4$
Biotita	$\text{K}(\text{Mg,Fe}^{2+})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Clorita	$(\text{Mg,Fe}^{2+})_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
Moscovita/illita/sericita	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Arcillas de Al	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Calcita	CaCO_3
Óxidos e hidróxidos de Fe	$\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_3\text{O}_4 / \text{FeO}(\text{OH})$
Sulfuros de cobalto	$\text{CoAsS} / (\text{Co,Fe})\text{AsS}$
Asbolana	$(\text{Co,Ni})_{1-y}(\text{MnO}_2)_{2-x}(\text{OH})_{2-2x+2y}\cdot n\text{H}_2\text{O}$
Óxidos de cobalto	$\text{O}_x \text{Co}(\text{Mn,As}) / (\text{Cu,Co})(\text{As,Ca})\text{O}$
Sulfuros de Fe	$\text{FeS}_2 / \text{Fe}_{1-x}\text{S} / \text{FeAsS}$
Calcopirita	CuFeS_2
Rutilo	TiO_2
Ilmenita	FeTiO_3
Titanita/esfeno	CaTiSiO_4
Apatito	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
Epidota	$\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$
Actinolita	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Como fue mencionado anteriormente, los elementos pueden encontrarse en más de una especie mineral, por lo que, para analizar la base de datos geoquímicos del análisis ME-MS41 se debe estudiar el comportamiento conjunto de los elementos mayores que componen los minerales, donde se debe tener en cuenta el grado de disolución en agua regia y concentración de los distintos minerales en las muestras.

Según los resultados de Cárdenas (2015), es posible identificar una correlación entre la mineralogía

y geoquímica mediante la visualización de gráficos de concentraciones molares de elementos. En ellos se utilizan líneas de control mineral, calculadas a partir de sus fórmulas teóricas y, con la información cuantitativa de la mineralogía automatizada, se varía el tamaño de los círculos que identifican cada muestra para indicar la razón relativa de los minerales: (clorita+biotita)/sericita y (clorita+biotita)/pirita. De esta manera, en dicho estudio, las muestras con alteración potásica biotítica y clorita-sericita, con mayor concentración clorita-biotita relativa a sericita, graficaron entorno a las líneas de tendencia de estos minerales. Lo contrario ocurrió para las muestras con alteración fílica y argílica avanzada, donde esta relación se invirtió.

A partir de esta correlación y del hecho de que algunos grupos minerales son altamente solubles en agua regia, Cárdenas (2015) identificó la proveniencia más probable de los elementos mayores en función de la estequiometría teórica de cada mineral. Aunque la mineralogía de las muestras entre ambos estudios es relativamente diferente (al igual que sus concentraciones), existen ciertos minerales en común. A continuación, se nombran los minerales en común que son fuente de los elementos mayores de sus estequiometrías (ver Tabla 5.2).

El aluminio proviene preferentemente de las micas: biotita, clorita, arcillas y, probablemente, sericita (moscovita-illita). Estas micas pueden definir diferentes alteraciones, por lo que el aluminio debe evaluarse en conjunto con otros elementos mayores.

El magnesio proviene de la biotita y clorita. Estos minerales se correlacionan con las altas concentraciones de magnesio y son característicos de las alteraciones potásica biotítica, propilítica y sericita-clorita.

El potasio tiene como principal fuente teórica la biotita y sericita. Sin embargo, la bibliografía y las líneas de control mineral indicaron que este elemento proviene principalmente de la biotita y no de la sericita. Es solo debido a la ausencia de biotita que las muestras donde predomina la sericita grafiquen en su respectiva línea. Por lo tanto, se deben considerar las concentraciones de ambos minerales para atribuir la proveniencia del potasio.

El azufre proviene preferentemente de los sulfuros, como pirita y calcopirita, teniendo en cuenta esencialmente al que es predominante. Los sulfuros son característicos de la mineralización hipógena, aunque, la pirita también lo es en la alteración fílica. Acá también se toma en cuenta a la cobaltita, al ser un sulfoarseniuro.

El hierro posee varias fuentes, ya que puede provenir de pirita, calcopirita, óxidos de hierro (magnetita, hematita, hidróxidos), biotita y clorita. Similar a lo que ocurre con el aluminio, los minerales fuentes del hierro pueden encontrarse en distintas alteraciones, por ello debe observarse su comportamiento junto a otros elementos mayores.

El calcio se correlaciona directamente con la presencia de sulfatos y carbonatos cálcicos, ya que

son altamente solubles en agua regia, siendo la calcita el mineral más abundante entre estos dos grupos.

Los elementos de interés y mayores no incluidos en los resultados de Cárdenas (2015) son Co, As y Ti, los cuales no formaban parte de la mineralogía principal de sus muestras. En consecuencia, siguiendo la misma línea de los sulfuros y óxidos, el cobalto y arsénico provienen principalmente de la cobaltita y de los óxidos de Co (ver Tabla 5.2). Por su parte, el titanio, según Snäll & Liljefors (2000), proviene fundamentalmente de la ilmenita y titanita.

El sodio no forma parte de ninguna especie mineral que sea altamente soluble en agua regia, lo que se refleja en las bajas concentraciones de este elemento mayor (ver Figura 4.22), con una media de 690 ppm. Los minerales que poseen Na en su estequiometría son la albita y turmalina. La albita es mínimamente soluble, pero si se presenta en considerables concentraciones podría ser la fuente del sodio en ciertas muestras de la base de datos. Por su parte, la turmalina presenta una complejidad química, dada por la existencia de múltiples especies. Según los estudios de petrografía de cortes transparentes, muchos de los cristales de turmalina presentan zonación, en el centro la variedad dravita o elbaita (Mg o Li, respectivamente) y en los bordes chorlo (Fe), teniendo en común que estas 3 especies de turmalina se componen de sodio. Teniendo en cuenta la única bibliografía que muestra datos de disolución de la turmalina en agua regia, donde la caracteriza como un mineral levemente soluble (Church et al., 1987), es que, al igual que con la albita, si la turmalina se presenta en concentraciones importantes, podría ser la fuente del sodio en algunas muestras de la base de datos.

5.2 Geoquímica y logueo de sondajes

La información geoquímica y mineralógica disponible no permite, en gran parte, reconocer si existe un control de una especie mineral por sobre otra en las concentraciones de los elementos que tienen en común composicionalmente. De modo que, se decide usar los registros del logueo de sondajes, tanto los de alteración como de mineralización, para visualizar con histogramas y diagramas de caja la existencia o ausencia de poblaciones preferenciales, dentro de las distribuciones de los elementos que componen las estequiometrías de los minerales de alteración y de mena (ver Tabla 5.2).

5.2.1 Alteración hidrotermal

En la Figura 5.1 se muestran los registros del logueo de sondajes por mineral de alteración en el total de las muestras. De los diez minerales, se consideran nueve, dejando fuera al cuarzo (cuarzo/sílice) por ser insoluble en agua regia. Los números 1, 2 y 3, que acompañan a cada mineral, representan la intensidad de alteración, que, en efecto, describe la abundancia relativa de estos (1: baja; 2: moderada; 3: alta). Además, se incluyen 182 muestras (en color celeste y diferenciadas con las siglas “S/alt”) que no presentan registros de minerales de alteración en la base de datos y en las cartillas de logueo de los sondajes respectivos, de manera que, se pretende comparar el

comportamiento de estas muestras con el de las demás, que si registran al menos uno de los nueve minerales de alteración. Así, de 3421 muestras seleccionadas y analizadas hasta este punto, se aumenta a 3603. Por último, los datos en color negro representan a las muestras sin mapeo del mineral que corresponda, es decir, cuando se analicen los registros de mapeo de cada mineral de alteración, en color negro estarán las muestras que no presentan registros de ese mineral de alteración en particular, pero sí de otros.

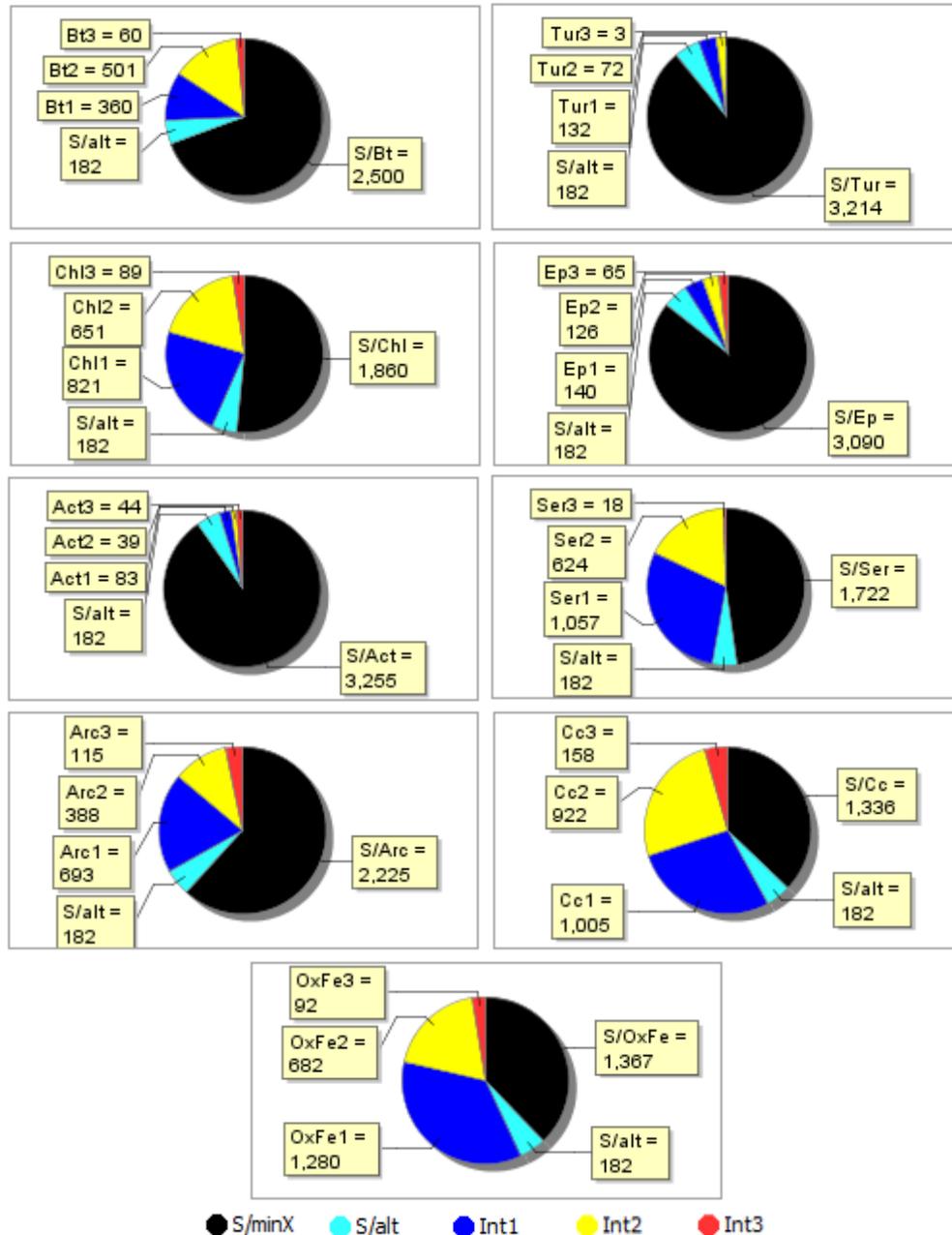


Figura 5.1. Gráficos circulares con el registro de nueve minerales de alteración del logueo de sondajes en 3603 muestras (S/alt: 182 muestras que no presentan registros de minerales de alteración. S/minX: muestras que no presentan registros de mapeo del mineral de alteración respectivo).

Los gráficos circulares de la Figura 5.1 también se encuentran subdivididos para cada litología del mapeo geológico (ver Anexo C: Gráficos circulares por litología con los registros del logueo de sondajes por cada mineral de alteración), donde algunos minerales de alteración pueden presentar, según la información del logueo, mayor ocurrencia en ciertas litologías. Es el caso de la biotita y turmalina en las brechas hidrotermales, y de la epidota y actinolita en las rocas intrusivas (D/M y P.A). Por otro lado, minerales de alteración como la sericita, calcita y los óxidos de hierro, presentan una ocurrencia transversal, sin una litología que concentre los registros del logueo de sondajes. A este grupo se le podrían sumar la clorita y las arcillas, ya que no existe una diferencia tan marcada entre los registros de los gráficos circulares por litología. Así mismo, estos últimos cinco minerales (sericita, calcita, óxidos de hierro, clorita y arcillas) corresponden a los con mayor cantidad de registros a partir del logueo de alteración en las muestras seleccionadas.

Las variables por analizar con los histogramas y boxplots (ver Anexo C: Histogramas y boxplots por litología con los registros del logueo de sondajes por cada mineral de alteración) corresponden a los elementos de las estequiometrias teóricas de los minerales de alteración del logueo de sondajes. De esta manera, se busca observar una correlación entre la intensidad del mapeo de los minerales de alteración, solubles en agua regia, y las concentraciones de los elementos que los componen.

La biotita es altamente soluble en agua regia y los elementos de su estequiometria teórica que están en la base de datos geoquímicos son: K, Mg, Fe y Al. Los histogramas y boxplots con los registros del mapeo de biotita (ver Anexo C) muestran que no hay una relación directa, en la mayoría de las muestras, entre las distribuciones de los elementos y la presencia del mineral. Solo en las muestras de brechas hidrotermales, a través del rango intercuartil de los diagramas de caja (ver Figura 5.2), se observa una leve correlación entre el aumento de la intensidad mapeada y mayores concentraciones de los elementos. Aunque, en los histogramas no se observan poblaciones dentro de las distribuciones de los elementos que coincidan con las muestras con y sin biotita de alteración.

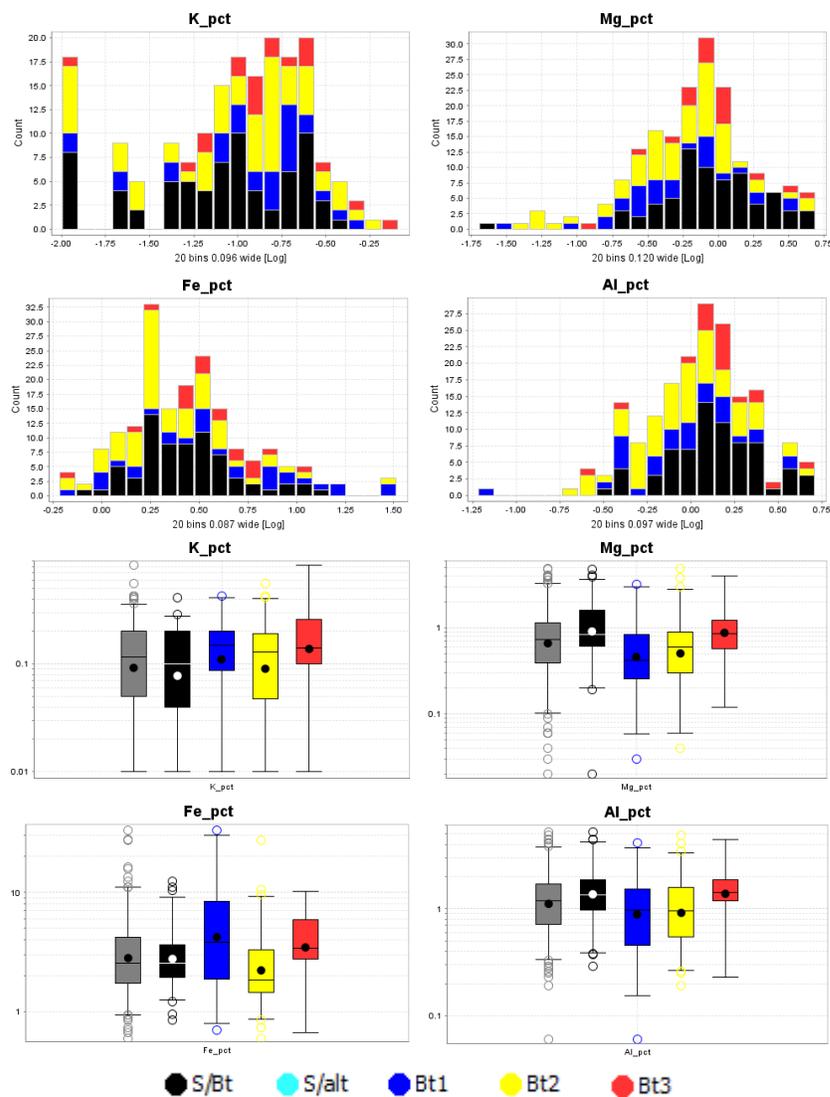


Figura 5.2. Histogramas y boxplots de K, Mg, Fe y Al, con los datos del mapeo de biotita en las muestras de brechas hidrotermales (B.H.Qz y B.H.Bt). Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de brechas hidrotermales de las distintas clases, respectivamente.

La turmalina es levemente soluble en agua regia y tiene una fórmula química muy compleja. Según la zonación en algunos cristales de turmalina descrita en los análisis petrográficos hechos por MCGEOSCIENCES, las especies de turmalina que podrían hallarse en las muestras corresponden al chorro (Fe), dravita (Mg) y elbaita (Li). De la estequiometría de las tres especies nombradas, los elementos disponibles en la base de datos geoquímicos son: Na, Al, Fe, Mg y Li. La cantidad de muestras con presencia de turmalina es baja, por ello, los histogramas y boxplots (ver Anexo C) no visualizan efectivamente los registros del mapeo. Las muestras de brechas hidrotermales son la unidad litológica que agrupa la mayoría de los registros, aun así, no hay una relación entre las distribuciones de los elementos y la presencia del mineral (ver Figura 5.3). Esto puede deberse al bajo porcentaje de disolución en agua regia de la turmalina, lo que hace que este mineral no se vea reflejado en la geoquímica de las muestras.

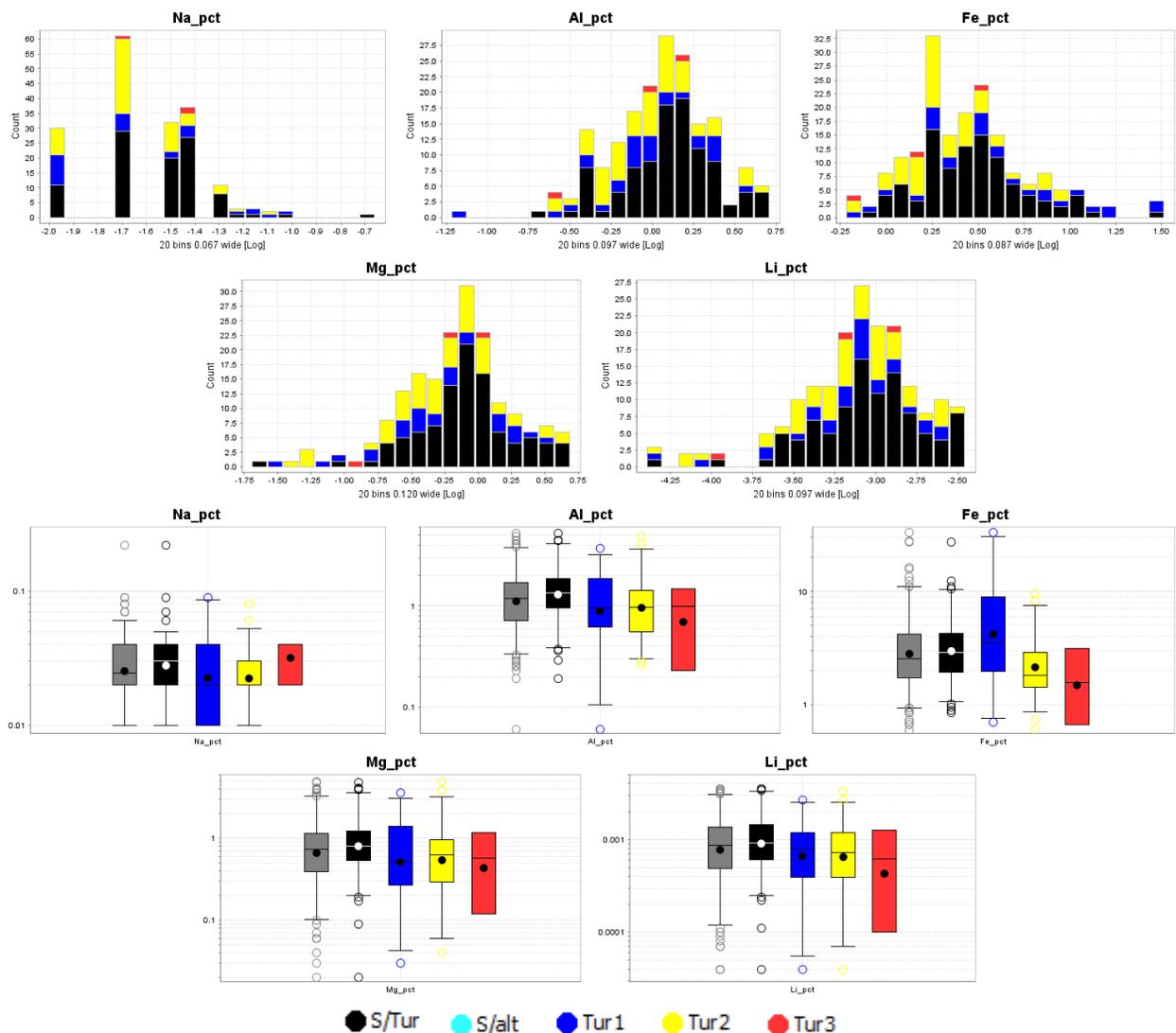


Figura 5.3. Histogramas y boxplots de Na, Al, Fe, Mg y Li, con los datos del mapeo de turmalina en las muestras de brechas hidrotermales (B.H.Qz y B.H.Bt). Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de brechas hidrotermales de las distintas clases, respectivamente.

La clorita es altamente soluble en agua regia y los elementos de su estequiometría teórica que están en la base de datos geoquímicos son: Mg, Fe y Al. Los boxplots con los registros del mapeo de clorita, considerando todas las muestras, muestra que hay una correlación leve entre el aumento de la intensidad mapeada y mayores concentraciones de los elementos, siendo más marcada en el magnesio (ver Figura 5.4). Por otra parte, en los histogramas no se observan poblaciones dentro de las distribuciones de los elementos que coincidan con las muestras con y sin clorita de alteración, solo una asimetría positiva en la distribución del magnesio, la cual presenta registros de clorita en gran parte de esas muestras.

Al observar los histogramas y boxplots de la clorita por litología (ver Anexo C), se aprecia que las distribuciones de los elementos en las muestras de diorita no muestran una correlación con el mapeo de intensidad, más aún, las muestras sin registros del mineral tienen similares

concentraciones con las muestras con mapeo de alta intensidad de clorita. Por otro lado, las muestras de brechas hidrotermales presentan una gran correlación entre las concentraciones de los elementos y el mapeo de intensidad, aunque, las muestras con los mayores valores de hierro no corresponden a muestras con clorita.

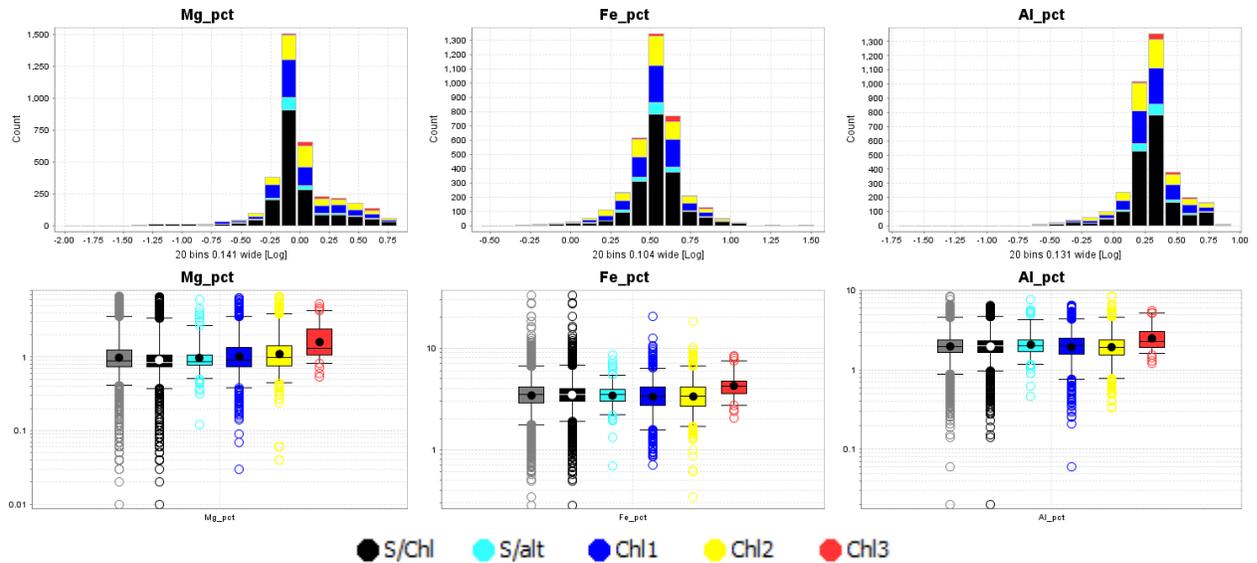


Figura 5.4. Histogramas y boxplots de Mg, Fe y Al, con los datos del mapeo de clorita en toda la población de muestras. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.

La epidota y la actinolita son minerales de alteración que se dan principalmente en las muestras de rocas intrusivas. Las muestras con registros de actinolita son pocas y casi todas también tienen registros de epidota. De manera que, las muestras con actinolita en su mayoría implican presencia de epidota, pero las muestras con epidota, al ser mucho más numerosas, no implican la presencia de actinolita.

La epidota es ligeramente soluble en agua regia y los elementos de su estequiometría teórica que están en la base de datos geoquímicos son: Ca, Fe y Al. Al considerar todas las muestras, los histogramas y boxplots con los registros del mapeo de epidota (ver Anexo C) muestran que existe una relación entre las distribuciones de los elementos y la presencia del mineral, donde a mayor intensidad de mapeo, mayores son las concentraciones de los elementos. Al observar los histogramas y boxplots de las muestras de diorita y pórfido andesítico (ver Figura 5.5), de donde proviene la mayoría de los registros de este mineral, se aprecia que la correlación entre el mapeo de intensidad y las concentraciones de los elementos disminuye o incluso, desaparece. No obstante, al centrarse en los diagramas de las muestras de pórfido andesítico (ver Anexo C) se observa una correlación entre el mapeo de intensidad y las distribuciones de los elementos, siendo más marcada en el calcio y hierro.

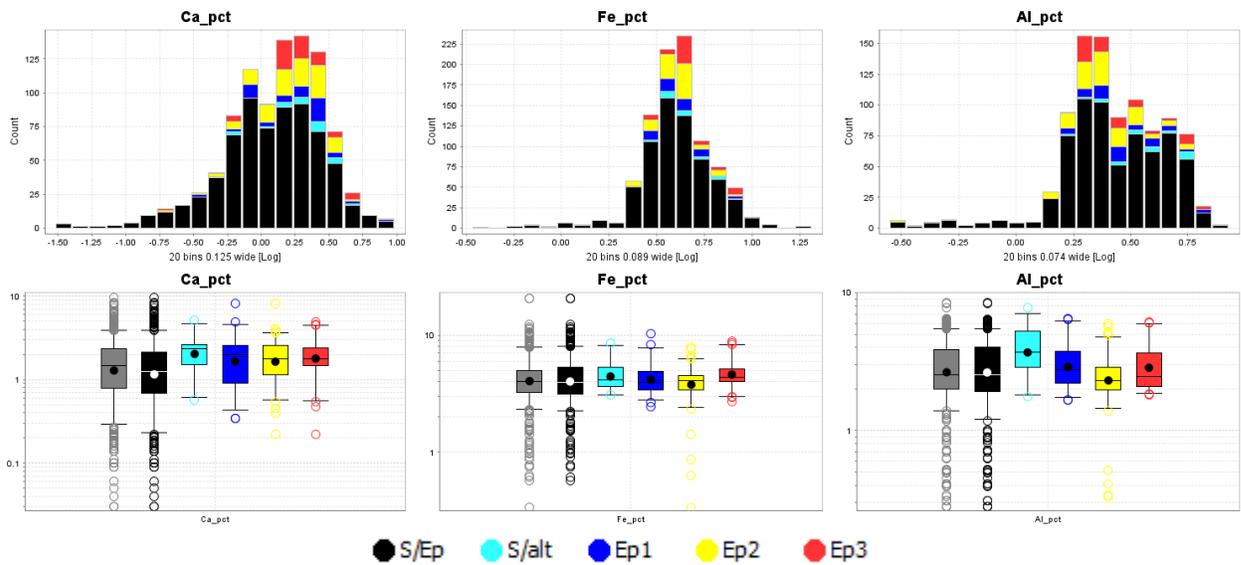


Figura 5.5. Histogramas y boxplots de Ca, Fe y Al, con los datos del mapeo de epidota en las muestras de diorita/microdiorita (D/M) y pórfido andesítico (P.A). Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de D/M y P.A de las distintas clases, respectivamente

Con la actinolita ocurre algo similar a lo descrito con la epidota, pero con menor número de registros en las muestras. La actinolita también es escasamente soluble en agua regia y los elementos de su estequiometría que están en la base de datos geoquímicos son: Ca, Mg y Fe. Considerando toda la población de muestras, los histogramas y boxplots muestran que existe una relación entre las intensidades del mapeo actinolita y las concentraciones de los elementos en esas muestras. En la Figura 5.6 se observan los histogramas y boxplots con los registros del mineral en las muestras de diorita y pórfido andesítico, en donde, la correlación entre el mapeo de intensidad y las concentraciones de los elementos disminuye o desaparece. Aunque, al igual que con la epidota, en los diagramas de las muestras de pórfido andesítico (ver Anexo C) es posible observar una correlación entre el mapeo de intensidad de la actinolita y las distribuciones de los elementos, siendo más notoria en el calcio y hierro.

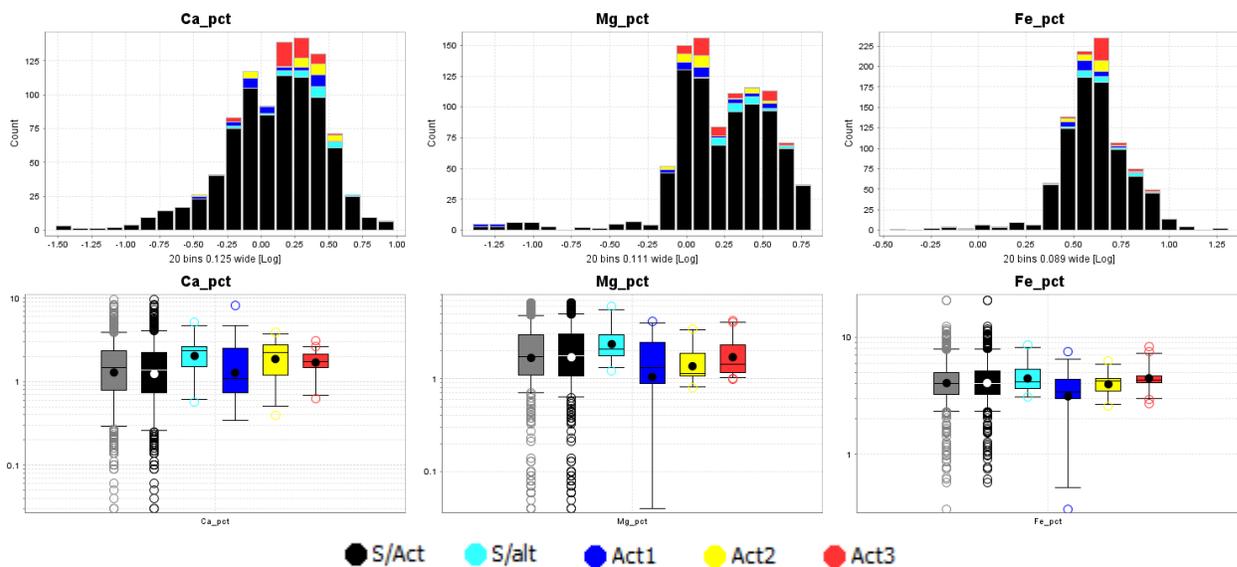


Figura 5.6. Histogramas y boxplots de Ca, Mg y Fe, con los datos del mapeo de actinolita en las muestras de diorita/microdiorita (D/M) y pórfido andesítico (P.A). Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de D/M y P.A de las distintas clases, respectivamente.

La sericita no es propiamente un mineral, sino un término que hace referencia a un agregado de grano fino de micas blancas del tipo moscovita-paragonita u otros minerales con una estructura similar a estos, como son los del grupo de la illita (minerales del grupo de la arcilla). Es un mineral de alteración común de los feldespatos, siendo las plagioclasas las que con mayor frecuencia desarrollan este tipo de alteración. La sericita (moscovita/illita) es leve a moderadamente soluble en agua regia, siendo fuente teórica para el potasio y aluminio. No obstante, según Cárdenas (2015), solo en ausencia de biotita, la sericita puede ser la fuente del potasio, mientras que, para el aluminio, este proviene en primer lugar de otras micas más solubles, como la biotita, clorita y arcillas.

Los histogramas y boxplots con los registros del mapeo de sericita (ver Anexo C) muestran que en gran parte de las muestras no hay una relación directa entre las distribuciones de los elementos y el mapeo de intensidad. Al considerar toda la población de muestras, el gráfico de caja del potasio muestra un leve aumento en las concentraciones de las muestras mapeadas con mayor intensidad de sericita, lo que no ocurre para el gráfico del aluminio (ver Figura 5.7). Por otro lado, al observar los histogramas y boxplots por litología, se aprecia algo similar para las muestras de roca metamórfica, no así en los diagramas de las muestras de diorita y pórfido andesítico, donde no existe correlación entre la presencia de sericita y las concentraciones de potasio y aluminio.

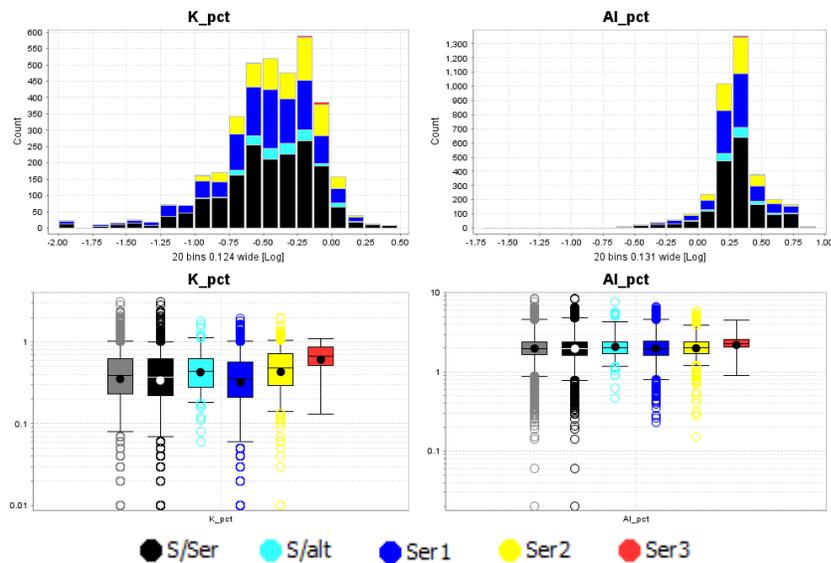


Figura 5.7. Histogramas y boxplots de K y Al, con los datos del mapeo de sericita en toda la población de muestras. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.

Las arcillas son un conjunto de minerales aluminosilicatados de grano muy fino ($<2 \mu\text{m}$), conforman el grupo de la arcilla dentro de los filosilicatos y su solubilidad en agua regia es variable, ya que dependerá de la especie de arcilla presente. Por el tamaño de grano, no es posible reconocer mediante muestra de mano que mineral de arcilla es o son los que se dan en los testigos de sondajes. Por su parte, el análisis de mineralogía automatizada solo indica la presencia de arcillas de Al, pero a su vez, indica de forma separada la presencia de illita (illita/moscovita), por lo que esta arcilla es descartada y se toma como referencia la estequiometría general de una arcilla solo con Al (por ejemplo, la caolinita), compuesta por Al, Si, O e H.

Los histogramas y boxplots con los registros del mapeo de arcillas, para todas las muestras o por litología (ver Anexo C), muestran que no hay relación entre la distribución del aluminio y el mapeo de intensidad de las arcillas. En la Figura 5.8, en el gráfico de cajas, se observa que las muestras con y sin presencia de arcillas tienen concentraciones medias semejantes, incluso, los rangos intercuartiles (cajas) y el largo de los bigotes son muy similares entre los grupos de muestras.

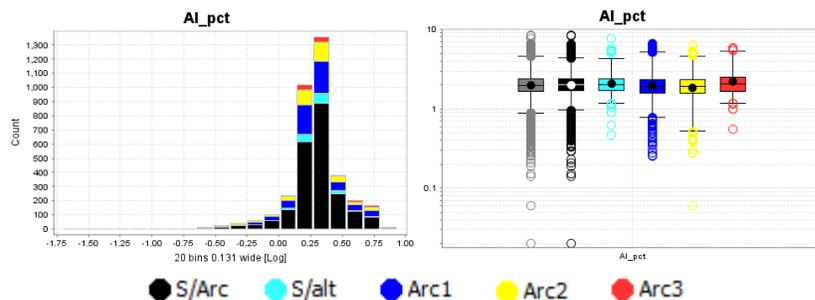


Figura 5.8. Histograma y boxplot de Al, con los datos del mapeo de arcillas en toda la población de muestras. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.

La calcita es altamente soluble en agua regia y el único elemento de su estequiometría teórica que se encuentra en la base de datos es el calcio. En la Figura 5.9 se muestra el histograma y el boxplot con los registros de calcita en todas las muestras, donde se puede observar una correlación entre las concentraciones de calcio y el mapeo de intensidad de la calcita, además, de una leve asimetría positiva en la distribución del elemento. Los promedios de calcio de las muestras con calcita son mayores que el de las muestras sin la presencia del mineral, siendo la media de concentración más alta la de las muestras mapeadas con intensidad alta.

En los histogramas y boxplots con los registros de la calcita por litología (ver Anexo C), se aprecia que las muestras de brechas hidrotermales presentan la mayor correlación entre la distribución de calcio y el mapeo de intensidad. Además, en el histograma de las muestras de pórfido andesítico se observa que la distribución de calcio se divide en dos poblaciones principales, donde la que responde a mayores valores de calcio coincide en gran parte con las muestras que presentan calcita.

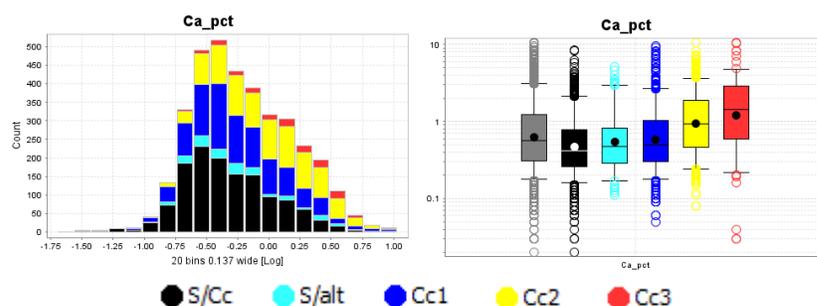


Figura 5.9. Histograma y boxplot de Ca, con los datos del mapeo de calcita (Cc) en toda la población de muestras. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.

Los óxidos de hierro, según la planilla de logueo de sondajes, representan a la hematita y a la goethita, principalmente. Este conjunto de minerales es altamente soluble en agua regia y el único elemento de su estequiometría teórica que se encuentra en la base de datos es el hierro. Los histogramas y boxplots con los registros del mapeo de los óxidos de hierro (ver Anexo C) muestran que no hay una relación directa, en la mayoría de las muestras, entre la distribución del hierro y la presencia de los óxidos. En los diagramas por litología se puede observar que, en las muestras de brechas hidrotermales las con mayores valores de hierro corresponden a muestras con mapeo de intensidad moderada a alta, aunque, al considerar toda la población de muestras, las con registro de óxidos de hierro tienen similares concentraciones con las muestras que no los presentan (ver Figura 5.10). El caso de las muestras de brechas hidrotermales con abundante presencia de óxidos y altos valores de hierro se podría relacionar a la oxidación de minerales ricos en hierro, como, por ejemplo, los sulfuros de hierro (también presentes en las muestras de brechas hidrotermales).

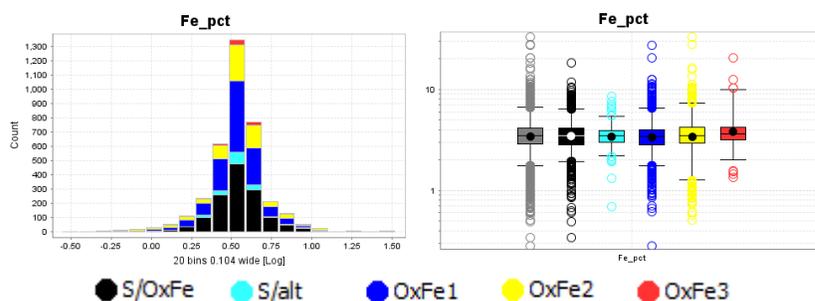


Figura 5.10. Histograma y boxplot de Fe, con los datos del mapeo de óxidos de hierro en toda la población de muestras. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.

5.2.2 Mineralización de interés

En la Figura 5.11 se muestran los registros del logueo de sondajes para la mineralización de mena, cobre y cobalto, y de interés, como los sulfuros de hierro, en el total de las muestras. Tanto para la mineralización de cobalto como la de cobre, las muestras se agruparon por la naturaleza de los minerales presentes: oxidados, sulfuros y mixto (oxidados y sulfuros). Mientras que, para los sulfuros de hierro, las muestras se agruparon por el mapeo de abundancia relativa de este conjunto de minerales. Además, en cada gráfico circular se indica, en color negro, la fracción de muestras que no presentan registros de mineralización para cada caso.

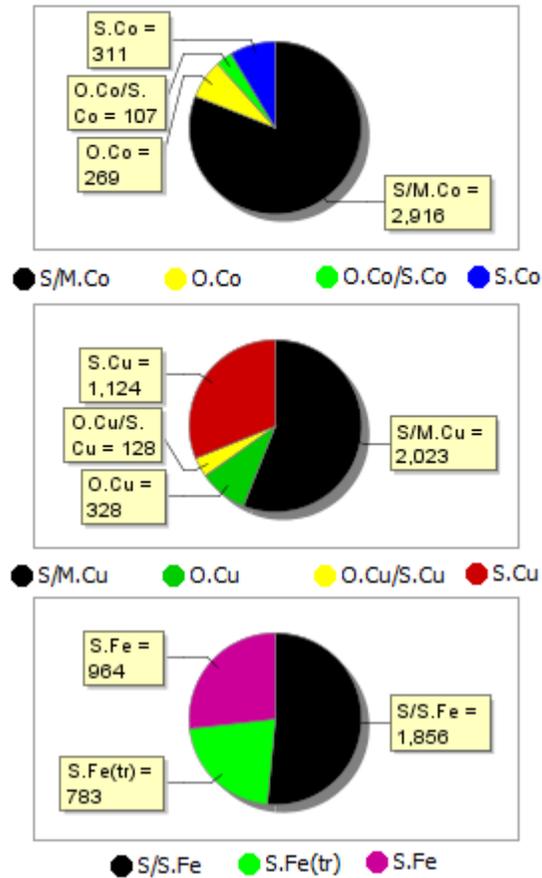


Figura 5.11. Gráficos circulares con los registros de mineralización del logueo de sondajes en 3603 muestras, en donde 182 corresponden a muestras que no presentan registros de minerales de alteración (S/M.Co: muestras que no presentan registros de mapeo de minerales de Co. S/M.Cu: muestras que no presentan registros de mapeo de minerales de Cu. S/S.Fe: muestras que no presentan registros de mapeo de sulfuros de Fe).

Los gráficos circulares de la Figura 5.11 también se encuentran subdivididos para cada litología del mapeo geológico (ver Anexo C: Gráficos circulares por litología con los registros del logueo de sondajes de la mineralización de interés), donde la mineralización puede presentar, según la información del logueo, mayor ocurrencia en ciertas litologías. Por ejemplo, la unidad litológica de las brechas hidrotermales es la que presenta el mayor porcentaje de muestras mineralizadas con oxidados y sulfuros de cobre y de cobalto, siendo seguida por las muestras de diorita y de roca metamórfica. Por otro lado, los sulfuros de hierro se dan de forma transversal, sin una litología que concentre los registros del logueo de sondajes, aunque, en las brechas hidrotermales, casi la totalidad de las muestras con presencia de estos sulfuros corresponden a registros de mayor abundancia relativa.

Las variables por analizar con los histogramas y boxplots (ver Anexo C: Histogramas y boxplots por litología con los registros del logueo de sondajes de la mineralización de interés) corresponden a los elementos que componen los distintos minerales de mena reconocidos y que formen parte de la base de datos geoquímicos. Así, para los minerales de cobalto se consideran los elementos Co, As, Fe, S, Cu, Ni y Mn; para los de cobre los elementos Cu, Fe y S; y para los sulfuros de hierro

los elementos Fe, S y As. De esta manera, se busca observar la relación entre las muestras con presencia de estas especies minerales, altamente solubles en agua regia, y las concentraciones de los elementos que las componen.

Para la mineralización de cobalto, los gráficos de caja de la Figura 5.12 muestran que, considerando toda la población de muestras, las que registran oxidados y/o sulfuros de cobalto son las que presentan, en promedio, mayores concentraciones de Co, As, S, Cu y Ni, mientras que, para el Fe y Mn, las muestras sin registro de estos minerales tienen concentraciones similares a las que si los presentan. Por su parte, los histogramas del primer grupo de elementos muestran una asimetría positiva en sus distribuciones, donde las muestras con mayores valores de estos elementos corresponden a muestras mineralizadas. Además, se observan diferencias dentro del grupo de muestras mineralizadas, dadas por el tipo de mineralogía de mena presente. Esto se puede notar con el mapeo de sulfuros de cobalto, que implica para las muestras una mayor concentración de Co, As, S y Ni, en cambio, en el cobre no hay diferencias de concentraciones entre las muestras con oxidados o sulfuros de cobalto.

Los histogramas y boxplots con los registros de mineralización de cobalto por litología (ver Anexo C) muestran que existen diferencias, dependiendo de la población litológica, entre las distribuciones de los elementos y las muestras mineralizadas con lo observado en la Figura 5.12, donde se considera la totalidad de las muestras. Por una parte, los diagramas de la unidad litológica con mayor fracción de muestras mineralizadas, la de brechas hidrotermales, no presentan la misma distribución que en las otras litologías, esto se debe principalmente a que esta unidad corresponde justamente a la litología que tiene mayores concentraciones de los elementos de interés. Por esta razón, la diferencia entre las concentraciones y distribuciones de las muestras con registros de minerales de cobalto, y las que no los presentan, es menor o inexistente (lo segundo ocurre en los elementos que también se encuentran en otras especies minerales, como el azufre y cobre). Mientras que, el comportamiento de las muestras mineralizadas en los diagramas de las otras unidades litológicas, se asemeja al mostrado en la Figura 5.12, en que la presencia de minerales de cobalto se correlaciona con mayores concentraciones de Co, As, S y Cu, principalmente. De esta manera, teniendo en cuenta los histogramas y boxplots por litología y por toda la población de muestras, la mineralización de cobalto se correlaciona principalmente con las distribuciones de Co y As, en segundo lugar, con las de S y Cu, y, por último, levemente con la de Ni, pero no con las de Fe y Mn.

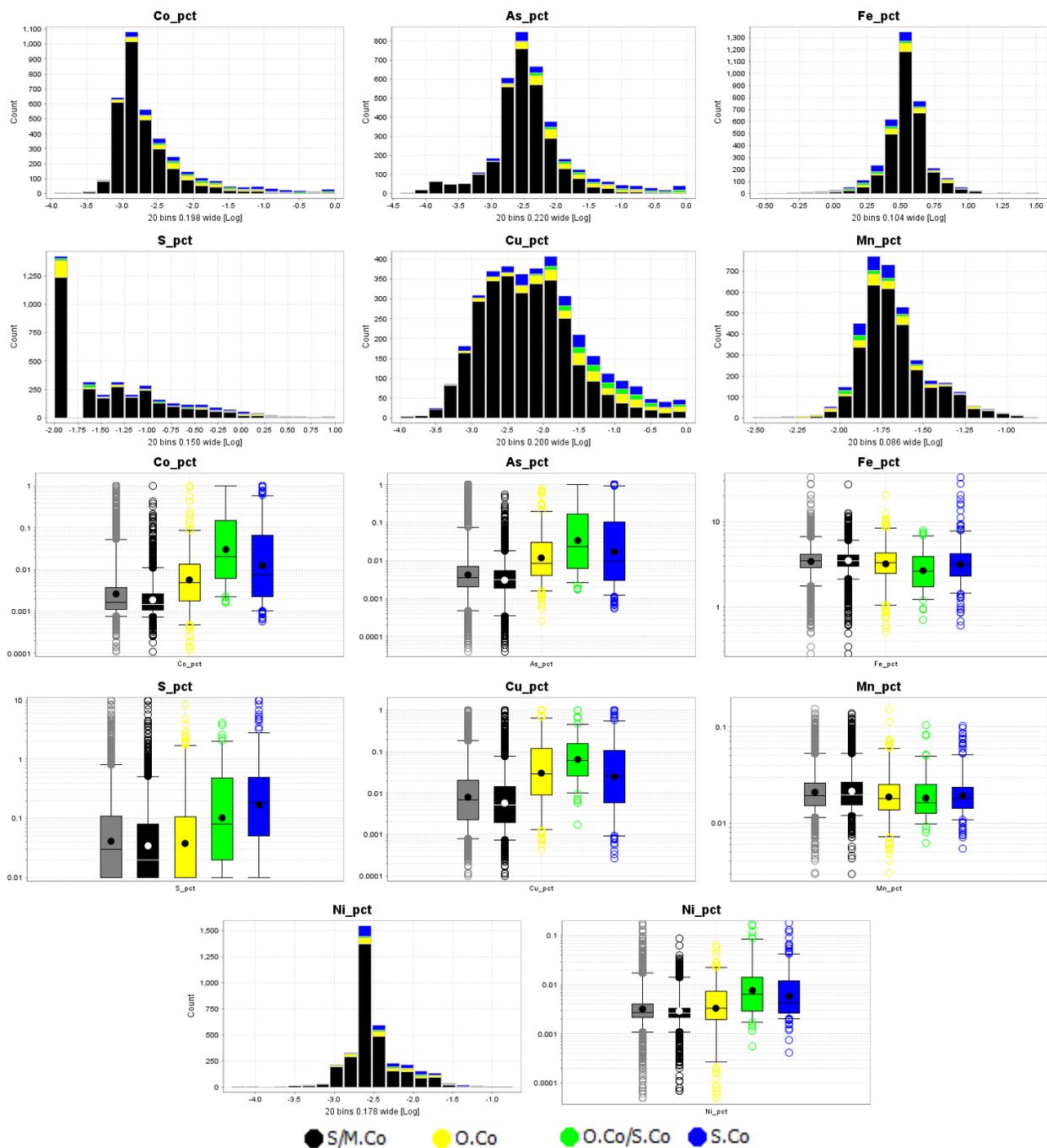


Figura 5.12. Histogramas y boxplots de Co, As, Fe, S, Cu, Mn y Ni, con los datos del mapeo de sulfuros y oxidados de cobalto en toda la población de muestras. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.

Para la mineralización de cobre, los boxplots de la Figura 5.13 muestran que (considerando toda la población de muestras), las que registran oxidados y/o sulfuros de cobre son las que presentan, en promedio, mayores concentraciones de Cu y S, mientras que, para el hierro, las muestras sin registro de estos minerales tienen concentraciones similares a las que si los presentan. Por su parte, los histogramas de la primera pareja de elementos muestran una asimetría positiva en sus distribuciones, donde las muestras con mayores valores de estos elementos corresponden a

muestras mineralizadas. Además, al igual que en los diagramas de la mineralización de cobalto, se observan diferencias dentro del grupo de muestras mineralizadas con cobre, las que se deben al tipo de mineralogía de mena presente. Esto ocurre con el mapeo de sulfuros de cobre, que significa para las muestras una mayor concentración de azufre, pero no de cobre, ya que esta estará sujeta a la abundancia del mineral de cobre, sea de los oxidados o sulfuros.

Los histogramas y boxplots con los registros de mineralización de cobre por litología (ver Anexo C) muestran que la relación entre las distribuciones de los tres elementos y las muestras mineralizadas es similar a la observada al considerar toda la población de muestras (ver Figura 5.13). Esto quiere decir que la presencia de minerales de cobre se correlaciona con mayores concentraciones de cobre y azufre, pero no de hierro. De igual forma, la abundancia relativa de sulfuros de cobre en las muestras marcará las concentraciones de azufre y cobre, ya que la calcopirita (sulfuro de cobre) al ser el mineral de cobre predominante en los registros del mapeo de mineralización, se encuentra desde abundancias muy bajas a unas donde su presencia es más considerable. No obstante, los oxidados de cobre también están muy presentes en las muestras con mayores valores de cobre, lo que se puede notar claramente en la distribución de Cu en las muestras de brechas hidrotermales.

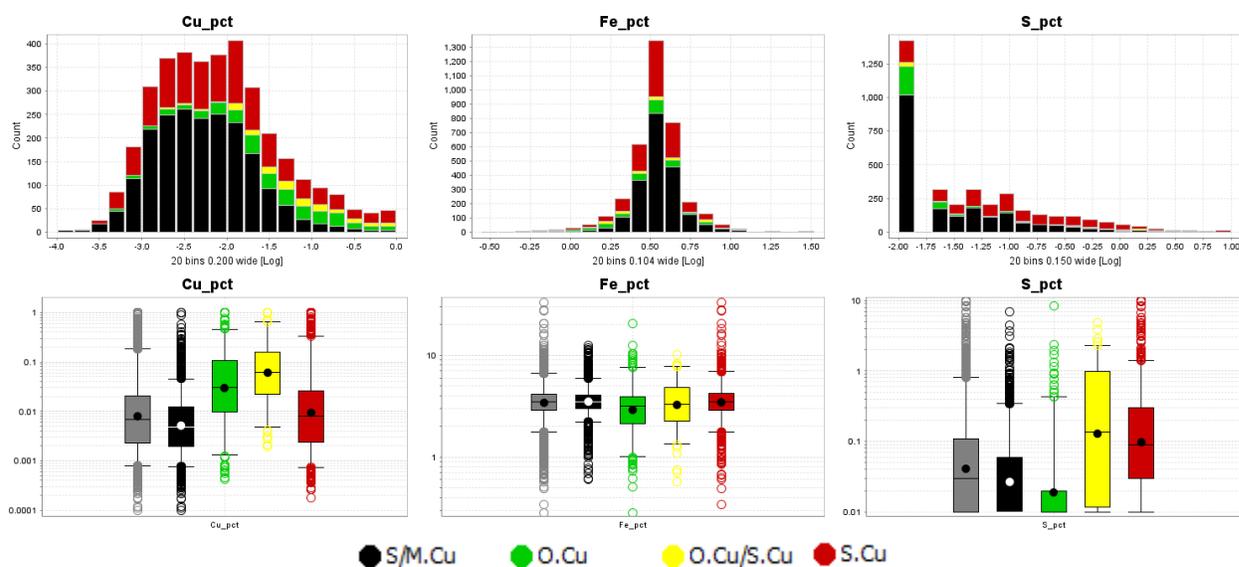


Figura 5.13. Histogramas y boxplots de Cu, Fe y S, con los datos del mapeo de sulfuros y oxidados de cobre en toda la población de muestras. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.

En cuanto al mapeo de los sulfuros de hierro, al ser todos de un mismo grupo mineral (sulfuros), en los histogramas y boxplots se comparan las clases de muestras según la ausencia y presencia, más la abundancia relativa, de estos minerales. Teniendo en cuenta toda la población de muestras, en los diagramas de la Figura 5.14 se observa que el grupo de muestras con registros de sulfuros de hierro poseen una concentración promedio mayor de azufre, la que es directamente proporcional con el mapeo de abundancia de los sulfuros. En cambio, esta relación no se observa en las distribuciones de Fe y As.

Los histogramas y boxplots con los registros de sulfuros de hierro por litología (ver Anexo C) muestran que la relación entre las distribuciones de los tres elementos y las muestras mapeadas es bastante similar a la observada al considerar toda la población de muestras (ver Figura 5.14). De modo que, en las muestras de cada litología, las que registran sulfuros de hierro tienden a presentar mayores concentraciones de azufre y, además, en cada litología, los mayores valores de S corresponden a muestras con presencia de estos sulfuros. Por su parte, las concentraciones de Fe y As no presentan correlación con el mapeo de sulfuros de hierro en la mayoría de las litologías de la clasificación, solo siendo levemente correlacionable con la distribución del hierro en las brechas hidrotermales y la de arsénico en las muestras de diorita.

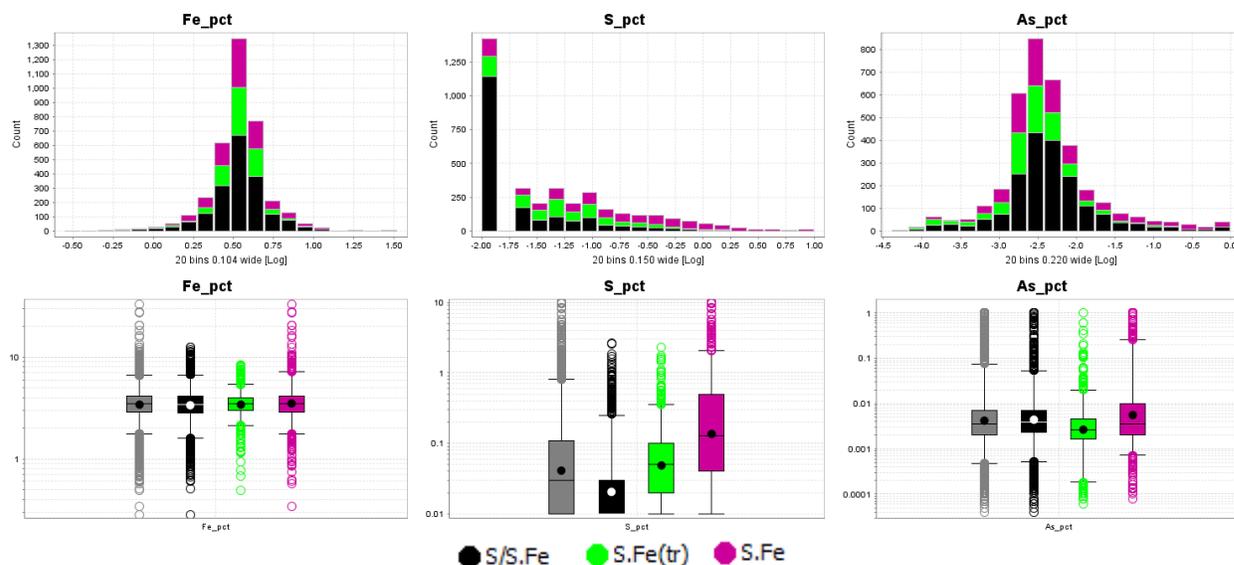


Figura 5.14. Histogramas y boxplots de Fe, S y As, con los datos del mapeo de sulfuros de hierro en toda la población de muestras. Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente.

5.3 Gráficos de clasificación y control mineral

En estudios anteriores (Cárdenas, 2015; Townley et al., 2012) se llevó a cabo la clasificación de una base de datos geoquímicos obtenida por digestión con agua regia, la cual se hizo utilizando parámetros construidos a partir de la representación gráfica del comportamiento de los elementos químicos. La clasificación reagrupa las alteraciones hidrotermales según la asociación mineralógica presente y su estequiometría teórica, por lo tanto, las muestras se separarían por la mineralogía que las compone.

Los elementos mayores permiten distinguir muestras con un enriquecimiento relativo de los mismos, lo que puede estar asociado a la presencia de ciertos minerales índices. Según Cárdenas (2015), los minerales que mejor particionan en función de las alteraciones son biotita, clorita, sericita, óxidos de hierro y pirita (dentro de los minerales de alteración que también se encuentran en la base de datos de Las Cobalteras). Todos son altamente solubles en agua regia. Se puede agregar a este grupo de minerales a la calcita, dada su alta solubilidad en agua regia y su correlación

con las concentraciones de calcio en las muestras mapeadas (ver Anexo C).

Uno de los diagramas de clasificación de alteraciones hidrotermales, propuesto por Townley et al. (2012), es el de Al-Fe-Mg (ver Figura 5.15). La línea caracterizada por la razón $Al/(Mg+Al) = 80\%$ divide el triángulo en dos zonas, denominadas Zona 1, con mayor biotita-clorita y menor sericita, y Zona 2, con mayor sericita-arcillas y menor biotita-clorita. Las muestras de ambas zonas pueden tener presencia de piritita. Así, las muestras de la Zona 1 estarían dominadas por la presencia de clorita y/o biotita, mientras que, las muestras de la Zona 2 estarían dominadas por la presencia de sericita y/o arcillas.

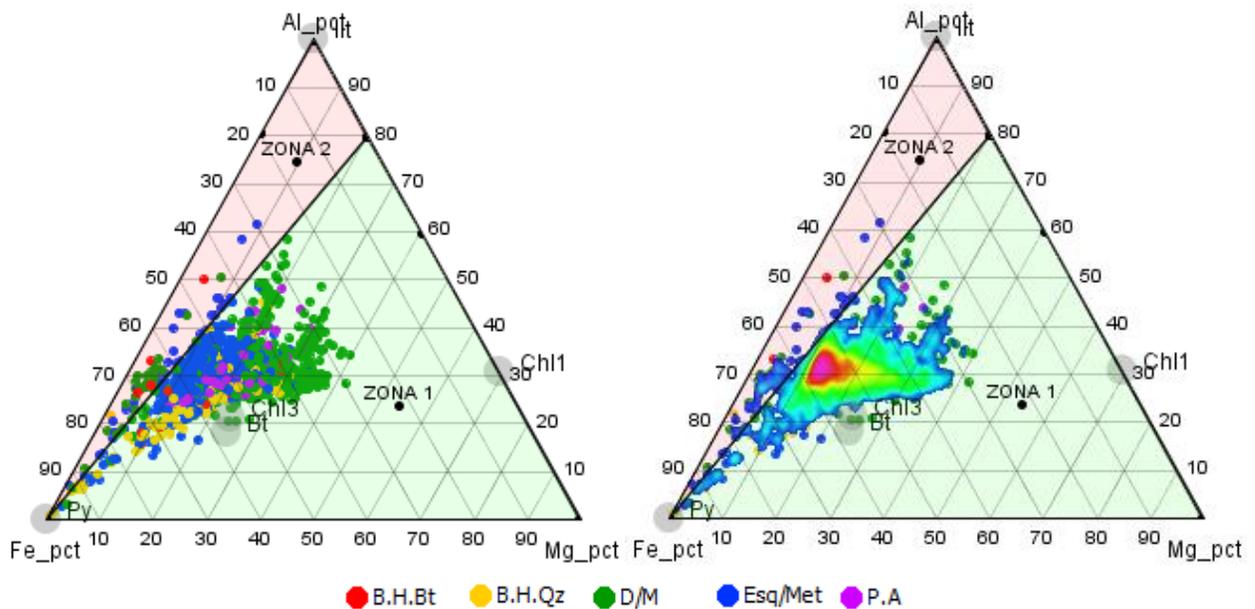


Figura 5.15. Diagrama de clasificación Al-Fe-Mg (Townley et al., 2012) con base de datos geoquímicos de Las Cobalteras. A la derecha se muestra la densidad de puntos (muestras) en colores, con un foco principal en la Zona 1.

Un segundo diagrama de clasificación es el de Mg-Fe-S (ver Figura 5.16). El diagrama ternario se divide en tres zonas, dos extremos asociados a control mineralógico y una zona de transición entre medio. Las áreas de control mineralógico son de biotita-clorita y piritita, respectivamente. Las alteraciones tipo filica y argílica son más cercanas a la zona de piritita, y las alteraciones potásicas, principalmente potásica biotítica, y clorita-sericita (u otras alteraciones con clorita) a la zona de biotita-clorita (Cárdenas 2015).

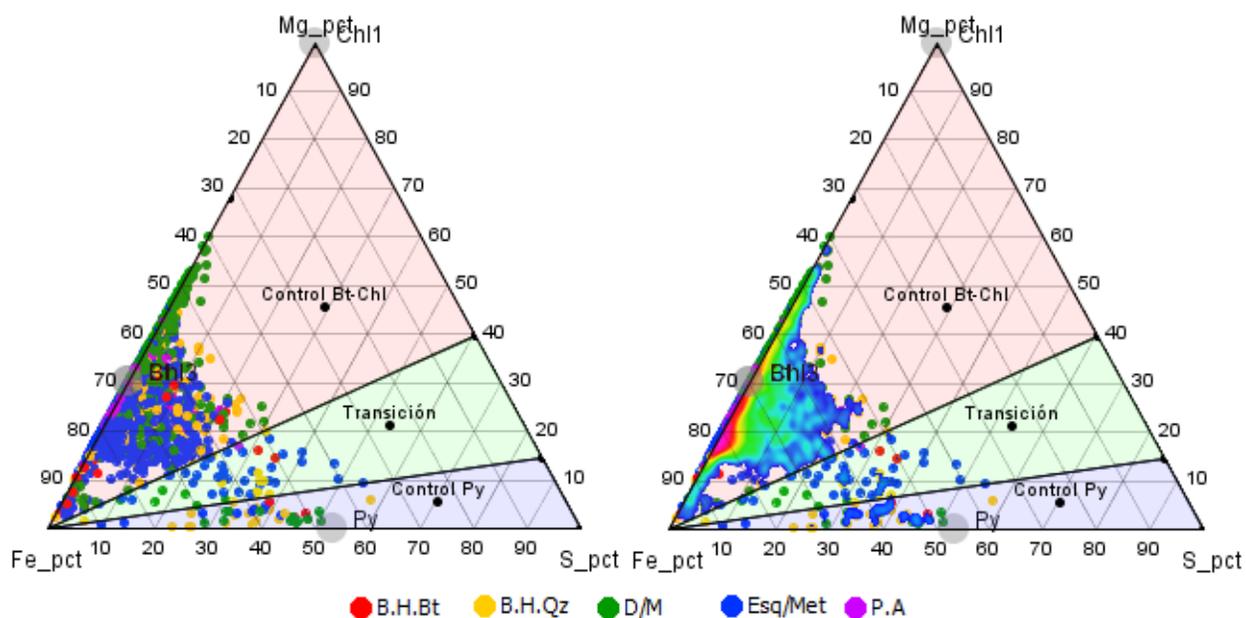


Figura 5.16. Diagrama de clasificación Mg-Fe-S (Cárdenas, 2015) con base de datos geoquímicos de Las Cobalteras. A la derecha se muestra la densidad de puntos (muestras) en colores, con un foco principal en la zona de Control biotita-clorita.

El tercer diagrama de clasificación que se presenta es el de Mg-K-Ca (ver Figura 5.17). El diagrama ternario se divide en dos zonas de control mineral, una de biotita-clorita y la otra de sericita. Además, se podría definir una zona enriquecida en calcio asociada a la presencia de calcita.

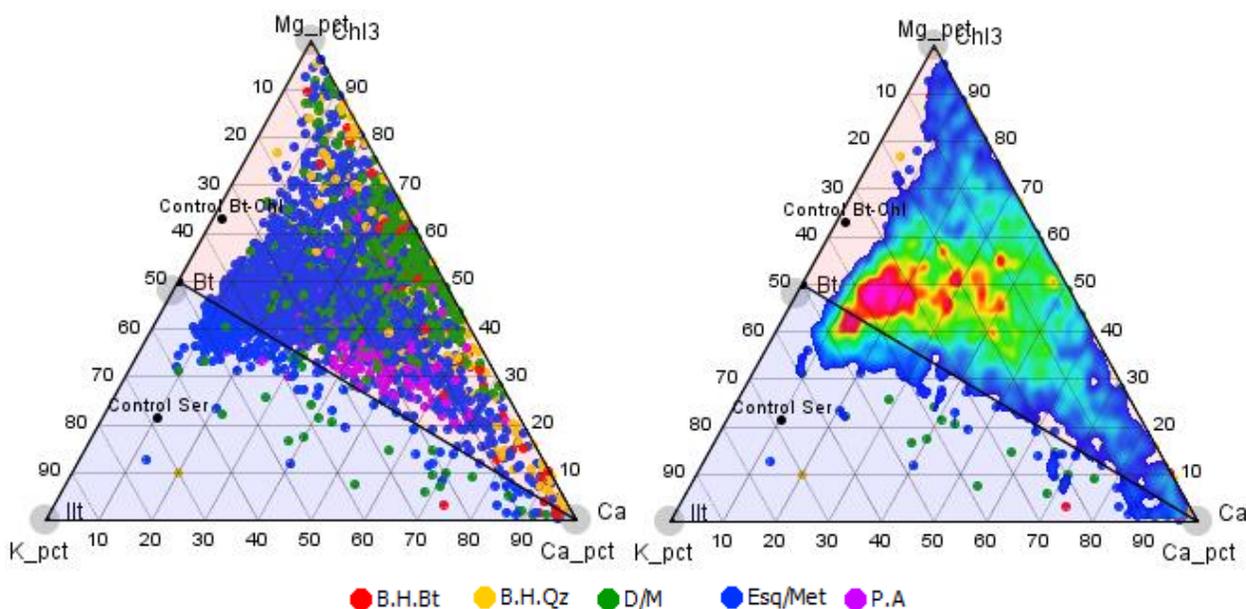


Figura 5.17. Diagrama de clasificación Mg-K-Ca (Cárdenas, 2015) con base de datos geoquímicos de Las Cobalteras. A la derecha se muestra la densidad de puntos (muestras) en colores, con un foco principal y otros más pequeños en la zona de Control biotita-clorita. Se observa extensión del foco principal hacia la zona de Control sericita.

Los tres diagramas mostrados entregan información útil para la clasificación acerca de los controles ejercidos por la mineralogía de alteración soluble en agua regia. Los elementos Al, Mg y K permiten diferenciar entre zonas de alta y baja presencia de biotita y clorita. El Fe y S indican si las muestras se encuentran bajo el control mineral de la pirita, o saber cuáles presentan un enriquecimiento de esta. Si el enriquecimiento es de Fe, la muestra se asociaría con mayor contenido en biotita, clorita u óxidos de hierro, y si el enriquecimiento es de S, entonces la muestra presentaría un mayor contenido de sulfuros o sulfatos que no contengan hierro en su estequiometría. Por otro lado, las muestras con mayores valores de calcio indicarían un control mineralógico de la calcita por sobre los demás minerales índices. No obstante, no queda claro el comportamiento de la sericita y las arcillas, ya que, siendo parte del grupo de minerales de alteración con mayores registros de mapeo en las muestras, no mostraron tener un control mineralógico en los diagramas de clasificación, lo que se podría explicar, en caso de existir, con que las muestras con alteración de sericita y/o arcillas también presentan minerales fuentes de Mg y Fe como la clorita y biotita.

Por último, se presenta el diagrama de clasificación Cu-Fe-S (ver Figura 5.18), propuesto por Cárdenas (2015), con un enfoque más a la mineralización de mena y en donde se resaltan tres zonas distintas. La zona central se caracteriza por el control de pirita y sulfuros de cobre, siendo la calcopirita el sulfuro de Cu principal en las muestras. Estos minerales son disueltos totalmente por el agua regia y por lo tanto se verían reflejados en la química de estos elementos. Las otras dos zonas de enriquecimiento relativo de hierro y azufre destacan la presencia de minerales como biotita, clorita y óxidos de Fe para el caso del hierro, y sulfuros o sulfatos sin Fe para el caso del azufre. De modo similar se aplica el diagrama ternario para Co-Fe-S (ver Figura 5.18), en donde la zona central pasa a estar definida por el control de pirita y sulfuros de cobalto, siendo la cobaltita el sulfuro de Co principal en las muestras. Las respectivas zonas de alto hierro y azufre representan lo mismo que en el diagrama Cu-Fe-S. Tanto las concentraciones de Co y Cu corresponden a las del análisis químico para cobalto total y cobre total en las muestras.

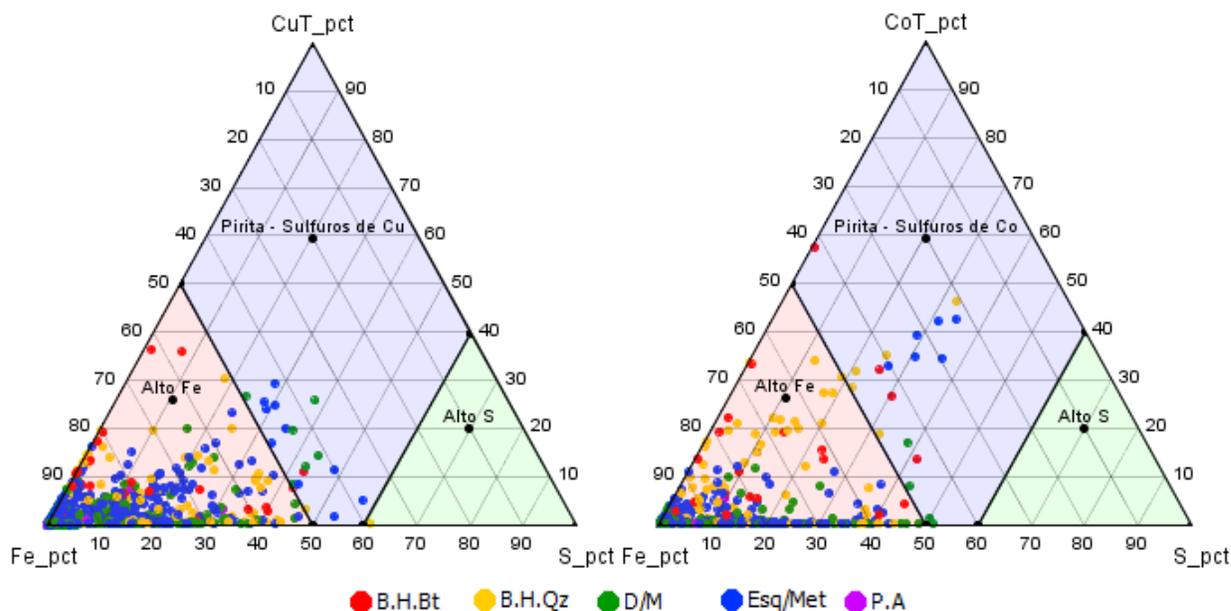


Figura 5.18. Diagramas ternarios CuT-Fe-S y CoT-Fe-S (cobre y cobalto total) con base de datos geoquímicos de Las Cobalteras. Basados en el diagrama CuT-Fe-S de Cárdenas (2015), indicando zonas de pirita-sulfuros de Cu y enriquecimiento de Fe y S.

6 DISCUSIÓN Y LIMITANTES

6.1 Discusión

Los gráficos ternarios utilizados para una primera clasificación de la base de datos consideran los elementos mayores que se correlacionan en algún grado, según los registros del logueo de sondajes, con la presencia de los minerales de alteración solubles en agua regia: biotita, clorita, oxihidróxidos de hierro, calcita y pirita (más otros sulfuros, como calcopirita y cobaltita), y que se distribuyen, según la bibliografía, en función de las alteraciones hidrotermales. Existen minerales de alteración que no pueden ser diferenciados a partir de la geoquímica de elementos solubles en agua regia, ya sea por su nula o baja solubilidad, o porque no existe correlación con sus registros de mapeo.

Del trabajo de Cárdenas (2015) se obtiene que el grupo mineral soluble en agua regia a partir del cual es posible definir alteraciones hidrotermales son los filosilicatos. En primer lugar, dentro del grupo de las micas trioctaédricas, se destaca el comportamiento de las biotitas, cloritas y esmectitas, dado que son disueltas totalmente y se asocian a la liberación de Mg, Fe y Al, lo que indicaría una disolución preferencial de las capas octaédricas por sobre las tetraédricas. Además, las cloritas y esmectitas ricas en Mg presentan una tasa de disolución mayor que las ricas en Fe (II) y Al, respectivamente. Esto se debería a que los enlaces Mg-O son más débiles que los Fe-O o Al-O en este tipo de minerales (Ryan et al., 2008). Por otra parte, los minerales que poseen la mayor proporción de K son los feldespatos potásicos y filosilicatos. Sin embargo, la fracción extraíble por agua regia corresponde a los filosilicatos excluyendo a las micas blancas, es decir, el K provendría

de micas trioctaédricas, illita y filosilicatos de capa mixta (Andrist-Rangel, et al., 2010). En el análisis de la mineralogía cuantitativa y la geoquímica de Cárdenas (2015), las altas concentraciones de potasio se correlacionan a la presencia de biotita y no a la de sericita, por lo que se confirmó la proveniencia principal de este elemento.

Los diagramas de clasificación permiten distinguir dentro de tres agrupamientos principales de los datos: control biotita-clorita (ricos en Al, Mg y Fe), control sericita (ricos en Al y pobres en Mg) y control pirita (ricos en S y Fe). El primer grupo podría representar a las alteraciones potásica biotítica, clorita-sericita, propilítica o clorítica. El segundo lo haría con las alteraciones filica, cuarzo-sericita, argílica moderada o sericítica. Mientras que el tercero, en este caso, estaría más asociado a la abundancia de pirita en las muestras o de otros sulfuros de mena, como la calcopirita y cobaltita. Dado que los diagramas solo generan el agrupamiento de los datos por la mineralogía índice soluble que compone las muestras, no es posible saber y tomar en cuenta si dichos minerales tienen efectivamente un origen metasomático posterior o si la mineralogía primaria de la roca, o la geoquímica de esta, es similar a la de la alteración mapeada. En vista de la distribución que tienen los datos en los diagramas de clasificación, casi la totalidad de las muestras exhiben un control teórico por la presencia de biotita y/o clorita sobre la sericita. Asimismo, pocas muestras están dominadas por la pirita, ya que el contenido relativo de hierro es más alto que el de azufre, lo que correspondería a un control de minerales solubles como biotita, clorita u óxidos de hierro. No obstante, los gráficos circulares con los registros de alteración del logueo de sondajes muestran que no todas las rocas presentan alteración de biotita, clorita u óxidos de hierro, y no todos los registros de intensidad (abundancia relativa) de los minerales de alteración se correlacionan con la distribución de los elementos (ver Anexo C).

En la Figura 6.1 y la Figura 6.2 se muestran los diagramas Al-Fe-Mg y Mg-K-Ca para las muestras que no tienen registros de alteración de biotita y clorita, además, se añade el atributo de intensidad para los registros de sericita y arcillas, respectivamente. Se observa que las muestras con registros de alteración de sericita o arcillas se ubican principalmente en las zonas de control de biotita-clorita, sin ni siquiera mostrar una polarización hacia las zonas de menor concentración relativa de magnesio, al igual que las muestras en negro, que corresponden a las muestras que no tienen registros de biotita, clorita y sericita (diagramas de la Figura 6.1), y de biotita, clorita y arcillas (diagramas de la Figura 6.2), manteniéndose distribuciones similares a las observadas cuando se considera toda la población de datos.

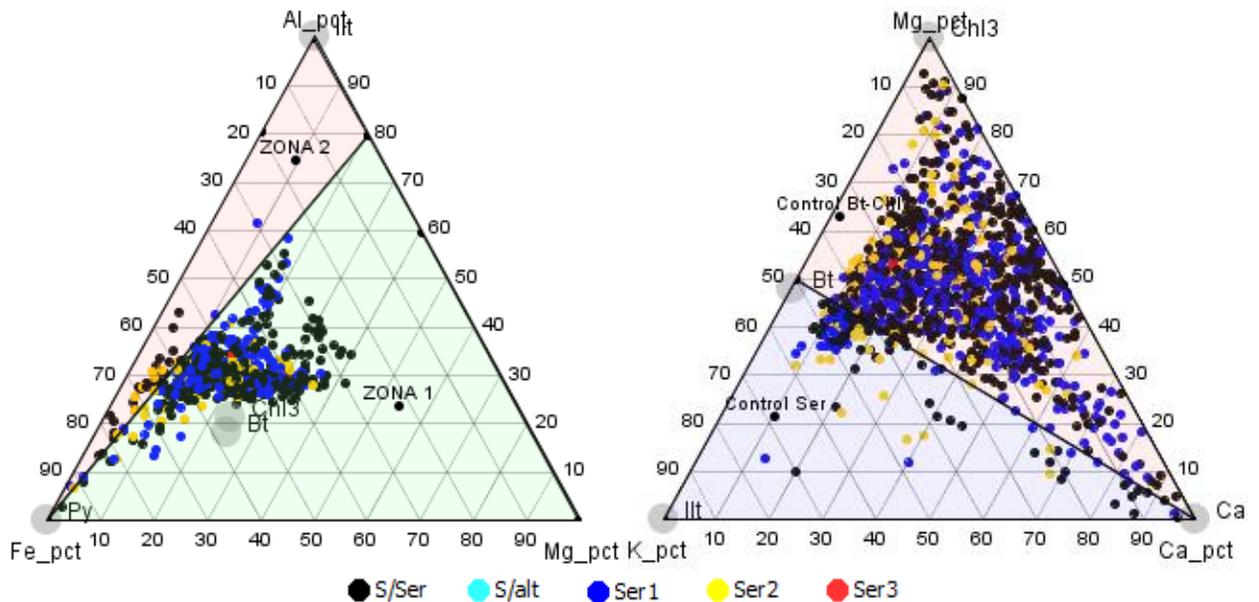


Figura 6.1. Diagramas ternarios de clasificación Al-Fe-Mg y Mg-K-Ca con la población de muestras sin registros de alteración de biotita y clorita. Datos con atributo color para el mapeo de sericita.

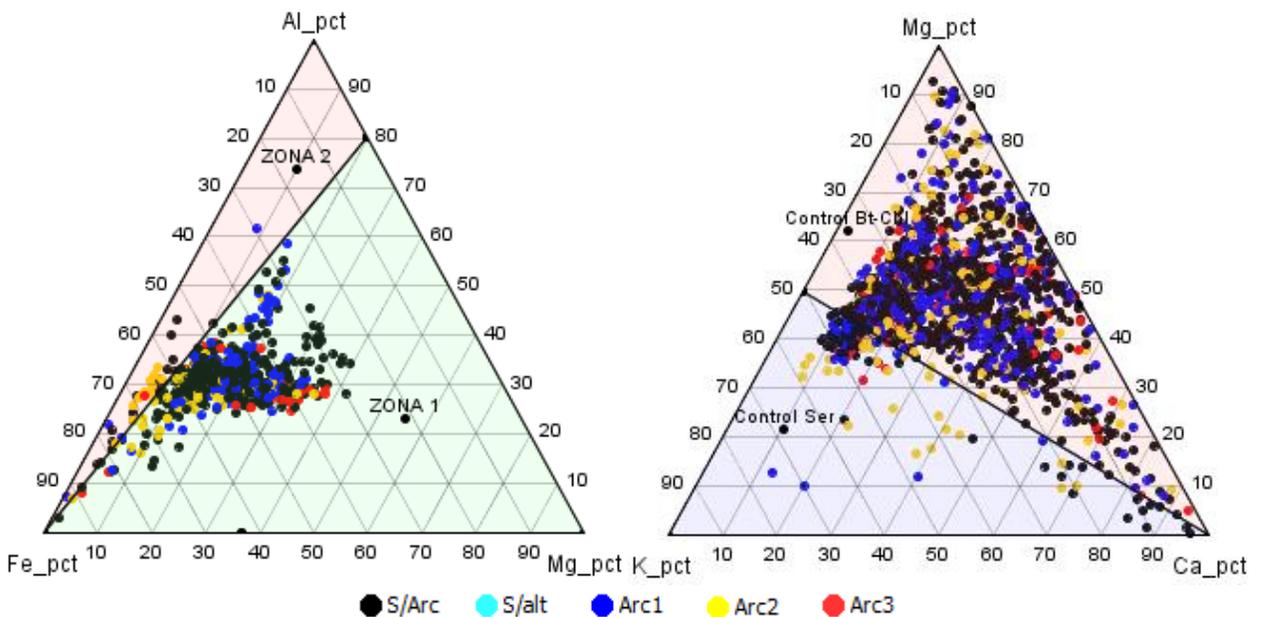


Figura 6.2. Diagramas ternarios de clasificación Al-Fe-Mg y Mg-K-Ca con la población de muestras sin registros de alteración de biotita y clorita. Datos con atributo color para el mapeo de arcillas.

Los boxplots de elementos mayores con el mapeo de intensidad de sericita y arcillas (ver Figura 6.3) señalan que las muestras con registros de alguna de estas dos alteraciones poseen, en su mayoría, rangos de concentraciones similares (traslapes entre las cajas y bigotes superiores e inferiores) a las muestras que no las presentan. Por consiguiente, tiene sentido que en los diagramas de las Figura 6.1 y Figura 6.2, las muestras sin mapeo de alteración de biotita y clorita mantengan

una distribución principal en las zonas de control biotita-clorita, ya que incluso las rocas con alteración de sericita y/o arcillas tienen concentraciones suficientes de Mg, K y Fe para que los gráficos de clasificación determinen, por química, un control de biotita y/o clorita. Lo anterior se puede dar por la existencia de minerales altamente solubles en agua regia que sean fuente de Mg, K y Fe, sobre todo de magnesio, y que no correspondan a una alteración a mapear o minerales de alteración, como biotita y clorita, que no fueron reconocidos en la instancia de logueo. Aun así, de los distintos minerales que componen las rocas del estudio (en base a los datos de mineralogía), los que contienen Mg en su estequiometría teórica y son altamente solubles en agua regia, son biotita y clorita. Por lo tanto, existe la posibilidad de ocurrencia de biotita y clorita sin un origen por alteración hidrotermal en las muestras, en especial en las rocas metamórficas, por la factibilidad de un origen metamórfico para ambos minerales, y en las rocas intrusivas, por cristalización directa de biotita.

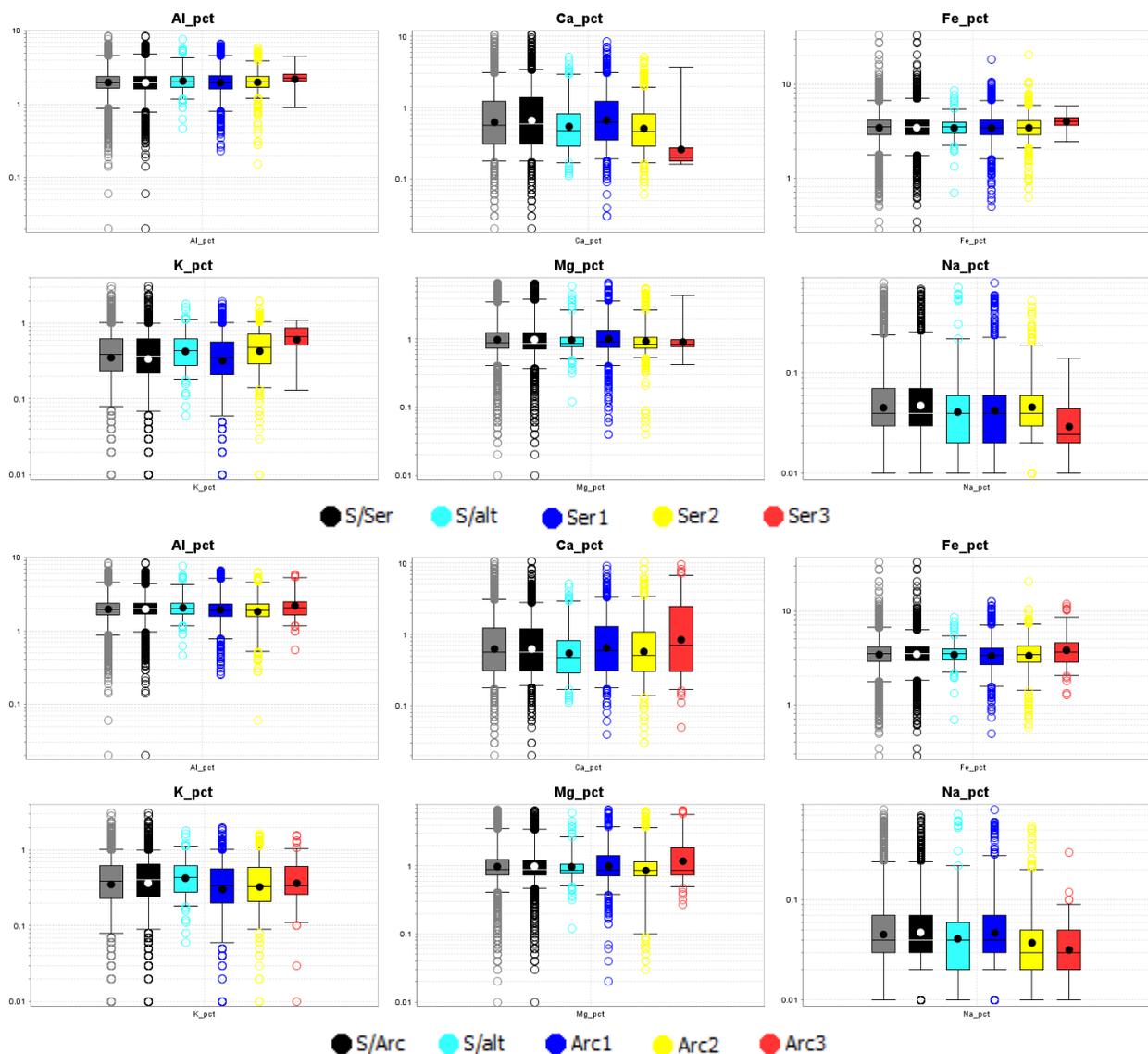


Figura 6.3. Boxplots (con eje logarítmico) de elementos mayores: Al, Ca, Fe, K, Mg y Na, con atributo color para el mapeo de alteración de sericita (gráficos superiores) y arcillas (gráficos inferiores).

A causa del análisis univariable en los elementos mayores con los registros del mapeo de sericita y arcillas, se encontró una correlación inversa entre la distribución de sodio de las muestras de rocas intrusivas (diorita y pórfido andesítico) y el mapeo de abundancia relativa de las arcillas (ver Figura 6.4).

Por los datos de mineralogía, existe gran presencia de plagioclasas en las muestras de rocas ígneas, las que pueden presentar alteración y estar albitizadas, tal como lo indican los análisis de petrografía de los cortes transparentes y los significativos porcentajes de albita en las muestras con mineralogía automatizada. La albita es un mineral levemente soluble en agua regia, por lo que su disolución aporta bajas concentraciones de sodio, aunque, si se observan las concentraciones de sodio en toda la población de muestras, estas son bajísimas, con medias por litología a niveles de centenas de ppm, en donde las más altas corresponden a las de muestras de diorita y pórfido andesítico, con 0,13 % y 0,17 %, aproximadamente (ver Figura 4.24). Sumado a lo anterior, los cortes transparentes de las rocas ígneas muestran la argilización de algunos cristales de albita, por lo que, se esperaría que las concentraciones de Na disminuyan en las muestras de diorita y pórfido andesítico mapeadas con alteración de arcillas de alta intensidad (alta abundancia relativa de arcillas en la roca).

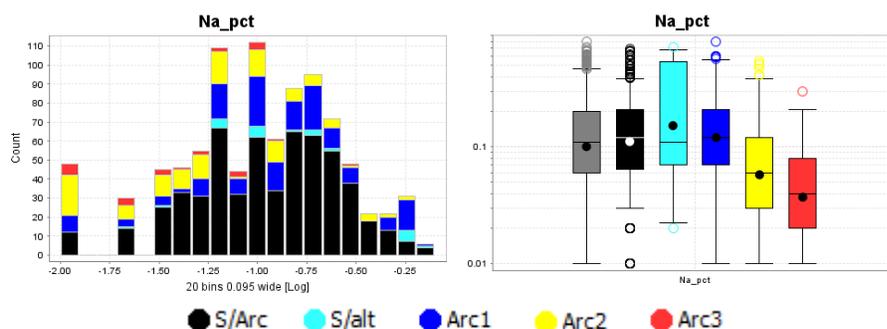


Figura 6.4. Histograma y boxplot de Na con los datos del mapeo de arcillas en las muestras de diorita/microdiorita (D/M) y pórfido andesítico (P.A).

Con los resultados del análisis univariable, los histogramas y boxplots por litología con los registros del logueo de sondajes por cada mineral de alteración en los elementos de sus estequiometrias teóricas (ver Anexo C), expusieron que no todos los minerales de alteración mapeados significaron un enriquecimiento químico, en los elementos correspondientes a sus estequiometrias, en dichas muestras. Mientras que, los minerales de alteración que si mostraron correlación entre la abundancia relativa mapeada y la distribución de las concentraciones de los elementos fue de forma moderada y no del todo absoluta, ya que muestras que no presentan ningún mapeo de alteración (datos identificados como “S/alt” y en color celeste) expusieron que pueden tener similares concentraciones en elementos directamente asociados a la mineralogía de alteración soluble, con las que sí. A pesar de ello, se debe destacar a la calcita, mineral de alteración soluble en agua regia que presenta la mayor correlación entre su abundancia relativa mapeada y las concentraciones de calcio, mostrando un comportamiento, aparentemente, independiente de la clasificación litológica de la muestra (histogramas y boxplots de toda la población de muestras y por litología). En la

Figura 6.5 se observa el diagrama de clasificación Mg-K-Ca con el atributo del mapeo de intensidad de calcita, en donde es posible apreciar el control de este carbonato, bastante abundante en el logeo de sondajes, como fuente principal de Ca en las rocas.

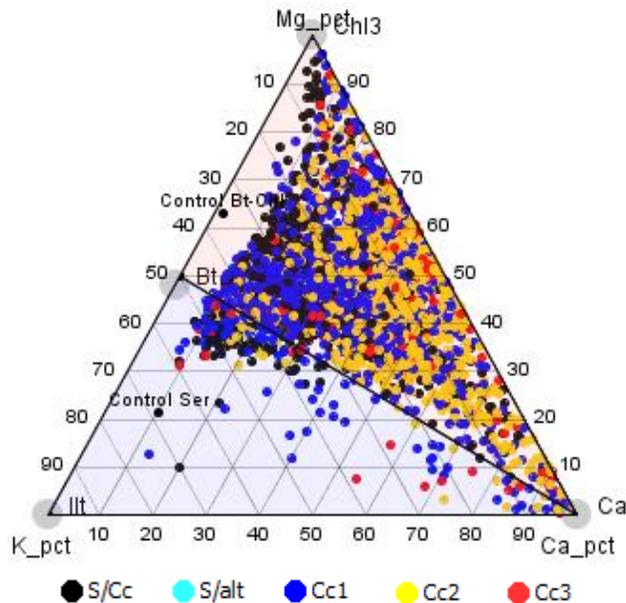


Figura 6.5. Diagrama ternario de clasificación Mg-K-Ca con toda la población de muestras. Datos con atributo color para el mapeo de calcita.

En línea con lo anterior, los análisis de componentes principales (ACP), especialmente el de elementos mayores, muestran, a través de los diagramas de dispersión de los cuatro primeros componentes (ver Figura 4.34), que los agrupamientos de los datos coinciden fuertemente con su clasificación litológica, lo que podría indicar un mayor control de la geoquímica propia de cada unidad litológica y, que los datos más dispersos o alejados del centro de cada grupo corresponderían a muestras con un enriquecimiento en los elementos que se correlacionan con el componente principal respectivo. Por ejemplo, los datos más lejanos de cada litología a favor del PC1 (los valores más altos de PC1 por cada clasificación litológica de los datos), corresponden a las muestras con mayores concentraciones de Al, Mg y Na. Lo mismo ocurre con el PC2 y la relación directa con las concentraciones de As, Co, Cu y S en las muestras dispersas con mayores valores del segundo componente en cada litología.

Teniendo en cuenta los elementos mayores que se correlacionan con la mineralogía de alteración y de mena soluble en agua regia y, que son utilizados en los diagramas de clasificación de control mineral, tales como: K, Mg, Fe, Co, Cu y S, es que los círculos de correlación del ACP de elementos mayores (ver Figura 4.33) muestran que el componente principal PC3 permite separar los datos, ya sea de toda la población o por litología, entre las muestras con mayores concentraciones de Co (dominio mineralización de cobalto) frente a las de Cu (dominio mineralización de cobre). Del mismo modo, el PC4 permite separar los datos entre las muestras con mayores concentraciones de K (principal fuente mineral: biotita) contra las de Mg (principales fuentes minerales: clorita y biotita). Aun así, por la distribución de los datos en los diagramas de dispersión del ACP, se

mantiene la situación de un aparente agrupamiento de las muestras por la geoquímica de las litologías de clasificación, sobre todo en las rocas metamórficas y de pórfido andesítico, ya que se observa una menor dispersión de sus datos, frente a los de brechas hidrotermales y de diorita, que presentan una mayor dispersión.

Un último aspecto del ACP es que los gráficos de dispersión de los componentes principales con el atributo de clasificación de las unidades geológicas de las muestras (ver Figura 4.35), señalan que, las rocas de la unidad Halo, en general contiguas a las de la unidad Veta en los sondajes, presentan una distribución entre los datos de la unidad Veta y las demás unidades, Dique y Metamórfico. Esto último complementa a lo observado en los histogramas y boxplots por unidad geológica (ver Anexo B), en donde los datos de la unidad Halo muestran una distribución de los elementos parecida a la de los datos de la unidad Veta, aunque sin los valores extremos, es decir, en la distribución de varios elementos, la unidad Veta puede presentar concentraciones más bajas y/o más altas que las de la unidad Halo. También, las medias de concentración de los elementos en la unidad Halo tienden a estar entre los promedios de la unidad Veta y de las demás unidades.

De todo lo anterior respecto a la geoquímica de las muestras, a través de los análisis univariable y multivariable, fuentes minerales de las concentraciones de los elementos y mineralogía soluble en agua regia, es que, se propone un nuevo gráfico de clasificación (diagrama ternario) para las muestras: Mg-K-S. Otras alternativas de diagramas ternarios eran los de Al-Mg-S y Al-K-S (ver Anexo D: Diagramas ternarios propuestos), a los que se les suman los de Mg-K-Co y Mg-K-Cu. Estos dos últimos, debido a las pocas muestras con altas concentraciones de Co y/o Cu, se descartaron, aunque se plotearon versiones del diagrama propuesto Mg-K-S con crecimiento de la figura de cada dato en proporción al aumento de la concentración de Co (ver Figura 6.6) y Cu (ver Figura 6.7), respectivamente.

En los diagramas de la Figura 6.6 y 6.7, los datos con mayores concentraciones de Co y/o Cu tienden a ubicarse cerca y a lo largo del eje o sistema binario Mg-S, en donde, además, la litología de estas muestras es variada, pero con la mayoría de las B.H.Qz emplazándose en dicha zona, mientras que, la unidad geológica Veta domina en la clasificación de esas muestras. Por otro lado, los datos que se ubican cercanos al eje o sistema binario Mg-K, corresponden mayormente a rocas metamórficas e ígneas intrusivas, en donde, la unidad metamórfica y pórfido andesítico se clasifican tendiendo más al componente K, mientras que, la unidad diorita es baja a muy baja en dicho componente, estando más cerca del componente Mg. Entre medio de los dos sistemas binarios nombrados, Mg-S y Mg-K, se ubica la mayoría de los demás datos, habiendo muestras de todas las litologías, destacando entre ellas a las muestras clasificadas como Halo dentro de las unidades geológicas.

Hay que recordar que, como en los diagramas ternarios del capítulo de gráficos de clasificación y control mineral, los componentes del diagrama Mg-K-S están relacionados con la mineralogía soluble presente: Mg con la clorita; K con la biotita (o con sericita en ausencia de biotita); S con los sulfuros. Por lo mismo, se incluyen en el diagrama Mg-K-S los puntos que representan a la clorita (1.0 Mg), biotita (0.5 K y 0.5 Mg) y piritita (1.0 S), aunque tengan 1 o 2 componentes en cero.

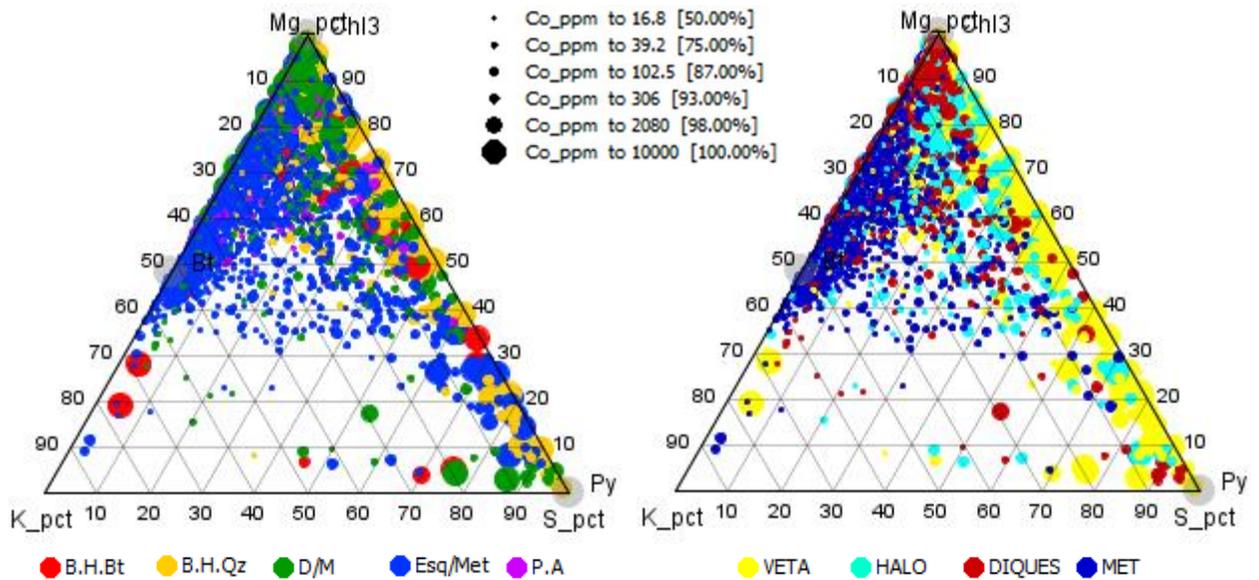


Figura 6.6. Diagrama ternario Mg-K-S, propuesto para clasificación de las muestras analizadas (3421). Diagrama de la izquierda presenta los datos con atributo color para las litologías y el de la derecha con atributo color para las unidades geológicas. Atributo para el tamaño de la figura de los datos según concentración de Co en ppm (análisis ME-MS41).

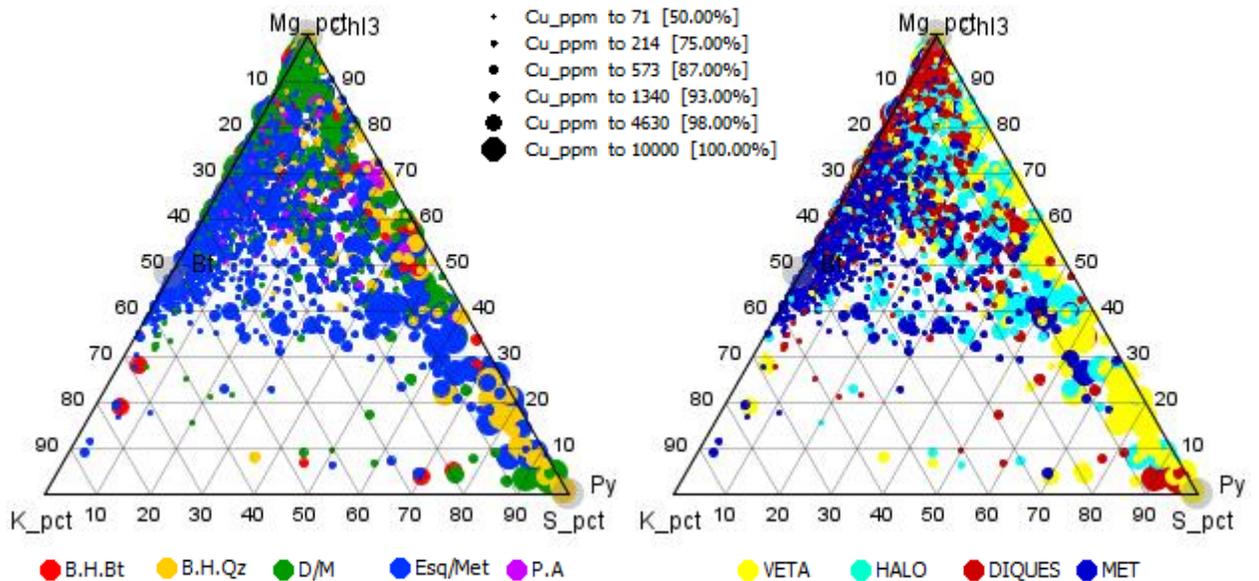


Figura 6.7. Diagrama ternario Mg-K-S, propuesto para clasificación de las muestras analizadas (3421). Diagrama de la izquierda presenta los datos con atributo color para las litologías y el de la derecha con atributo color para las unidades geológicas. Atributo para el tamaño de la figura de los datos según concentración de Cu en ppm (análisis ME-MS41).

Por su parte, la petrografía de cortes transparentes muestra que las alteraciones descritas en las rocas analizadas bajo microscopio son, principalmente, selectivas y poco a moderadamente pervasivas. Los procesos de reemplazo e intercambio iónico tienden a predominar, de minerales

inestables a minerales estables o metaestables en las nuevas condiciones. Por ejemplo; en las rocas metamórficas se observa el remplazo de micas blancas por sericita; en las rocas dioríticas el remplazo de anfíboles por actinolita, epidota o clorita y el de plagioclasas por epidota, clorita, albita, sericita o arcillas; en la roca andesítica el remplazo de piroxenos y hornblendas por actinolita o clorita y el de plagioclasas por clorita, albita o sericita. También se presentan minerales de alteración debidos a procesos de depositación directa, tales como cuarzo, calcita, turmalina y pirita, principalmente.

Los datos de mineralogía automatizada TIMA-TESCAN indican que los minerales predominantes en las muestras analizadas corresponden a cuarzo, turmalina, clorita, moscovita/illita, albita y calcita. Al comparar la Tabla 6.1 y la Tabla 6.2, que muestran la mineralogía del logueo de sondajes y los porcentajes de la mineralogía automatizada, respectivamente, se puede hacer la distinción en que, para el mismo tramo de testigo de sondaje, el mapeo geológico no se corresponde totalmente con la mineralogía cuantitativa. Por ejemplo, los tramos de sondajes que corresponden a las muestras TESCOAN 825 y 1302, según el logueo de sondajes, presentan alteración con abundancia relativa moderada de biotita, sin embargo, los porcentajes de la mineralogía automatizada señalan que los mismos tramos de testigo no superan el 0,2% de biotita, pero si poseen porcentajes considerables de clorita. Esta diferencia entre mapeo geológico y la mineralogía cuantitativa en la proporción de biotita-clorita puede deberse a un error de reconocimiento mineral durante el logueo de sondajes, ya que el remplazo de biotita por clorita no siempre es evidente a escala de muestras de mano o, simplemente, es impreciso determinar por el ojo geológico entre ambos minerales en ciertas condiciones. De esta manera, se pone en duda el supuesto de que el mapeo geológico determina la alteración hidrotermal predominante de la roca, lo que introduce un grado de error a la clasificación y correlación entre el mapeo geológico y la geoquímica de las muestras.

Tabla 6.1. Muestras con análisis TIMA-TESCAN y la información del mapeo geológico del tramo de sondaje respectivo.

N° muestra TESCOAN	N° sondaje	Clasificación litológica	Minerales alteración Mapeo Geológico	Mineralización Mapeo Geológico
19	DDH-01	B.H.Qz	Sil(2), OxFe(1)	O.Co, O.Cu
825	DDH-09	Esq/Met	Sil(2), Bt(2), Ser(2)	S.Fe
923	DDH-11	Esq/Met	Sil(3), Cc(2), Arc(3), OxFe(1)	-
952	DDH-11	P.A	Chl(2), Arc(2), OxFe(2)	-
1302	DDH-15	Esq/Met	Sil(2), Bt(2), Ser(2)	S.Fe
2884	FAR-04	P.A	Chl(2), Ep(2), Cc(2)	-

Tabla 6.2. Muestras con análisis TIMA-TESCAN y la información de mineralogía cuantitativa, en porcentaje, de los minerales del logueo de sondajes (mapeo de alteración y mineralización).

TESCAN	Qz	Ab	Tur	Bt	Chl	Ms/Il	Arc Al	Cal	Hem/Mag	Cob	Ox Co	Py	Cpy
19 (B.H.Qz)	51,61	2,44	34,17	0,04	4,81	4,25	0,26	0,03	0,17	0,01	1,40	0,00	0,00
825 (Met)	40,84	1,97	12,61	0,15	22,96	8,91	0,03	5,60	0,02	2,80	0,00	1,94	0,56
923 (Met)	51,50	7,87	19,70	0,51	4,54	3,33	0,47	3,57	0,07	2,29	0,00	0,13	0,00
952 (P.A)	55,24	1,67	2,97	0,87	5,28	17,39	0,04	0,97	0,59	0,43	0,00	5,74	5,65
1302 (Met)	16,42	20,22	38,17	0,08	6,90	8,34	0,45	2,04	0,01	4,43	0,00	0,66	0,39
2884 (P.A)	49,37	1,76	39,10	0,00	4,39	0,78	0,35	0,92	0,04	1,29	1,08	0,00	0,00

Otra disparidad crítica entre los datos de la mineralogía cuantitativa y el mapeo geológico, son los porcentajes y registros del mapeo de turmalina en las muestras. Esto se puede notar en las muestras 1302 y 2884 del análisis TIMA-TESCAN, las cuales tienen más de 30% de turmalina (ver Tabla 6.2), mientras que, los tramos de sondaje correspondientes fueron mapeados como esquisto y pórfido andesítico, respectivamente, sin registros de alteración de turmalina (ver Tabla 6.1). La turmalina es un mineral importante en la zona de estudio, por su presencia en la masa fundamental de brechas hidrotermales y en el relleno de vetas/vetillas mineralizadas. Sin embargo, es considerada no soluble en agua regia, por lo que, no puede ser diferenciada a partir de la base de datos geoquímicos utilizada en este trabajo. Por esta razón, solo es posible inferir algo en base a las muestras con análisis de mineralogía automatizada y el logueo de los tramos de sondajes correspondientes, en donde la falta de mapeo de turmalina en las muestras con altos porcentajes de este mineral puede atribuirse a un desacierto durante el logueo, una incorrecta correspondencia de las muestras TIMA-TESCAN con los tramos de sondajes o, a otra causa, la cual no es posible identificar en esta instancia.

En vista de todo lo anterior, la mayor incertidumbre en los diagramas de clasificación se debe a las razones de minerales de biotita y clorita con respecto a sericita, las cuales pueden estar en mayor o menor proporción debido a la propia litología o a una alteración hidrotermal propiamente tal. Esto puede llevar a errores de clasificación entre alteraciones como la potásica biotítica, sericita-clorita y fílica, siempre y cuando el origen de los minerales sea por metasomatismo y no de litología misma. Cabe mencionar que la alteración fílica puede presentar clorita en proporciones considerables, al igual que la alteración potásica biotítica, pero con mayor biotita que clorita en esta última. Además, se debe tener presente la posibilidad de superposición de alteraciones, ya que no es considerada en el mapeo de sondajes y puede llevar a incongruencias con la geoquímica.

El modelo de clasificación de alteraciones hidrotermales de Cárdenas (2015) selecciona las muestras obedeciendo a los patrones de razones entre minerales de alteración. Por ejemplo, diferenciar rocas con alteración potásica biotítica de las alteraciones más cloríticas, como una sericita-clorita o propilítica abundante en clorita, la diferencia se daría cuando la clorita comience a predominar sobre la biotita. Sin embargo, para las razones minerales que incluyen sericita el límite para diferenciar alteraciones se vuelve más difuso. Es el caso de alteraciones como sericita-clorita-arcillas (SCC) y cuarzo-sericita (fílica), ya que, si bien la primera posee mayor proporción de clorita que la segunda, en ambos casos el cuarzo y la sericita tienden a ser los minerales predominantes. De esta manera, según los resultados de Cárdenas (2015), los errores de clasificación se vinculan directamente a las concentraciones de los elementos químicos provenientes de los minerales solubles en agua regia. Es por ello, que las alteraciones sericita-clorita pueden ser clasificadas como potásicas biotíticas, si las concentraciones de Al-Mg-K son relativamente altas o como fílica, si son bajas. Como ocurre con las muestras con gran presencia de sericita y/o arcillas que pueden ser clasificadas erróneamente por sus concentraciones relativamente altas de Al-Mg-K, cuyos minerales fuentes pueden no necesariamente tener un origen por alteración hidrotermal.

La metodología de dicho modelo puede ser utilizada de varias maneras útiles. Es posible reconocer,

en función de la mineralogía automatizada, a las muestras que fueron clasificadas erróneamente según el mapeo geológico, ya que dependerá de las razones de biotita, clorita y sericita definidas para cada alteración, siempre y cuando se determine que dichos minerales se den por alteración hidrotermal. De manera que, es fundamental contar con suficientes muestras con datos de mineralogía cuantitativa para generar los patrones necesarios para una correcta clasificación y, además, habría una aplicación sobre el logueo de sondajes, al sugerir alteraciones en función de la química, con sustento en la mineralogía cuantitativa, en zonas donde existe mayor incertidumbre para los y las geólogos durante el mapeo. Por último, cada clase de alteración predefinida por el mapeo geológico debe ser analizada con un enfoque integral entre las variables mineralógicas, geoquímicas y texturales, considerando, a la vez, las variables críticas como, por ejemplo, el método de digestión de las muestras, la solubilidad de los minerales y, la mineralogía de alteración frente a la mineralogía primaria de las rocas.

6.2 Limitantes

Este trabajo no considera una serie de variables que pueden afectar en la clasificación de alteraciones hidrotermales, como estructuras pequeñas y texturas, principalmente. Por ejemplo, un tramo de roca intrusiva, diorita o pórfido andesítico, puede tener registros de alteración por cuarzo, biotita, turmalina, clorita y sericita, más mineralización de sulfuros, sin embargo, no se considera el caso de que la clorita y sericita se dan en la roca intrusiva misma, mientras que el cuarzo, biotita, turmalina y sulfuros se presentan en vetillas centimétricas que cortan la roca, lo que pone en duda cuál alteración es predominante y cuál subordinada desde el punto de vista químico. Además, no se considera, siguiendo el ejemplo anterior, si la alteración por clorita y sericita en la roca intrusiva corresponde a un halo de alteración de las vetillas o es una alteración previa. En cuanto a las texturas de las rocas el efecto sería similar. Una textura de reemplazo de minerales o inclusión de otras litologías, como sería el caso de las brechas (no fueron consideradas en Cárdenas, 2015), puede llevar a que una muestra sea clasificada dentro de una clase totalmente distinta. Por ejemplo, en una brecha hidrotermal con matriz de cuarzo-turmalina, los minerales que se disuelven en agua regia corresponderían únicamente a los que se encuentren en los fragmentos y no a la masa fundamental, lo que conduciría a clasificar la muestra según los fragmentos predominantes y, en caso de haber minerales solubles que formen parte del cemento de la brecha, seguirá existiendo la influencia química de la mineralogía soluble de los clastos, la que será mayor o menor según el porcentaje de clastos en las muestras de brechas hidrotermales. No obstante, las brechas hidrotermales corresponden a la principal unidad litológica con mineralización de cobre y cobalto, por lo que, las muestras mapeadas como brecha hidrotermal no fueron eliminadas en este estudio.

Las brechas hidrotermales pueden componerse de clastos de rocas intrusivas o metamórficas, clastos que pueden presentar sus respectivas alteraciones, pero al no contar con una diferenciación en la cartilla de mapeo que especifique que registros de minerales de alteración corresponden a la masa fundamental o a los clastos, no es posible mejorar el análisis en esta unidad litológica. Tampoco se cuenta con la información de la litología de los clastos en los tramos de brechas hidrotermales. Por consiguiente, la clasificación de estas muestras es la que posee mayor incertidumbre por el grado de control químico que puede llegar a tener la mineralogía soluble en agua regia perteneciente a los fragmentos de roca de las otras litologías.

Pese a que en su momento haya sido tratada como una desventaja que la base de datos geoquímicos fuese obtenida por un método de digestión parcial (agua regia) y no disuelva la mayoría de los minerales, en realidad, este hecho acota las posibles fuentes de los elementos. Una disolución mediante otros métodos como 4-ácidos o ácido fluorhídrico habría significado que los elementos varíen considerablemente sus concentraciones y tratar de determinar su proveniencia sería un problema litogeoquímico mucho más complejo. De modo que, se recuerda que los grupos minerales considerados totalmente solubles en agua regia son sulfuros, micas trioctaédricas (clorita y biotita, por ejemplo), sulfatos, carbonatos y oxi-hidróxidos de Fe-Mn. Los demás grupos minerales, como las micas blancas, feldspatos, hornblenda y caolinita, mantienen sus proporciones mayormente constantes posteriores al agua regia. Otros minerales, como la albita, pueden disolverse solo en fracciones muy bajas por lo que la proveniencia de los elementos disueltos no puede ser determinada directamente de la presencia de estos (Ryan et al., 2002; Ryan et al., 2008; Tarvainen et al., 2009; Macfarlane et al., 2005).

El conocimiento de la proveniencia de los elementos químicos es de vital importancia para el análisis de alteraciones porque permite asociar los datos geoquímicos con zonas de enriquecimiento relativo de minerales. De lo contrario, las alteraciones pueden ser definidas erróneamente al asociar elementos a minerales equivocados. Es por ello, que una gran limitante para seguir el modelo de clasificación de Cárdenas (2015) y, así determinar si existe diferencia por litología en la proveniencia y mineralogía fuente de los elementos químicos, es la cantidad de muestras con análisis de mineralogía automatizada. El modelo clasifica las muestras obedeciendo a los patrones de razones entre minerales de alteración y, al contar con tan pocos datos de mineralogía cuantitativa, no es posible en este trabajo comparar y correlacionar las proporciones minerales de las muestras con la base de datos geoquímicos e, incluso, con los registros del logueo de sondajes.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dada la baja cantidad de datos de mineralogía cuantitativa, la búsqueda de correlación se centró en la geoquímica de elementos solubles en agua regia y el mapeo geológico de sondajes.

Las variables geoquímicas que permiten diferenciar entre alteraciones, según la bibliografía y la correlación mostrada con algunos minerales del mapeo geológico, son los elementos mayores, ya que tienen directa relación con la mineralogía de alteración y de mena soluble en agua regia. En este caso, los elementos que muestran alguna relación, ya sea en todas las muestras o en alguna unidad litológica específica, son: Mg, K, Ca, Na, S, Fe, Cu y Co.

Los datos geoquímicos del grupo de elementos recién nombrados se relacionan con el mapeo de los minerales solubles en agua regia: biotita, clorita, calcita, sulfuros y oxidados de Fe, Co y/o Cu, principalmente. La correlación entre la geoquímica y el mapeo de la mineralogía soluble experimenta variaciones al separar la población de muestras según la clasificación litológica del logueo de sondajes. De esta manera, la relación entre la distribución de los elementos formadores de la mineralogía soluble seleccionada, y la clasificación litológica de las muestras, queda de la

siguiente manera: biotita en las brechas hidrotermales; clorita en las brechas hidrotermales y pórfido andesítico; calcita en las brechas hidrotermales, diorita, pórfido andesítico y rocas metamórficas; oxi-hidróxidos de hierro en las brechas hidrotermales; oxidados y sulfuros de cobalto en las brechas hidrotermales, diorita, pórfido andesítico y rocas metamórficas; oxidados y sulfuros de cobre en las brechas hidrotermales, diorita, pórfido andesítico y rocas metamórficas; sulfuros de hierro en las brechas hidrotermales, diorita, pórfido andesítico y rocas metamórficas.

El cruce entre la información de mineralogía (microscopia y automatizada), geoquímica (análisis ME-MS411), logueo de sondajes y solubilidad de minerales en agua regia, indicarían que las alteraciones hidrotermales tendrían un control litológico, es decir, la composición mineralógica previa de las rocas sería un factor importante en el control de la alteración hidrotermal y las asociaciones minerales generadas.

Las rocas intrusivas, dioritas y pórfido andesítico, desarrollan reemplazo de minerales ferromagnesianos como anfíboles y piroxenos, por actinolita, epidota o clorita, y de plagioclasas por epidota, clorita, albita, sericita o arcillas. Todos los minerales de reemplazo corresponden, mayormente, a los que pueden encontrarse en alteraciones del tipo propilítica, por lo que, las distintas asociaciones de estos minerales de alteración que se vayan dando estarán relacionadas a características del fluido hidrotermal y la cercanía al mismo.

Las rocas metamórficas sufren el reemplazo de micas blancas por sericita y/o arcillas y la oxidación de minerales ferromagnesianos como la biotita. En estas rocas se presenta la mayor incertidumbre al momento de reconocer y clasificar la alteración hidrotermal. Las principales razones recaen en los minerales de alteración: biotita y clorita. Estos dos minerales pueden originarse en el proceso metamórfico o por una alteración posterior, o ambas, lo que añade un poco de incertidumbre a los registros del mapeo de alteración. Por otro lado, la falta de correlación entre el mapeo de abundancia relativa de ambos minerales y las distribuciones de los elementos que los componen, en esta unidad litológica, se podría explicar por una geoquímica relativamente similar entre la roca y la alteración que posee.

El mapeo de las brechas hidrotermales no diferencia entre masa fundamental (cemento y matriz) y fragmentos líticos, por lo que, los minerales de alteración registrados pueden corresponder a una de las partes o a ambas. En estas rocas se observa la mayor correlación entre el mapeo de la mineralogía de alteración soluble y la distribución de elementos mayores, al igual que con la mineralogía de mena. No obstante, las concentraciones de los elementos mayores de las brechas hidrotermales tienden a ser menores que las de las muestras de las otras litologías y, solo en los elementos asociados a la mineralogía de mena como: S, Co, Cu y As, ocurre lo contrario. Dado que las brechas corresponden a la principal unidad litológica mineralizada, no pueden ser eliminadas de la base de datos, destacando que la distribución de los elementos es bastante amplia debido a la influencia química de los fragmentos de rocas de las otras litologías. De manera que, se sugiere realizar una revisión del mapeo de los tramos de brechas hidrotermales, para evaluar la viabilidad de separar los registros de logueo para la masa fundamental de las brechas y los clastos.

En cuanto a los diagramas ternarios de clasificación, casi la totalidad de las muestras estudiadas clasifican en las zonas de control mineral de biotita-clorita, incluyendo a las rocas sin registros de biotita y clorita en el mapeo de alteración.

El análisis univariable de los elementos químicos y la clasificación de las muestras a partir de los diagramas ternarios indican que, existen minerales de alteración y, por consiguiente, alteraciones que no pueden ser reconocidas o diferenciadas a partir de la geoquímica soluble en agua regia, como: turmalina, sericita y arcillas. Esto puede tener dos explicaciones posibles no excluyentes. La primera se debería a que el agua regia no disuelve a la sericita y a las arcillas, que corresponden a minerales claves para la diferenciación de alteraciones en la zona de estudio, ya que se tienden a asociar con fluidos hidrotermales un poco más ácidos. La segunda, es que no exista gran diferencia de la mineralogía soluble en las rocas de una misma litología a pesar de que estén mapeadas con diferentes minerales de alteración. Ambas pueden explicar lo que ocurre en los diagramas Al-Fe-Mg y Mg-K-Ca con las muestras con alteración de sericita y/o arcillas, y sin alteración de biotita y clorita, que, aun así, clasifican en las zonas de control biotita-clorita, ya que estas rocas poseen concentraciones de Mg y K comparables a las que se dan en las rocas que registran alteración de biotita y/o clorita.

La alteración de calcita es la única que se distingue geoquímicamente con facilidad, dada la notoria correlación entre la distribución de calcio y el mapeo de abundancia relativa de calcita. Asimismo, esta correlación es independiente de la litología de las rocas, ya que se observa por unidad litológica, unidad geológica y en toda población de muestras. Por los análisis microscópicos de cortes transparentes, la calcita se presenta principalmente como vetillas de distintas potencias, las que cortan a vetillas de otros minerales de alteración e, incluso, a la foliación de las rocas metamórficas, por lo que, temporalmente no es una alteración temprana, siendo posterior a las demás.

Por su parte, la alteración y/o mineralización asociada a la pirita, pese a ser ampliamente mapeada en los tramos de sondajes, no se correlaciona con la clasificación de los diagramas ternarios CuT-Fe-S y CoT-Fe-S, en donde la mayoría de las muestras se ubica en las zonas de alto Fe y no en las zonas de control mineralógico de pirita y otros sulfuros. Ninguna muestra clasifica en las zonas de alto S, lo que se relaciona y evidencia con la distribución del azufre en los histogramas y boxplots, en que son pocas las rocas con altas concentraciones de S. Además, esta la incertidumbre respecto a cómo distinguir geoquímicamente la pirita de origen metamórfico y la de origen hidrotermal, ya que en los registros de mapeo no existe diferencia o comentarios al respecto, teniendo en cuenta la dificultad del reconocimiento visual entre ambas.

Las asociaciones de minerales de alteración que se pueden dar en las rocas, según los datos mineralógicos y de mapeo, indican que las alteraciones hidrotermales presentes en las rocas estarían relacionadas a fluidos con un amplio rango de temperaturas y de pH neutros a levemente ácidos, ya que no existen muestras con alteración argílica avanzada o que hayan sufrido fuertes procesos de lixiviación, más allá de los tramos mapeados como fallas o los que están en contacto con la superficie, o muy cercanos a esta, ya que están sujetos a procesos propios de la meteorización.

Una manera de mejorar la clasificación es considerar más muestras para análisis de mineralogía automatizada, de esta manera será posible comparar los datos de mineralogía cuantitativa con el mapeo geológico y la geoquímica por digestión en agua regia, pudiendo ser útil para esclarecer dudas de reconocimiento mineral como, por ejemplo, entre biotita-turmalina o biotita-clorita, al igual que las cantidades de moscovita-illita y arcillas, donde este último grupo se podría comparar con las cantidades de albita, dada la correlación entre la abundancia relativa de arcillas mapeadas y, menores concentraciones de sodio en las muestras. Dado que los filosilicatos son el grupo mineral soluble en agua regia a partir del cual es posible definir alteraciones hidrotermales, es de suma relevancia tener mayor certeza de las cantidades de estos en las rocas, cuáles son las especies de filosilicatos presentes y la génesis más probable de cada uno. Además, con la mineralogía cuantitativa se pueden crear razones minerales que permitan distinguir las alteraciones y encontrar los patrones geoquímicos asociados, ya que únicamente por geoquímica no es algo directo y representa un mayor problema.

Pese a que los resultados no cumplen a cabalidad la hipótesis planteada al comienzo de este trabajo, estos pueden ser utilizados para obtener una primera clasificación de las alteraciones hidrotermales presentes en las rocas del área de Las Cobalteras, donde el metamorfismo puede jugar un rol importante en el origen de ciertos minerales, mientras que las brechas hidrotermales no tienden a desarrollar un halo de alteración fácilmente reconocible en la roca caja, solo alteraciones del tipo propilítica en las rocas intrusivas son distinguibles sin complejidad. Con la información disponible no fue posible obtener un índice de alteración que permita reconocer que roca realmente presenta alteración y estimar cuán alterada se encuentra. Para ello, se debe considerar una línea base o background, es decir, es necesario contar con la caracterización geoquímica y mineralógica de las litologías que no presenten alteración para poder calcular un índice de cuán alterada está la roca con respecto a su estado no alterado. Una forma de hacer esta estimación sería definir clusters con las litologías frescas y calcular grados de pertenencia de las muestras por litología, para así distinguir las que presentan algún grado de alteración. Además, se recomienda realizar un análisis de las variables mineralógicas previo a la definición de clases de alteraciones hidrotermales con la finalidad de disminuir la incertidumbre en el mapeo.

8 BIBLIOGRAFÍA

Andrist-Rangel, Y. y otros, 2010. Assessing potassium reserves in northern temperate grassland soils: A perspective based on quantitative mineralogical analysis and aqua-regia extractable potassium. *Geoderma*, pp. 303-314.

Arévalo, C., Grocott, J. & Welkner, D., 2003. The Atacama Fault System in the Huasco Province, Southern Atacama Desert, Chile. In Congreso Geológico Chileno, No 10, CD-ROM. Concepción.

Arévalo, C. & Welkner, D., 2008. Geología del Área Carrizal Bajo-Chacritas, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 111:67 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

Cárdenas, E., 2015. Caracterización geoquímica y mineralógica de alteraciones hidrotermales en Pórfido Cuprífero Escondida. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Chao, T. T., 1984. Use of partial dissolution techniques in geochemical exploration. *Journal of Geochemical*, pp. 101-135.

Chao, T. T. & Sanzalone, R. F., 1992. Decomposition techniques. *Journal of Geochemical Exploration*, pp. 65-106.

Church, S. E., Mosier, E. L., Motooka, J. M., 1987. Mineralogical Basis for the Interpretation of Multi-Element (ICP-AES), Oxalic Acid, and Aqua Regia Partial Digestions of Stream Sediments for Reconnaissance Exploration Geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, pp. 207-233.

Corbett, G. & Leach, T., 1997. Short course manual: Southwest Pacific rim gold-copper systems: Structure, alteration and mineralization, s.l.: s.n.

Gill, R., 1997. *Modern Analytical Geochemistry. An introduction to quantitative chemical analysis for earth, environmental and materials scientists.* London: Longman.

Hall, G., 1999. Near-total acid digestions. *Explore*, Volumen 104, pp. 15-19.

Hall, G. E. & Cameron, E. M., 2001. Comparison of Selective Extractions of Soils Over The Spence Deposit, Chile. Part A: Sequential Extractions of a Soil Profile, s.l.: s.n.

Klassen, R. A., 2001. The interpretation of background variation in regional geochemical surveys - an example from Nunavut, Canada. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, pp. 163-173.

Langmuir, D., 1997. *Aqueous environmental geochemistry.* New Jersey: Prentice-Hall.

Macfarlane, W. R. y otros, 2005. Continuous leach inductively coupled plasma mass spectrometry: applications for exploration and environmental geochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, Volumen 5, pp. 123-134.

Maksaev, V., 2001. Alteración Hidrotermal, Apunte Curso Metalogénesis, Documento de Trabajo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Maksaev, V., Townley, B., Palacios, C., Camus, F., 2007. Metallic ore deposits (Chapter 6). In: The Geology of Chile, T. Moreno, W. Gibbons (eds.), England, p. 181-201.

Meyer, C. & Hemley, J.J., 1967. Wall Rock Alteration. En: Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, Primera Edición, Hubert L. Barnes (ed.), Holt, Rinehart and Winston Inc. Publication, 166-235.

Moscoso, D., Nasi, C., Salinas, P., 1982. Geología de la Hoja Vallenar y parte Norte de La Serena, Regiones de Atacama y Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 55, 102 p., 1 mapa escala 1:250.000. Santiago.

Reed, M.H., 1997. Hydrothermal Alteration and Its Relationship to Ore Fluid Composition. En: Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, Tercera Edición, Hubert L. Barnes (ed.), John Wiley and Sons Inc. Publication, 303-366.

Rose, A.W. & Burt, D.M., 1979. Hydrothermal Alteration. En: Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, Segunda Edición, Hubert L. Barnes (ed.), Wiley Interscience Publication, 173-235.

Ryan, P., Hillier, S. & Wall, A., 2008. Stepwise effects of the BCR sequential chemical extraction procedure on dissolution and metal release from common ferromagnesian clay minerals: A combined solution chemistry and X-ray powder diffraction study. *Science of the total environment*, pp. 603-614.

Ryan, P., Wall, A., Hillier, S. & Clark, L., 2002. Insights into sequential chemical extraction procedures from quantitative XRD: a study of trace metal partitioning in sediments related to frog malformities. *Chemical Geology*, Volumen 184, pp. 337-357.

Sillitoe, R., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, Volumen 105, pp. 3-41.

Snäll, S. & Liljefors, T., 2000. Leachability of major elements from mineral strong acids. *Journal of Geochemical Exploration*, pp. 1-12.

Tarvainen, T., Jarva, J. & Kahelin, H., 2009. Geochemical baselines in relation to analytical methods in the Itä-Uusimaa and Pirkanmaa regions, Finland. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, Volumen 9, pp. 81-92.

Townley, B., 2006. Metalogénesis: Hidrotermalismo y Modelos de Yacimientos, Apuntes y Referencias, Documento de trabajo. Geología Económica, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Townley, B., Díaz, A., Luca, R., 2017 (A). Estado del arte y potenciales recursos Co y Mn en Chile. Advanced Mining Technology Center (AMTC), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM), Universidad de Chile. Santiago.

Townley, B., Díaz, A., Luca, R., 2017 (B). Geología, alteración y mineralización preliminar de distritos/yacimientos seleccionados. Potenciales recursos de cobalto y manganeso en Chile: Definición de zonas y selección de distritos/yacimientos u otras fuentes en Chile. Advanced Mining Technology Center (AMTC), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM), Universidad de Chile. Santiago.

Townley, B., Luca, R., López, F., Muñoz, M., Castillo, P., 2018. Multi-element geochemistry for bulk mineral characterization of hydrothermal alteration associations in porphyry copper deposits and applications to predictive geo-metallurgical modeling. Santiago, Chile.

Welkner, D., Arévalo, C., Godoy, E., 2006. Geología de la Carta Freirina-El Morado, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 100, 50 p., 1 mapa escala 1:100.000.

Wilburn, D.R., 2012. Cobalt mineral exploration and supply from 1995 through 2013: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011–5084, 16 p.

Xu, G. y otros, 2012. Digestion methods for trace element measurements in shales: Paleoredox proxies examined. Chemical Geology, Volumen 324-325, pp. 132-147.

ANEXOS

Anexo A

Tablas resúmenes para las muestras con análisis de petrografía y calcografía

Muestra	455308
Clasificación petrográfica	Veta de turmalinita mineralizada (Py rica en Co y As o glaucodot)
Componentes primarios	Turmalinita (75%) = Tur (30%); Qz (38%); Opacos (7%); Rut (tr). Metapsamopelita (25%) = Qz (4%); Ser (6%); Chl-Sme (13%); Opacos (2%); Zrn (tr).
Alteración/Minerales de alteración	Tur-Qz; Ser-Chl. Cristales de Tur impregnados parcialmente por Ox-Hox de Fe. Ser reemplaza a Feld de protolito psamopelítico.
Minerales opacos	10% = Py (75%); Rut (25%); Cpy (<1%).
Resumen	Veta de Qz-Tur (con Chl-Ser) mineralizada con Py-Cpy, halo de Qz-Ser-Chl. Tur parcialmente impregnada por Ox-Hox de Fe. Roca caja metamórfica (metapsamopelita) con alteración Ser-Chl-Sme. Ser reemplazando a Feld.

Muestra	455309
Clasificación petrográfica	Veta de cuarzo mineralizada (Po-Cpy)
Componentes primarios	100% = Qz (62%); Ser (5%); Chl (3%); Opacos (30%).
Alteración/Minerales de alteración	Qz-Chl-Ser-Cal. Ser junto a Chl alterando a metapsamopelita. Patinas de Ox-Hox de Fe en fracturas rellenas de silicatos y en bordes de vetillas de Po.
Minerales opacos	25% = Po (45%); Cpy (35%); Ox-Hox de Fe (20%).
Resumen	Veta de Qz (con Chl-Ser) mineralizada con Po-Cpy. Patinas de Ox-Hox de Fe en fracturas y bordes de vetillas. Roca metamórfica (metapsamopelita) con alteración Ser-Chl. Microvetillas de Cal sin halo.

Muestra	455310
Clasificación petrográfica	Veta de cuarzo mineralizada (Py o glaucodot - Cpy o gersdorfitita)
Componentes primarios	100% = Qz (68%); Tur (9%); Carb (10%); Chl-Sme (6%); Opacos (7%).
Alteración/Minerales	Qz-Tur-Chl-Ser-Carb.

de alteración	Tur parcialmente alterada por Ox-Hox de Fe.
Minerales opacos	10% = Py (55%); Cpy (45%).
Resumen	Veta de Qz grueso mineralizada con Py-Cpy. Microvetillas de minerales opacos, Tur y Qz fino. Microvetilla de minerales opacos, Carb y Chl-Sme, se une con microvetillas de Carb. Microvetilla de Tur-Qz (Tur alterada parcialmente por Ox-Hox de Fe). Microvetillas de Qz, microvetillas de minerales opacos, microvetillas de Carb.

Muestra	455311
Clasificación petrográfica	Diorita porfídica fuertemente alterada
Componentes primarios	100% = Plg (55%); Anf (30%); Pseudomorfos de Chl y/o Act (17%); Opacos (8%).
Alteración/Minerales de alteración	Act-Ab-Ep-Carb. 40% = Ab (2%); Ep (5%); Act-Tre (8%); Bt (5%); Chl (15%); Ser (5%).
Minerales opacos	5% = Cpy (35%); Py (55%); Ox-Hox de Fe (10%).
Resumen	Roca intrusiva (diorita) con alteración Act/Tre-Chl-Ab-Ep-Ser y Bt previa. Minerales ferromagnesianos con alteración Act/Tre-Chl-Ep; Plg alterada a Ab y Ser-Ep±Chl. En agregados de Chl que reemplazan a Anf se preservan relictos de Bt microcristalina (al parecer corresponde a una alteración previa de ferromagnesianos por Bt). Vetilla de Carb-Ep y Act-Opacos, parte central de Carb, bordes de Ep con Act y minerales opacos diseminados. Microvetilla de Qz y microvetilla de Carb. Presencia de Ox-Hox de Fe en patinas y en bordes de vetillas.

Muestra	455312
Clasificación petrográfica	Diorita de anfíbola
Componentes primarios	100% = Plg (65%); Anf (25%); Qz (5%); Ap (tr); Opacos (5%).
Alteración/Minerales	Act-Bt-Ab-Ep-Chl.

de alteración	46% = Ab (10%); Act (12%); Ep (5%); Bt (1%); Rut (tr); Tnt (4%); Chl (7%); Arc (3%); Carb (4%).
Minerales opacos	3% = Py (80%); Cpy (20%).
Resumen	Roca intrusiva (diorita) con alteración Act-Ab-Chl-Ep-Carb, Bt previa y minerales de Arc. Presencia de Tnt y Rut. Minerales ferromagnesianos con alteración Act-Chl y Carb; Plg alterada a Ab-Ep-Chl-Carb y Arc. En agregados de Ep-Chl que reemplazan a Anf se preservan relictos de Bt microcristalina (al parecer corresponde a una alteración previa de ferromagnesianos por Bt). Microvetilla de Qz-Carb sin halo.

Muestra	455313
Clasificación petrográfica	Esquisto psamopelítico crenulado
Componentes primarios	100% = Qz (60%); Bt (8%); Chl-Sme (14%); Ser (13%); Tur (tr); Zrn (tr); Opacos (5%).
Alteración/Minerales de alteración	Ser-Chl y Bt tardía asociada al clivaje de crenulación. Cristales oxidados de Bt en microvetillas y en sectores entre la foliación principal.
Minerales opacos	5% = Ilm (95%); Ox-Hox de Fe (5%); Sulf de Cu (tr).
Resumen	Roca metamórfica (esquisto psamopelítico) con alteración Ser-Chl-Sme. Ser formada en metamorfismo, Chl-Sme podría también serlo. Bt (secundaria) oxidada en microvetillas y en el clivaje de crenulación. Microvetillas post deformacionales de: Qz; Qz con halo de Bt oxidada; minerales opacos con halo de Bt oxidada. Presencia de Ox-Hox de Fe en fracturas y bordes de microvetillas. Agregados lenticulares de Ilm siguiendo la foliación.

Muestra	455314
Clasificación petrográfica	Andesita porfídica amigdaloidal
Componentes primarios	Fenocristales (25%) = Plg (12%); Px (8%); Hbl (5%). Masa fundamental (75%) = Plg (43%); Px (23%); Qz (2%); Opacos (7%).

Alteración/Minerales de alteración	Act-Chl-Tnt-Qz. 60% = Act (25%); Chl (15%); Sme (10%); Ser (3%); Qz (8%); Ttn (tr); Tur (tr). Presencia de Ox-Hox de Fe en fracturas y bordes de cristales de Hem.
Minerales opacos	7% = Hem (leve magnetismo sugiere presencia de relictos de Mag); Ox-Hox de Fe.
Resumen	Roca porfídica andesítica con alteración Act-Chl-Sme-Ser. Fenocristales alterados a Act-Chl-Sme-Ser, masa fundamental alterada a Act-Chl-Sme. Amígdalas elongadas rellenas parcial o totalmente de Qz±Tur±Act. Roca con magnetismo (probables relictos de Mag), Hem y Ox-Hox de Fe. Microvetilla de minerales opacos, Qz y Tur.

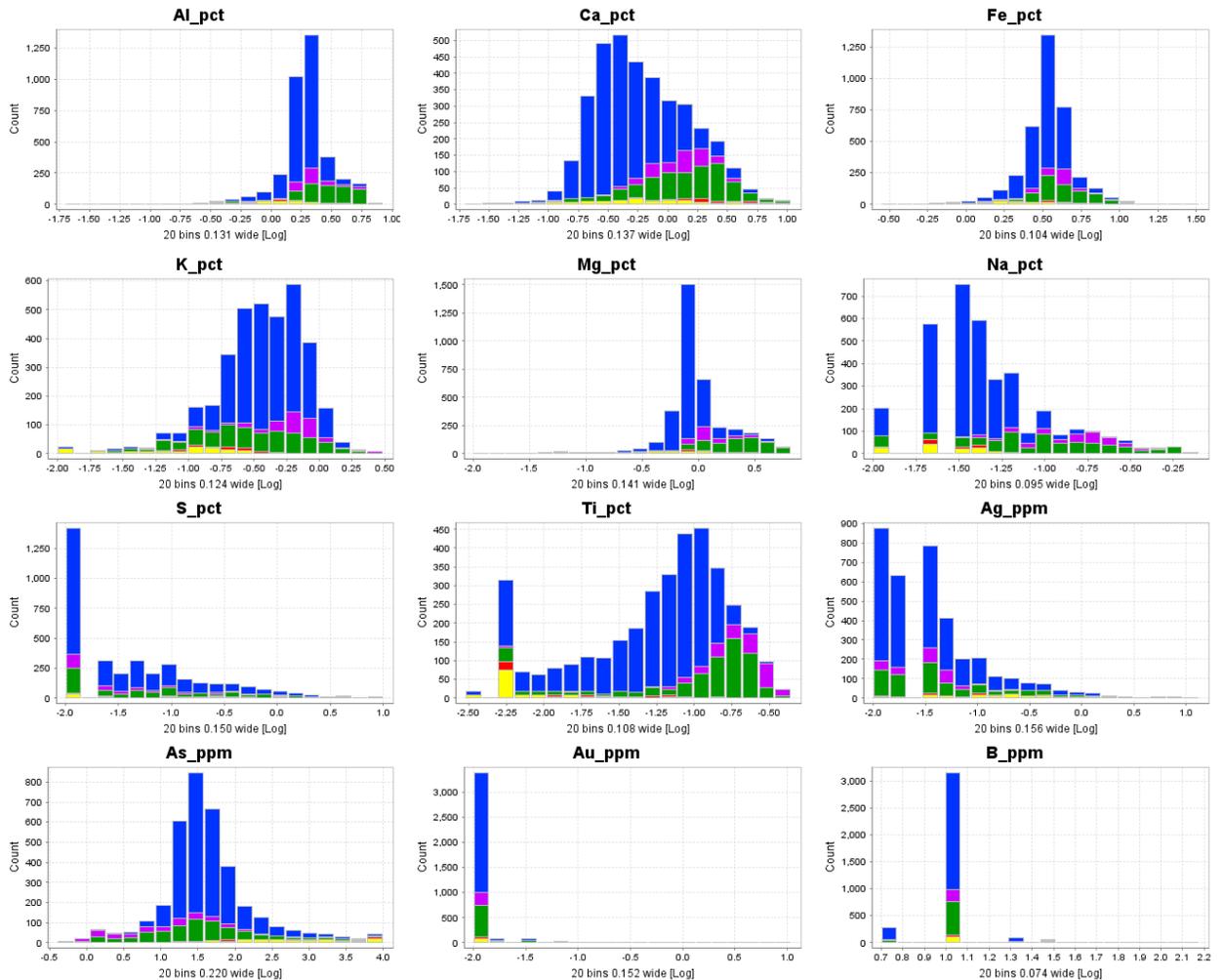
Muestra	455315
Clasificación petrográfica	Esquisto psamopelítico crenulado
Componentes primarios	100% = Qz (45%); Opacos (25%); WM (15%); Bt (15%).
Alteración/Minerales de alteración	Ser-Bt. Bt (secundaria) asociada al clivaje de crenulación y Ser diseminada. Presencia de Ox-Hox de Fe en planos de bandeamiento.
Minerales opacos	3% = Ilm (75%); Py (10%); Ox-Hox de Fe (5%); Sulf de Cu (tr).
Resumen	Roca metamórfica (esquisto psamopelítico) con alteración leve a Ser. Bt secundaria en microvetillas y en el clivaje de crenulación. Ox-Hox de Fe en patinas y en planos de bandeamiento. Agregados lenticulares de Ilm siguiendo la foliación.

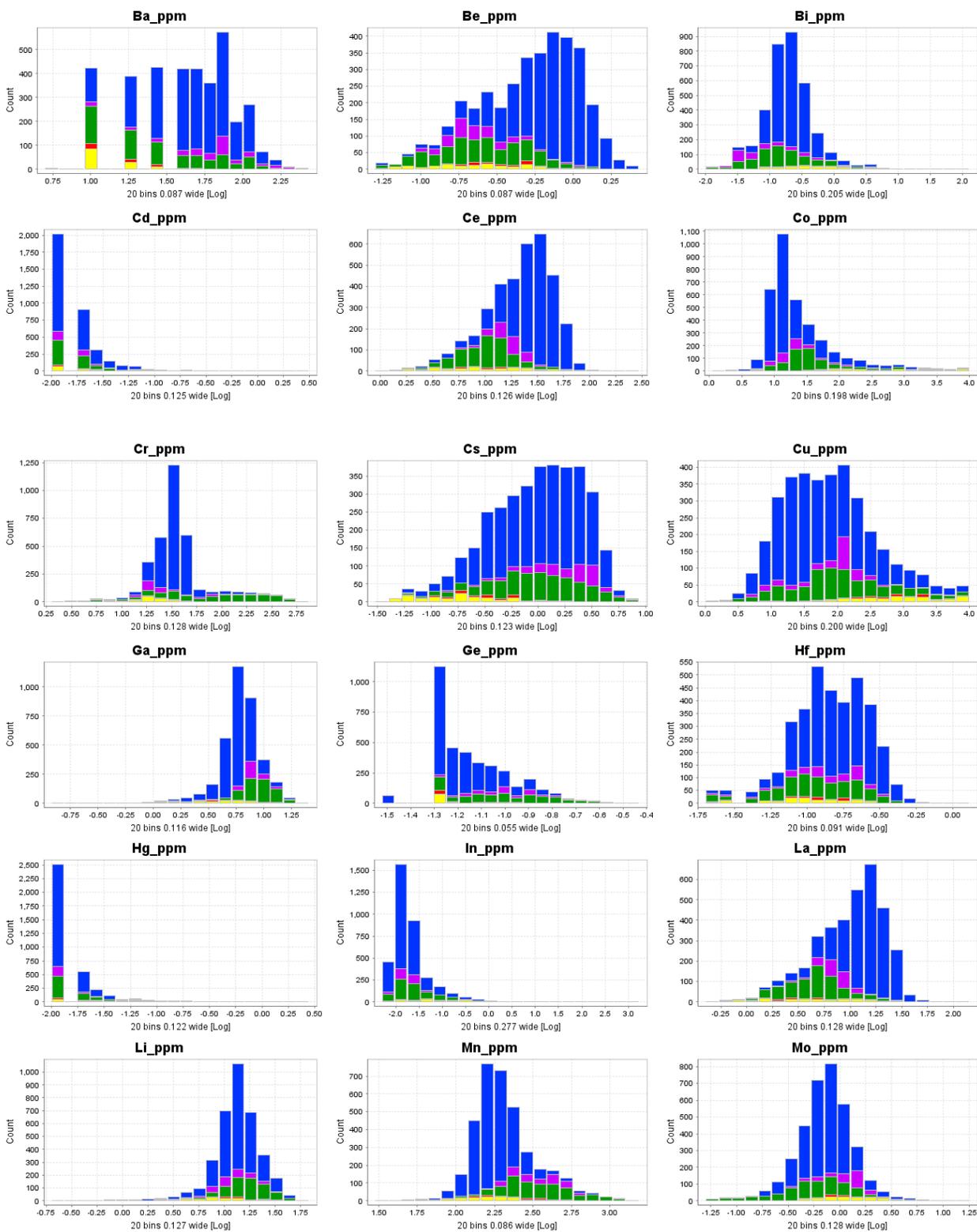
Muestra	455316
Clasificación petrográfica	Metapsamopelita crenulada
Componentes primarios	100% = Qz (45%); Opacos (30%); WM (12%); Bt (8%); Chl (5%); Zrn (tr).
Alteración/Minerales	Bt-Ser-Qz.

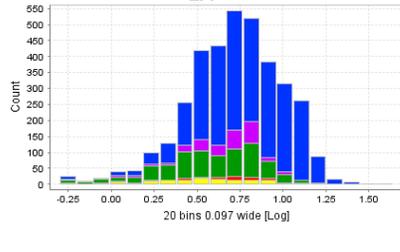
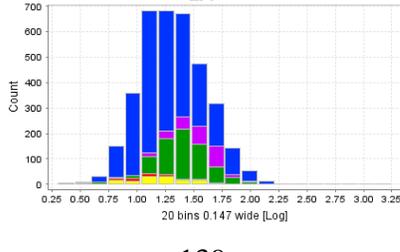
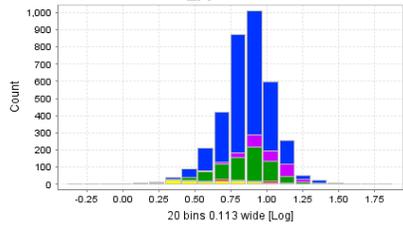
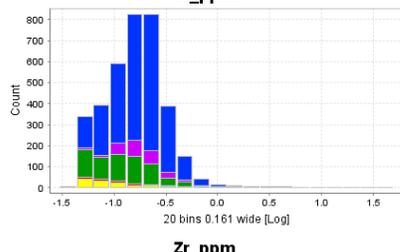
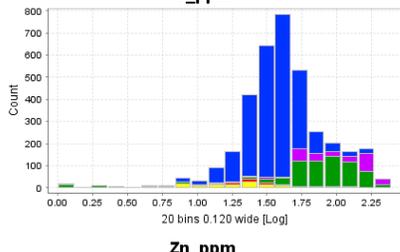
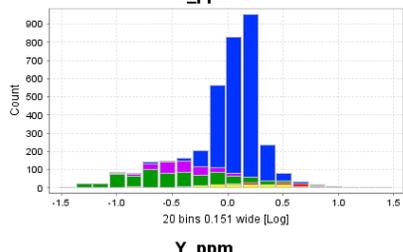
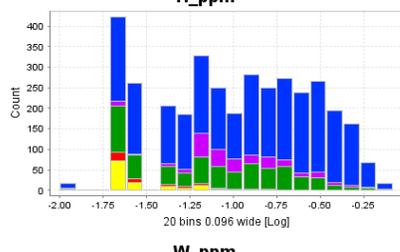
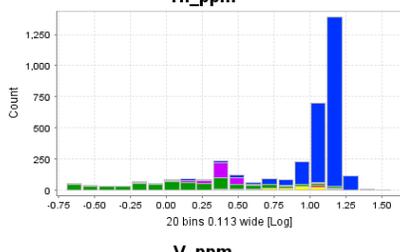
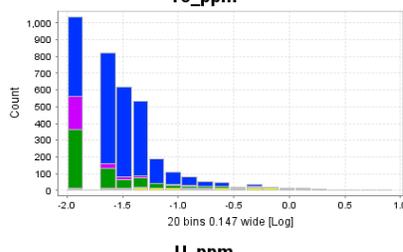
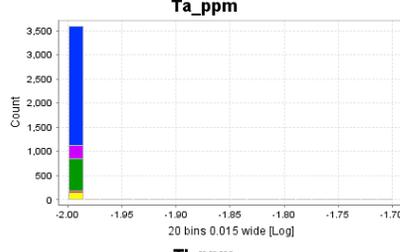
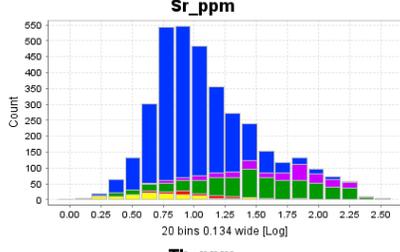
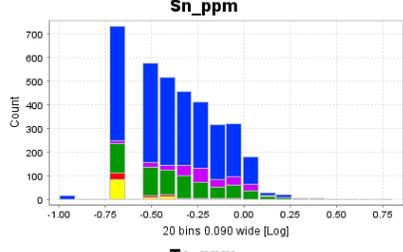
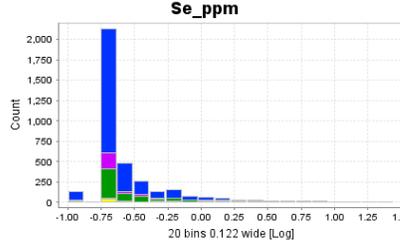
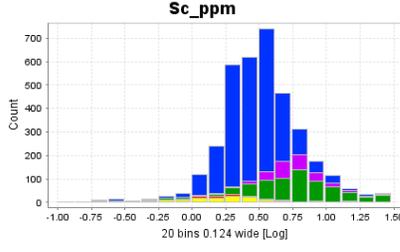
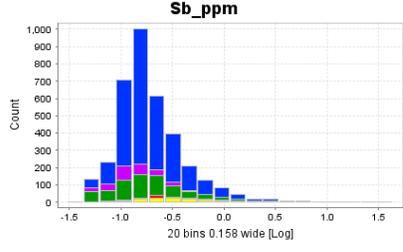
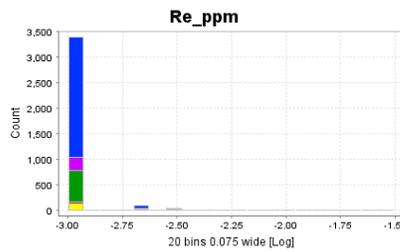
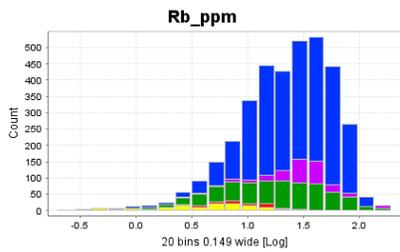
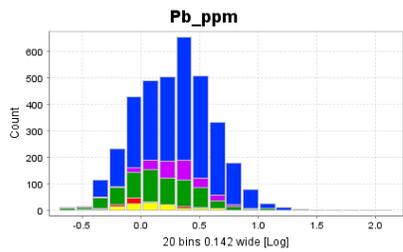
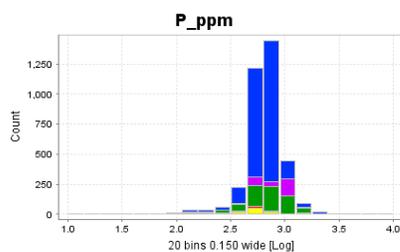
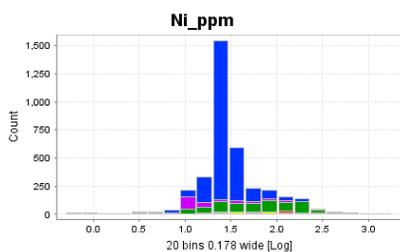
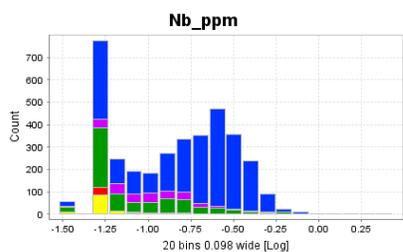
de alteración	Bt secundaria asociada a microvetillas y al clivaje de crenulación.
Minerales opacos	5% = Ilm (95%); Po (4%); Cpy (1%).
Resumen	Roca metamórfica (metapsamopelita) con alteración no definida. Bt (secundaria) en microvetillas y en el clivaje de crenulación. Micas blancas (WM) alteradas a Ser en algunos sectores, pero Ser también pudo formarse durante metamorfismo. Microvetillas de Qz con y sin halo de Ser. Microvetillas post deformacionales de: Carb; Ser-Bt-Chl. Cuerpos lenticulares de Qz-Ser entre planos de foliación y agregados lenticulares de Ilm siguiendo la foliación.

Anexo B

Histogramas [log] por litología para elementos mayores y traza

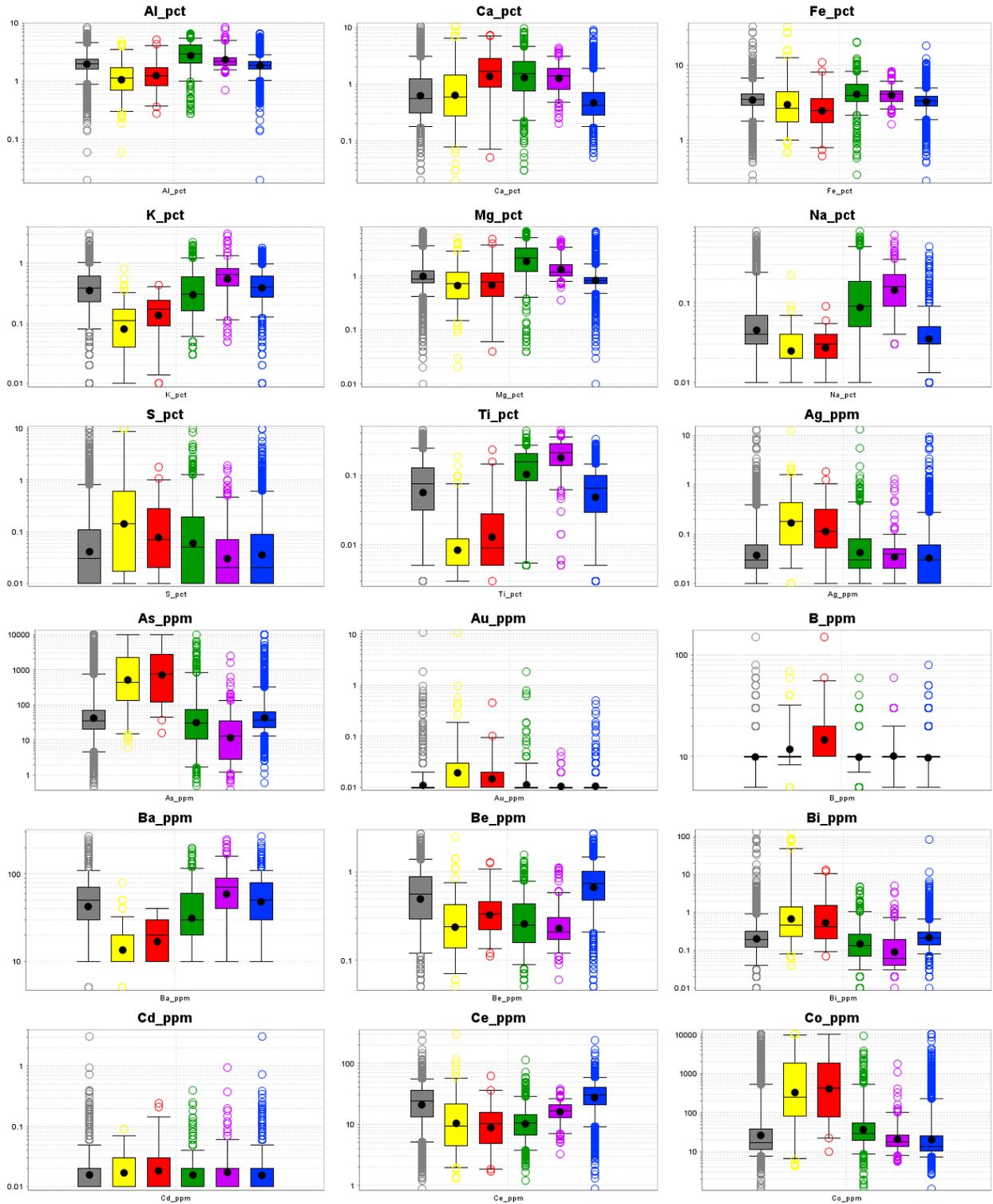


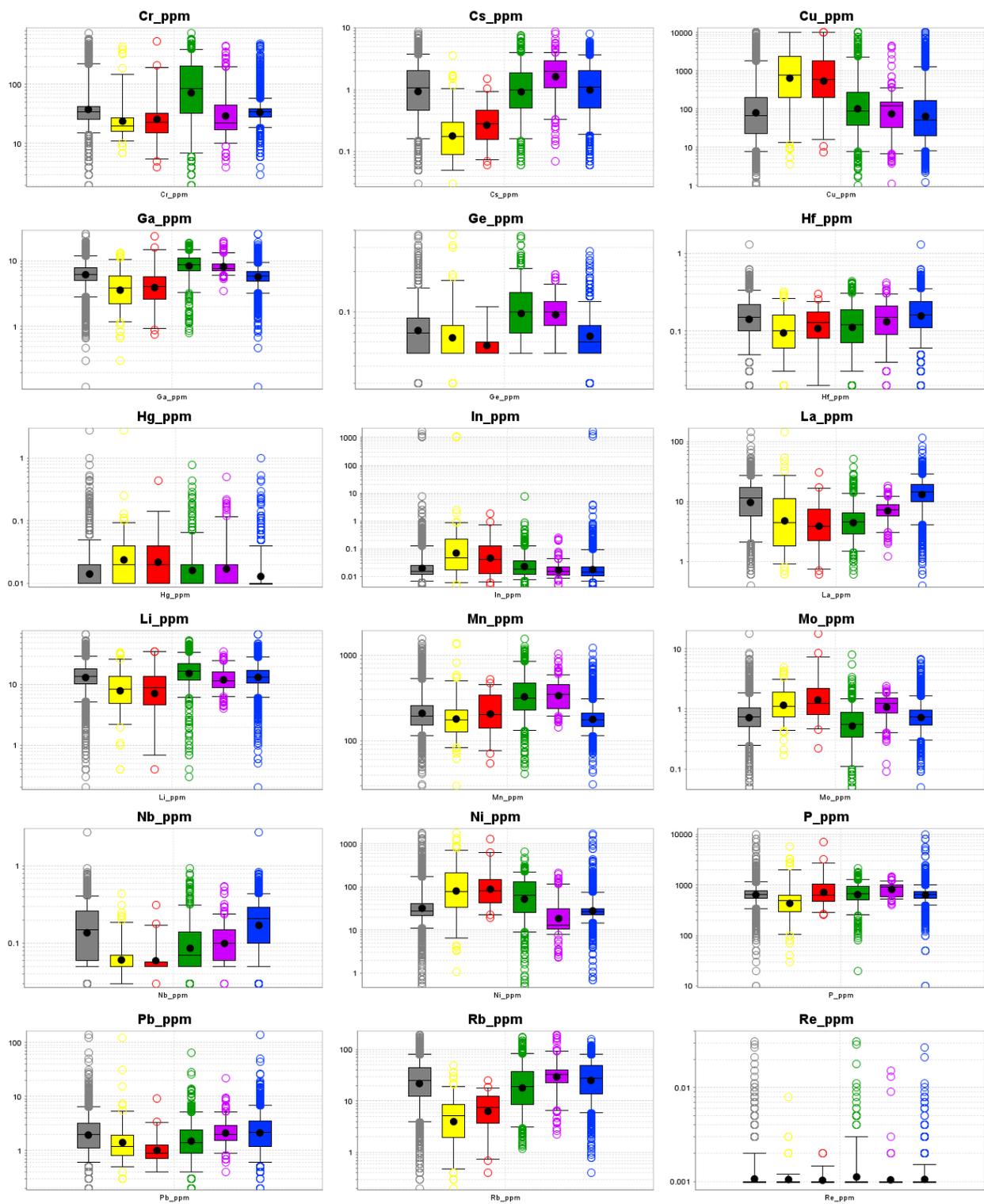


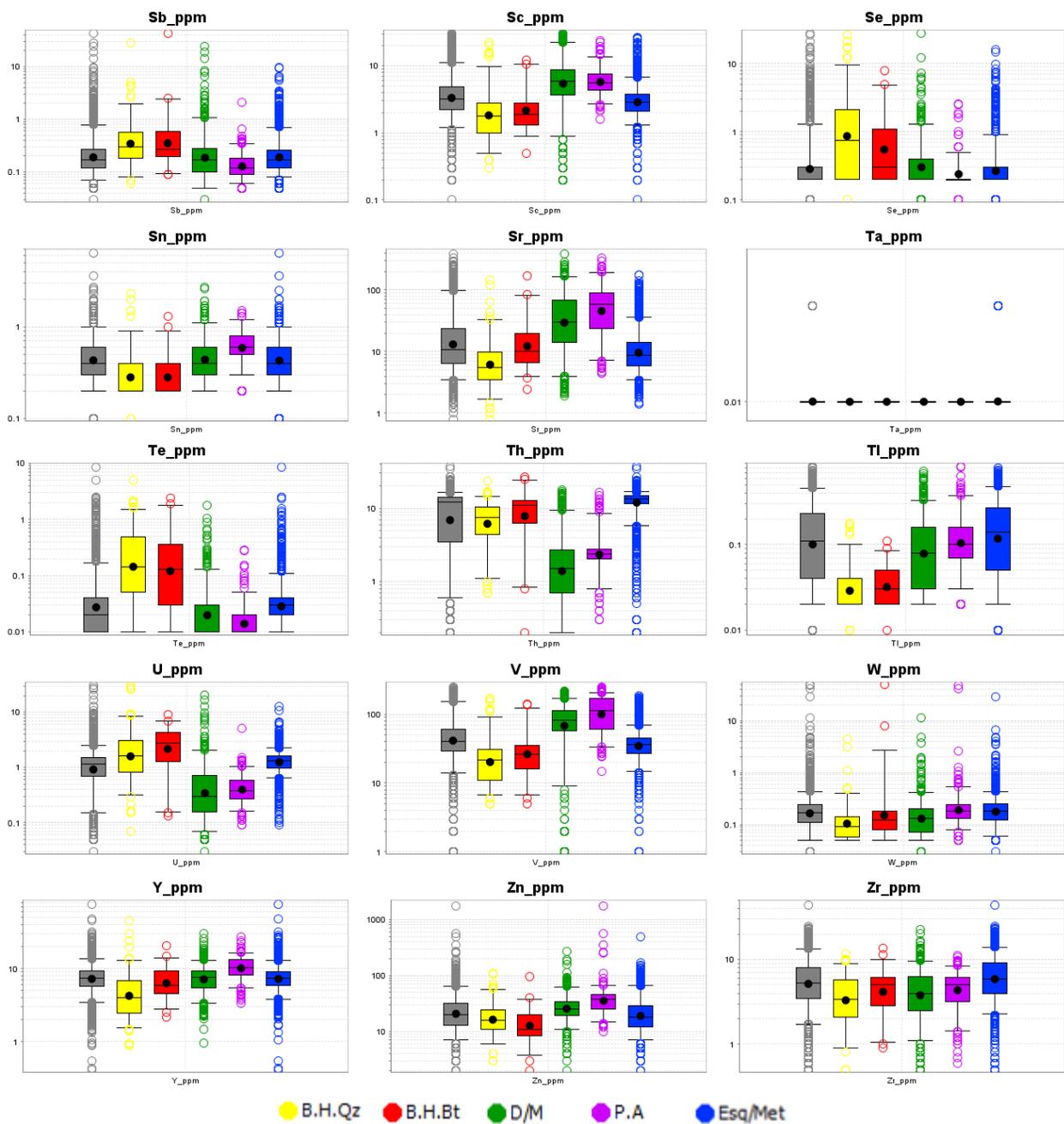


● B.H.Qz ● B.H.Bt ● D/M ● P.A ● Esq/Met

Boxplots [percentile] por litología para elementos mayores y traza

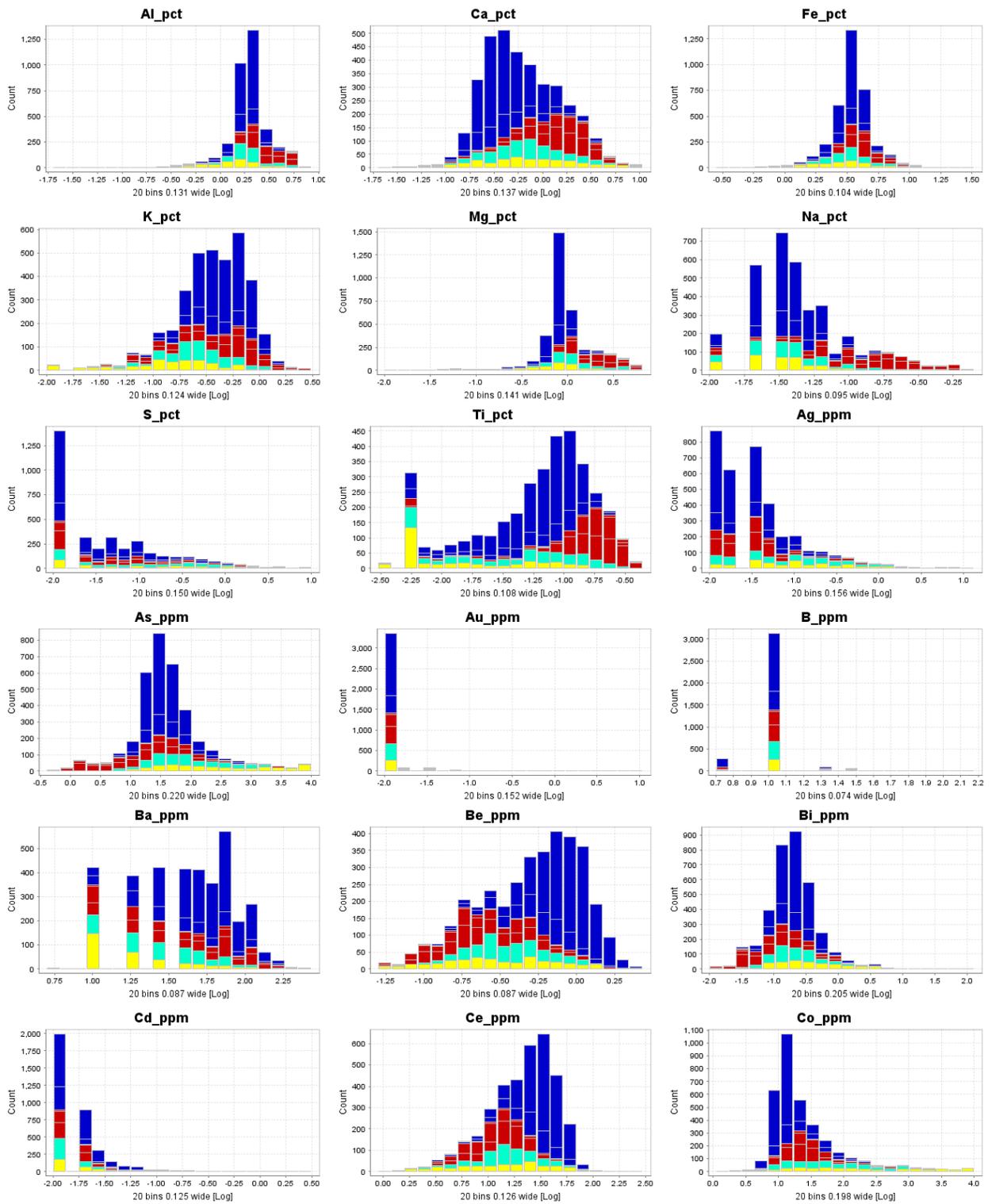


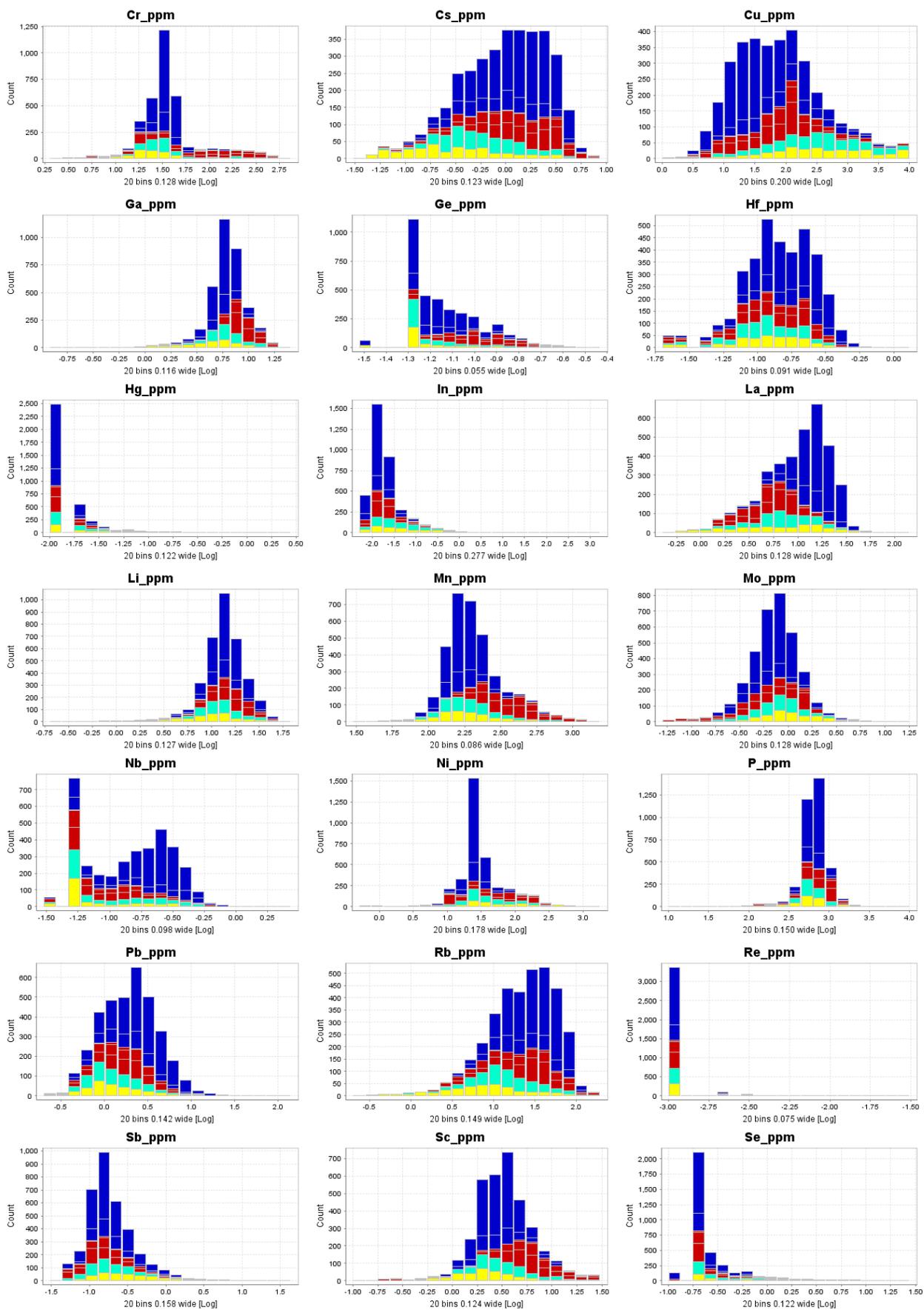


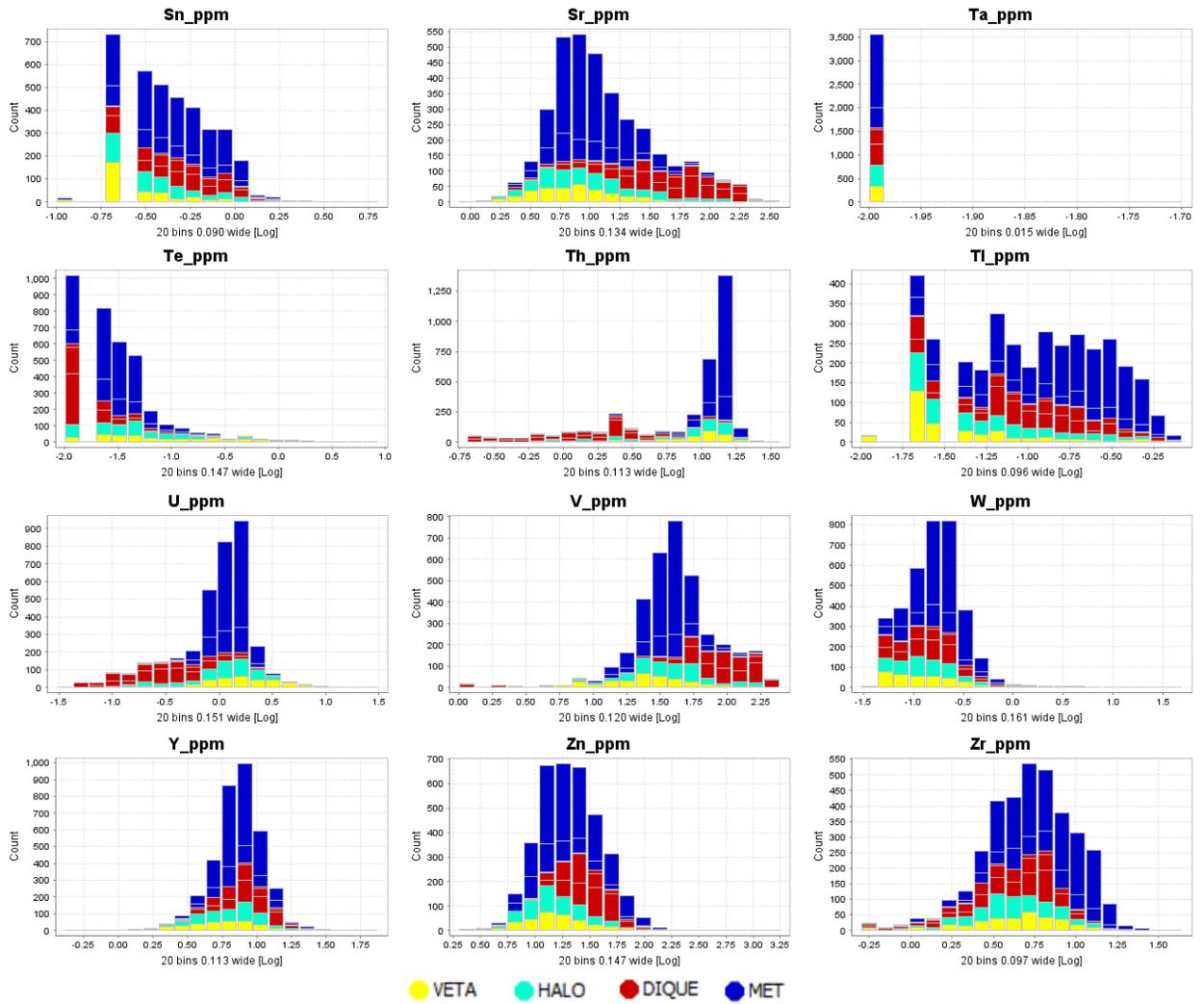


(Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente).

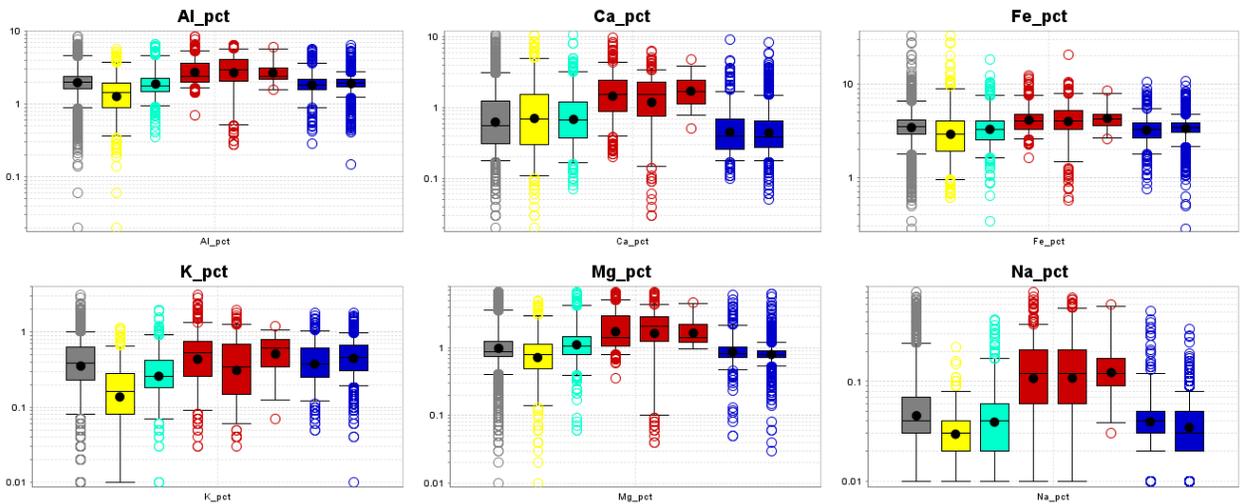
Histogramas [log] por unidad geológica para elementos mayores y traza

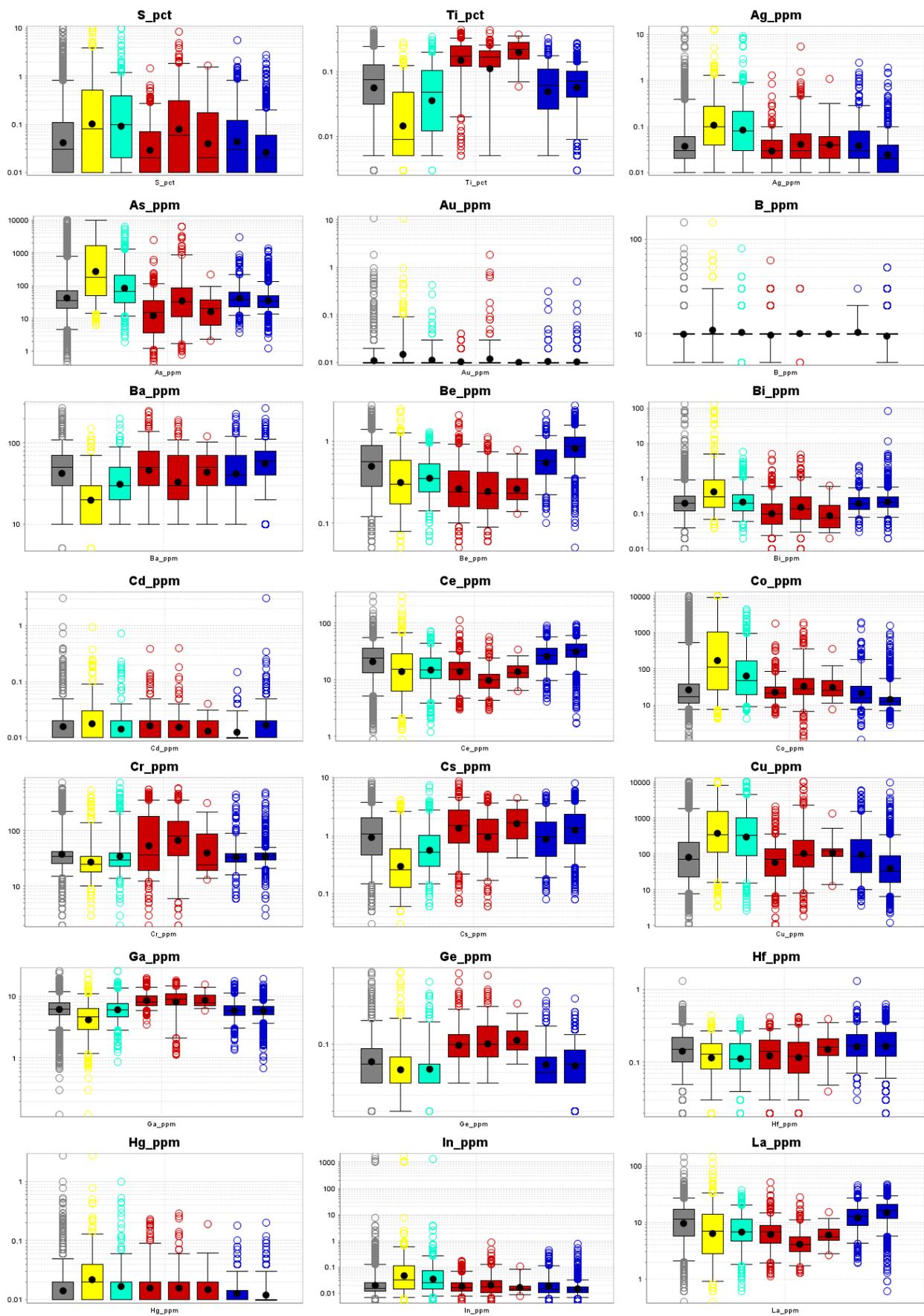


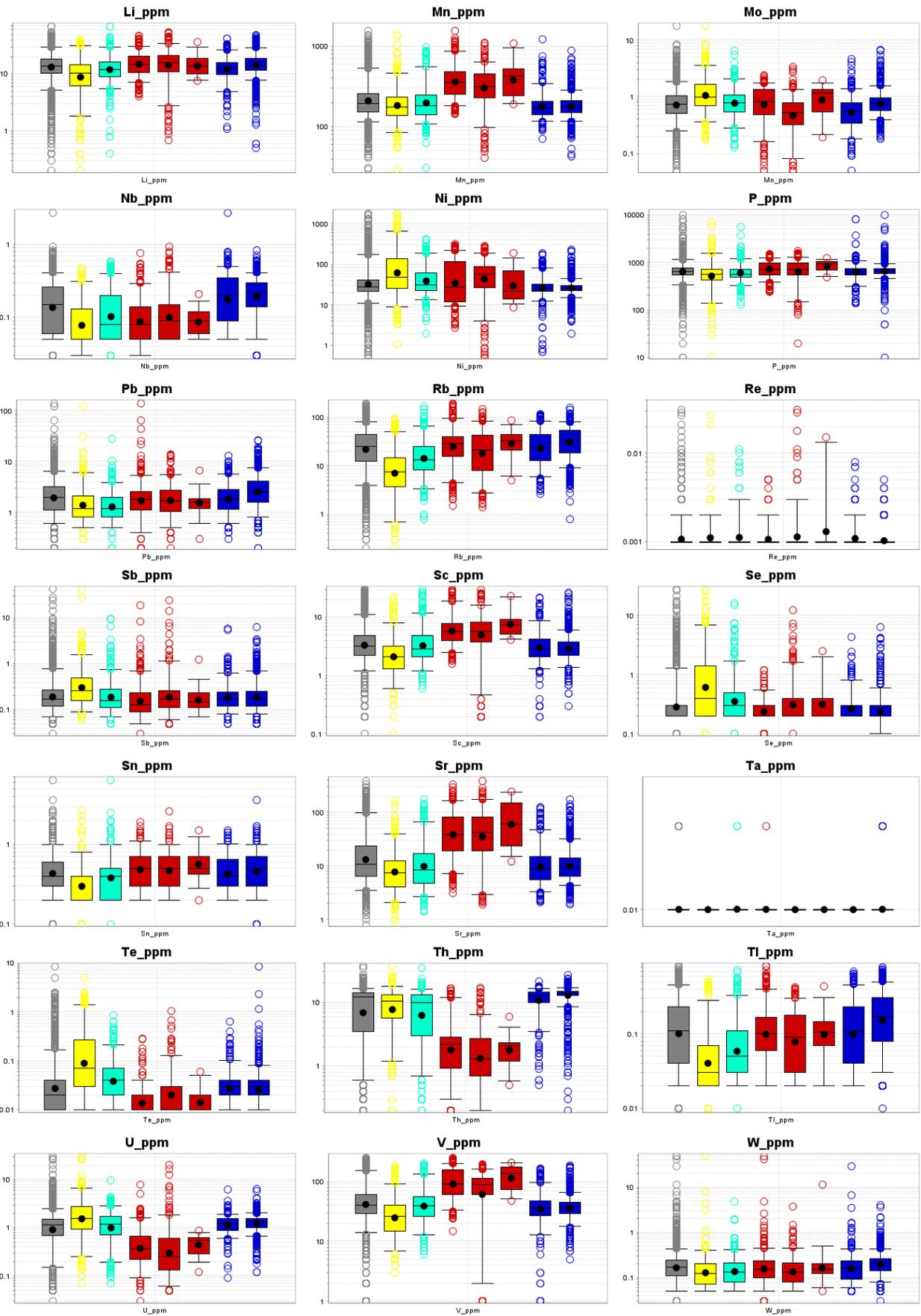


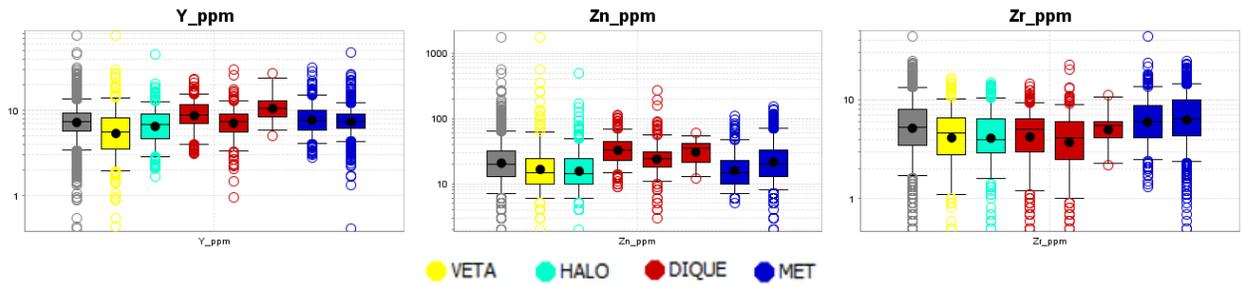


Boxplots [percentile] por unidad geológica para elementos mayores y traza









(Cajas y datos en gris representan a todas las muestras de las distintas clases, respectivamente).

Matriz de correlación para elementos mayores [wt%]

	Al	As	Ca	Co	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	Ti
Al	1.0	-0.14	0.39	-0.12	-0.04	0.57	0.44	0.82	0.60	0.56	0.18	-0.06	0.54
As	-0.14	1.0	0.05	0.90	0.30	-0.01	-0.20	-0.04	-0.04	-0.07	0.04	0.24	-0.19
Ca	0.39	0.05	1.0	0.06	0.04	0.19	-0.03	0.53	0.66	0.26	0.09	0.01	0.26
Co	-0.12	0.90	0.06	1.0	0.25	-0.05	-0.18	-0.01	-0.01	-0.06	0.05	0.17	-0.16
Cu	-0.04	0.30	0.04	0.25	1.0	0.30	-0.20	0.04	-0.03	-0.05	-0.03	0.54	-0.17
Fe	0.57	-0.01	0.19	-0.05	0.30	1.0	0.20	0.52	0.45	0.11	0.10	0.53	0.26
K	0.44	-0.20	-0.03	-0.18	-0.20	0.20	1.0	0.09	0.15	0.36	0.16	-0.13	0.58
Mg	0.82	-0.04	0.53	-0.01	0.04	0.52	0.09	1.0	0.76	0.29	0.06	-0.01	0.43
Mn	0.60	-0.04	0.66	-0.01	-0.03	0.45	0.15	0.76	1.0	0.22	0.05	-0.04	0.57
Na	0.56	-0.07	0.26	-0.06	-0.05	0.11	0.36	0.29	0.22	1.0	0.16	-0.01	0.59
P	0.18	0.04	0.09	0.05	-0.03	0.10	0.16	0.06	0.05	0.16	1.0	-0.04	0.15
S	-0.06	0.24	0.01	0.17	0.54	0.53	-0.13	-0.01	-0.04	-0.01	-0.04	1.0	-0.11
Ti	0.54	-0.19	0.26	-0.16	-0.17	0.26	0.58	0.43	0.57	0.59	0.15	-0.11	1.0

Matriz de correlación para elementos traza [ppm] (parte I)

	Ag	Ba	Be	Bi	Ce	Cr	Cs	Ga	Ge	Hf	In	La	Li	Mo	Nb
Ag	1,00	-0,12	-0,12	0,12	-0,09	-0,03	-0,12	-0,03	0,03	-0,09	0,43	-0,09	-0,07	0,08	-0,10
Ba	-0,12	1,00	0,50	-0,07	0,33	-0,08	0,76	0,32	0,24	0,19	-0,03	0,32	0,27	-0,06	0,45
Be	-0,12	0,50	1,00	-0,05	0,63	-0,16	0,52	0,02	0,01	0,35	-0,01	0,64	0,37	-0,04	0,44
Bi	0,12	-0,07	-0,05	1,00	-0,06	-0,04	-0,06	-0,09	0,01	-0,07	0,02	-0,06	-0,07	0,05	-0,04
Ce	-0,09	0,33	0,63	-0,06	1,00	-0,26	0,31	-0,11	0,07	0,34	-0,01	1,00	0,10	0,01	0,31
Cr	-0,03	-0,08	-0,16	-0,04	-0,26	1,00	0,13	0,55	0,48	-0,06	-0,01	-0,26	0,48	-0,16	-0,25
Cs	-0,12	0,76	0,52	-0,06	0,31	0,13	1,00	0,43	0,41	0,23	-0,03	0,31	0,44	-0,08	0,32
Ga	-0,03	0,32	0,02	-0,09	-0,11	0,55	0,43	1,00	0,66	-0,12	-0,03	-0,12	0,73	-0,07	-0,11
Ge	0,03	0,24	0,01	0,01	0,07	0,48	0,41	0,66	1,00	0,01	0,02	0,07	0,48	-0,03	-0,07
Hf	-0,09	0,19	0,35	-0,07	0,34	-0,06	0,23	-0,12	0,01	1,00	-0,02	0,34	-0,08	-0,09	0,29
In	0,43	-0,03	-0,01	0,02	-0,01	-0,01	-0,03	-0,03	0,02	-0,02	1,00	-0,01	-0,04	0,08	-0,01
La	-0,09	0,32	0,64	-0,06	1,00	-0,26	0,31	-0,12	0,07	0,34	-0,01	1,00	0,11	-0,45	0,32
Li	-0,07	0,27	0,37	-0,07	0,10	0,48	0,44	0,73	0,48	-0,08	-0,04	0,11	1,00	-0,09	0,02
Mo	0,08	-0,06	-0,04	0,05	0,01	-0,16	-0,08	-0,07	-0,03	-0,09	0,08	-0,45	-0,09	1,00	-0,06
Nb	-0,10	0,45	0,44	-0,04	0,31	-0,25	0,32	-0,11	-0,07	0,29	-0,01	0,32	0,02	-0,06	1,00
Ni	0,23	-0,19	-0,19	0,14	-0,08	0,31	-0,08	0,10	0,25	-0,10	0,12	-0,08	0,09	0,26	-0,23
Pb	0,03	0,17	0,21	0,13	0,14	-0,07	0,19	0,04	0,09	0,05	0,01	0,15	0,10	0,02	0,17
Rb	-0,11	0,84	0,56	-0,06	0,33	0,04	0,92	0,41	0,34	0,21	-0,03	0,33	0,40	-0,10	0,41
Sb	0,08	-0,09	-0,01	0,11	-0,69	0,05	-0,06	0,01	0,12	-0,04	0,02	0,68	0,04	0,14	-0,09
Sc	-0,03	0,17	-0,06	-0,05	-0,19	0,65	0,34	0,79	0,67	-0,13	-0,03	-0,19	0,61	-0,06	-0,15
Sn	0,28	0,59	0,32	-0,03	0,17	-0,01	0,55	0,32	0,29	0,14	0,13	0,17	0,25	0,01	0,35
Sr	-0,02	0,22	-0,21	-0,03	-0,23	0,33	0,33	0,43	0,36	-0,09	-0,01	-0,24	0,12	-0,02	-0,19
Te	0,27	-0,15	-0,10	0,48	-0,01	-0,06	-0,13	-0,12	0,03	-0,07	0,11	-0,01	-0,11	0,28	-0,09
Th	-0,09	0,24	0,64	-0,04	0,58	-0,44	0,07	-0,40	-0,38	0,31	-0,01	0,59	-0,06	0,04	0,42
Tl	-0,10	0,78	0,69	-0,04	0,45	-0,02	0,88	0,28	0,25	0,26	-0,01	0,45	0,41	-0,09	0,50
U	0,08	-0,09	0,13	0,02	0,09	-0,13	-0,12	-0,22	-0,14	0,03	0,08	0,09	-0,09	0,28	0,04
V	-0,04	0,20	-0,19	-0,07	-0,23	0,57	0,41	0,76	0,64	-0,03	-0,03	-0,24	0,46	0,01	-0,22
W	0,04	0,03	-0,01	0,01	-0,01	-0,02	0,01	0,01	0,83	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02	0,06	0,02
Y	-0,04	0,26	0,15	-0,08	0,20	-0,02	0,25	0,21	0,24	0,11	-0,02	0,19	0,08	0,08	0,23
Zn	0,18	0,13	0,12	0,01	0,06	0,09	0,22	0,17	0,16	-0,33	0,06	0,06	0,21	0,02	0,05
Zr	-0,09	0,22	0,43	-0,07	0,40	-0,09	0,24	-0,12	-0,03	0,95	-0,02	0,40	-0,04	-0,10	0,26

Matriz de correlación para elementos traza [ppm] (parte II)

Ni	Pb	Rb	Sb	Sc	Sn	Sr	Te	Th	Tl	U	V	W	Y	Zn	Zr
0,23	0,03	-0,11	0,08	-0,03	0,28	-0,02	0,27	-0,09	-0,10	0,08	-0,04	0,04	-0,04	0,18	-0,09
-0,19	0,17	0,84	-0,09	0,17	0,59	0,22	-0,15	0,24	0,78	-0,09	0,20	0,03	0,26	0,13	0,22
-0,19	0,21	0,56	-0,01	-0,06	0,32	-0,21	-0,10	0,64	0,69	0,13	-0,19	-0,01	0,15	0,12	0,43
0,14	0,13	-0,06	0,11	-0,05	-0,03	-0,03	0,48	-0,04	-0,04	0,02	-0,07	0,01	-0,08	0,01	-0,07
-0,08	0,14	0,33	-0,69	-0,19	0,17	-0,23	-0,01	0,58	0,45	0,09	-0,23	-0,01	0,20	0,06	0,40
0,31	-0,07	0,04	0,05	0,65	-0,01	0,33	-0,06	-0,44	-0,02	-0,13	0,57	-0,02	-0,02	0,09	-0,09
-0,08	0,19	0,92	-0,06	0,34	0,55	0,33	-0,13	0,07	0,88	-0,12	0,41	0,01	0,25	0,22	0,24
0,10	0,04	0,41	0,01	0,79	0,32	0,43	-0,12	-0,40	0,28	-0,22	0,76	0,01	0,21	0,17	-0,12
0,25	0,09	0,34	0,12	0,67	0,29	0,36	0,03	-0,38	0,25	-0,14	0,64	0,83	0,24	0,16	-0,03
-0,10	0,05	0,21	-0,04	-0,13	0,14	-0,09	-0,07	0,31	0,26	0,03	-0,03	-0,01	0,11	-0,33	0,95
0,12	0,01	-0,03	0,02	-0,03	0,13	-0,01	0,11	-0,01	-0,01	0,08	-0,03	-0,01	-0,02	0,06	-0,02
-0,08	0,15	0,33	0,68	-0,19	0,17	-0,24	-0,01	0,59	0,45	0,09	-0,24	-0,01	0,19	0,06	0,40
0,09	0,10	0,40	0,04	0,61	0,25	0,12	-0,11	-0,06	0,41	-0,09	0,46	-0,02	0,08	0,21	-0,04
0,26	0,02	-0,10	0,14	-0,06	0,01	-0,02	0,28	0,04	-0,09	0,28	0,01	0,06	0,08	0,02	-0,10
-0,23	0,17	0,41	-0,09	-0,15	0,35	-0,19	-0,09	0,42	0,50	0,04	-0,22	0,02	0,23	0,05	0,26
1,00	0,02	-0,12	0,17	0,17	-0,06	0,09	0,57	-0,20	-0,12	0,25	0,12	-0,02	-0,08	0,05	-0,11
0,02	1,00	0,19	0,24	0,01	0,20	0,02	0,18	0,06	0,25	-0,01	-0,03	0,05	0,09	0,16	0,06
-0,12	0,19	1,00	-0,08	0,29	0,58	0,24	-0,13	0,18	0,92	-0,09	0,28	0,02	0,22	0,17	0,24
0,17	0,24	-0,08	1,00	0,07	-0,02	-0,03	0,23	-0,06	-0,06	0,08	0,03	0,01	0,06	0,01	-0,05
0,17	0,01	0,29	0,07	1,00	0,27	0,33	-0,08	-0,46	0,16	-0,15	0,79	-0,01	0,23	0,14	-0,16
-0,06	0,20	0,58	-0,02	0,27	1,00	0,15	-0,01	0,01	0,60	-0,06	0,23	0,07	0,24	0,30	0,13
0,09	0,02	0,24	-0,03	0,33	0,15	1,00	-0,05	-0,49	0,09	-0,19	0,57	0,70	0,17	0,09	-0,12
0,57	0,18	-0,13	0,23	-0,08	-0,01	-0,05	1,00	-0,03	-0,10	0,25	-0,10	0,01	-0,08	0,02	-0,07
-0,20	0,06	0,18	-0,06	-0,46	0,01	-0,49	-0,03	1,00	0,30	0,29	-0,57	-0,01	0,02	-0,10	0,39
-0,12	0,25	0,92	-0,06	0,16	0,60	0,09	-0,10	0,30	1,00	-0,04	0,10	0,02	0,16	0,22	0,30
0,25	-0,01	-0,09	0,08	-0,15	-0,06	-0,19	0,25	0,29	-0,04	1,00	-0,24	-0,02	-0,04	-0,05	0,02
0,12	-0,03	0,28	0,03	0,79	0,23	0,57	-0,10	-0,57	0,10	-0,24	1,00	-0,01	0,30	0,17	-0,11
-0,02	0,05	0,02	0,01	-0,01	0,07	0,70	0,01	-0,01	0,02	-0,02	-0,01	1,00	0,02	0,03	-0,01
-0,08	0,09	0,22	0,06	0,23	0,24	0,17	-0,08	0,02	0,16	-0,04	0,30	0,02	1,00	0,05	0,09
0,05	0,16	0,17	0,01	0,14	0,30	0,09	0,02	-0,10	0,22	-0,05	0,17	0,03	0,05	1,00	-0,01
-0,11	0,06	0,24	-0,05	-0,16	0,13	-0,12	-0,07	0,39	0,30	0,02	-0,11	-0,01	0,09	-0,01	1,00

Componentes principales elementos mayores

Valores propios

	Valores propios	Porcentaje	Porcentaje acumulado
PC1	4.11	31.59	31.59
PC2	2.49	19.18	50.77
PC3	1.51	11.65	62.42
PC4	1.37	10.57	72.99
PC5	0.90	6.94	79.93
PC6	0.76	5.85	85.78
PC7	0.58	4.47	90.25
PC8	0.49	3.74	93.99
PC9	0.39	2.99	96.98
PC10	0.16	1.25	98.24
PC11	0.11	0.82	99.07
PC12	0.08	0.64	99.72
PC13	0.04	0.28	100.0

Vectores propios

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11	PC12	PC13
Al	0.45	0.02	0.01	0.04	0.01	0.13	0.48	0.06	0.21	0.04	0.04	0.01	0.71
As	-0.10	0.48	-0.42	0.17	-0.13	0.16	0.02	-0.06	0.02	-0.07	-0.18	0.69	0.02
Ca	0.28	0.16	-0.20	-0.39	0.11	-0.40	-0.37	-0.04	0.54	-0.05	-0.31	-0.08	0.03
Co	-0.09	0.45	-0.48	0.15	-0.13	0.17	0.03	-0.02	-0.01	0.01	0.13	-0.69	-0.01
Cu	-0.04	0.43	0.31	0.11	0.69	-0.32	0.03	0.77	-0.09	-0.06	0.01	-0.01	0.01
Fe	0.29	0.27	0.43	0.09	0.10	0.35	0.01	-0.21	0.04	-0.60	-0.22	-0.11	-0.23
K	0.24	-0.23	-0.01	0.50	-0.18	0.30	-0.29	0.28	0.51	0.18	0.15	0.05	-0.22
Mg	0.40	0.15	-0.01	-0.29	0.03	0.17	0.35	0.07	-0.11	0.53	-0.16	0.01	-0.50
Mn	0.40	0.11	-0.09	-0.33	-0.02	0.11	-0.34	0.05	-0.26	-0.15	0.68	0.16	0.02
Na	0.29	-0.07	-0.14	0.35	-0.21	-0.62	0.34	-0.23	-0.02	-0.22	0.21	0.04	-0.28
P	0.10	0.01	-0.19	0.33	0.90	-0.05	-0.06	0.01	-0.11	0.06	0.05	0.02	-0.02
S	-0.01	0.41	0.45	0.22	-0.04	-0.16	-0.23	-0.46	0.03	0.48	0.15	0.02	0.15
Ti	0.38	-0.14	-0.10	0.24	-0.22	-0.06	-0.37	0.04	-0.56	0.07	-0.47	-0.09	0.19

Componentes principales elementos traza

Valores propios

	Valores propios	Porcentaje	Porcentaje acumulado
PC1	6.50	20.96	20.96
PC2	5.48	17.68	38.63
PC3	2.48	8.01	46.64
PC4	1.78	5.75	52.39
PC5	1.50	4.85	57.24
PC6	1.34	4.33	61.57
PC7	1.25	4.04	65.62
PC8	1.18	3.79	69.41
PC9	1.02	3.28	72.69
PC10	0.97	3.13	75.82
PC11	0.91	2.94	78.76
PC12	0.85	2.74	81.5
PC13	0.71	2.29	83.79
PC14	0.67	2.16	85.95
PC15	0.63	2.02	87.96
PC16	0.58	1.88	89.84
PC17	0.50	1.62	91.47
PC18	0.42	1.36	92.82
PC19	0.37	1.19	94.01
PC20	0.34	1.08	95.09
PC21	0.28	0.91	96.01
PC22	0.27	0.87	96.87
PC23	0.25	0.80	97.67
PC24	0.20	0.64	98.31
PC25	0.15	0.48	98.8
PC26	0.14	0.46	99.25
PC27	0.11	0.35	99.6
PC28	0.05	0.15	99.75
PC29	0.04	0.13	99.88
PC30	0.03	0.10	99.99
PC31	0.01	0.01	100.0

Vectores propios (parte I)

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15
Ag	0,13	0,08	0,52	0,28	0,37	0,45	0,07	0,13	0,07	0,01	0,10	0,01	0,92	0,17	0,04
Ba	-0,81	-0,09	-0,04	0,31	-0,01	-0,13	-0,07	-0,17	0,04	0,01	0,04	-0,08	-0,02	0,07	0,01
Be	-0,68	-0,50	0,08	-0,12	-0,20	0,12	0,11	-0,01	-0,08	0,06	0,02	-0,01	-0,11	-0,09	0,08
Bi	0,12	0,01	0,44	0,09	0,01	-0,41	0,40	-0,07	0,20	-0,18	0,26	0,32	-0,30	-0,15	0,21
Ce	-0,50	-0,57	0,15	-0,32	-0,16	0,12	-0,10	0,21	0,28	-0,28	-0,04	-0,08	0,05	0,03	0,01
Cr	-0,14	0,70	-0,03	-0,38	0,01	0,12	0,21	-0,08	-0,13	0,03	0,04	0,01	0,14	-0,05	0,03
Cs	-0,89	0,09	0,01	0,15	0,01	-0,11	0,02	-0,18	0,04	-0,03	-0,06	-0,15	-0,04	0,01	0,05
Ga	-0,51	0,72	-0,03	-0,11	-0,12	0,10	-0,01	0,02	-0,04	0,01	0,08	0,05	-0,08	-0,05	-0,04
Ge	-0,47	0,59	0,18	-0,25	0,02	0,01	-0,05	0,11	0,12	-0,09	0,08	0,01	0,09	0,07	-0,05
Hf	-0,35	-0,40	-0,10	-0,46	0,65	-0,12	0,04	-0,06	-0,14	0,08	-0,03	0,05	-0,07	-0,01	-0,03
In	0,04	0,01	0,35	0,20	0,33	0,54	-0,03	0,04	0,14	0,10	0,28	-0,26	-0,08	-0,35	0,01
La	-0,50	-0,58	0,15	-0,32	-0,17	0,13	-0,08	0,21	0,26	-0,27	-0,04	-0,08	0,05	0,02	0,01
Li	-0,56	0,42	0,05	-0,23	-0,37	0,26	0,21	0,02	-0,15	0,06	0,05	0,08	-0,12	-0,11	-0,05
Mo	0,12	-0,03	0,46	0,02	-0,11	-0,08	-0,57	-0,15	-0,16	-0,01	-0,19	-0,01	-0,42	-0,14	-0,33
Nb	-0,46	-0,45	-0,04	0,24	0,02	-0,08	-0,03	-0,01	-0,11	0,22	0,19	0,31	0,25	0,04	-0,18
Ni	0,14	0,29	0,65	-0,30	0,01	0,01	-0,01	-0,28	0,01	-0,09	-0,09	-0,06	0,31	0,14	-0,19
Pb	-0,25	-0,08	0,33	0,12	-0,05	-0,34	0,22	0,44	-0,13	0,22	-0,13	-0,16	0,26	-0,42	-0,16
Rb	-0,90	-0,01	-0,01	0,22	-0,03	-0,09	0,04	-0,21	0,02	0,01	0,02	-0,12	-0,02	0,06	0,02
Sb	0,05	0,08	0,40	-0,17	-0,11	-0,27	-0,01	0,43	-0,13	0,39	0,08	-0,34	-0,20	0,36	0,18
Sc	-0,39	0,77	0,02	-0,20	-0,09	0,08	-0,02	0,04	-0,08	0,08	0,14	0,15	-0,03	0,01	-0,02
Sn	-0,64	0,06	0,22	0,40	0,23	0,12	-0,04	0,05	-0,07	0,06	0,01	0,12	0,01	0,22	-0,08
Sr	-0,22	0,57	-0,08	0,15	0,24	-0,26	-0,17	-0,12	0,20	-0,13	-0,19	-0,29	0,10	-0,15	0,23
Te	0,19	-0,01	0,78	-0,05	0,03	-0,28	0,13	-0,17	0,10	-0,11	0,04	0,09	0,07	0,05	-0,08
Th	-0,22	-0,82	0,04	-0,11	-0,20	0,13	-0,01	-0,07	-0,06	0,05	0,09	0,04	-0,04	-0,05	0,06
Tl	-0,90	-0,18	0,06	0,19	-0,08	-0,03	0,13	-0,16	-0,04	0,01	-0,03	-0,09	0,01	0,04	-0,02
U	0,12	-0,26	0,42	-0,15	-0,17	0,12	-0,27	-0,39	-0,26	0,23	-0,06	0,05	0,18	-0,10	0,45
V	-0,37	0,80	-0,06	-0,13	0,13	-0,06	-0,18	0,02	0,04	-0,02	-0,01	0,05	-0,10	-0,06	0,04
W	-0,02	0,10	0,05	0,14	0,06	-0,07	-0,11	0,19	-0,67	-0,61	0,27	-0,11	0,06	-0,01	0,07
Y	-0,36	0,07	0,01	-0,02	0,09	-0,16	-0,61	0,33	0,17	0,09	0,18	0,35	0,14	-0,08	0,15
Zn	-0,26	0,14	0,22	0,19	0,10	0,21	0,15	0,27	-0,14	-0,11	-0,67	0,31	-0,06	-0,01	0,16
Zr	-0,37	-0,46	-0,09	-0,47	0,59	-0,09	0,08	-0,06	-0,13	0,05	-0,03	0,01	-0,10	-0,03	-0,02

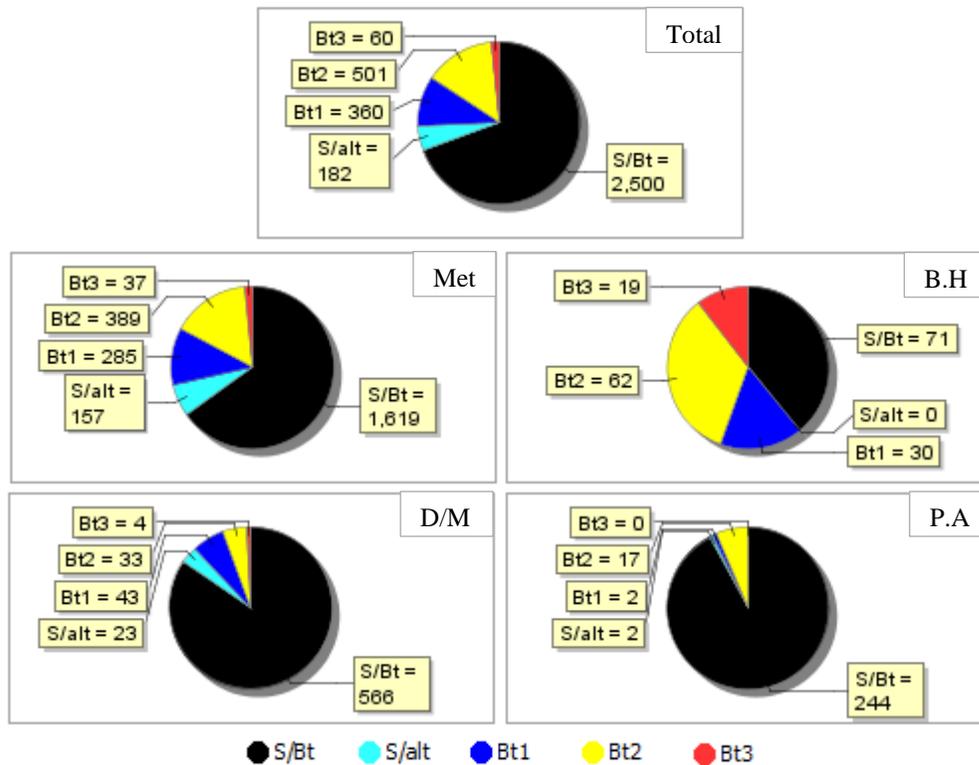
Vectores propios (parte II)

PC16	PC17	PC18	PC19	PC20	PC21	PC22	PC23	PC24	PC25	PC26	PC27	PC28	PC29	PC30	PC31
0,29	0,16	0,17	0,08	0,23	0,07	0,09	0,04	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,10
0,01	0,01	-0,04	-0,04	-0,07	0,27	-0,16	0,02	0,10	0,20	-0,03	0,08	0,02	0,01	0,01	-0,12
0,01	0,18	0,04	0,02	0,03	-0,16	-0,04	-0,19	-0,14	0,20	0,04	-0,09	-0,01	-0,01	0,01	0,40
-0,03	-0,09	0,09	0,11	-0,01	-0,02	-0,09	0,11	-0,03	-0,01	0,01	-0,01	0,31	-0,82	0,01	0,07
0,02	-0,10	0,07	0,01	-0,09	0,02	0,08	0,07	0,01	0,01	0,01	0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,05
-0,16	0,10	0,18	0,33	-0,13	0,10	0,04	-0,10	0,16	0,84	-0,02	-0,04	-0,01	-0,01	0,23	0,01
-0,06	0,02	-0,11	0,12	0,13	-0,06	0,13	0,03	-0,01	-0,06	-0,09	-0,01	0,12	-0,09	0,02	0,10
0,12	0,03	0,01	-0,23	-0,01	0,07	-0,04	0,13	0,08	-0,04	0,12	-0,20	0,03	-0,01	0,02	-0,25
-0,01	-0,34	0,03	-0,04	0,27	-0,04	-0,19	-0,21	0,04	-0,02	-0,03	0,01	-0,73	0,01	-0,01	-0,03
0,02	-0,04	-0,01	-0,05	0,01	-0,01	0,02	0,04	0,01	0,01	-0,02	0,02	-0,05	-0,02	0,11	-0,07
-0,32	-0,08	-0,12	-0,06	-0,08	-0,01	-0,02	-0,57	-0,28	-0,01	0,68	0,01	-0,38	-0,01	0,20	-0,03
0,02	-0,09	0,07	0,02	-0,08	0,02	0,07	0,06	0,02	0,01	0,01	0,01	-0,01	-0,01	-0,23	-0,05
0,06	0,18	0,07	-0,19	0,01	-0,14	-0,03	0,09	0,08	-0,02	-0,12	0,15	-0,02	-0,01	-0,01	0,62
-0,01	-0,03	0,15	0,11	0,03	0,01	0,01	-0,02	0,04	-0,01	0,02	0,01	-0,01	-0,01	0,01	-0,05
-0,31	-0,10	0,31	-0,12	0,05	0,02	0,10	0,05	-0,05	0,02	-0,01	-0,01	0,01	-0,01	-0,02	-0,02
-0,13	0,16	-0,08	0,05	0,01	-0,03	-0,18	0,18	-0,14	0,02	-0,01	-0,01	-0,09	-0,01	-0,39	0,05
0,23	-0,04	-0,02	0,07	0,02	0,05	-0,01	0,03	-0,01	0,84	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,36
-0,03	0,01	-0,10	0,06	0,09	0,03	0,05	0,03	0,03	-0,06	0,08	-0,01	-0,15	-0,06	-0,05	-0,01
-0,19	0,01	0,04	-0,03	-0,03	0,01	-0,01	0,03	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,01	0,23	-0,55	-0,03
0,06	-0,09	-0,08	0,06	-0,08	0,10	0,11	-0,05	-0,19	-0,01	0,18	0,14	0,03	-0,01	0,01	0,56
0,22	-0,11	0,03	0,04	-0,34	-0,13	-0,11	-0,06	-0,03	-0,08	-0,06	-0,03	-0,01	-0,02	-0,01	-0,24
-0,01	0,15	0,33	-0,14	-0,05	-0,04	-0,04	-0,06	-0,07	-0,05	0,05	0,04	-0,06	0,01	0,01	-0,18
-0,96	0,11	-0,13	-0,23	-0,08	0,04	0,19	-0,22	0,09	-0,86	-0,01	-0,01	0,71	-0,01	-0,21	-0,01
0,03	0,17	0,03	-0,02	0,03	0,26	-0,12	-0,11	-0,11	-0,20	-0,06	-0,02	0,01	0,01	0,01	-0,14
-0,06	0,02	-0,06	0,08	0,05	-0,10	0,07	0,03	0,04	-0,07	0,05	-0,01	0,01	0,16	0,03	0,55
0,15	-0,23	0,01	-0,02	-0,01	-0,02	0,04	0,05	0,04	0,02	-0,01	-0,01	0,01	0,69	-0,01	0,04
0,03	-0,05	-0,04	-0,02	-0,01	0,11	0,15	0,04	-0,16	0,06	-0,21	-0,07	-0,04	0,05	-0,03	-0,01
-0,04	0,01	-0,01	-0,02	0,01	-0,01	0,01	0,01	-0,01	0,80	-0,01	0,01	-0,64	-0,50	-0,01	0,04
-0,05	0,27	-0,15	0,08	0,03	-0,07	-0,05	0,01	0,08	-0,01	0,01	0,01	-0,01	0,01	0,01	0,02
-0,24	-0,01	-0,06	-0,04	0,02	0,07	-0,03	-0,01	0,01	-0,01	0,02	0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,13
0,06	0,04	-0,02	-0,04	0,37	0,79	-0,04	0,02	0,04	-0,01	0,05	0,02	0,05	0,02	-0,11	0,16

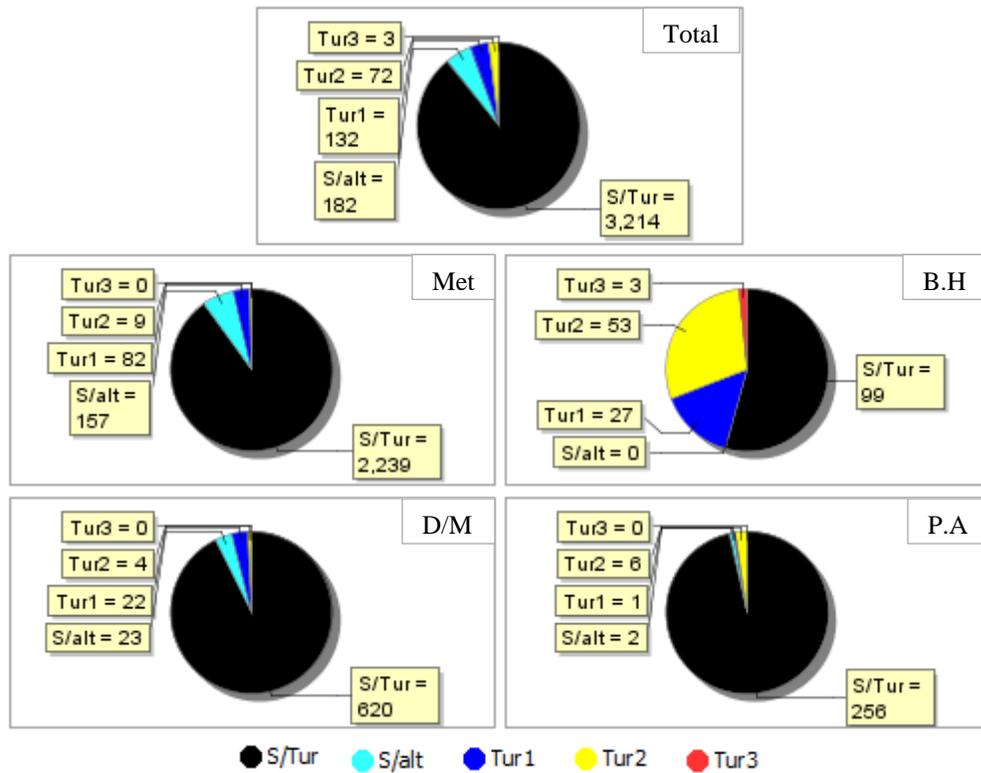
Anexo C

Gráficos circulares por litología con los registros del logueo de sondajes por cada mineral de alteración

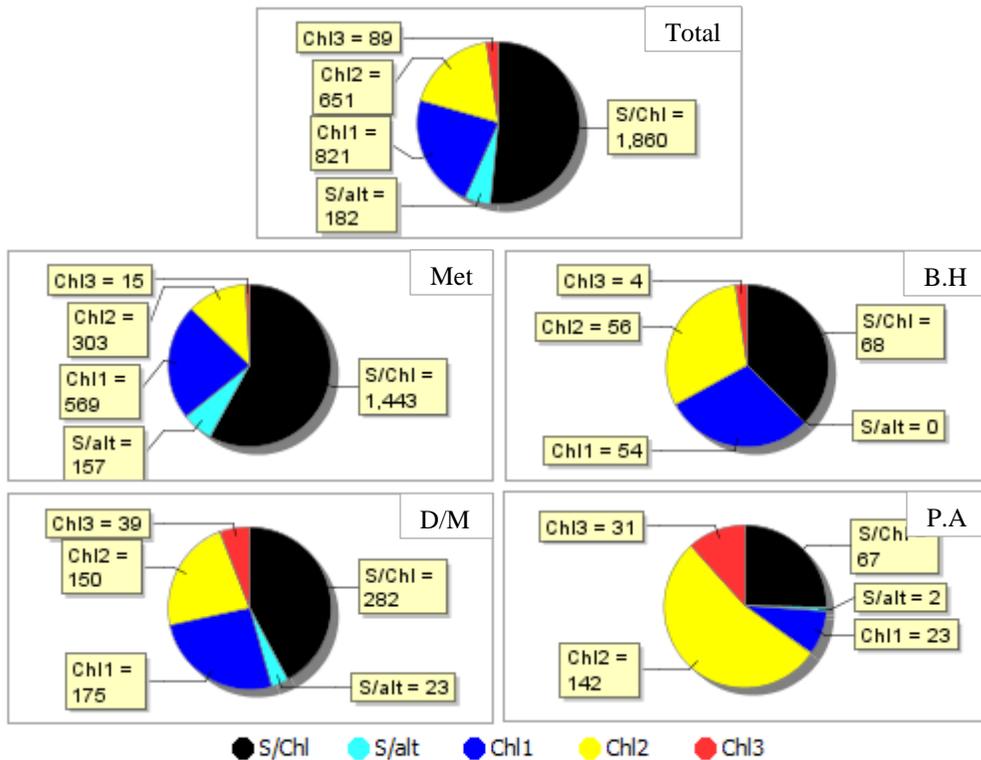
Mineral de alteración: Biotita (Bt)



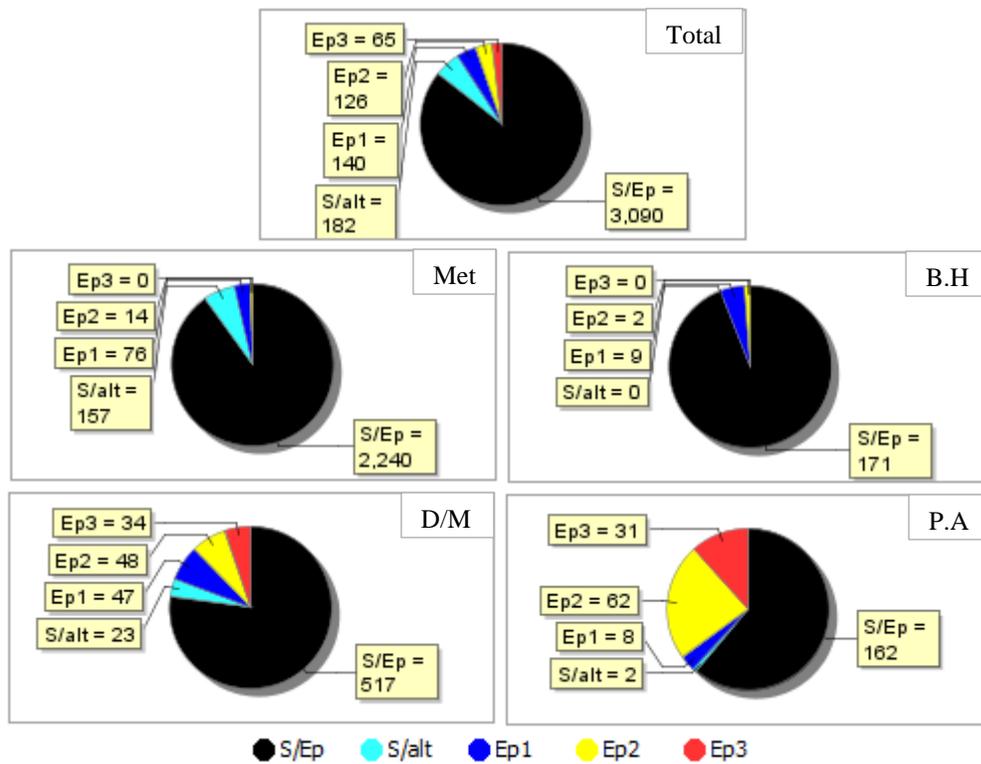
Mineral de alteración: Turmalina (Tur)



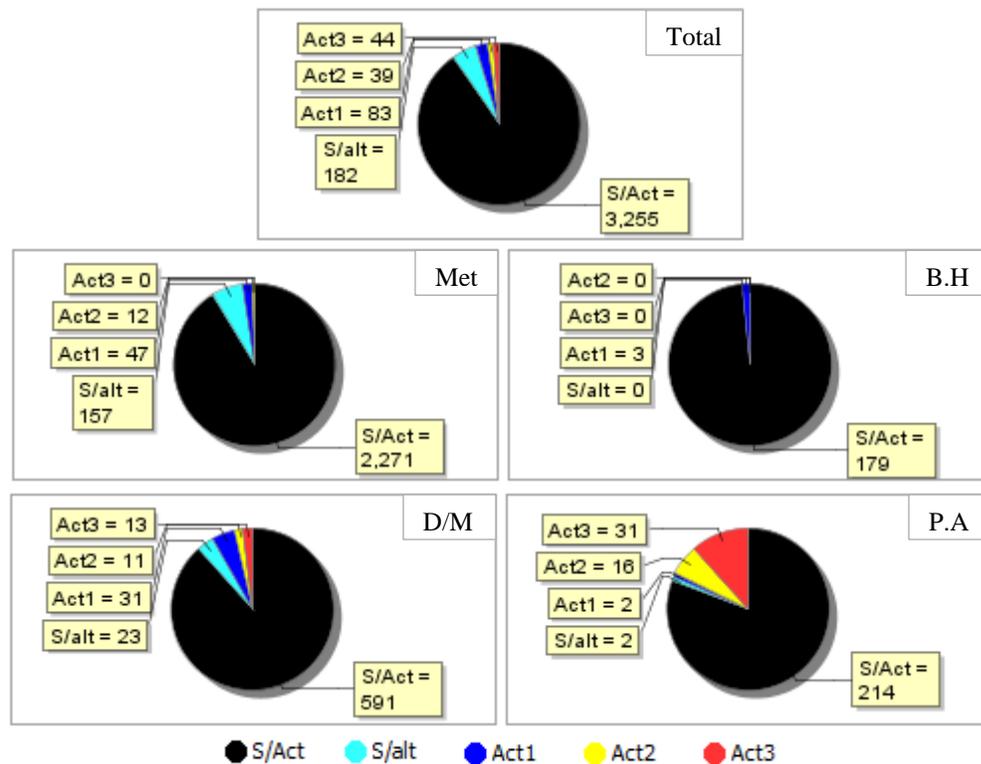
Mineral de alteración: Clorita (Chl)



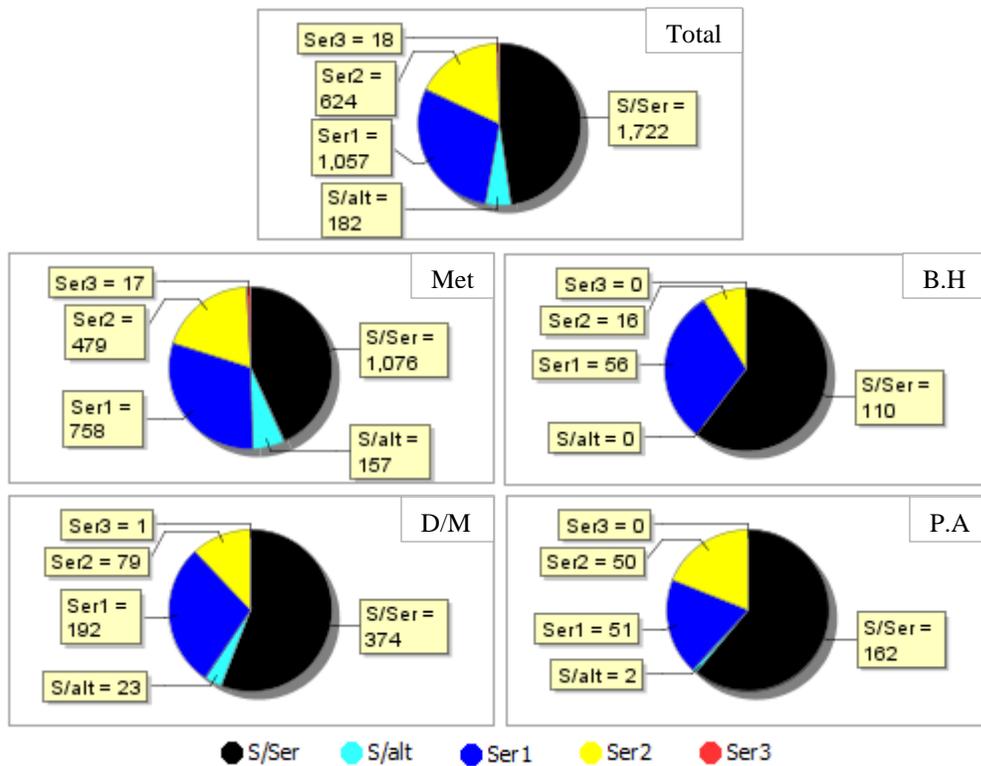
Mineral de alteración: Epidota (Ep)



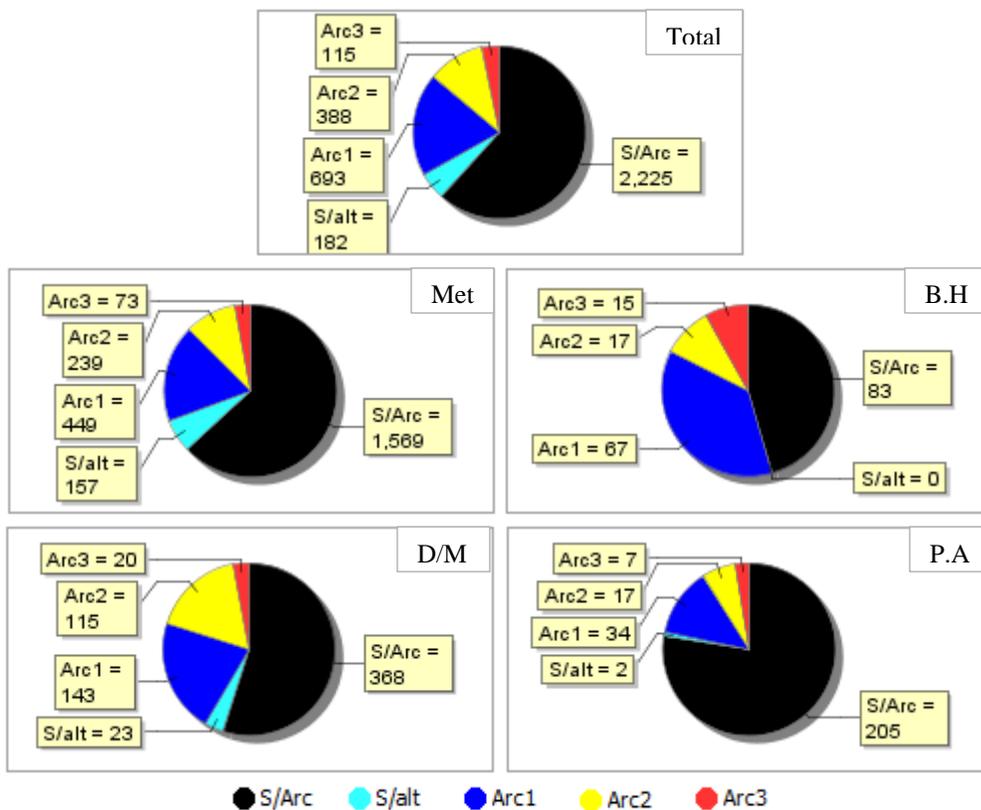
Mineral de alteración: Actinolita (Act)



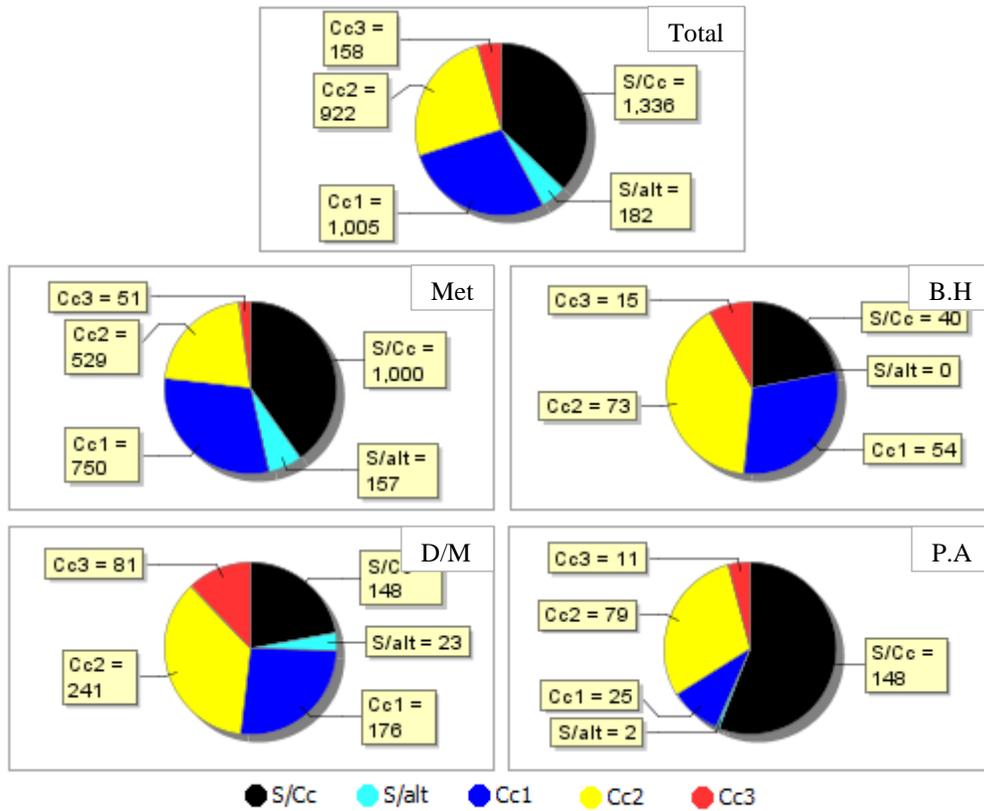
Mineral de alteración: Sericita (Ser)



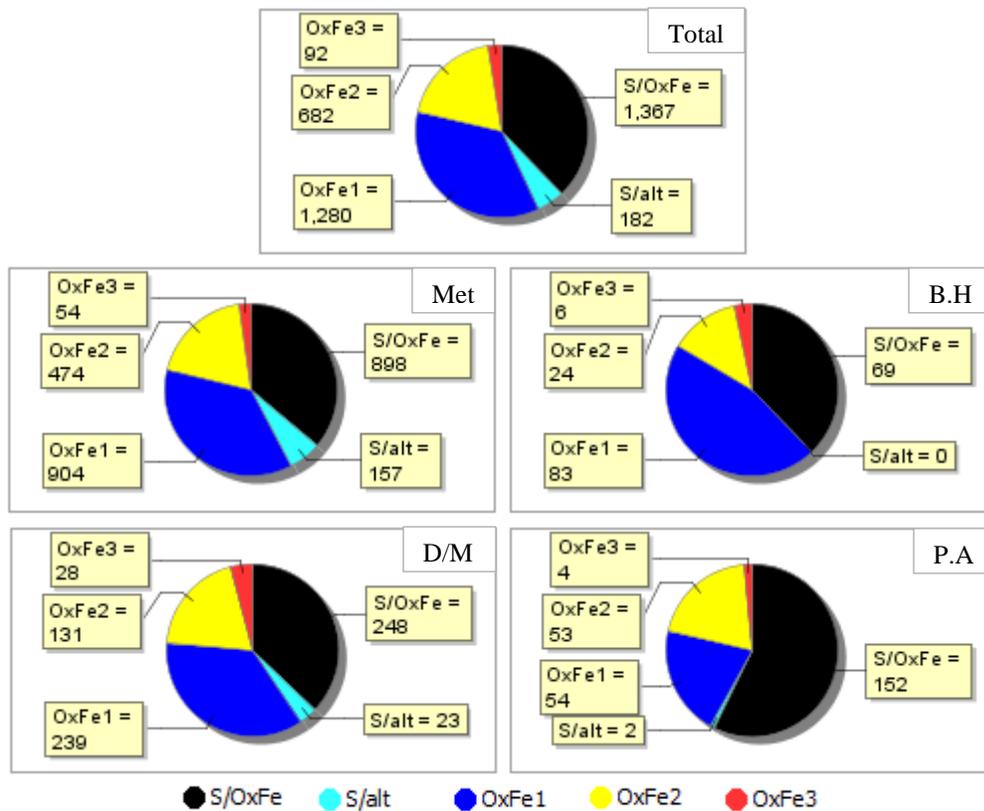
Mineral de alteración: Arcillas (Arc)



Mineral de alteración: Calcita (Cc)

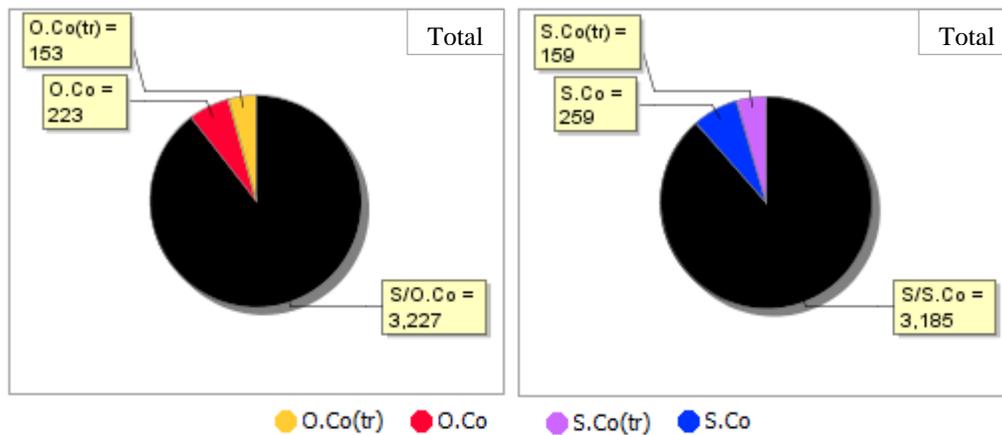


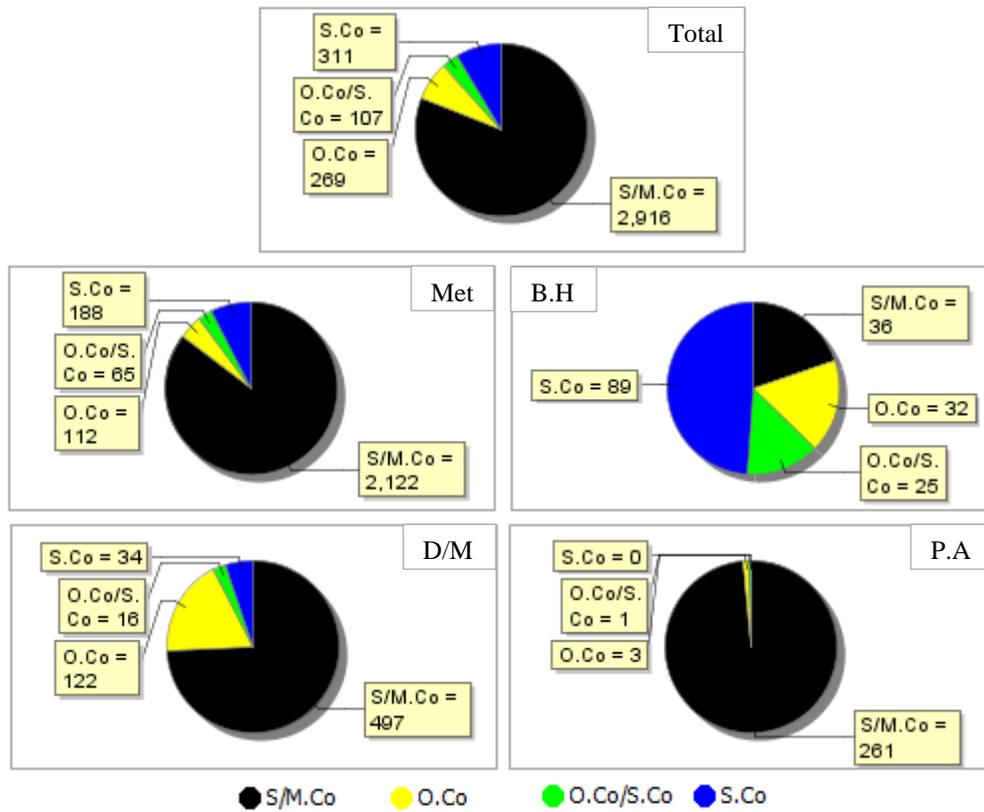
Mineral de alteración: Oxi-hidróxidos de hierro (OxFe)



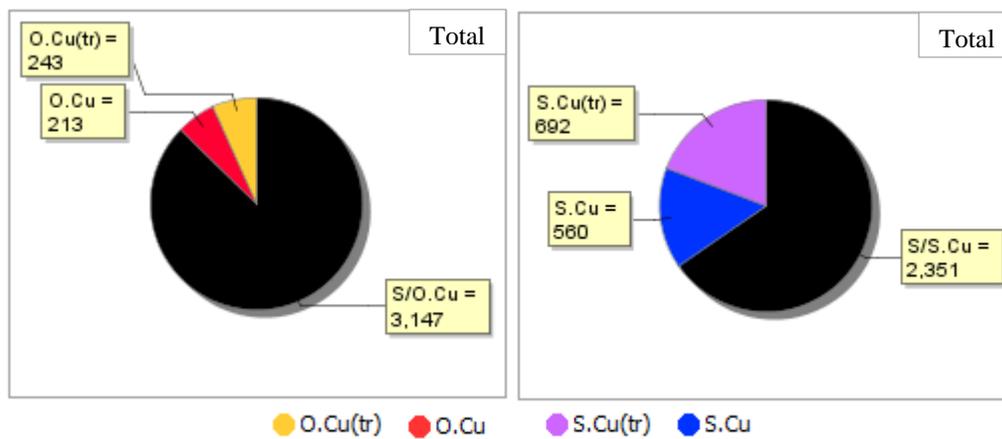
Gráficos circulares por litología con los registros del logueo de sondajes de la mineralización de interés (sulfuros y oxidados)

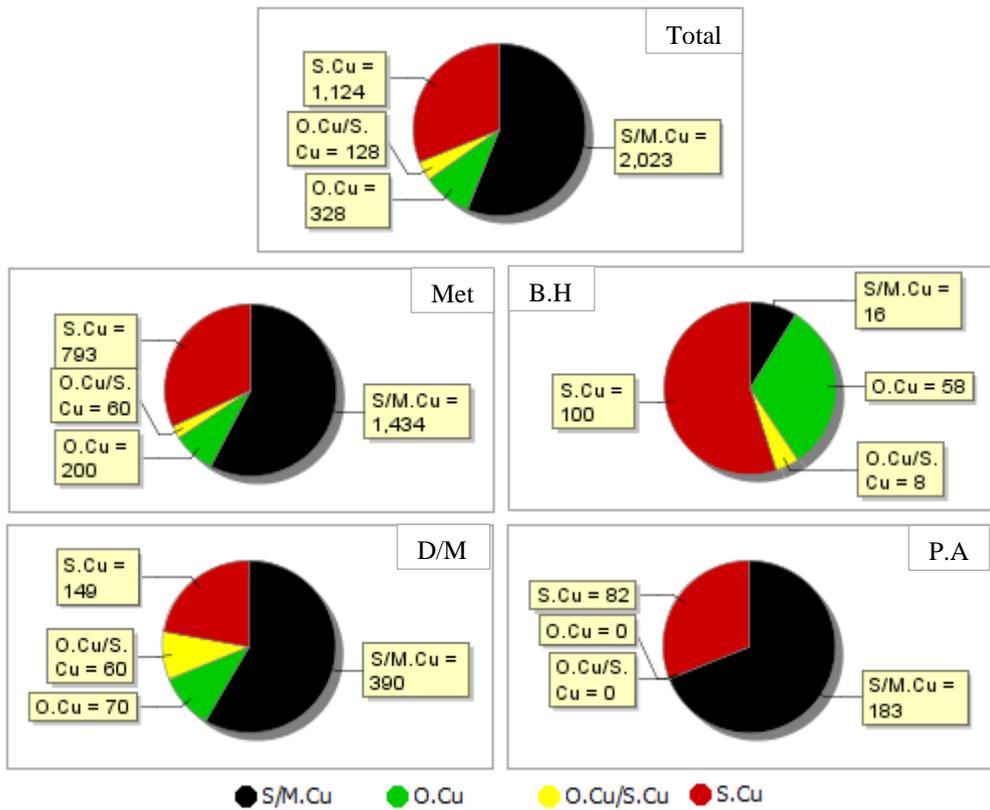
Sulfuros y oxidados de cobalto (S.Co y O.Co)



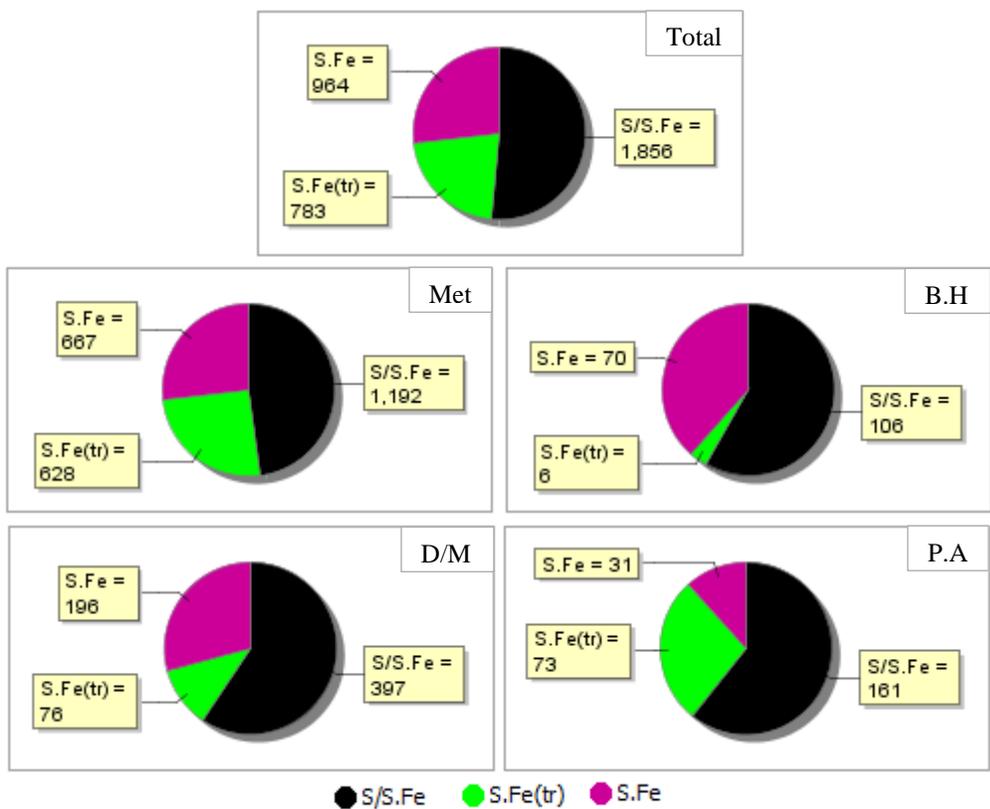


Sulfuros y oxidados de cobre (S.Cu y O.Cu)



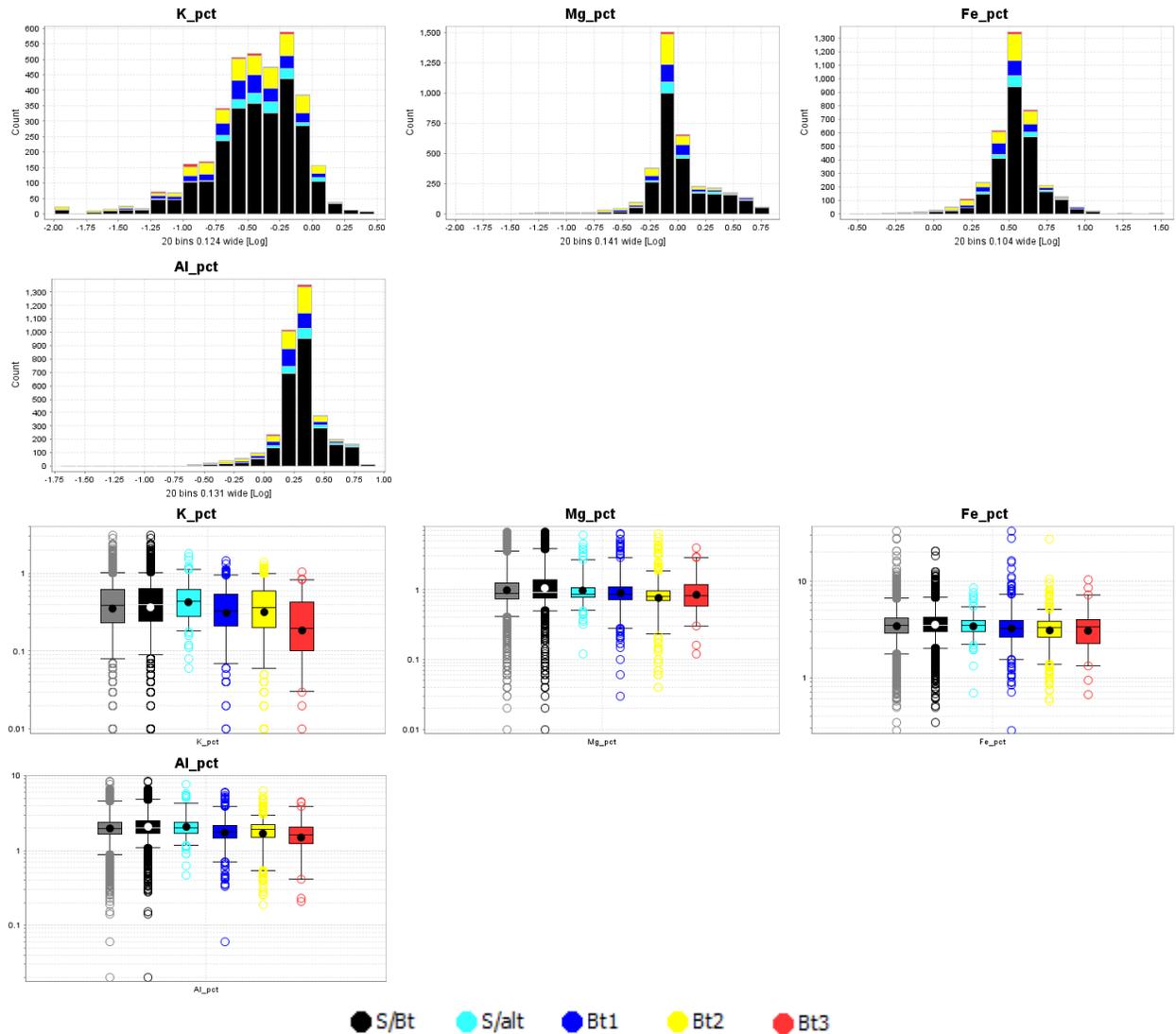


Sulfuros de hierro (S.Fe)

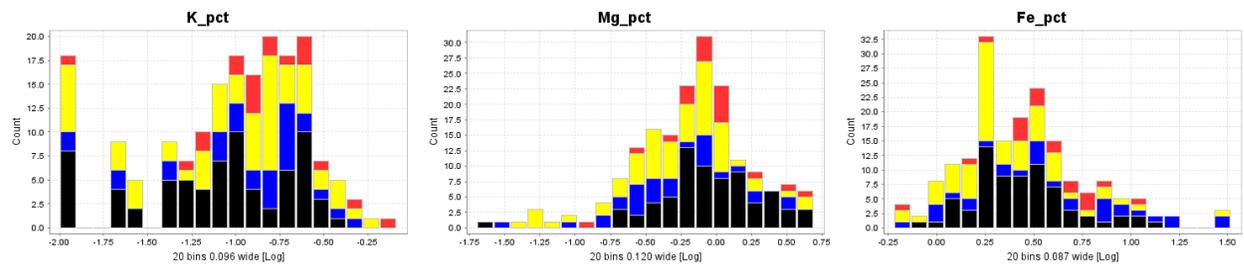


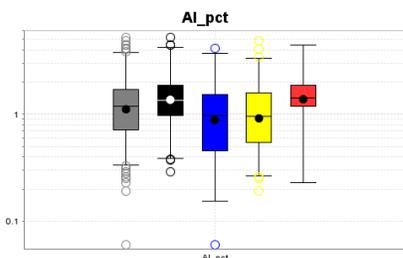
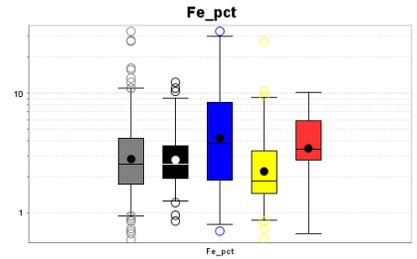
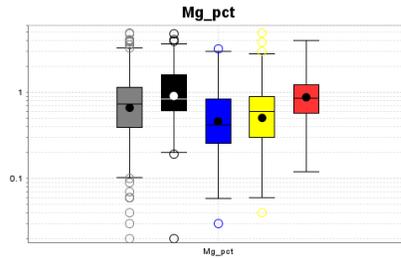
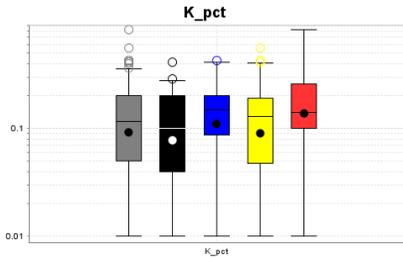
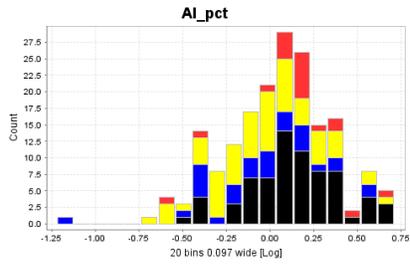
Histogramas y boxplots por litología con los registros del logueo de sondajes por cada mineral de alteración en los elementos de sus estequiometrias teóricas

Biotita (Bt) - Todas las muestras (3603 datos)



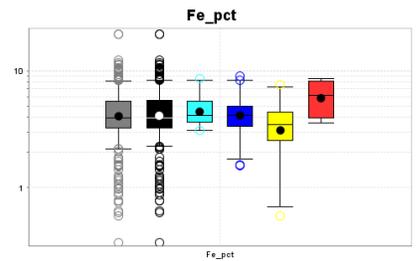
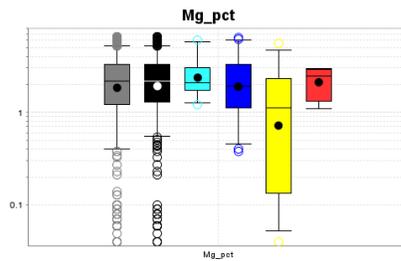
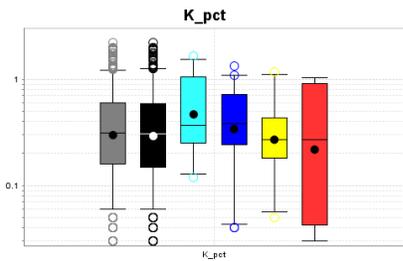
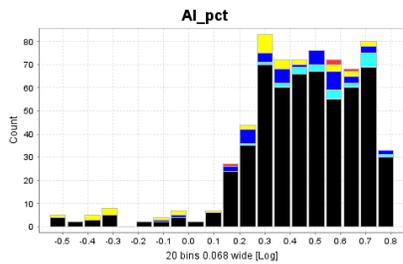
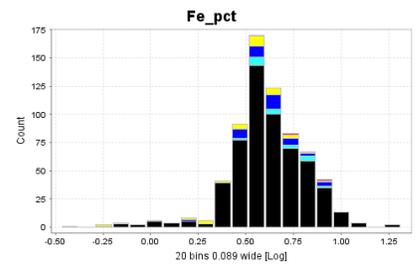
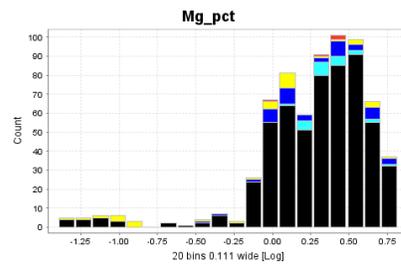
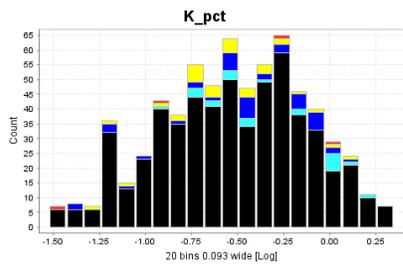
Biotita (Bt) - Brechas hidrotermales (B.H.Qz y B.H.Bt)

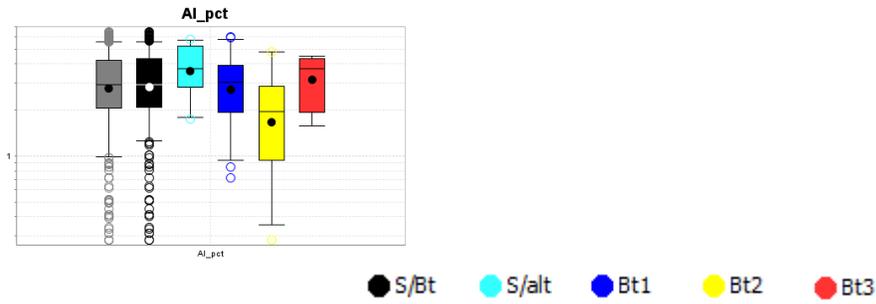




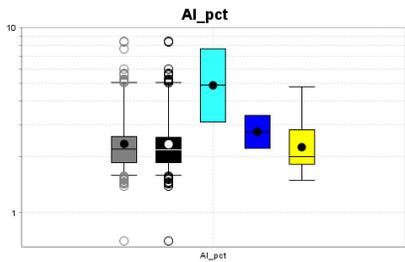
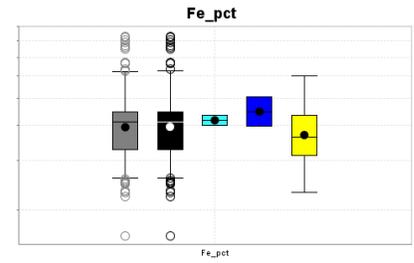
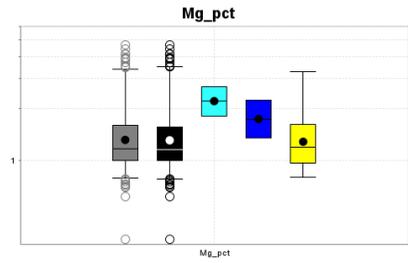
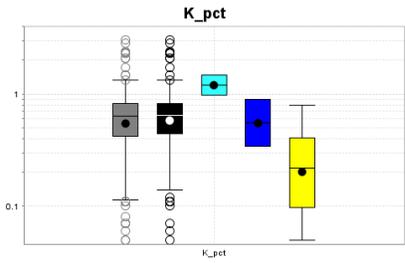
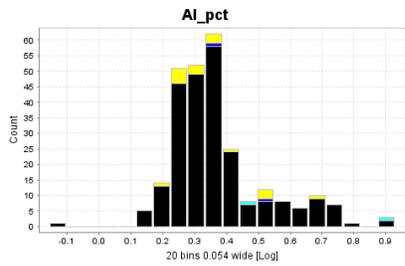
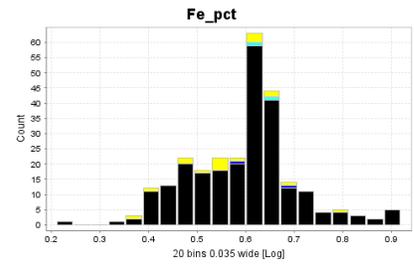
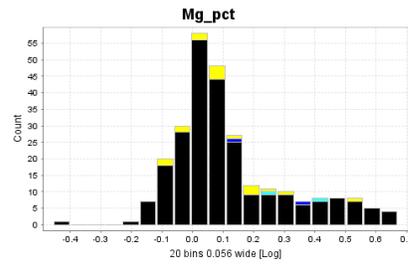
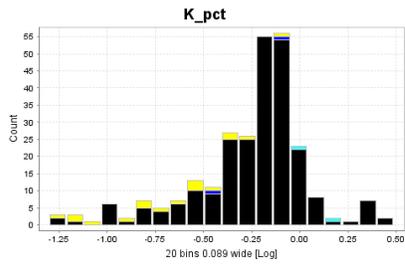
● S/Bt ● S/alt ● Bt1 ● Bt2 ● Bt3

Biotita (Bt) - Diorita/microdiorita (D/M)

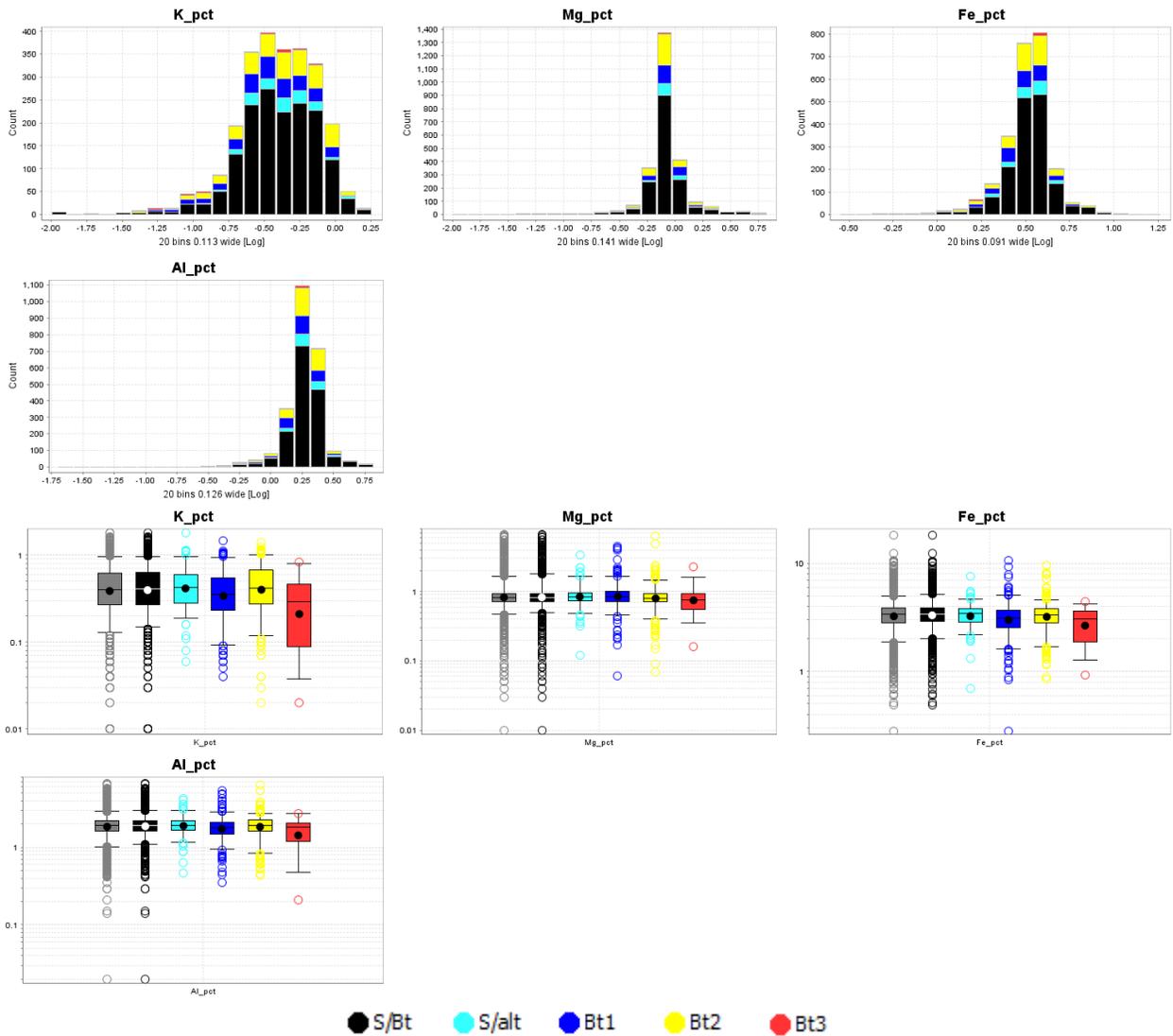




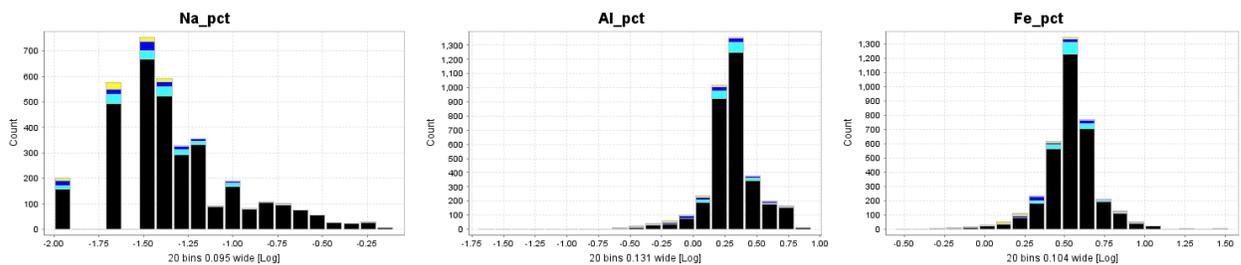
Biotita (Bt) - Pórfido andesítico (P.A)

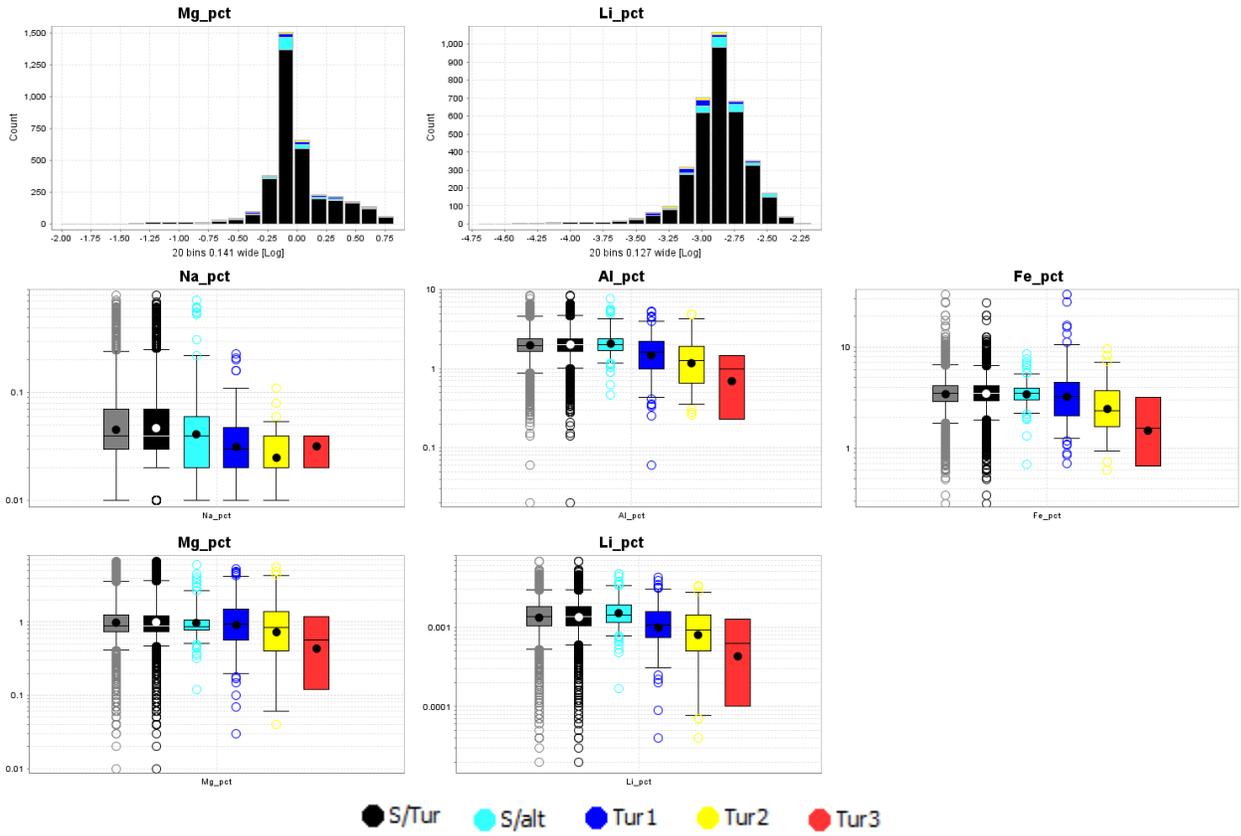


Biotita (Bt) - Esquisto/metamórfico (Esq/Met)

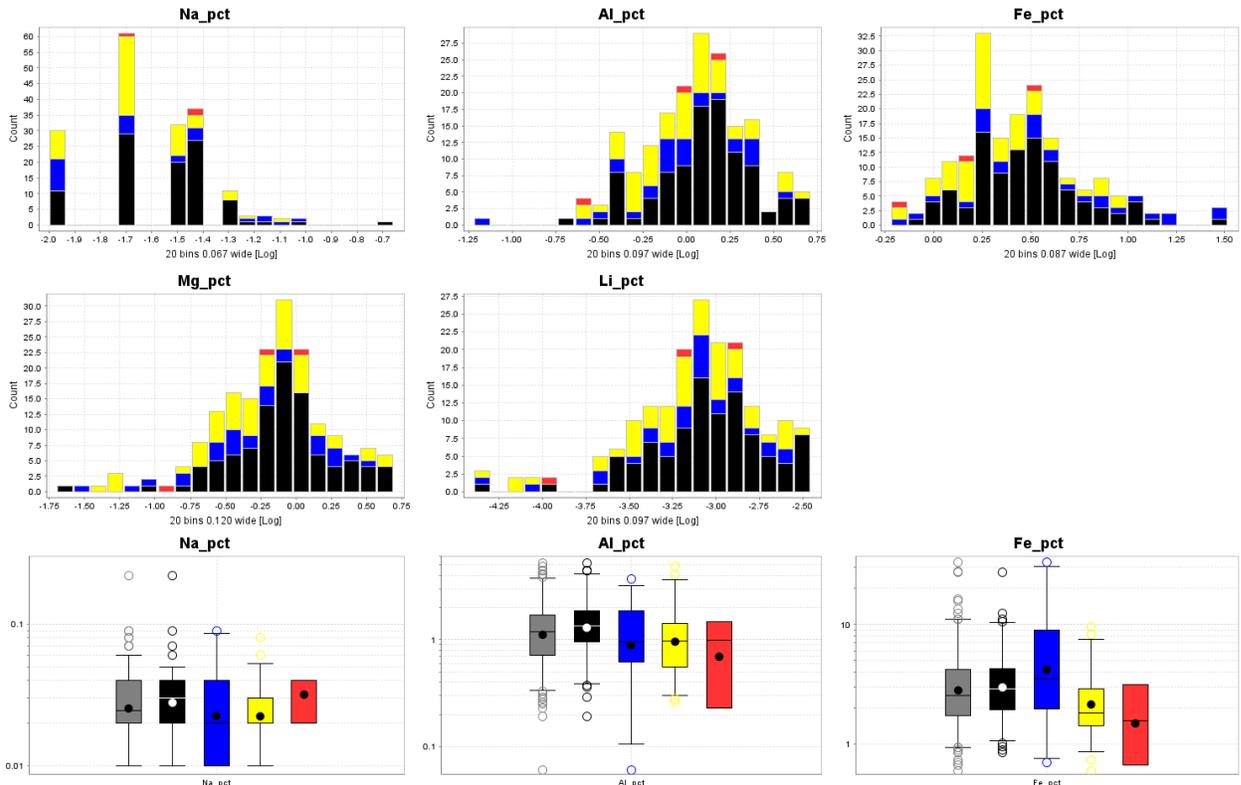


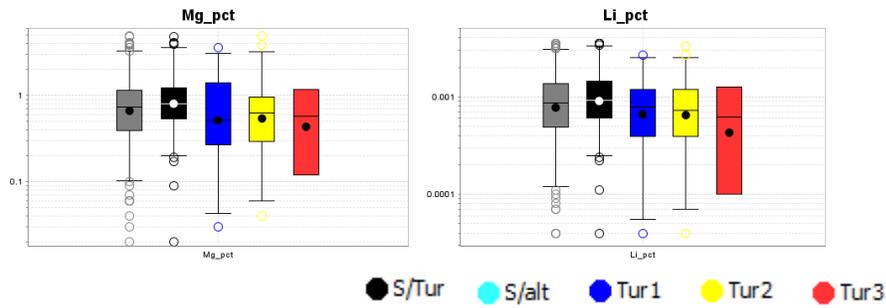
Turmalina (Tur) - Todas las muestras (3603 datos)



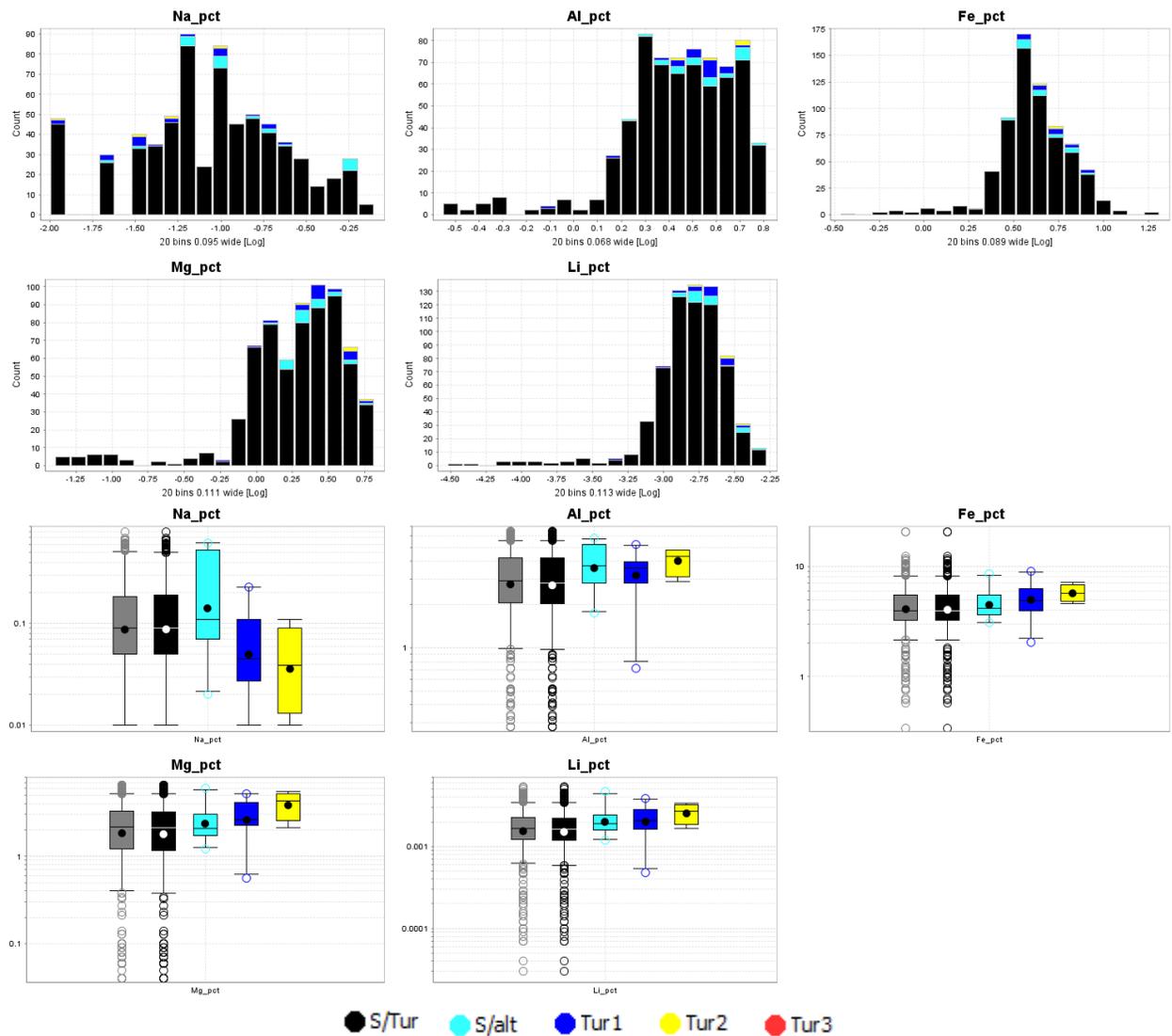


Turmalina (Tur) - Brechas hidrotermales (B.H.Qz y B.H.Bt)

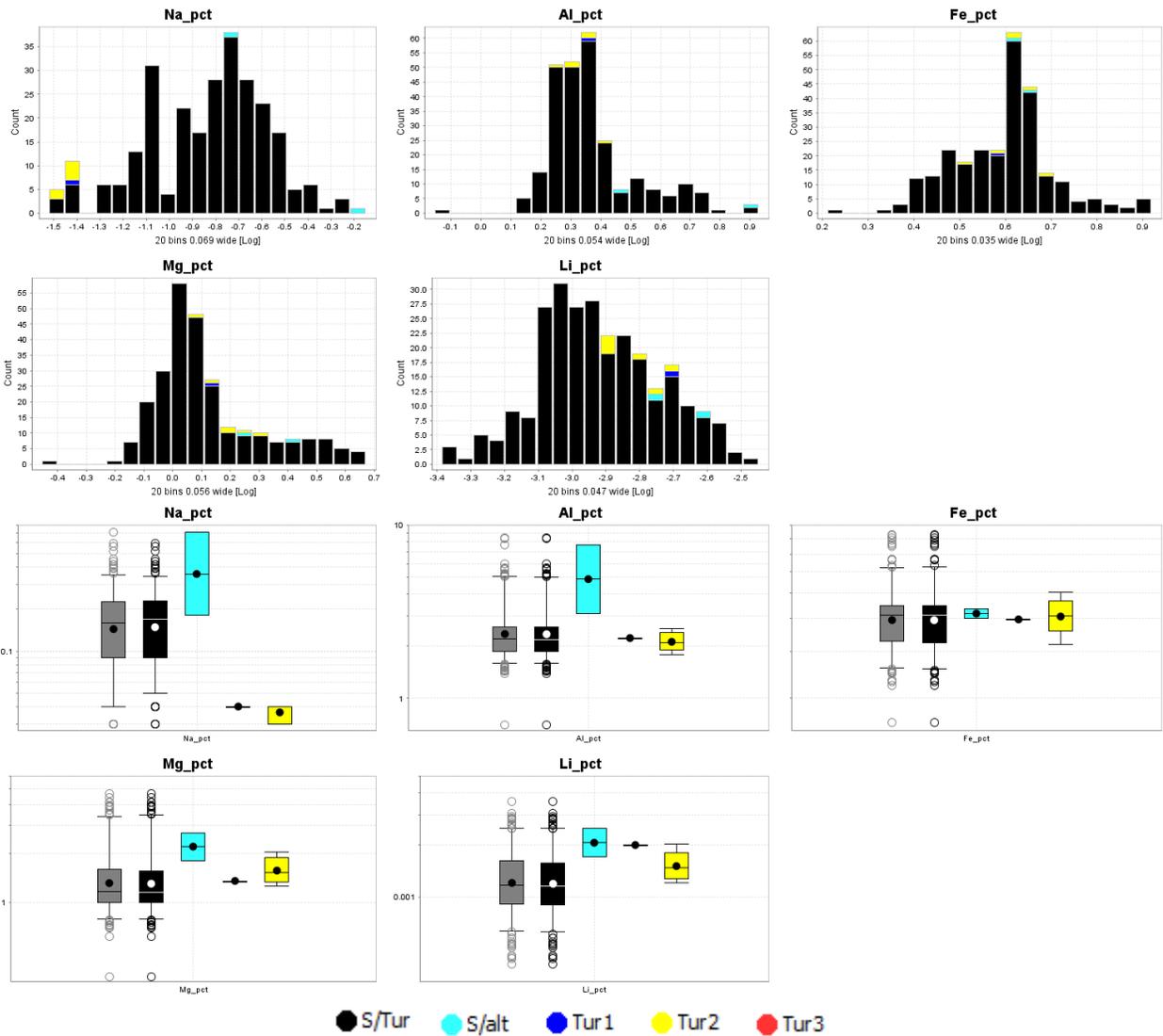




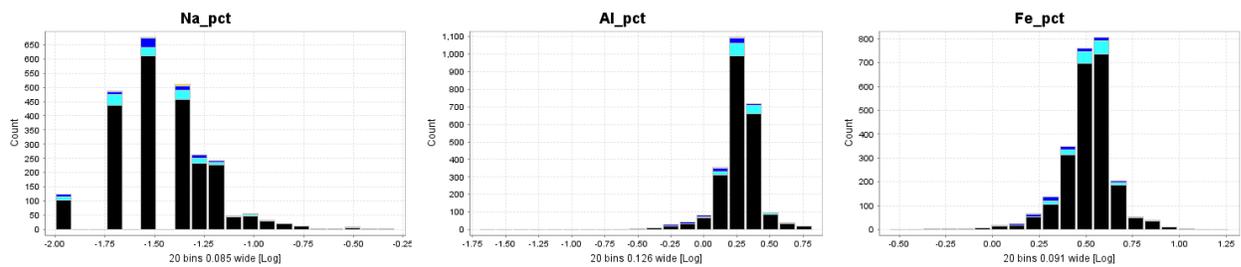
Turmalina (Tur) - Diorita/microdiorita (D/M)

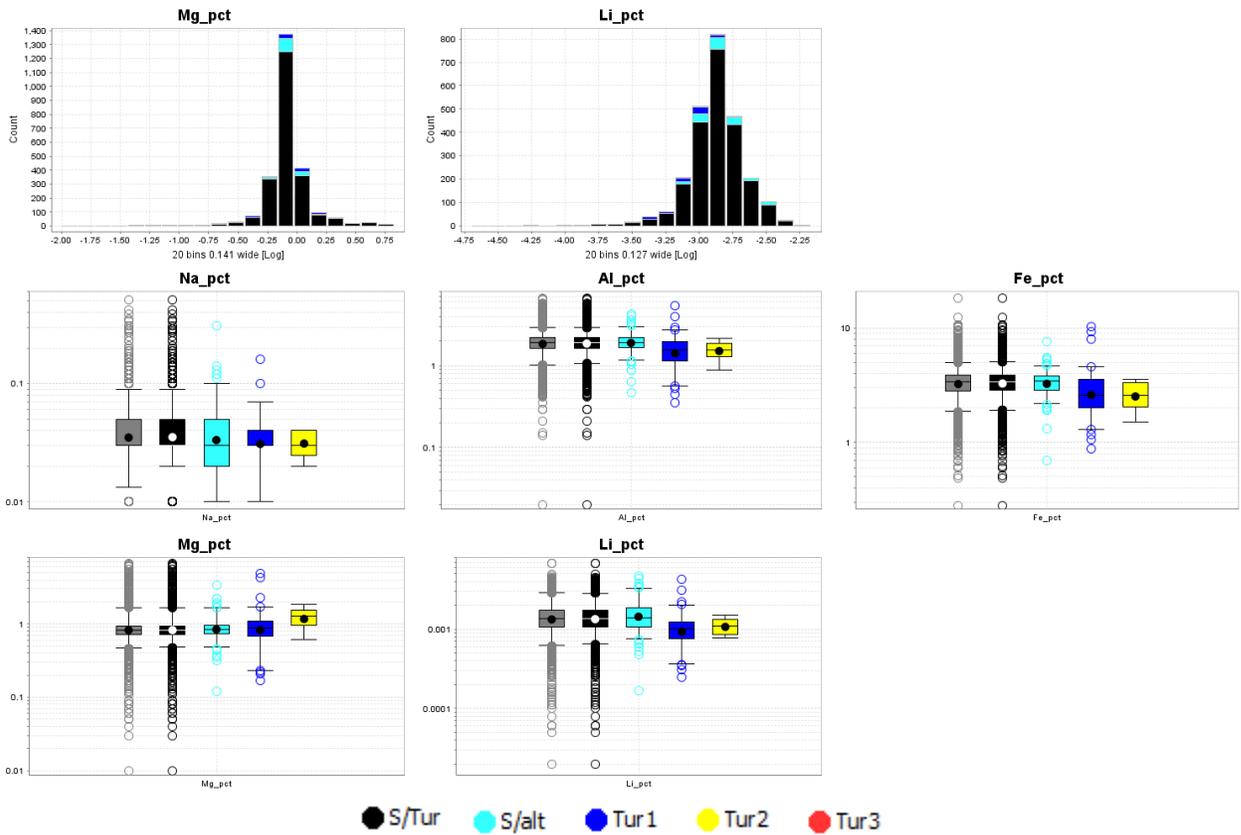


Turmalina (Tur) - Pórfido andesítico (P.A)

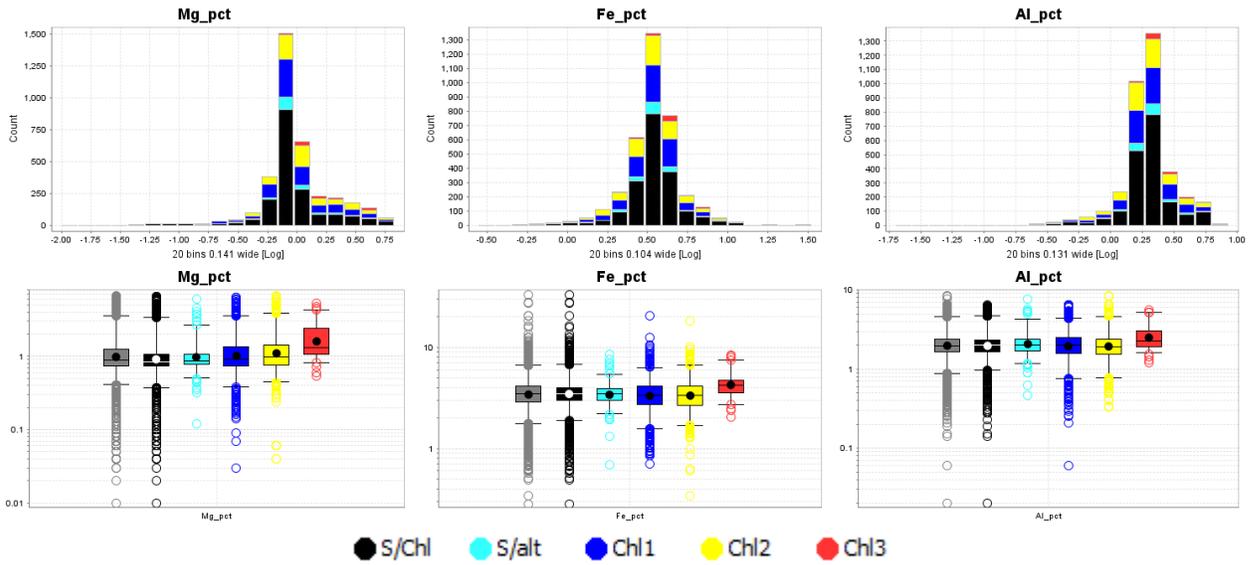


Turmalina (Tur) - Esquisto/metamórfico (Esq/Met)

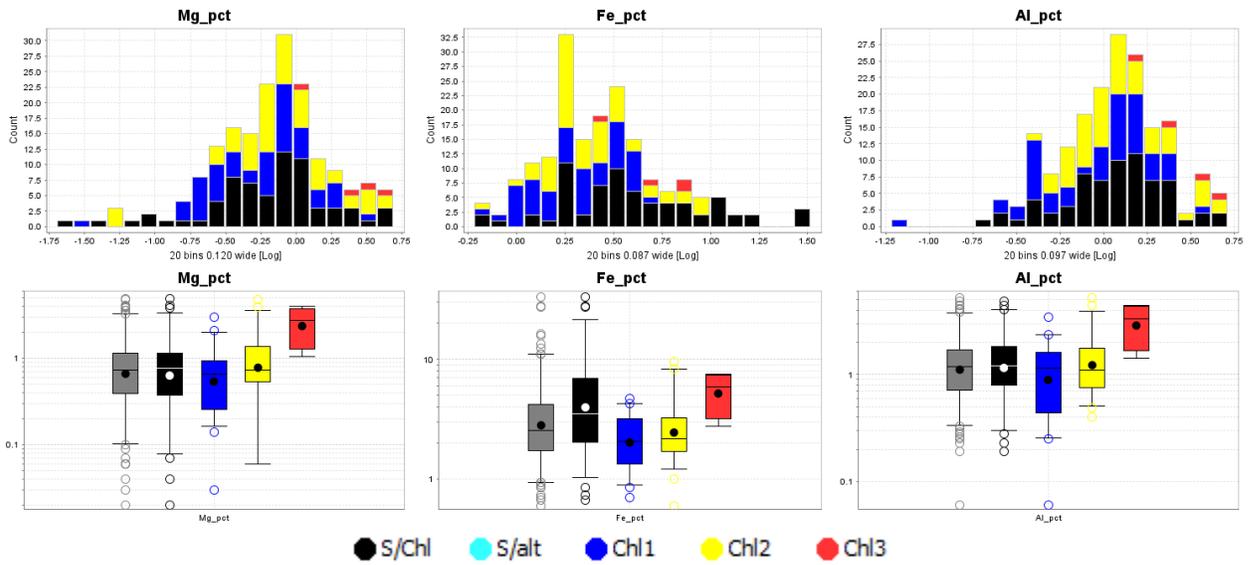




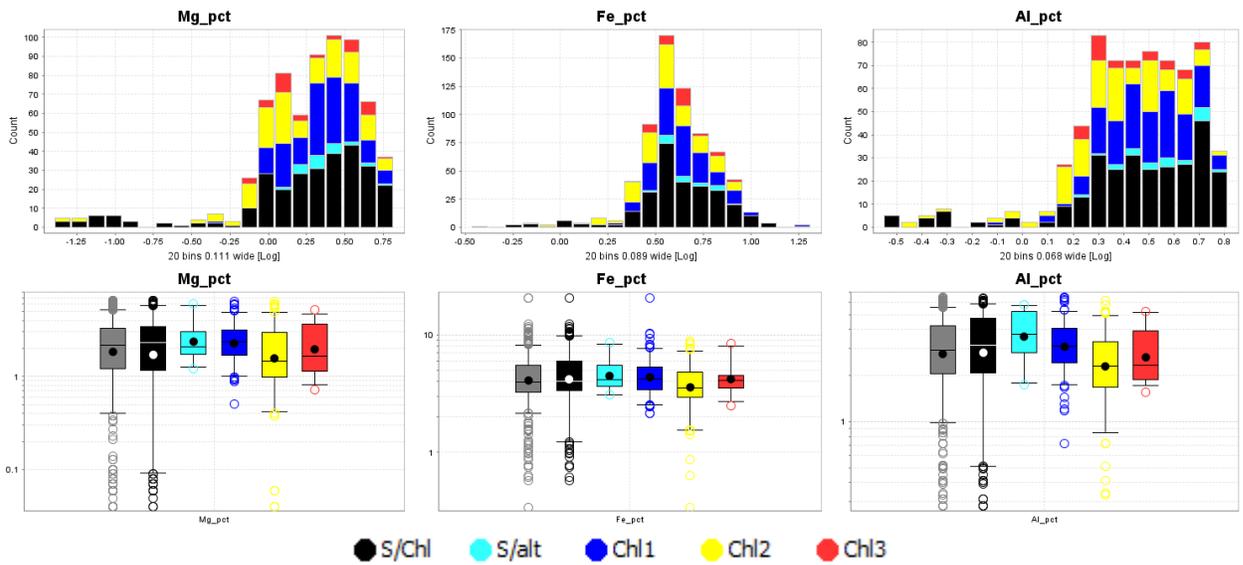
Clorita (Chl) - Todas las muestras (3603 datos)



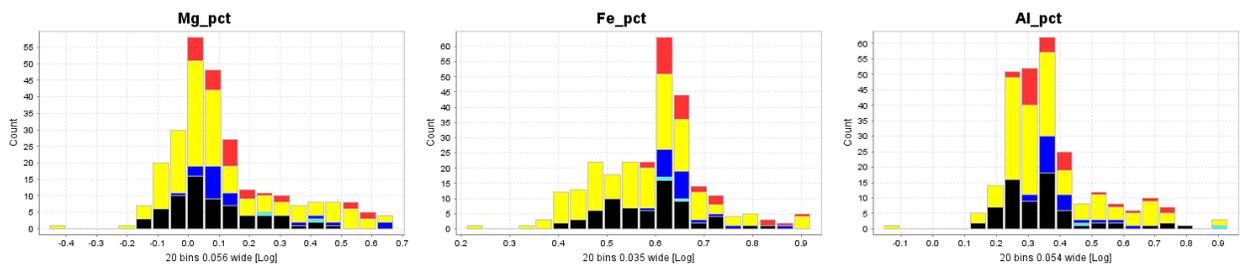
Clorita (Chl) - Brechas hidrotermales (B.H.Qz y B.H.Bt)

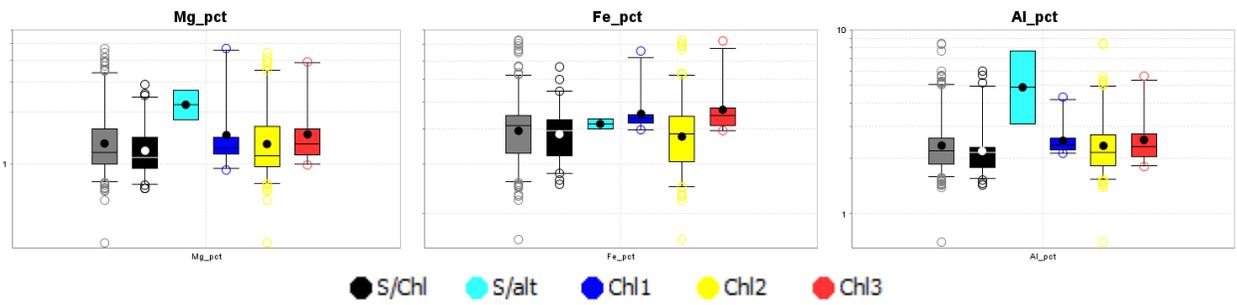


Clorita (Chl) - Diorita/microdiorita (D/M)

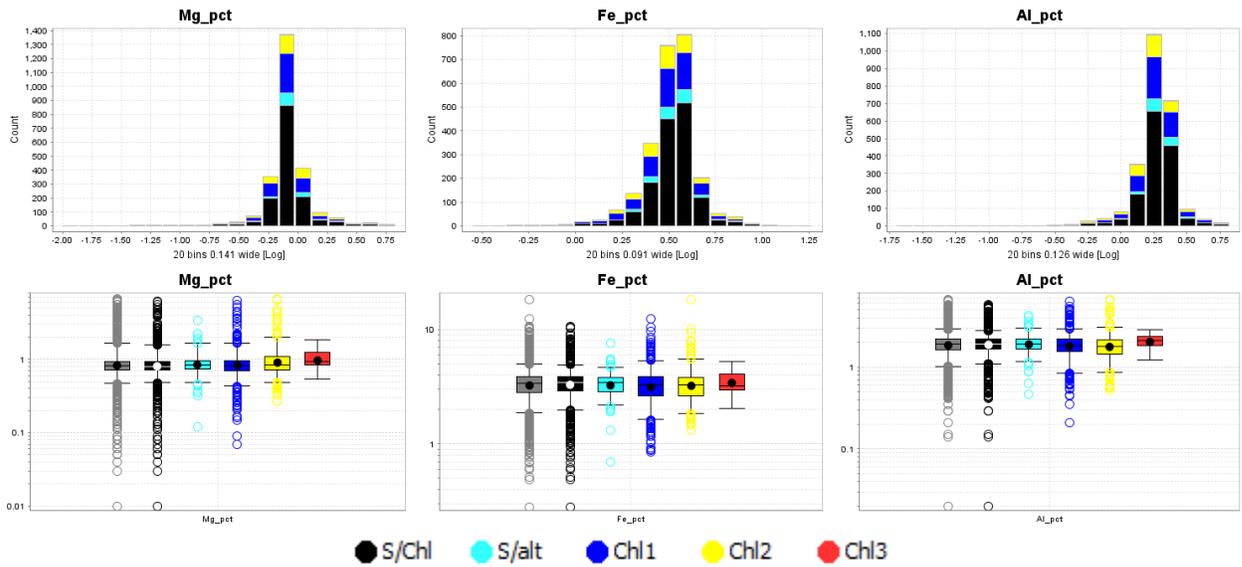


Clorita (Chl) - Pórfido andesítico (P.A)

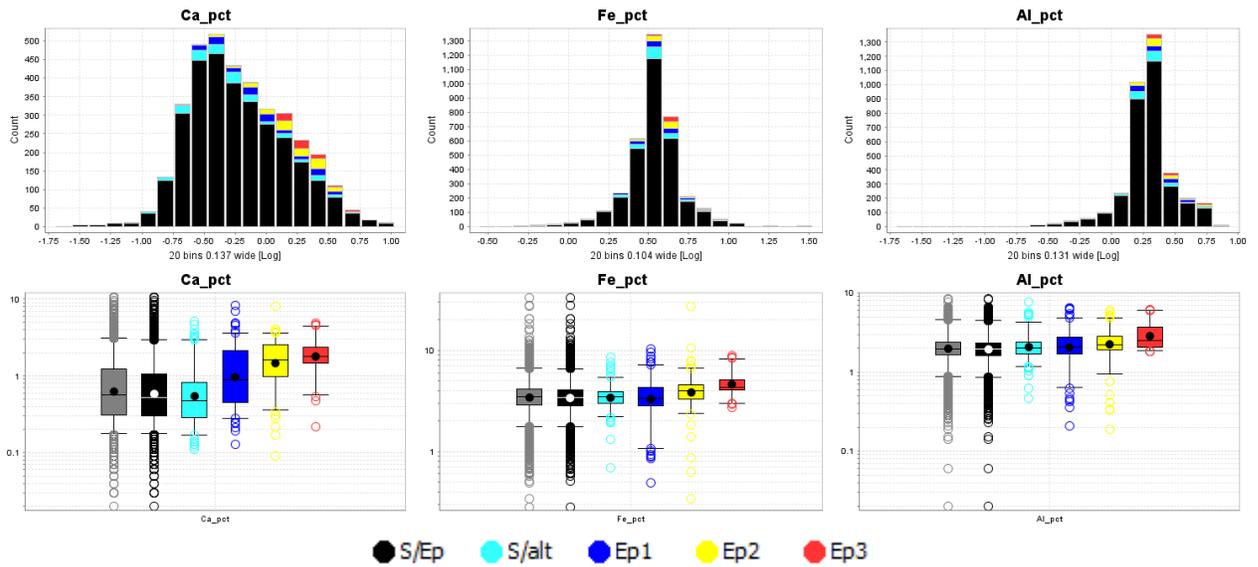




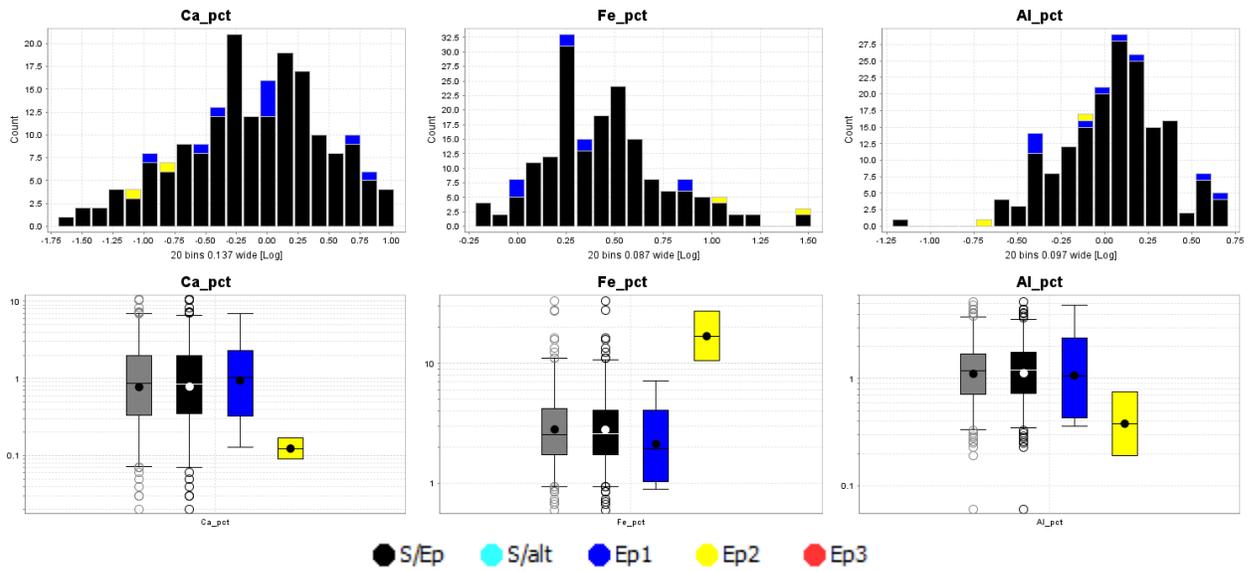
Clorita (Chl) - Esquisto/metamórfico (Esq/Met)



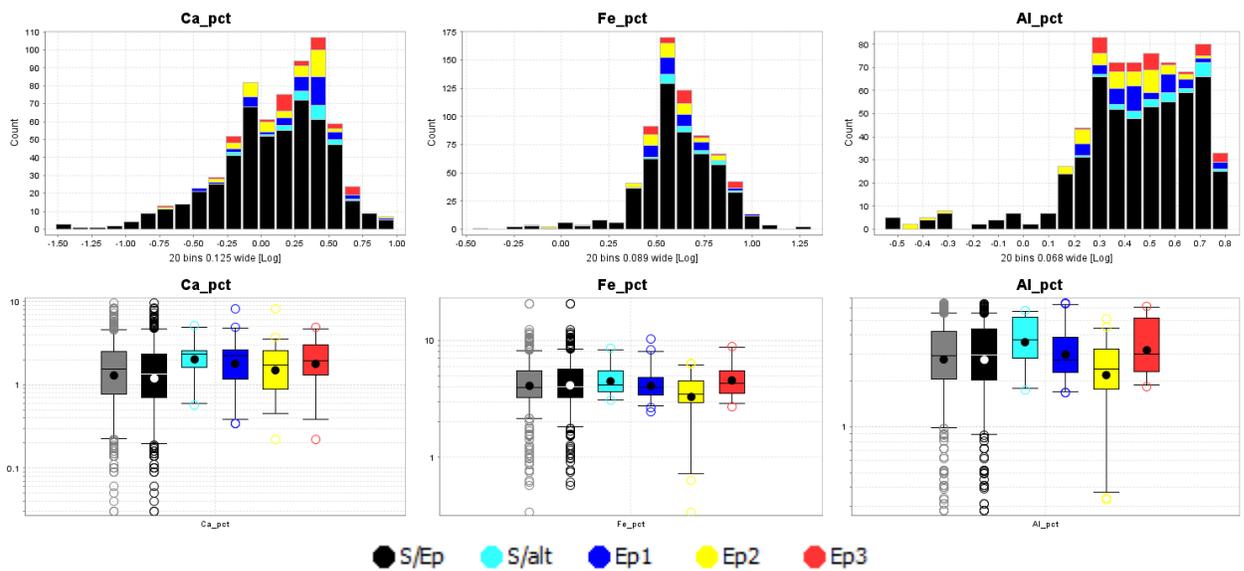
Epidota (Ep) - Todas las muestras (3603 datos)



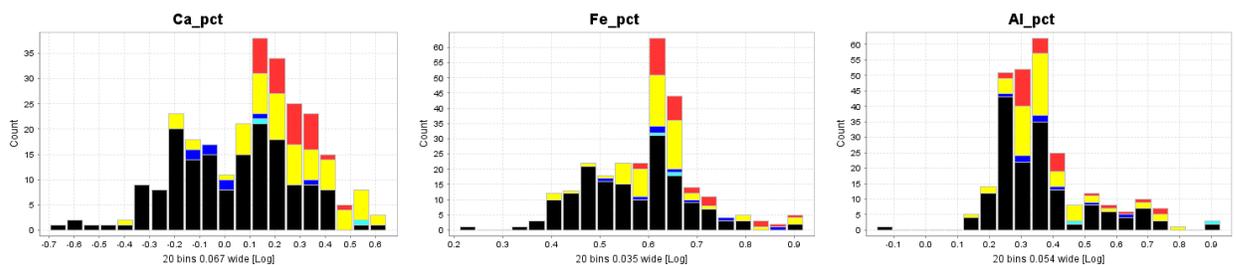
Epidota (Ep) - Brechas hidrotermales (B.H.Qz y B.H.Bt)

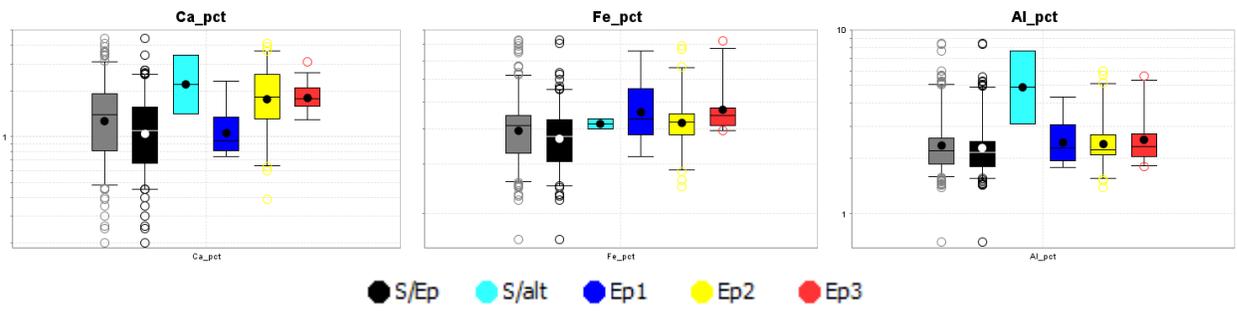


Epidota (Ep) - Diorita/microdiorita (D/M)

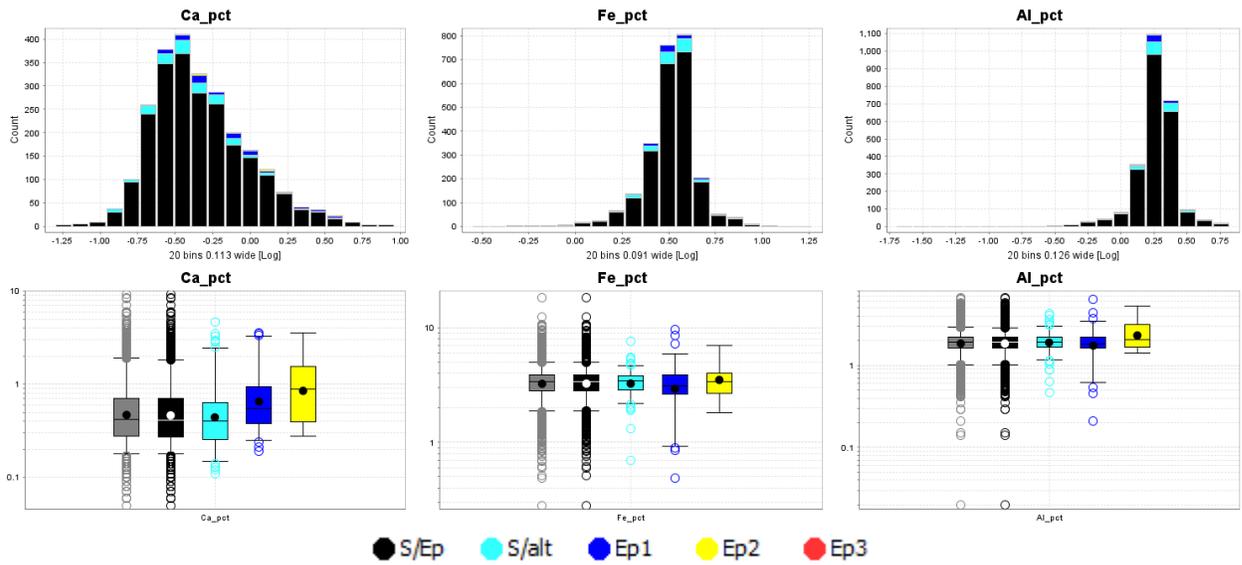


Epidota (Ep) - Pórfido andesítico (P.A)

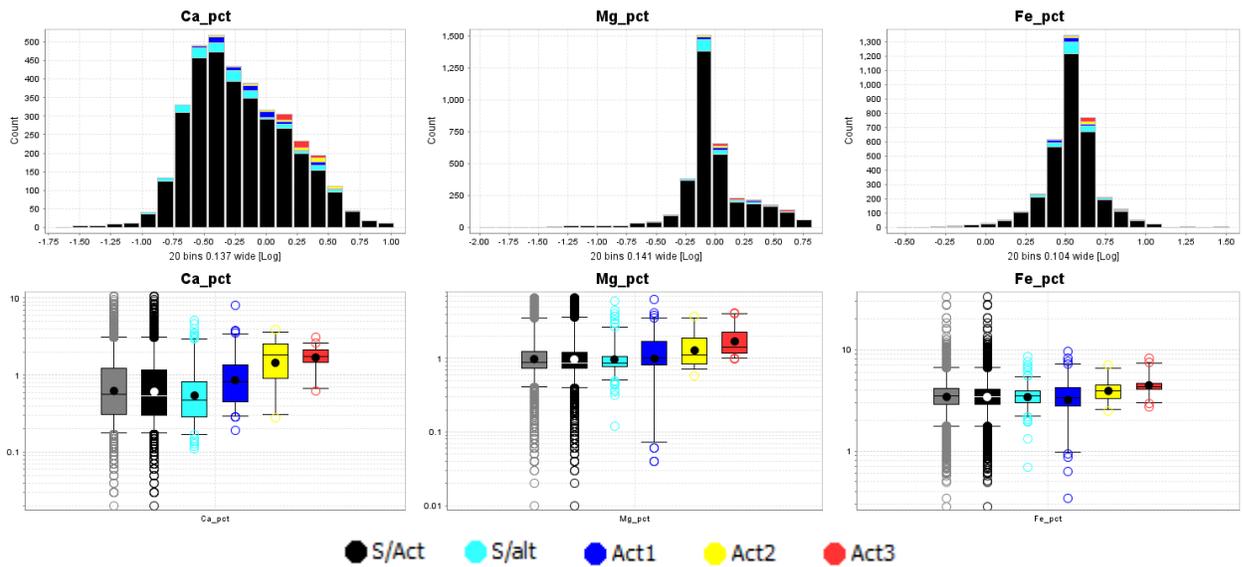




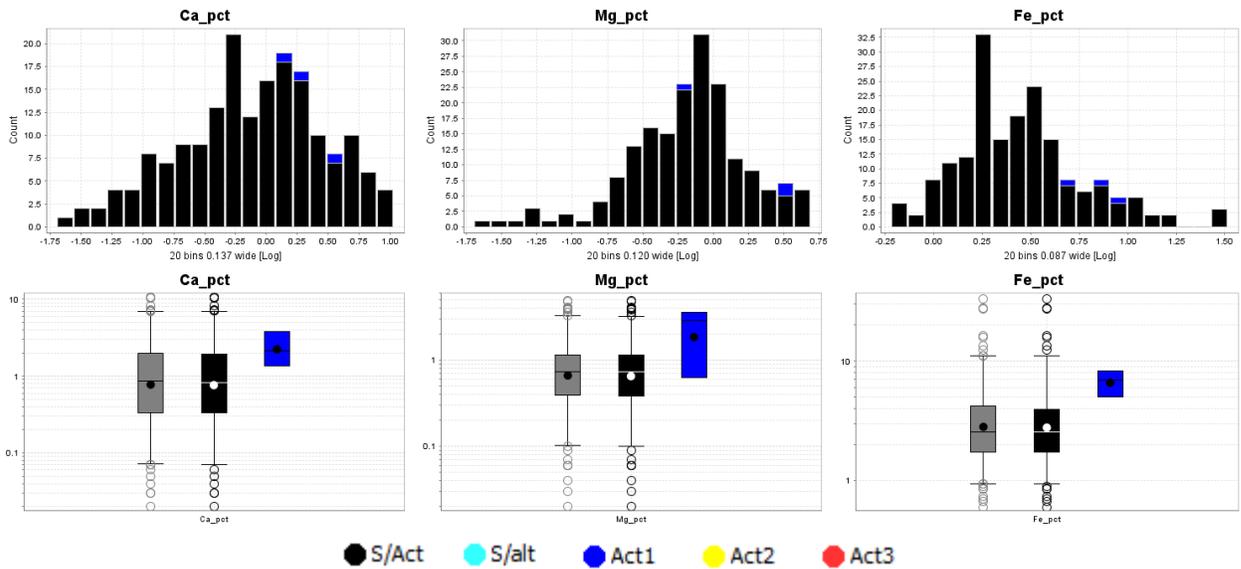
Epidota (Ep) - Esquisto/metamórfico (Esq/Met)



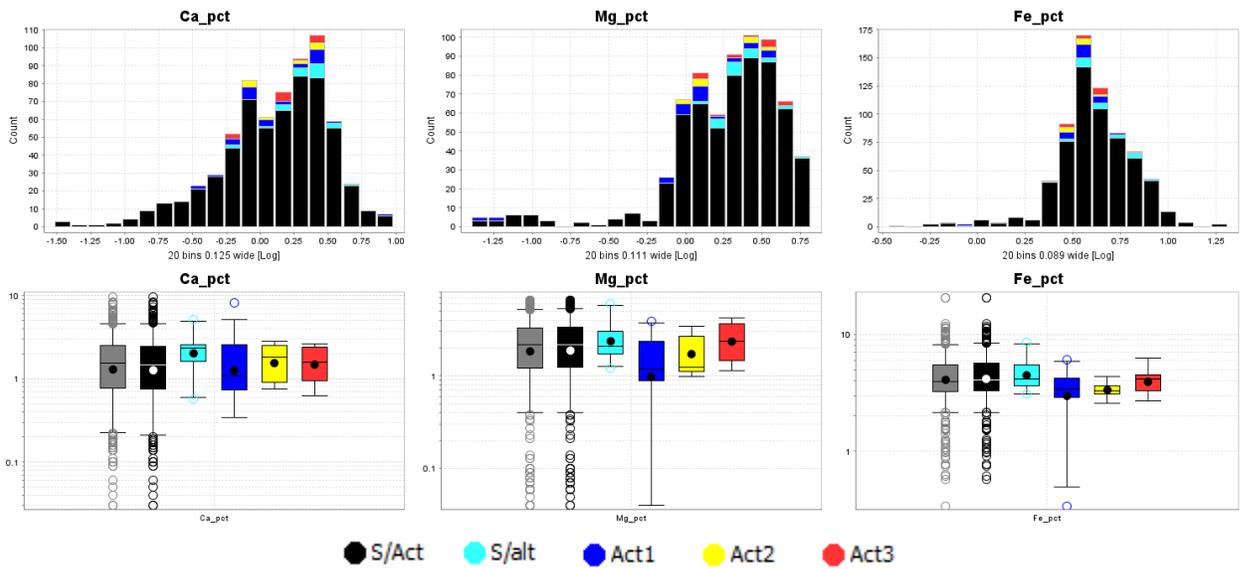
Actinolita (Act) - Todas las muestras (3603 datos)



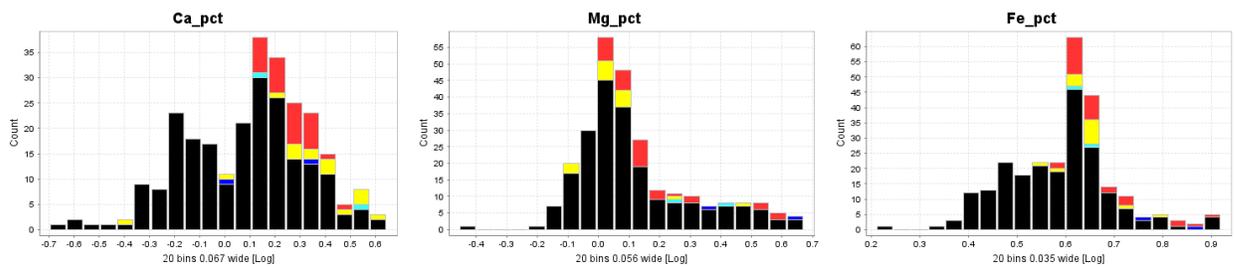
Actinolita (Act) - Brechas hidrotermales (B.H.Qz y B.H.Bt)

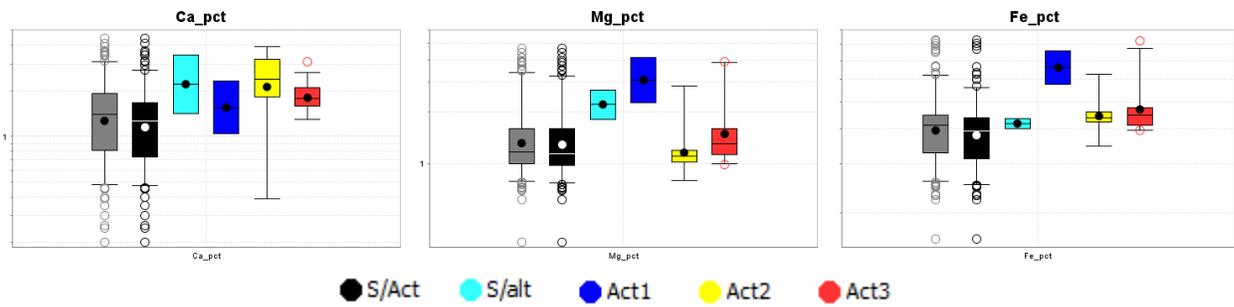


Actinolita (Act) - Diorita/microdiorita (D/M)

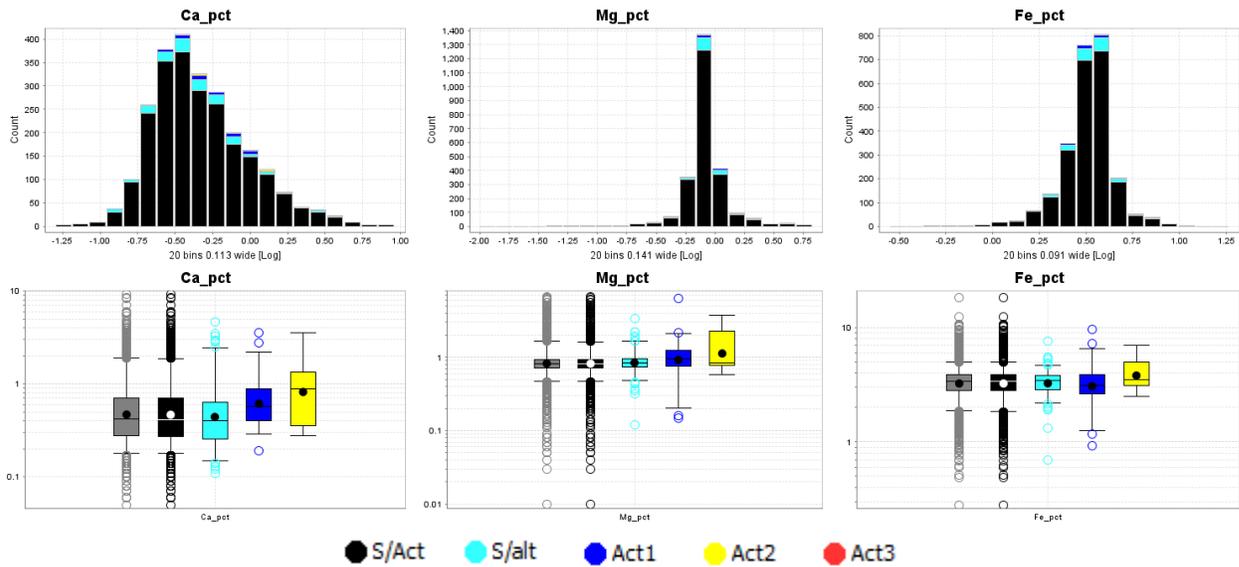


Actinolita (Act) - Pórfido andesítico (P.A)

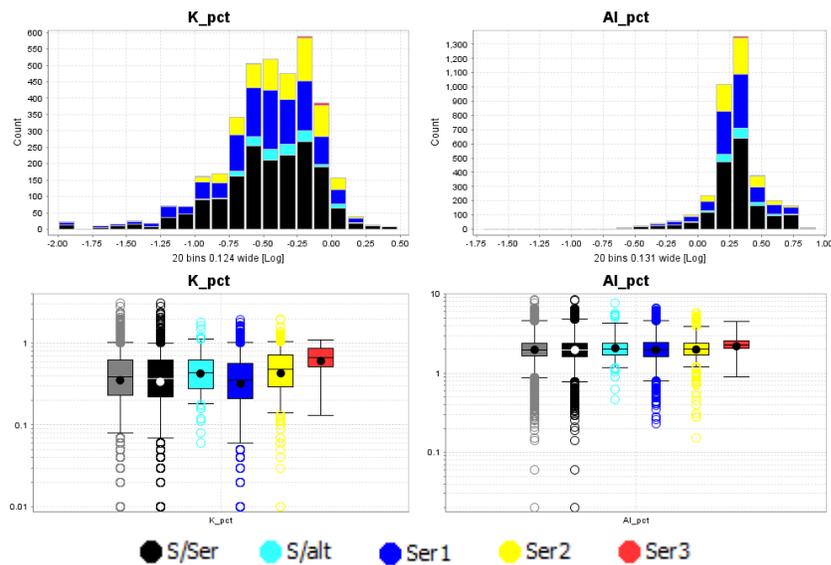




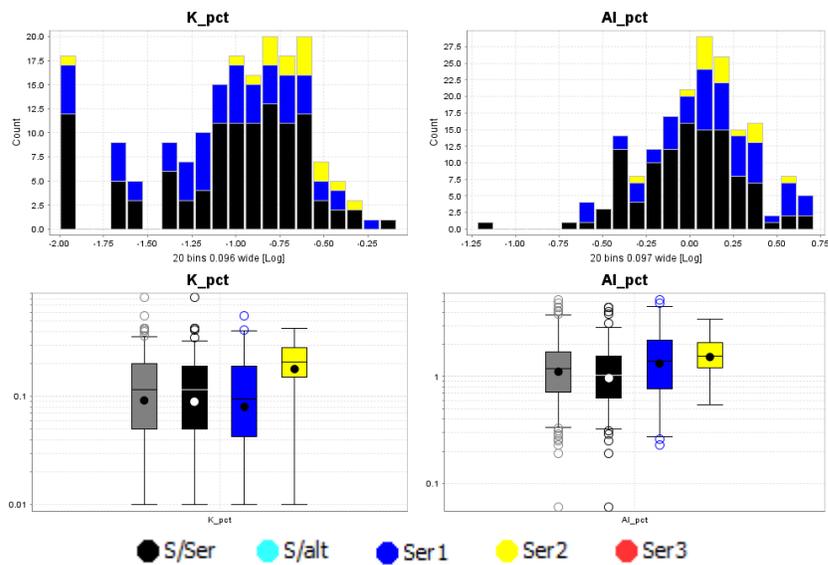
Actinolita (Act) - Esquisto/metamórfico (Esq/Met)



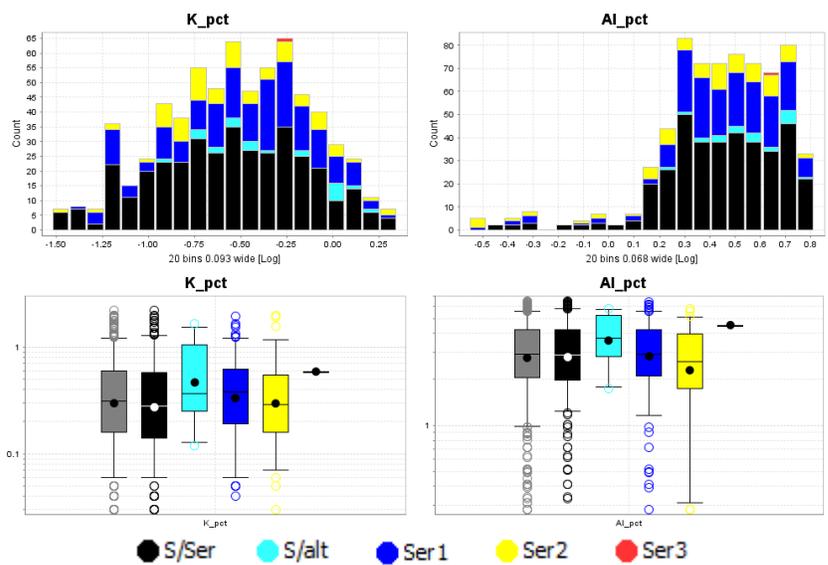
Sericita (Ser) - Todas las muestras (3603 datos)



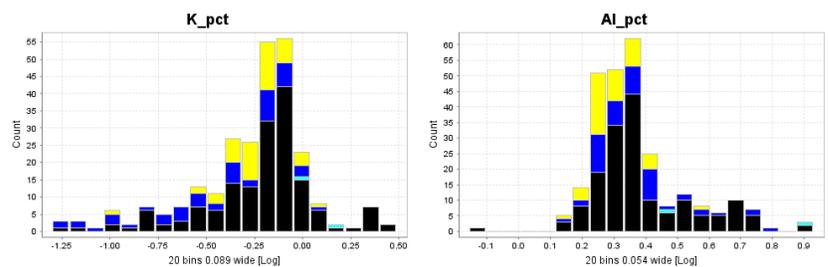
Sericita (Ser) - Brechas hidrotermales (B.H.Qz y B.H.Bt)

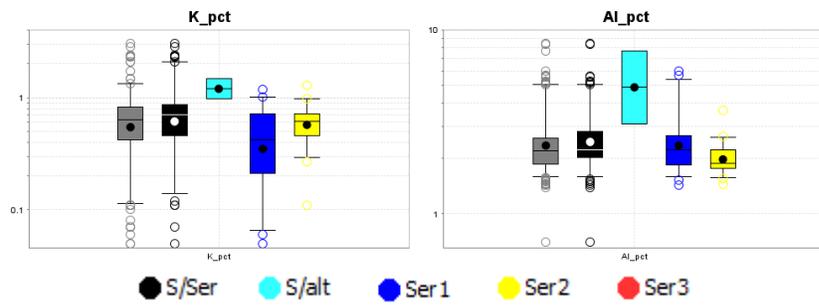


Sericita (Ser) - Diorita/microdiorita (D/M)

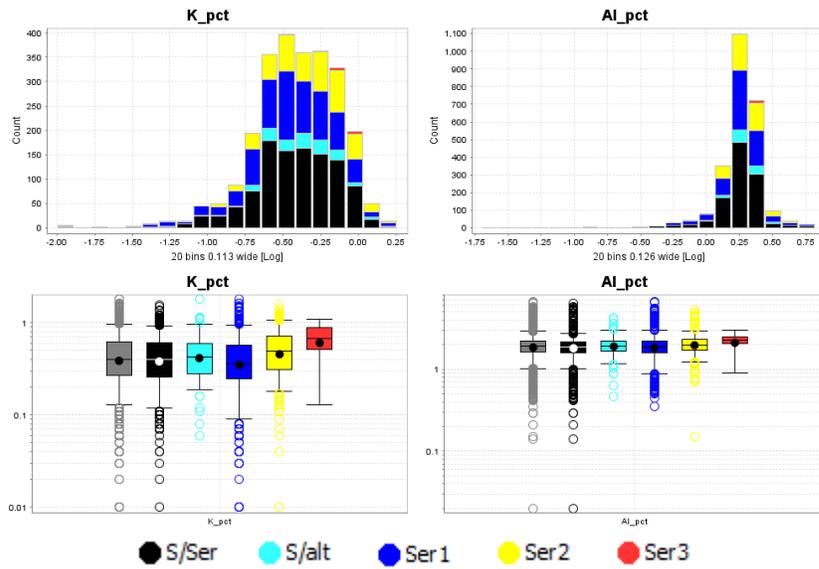


Sericita (Ser) - Pórfido andesítico (P.A)

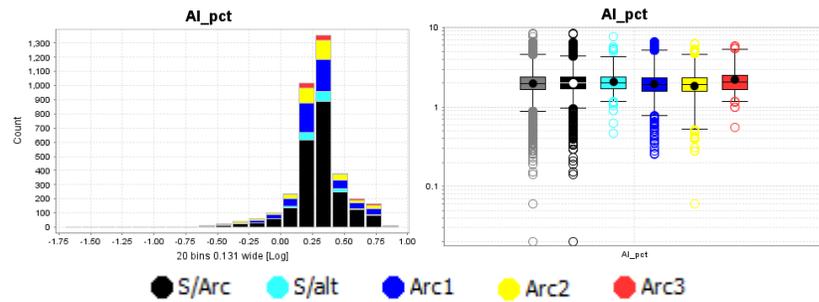




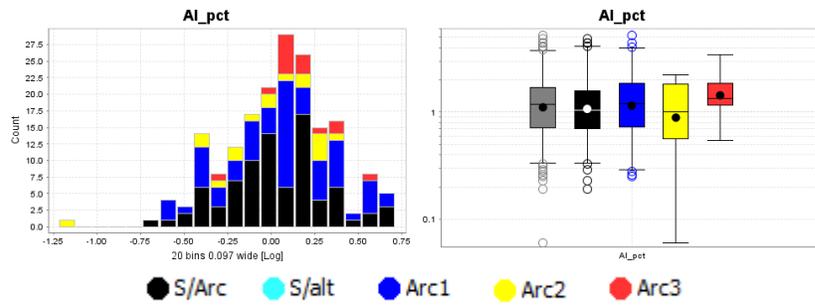
Sericita (Ser) - Esquisto/metamórfico (Esq/Met)



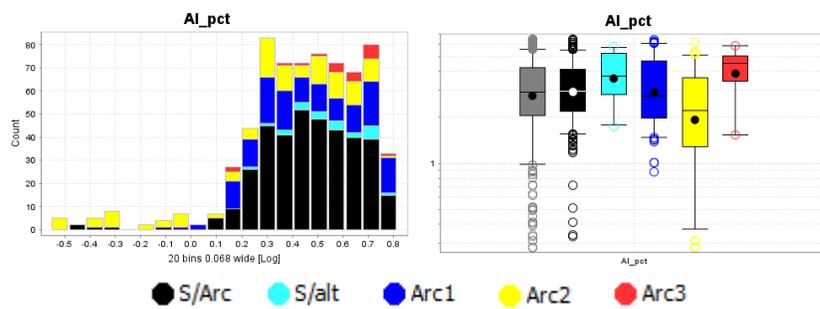
Arcillas (Arc) - Todas las muestras (3603 datos)



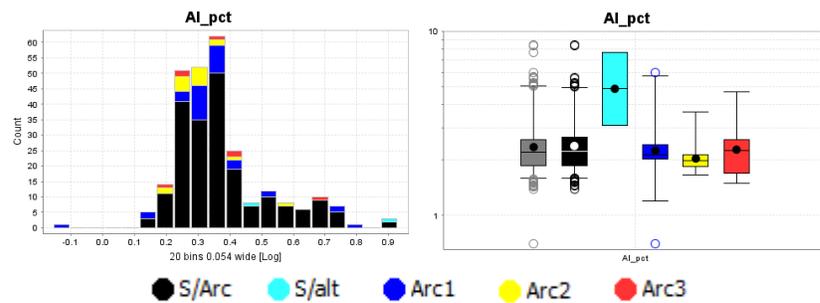
Arcillas (Arc) - Brechas hidrotermales (B.H.Qz y B.H.Bt)



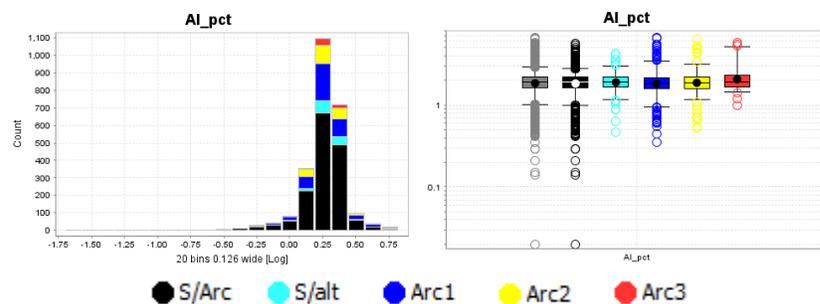
Arcillas (Arc) - Diorita/microdiorita (D/M)



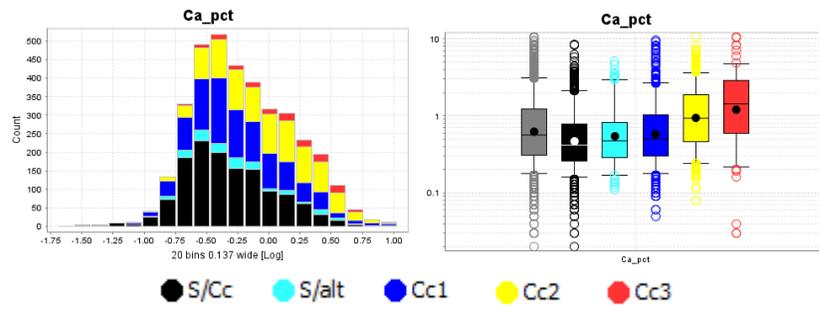
Arcillas (Arc) - Pórfido andesítico (P.A)



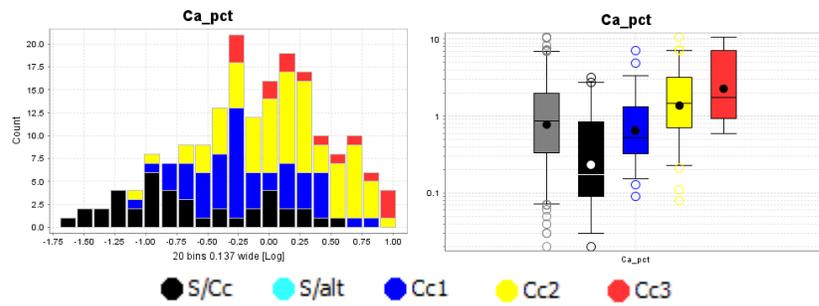
Arcillas (Arc) - Esquisto/metamórfico (Esq/Met)



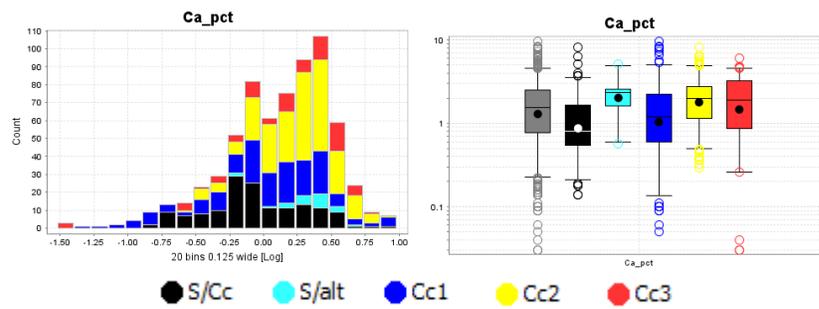
Calcita (Cc) - Todas las muestras (3603 datos)



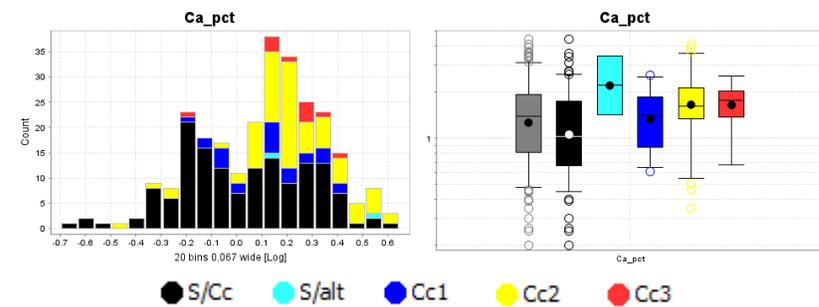
Calcita (Cc) - Brechas hidrotermales (B.H.Qz y B.H.Bt)



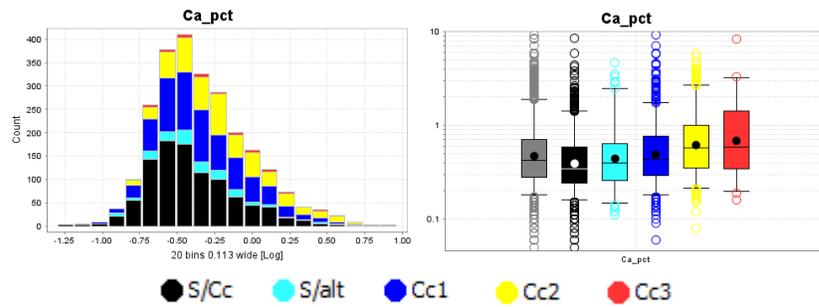
Calcita (Cc) - Diorita/microdiorita (D/M)



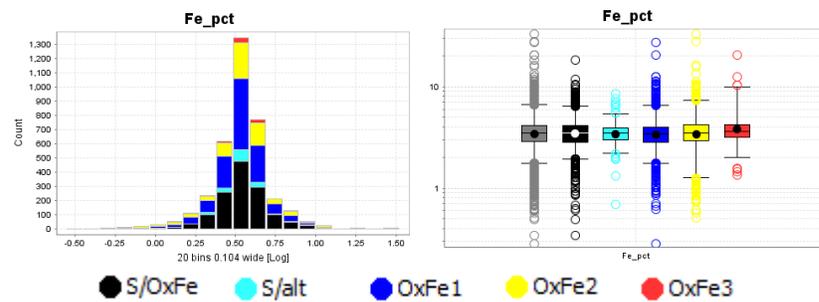
Calcita (Cc) - Pórfido andesítico (P.A)



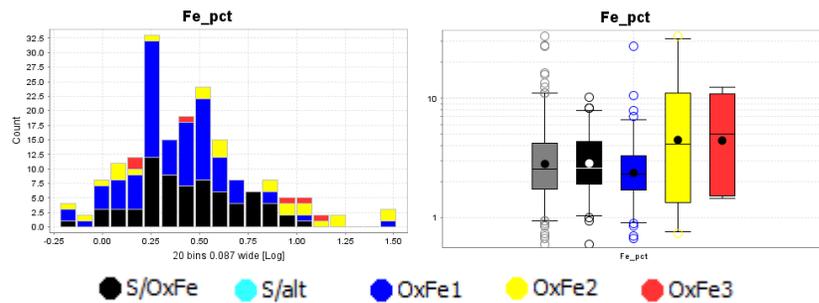
Calcita (Cc) - Esquisto/metamórfico (Esq/Met)



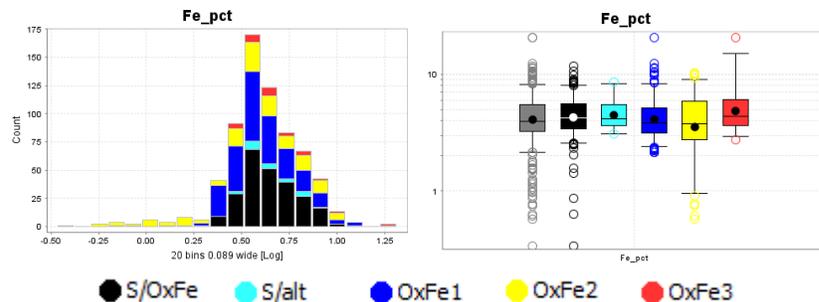
Oxi-hidróxidos de hierro (OxFe) - Todas las muestras (3603 datos)



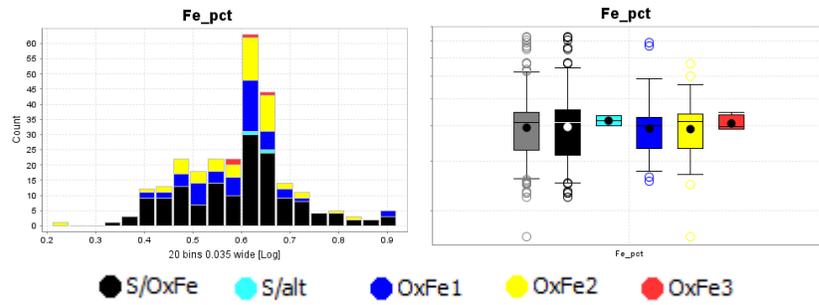
Oxi-hidróxidos de hierro (OxFe) - Brechas hidrotermales (B.H.Qz y B.H.Bt)



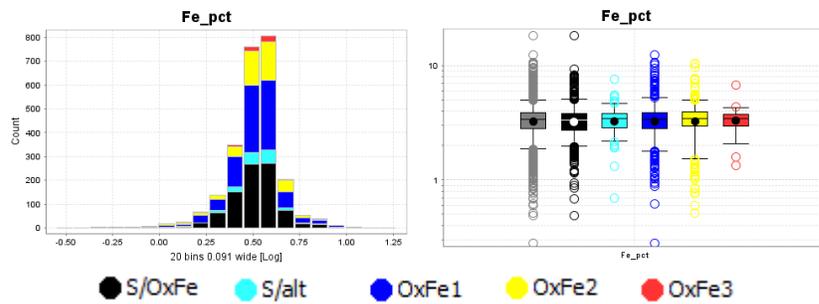
Oxi-hidróxidos de hierro (OxFe) - Diorita/microdiorita (D/M)



Oxi-hidróxidos de hierro (OxFe) - Pórfido andesítico (P.A)

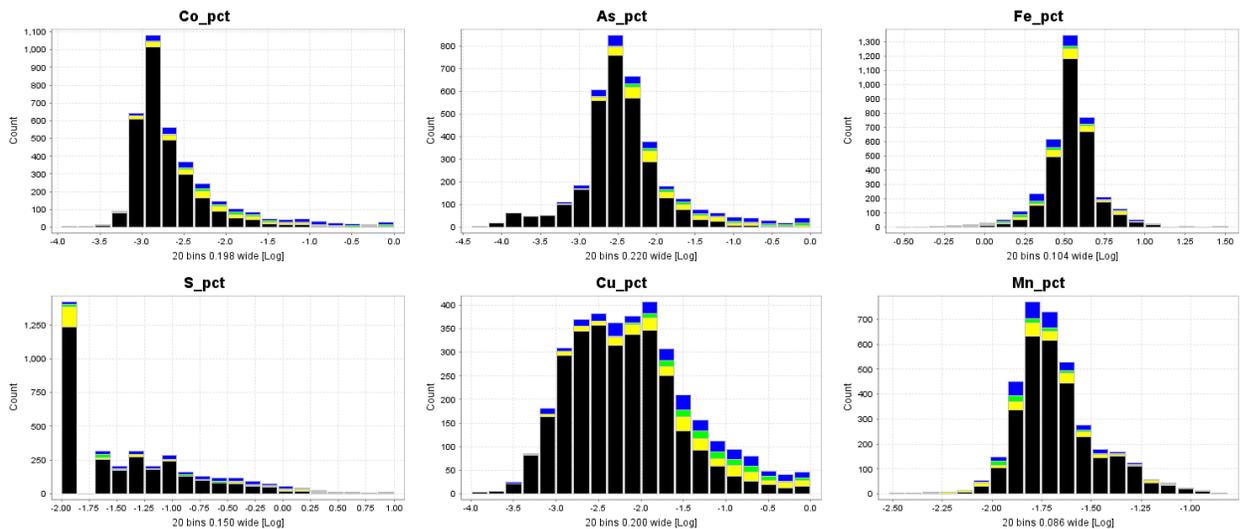


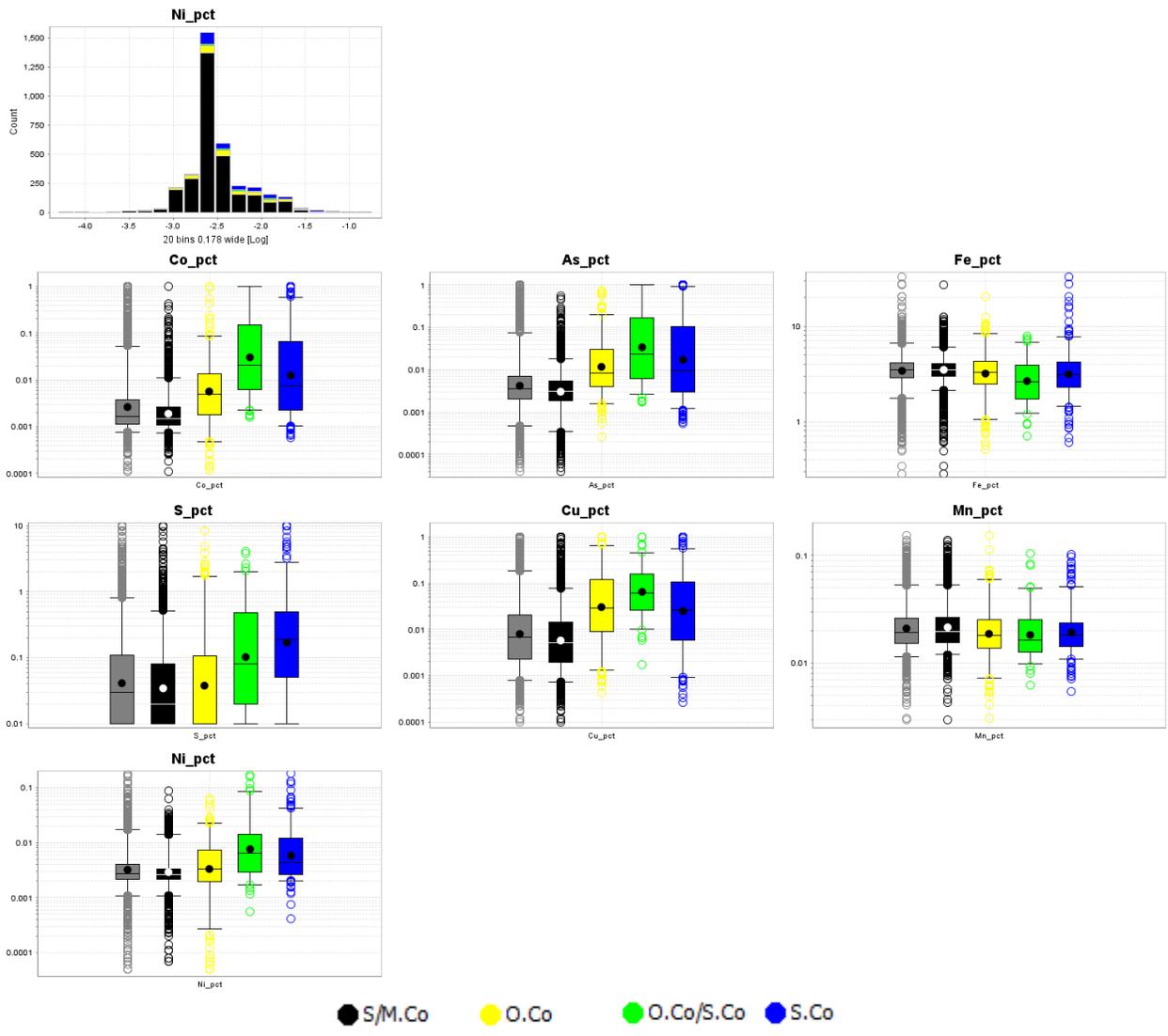
Oxi-hidróxidos de hierro (OxFe) - Esquisto/metamórfico (Esq/Met)



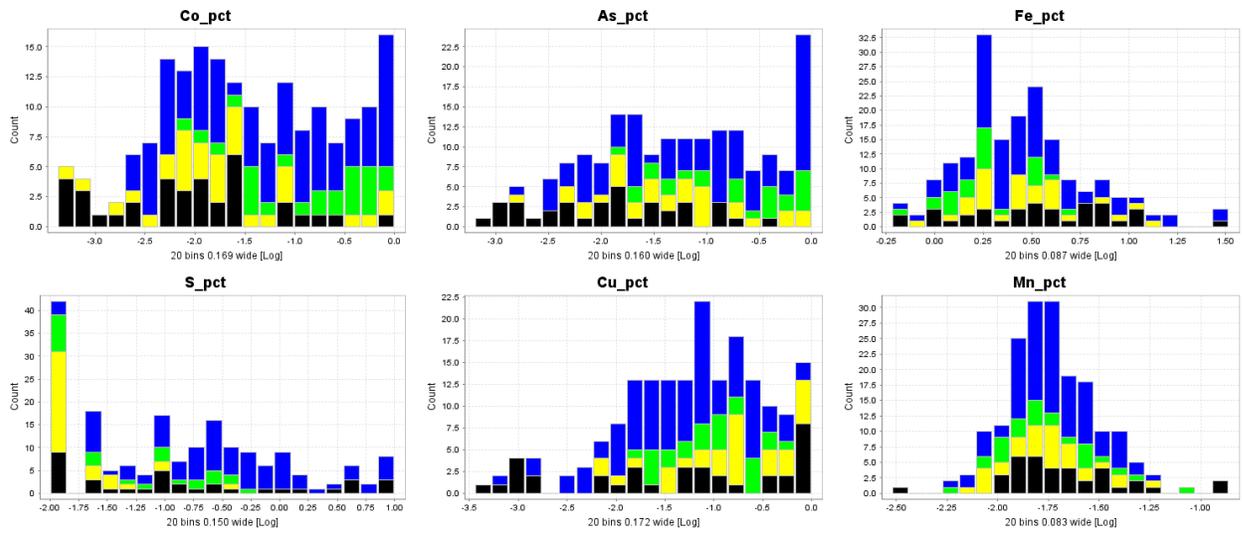
Histogramas y boxplots por litología con los registros del logueo de sondajes de la mineralización de interés (sulfuros y oxidados) en los elementos de sus estequiometrias teóricas

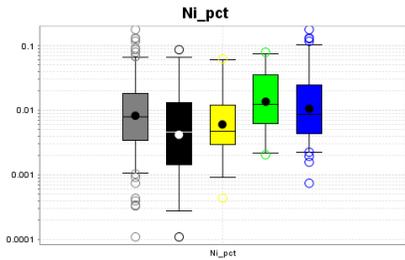
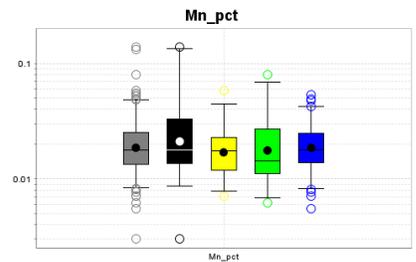
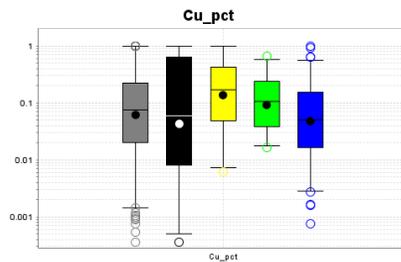
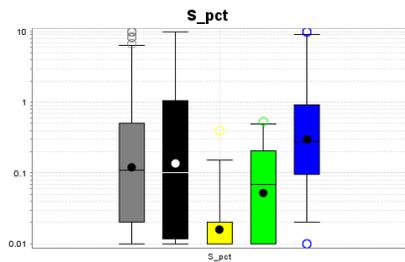
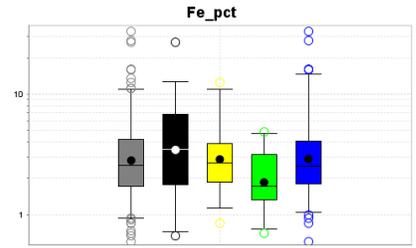
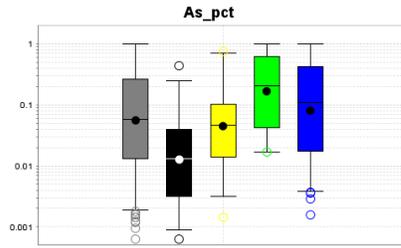
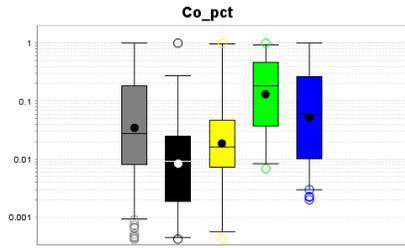
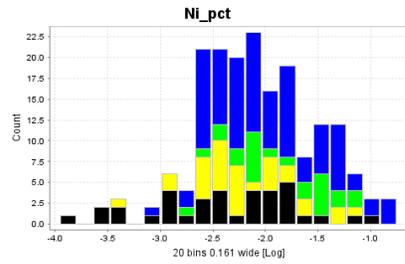
Sulfuros y oxidados de cobalto (S.Co y O.Co) - Todas las muestras (3603 datos)





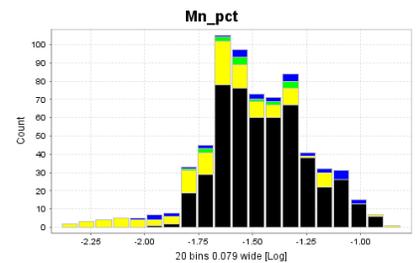
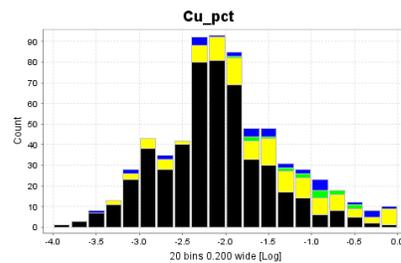
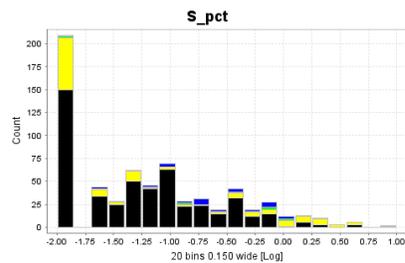
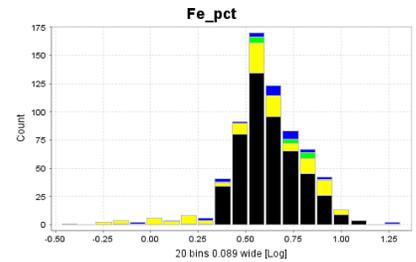
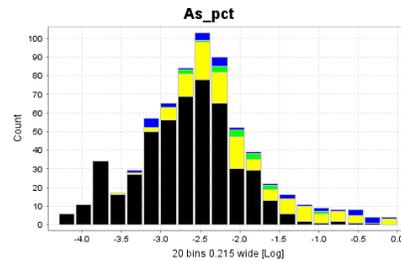
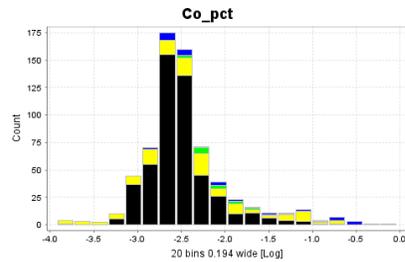
Sulfuros y oxidados de cobalto (S.Co y O.Co) - Brechas hidrotermales (B.H.Qz y B.H.Bt)

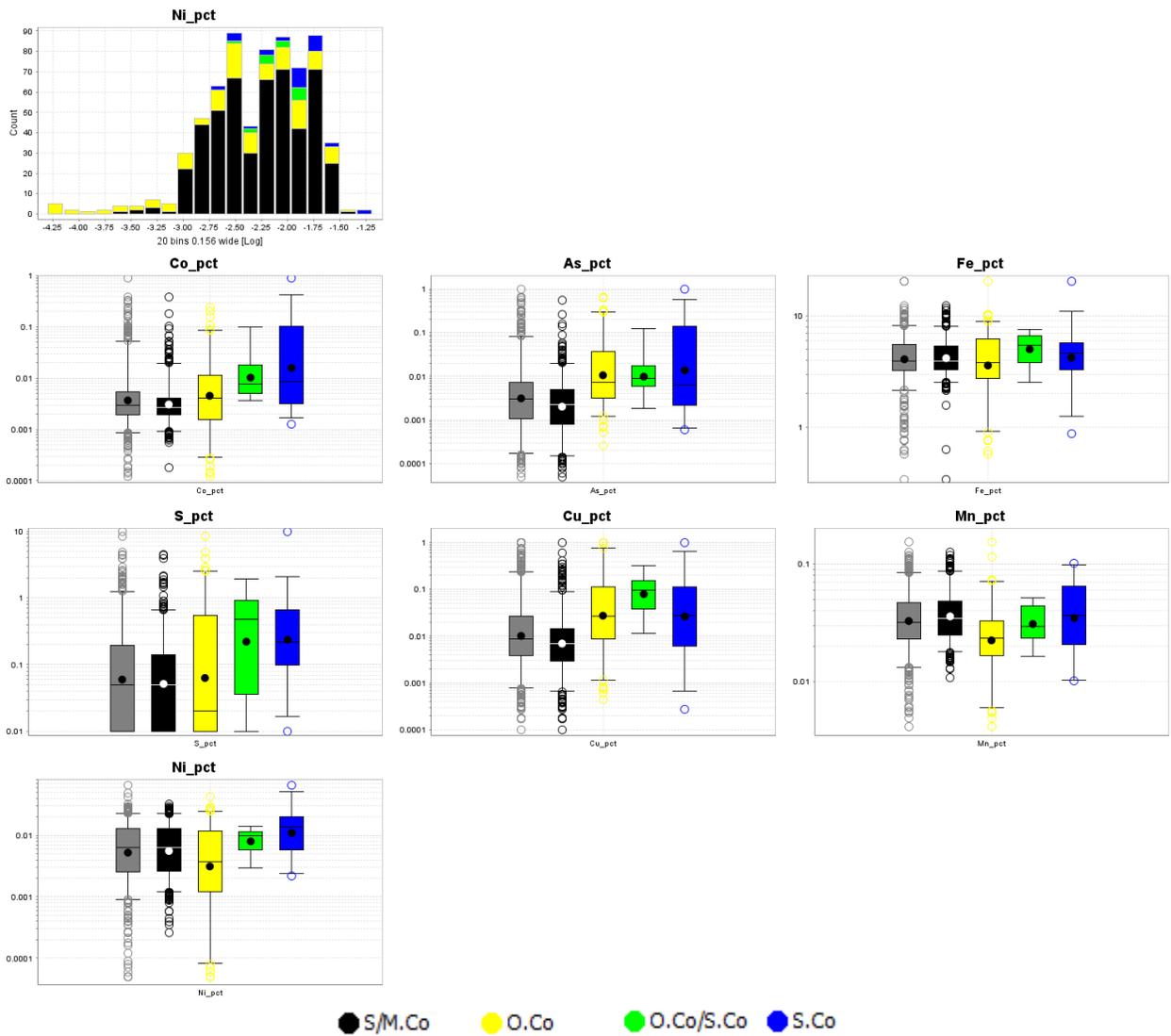




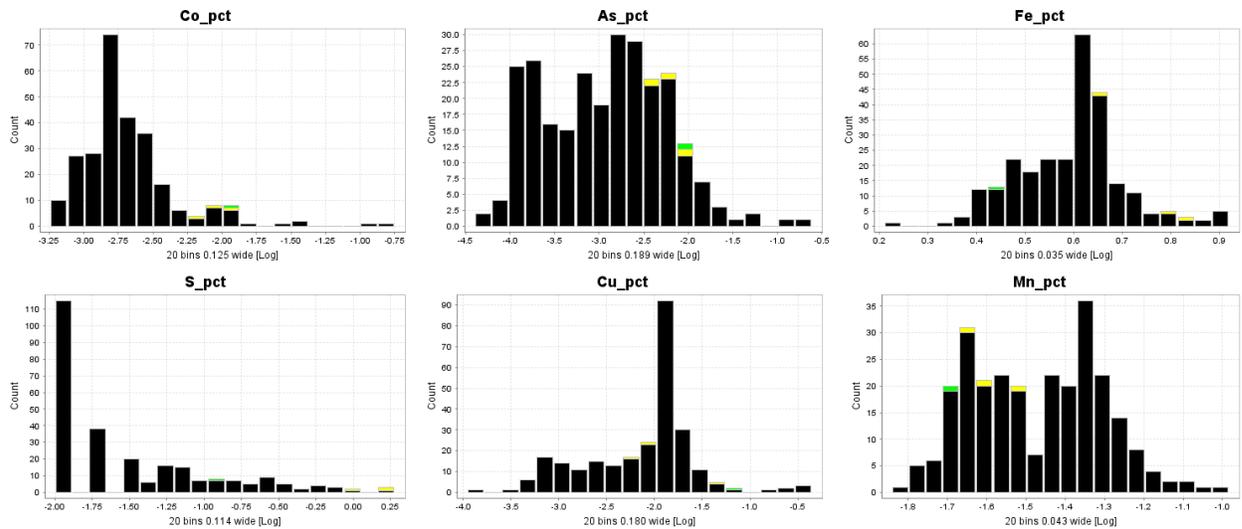
● S/M.Co ● O.Co ● O.Co/S.Co ● S.Co

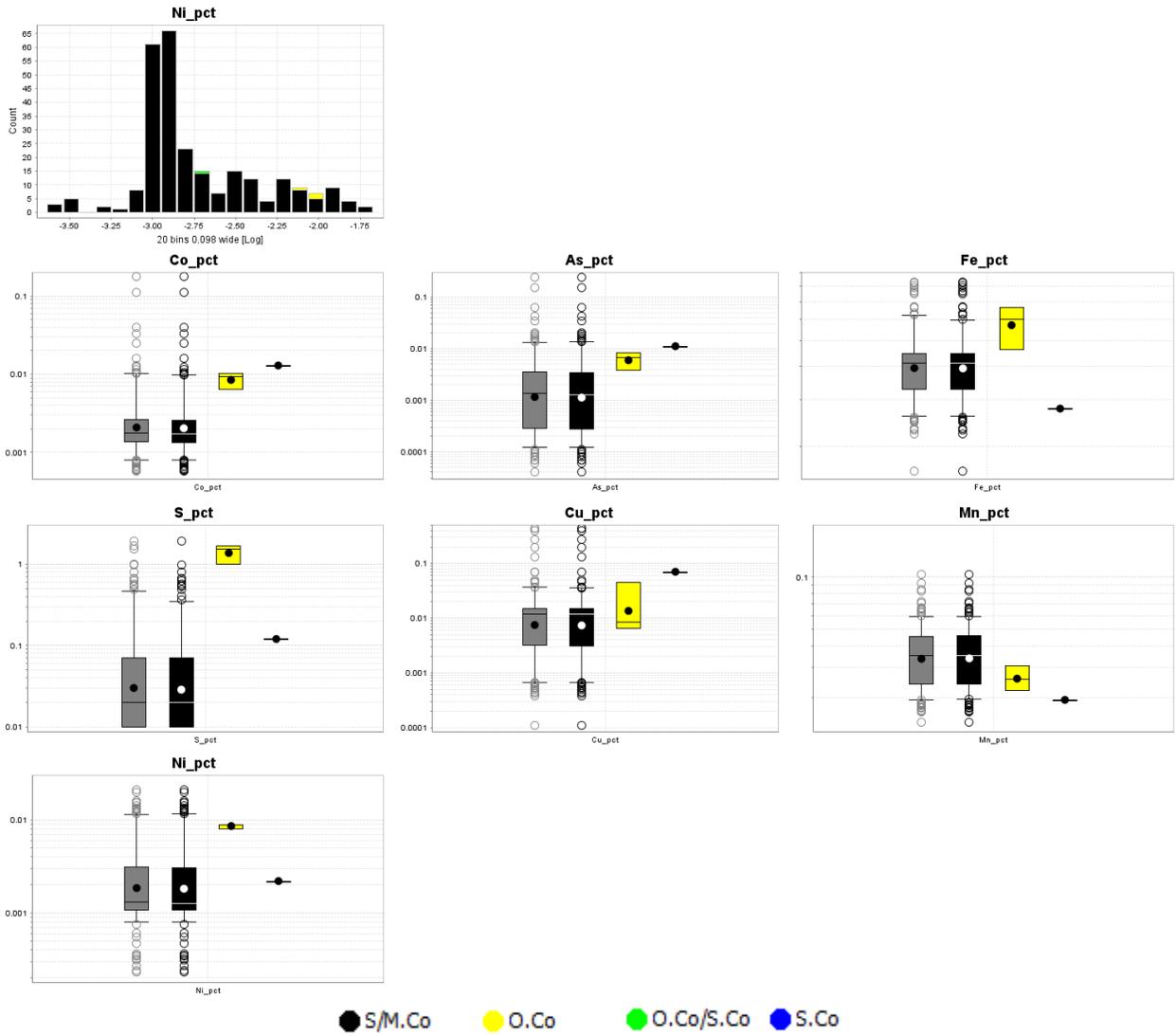
Sulfuros y oxidados de cobalto (S.Co y O.Co) - Diorita/microdiorita (D/M)



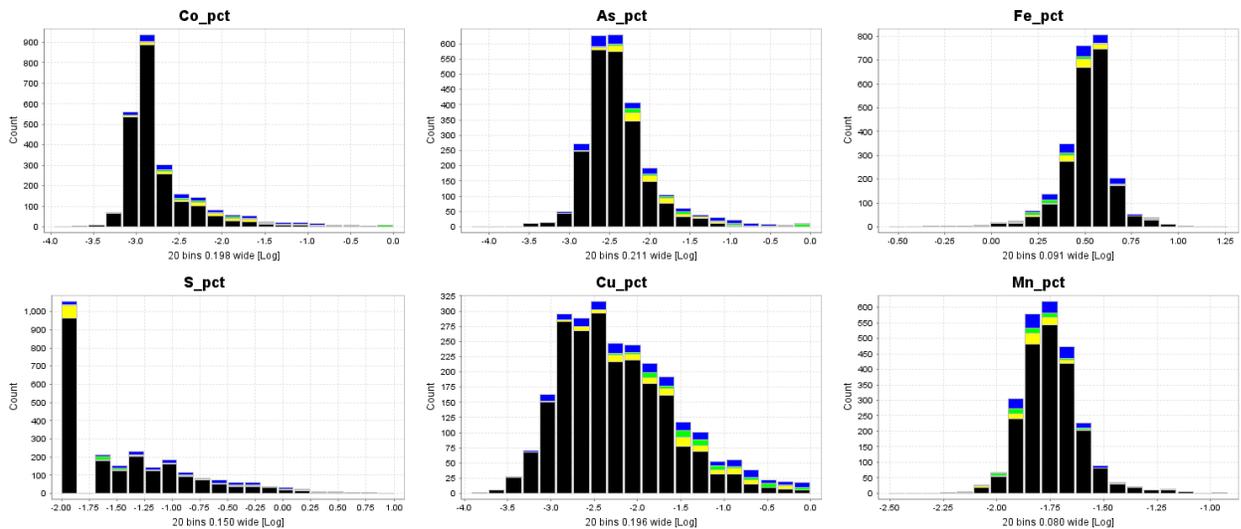


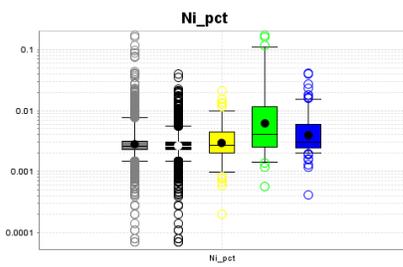
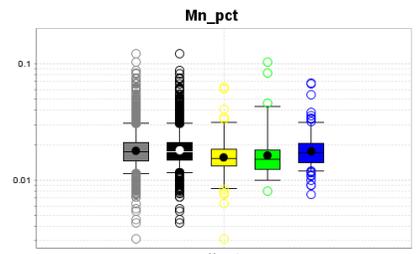
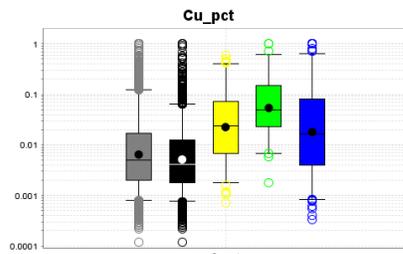
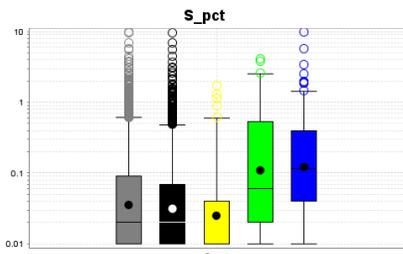
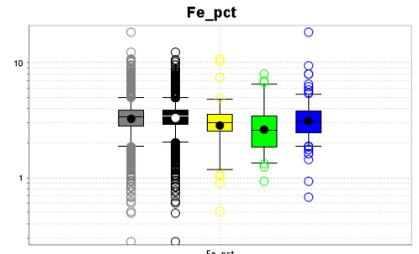
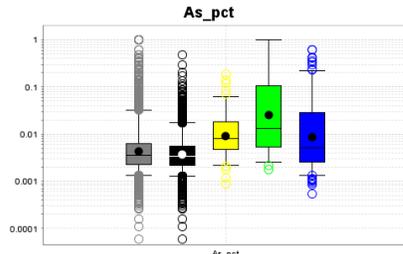
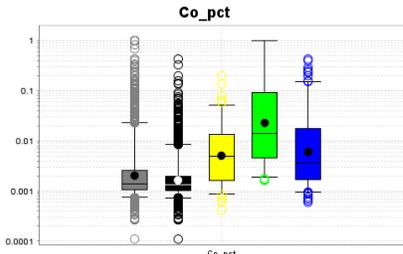
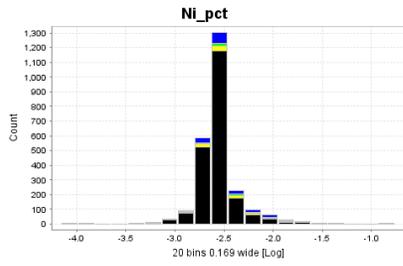
Sulfuros y oxidados de cobalto (S.Co y O.Co) - Pórfido andesítico (P.A)





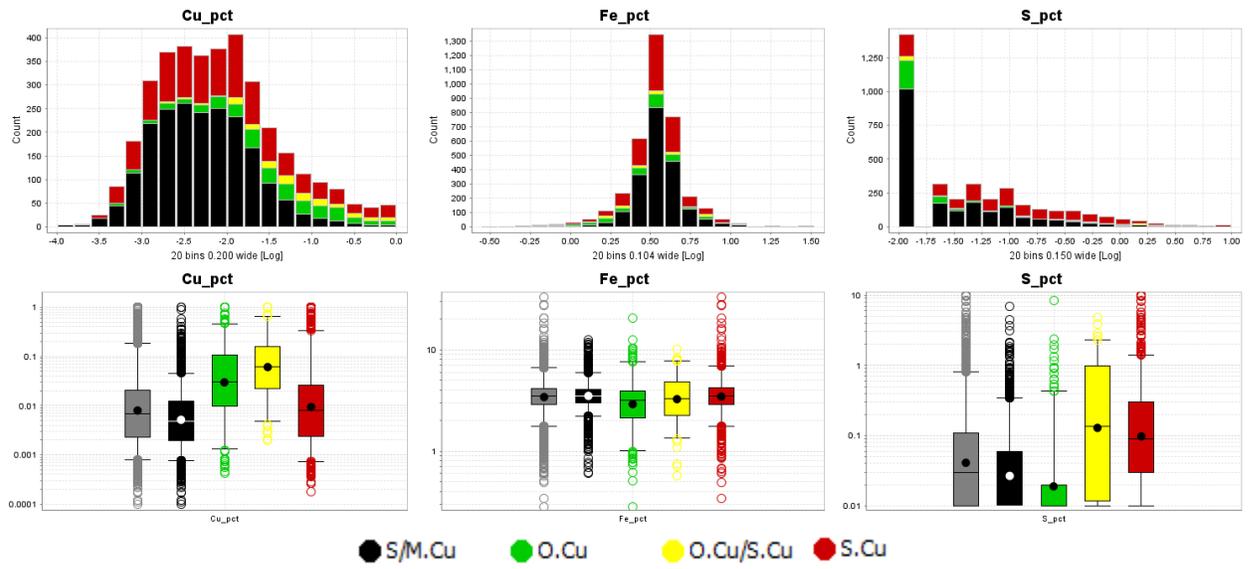
Sulfuros y oxidados de cobalto (S.Co y O.Co) - Esquisto/metamórfico (Esq/Met)



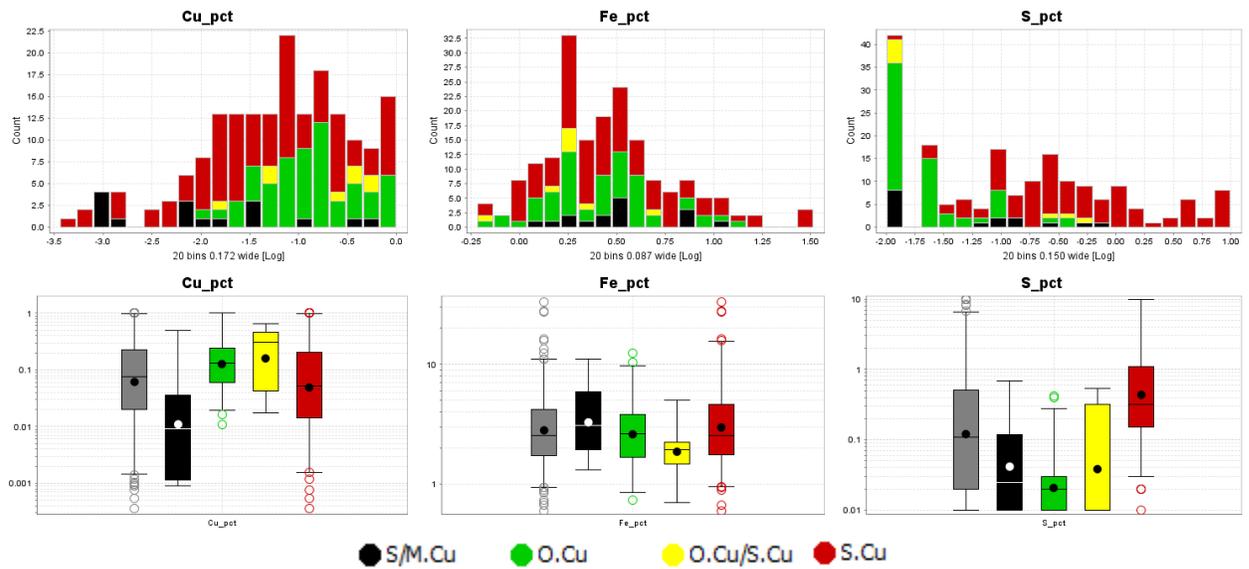


● S/M.Co
 ● O.Co
 ● O.Co/S.Co
 ● S.Co

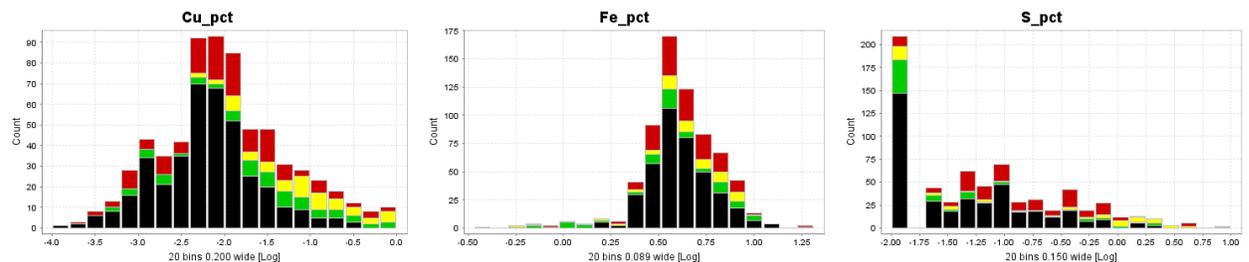
Sulfuros y oxidados de cobre (S.Cu y O.Cu) - Todas las muestras (3603 datos)

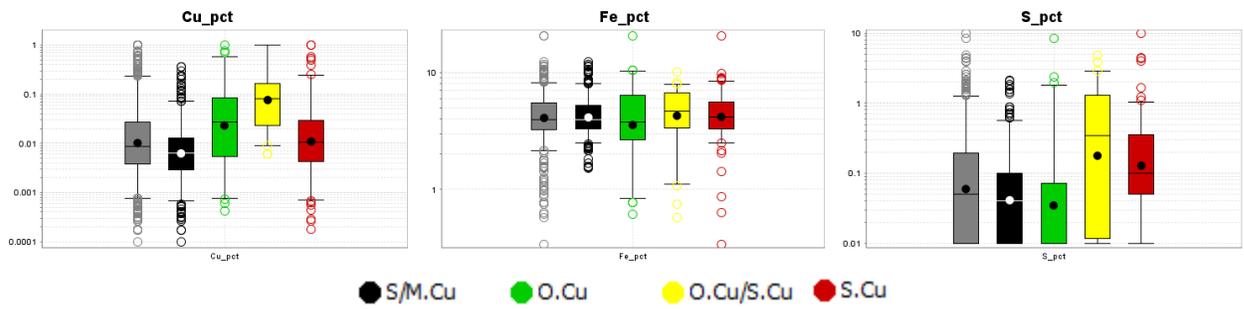


Sulfuros y oxidados de cobre (S.Cu y O.Cu) - Brechas hidrotermales (B.H.Qz y B.H.Bt)

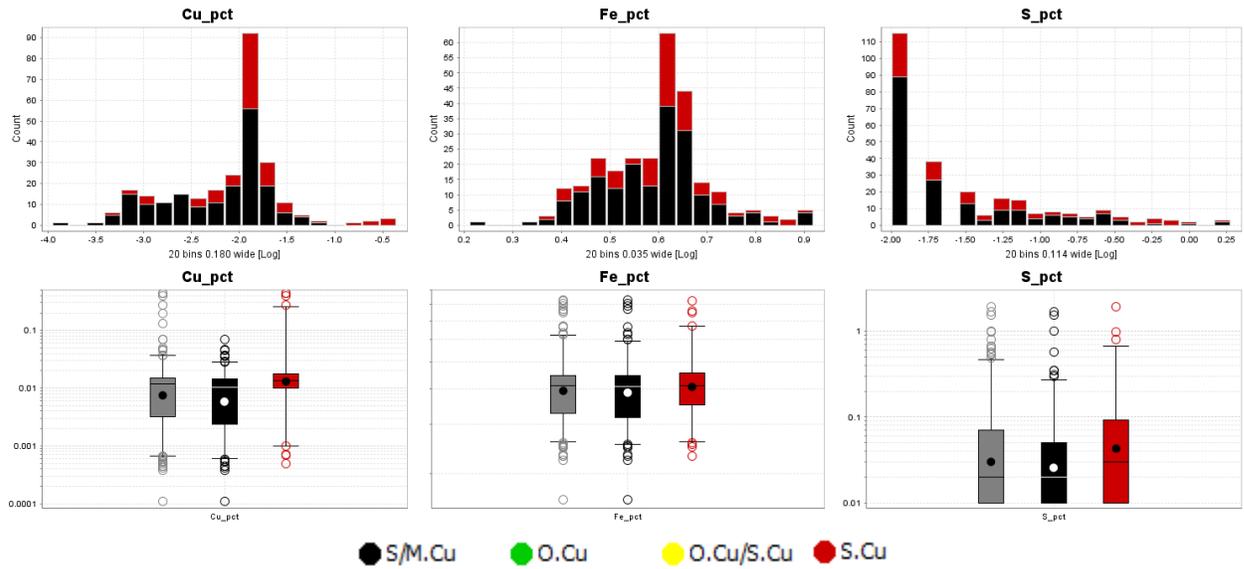


Sulfuros y oxidados de cobre (S.Cu y O.Cu) - Diorita/microdiorita (D/M)

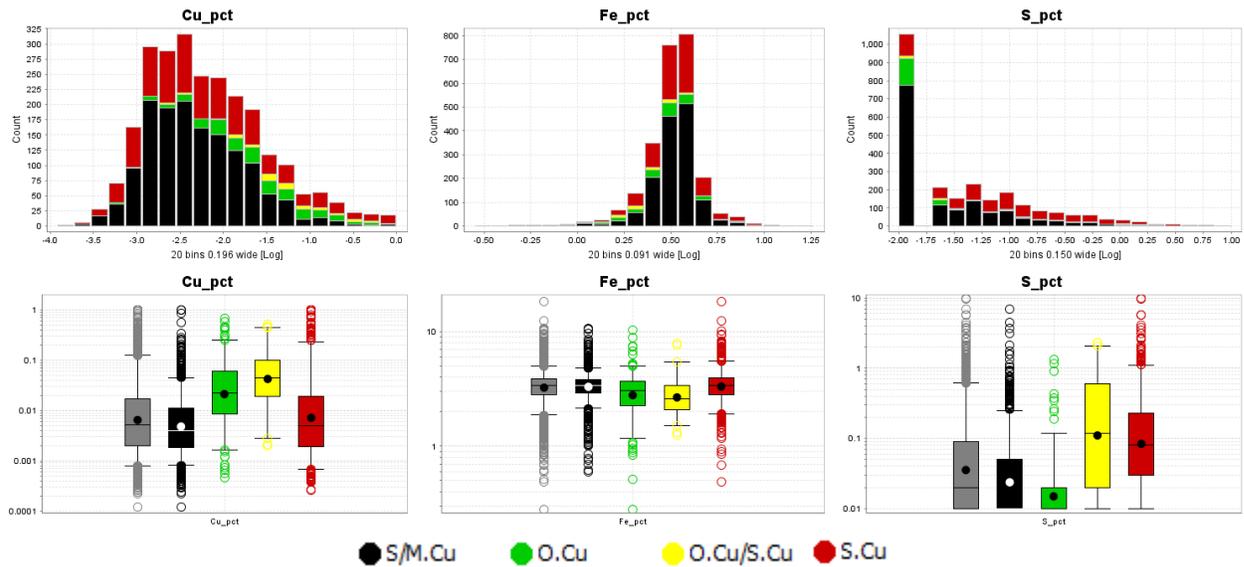




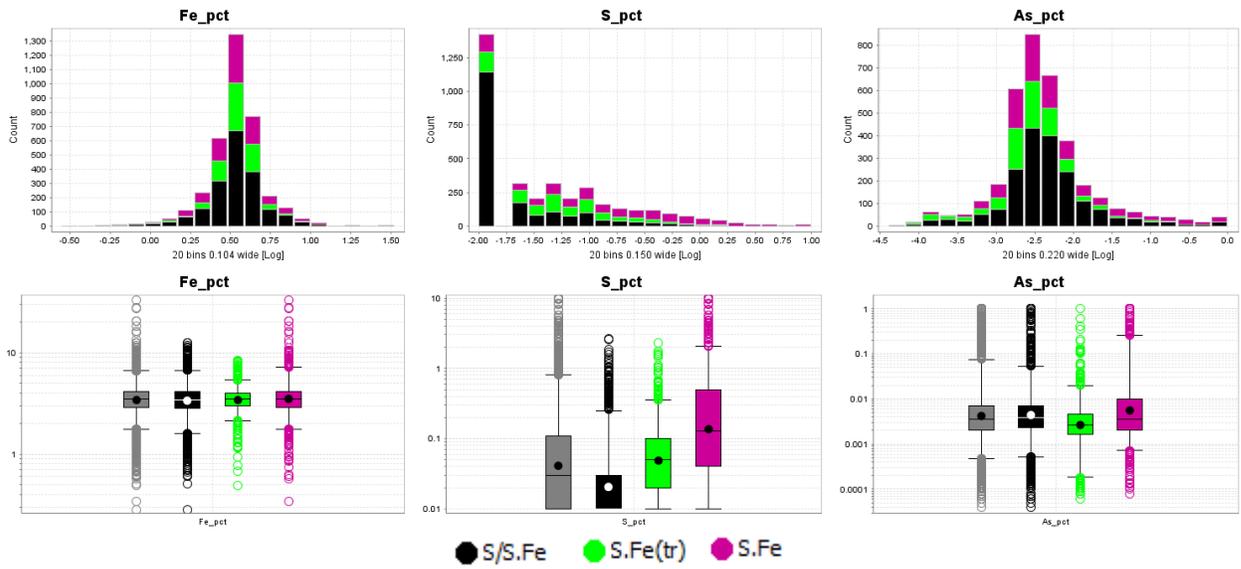
Sulfuros y oxidados de cobre (S.Cu y O.Cu) - Pórfido andesítico (P.A)



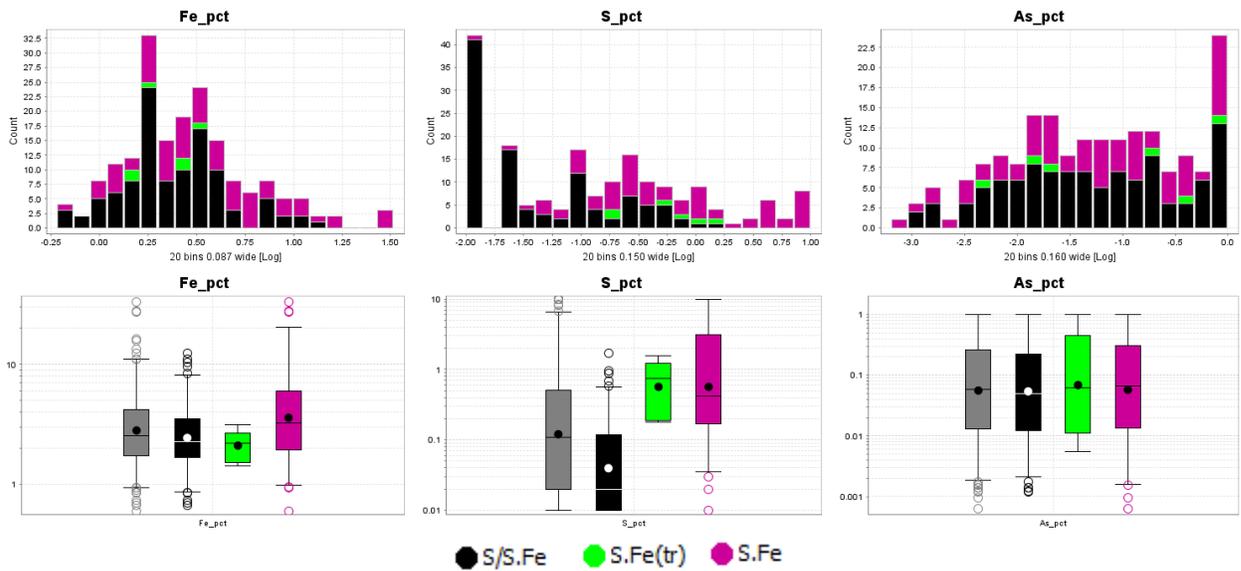
Sulfuros y oxidados de cobre (S.Cu y O.Cu) - Esquisto/metamórfico (Esq/Met)



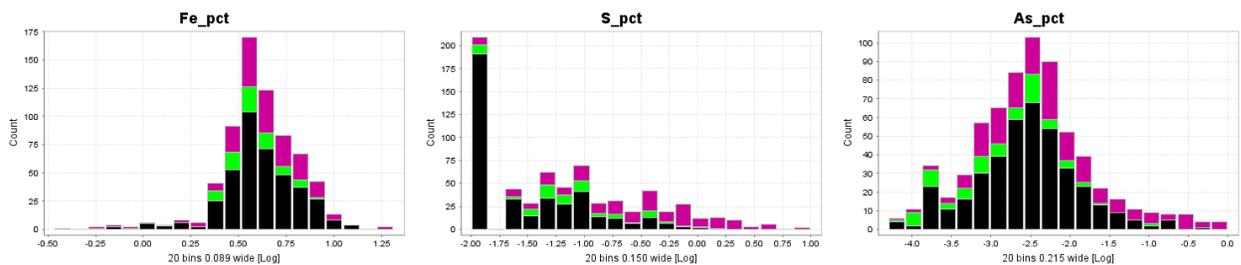
Sulfuros de hierro (S.Fe) - Todas las muestras (3603 datos)

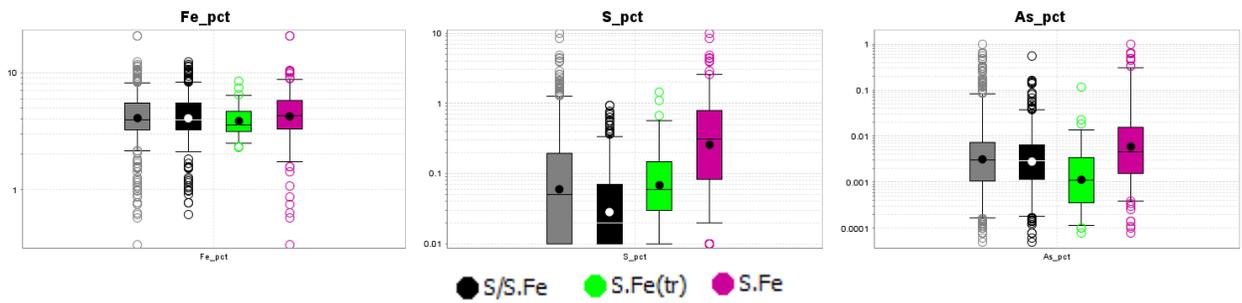


Sulfuros de hierro (S.Fe) - Brechas hidrotermales (B.H.Qz y B.H.Bt)

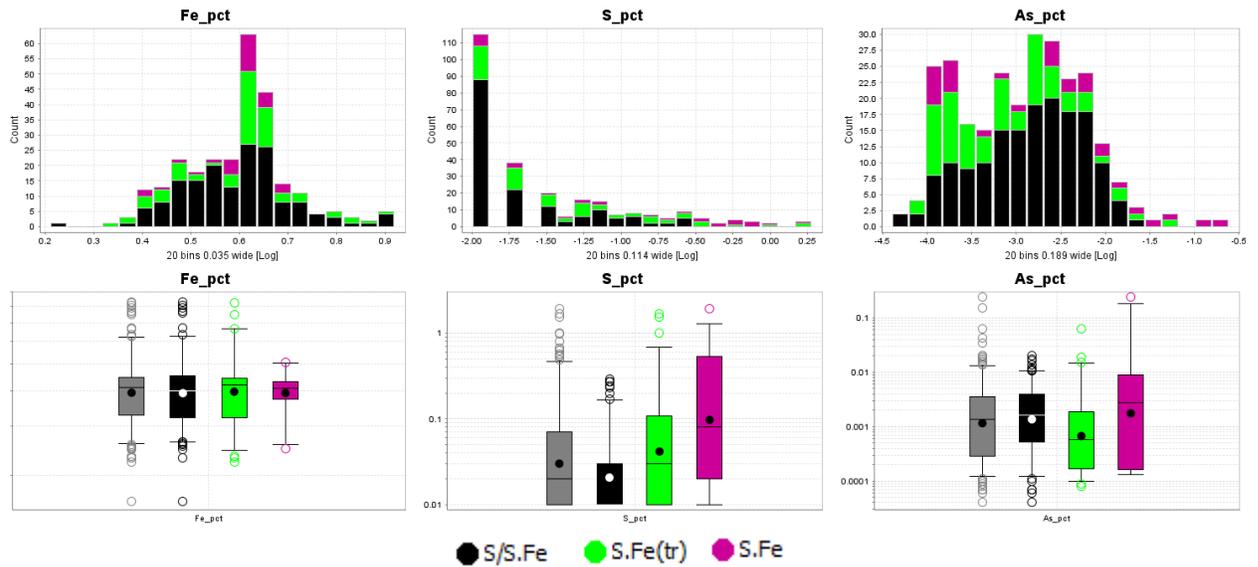


Sulfuros de hierro (S.Fe) - Diorita/microdiorita (D/M)

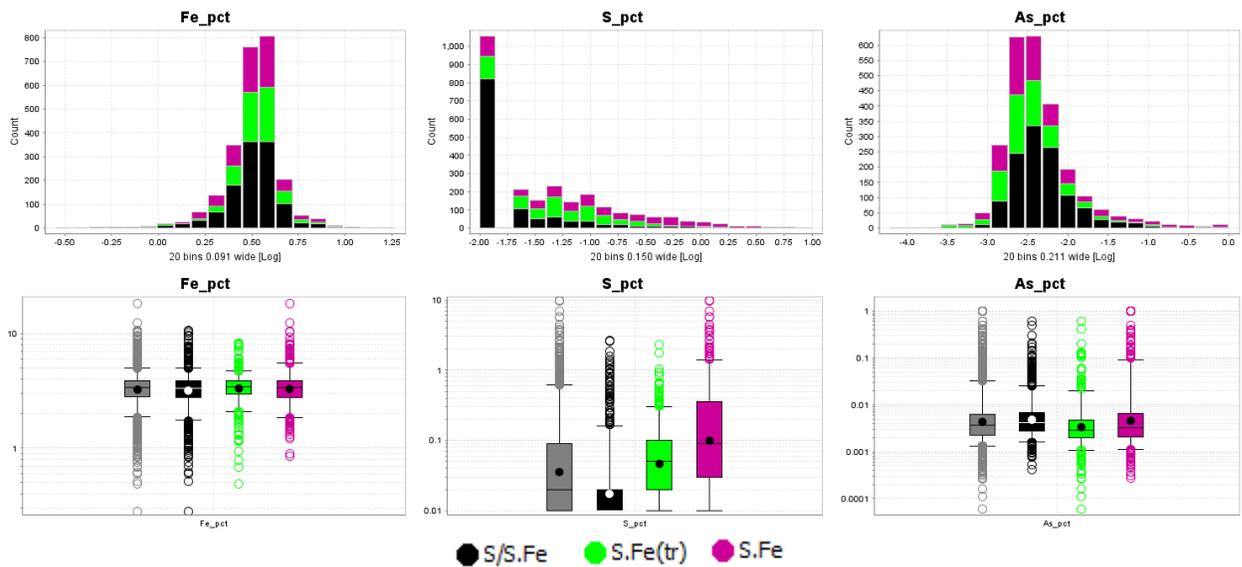




Sulfuros de hierro (S.Fe) - Pórfido andesítico (P.A)



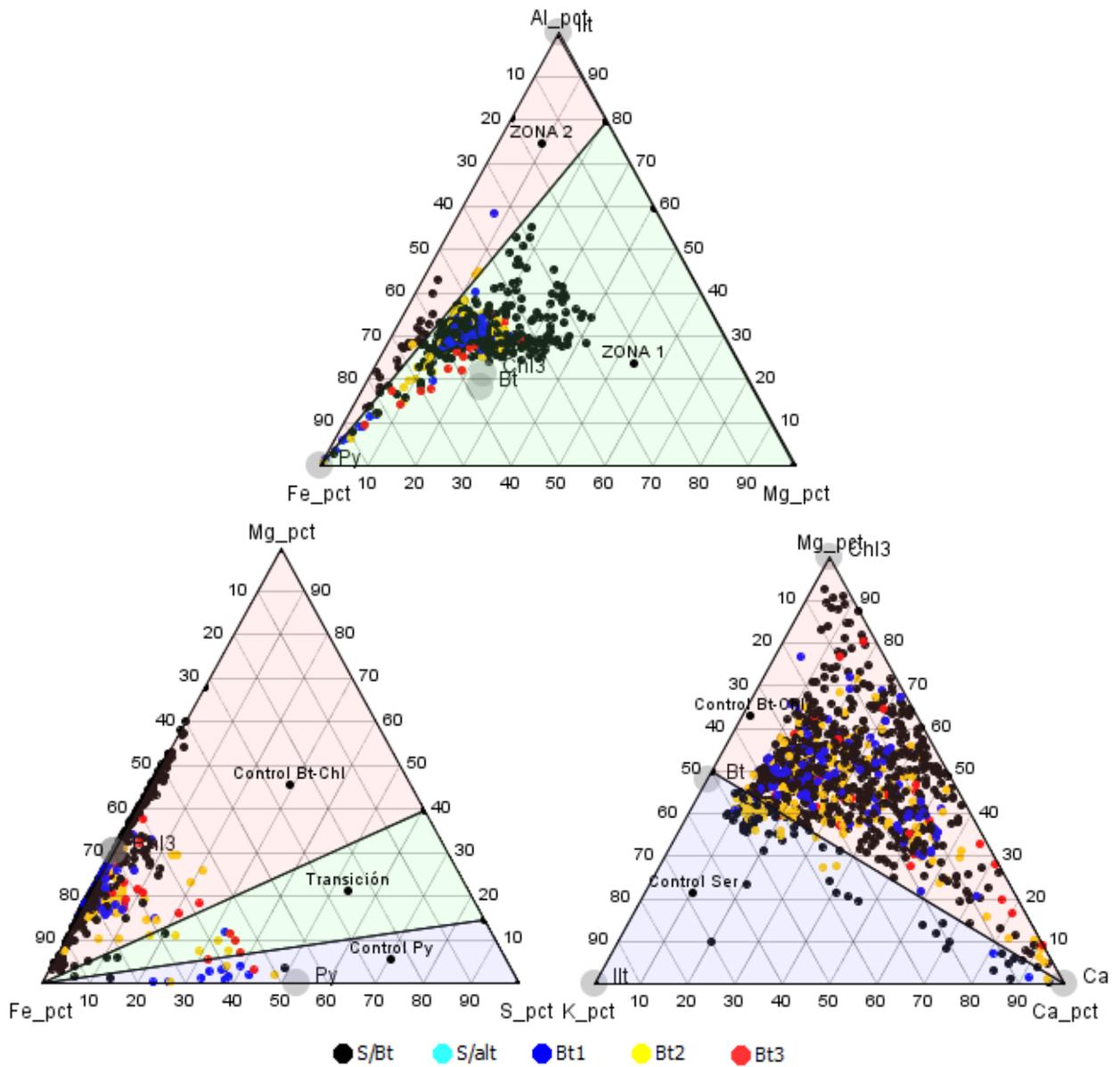
Sulfuros de hierro (S.Fe) - Esquisto/metamórfico (Esq/Met)



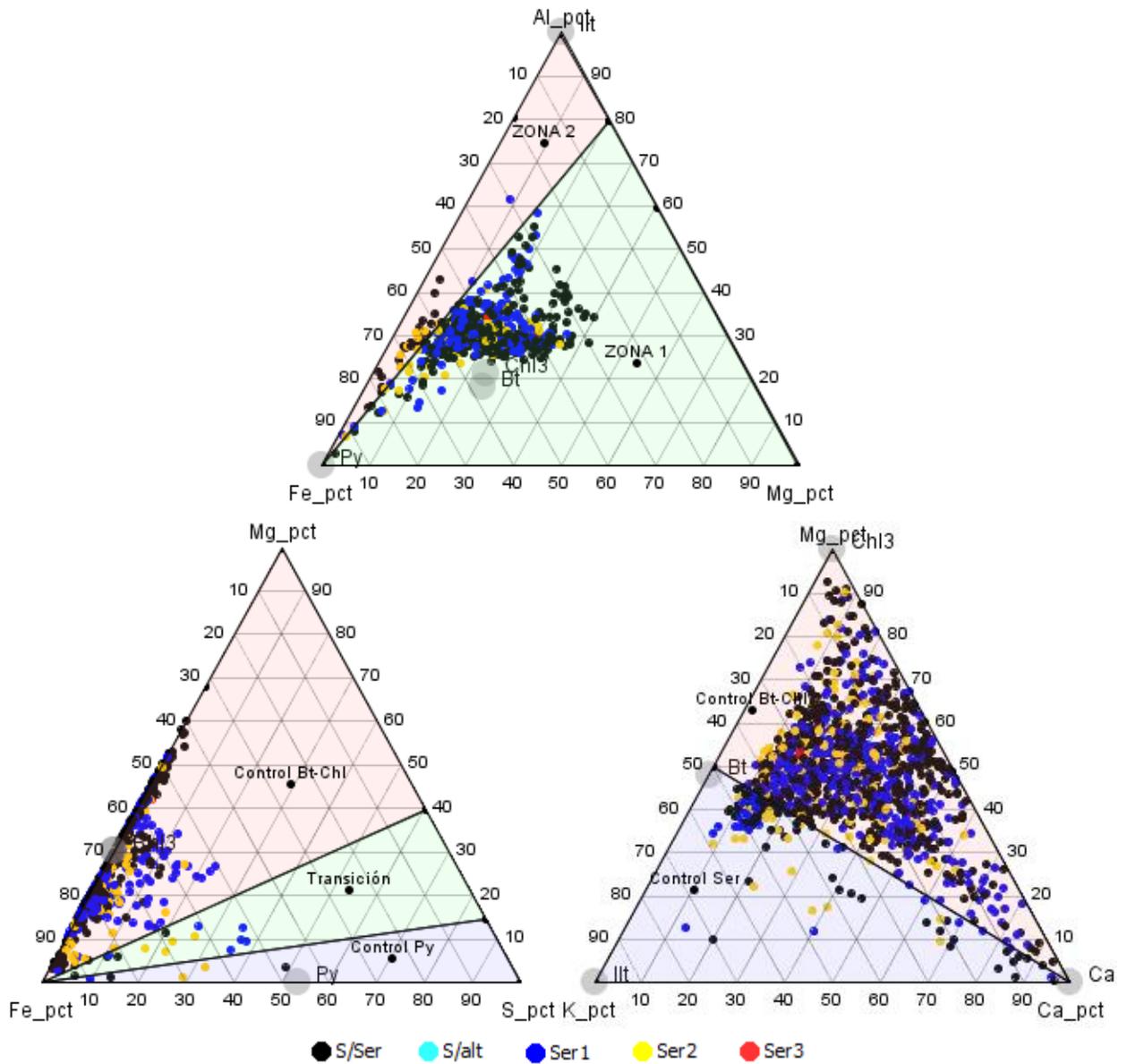
Anexo D

Diagramas ternarios de Townley et al. (2012) y Cárdenas (2015) para la clasificación de las muestras

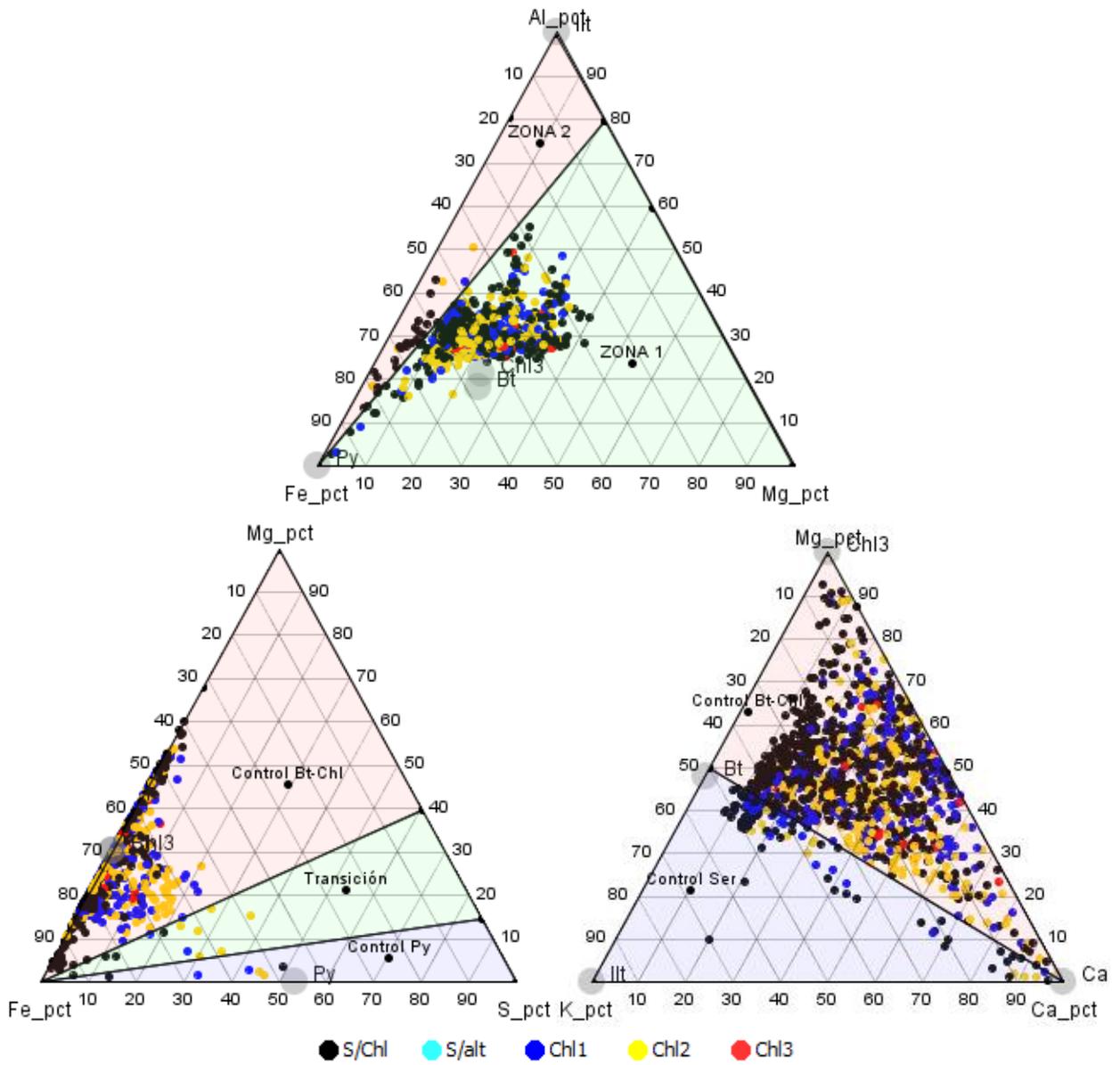
Datos con atributo color para biotita (sin sericita y clorita)



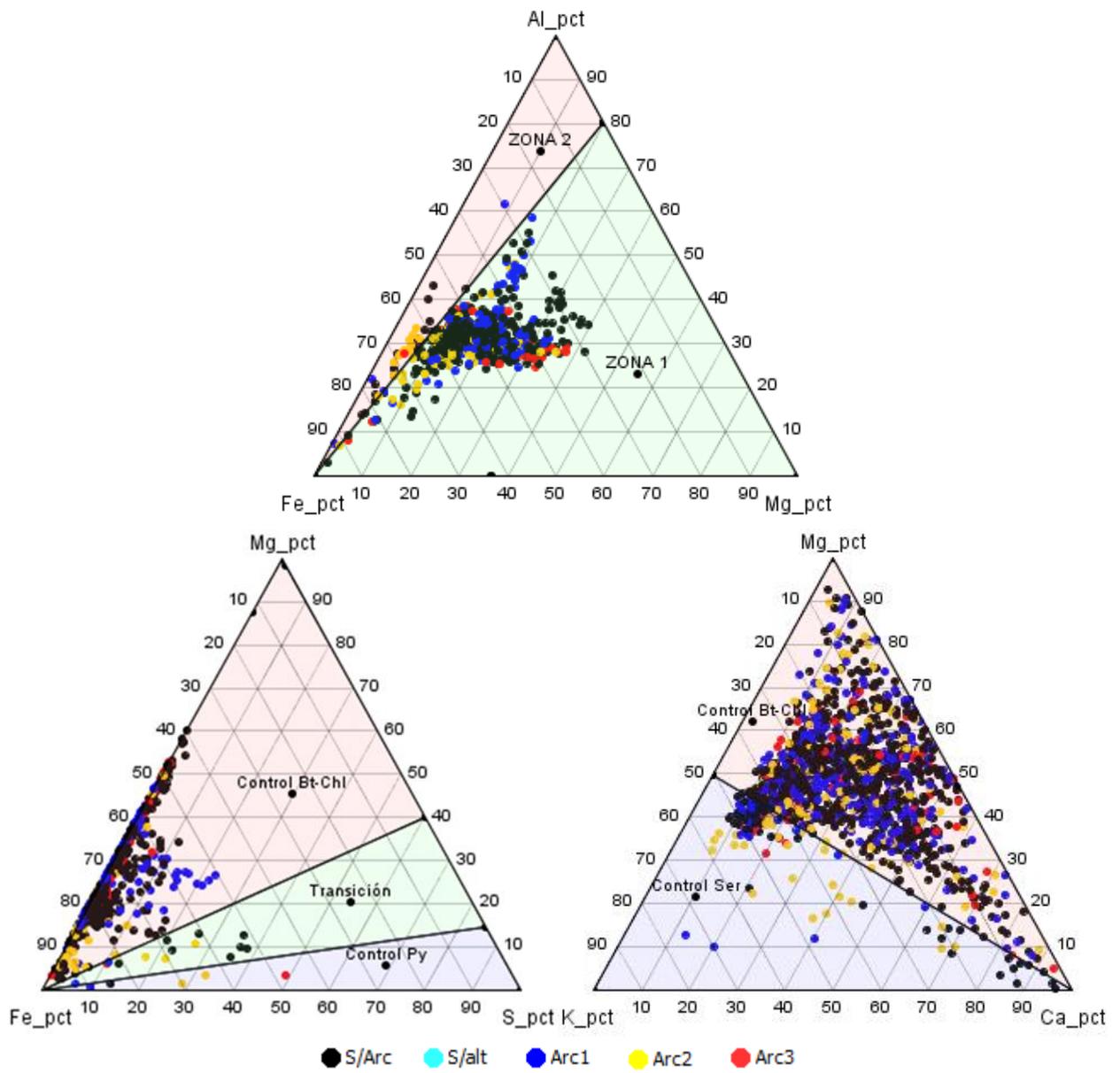
Datos con atributo color para sericita (sin biotita y clorita)



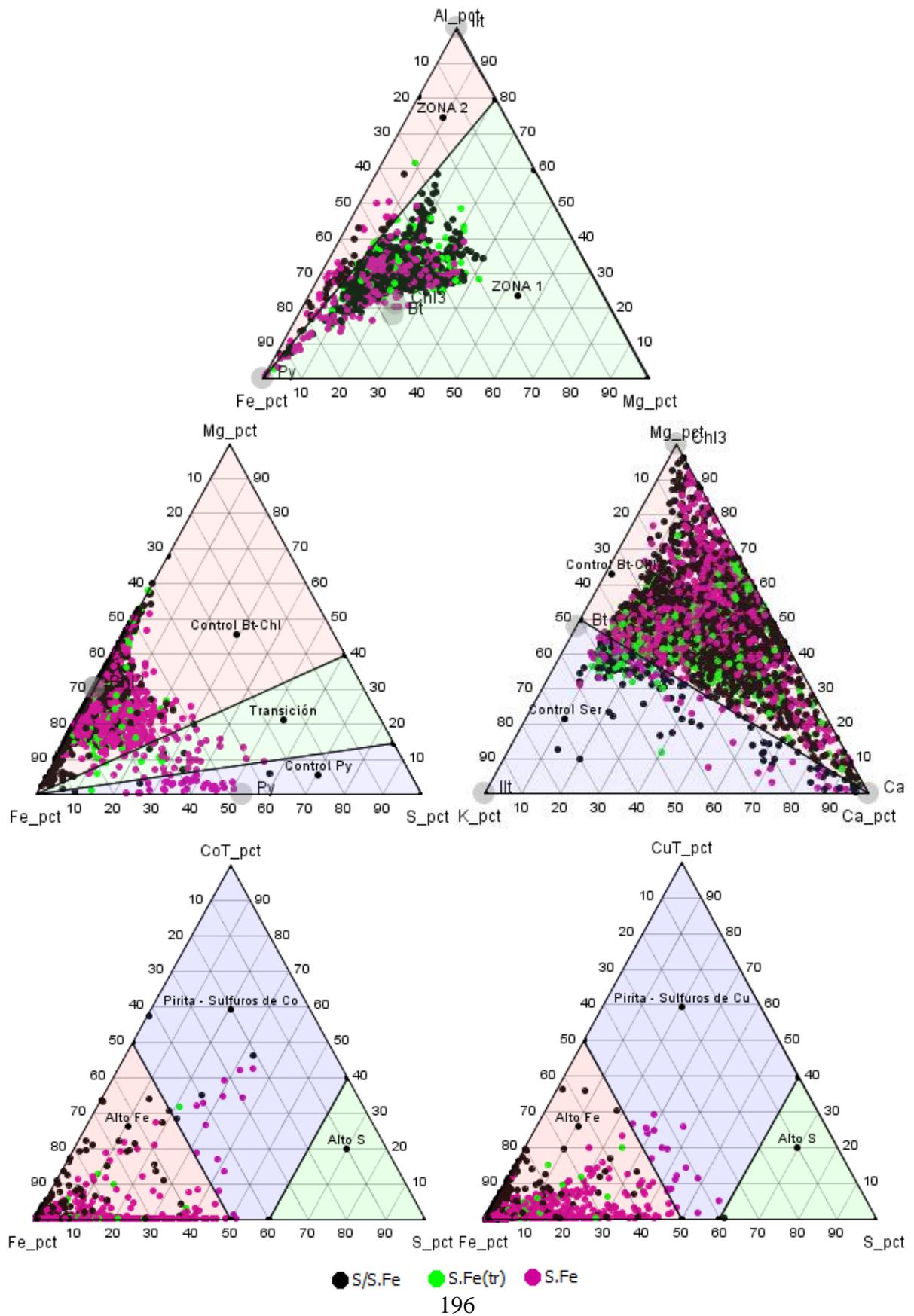
Datos con atributo color para clorita (sin sericita y biotita)



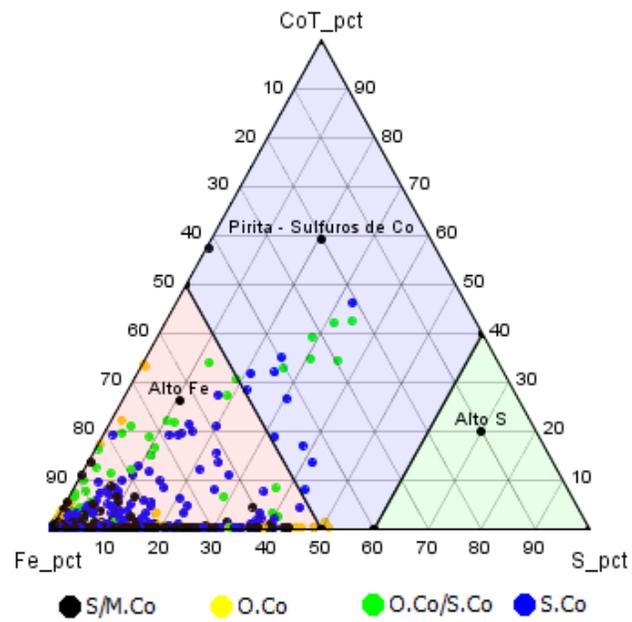
Datos con atributo color para arcillas (sin biotita y clorita)



Datos con atributo color para sulfuros de hierro (S.Fe)



Datos con atributo color para sulfuros y oxidados de cobalto (S.Co y O.Co)



Datos con atributo color para sulfuros y oxidados de cobre (S.Cu y O.Cu)

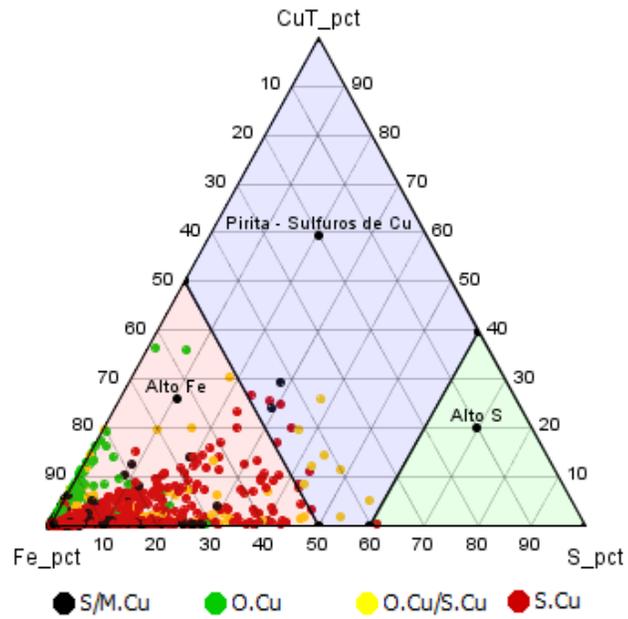


Diagrama ternario Al-Mg-S propuesto para la clasificación de las muestras

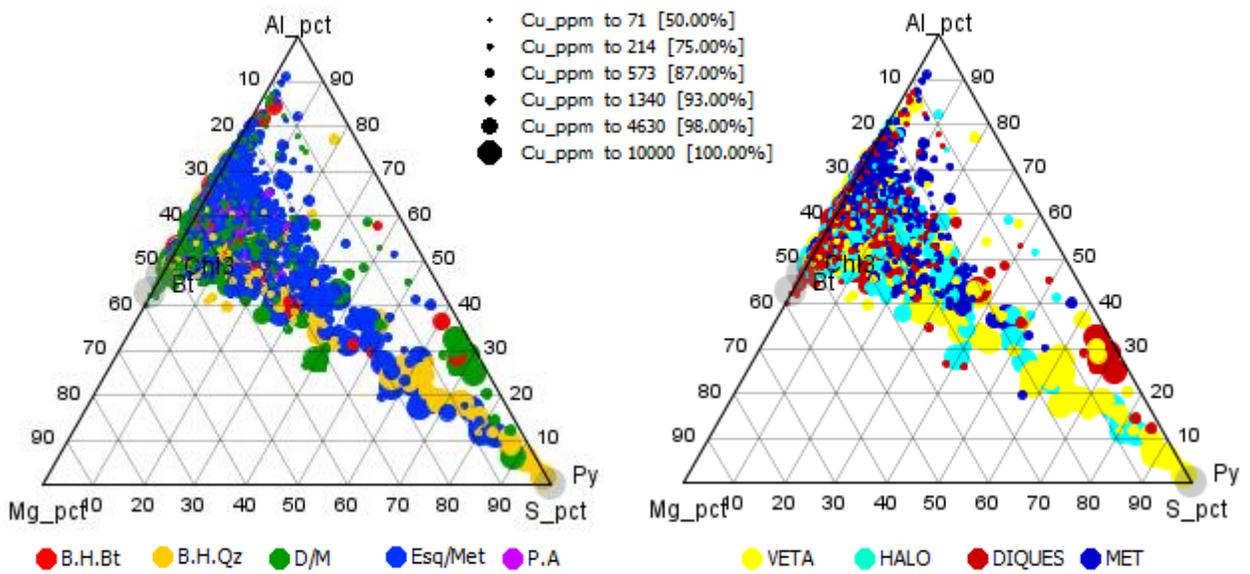
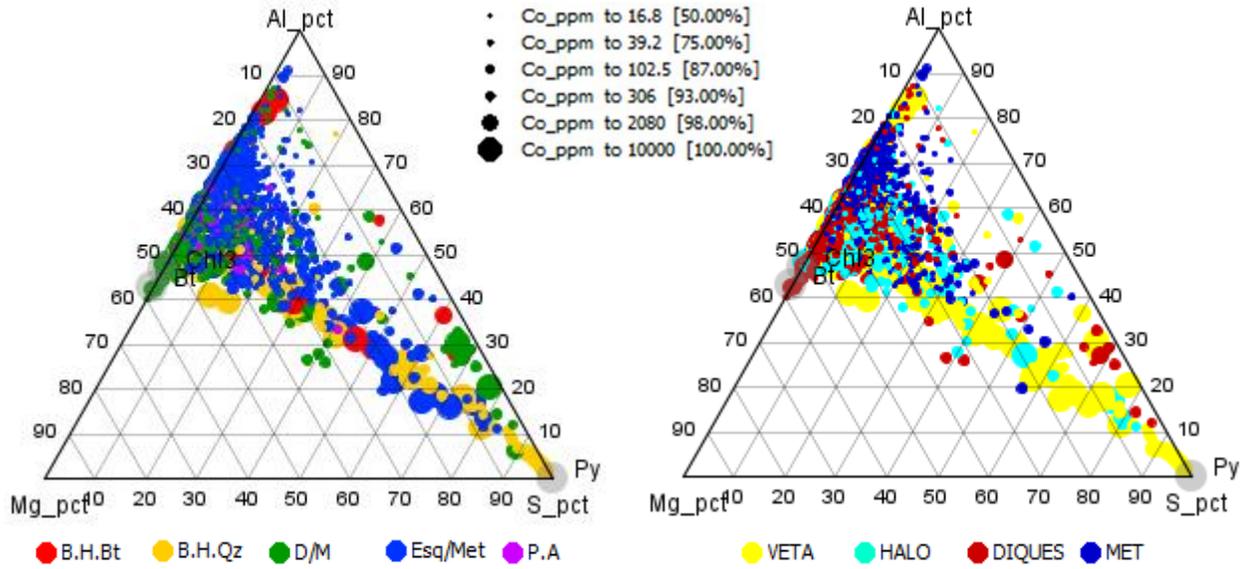


Diagrama ternario Al-K-S propuesto para la clasificación de las muestras

