



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

**DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA DE ALTERACIONES  
HIDROTERMALES EN PÓRFIDO CUPRÍFERO ESCONDIDA**

**TESIS PARA OPTAR A MAGÍSTER EN CIENCIAS, MENCIÓN GEOLOGÍA**

**MEMORÍA PARA OPTAR A TÍTULO DE GEÓLOGO**

**EFRAÍN EDUARDO JUVENAL CÁRDENAS DEL RÍO**

**PROFESOR GUÍA:**

**BRIAN TOWNLEY CALLEJAS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

**JULIÁN ORTIZ CABRERA**

**KATJA DECKART**

**DUBER JOFRÉ PINTO**

**SANTIAGO DE CHILE**

**2015**

## RESUMEN

En la minería del cobre existen minerales de ganga que afectan la recuperación de la mena, disminuyendo la eficiencia del proceso extractivo, por lo que predecir la presencia de estos minerales es fundamental para formular una planificación minera que optimice la recuperación de la mena.

Con el objetivo de crear una herramienta que permita predecir la presencia de alteraciones hidrotermales a partir de datos geoquímicos, se caracteriza cada una de las zonas de alteración cruzando información de mapeo geológico, geoquímica y mineralogía Qemscan. Debido a que el método de disolución por agua regia fue utilizado en la obtención de la base de datos, se definen las zonas de alteración hidrotermal en función de la mineralogía que es capaz de disolver este ácido.

La metodología para la clasificación consta de la definición de centroides para cada alteración hidrotermal en un espacio definido por las concentraciones de elementos químicos, para luego calcular un grado de pertenencia a cada uno de las alteraciones predefinidas. De esta manera, el grupo de elementos que mejor discrimina entre alteraciones hidrotermales es Al-Mg-K-Ca-Na, logrando definir hasta 3 zonas de alteración en donde predominan algunos minerales como biotita, clorita y pirita.

La clasificación de los datos Qemscan indica que el modelo replica las razones de minerales que caracterizan las alteraciones, a pesar de que el mapeo no sea consistente con la mineralogía. Así, el modelo de clasificación tiene como aplicación directa ayudar al mapeo de alteraciones sugiriendo las clases e indicando los principales controles minerales. Además, es posible utilizar la correlación entre los porcentajes de clasificación y los grados de pertenencia para indicar si una muestra se encuentra mapeada correctamente según sus patrones geoquímicos.

El algoritmo utilizado puede ser implementado en trabajos futuros que incorporen el análisis de otras variables de interés con el objetivo de integrar la mayor cantidad de información valiosa para la planificación.

*A mis padres, Efraín y Verónica*

*A mi hermana, Valentina*

*A mi sobrino, Felipe*

*A Juve*

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer a todas las personas que me apoyaron e hicieron de este trabajo una experiencia única.

A mis profesores, Brian Townley y Julián Ortiz, por confiar en mí, por el apoyo y por guiarme en lo largo de este proceso. A los miembros de la comisión, Katja Deckart y Duber Jofre, por disposición a entregar su experiencia y conocimiento.

A CONICYT y AMTC, por las becas y viajes. A la gente de BHP y Escondida por su ayuda.

Al laboratorio ALGES, por la buena onda, la ayuda y la guía. A los compañeros de oficina Alges VIP: Pía, Roberto, Felipe, Yerko, Rodrigo y Sebastián.

A mis hermanos de Diogenes Magallanes, Gabriel, Daniel, Constanza, Rodrigo, Cristian y Emilio, por la fuerza, la paciencia y la inspiración.

A mis amigos por la buena onda, la vibra, las emociones, el apoyo.

A mi familia por estar presente, aguantarme, aconsejarme, y sobre todo, por creer en mí.



## Tabla de contenido

1	Introducción .....	1
1.1	Formulación del problema .....	1
1.2	Hipótesis de trabajo.....	2
1.3	Objetivos .....	3
1.4	Metodología de estudio .....	3
1.4.1	Caracterización geoquímica de zonas de alteraciones hidrotermales .....	3
1.4.2	Caracterización mineralógica de las alteraciones hidrotermales .....	4
1.4.3	Correlación de geoquímica y mineralogía .....	4
1.4.4	Clasificación de muestras a partir de datos geoquímicos.....	4
1.5	Características relevantes del yacimiento Escondida .....	4
2	Marco geológico del yacimiento Escondida .....	7
2.1	Rocas estratificadas .....	8
2.1.1	Formación La Tabla (Carbonífero-Pérmico) .....	8
2.1.2	Formación Agua Dulce (Triásico Superior) .....	9
2.1.3	Formación El Profeta y Santa Ana (Jurásico-Cretácico).....	9
2.1.4	Formación Augusta Victoria (Paleoceno-Eoceno inferior) .....	10
2.2	Rocas intrusivas.....	10
2.2.1	Complejo Intrusivo Feldespático Escondida (CIFE).....	10
2.2.2	Pófido Riolítico.....	11
2.2.3	Stocks dioríticos y diques .....	11
2.3	Brechas .....	12
2.4	Gravas.....	12
2.5	Estructuras .....	12
2.6	Alteración hidrotermal y mineralización.....	15
2.6.1	Alteración potásica .....	16

2.6.2	Alteración propilítica .....	17
2.6.3	Silicificación .....	17
2.6.4	Vetillas Tempranas .....	18
2.6.5	Clorita-sericita±cuarzo .....	18
2.6.6	Cuarzo-sericita.....	19
2.6.7	Argílica avanzada .....	19
3	Marco Teórico.....	20
3.1	Alteración hidrotermal .....	20
3.2	Análisis ICP-AES.....	24
3.2.1	Disolución por Agua Regia .....	24
4	Análisis de Datos .....	30
4.1	Análisis geoquímicos y mapeo de sondajes.....	30
4.2	Definición del sistema .....	31
4.2.1	Porcentaje de disolución.....	39
4.2.2	Abundancia de minerales .....	43
4.3	Análisis univariable.....	48
4.4	Depuración de base de datos geoquímicos .....	51
4.5	Análisis de componentes principales .....	53
4.5.1	Elementos mayores .....	53
4.5.2	Elementos traza.....	57
4.6	Clasificación Previa.....	60
5	Mineralogía avanzada.....	66
5.1	Base de datos QEMSCAN .....	66
5.1.1	Depuración de base de datos Qemscan.....	66
5.1.2	Mineralogía Soluble .....	68
5.1.3	Mineralogía y geoquímica.....	72

6	Análisis preliminar de variables y definición de gráficos de interés .....	77
6.1	Selección de elementos .....	78
6.2	Alteraciones y mineralización por sondaje .....	81
6.3	Gráficos de control mineral .....	87
7	Modelo de clasificación de alteraciones hidrotermales .....	92
7.1	Definición de muestras por alteración hidrotermal .....	93
7.2	Selección de elementos según desempeño .....	96
7.3	Análisis de los clusters por alteración hidrotermal .....	106
7.4	Número óptimo de clusters .....	110
7.5	Grados de pertenencia de muestras con una alteración por tramo.....	115
7.6	Patrones mineralógicos.....	119
7.7	Reclasificación de alteración fílica indiferenciada .....	124
7.8	Grados de pertenencia de muestras con dos alteraciones por tramo .....	128
8	Discusión .....	131
8.1	Limitantes.....	139
9	Conclusiones y recomendaciones .....	141
10	Bibliografía.....	144
Anexo A.....		149
	Cantidad de datos por litología, alteración y minzone.....	149
	Histogramas por alteración para elementos mayores y traza .....	152
	Boxplots por alteración (log base 10).....	155
	Histogramas litologías 31 y 50 .....	157
	Histogramas de minerales según alteración .....	160
	Mineralogía vs elementos mayores.....	161
	Mineralogía vs abundancia relativa (tamaño indica mayor índice de abundancia) ...	168
	Diagramas de dispersión de elementos mayores .....	170

Scatter de elementos con menor traslape entre alteraciones .....	173
Matrices de confusión entre clasificación y mapeo de alteraciones considerando distintos grupos de elementos mayores.....	183
Matriz de correlación para elementos mayores [wt%].....	186
Matriz de correlación para elementos traza [ppm] .....	187
Matriz de correlación para elementos traza [ppm] (continuación).....	188
Componentes principales elementos mayores .....	189
Valores propios.....	189
Vectores propios.....	189
Componentes principales elementos traza .....	190
Valores propios.....	190
Vectores propios.....	191
Anexo B.....	194
Boxplots muestras con una alteración .....	194
Al-Mg-K-Ca-Na .....	194
Al-Mg-K-Ca .....	194
Al-Mg-K-Na .....	195
Boxplots muestras con dos alteraciones.....	195
Al-Mg-K-Ca-Na .....	195
Al-Mg-K-Ca .....	196
Al-Mg-K-Na .....	196
Plantas de muestras con una alteración .....	197
Al-Mg-K-Ca-Na .....	197
Al-Mg-K-Ca .....	198
Al-Mg-K-Na .....	199
Porcentaje de clasificación versus rangos de porcentaje de alteración por tramo ....	200

Al-Mg-K-Ca-Na .....	200
Al-Mg-K-Ca .....	200
Al-Mg-K-Na .....	200
Porcentaje de clasificación versus rangos de grados de pertenencia.....	201
Al-Mg-K-Ca-Na .....	201
Al-Mg-K-Ca .....	201
Al-Mg-K-Na .....	201
Anexo C.....	202
Tabla de Estadígrafos para elementos en ppm.....	202
Tabla de Estadígrafos para mineralogía QemScan .....	204

## Índice de Figuras

Figura 1.1. Franja metalogénica del Eoceno Superior – Oligoceno Inferior. Se esquematiza el Sistema de Fallas de Domeyko (Maksaev, 2001). .....	5
Figura 2.1. Mapa geológico del yacimiento Escondida (modificado de Richards et al., 2001). .....	8
Figura 2.2. Esquemas de las estructuras principales de Escondida. A) Geología y estructuras de Escondida. B) Geología y estructuras del distrito Escondida en general (Padilla et al., 2001). .....	14
Figura 2.3. Mapa de alteraciones hidrotermales del yacimiento Escondida (Modificado de Padilla et al., 2001). .....	15
Figura 3.1. Asociaciones de minerales de alteración común en sistemas hidrotermales (Corbett & Leach, 1997). .....	21
Figura 3.2. Modelo de zonación de alteración y mineralización para pórfidos cupríferos (Sillitoe, 2010). .....	22

Figura 3.3. Esquema generalizado de la secuencia de mineralización y alteración en un pórfido cuprífero en función de la paleoprofundidad y tiempo de formación (Sillitoe, 2010). .....	23
Figura 3.4. 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). .....	26
Figura 3.5. Porcentaje de disolución de varios minerales, obtenidos al comparar digestión por agua regia relativa la digestión por HF-HNO <sub>3</sub> -HClO <sub>4</sub> (Church et al., 1987). .....	27
Figura 3.6. Porcentaje de recuperación de elementos por mineral (datos de Snäll & Liljefors, 2000). .....	29
Figura 4.1. Cantidad de muestras por litología según primera y segunda litología mapeada por tramo (ver Anexo A). .....	32
Figura 4.2. Cantidad de muestras por alteración para las litologías PF (31), PC (33) y AN (50) (Ver Anexo A). .....	33
Figura 4.3. Cantidad de muestras por zonas de mineralización o minzone (ver Tabla 4.1 para codificación). .....	34
Figura 4.4. Distribución espacial de los datos geoquímicos según la litología. Arriba: Perfil EW N = 107350 ± 50 m. Abajo: Planta cota = 2750 ± 50 m. ....	37
Figura 4.5. Distribución espacial de los datos geoquímicos según alteración hidrotermal. Arriba: Perfil EW N = 107350 ± 50 m. Abajo: Planta cota = 2750 ± 50 m. ....	38
Figura 4.6. Distribución espacial de los datos geoquímicos según mineralización. Perfil EW N = 107350 ± 50 m. ....	39
Figura 4.7. Boxplot de disolución total calculada para elementos mayores. ....	41
Figura 4.8. Porcentaje relativo promedio de elementos disuelto por alteración. ....	42
Figura 4.9. Porcentaje normalizado promedio de elementos traza disueltos. ....	43
Figura 4.10. Esquema de grado de destrucción de los feldespatos. ....	44
Figura 4.11. Abundancia relativa de minerales en cada alteración hidrotermal. ....	45

Figura 4.12. Abundancia relativa de todos los minerales por alteración hidrotermal.....	47
Figura 4.13. Histogramas de elementos mayores por alteración hidrotermal.....	49
Figura 4.14. Histogramas de algunos elementos separados por alteración hidrotermal. .....	50
Figura 4.15. Boxplots con eje logarítmico de elementos por alteración hidrotermal.....	51
Figura 4.16. Varianza acumulada según ACP de elementos mayores. ....	54
Figura 4.17. Diagrama de sedimentación para elementos mayores. ....	54
Figura 4.18. Círculos de correlación para elementos mayores. ....	55
Figura 4.19. Diagrama de dispersión entre PC1 y PC2. Los colores indican alteraciones hidrotermales.....	56
Figura 4.20. Varianza acumulada según ACP de elementos traza. ....	58
Figura 4.21. Diagrama de sedimentación para elementos traza. ....	58
Figura 4.22. Diagramas de componentes principales para elementos traza. ....	59
Figura 4.23. Diagrama de dispersión entre PC1 y PC2. Los colores indican alteraciones hidrotermales.....	60
Figura 4.24. Diagrama de clasificación Al-Fe-Mg (Townley et al., 2012). ....	61
Figura 4.25. Diagrama de clasificación Ca-Fe-S (Townley et al., 2012).....	62
Figura 4.26. Diagrama de discriminación entre alteraciones usando índice (Al+K)/(Na+Ca+Mg) vs Sc*V. Arriba se indica con una línea roja el límite para la clasificación como alteración potásica. Abajo se indica la densidad de datos (Townley et al., 2012). ....	63
Figura 4.27. Diagrama Mg-Fe-S mostrando clasificación de base de datos (Townley et al., 2012). ....	65
Figura 5.1. Concentraciones promedio de minerales Qemscan por alteración hidrotermal. ....	68
Figura 5.2. Proporciones relativas de minerales solubles por alteración hidrotermal.....	69

Figura 5.3. Histogramas de distribución de mineralogía cuantitativa Qemscan por alteración hidrotermal.....	70
Figura 5.4. Diagramas de clasificación según Townley et al., 2012. El tamaño de los círculos indica abundancia relativa de pirita a la izquierda y clorita a la derecha.....	71
Figura 5.5. Diagrama de clasificación según Townley et al. (2012) para alteración K1. El tamaño de los círculos indica abundancia relativa de biotita.....	72
Figura 5.6. Histogramas de razones de minerales Qemscan.....	74
Figura 5.7. Gráficos molares de dispersión de Al-Mg, Al-K, Mg-K. El tamaño de los círculos indica la razón clorita/sericita.....	75
Figura 5.8. Gráficos molares de dispersión de Al-Mg, Al-K, Fe-Mg, Fe-S, Mg-K y Mg-S. El tamaño de los círculos indica la razón clorita/pirita.....	76
Figura 6.1. Casos posibles de traslapes entre las alteraciones 30 y 31.....	79
Figura 6.2. Boxplot de minzones para Cu total.....	81
Figura 6.3. Concentraciones de elementos a lo largo de sondajes resaltando el contacto entre alteraciones.....	82
Figura 6.4. Concentraciones de elementos a lo largo de sondajes resaltando variaciones no relacionadas al cambio de alteración.....	84
Figura 6.5. Concentraciones de elementos a lo largo de sondajes resaltando variaciones de potasio en una misma alteración.....	85
Figura 6.6. Razón de minerales Qemscan clorita:sericita vs K wt%. Tamaño indica concentración de biotita Qemscan.....	86
Figura 6.7. Diagrama ternario Cu-Fe-S indicando zonas de pirita-sulfuros de Cu y enriquecimiento de Fe y S.....	88
Figura 6.8. Diagrama ternario Mg-Fe-S indicando zonas de control mineral de biotita-clorita, pirita y transición entre ambas.....	89
Figura 6.9. Diagrama ternario Mg-K-Ca indicando zonas de Control biotita-clorita y Control de sericita.....	91
Figura 7.1. Abundancia de minerales Qemscan según alteración hidrotermal.....	95



Figura 7.2. Diferentes particiones con igual distancia entre centroides pero con distinta orientación para igual set de datos (Tomado de Rezaee, 2010).....	98
Figura 7.3. Boxplots grados de pertenencia por alteración para magnesio.....	102
Figura 7.4. Boxplots grados de pertenencia por alteración para azufre. ....	103
Figura 7.5. Promedio de grados de pertenencia por alteración mapeada. ....	107
Figura 7.6. Planta Cota 2750 ± 50 m. Tamaño de las muestras representa el grado de pertenencia a un cluster. ....	108
Figura 7.7. Planta Cota 2750 ± 50 m. Tamaño de las muestras representa el grado de pertenencia a un cluster (continuación).....	109
Figura 7.8. Metodología de agrupación de k-means (tomado de Han et al., 2012).....	112
Figura 7.9. Media de silhouettes vs número de clusters para grupos de elementos mayores y trazas. ....	113
Figura 7.10. Boxplots de grados de pertenencia a clusters K, SCC y S calculados para Al-Mg-K-Ca-Na para muestras con una alteración por tramo.....	116
Figura 7.11. Grados de pertenencia calculados por rango para muestras con solo una alteración por tramo para diferentes grupos de elementos. ....	118
Figura 7.12. Diagramas ternarios para las muestras Qemscan. El tamaño de los círculos indica mayor valor de la razón (Biotita+Clorita)/Pirita.....	121
Figura 7.13. Composición media de minerales para muestras clasificadas correctamente y sus respectivos errores.....	122
Figura 7.14. Boxplots composición media de minerales para muestras clasificadas correctamente y sus respectivos errores.....	123
Figura 7.15. Boxplots de grados de pertenencia de alteración fílica indiferenciada. ....	125
Figura 7.16. Diagramas ternarios para alteración fílica indiferenciada.....	126
Figura 7.17. Planta Cota= 2750 ± 50 m. Grados de pertenencia a los clusters K, SCC y S para Al-Mg-K-Ca-Na. ....	127
Figura 7.18. Distribución espacial de clasificación de alteración fílica indiferenciada. .	128

Figura 7.19. Boxplots de grados de pertenencia a clusters K, SCC y S calculados para Al-Mg-K-Ca-Na para muestras con dos alteraciones por tramo. ....	129
Figura 7.20. Ejemplo del par SCC – S. ....	129
Figura 7.21. Porcentaje de clasificación en función de las proporciones de alteración por tramo y grado de pertenencia para los pares K – SCC y SCC – S, considerando el grupo de elementos Al-Mg-K-Na. ....	130
Figura 8.1. Boxplots de concentración de arcillas por alteración.....	132
Figura 8.2. Sondaje con mapeos de alteración incongruente con geoquímica. ....	133
Figura 8.3. Distribución espacial de alteraciones hidrotermales. Tamaño indica grado de incertidumbre. Perfil N = 107350 ± 50 m. Planta cota = 2750 ± 50 m. ....	136
Figura 8.4. Distribución espacial de litologías. Tamaño indica grado de incertidumbre. Perfil N = 107350 ± 50 m. Planta cota = 2750 ± 50 m. ....	136
Figura 8.5. Distribución espacial de zonas de mineralización. Tamaño indica grado de incertidumbre. Perfil N = 107350 ± 50 m. Planta cota = 2750 ± 50 m. ....	137
Figura 8.6. Distribución espacial de clasificación de alteraciones hidrotermales. Tamaño indica grado de incertidumbre. Perfil N = 107350 ± 50 m. Planta cota = 2750 ± 50 m. ....	138
Figura 8.7. Razón K/Al vs Mg/Al.....	141

## Índice de Tablas

Tabla 1.1. Producción anual de cobre en miles de toneladas en Escondida (BHP Billiton, 2012). ....	6
Tabla 1.2. Producción anual de oro y plata en miles de onzas en Escondida (BHP Billiton, 2012). ....	6
Tabla 1.3. Recursos minerales de cobre al 30 de junio de 2012 en Escondida (BHP Billiton, 2012). ....	6
Tabla 1.4. Reservas de mena de cobre al 30 de junio de 2012 en Escondida (BHP Billiton, 2012). ....	6

Tabla 2.1. Edades de Formaciones de rocas estratificadas. ....	8
Tabla 2.2. Etapas de alteración hidrotermal y vetillas asociadas. ....	16
Tabla 4.1. Codificación de zonas mineralógicas. ....	33
Tabla 4.2. Cantidad de muestras con única alteración por tramo. ....	35
Tabla 4.3. Cantidad de datos por tramo con mezcla de alteraciones. ....	35
Tabla 4.4. Estadígrafos de porcentaje de disolución calculada. ....	40
Tabla 4.5. Elementos con índice de correlación superior o igual a 0.93. ....	52
Tabla 4.6. Clasificación entre clases propuestas por Townley et al. (2012). ....	64
Tabla 5.1. Minerales por grupo mineral identificados en la base de datos Qemscan. ....	67
Tabla 5.2. Cantidad de muestras de mineralogía QEMSCAN por litología y alteración. ....	67
Tabla 5.3. Fórmula estructural de los minerales analizados por QEMSCAN considerados como solubles en agua regia. ....	73
Tabla 6.1. Percentiles definidos para el 75% de los datos por alteración para magnesio. ....	78
Tabla 6.2. Menor porcentaje de traslape obtenido para las combinaciones de alteraciones indicadas. ....	79
Tabla 6.3. Pares de alteraciones con porcentaje de traslape menor a un 15%. ....	80
Tabla 6.4. Porcentaje de muestras por zona en sistema Cu-Fe-S. ....	88
Tabla 6.5. Porcentaje de muestras por zona en sistema Mg-Fe-S. ....	90
Tabla 6.6. Porcentaje de muestras por zona en sistema Mg-K-Ca. ....	91
Tabla 7.1. Índices de abundancia relativa de minerales para la definición de clusters. ....	93
Tabla 7.2. Índices de mapeo de abundancia relativa de minerales con mineralogía Qemscan. ....	96
Tabla 7.3. Cantidad muestras por base de datos con una alteración por tramo. ....	96
Tabla 7.4. Matriz de error asociada al Mg. Media matriz= 0.172. Media diagonal = 0.60. ....	101

Tabla 7.5. Errores de clasificación para elementos mayores. ....	101
Tabla 7.6. Errores de clasificación para elementos traza. ....	104
Tabla 7.7. Error promedio y promedio de porcentajes máximos de clasificación para grupos de elementos mayores. ....	105
Tabla 7.8. Error promedio y promedio de porcentajes máximos de clasificación para grupos de elementos traza. ....	106
Tabla 7.9. Matrices de confusión de Al-Mg-K-Ca-Na y Al-Mg-K-Na. ....	110
Tabla 7.10. Distancia euclidiana entre centros de alteraciones (Al-Mg-K-Ca-Na). ....	111
Tabla 7.11. Porcentaje de clasificación de alteraciones en los clusters calculados por K-means para Al-Mg-K-Ca-Na y Al-Mg-K-Ca. ....	113
Tabla 7.12. Distancia entre centros predefinidos y calculados por K-means para Al-Mg-K-Ca-Na y Al-Mg-K-Ca. ....	114
Tabla 7.13. Porcentaje de clasificación de alteraciones mapeadas en clusters redefinidos para distintos grupos de elementos. ....	115
Tabla 7.14. Matrices de confusión para los datos de mineralogía Qemscan. ....	120
Tabla 7.15. Resultados de clasificación de alteración fílica indiferenciada. ....	124
Tabla 8.1. Porcentaje de clasificación de alteraciones mapeadas en clusters redefinidos para distintos grupos de elementos. ....	134

## **1 Introducción**

Este proyecto de tesis de Magíster en Ciencias Mención Geología, se enmarca dentro del proyecto MQAlt del laboratorio ALGES (Advanced Laboratory for Geostatistical Supercomputing) de AMTC (Advanced Mining Technology Center), el cual tiene como objetivo desarrollar herramientas para el análisis y modelamiento de las alteraciones hidrotermales presentes en la mina.

### **1.1 Formulación del problema**

En la gran minería, uno de los mayores desafíos es caracterizar a tiempo el tipo de roca que será procesado. No tan solo los minerales de mena son relevantes, sino que también los minerales asociados que, a pesar de no poseer valor económico, influyen directamente en el procesamiento de la roca. La presencia de algunos minerales de ganga en distintas proporciones dentro de la roca pueden controlar su comportamiento en planta. Si no se conoce ni cuantifica la presencia de estos minerales, pueden producirse importantes pérdidas económicas durante el procesamiento metalúrgico del material.

Los procesos hidrotermales que producen la mineralización económica en un sistema tipo pórfido cuprífero como Escondida, también son responsables de alterar la roca que la aloja. Esta alteración corresponde a asociaciones de minerales que dan información acerca de los procesos que han afectado a la roca. A estas asociaciones se les conoce como alteración hidrotermal y están relacionadas directamente con los procesos mineralizadores.

Trabajos anteriores han demostrado que es posible realizar una clasificación de las alteraciones hidrotermales de Escondida en función de la geoquímica y los datos de mapeo geológico de sondajes (Townley, et al., 2012; Luca, et al., 2012). En el presente trabajo se propone refinar esta clasificación al poseer datos de la intensidad de

alteración para cada muestra (leve, moderada e intensa), y datos de mineralogía avanzada obtenidos por análisis Qemscan.

El principal problema con el que se debe lidiar para realizar esta clasificación es que la base de datos geoquímica no es la ideal para el estudio de la mineralogía de alteración, ya que el método de disolución por agua regia no es total. Este ácido no es capaz de disolver la mayoría de los silicatos, sino que solo sulfuros, algunos sulfatos, óxidos de Fe-Mn, carbonatos, entre otros minerales (Chao, 1984; Chao & Sanzalone, 1992; Church, et al., 1987; Hall, 1999; Snäll & Liljefors, 2000). Otro problema a considerar, es que la base de datos se ha generado a lo largo de los años y por lo tanto los procedimientos de análisis geoquímico han podido variar dependiendo de la cantidad de laboratorios que los han realizado.

Este trabajo busca correlacionar las bases de datos geoquímica, mineralógica y mapeo de sondajes para crear un modelo de clasificación de las alteraciones hidrotermales. Este modelo podrá ser usado en estudios posteriores que apunten a predecir el comportamiento de la roca en la planta a partir de la mineralogía utilizando criterios geo-minero-metalúrgicos.

## **1.2 Hipótesis de trabajo**

La presencia y abundancia relativa de ciertos minerales definen un tipo de alteración hidrotermal, la cual imprime composiciones químicas particulares a la roca. En el caso de Escondida, es posible definir la presencia de alteraciones hidrotermales a partir de la base de datos geoquímica, previamente asociada y calibrada a los datos de logueo de sondajes y mineralogía avanzada Qemscan.

Se postula que correlacionar la información de mapeo de sondajes, mineralogía avanzada Qemscan y base de datos geoquímico, permitirá encontrar criterios para cuantificar la presencia de alteraciones hidrotermales.

### **1.3 Objetivos**

El objetivo general de este estudio es definir criterios y parámetros geoquímicos de caracterización mineral cuantitativa para su posterior uso en modelamiento espacial. De esta manera, se plantea construir un modelo cuantitativo de alteraciones hidrotermales basado en datos geoquímicos, mineralógicos y mapeo de sondajes para ser utilizado en la predicción del comportamiento del material durante el procesamiento metalúrgico.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- 1) Determinar la mineralogía y geoquímica de las zonas de alteración hidrotermal.
- 2) Analizar correlación entre mineralogía y geoquímica de las zonas de alteración hidrotermal.
- 3) Definir zonas de alteración hidrotermal en función de la geoquímica.

### **1.4 Metodología de estudio**

#### **1.4.1 Caracterización geoquímica de zonas de alteraciones hidrotermales**

La metodología para definir la mineralogía de las zonas de alteración 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 presenten una distribución preferencial por alteración hidrotermal. Se hace la distinción entre elementos mayores y traza, ya que los primeros se correlacionan con la presencia de minerales de mena y ganga.

#### **1.4.2 Caracterización mineralógica de las alteraciones hidrotermales**

El análisis estadístico de los datos de mineralogía Qemscan permitirá determinar las asociaciones minerales representativas de cada zona de alteración considerando solo los grupos minerales solubles. Además, se analizarán las principales diferencias entre alteraciones y se contrasta con las diferencias del protocolo de mapeo.

#### **1.4.3 Correlación de geoquímica y mineralogía**

Considerando la mineralogía y geoquímica definidas para cada zona de alteración, se estudia el comportamiento conjunto de los elementos mayores y su correlación con las principales fases presentes. De esta manera, se obtendrá una aproximación de las principales fuentes de los elementos químicos.

#### **1.4.4 Clasificación de muestras a partir de datos geoquímicos**

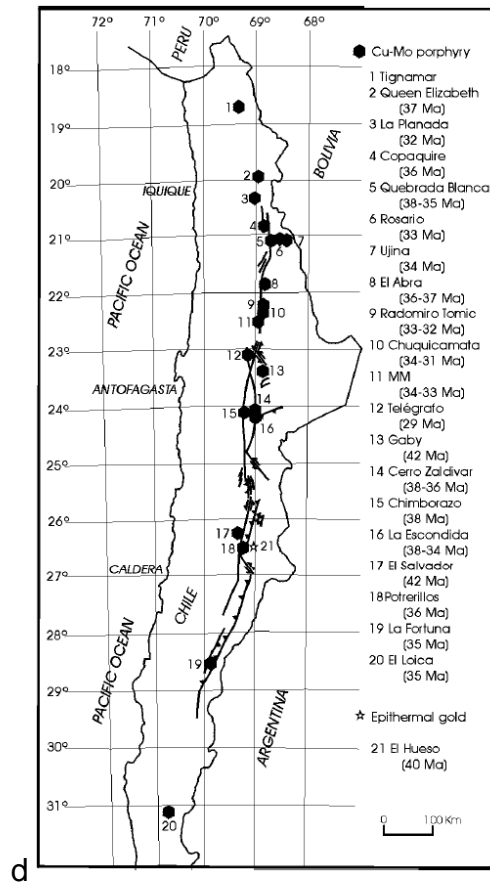
Considerando la información bibliográfica, la selección de elementos químicos asociados a la presencia mineral, se crea un modelo de clasificación de las alteraciones a partir de los datos geoquímicos más relevantes. Posteriormente, se compara la clasificación con los datos de mapeo de sondaje y estudian las principales fuentes de error.

### **1.5 Características relevantes del yacimiento Escondida**

Escondida es un yacimiento tipo pórfido Cu-Mo ubicado en el norte de Chile, perteneciente al cluster Escondida junto a Escondida Norte, Zaldivar y Chimborazo. Estos yacimientos se encuentran dentro del dominio del Sistema de Fallas de Domeyko (SFD) en la franja metalogénica del Eoceno superior – Oligoceno inferior (Ver Figura



1.1). Dentro de esta franja se encuentran los depósitos de Cu con mayor importancia económica para Chile, además de Escondida, tales como: Chuquicamata, Collahuasi y El Salvador (Maksaev, 2001).



**Figura 1.1. Franja metalogénica del Eoceno Superior – Oligoceno Inferior. Se esquematiza el Sistema de Fallas de Domeyko (Maksaev, 2001).**

Minera Escondida Limitada (MEL) pertenece en un 57.5% a BHP Billiton Ltds., 30% a Rio Tinto Plc, 10% al consorcio corporativo JECO el cual incluye Mitsubishi, Nippon Mining and Metals Ltd., y 2.5% a International Finance Corp. Minera Escondida es parte del CSG (Customer Sector Group) de metales base de BHP Billiton, y cuenta con dos faenas principales a rajo abierto: Escondida y Escondida Norte (Camus, 2003; BHP Billiton, 2012).

En el año fiscal del 2012, Escondida produjo 333.8 kt de concentrado de cobre y 172 kt de cátodos de cobre, lo cual es inferior a la producción de 2010 y 2011. Según

los estándares de producción actual, Escondida tiene una vida estimada de 54 años (BHP Billiton, 2012).

**Tabla 1.1. Producción anual de cobre en miles de toneladas en Escondida (BHP Billiton, 2012).**

	2012	2011	2010
<b>Concentrado de cobre [kt]</b>	333.8	390.5	448.1
<b>Cátodos de cobre [kt]</b>	172	179.1	174.2

**Tabla 1.2. Producción anual de oro y plata en miles de onzas en Escondida (BHP Billiton, 2012).**

	2012	2011	2010
<b>Oro</b>	50.9	84.7	76.4
<b>Plata</b>	1921	2849	2874

**Tabla 1.3. Recursos minerales de cobre al 30 de junio de 2012 en Escondida (BHP Billiton, 2012).**

Tipo de mena	Medidos		Indicados	
	Mt	%TCu	Mt	%TCu
<b>Óxido</b>	104	0.81	58	0.79
<b>Mixto</b>	97	0.82	74	0.65
<b>Sulfuro</b>	3855	0.71	3081	0.55

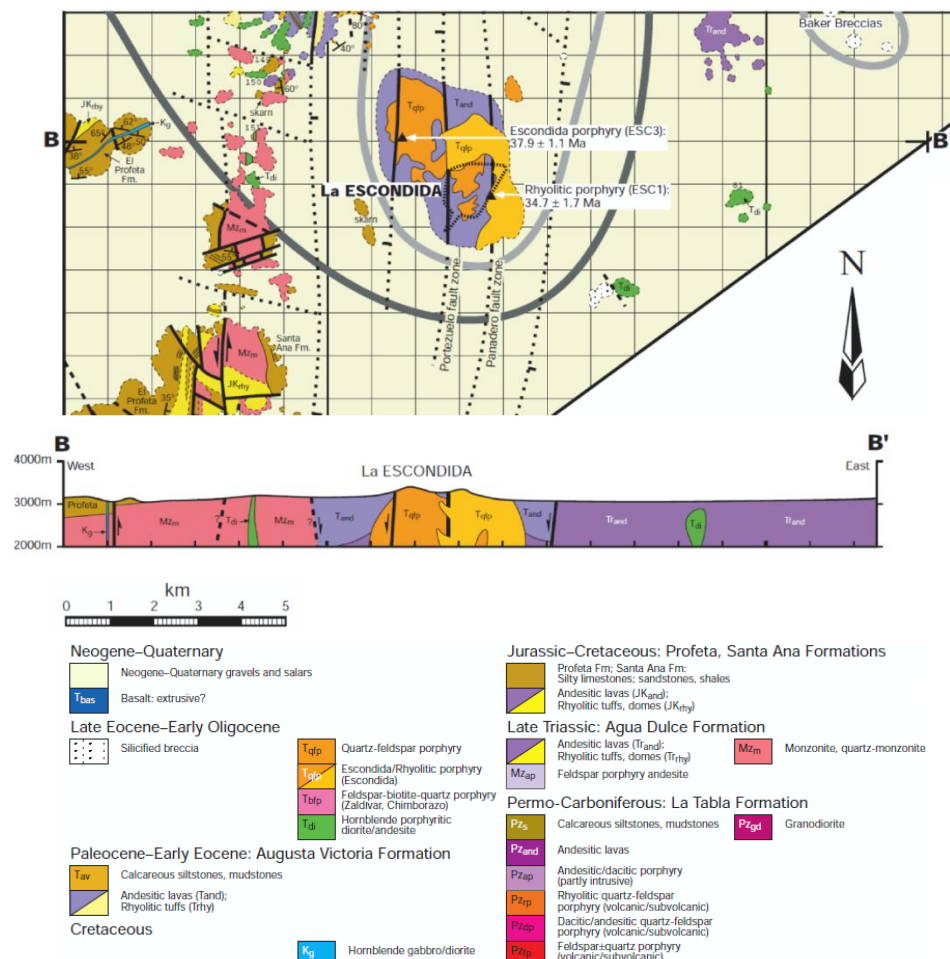
**Tabla 1.4. Reservas de mena de cobre al 30 de junio de 2012 en Escondida (BHP Billiton, 2012).**

Tipo de mena	Probado		Probable	
	Mt	%TCu	Mt	%TCu
<b>Óxido</b>	76	0.9	40	0.88
<b>Sulfuro</b>	2779	0.8	2148	0.58
<b>Lixiviación de Sulfuro</b>	1150	0.5	827	0.44

En sus inicios, la explotación del yacimiento Escondida se enfocó en la zona de enriquecimiento supérgeno, caracterizada por altas leyes de cobre. Actualmente, Escondida se encuentra en una etapa de transición hacia la zona de sulfuros primarios en donde la eficiencia del procesamiento mineral mediante flotación juega un papel fundamental en la optimización de las ganancias en el negocio minero. El proyecto MQAlt busca crear una herramienta para la caracterización mineralógica de la ganga con el objetivo de predecir su comportamiento en el proceso de flotación.

## 2 Marco geológico del yacimiento Escondida

El yacimiento de Escondida se caracteriza por una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias intruidas por varios cuerpos magmáticos responsables de la mineralización económica (ver Figura 2.1).



**Figura 2.1. Mapa geológico del yacimiento Escondida (modificado de Richards et al., 2001).**

## **2.1 Rocas estratificadas**

Las rocas estratificadas que afloran en el yacimiento Escondida corresponden a 4 formaciones (ver Tabla 2.1). Las características litológicas de cada una de ellas se describen a continuación.

**Tabla 2.1. Edades de Formaciones de rocas estratificadas.**

<b>Formación</b>	<b>Edad [Ma]</b>	<b>Edad asignada</b>	<b>Referencia</b>
<b>Augusta Victoria</b>	71.7±2.9 a 41.2±2.2	Paleoceno - Eoceno inferior	Marinovic et al., 1995
<b>El Profeta y Santa Ana</b>	-	Triásico Superior - Jurásico Inferior	Gallego & Covacevich, 1998 y Cornejo, 2009
<b>Agua Dulce</b>	196±7 a 169±6	Triásico Superior	Marinovic et al., 1995
<b>La Tabla</b>	300 a 260	Carbonífero -Pérmico	Cornejo, 2009

### **2.1.1 Formación La Tabla (Carbonífero-Pérmico)**

Rocas ígneas extrusivas e intrusivas intermedias a félsicas correspondientes al basamento cristalino de Escondida. Solo aflora en el rajo de Escondida Norte (Richards et al., 2001; Cornejo et al., 2009).

### **2.1.2 Formación Agua Dulce (Triásico Superior)**

Aflora al NE del rajo Escondida Norte y está compuesta por rocas andesíticas con textura porfírica de plagioclasas sausuritizadas inmersas en una masa fundamental fina con ocasional textura traquítica. Los minerales máficos corresponden principalmente a hornblenda y clinopiroxeno. Esta roca se encuentra comúnmente afectada por alteración propilítica.

Las rocas riolíticas tienen textura porfírica con fenocristales de cuarzo, feldespatos y menor biotita inmersos en una masa fundamental vítrea devitrificada, pudiendo presentar textura eutaxítica y bandeamiento de la masa fundamental (Richards et al., 2001).

### **2.1.3 Formación El Profeta y Santa Ana (Jurásico-Cretácico)**

Rocas sedimentarias con intercalaciones de rocas volcánicas que afloran al SW de Escondida. En las zonas donde aflora, El Profeta subyace a la Formación Agua Dulce (Richards et al., 2001).

La Formación El Profeta posee un espesor de alrededor de 1000 m de calizas fosilíferas, calizas brechizada y lentes de arenisca y limo. Puede presentar intercalaciones con lavas andesíticas, la cual presenta fenocristales de plagioclasas, piroxenos y biotita inmersos en una masa fundamental vítrea devitrificada.

La Formación Santa Ana se caracteriza por areniscas y limo con horizontes de carbonato, intercalado con capas de andesitas y riolitas. El nivel inferior marino corresponde a intercalaciones de areniscas líticas y arcósicas de grano medio a grueso, presentando bancos de calcarenitas fosilíferas finamente estratificadas. El nivel superior corresponde a intercalaciones de areniscas rojas grano medio, volcarenitas verdes, conglomerados rojos de grano fino, calizas margosas laminadas, calci-ruditas rojas e intercalaciones menores de lutitas, conglomerados y brechas con intercalaciones de limolitas (Richards et al., 2001; Cornejo et al., 2009).

#### **2.1.4 Formación Augusta Victoria (Paleoceno-Eoceno inferior)**

Se distribuye principalmente en el sector SW del rajo Escondida y corresponde a la roca de caja del complejo subvolcánico mineralizador del yacimiento Escondida.

La roca corresponde a lavas andesíticas de textura porfírica con alto contenido en fenocristales de plagioclasa y clinopiroxeno, inmersos en una masa fundamental afanítica de feldespatos, biotita y menor hornblenda con alteración a clorita y epidota. Los fenocristales pueden alcanzar un tamaño de hasta 2 mm de largo, y presentar sericitización y argilización (Richards et al., 2001; Véliz, 2004).

## **2.2 Rocas intrusivas**

### **2.2.1 Complejo Intrusivo Feldespático Escondida (CIFE)**

Conformada por 3 fases: Pórfido Colorado Grande, Pórfido Escondida y Pórfido Riolítico (Camus, 2003).

El CIFE es un stock cuarzo monzonítico-granodiorítico que intruye a la Formación Augusta Victoria y posee una forma elíptica con eje mayor de largo máximo de 4.5 km en dirección N30W a N40W, y eje menor de 2.5 km máximo (Padilla-Garza et al., 2004; Padilla et al., 2001).

Las 2 primeras fases corresponden a pórfidos synmineralización cuya mineralogía se caracteriza por abundantes fenocristales de feldespato con cuarzo subordinado y fenocristales de biotita en una matriz fina cuarzo-feldespática. Presentan biotita secundaria poco desarrollada y, clorita y sericita como alteración selectiva de biotita y feldespatos, respectivamente (Richards et al., 2001).

La intrusión Colorado Grande tiene una edad de  $37.9 \pm 1.1$  Ma (U-Pb en circones, Richards et al., 1999).

La tercera intrusión del CIFE corresponde al pórfido-brecha, la cual tiene una geometría elongada en dirección N10°W con eje mayor de hasta 1 km y eje menor de 250 m. Su composición es similar a la de la intrusión Escondida pero incluye fragmentos mineralizados de los intrusivos previos y la andesita. El contenido en fragmentos es de un 8% en volumen pudiendo encontrarse sectores donde llegaría hasta un 60% donde exhibe una textura de brecha intrusiva (Padilla et al., 2001).

### **2.2.2 Pórfido Riolítico**

El Pórfido Riolítico es un cuerpo intrusivo hipabisal que se distribuye en la zona NE y SE del rajo Escondida. Se encuentra en contacto por intrusión con el Pórfido Escondida y la Formación Augusta Victoria, y tiene una edad de emplazamiento de  $34.7 \pm 1.7$  Ma. Posee geometría de domo y sería posterior a la mineralización del yacimiento. Petrográficamente se caracteriza por fenocristales de cuarzo más abundante que en los intrusivos synmineralización. También presenta fenocristales de feldespatos y biotita relicta en la matriz de grano fino. Esta intrusión se asocia a los eventos de silicificación y alteración argílica avanzada (Richards et al., 2001; Véliz 2004).

Posteriormente, diques porfíricos dacíticos y cuarzo-latíticos intruyeron los pórfidos anteriores siguiendo la tendencia NW de las fallas postmineralización, produciendo una leve alteración sericítica de edad K-Ar de  $31 \pm 2.8$  Ma (Alpers y Brimhall, 1988). Estos diques indican un límite temporal de la actividad magmática (Padilla et al., 2001).

### **2.2.3 Stocks dioríticos y diques**

Stock dioríticos y diques se encuentran intruyendo a la Formación Augusta Victoria y el Profeta. Se caracterizan por presentar abundantes fenocristales de

hornblenda, y magnetita lo que indica un alto contenido de agua magmática y alto estado de oxidación (Richards et al., 2001).

Finalmente, diques dacíticos y cuarzo-latíticos con tendencia NW se emplazaron en fallas postmineralización (Richards et al., 1999).

### **2.3 Brechas**

Además del pórfido brecha asociado al CIFE, existen otros 3 tipos de brecha en Escondida: Brecha de enfriamiento formada en el contacto del domo riolítico y la andesita, diques de guijarros mineralizados y estériles que postdatan el emplazamiento de la riolita, y brecha tectónica asociada a los sistemas de fallas (Padilla et al., 2001).

### **2.4 Gravas**

Secuencia sedimentaria continental compuesta por areniscas y brechas sedimentarias. Textura poco consolidada y mal seleccionada. Los fragmentos son angulosos a subangulosos, de tamaños variables de milimétricos a decimétricos. Presenta una matriz compuesta por material detrítico tamaño arena, y cemento de yeso, carbonatos y sales indeterminadas.

Su disposición es subhorizontal sobreyaciendo en contacto por inconformidad a todas las unidades anteriores. Presenta zonas con mineralización exótica de cobre (Véliz, 2004).

### **2.5 Estructuras**

El yacimiento posee dos sistemas estructurales principales: NNW y NE (ver Figura 2.2). Los altos ángulos de manto sugieren que ambos sistemas se asocian al SFD.



El sistema NNW se asocia a la etapa de mineralización del yacimiento. En el rajo Escondida las fallas principales con esta orientación corresponden a la falla Panadero, Ortiz y Portezuelo. Las fallas Zaldívar y Ferrocarril se encuentran fuera del pit principal. Estas estructuras controlan la distribución de las alteraciones cuarzo-sericita, argílica avanzada, y las vetillas polimetálicas.

El rumbo de estas estructuras es de N10W con variaciones entre N20E y N20W. Las fallas de la zona W del rajo mantienen hacia el E, mientras que las del E lo hacen en dirección contraria, lo que le da una geometría tipo graben. La continuidad de las fallas es de hasta 1 km en andesita, disminuyendo en los intrusivos. La mayoría de los diques de guijarro y diques estériles cuarzo-mozoníticos posee una tendencia con igual orientación. En particular, la falla Ortiz en el sector E, en el contacto entre el stock y la andesita se forma una geometría rómbica, la cual en perfil presenta una geometría del tipo flor positiva (Padilla et al., 2001).

El sistema NE se interpreta como postmineralización debido a que corta a los intrusivos y la mineralización. Las fallas son de carácter dextral a lo largo de rumbo NE presentando un manteo entre 60 y 70° S. Presentan espesor promedio de 0.3 m, de continuidad lateral de hasta 2 km (Richards et al., 2001; Padilla et al., 2001; Romero et al., 2010).

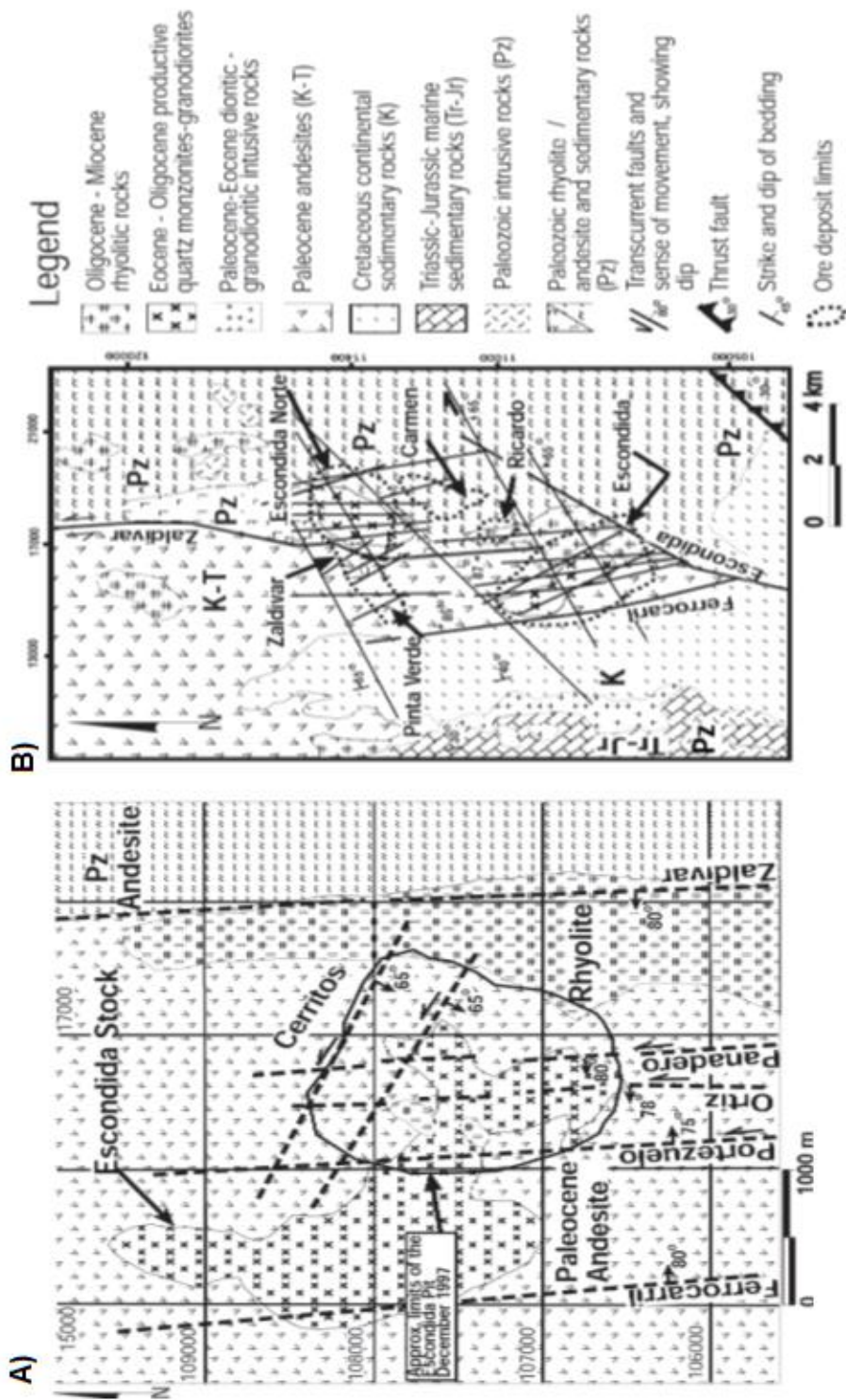
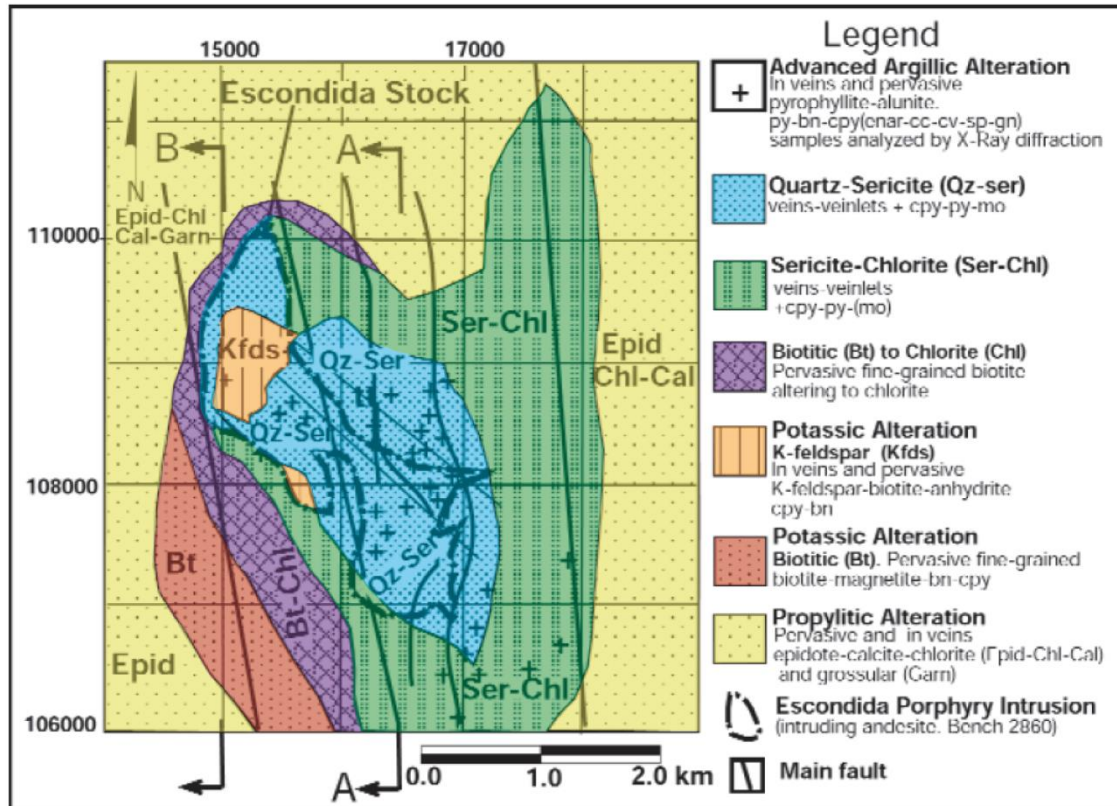


Figura 2.2. Esquemas de las estructuras principales de Escondida. A) Geología y estructuras de Escondida. B) Geología y estructuras del distrito Escondida en general (Padilla et al., 2001).

## 2.6 Alteración hidrotermal y mineralización

La alteración hidrotermal de Escondida se asocia a la intrusión del pórfido cuarzo monzonítico a granodiorítico del Eoceno – Oligoceno emplazado en lavas andesíticas Paleocenas. La distribución espacial de las alteraciones corresponde a una zonación típica de un sistema tipo pórfido cuprífero (ver Figura 2.3).



**Figura 2.3. Mapa de alteraciones hidrotermales del yacimiento Escondida (Modificado de Padilla et al., 2001).**

La mineralización hipógena de Cu se asocia a la intrusión del pórfido dacítico cuarzo-feldespato-biotita, conocido como Pórfido Escondida, el cual incluye al Pórfido Colorado Grande. Este intrusivo se habría emplazado a los  $37.9 \pm 1.1$  Ma siendo posteriormente intruido por el pórfido Riolítico (edad U-Pb de  $34.7 \pm 1.7$  Ma). Durante este periodo ocurriría el principal evento mineralizador de Escondida (Richards et al., 1999; Richards et al., 2001).

A los pórfidos del CIFE asociados a mineralización hipógena de Cu-Fe se les denomina intrusivos synmineralización. Estos se caracterizan por presentar una alteración potásica con sobreimposición fílica. Por otro lado, el Pórfido Riolítico se denomina intrusivo postmineralización, ya que no introduce mayor mineralización al sistema, sino que solo habría removilizado y redistribuido los sulfuros anteriores. A este se asocia a los eventos de silicificación y alteración argílica avanzada, presentando abundante mineralización local de sulfuros en vetillas, pero escasa a escala de roca total (Richards et al., 1999; Richards et al., 2001).

Se distinguen tres etapas (ver Tabla 2.2) de alteración hidrotermal sobreimpuestas caracterizadas por sus asociaciones minerales, distribución espacial, temporalidad y mineralización asociada (Padilla et al., 2001).

**Tabla 2.2. Etapas de alteración hidrotermal y vetillas asociadas.**

<b>Etapas</b>	<b>Alteración hidrotermal</b>	<b>Vetillas</b>
<b>1</b>	Potásica	Tempranas: 1a, 1b y 1c
	Propilítica	
	Silicificación	
<b>2</b>	Clorita-sericita±cuarzo	2a
	Cuarzo-sericita	2b y 2c
<b>3</b>	Argílica avanzada	3

### **2.6.1 Alteración potásica**

Presenta un control litológico, es decir, el tipo de asociación mineral depende de la roca a la cual afecta. En el stock Escondida, la alteración potásica se caracteriza por feldespatos potásicos como reemplazo de plagioclasas en cristales y masa fundamental. En andesita, se caracteriza por biotita secundaria, menor proporción de feldespatos potásicos y anhidrita diseminadas y en vetillas. La biotita es fina y ocurre como minerales

en la masa fundamental y fenocristales de plagioclasa y máficos. Los cristales de plagioclasa de mayor tamaño son alterados parcialmente.

La mineralización hipógena asociada corresponde a magnetita, bornita y calcopirita asociada a biotita y feldespato potásico-cuarzo. En andesita con alteración pervasiva de biotita, predomina magnetita, la cual puede ser reemplazada por calcopirita-bornita. En el stock Escondida, predomina calcopirita por sobre la magnetita.

### **2.6.2 Alteración propilítica**

Se forma como halo en torno al núcleo potásico presentándose como una alteración pervasiva pudiendo destruir total o parcialmente la mineralogía y textura original de la andesita.

Se define por la presencia de epidota principalmente, y menor proporción de clorita, montmorillonita, biotita, grosularia y vetillas de carbonatos y ceolitas. En andesita, esta asociación mineral afecta a anfíboles y plagioclasas. Las plagioclasas pueden ser ocasionalmente reemplazadas por grosularia y presentar un halo albítico.

La mineralización de sulfuros se caracteriza por abundante pirita, ocasionalmente asociada con calcopirita en vetillas.

### **2.6.3 Silicificación**

Capa de silicificación en el contacto entre el stock Escondida y la andesita. Es interpretada como un contacto por metasomatismo que afecta a ambas litologías. Esta alteración se define por una capa de cuarzo microcristalino, el cual le otorga una textura afanítica y mayor resistencia a la roca.

#### **2.6.4 Vetillas Tempranas**

Estas vetillas se componen por cuarzo o cuarzo-ortoclasa±biotita±anhidrita. Se subdividen en tres subgrupos definidos por su temporalidad.

1a: vetillas sinuosas, regulares y discontinuas, compuestas por cuarzo sin halo de alteración, principalmente distribuidas en el intrusivo o en andesita cercana al contacto con este. De largo inferior a 10 cm y espesor entre 1 mm y 2 cm.

1b: vetillas de cuarzo-feldespato potásico con menor proporción de biotita y anhidrita. Más continuas y menos sinuosas que 1a. Presenta halo de feldespato potásico haciendo los márgenes irregulares y poco definidos. Espesor variable entre 1 mm y 3 cm.

1c: vetillas continuas de cuarzo sin halo, principalmente distribuidas en el intrusivo. Márgenes irregulares. Largo hasta 70 cm y espesor de 1 a 5 cm.

#### **2.6.5 Clorita-sericita±cuarzo**

Varía según predominio de clorita o sericita. Puede ocurrir diseminada y en vetillas afectando a andesita con alteración biotítica. En el stock Escondida, se caracteriza por la alteración selectiva de biotita y máficos, y feldespato potásico de la alteración potásica alterados a clorita-sericita y menores proporciones de clorita en vetillas reabiertas o fracturas. Esta alteración no destruye la textura previa de la roca a excepción de las vetillas y en las proximidades de sus respectivos halos.

La relación sericita/clorita disminuye al aumentar la distancia desde el intrusivo. Se le asocia el tipo de vetilla 2a.

2a: vetillas que cortan o reabren vetillas tempranas. Largo variable de pocos centímetros hasta 50 cm con espesor variable entre 1 y 3 cm. Son más continuas que las tempranas y presenta bordes irregulares. Son sinuosas y pueden presentar ramificaciones. En andesita, poseen una zonación conformada por sulfuros en el centro

y bajo contenido de cuarzo, un halo de sericita y clorita subordinada, lo cual cambia hacia el exterior, llegando a clorita y sericita subordinada.

### **2.6.6 Cuarzo-sericita**

Alteración presente en el stock Escondida y en andesita cercana al contacto con este. Ocurre principalmente en vetillas y halos de alteración. Posee una alta densidad de vetillas 2b y 2c.

Las vetillas 2b y 2c poseen un largo superior a 20 cm y, en ocasiones, son mayores a 1 m. Su espesor varía entre 1 y 15 cm con bordes irregulares presentando alteración cuarzo-sericita intensa a moderada y débil. La mineralogía de las vetillas corresponde a cuarzo y sulfuros con halo sericítico pervasivo.

La mineralización se asocia a las vetillas intercrecida con la alteración sericítica o clorita-sericita, y corresponde a calcopirita con menor proporción de molibdenita y pirita. En general, el contenido de calcopirita y pirita se encuentran en razón 3:1.

### **2.6.7 Argílica avanzada**

Esta alteración afecta a la andesita, stock Escondida y riolita. Su distribución es controlada por fallas y por el contacto entre riolita y roca caja. La asociación mineral que la define corresponde a pirofilita, alunita y cuarzo, además de vetillas de cuarzo con abundantes sulfuros. En el contacto entre el domo riolítico y andesita, la alteración es pervasiva y se caracteriza por texturas moteada como resultado de la asociación pirofilita-sericita.

Se le asocian vetillas de espesor variable entre pocos milímetros hasta 1 o 2 metros con textura brechosa, bandeada y masiva. Las vetillas se caracterizan por la presencia de cuarzo, abundantes sulfuros y menor alunita. En los márgenes de estas se

presentan bandas de cuarzo azucarado de grano fino y cuarzo fino semitraslúcido con espesor entre variable desde milímetros a 10 cm.

La mineralización asociada a esta etapa consiste en una amplia variedad de sulfuros, entre los cuales se encuentra: calcopirita, bornita, pirita, covelina, calcosina, enargita, esfalerita, galena y tenantita. Esta mineralización ocurre principalmente en vetillas asociadas a la alteración o anteriores. La pirita ocurre tanto en disseminación como en vetillas, constituyendo el principal relleno de estas. En general, la mineralización de pirita y calcopirita se encuentran en una razón 5:1.

### **3 Marco Teórico**

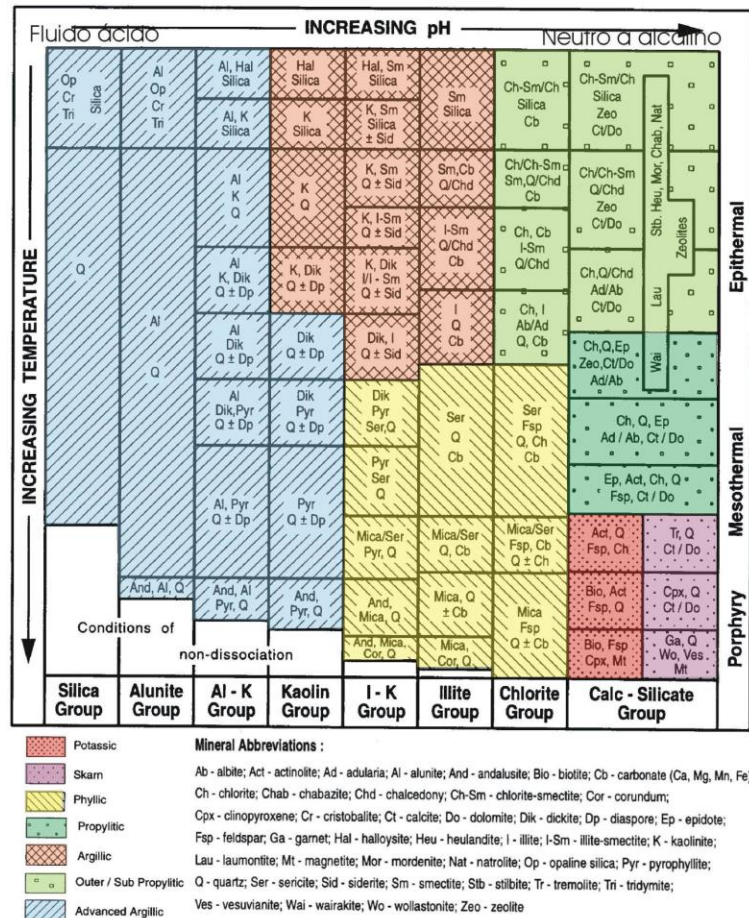
#### **3.1 Alteración hidrotermal**

Una alteración hidrotermal es el producto de un proceso metasomático donde la roca sufre un cambio químico, mineralógico y morfológico. Este proceso se debe al intercambio químico ocurrido durante la interacción de un fluido hidrotermal y la roca.

Los cambios producto del proceso de alteración imprimen asociaciones minerales que permiten obtener información acerca de sus condiciones de formación como: composición del fluido hidrotermal, composición de la roca, temperatura, pH, Eh y razón agua/roca.

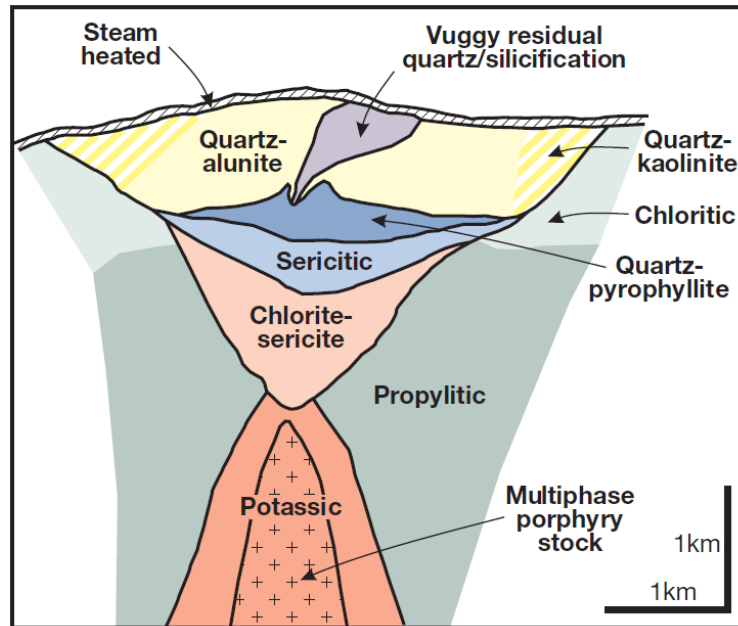
En la Figura 3.1 se muestra el modelo propuesto por Corbett & Leach (1997) donde las asociaciones minerales para cada alteración hidrotermal se ordenan relativas al pH, temperatura y profundidad de formación. En este diagrama se visualizan las posibles alteraciones hidrotermales que pueden encontrarse en un sistema tipo pórfido cuprífero, asumiendo que un fluido inicial, a alta temperatura y de pH neutro alcalino que produce una alteración potásica en la roca, evoluciona hacia uno de menor temperatura y menor pH produciendo una alteración fílica, argílica y argílica avanzada.





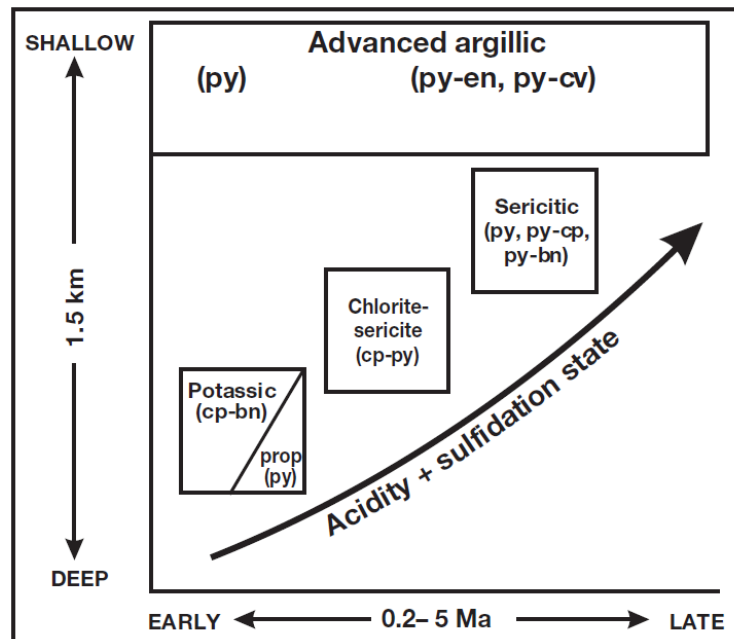
**Figura 3.1. Asociaciones de minerales de alteración común en sistemas hidrotermales (Corbett & Leach, 1997).**

En un pórfido cuprífero, las alteraciones hidrotermales presentan una zonación espacial asociada y centrada en un núcleo. De base a techo, se encuentran las alteraciones calcosódicas, potásicas, clorita-sericita (SCC), filica y argílica avanzada, y en las zonas más distales se encontrarían las alteraciones clorítica y propilítica (ver Figura 3.2).



**Figura 3.2. Modelo de zonación de alteración y mineralización para pórfidos cupríferos (Sillitoe, 2010).**

Las alteraciones hidrotermales son progresivamente más jóvenes de base a techo, por lo que inevitablemente, las más someras afectan a las profundas. Es decir, la alteración potásica presentará un sobreimposición clorita-sericita, la que a su vez presenta una sobreimposición fílica a medida que disminuye la profundidad con respecto al núcleo. En la Figura 3.3 se muestra la evolución de la alteración y mineralización en función del aumento de la acidez del fluido hidrotermal producto de la disminución de la temperatura. Además, el aumento en el estado de sulfidización del fluido implica un cambio en las asociaciones de sulfuros, yendo desde calcopirita-bornita, pasando por calcopirita-pirita y bornita-pirita, hasta pirita-enargita o pirita-covelina.



**Figura 3.3. Esquema generalizado de la secuencia de mineralización y alteración en un pórfido cuprífero en función de la paleoprofundidad y tiempo de formación (Sillitoe, 2010).**

En la base de datos geoquímica de Escondida, existen cuatro grupos de alteraciones hidrotermales: las alteraciones potásicas (30-K1 y 31-K2), clorita-sericita (40-SCC1 y 41-SCC2), fílicas (50-S, 51-S1 y 52-S2) y argílica avanzada supérgena (61-AA). Las alteraciones potásicas se asocian al núcleo y su mineralogía se caracteriza por la presencia de biotita y feldespato potásico. A medida que la roca se aleja del núcleo, se encuentra la alteración SCC o sericita-clorita-arcillas en donde existe un predominio de la clorita por sobre la sericita, el cual se invierte al alcanzar la zona de alteración fílica caracterizada por cuarzo, sericita y pirita. La alteración argílica avanzada supérgena, como su nombre lo indica, se asocia a procesos de carácter supérgeno que afectan a la roca luego de formada la alteración fílica.

Dada la evolución teórica de un sistema tipo pórfido cuprífero, es de esperar que las alteraciones hidrolíticas (fílica y argílica avanzada) presenten una mayor dispersión en los datos geoquímicos, ya que se superponen a alteraciones preexistentes.

## **3.2 Análisis ICP-AES**

El ICP-AES (Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectrometry) es una de las técnicas más utilizadas para el análisis de elementos químicos. Su aplicación depende directamente de la preparación de las muestras previa al análisis. En el caso de las rocas, la disolución de la muestra puede ser parcial o total dependiendo del tipo de reactivo que se utilice.

La base de datos geoquímicos de Escondida fue generada en ICP-AES utilizando agua regia como reactivo para disolver las muestras. El agua regia disuelve parcialmente la roca 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 digestión por fusión. Es decir, el agua regia resalta la presencia de algunos grupos minerales como los sulfuros y carbonatos por sobre los silicatos.

Una de las ventajas es que elementos como el As, Hg, S y Sb se volatilizan fácilmente al utilizar ácido fluorhídrico (HF), mientras que el agua regia los retiene. Además, la concentración de sólidos disueltos totales es menor al usar agua regia. Sin embargo, la ventaja más importante para los objetivos de este estudio es que la disolución por agua regia solo afecta a ciertas fases minerales, lo que disminuye considerablemente el número de variables ya que se acotan las posibles fuentes de los elementos.

### **3.2.1 Disolución por Agua Regia**

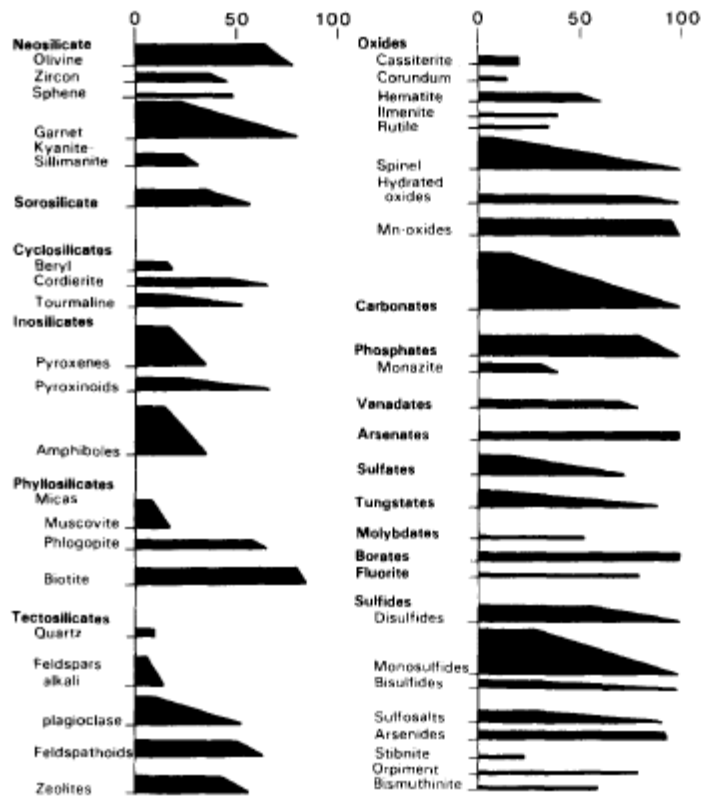
El agua regia consiste en una mezcla de HCl y HNO<sub>3</sub> en razón 3:1 en volumen. Según procedimientos estándar, las muestras son tratadas por un período entre 1 y 3 horas a una temperatura entre 80 y 95 °C (Gill, 1997). Sin embargo, el protocolo de análisis varía para cada laboratorio, y dado que se desconocen, no es posible detallarlos.

El método de disolución por agua regia es parcial ya que no afecta a la mayoría de los silicatos. Sin embargo, la digestión es cercana a la total para algunos minerales solubles en agua, elementos intercambiables, 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 (Chao, 1984; Chao & Sanzalone, 1992; Church et al., 1987; Hall & Cameron, 2001; Klassen, 2001; Hall, 1999; Xu et al., 2012).

Los grupos estructurales 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 cristalina del mineral, por lo que tienden a entrar en solución fácilmente, como es el caso de los elementos traza (Church et al., 1987).

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.

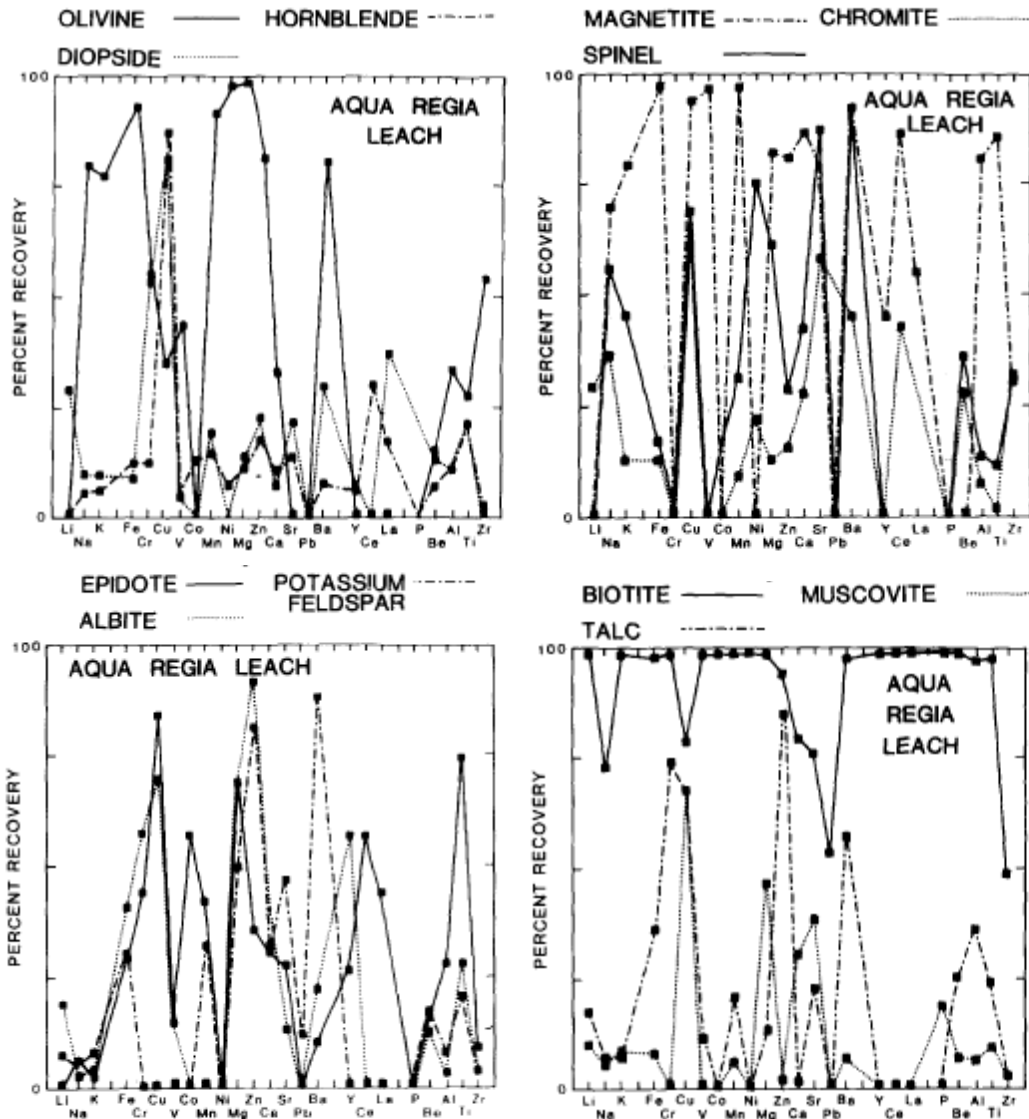
Church et al., (1987) realiza un estudio de disolución por ácido oxálico y agua regia en distintos grupos minerales, donde se comparan los resultados obtenidos con los de digestión total por HF-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>. Los resultados para la disolución por agua regia muestran que es cercana 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 3.4).



**Figura 3.4. 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, espinel, cromita y muscovita prácticamente no fueron atacados por el agua regia. Sin embargo, otros minerales como el olivino posee recuperaciones mayores al 90% para Fe, Mg y elementos traza en posición octaédrica, 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 3.5)

Se recalca la diferencia entre los porcentajes de recuperación entre muscovita y biotita, ya que a pesar de que ambos son filosilicatos, difieren en su estructura. La biotita es trioctaédrica y la muscovita es dioctaédrica.



**Figura 3.5. Porcentaje de disolución de varios minerales, obtenidos al comparar digestión por agua regia relativa la digestión por HF-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> (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 HNO<sub>3</sub> caliente. Además, se estudió la dependencia con la granulometría 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.

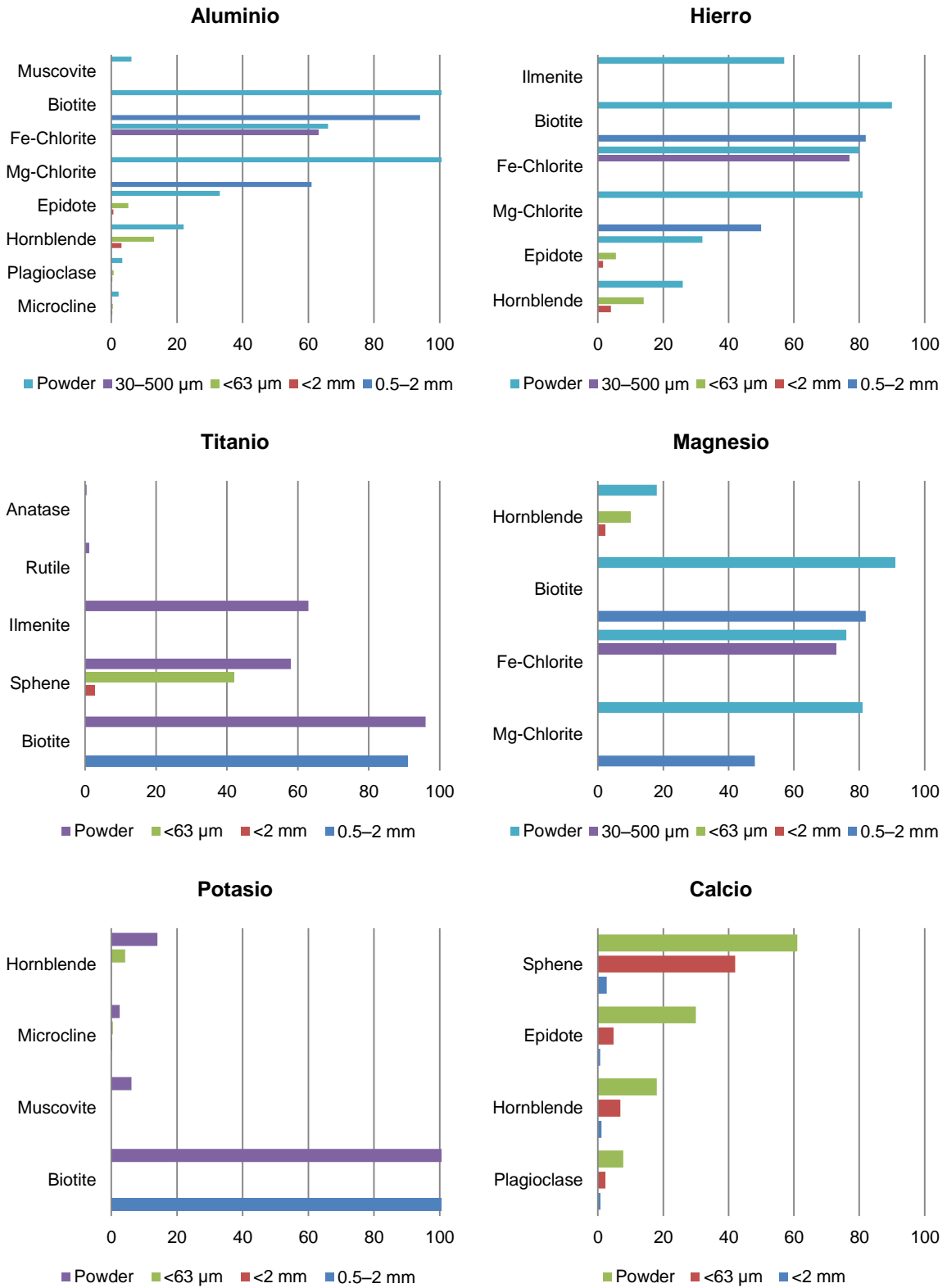
A tamaños del orden de micrones ( $\mu\text{m}$ ), las partículas tienen importantes propiedades de superficie. Estas propiedades tienen consecuencias como un aumento considerable de la solubilidad y un desbalance de la carga superficial lo que las convierte en potenciales sorbentes para especies disueltas. La importancia de las propiedades de superficie aumentan proporcionalmente con el área del material y a su densidad de carga superficial o número de sitios con carga por unidad de superficie.

Las arcillas poseen un alta razón de área/volumen, debido a su tamaño de orden de micrones, lo que favorece las reacciones con soluciones acuosas. 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  $\text{O}^{2-}$  y  $\text{OH}^-$ . Otras razones de la carga neta negativa son las sustituciones isomórfas 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).

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. Los errores varían entre un 10% y un 15% debido a variaciones composicionales de las muestras analizadas (ver Figura 3.6).

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).





**Figura 3.6. Porcentaje de recuperación de elementos por mineral (datos de Snäll & Liljefors, 2000).**

## **4 Análisis de Datos**

### **4.1 Análisis geoquímicos y mapeo de sondajes**

La base de datos consiste en análisis químicos de muestras de sondajes del yacimiento Escondida. Los datos fueron obtenidos por análisis mediante el método analítico ICP-AES por disolución en agua regia de la muestra. Cada muestra corresponde a un compósito de 14 y 16 metros consecutivos, de tal manera de tener muestras puntuales cada 15 metros a lo largo del sondaje. Se cuenta con un total de 15408 datos georreferenciados para 53 elementos mayores y traza. Esta cantidad corresponde a solo una fracción de la base de datos total de más de 35.000 muestras, la cual fue procesada y depurada previamente en el proyecto denominado “Modelamiento Geoquímico Distrito Escondida: Discriminación de Ambientes Hidrotermales, Fase 2: Estudio de Distribución Espacial y Determinación de Criterios de Discriminación de Ambientes Hidrotermales en el Yacimiento Escondida” (Townley et al., 2012; Luca et al., 2012).

La base de datos fue compilada a partir de datos preexistentes y no fue generada para este estudio en particular. Tampoco se cuenta con información acerca de los distintos laboratorios que han producido los datos, sus respectivos protocolos y/o control de ciertos parámetros tales como: tiempo de disolución, pH, temperatura y granulometría.

Los parámetros mencionados anteriormente controlan la estabilidad química de las fases minerales en contacto con el agua regia. Si el tiempo de disolución es muy prolongado, las variaciones del pH pueden llevar a la formación de coloides, los cuales a su vez pueden actuar como sustrato para la sorción o reprecipitación de metales. La temperatura influye en la cinética de la reacción, ya que un aumento de esta implica un aumento en la energía y por lo tanto, una mayor interacción entre las partículas (Kelley et al., 2003).

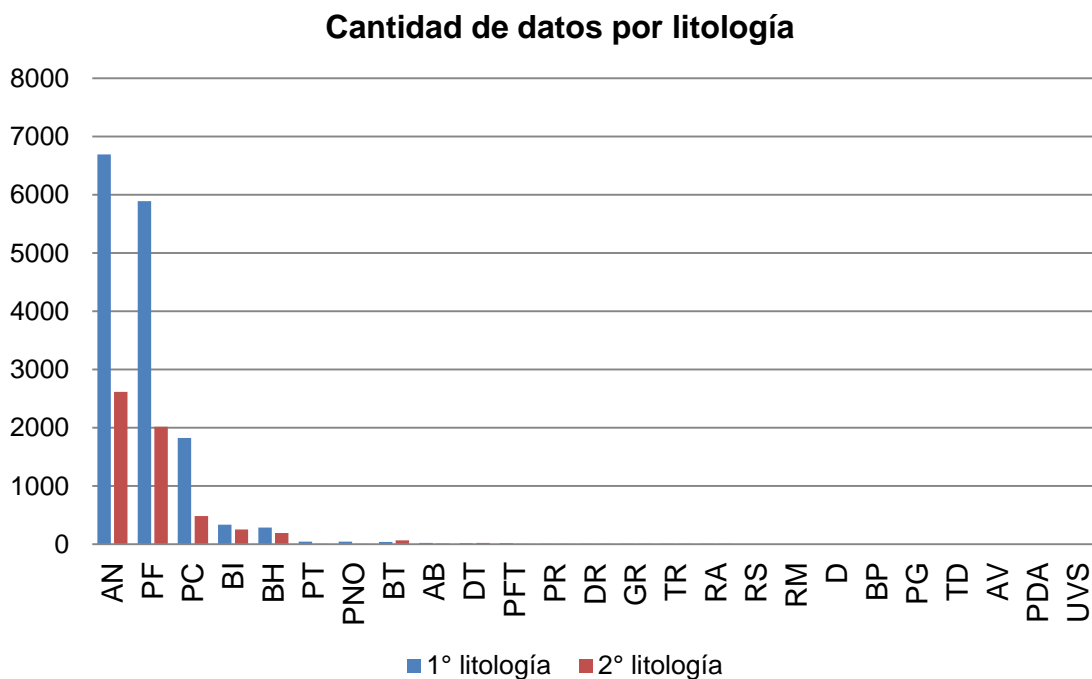
La base de datos geoquímicos se cruza con la información de logueo de sondajes de tal manera de contar con características geológicas como: litología, alteración, zona mineral y abundancia relativa de minerales de alteración. Como el procedimiento de

logueo de sondajes no considera longitudes constantes para la caracterización, se debe realizar un compósito de la información y ajustarla a los tramos definidos para los análisis químicos.

Este compósito de información categórica se realiza considerando las dos longitudes que representen el mayor porcentaje del tramo definido por la base de datos geoquímica. La suma de estas longitudes no necesariamente debe ser 100% del tramo, pero se considerarán aquellas muestras cuya suma sea mayor o igual a un 93% con el objetivo de disminuir la mezcla de información geoquímica. Por ejemplo, si el tramo correspondiente a un análisis químico es de 14 m y el mapeo indica que posee 3 tipos de alteración abarcando 7, 6 y 1 m, respectivamente, solo se considerarán los 2 primeros dado que suman 93% de la longitud total (13 m /14 m).

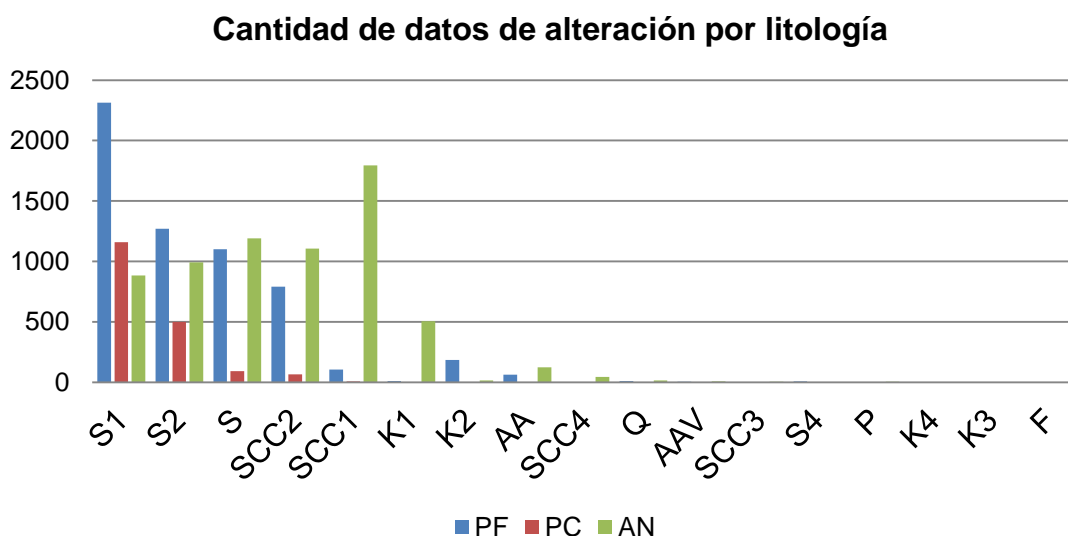
## **4.2 Definición del sistema**

Con la finalidad de acotar las variables del sistema, se definen las características litológicas de las muestras con las que se realizará el análisis (ver Anexo A). Como criterio general, se utilizaron aquellas categorías de litología, alteración hidrotermal y zona de mineralización que presentan mayor cantidad de datos como primer y segundo mapeo por muestra (ver Figura 4.1).



**Figura 4.1. Cantidad de muestras por litología según primera y segunda litología mapeada por tramo (ver Anexo A).**

A pesar de que la litología PC (Pórfido Cuarzífero - 33) presenta una gran cantidad de muestras, solo posee alteraciones sericita-cuarzo y algunas para clorita-sericita, por lo cual se deja fuera del análisis (ver Figura 4.2).

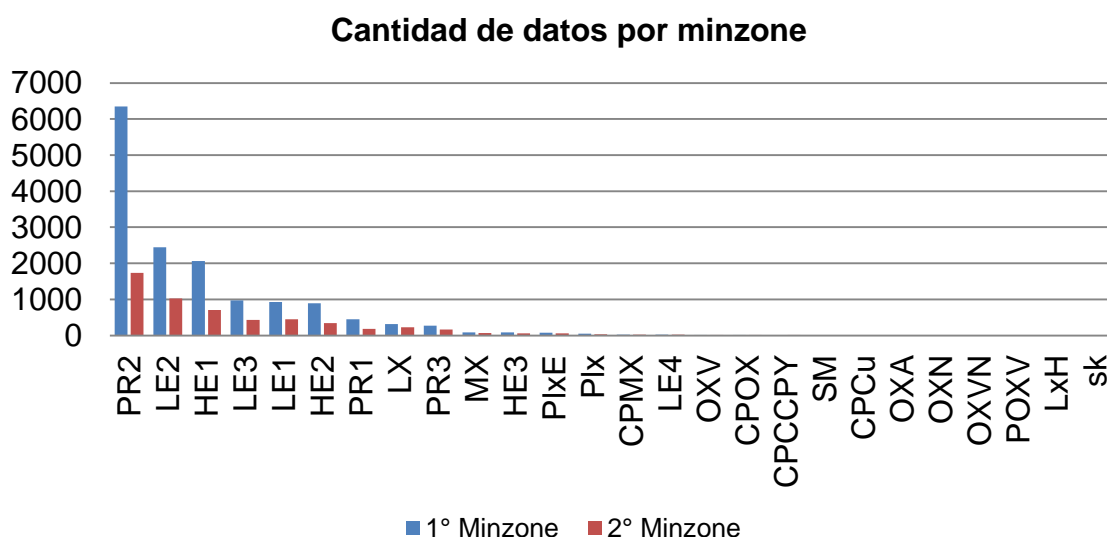


**Figura 4.2. Cantidad de muestras por alteración para las litologías PF (31), PC (33) y AN (50) (Ver Anexo A).**

Otro parámetro importante al momento de definir el sistema en el que se trabajará es la mineralización. La mineralización predominante corresponde a la variable denominada minzone y se agrupa en 3 categorías: alto enriquecido (HE), bajo enriquecido (LE) y primario (PR) (ver Figura 4.3). La zona de HE se caracteriza por la presencia de calcosina, covelina y pirita. La zona de LE se caracteriza por calcosina, covelina, calcopirita, posible bornita y pirita. La zona PR se caracteriza por pirita, calcopirita y/o bornita (ver Tabla 4.1).

**Tabla 4.1. Codificación de zonas mineralógicas.**

Zona mineralógica	Abrev.	Código
<b>Cc + Py</b>	HE1	<b>50</b>
<b>Cc + Cv + Py</b>	HE2	<b>51</b>
<b>Cv + Py</b>	HE3	<b>52</b>
<b>Cc + Cpy + Py</b>	LE1	<b>60</b>
<b>Cc + Cv + Cpy + Py</b>	LE2	<b>61</b>
<b>Cv + Cpy + Py</b>	LE3	<b>62</b>
<b>Cv + Cpy + Bo (+/- Cc, +/- Py)</b>	LE4	<b>63</b>
<b>Py</b>	PR1	<b>72</b>
<b>Cpy - Py</b>	PR2	<b>70</b>
<b>Bo - Cpy (+/- Py)</b>	PR3	<b>71</b>



**Figura 4.3. Cantidad de muestras por zonas de mineralización o minzone (ver Tabla 4.1 para codificación).**

Dado que las muestras pueden tener un máximo de dos alteraciones predominantes, se considerarán solo aquellas cuyos tramos sumen más de un 93%, es decir, las 2 alteraciones representen casi la totalidad de la muestra. Por ejemplo, si el tramo correspondiente a una muestra es de 15 metros y el mapeo indica que posee 3 alteraciones que abarcan 5 metros cada una, esta muestra es descartada porque el porcentaje máximo que alcanzan a cubrir las alteraciones es del 66,6% solamente.

Considerando los criterios anteriormente descritos, se obtiene la base de datos para 43 elementos con un total de 9738 muestras ubicadas espacialmente en el yacimiento Escondida. De estas, 8379 muestras corresponden a tramos de sondajes que presentan solo una alteración mapeada. Las 1359 muestras restantes presentan mezcla de alteraciones, es decir, presentan dos alteraciones mapeadas por tramo (ver Tabla 4.2).

**Tabla 4.2. Cantidad de muestras con única alteración por tramo.**

Alteración hidrotermal	Abrev.	Código	Alteración
Potásico (Sólo Bt secundaria)	K1	30	264
Feld K > Bt	K2	31	122
Clorita-Sericita-Arcillas	SCC1	40	1111
Clorita-Sericita-Cuarzo	SCC2	41	1417
Fílica	S	50	1151
Sericita-Cuarzo	S1	51	2551
Sericita-Cuarzo-Arcilla	S2	52	1706
Argilización Supérgena	AA	61	57
<b>Total</b>			<b>8379</b>

En la Tabla 4.3 se muestran los datos cuyos tramos presentan dos alteraciones distintas. Las alteraciones etiquetadas como 1° alteración corresponden a aquellas que representan un mayor porcentaje del tramo en cuestión y no tienen ninguna connotación genética. Se destaca que las alteraciones que presentan mayor cantidad de muestras con 2 alteraciones son las tipo S, S1, S2, SCC1 y SCC2.

**Tabla 4.3. Cantidad de datos por tramo con mezcla de alteraciones.**

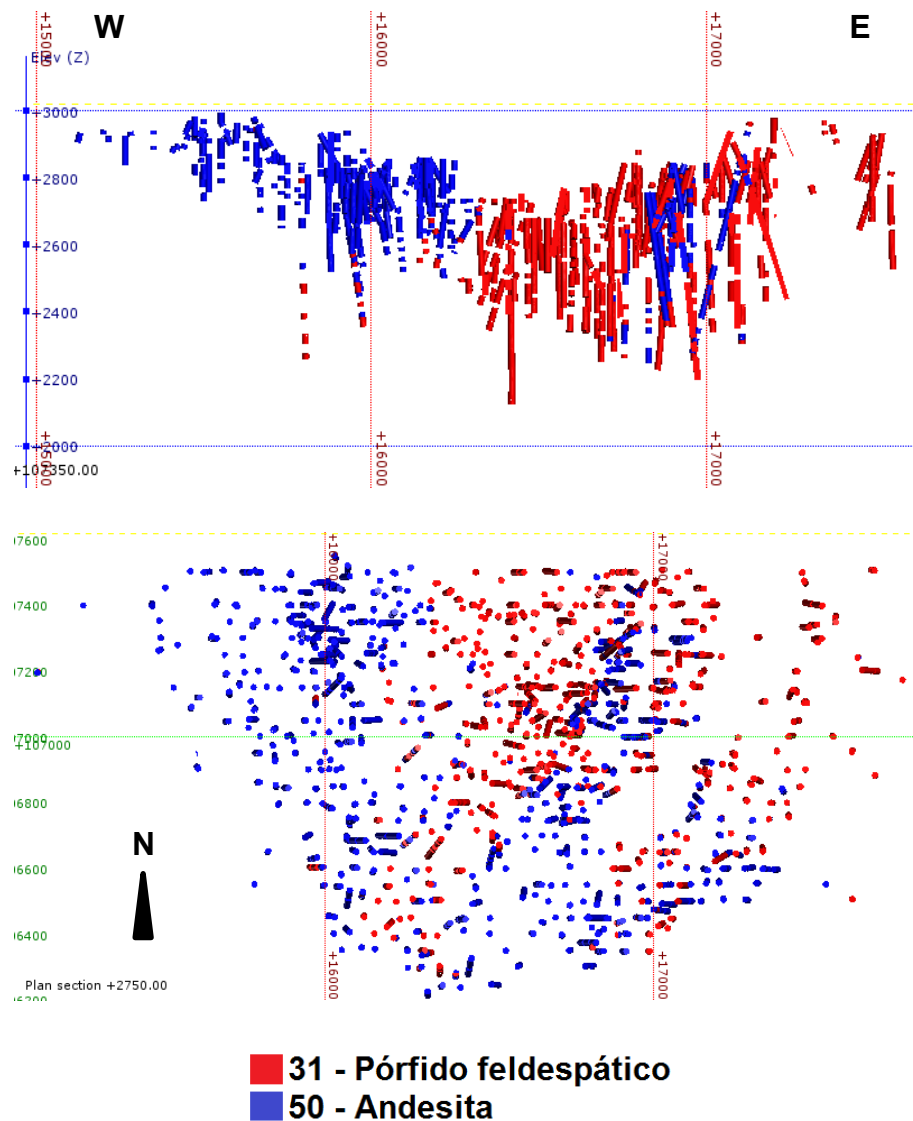
1° alteración	2° alteración									Total
	K1	K2	SCC1	SCC2	S	S1	S2	AA		
K1	0	2	49	38	17	6	2	2	116	
K2	3	0	4	11	12	3	1	0	34	
SCC1	43	1	0	17	122	5	30	19	237	
SCC2	31	12	24	0	19	109	35	0	230	
S	12	7	94	23	0	0	0	22	158	
S1	7	2	10	120	0	0	169	4	312	
S2	1	3	33	41	0	158	0	5	241	
AA	1	0	5	1	16	4	4	0	31	
									1359	

La alteración S (código 50) corresponde a un código de mapeo antiguo el cual caracteriza a la alteración fílica sin hacer distinción de la presencia de arcillas como lo hacen la S1 y S2, es decir, posee información agrupada de la alteración fílica, por lo que será reclasificada al finalizar el análisis.

De esta manera, la base de datos geoquímicos se reduce a 8240 muestras, 7225 para tramos con alteración único y 1015 para tramos con mezcla de 2 alteraciones. Esta base de datos corresponde aproximadamente a un 23% de la base de datos original compilada por Townley et al. (2012) y Luca et al.(2012), dado que solo se consideran las muestras de la zona sur del rajo Escondida que cumplen con los criterios descritos anteriormente.

La distribución espacial de los datos muestra tendencias según litología, alteración hidrotermal y mineralización. Según litología (ver Figura 4.4) el pórfido feldespático se distribuye preferentemente en la zona noreste del yacimiento pudiendo alcanzar mayor profundidad que la andesita, la cual tiende a encontrarse en la zona oeste.

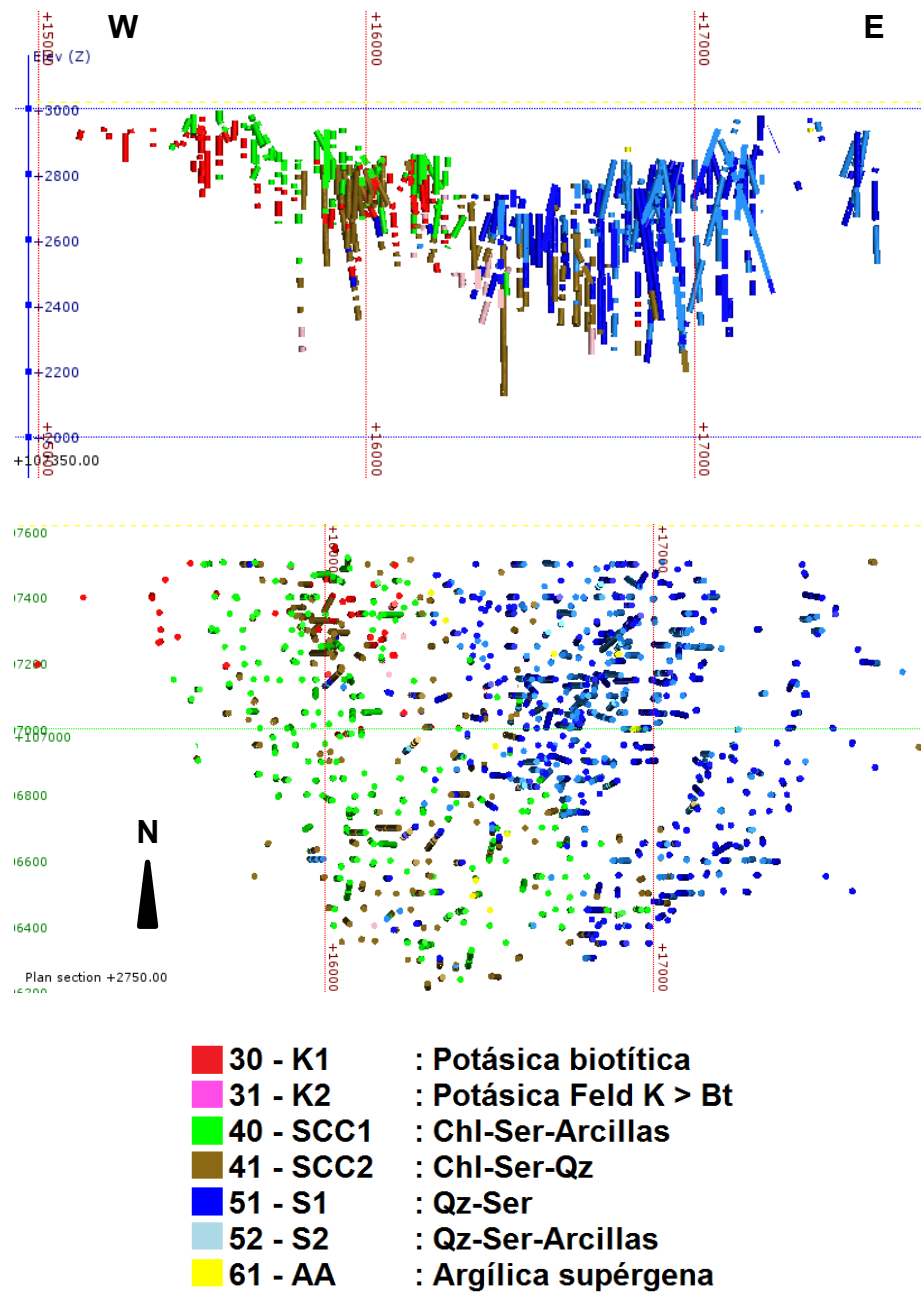




**Figura 4.4. Distribución espacial de los datos geoquímicos según la litología.**

**Arriba: Perfil EW N = 107350 ± 50 m. Abajo: Planta cota = 2750 ± 50 m.**

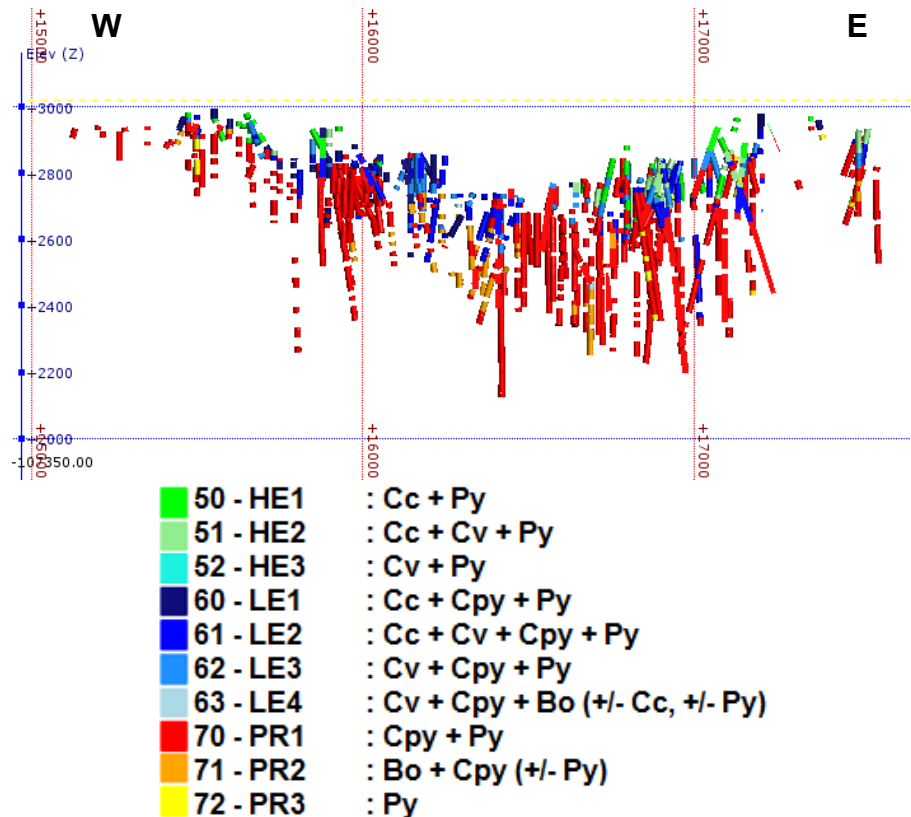
Según la alteración hidrotermal (ver Figura 4.5) es posible identificar tres zonas: Oeste, Central y Este. En la zona Oeste, se encuentran preferentemente las alteraciones SCC1 y SCC2, asociadas a la andesita. La alteración K1 se distribuye en la zona noroeste del yacimiento. En la zona Este, se encuentran las alteraciones S1 y S2 asociadas al pórfido feldespático. La zona Central correspondería a una transición entre la Este y Oeste. En esta se encuentran las alteraciones SCC2 y K2 en contacto en profundidad con las alteraciones S1 y S2. La alteración AA es posible encontrarla en superficie en cualquiera de las tres zonas descritas.



**Figura 4.5. Distribución espacial de los datos geoquímicos según alteración hidrotermal. Arriba: Perfil EW N = 107350 ± 50 m. Abajo: Planta cota = 2750 ± 50 m.**

Al igual que la alteración hidrotermal, es posible definir 3 zonas en función de la distribución espacial de la mineralización (ver Figura 4.6): alto enriquecido (HE), bajo enriquecido (LE) y primario (PR). Estas zonas se caracterizan por presentarse gradualmente a mayor profundidad. La zona de HE (50, 51 y 52) es de baja profundidad y tiende a asociarse al pórfido feldespático en la zona Este. La zona de LE (60, 61, 62 y 63) se encuentran a profundidad intermedia y no presentan una distribución preferencial

según litología o alteración. Por último, la zona PR (70, 71 y 72) se presenta a profundidad alta y corresponde a la más abundante ya que se caracteriza por la presencia predominante de pirita. Al igual que LE, no presenta una tendencia a asociarse con alguna litología o alteración en particular.



**Figura 4.6. Distribución espacial de los datos geoquímicos según mineralización.  
Perfil EW N = 107350 ± 50 m.**

#### 4.2.1 Porcentaje de disolución

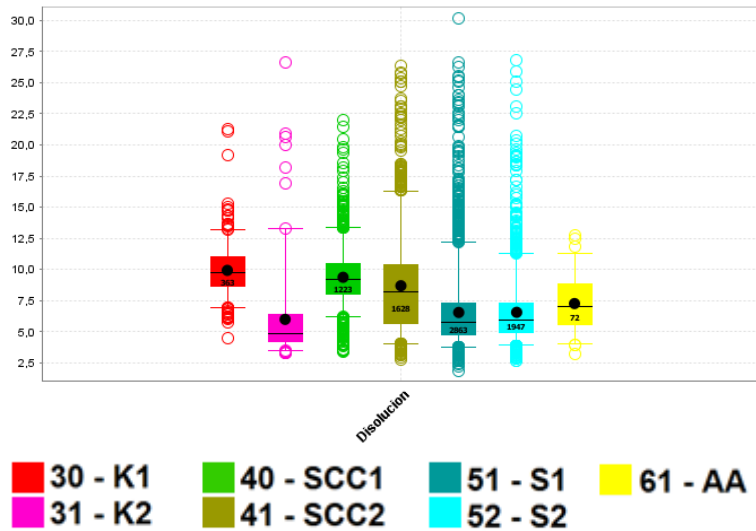
Los valores calculados de la disolución muestran que en promedio se disuelve tan solo un 7.5% de la roca, pudiendo llegar hasta 30% en algunos casos (ver Tabla 4.4). Es decir, la suma de las concentraciones de elementos mayores no corresponde a un 100% como en el caso de los análisis de roca total utilizando ácidos más fuertes como el ácido fluorhídrico.

Cabe señalar, que se realiza la siguiente distinción entre elementos mayores y trazas. Los elementos considerados como mayores son aquellos que constituyen minerales que conforman una roca dentro de un sistema en particular. 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, dada la mineralogía soluble en agua regia, el grupo de los elementos mayores corresponde a: Al, Mg, K, Ca, Na, Fe, S, Cu y Ti. Los elementos de P y Mn, pese a constituir parte de la mineralogía accesoria, sus concentraciones son del orden de ppm por lo que solo se consideran al analizar las variaciones conjuntas y no su valor absoluto (ver Análisis de componentes principales).

**Tabla 4.4. Estadígrafos de porcentaje de disolución calculada.**

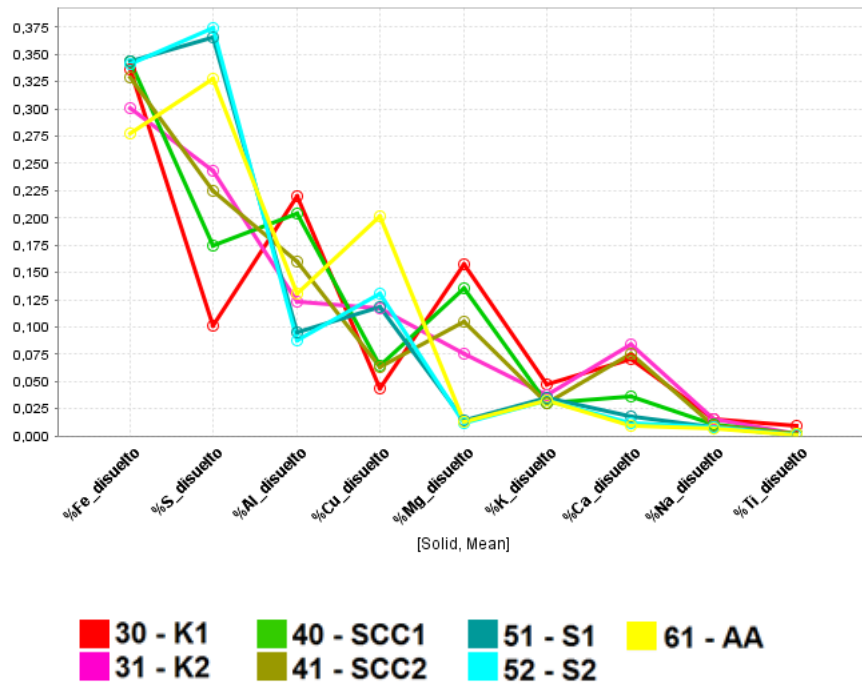
<b>Estadígrafo</b>	<b>% Total disuelto elementos mayores</b>	<b>% Total disuelto</b>
<b>Media</b>	7,54	7,73
<b>Desviación Estándar</b>	3,24	3,31
<b>Mínimo</b>	1,88	1,98
<b>Máximo</b>	30,21	30,27

En la Figura 4.7 se muestran los boxplots de la disolución total calculada para elementos mayores por alteración, evidenciando que el porcentaje de disolución parece no estar controlado por el tipo de alteración hidrotermal asociada, ya que los rangos de variación se sobreponen casi totalmente.



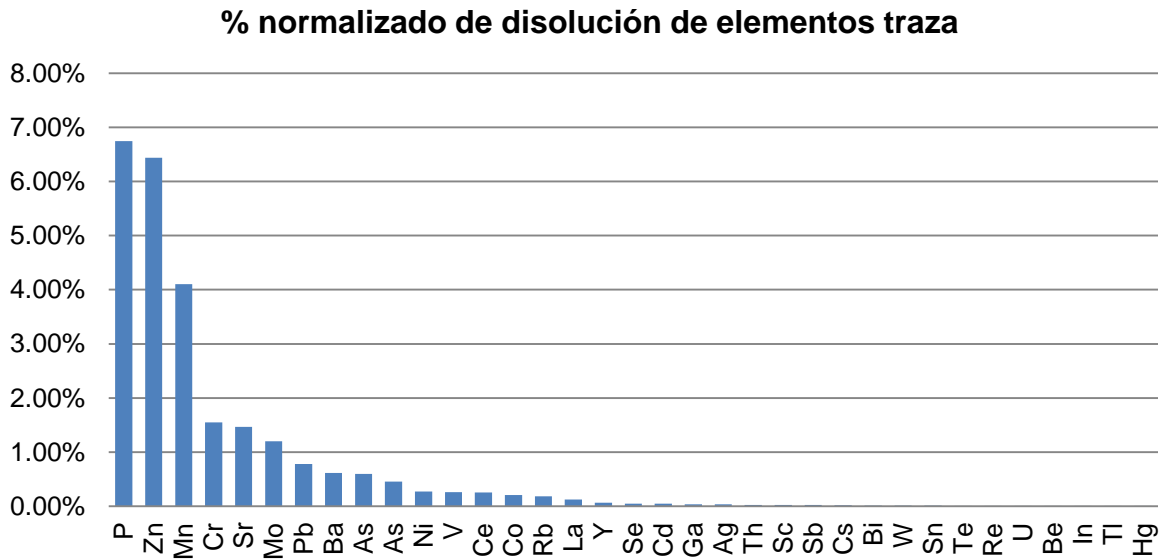
**Figura 4.7. Boxplot de disolución total calculada para elementos mayores.**

Los elementos representan un mayor porcentaje relativo de disolución en orden decreciente son Fe, S, Al, CuT, Mg, K, Ca, Na y Ti. Para el caso del Al, Mg y Ca, el porcentaje de disolución es mayor para las muestras caracterizadas por alteraciones neutras (K1 – 30 a SCC2 – 41) y menor para las ácidas (S1 – 51, S2 – 52 y AA – 61), mientras que el azufre se comporta de manera opuesta (ver Figura 4.8).



**Figura 4.8. Porcentaje relativo promedio de elementos disueltos por alteración.**

La Figura 4.9 muestra que los elementos traza que presentan un mayor porcentaje de disolución corresponde a P, Zn y Mn, lo que puede deberse a la presencia de minerales altamente solubles en agua regia como fosfatos, blenda y óxidos de manganeso.



**Figura 4.9. Porcentaje normalizado promedio de elementos traza disueltos.**

La diferencia entre los porcentajes de disolución calculados por alteraciones se debería al tipo de digestión utilizada. El agua regia disuelve ciertos minerales que pueden darse en distintas proporciones dependiendo de la alteración hidrotermal. Así, la alteración potásica biotítica puede presentar mayor porcentaje de disolución que la potásica feldespática, puesto que la biotita es disuelta fácilmente por el agua regia a diferencia del feldespato y la sericita.

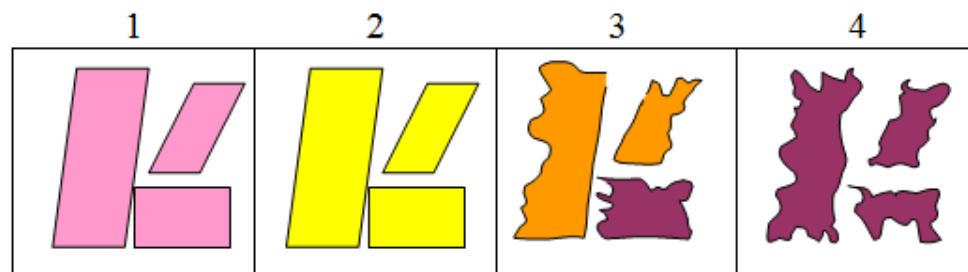
#### **4.2.2 Abundancia de minerales**

La cartilla de logueo de sondajes de Escondida cuenta con una sección en la cual se debe entregar un índice de intensidad de presencia de algunos minerales. La escala consiste en los valores nominales 0, 1, 2 y 3 que indican intensidad nula, débil, moderada e intensa, respectivamente. 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, alteración potásica, cuarzo-sericita, entre otras.

Otros parámetros que se encuentran en esta base de datos son: Alteración de los máficos (AltMaf) y Destrucción de feldespatos (Desfel). Al igual que la intensidad mineral, la alteración de los feldespatos consta de 4 categorías: ausente (0), biotitizados (1), cloritizados (2) y blanqueados (3). La categoría de biotitizados y cloritizados son asociados comúnmente a las alteraciones potásica biotítica y clorítica, respectivamente. La categoría de blanqueados se asocia a las alteraciones fílicas y argílicas supérgenas.

La destrucción de feldespatos consta de 5 categorías: ausente (0), nulo o fresco (1), pseudomorfo (2), destrucción parcial (3) y destrucción total (4). La Figura 4.10 esquematiza el grado de destrucción de los feldespatos.



**Figura 4.10. Esquema de grado de destrucción de los feldespatos.**



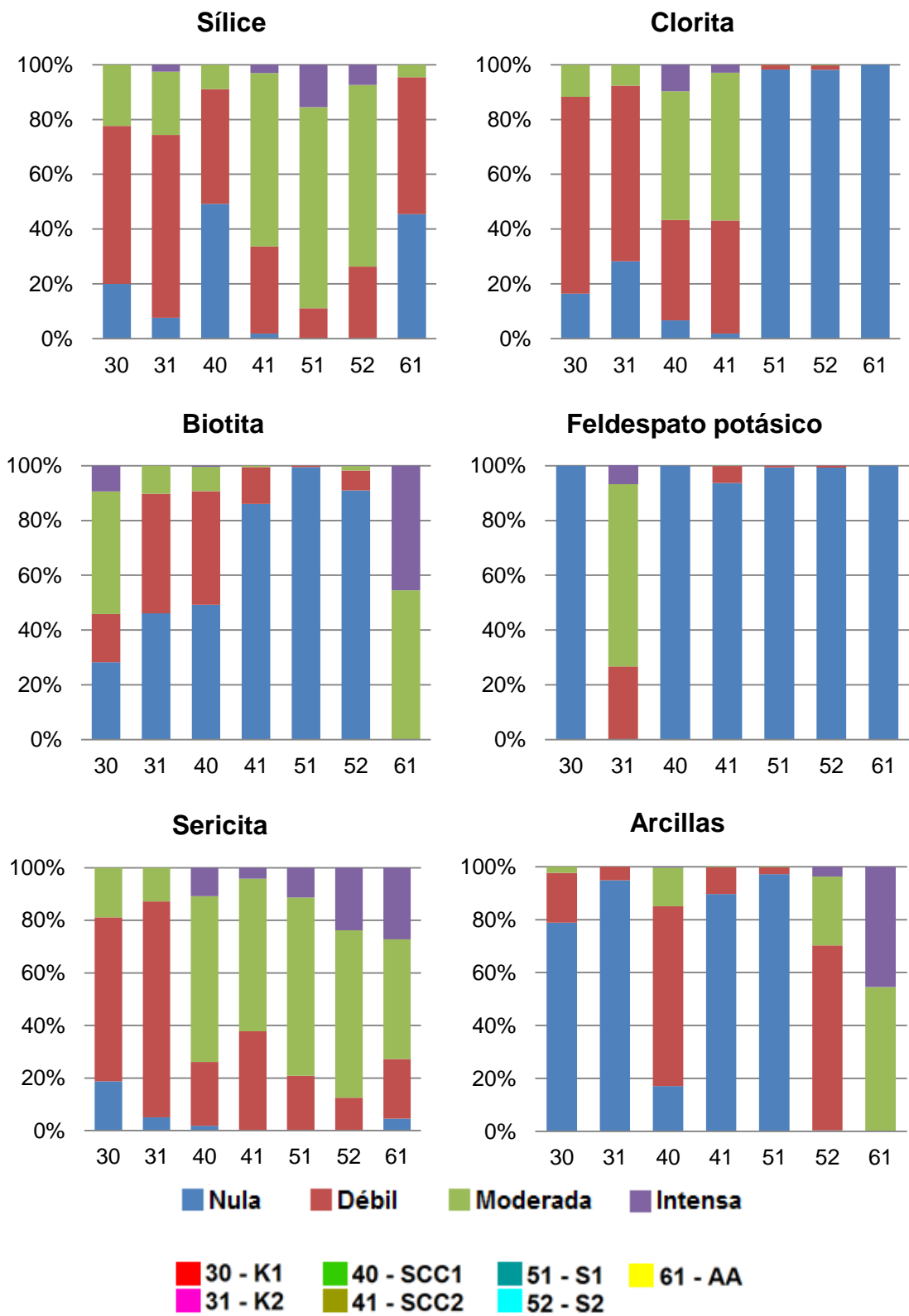


Figura 4.11. Abundancia relativa de minerales en cada alteración hidrotermal.

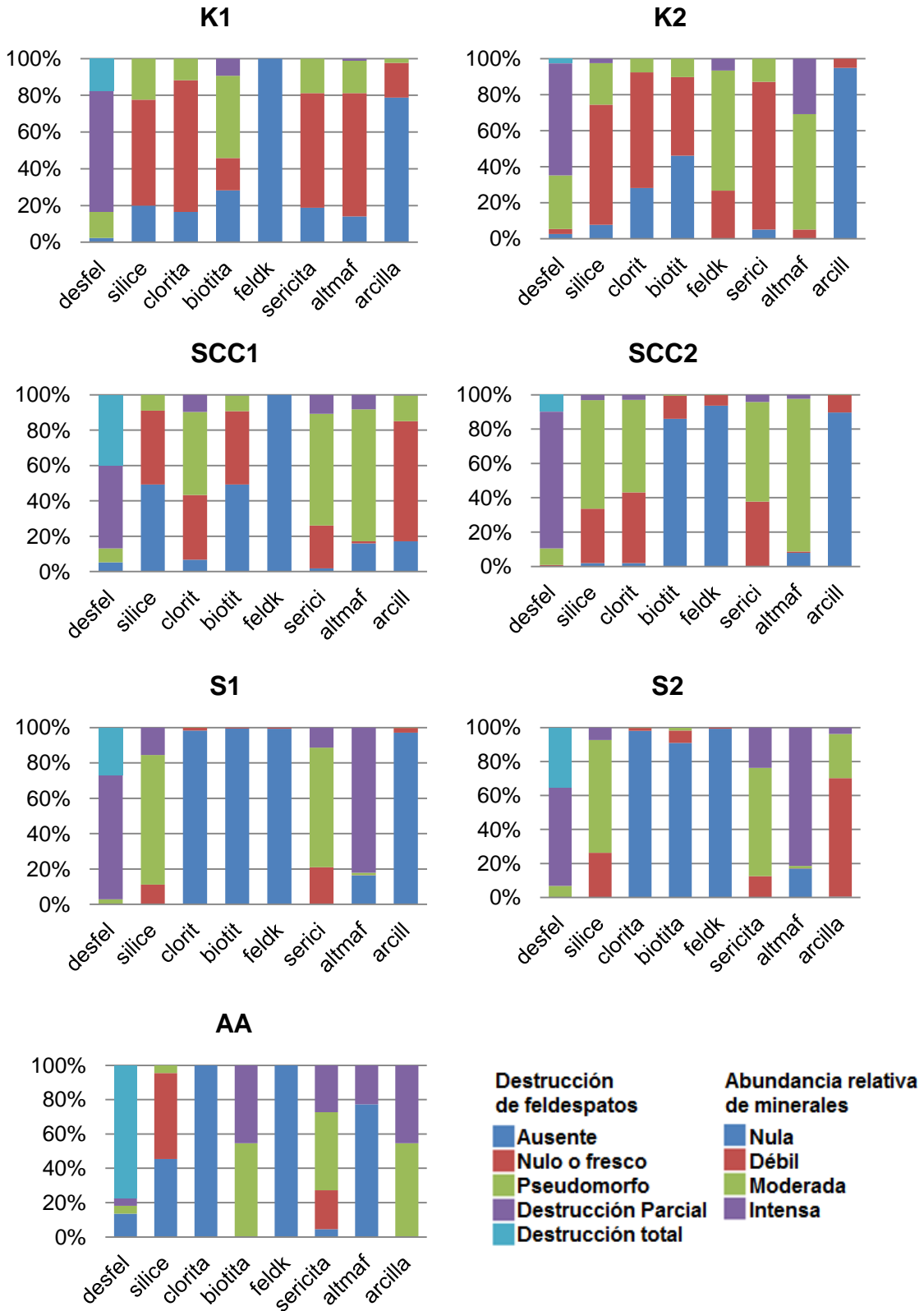
En la Figura 4.11 se muestran las abundancias minerales mapeadas para un total de 3906 muestras. Esta cantidad se debe a que el mapeo no es por tramos de longitud constante y, por lo tanto, para hacerlos coincidir con la base de datos geoquímicos se han considerado solo los mapeos de abundancia que representen la totalidad del soporte geoquímico. En los gráficos, la abundancia relativa de minerales por alteración se normaliza por la cantidad de datos.

La biotita y clorita presentan un mapeo de abundancia medio a alto preferentemente en las alteraciones potásicas y clorita-sericita. Se destaca que la presencia de clorita es esencial para distinguir entre las alteraciones SCC (40 y 41) y S (51 y 52). La intensidad de la biotita es alta en la alteración biotítica. En la alteración argílica supérgena la biotita tiene un mapeo moderado a intenso lo que pone en duda la clasificación relativa de minerales. La biotita es un mineral inestable bajo las condiciones fisicoquímicas de la alteración argílica supérgena, lo que hace improbable encontrar esta asociación en la mayoría de los datos de alteración AA.

La sericita es mapeada con abundancia media a alta en las alteraciones hidrolíticas (fílicas y argílica avanzada), mientras que solo con intensidad media a nula en las alteraciones potásicas (30 y 31). Sin embargo, la intensidad media y baja de sericita en las alteraciones potásica indica que existe una superposición de las alteraciones potásica y sericítica a pesar de haber filtrado la base de datos por tramos con solo una alteración.

La arcilla es mapeada con abundancia baja a media en las alteraciones 40 y 52, las cuales por definición poseen arcillas. Mientras que en la alteración argílica supérgena se presenta con intensidad media a alta dado que es un mineral clave para definir esta alteración.

El sílice es mapeado con intensidades relativamente homogéneas en todas las alteraciones, mientras que el feldespato solo se mapea en la alteración potásica feldespática.



**Figura 4.12. Abundancia relativa de todos los minerales por alteración hidrotermal.**

La alteración potásica biotítica (K1) se caracteriza por la destrucción de feldespatos parcial a total; moderada a intensa biotita y clorita; moderada a baja de sericita y arcillas; y máficos cloritizados y biotitizados, principalmente (ver Figura 4.12).

La alteración potásica feldespática (K2) se caracteriza por destrucción de feldespatos pseudomorfa a parcial, moderada a baja sericita, biotita y clorita, moderado a intenso feldespato potásico, nula arcillas y máficos cloritizados a blanqueados.

La alteración clorita-sericita-arcillas (SCC1) se caracteriza por destrucción de los feldespatos parcial a total; clorita, sericita y arcilla moderada a intensa; biotita moderada a nula; nulo feldespato potásico; y máficos biotitizados y cloritizados.

La alteración clorita-sericita-cuarzo (SCC2) se caracteriza por destrucción de feldespatos parcial a total; clorita, sericita y sílice moderada a intensa; nula a baja presencia de arcillas, biotita y feldespato potásico; y máficos cloritizados.

La alteración cuarzo-sericita (S1) se caracteriza por destrucción parcial a total de feldespatos; nula clorita, biotita, feldespato potásico y arcillas; moderada a abundante sericita y sílice; y máficos blanqueados.

La alteración cuarzo-sericita-arcillas (S2) se caracteriza por destrucción parcial a total de los feldespatos; nula clorita, biotita y feldespato potásico; baja a moderada sílice, sericita y arcillas; y máficos blanqueados.

La alteración argílica supérgena (AA) se caracteriza por una destrucción total a parcial de los feldespatos; nula clorita y feldespato potásico; baja a moderada sílice y sericita; moderada a intensa arcilla y biotita; y máficos blanqueados.

### **4.3 Análisis univariable**

Los histogramas (ver Anexo A: Histogramas por alteración para elementos mayores y traza) muestran que la distribución de los elementos se asemeja a una lognormal. Además, existen algunos elementos mayores y traza que presentan dos poblaciones bien definidas y que coinciden con dos grupos de alteraciones hidrotermales:

alteraciones neutras y ácidas. Las primeras la conforman las alteraciones potásicas (30 y 31) y las sericita-clorita (40 y 41), y en las segundas se encuentran las alteraciones cuarzo-sericita (50, 51 y 52) y argílica supérgena (61).

Entre los elementos mayores destacan Mg, Al, Ca, P y Mn (ver Figura 4.13), y en los elementos traza lo hacen Zn, Be, Ga, Sc, V e Y (ver Figura 4.14).

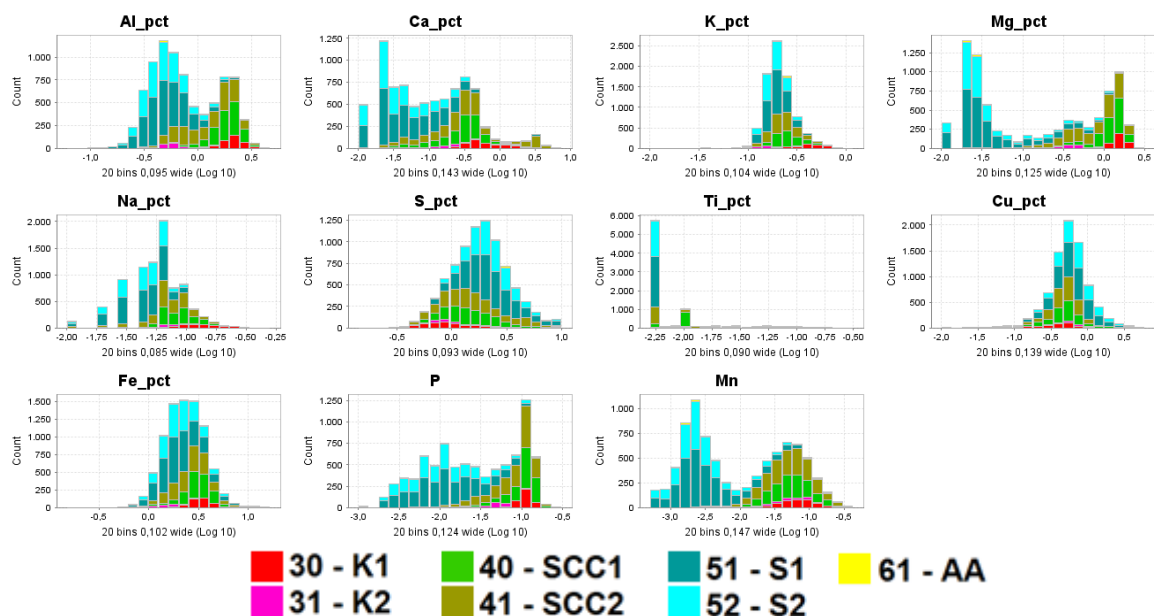
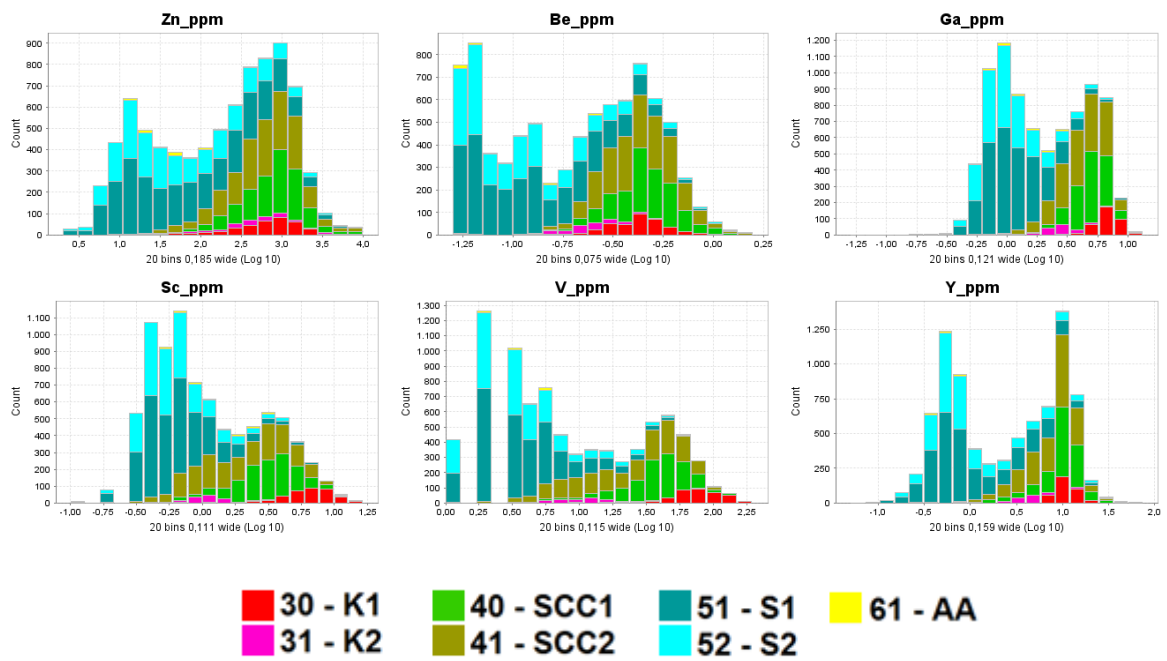


Figura 4.13. Histogramas de elementos mayores por alteración hidrotermal.



**Figura 4.14. Histogramas de algunos elementos separados por alteración hidrotermal.**

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 corresponde al 5% de los datos, y el bigote superior al 95% de estos. Los datos graficados como círculos son aquellos que se encuentran fuera de rango entre 5 y 95%.

Las alteraciones a pH neutro presentarían mayores concentraciones de Al, Mg, Ca, Na, Ti, Mn, P, Zn, Ce, Rb, V, Y, Th y Be, mientras que las alteraciones ácidas presentan mayor concentración de S (ver Figura 4.15).

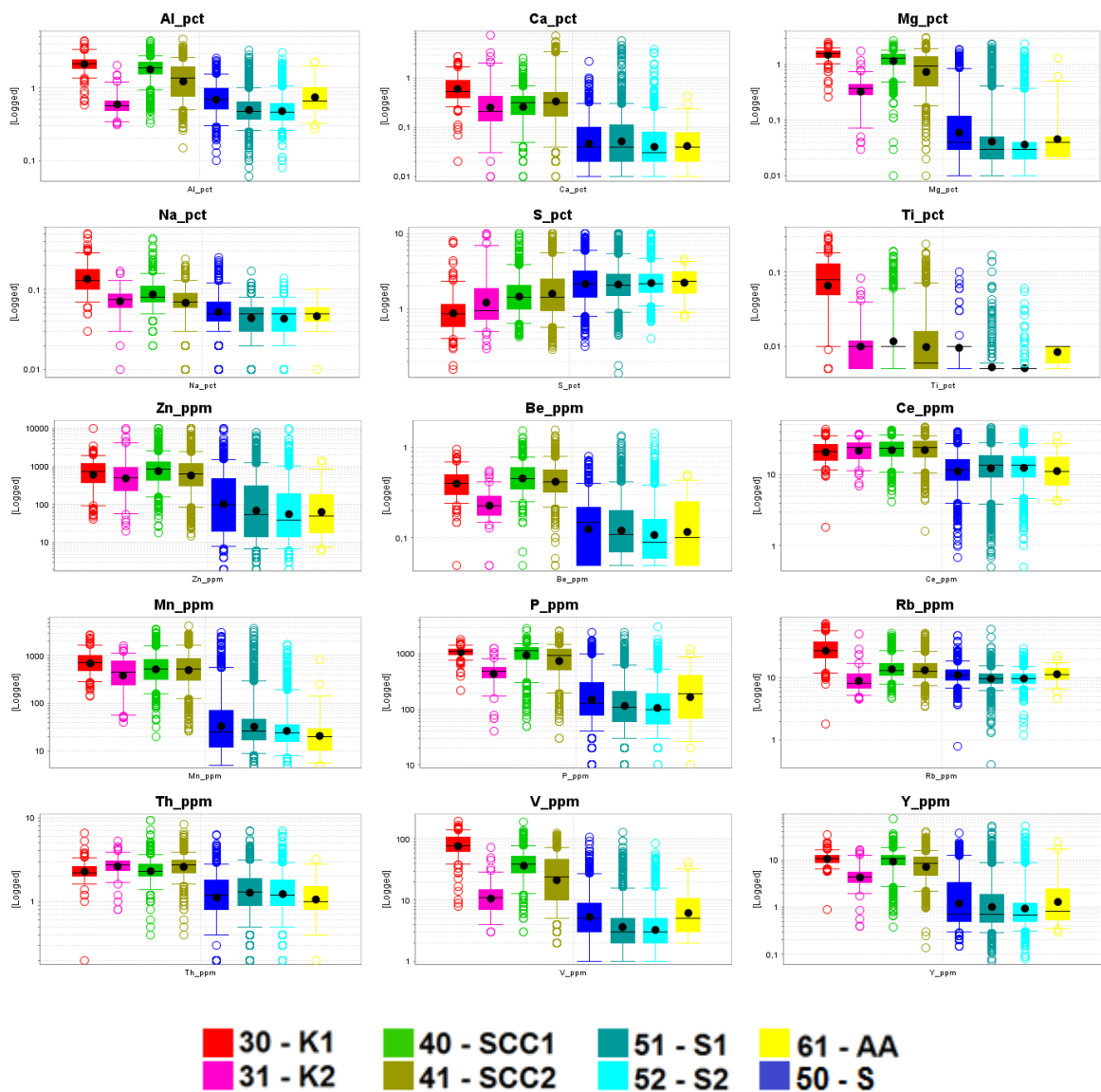


Figura 4.15. Boxplots con eje logarítmico de elementos por alteración hidrotermal.

#### 4.4 Depuración de base de datos geoquímicos

Según estudios previos realizados con la misma base de datos (Townley et al., 2012; Luca et al., 2012), existen variables que fueron eliminadas debido a no cumplir ciertas condiciones.

En este estudio, se procede a realizar un análisis exploratorio de datos usando las siguientes herramientas: Histogramas de frecuencia y acumulados, cálculo de estadígrafos básicos y medidas de dispersión, y matriz de correlación.

Los histogramas de frecuencia (ver Anexo A) evidencian que existen ciertos elementos cuyas concentraciones son casi constantes, lo que se puede observar también en los estadígrafos de rango y rango intercuartil cercanos a cero. De esta manera, se descartan los siguientes elementos: Au, B, Hf, Hg, Nb, Ta y Zr. Además, algunos elementos, Li y Au, poseen más del 20% de sus datos en blanco, lo que quiere decir que no se posee información y son eliminados (ver Anexo ).

De este modo, la base de datos geoquímicos final consta de un total de 45 variables. Cabe destacar que existen elementos que poseen más de una columna como Cu\_ppm, CuS y CuT y As\_ppm y As\_Tot. Con lo cual se contaría con información de 42 elementos por cada muestra. En el caso del Cu, se decide trabajar con el CuT porque representa el contenido total de cobre en la muestra y es uno de los principales elementos presente en los minerales solubles en agua regia, mientras que para el As se considera el soluble (As ppm) ya que el total no está disponible para todas las muestras.

Comúnmente, otro factor importante a considerar para disminuir el número de variables es la correlación entre elementos. Una correlación muy alta indicaría que hay elementos que presentan una relación lineal entre ellos y estarían entregando información redundante. Los pares de elementos con mayor correlación se muestran en la Tabla 4.5. Sin embargo, se prefiere no eliminar estos elementos antes del análisis ya que podrían presentar un comportamiento favorable para el objetivo de éste estudio.

**Tabla 4.5. Elementos con índice de correlación superior o igual a 0.93.**

<b>Elementos</b>	<b>Índice de correlación</b>
<b>Ce-La</b>	0.98
<b>Ga-Mg</b>	0.94
<b>Li-Mg</b>	0.93
<b>V-Sc</b>	0.94



Finalmente, la base de datos geoquímicos constaría de un total de 8240 muestras en el espacio con información de concentración para 42 elementos químicos, 10 mayores: Al, Ca, Na, K, Mg, Fe, S, Cu, P y Mn; 32 elementos traza y su información de mapeo: litología, alteración hidrotermal, minzone y abundancia relativa de minerales.

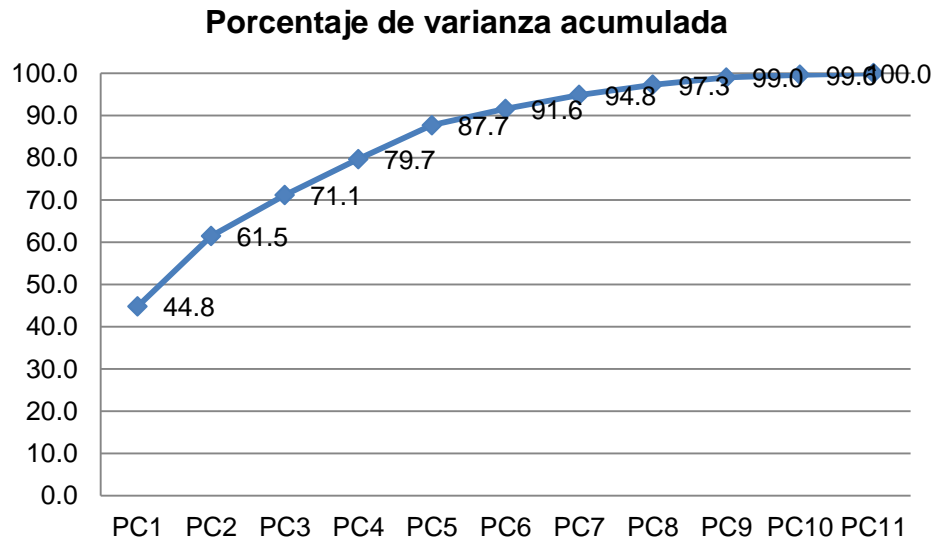
La mineralogía que se considerará para el estudio de las alteraciones hidrotermales será detallada más adelante en la sección de análisis mineralógico.

#### **4.5 Análisis de componentes principales**

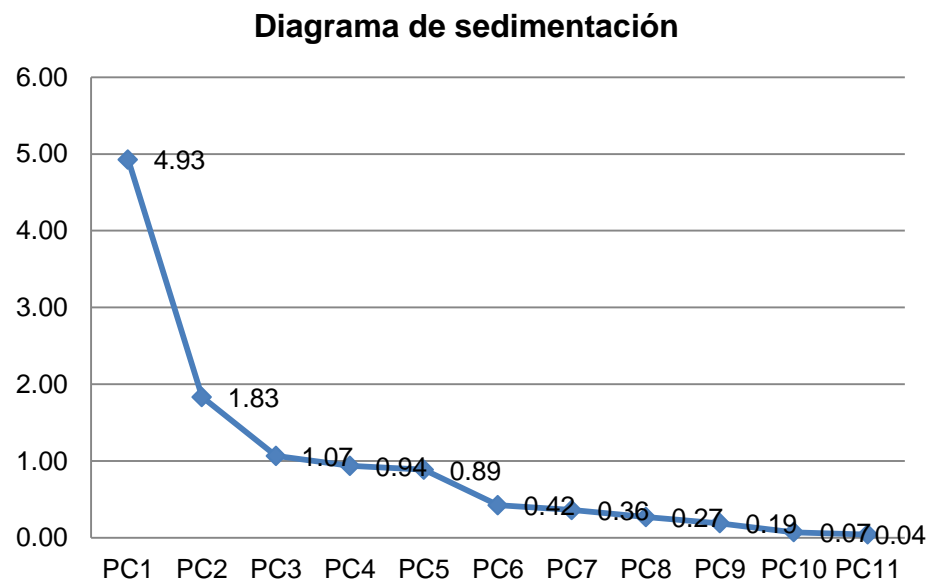
El análisis de componentes principales (ACP) busca reducir el número de variables determinando vectores propios cuyos valores propios describan la máxima varianza en todas las variables (ver Anexo A: Componentes principales). El ACP permite describir y analizar las relaciones entre varias variables, jerarquizando la información en factores ortogonales. Este análisis se realizará para los elementos mayores y trazas por separado.

##### **4.5.1 Elementos mayores**

En la Figura 4.16, se muestra que las 4 primeras componentes principales explican un 79.7% de la varianza, mientras que la Figura 4.17 muestra que solo las primeras 3 poseen valores propios asociados mayores a 1.



**Figura 4.16. Varianza acumulada según ACP de elementos mayores.**

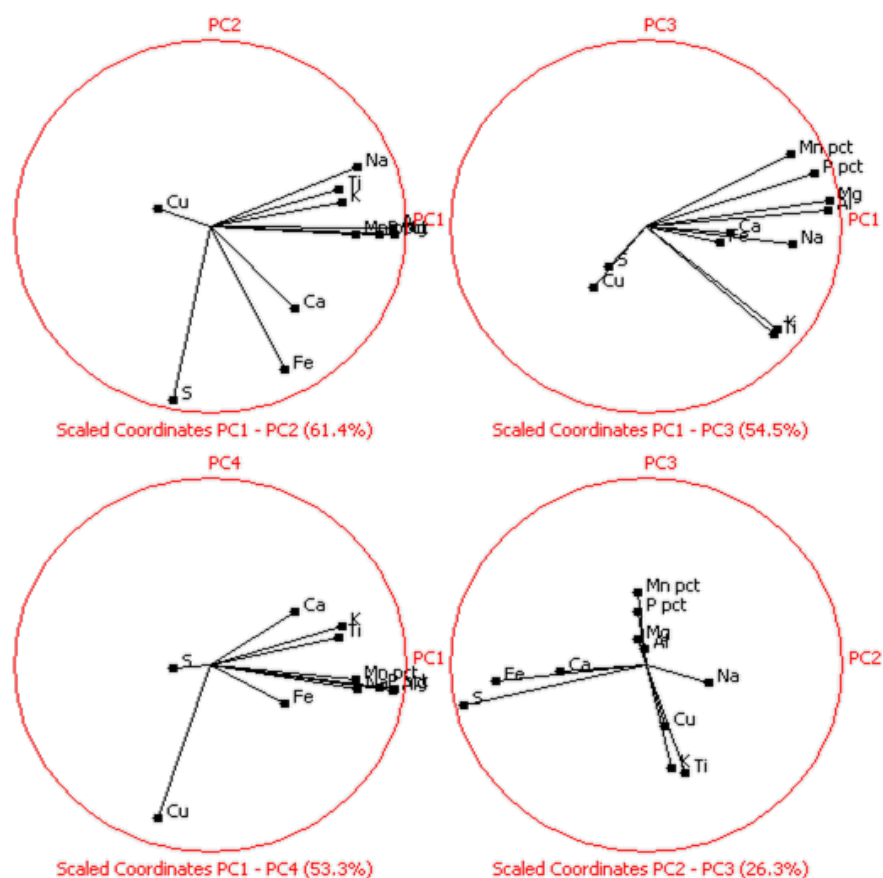


**Figura 4.17. Diagrama de sedimentación para elementos mayores.**

Los coeficientes de correlación entre los elementos mayores indican que existe una fuerte correlación entre dos grupos de elementos (ver Anexo A). Por un lado se encuentran Al, Mg, K, Ti, Na, P y Mn, y por otro, Fe, S y Ca. El primer y segundo grupo se correlaciona fuertemente con las componentes principales 1 y 2, respectivamente. Los círculos de correlación muestran una proyección de la esfera de las variables en dos componentes, representadas por un punto dentro de un círculo unitario. Si la

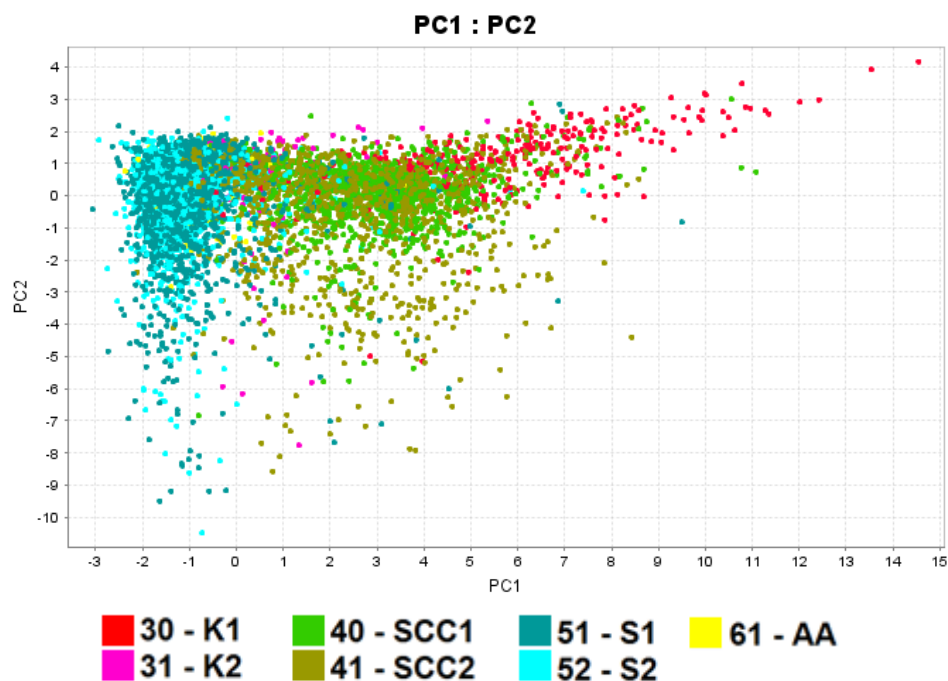
distancia entre la proyección de las variables es baja entonces su correlación es alta, sin embargo, no siempre la proximidad en las proyecciones implica una proximidad en la esfera, a menos que las proyecciones se encuentren cerca de la circunferencia del círculo.

En la Figura 4.18, se resalta la relación entre los elementos mayores. Se destaca el grupo de elementos conformado por Al, Mg, K, Ti, Na, Mn y P, los cuales muestran una alta correlación entre ellos asociándose con el primer factor. Además, K y Ti muestran un comportamiento conjunto pudiendo alejarse de las demás proyecciones. El grupo de S, Fe y Ca tienen una correlación baja con el grupo anterior, y se asocia con el segundo factor. Por su parte, el Cu parece tener un comportamiento inverso con el resto de los elementos, y no se explica completamente por las primeras 3 componentes principales.



**Figura 4.18. Círculos de correlación para elementos mayores.**

El diagrama de dispersión (ver Figura 4.19) entre el primer y segundo factor resalta que la primera componente es capaz de clasificar los datos en 3 grupos. El primer grupo presenta los valores más altos dentro del PC1 y corresponde principalmente a la alteración K1, mientras que el segundo grupo corresponde a los valores de PC1 menores a cero y se caracteriza por las alteraciones fílicas S1 y S2. El tercer grupo se encuentran las alteraciones SCC1, SCC2 y K2, y corresponderían a una zona transicional entre los dos grupos mencionados anteriormente.



**Figura 4.19. Diagrama de dispersión entre PC1 y PC2. Los colores indican alteraciones hidrotermales.**

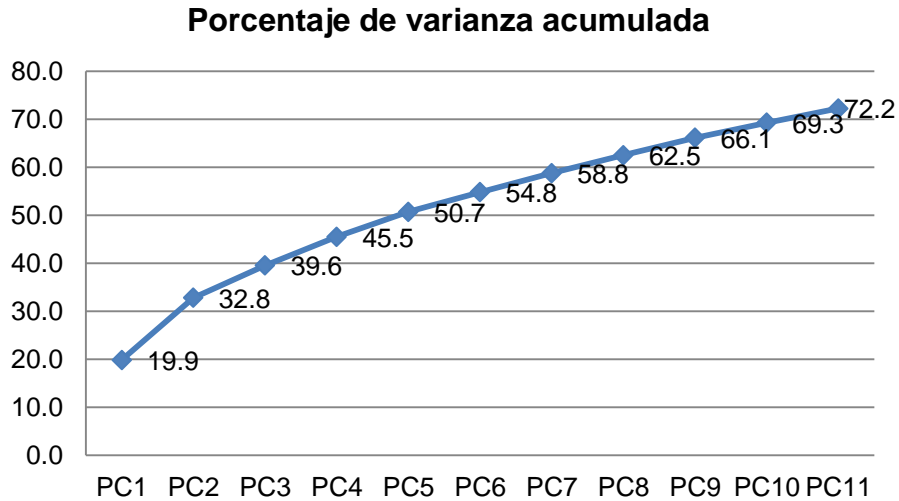
El comportamiento conjunto de los elementos mayores puede reflejar directamente la mineralogía de la cual provienen. El grupo de elementos asociados con la PC1, muestran un comportamiento capaz de separar las alteraciones neutras de las hidrolíticas. El Al, Mg, K, Ti, Mn y P se encuentran en mayor proporción en las alteraciones potásicas y sericita-clorita, que en las alteraciones fílicas. Esto puede reflejar el control mineralógico que ejercerían los filosilicatos de biotita, clorita y óxidos de hierro como magnetita. Por otro lado, el grupo de Fe, S y Ca no muestran una clasificación asociada a la PC2. Esto puede deberse principalmente a que los

elementos no muestran una correlación total con esta componente, lo que se explicaría por las múltiples proveniencias de estos elementos, como sulfuros, sulfatos, carbonatos, óxidos e hidróxidos de hierro, entre otros. De esta manera, el comportamiento de los elementos mayores se relacionaría con la composición de aquellos minerales propios de algunas alteraciones hidrotermales debido a los efectos de la digestión por agua regia.

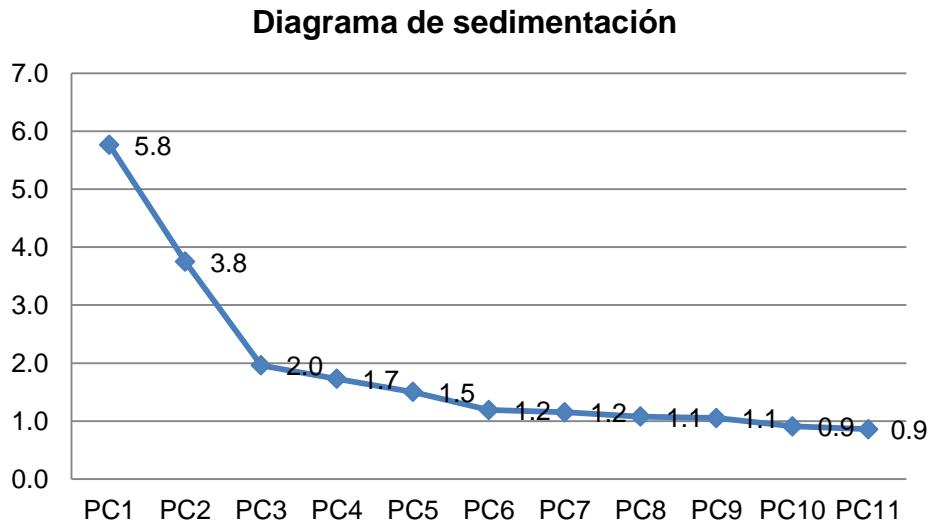
#### **4.5.2 Elementos traza**

La mayoría de los elementos traza muestran un comportamiento que no se correlaciona con las características de logueo de sondajes como la litología, alteración o minzone, y parecen distribuirse de forma aleatoria en el yacimiento. Sin embargo, existen algunos elementos (ver Análisis univariable) como Zn, Be, Ga, Sc, V e Y que presentan una partición preferencial según la alteración presente en la roca. Se eliminaron del análisis aquellos elementos que presentan un índice de correlación mayor a 0.94% (ver Anexo ), de esta manera solo se consideran 29 elementos.

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 4.20 se muestra que el porcentaje de varianza acumulada por las primeras 11 componentes solo alcanza el 72.2%. Además, en la Figura 4.21 muestra que los valores propios son inferiores a la unidad a partir del décimo factor.



**Figura 4.20. Varianza acumulada según ACP de elementos traza.**



**Figura 4.21. Diagrama de sedimentación para elementos traza.**

A pesar de la gran cantidad de variables, los círculos de correlación muestran que existen elementos que se relacionan fuertemente entre sí y con los primeros factores. En la Figura 4.22, se observa que las proyecciones de algunos elementos dentro de los círculos de correlación se relacionan fuertemente entre ellos y con la PC1, como: Ce, Be, Ce, Th, Y, Cs, Ga, Rb y V. El Zn, que es el elemento que posee una mayor concentración relativa a los demás, se correlaciona levemente con la PC1, sin embargo, también lo hace con otras componentes lo que habla de su gran dispersión dentro del yacimiento.

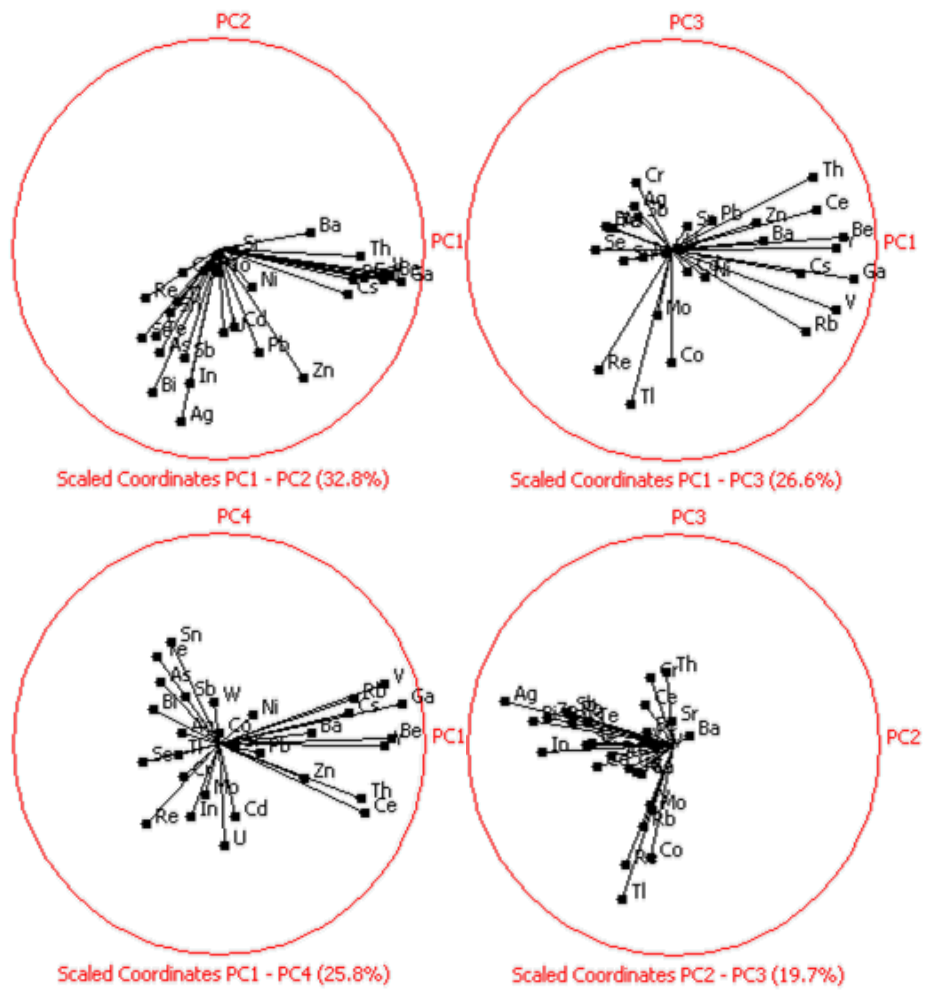
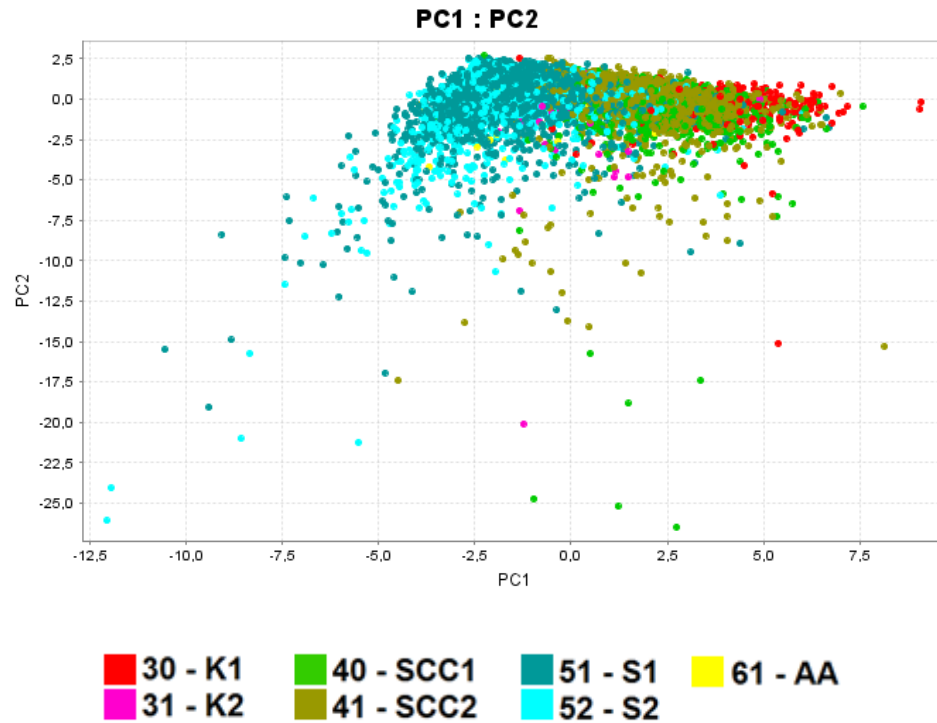


Figura 4.22. Diagramas de componentes principales para elementos traza.

Al igual que el primer factor del ACP para elementos mayores, el primer factor de los elementos clasifica las alteraciones en tres grupos: potásica biotítica (K1), fílicas (S1 y S2) y transicionales (SCC1, SCC2 y K2) (ver Figura 4.23).



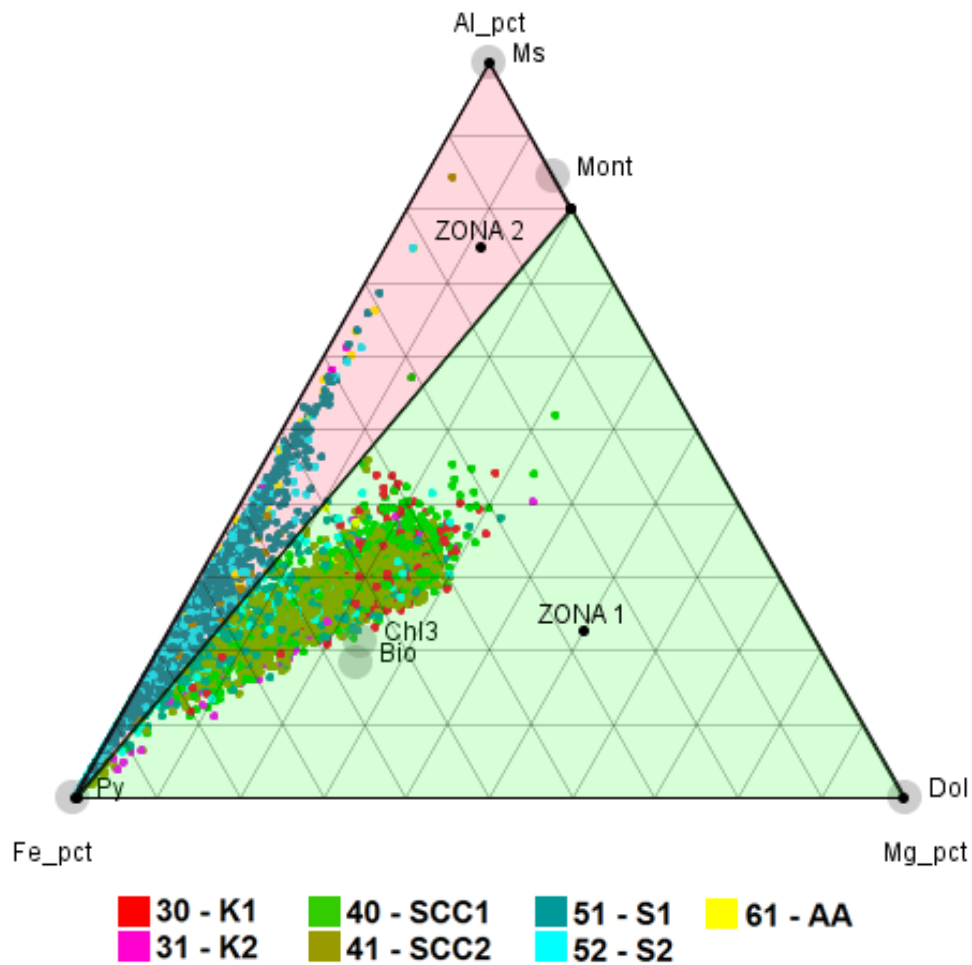
**Figura 4.23. Diagrama de dispersión entre PC1 y PC2. Los colores indican alteraciones hidrotermales.**

#### **4.6 Clasificación Previa**

En estudios anteriores (Townley et al., 2012) esta base de datos fue clasificada utilizando parámetros construidos a partir de la representación gráfica del comportamiento de los elementos químicos. Esta clasificación reagrupa las alteraciones hidrotermales según una mineralogía teórica. A continuación se describen los 3 pasos de clasificación.



1. Diagrama de clasificación Al-Fe-Mg: La línea caracterizada por la razón  $Al/(Mg+Al)=80\%$  divide el triángulo en dos zonas, denominadas zona 1 (>biotita, >clorita, <sericita) y zona 2 (>sericita, arcillas), ambos con piritita. Esta etapa es capaz de clasificar la base de datos geoquímicos con una eficiencia del 92,4% (ver Figura 4.24).



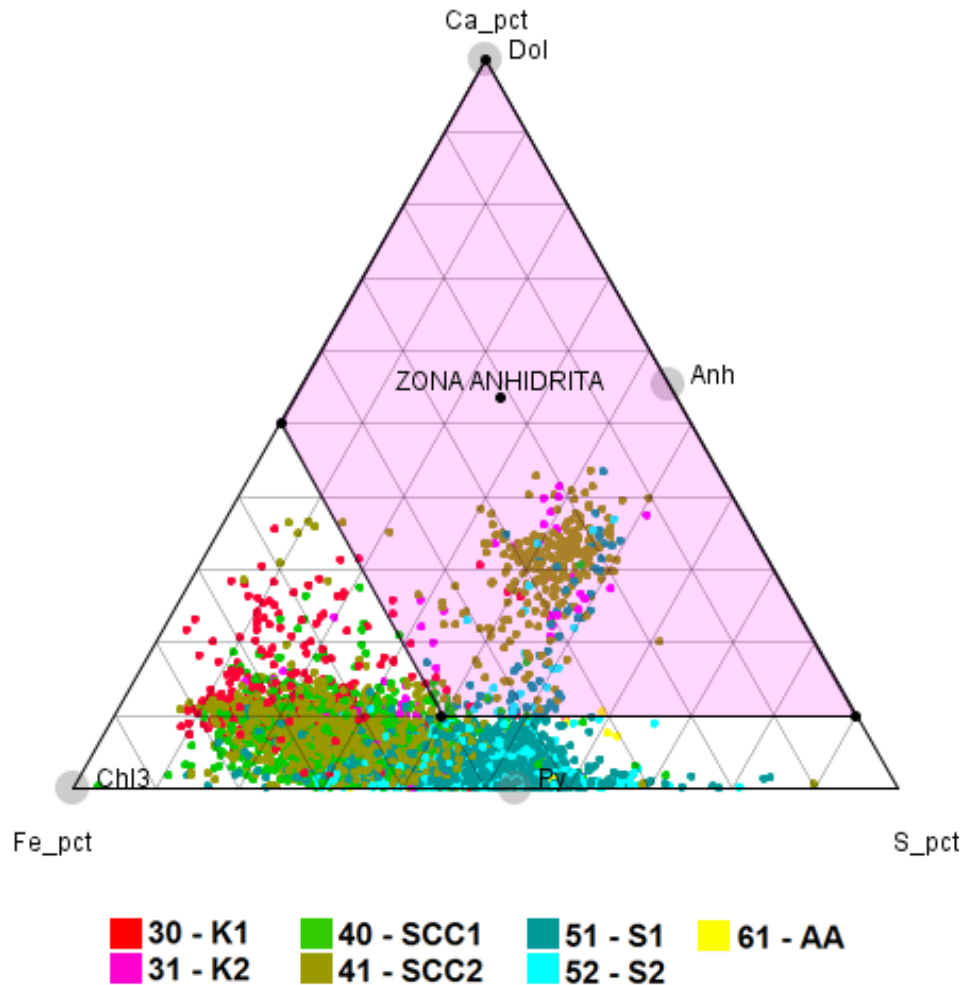
**Figura 4.24. Diagrama de clasificación Al-Fe-Mg (Townley et al., 2012).**

2. Diagrama de clasificación Ca-Fe-S: Se divide el triángulo en dos zonas según los siguientes criterios:

$$\frac{Ca}{(Ca + Fe + S)} > 10\%$$

$$\frac{Fe}{Ca + Fe + S} < 50\%$$

De esta manera, es posible distinguir aquellas muestras que teóricamente contendrían anhidrita de las que no (ver Figura 4.25).



**Figura 4.25. Diagrama de clasificación Ca-Fe-S (Townley et al., 2012).**

3. Diagrama de clasificación  $(Al+K)/(Na+Ca+Mg)$  vs  $Sc*V$ : Este diagrama destaca 4 zonas bien definidas (ver Figura 4.26): zona de alteración sericita-cuarzo-arcillas, clorita-sericita-potásica, potásica y con anhidrita/yeso. El criterio propuesto es que aquellas muestras cuyo producto  $Sc*V$  sea mayor a 250 serían clasificados como alteraciones potásicas.

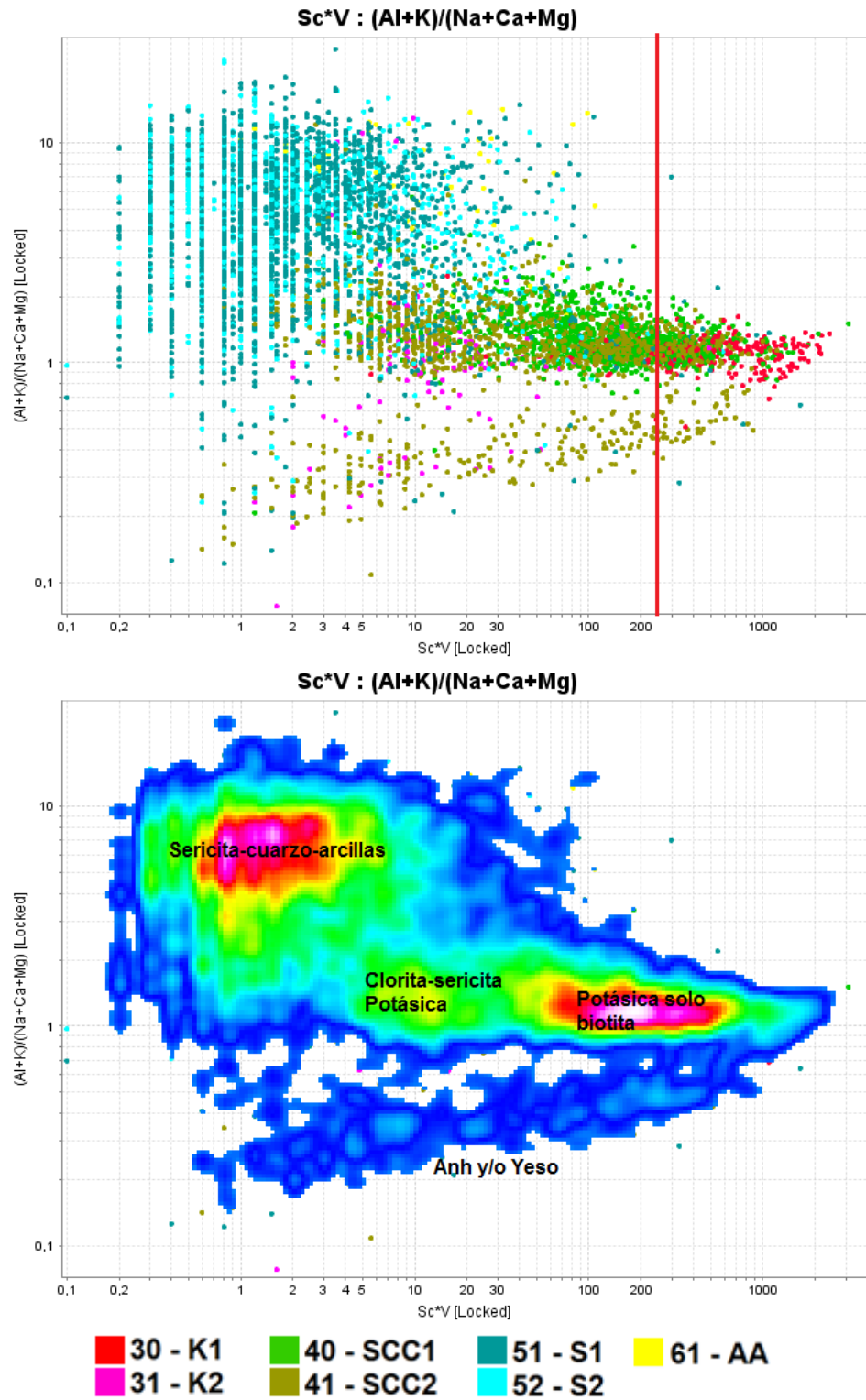


Figura 4.26. Diagrama de discriminación entre alteraciones usando índice  $(Al+K)/(Na+Ca+Mg)$  vs  $Sc*V$ . Arriba se indica con una línea roja el límite para la clasificación como alteración potásica. Abajo se indica la densidad de datos (Townley et al., 2012).

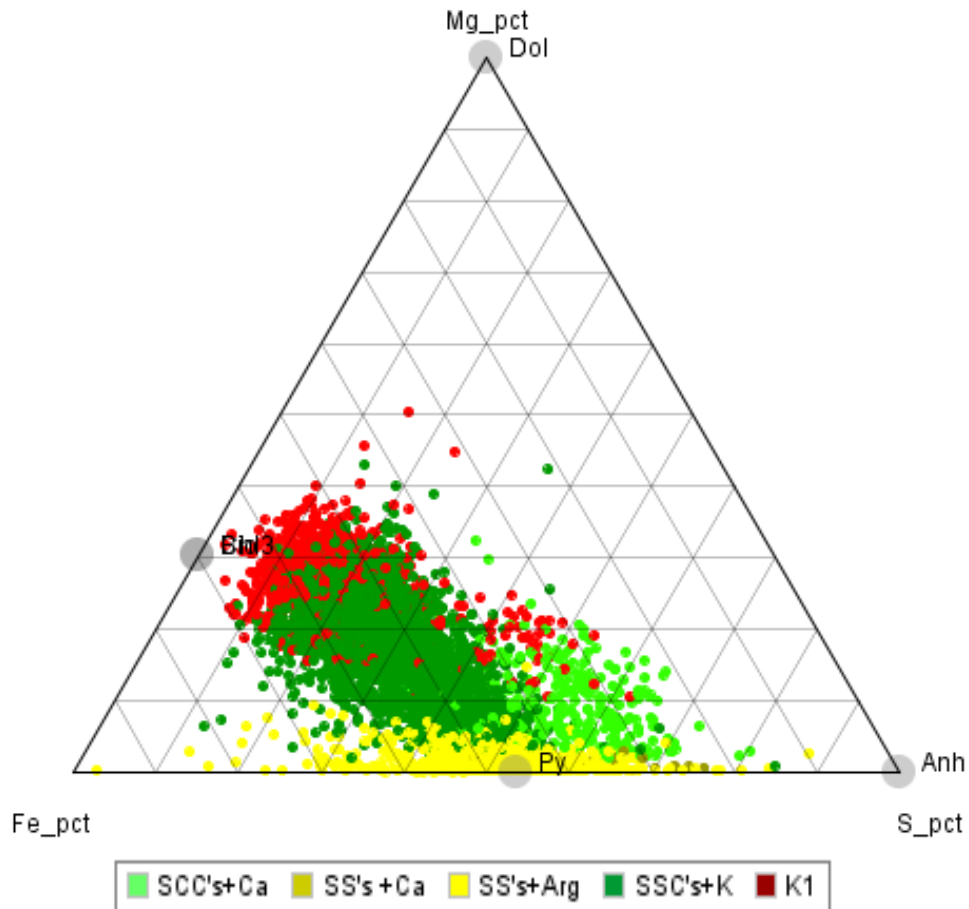
De acuerdo a la clasificación propuesta por Townley et al., 2012, las muestras de la base de datos geoquímicos de Escondida fueron catalogadas en 5 clases distintas. Como se observa en la Tabla 4.6, la alteración potásica biotítica fue clasificada en su mayoría como K1 y SCC, mientras que la alteración potásica feldespática fue clasificada como SCC y SCC+Anh, pudiendo incluso caer en el campo de las alteraciones fílicas y argílica avanzada. Las alteraciones SCC fueron clasificadas preferentemente como SCC, K1 y SCC+Anh. Las alteraciones S1, S2 y AA fueron clasificadas preferentemente como S+AA pudiendo caer en el campo de las SCC.

**Tabla 4.6. Clasificación entre clases propuestas por Townley et al. (2012).**

		% de clasificación por geoquímica					Cantidad total
		K1	SCC	SCC+Anh	S+AA	S+Anh	
<b>Alteración Mapeada</b>	<b>K1</b>	83%	15%	2%	0%	0%	264
	<b>K2</b>	2%	71%	20%	4%	2%	122
	<b>SCC1</b>	21%	77%	1%	1%	0%	1108
	<b>SCC2</b>	15%	68%	15%	2%	0%	1417
	<b>S1</b>	1%	11%	1%	86%	1%	2551
	<b>S2</b>	0%	9%	1%	90%	0%	1706
	<b>AA</b>	0%	7%	0%	91%	2%	57

A medida que la alteración a clasificar presenta más sobreimposición de alteraciones su dispersión en relación a los datos geoquímicos aumenta. Las alteraciones potásicas muestran una mejor clasificación y un menor rango de variación a diferencia de las alteraciones fílicas y argílica avanzada que pueden ser clasificadas frecuentemente como alteraciones SCC. Esto habla de que existe una transición del grado de alteración desde un núcleo potásico a un halo fílico pasando por alteración clorita-sericita-arcillas. En la Figura 4.27, se evidencia que las alteraciones potásicas

caen cercanas a la composición de la clorita-biotita, mientras que las alteraciones clasificadas como S+AA y S+Anh se encuentran cerca de la composición de la pirita, mineral que predomina en esta alteración. Por su parte, las alteraciones SCC tienden a graficar entre estos dos extremos lo que coincide con una etapa de transición entre ambas.



**Figura 4.27. Diagrama Mg-Fe-S mostrando clasificación de base de datos (Townley et al., 2012).**

## **5 Mineralogía avanzada**

### **5.1 Base de datos QEMSCAN**

QEMSCAN (Quantitative Evaluation Minerals by Scanning electron microscopy) es una técnica analítica configurada para medir variaciones mineralógicas basado en la geoquímica a escala microscópica. Esta técnica realiza mediciones de dos señales: backscattered electron (BSE) y Energy Dispersive Spectra (EDS). La primera es usada para localizar partículas y la segunda para identificar minerales. Posteriormente, la señal EDS de cada análisis es clasificada mediante la comparación con una base de datos de minerales conocida (Pirrie & Rollinson, 2011).

Los datos de mineralogía cuantitativa Qemscan utilizados en este estudio corresponden a proporciones de 47 minerales de interés definidos para el sistema tipo pórfido cuprífero de Escondida. Cada muestra cuenta con información para distintos rangos de tamaño de partícula entre: 1000-150  $\mu\text{m}$ , 150-53  $\mu\text{m}$ , 53-5  $\mu\text{m}$ , 5-0  $\mu\text{m}$  y la combinación de todos los anteriores.

#### **5.1.1 Depuración de base de datos Qemscan**

Al igual que en la base de datos geoquímicos, la base de datos de mineralogía avanzada de Qemscan se eliminaron un total de 30 minerales con rango intercuartil cercano a cero ( $<0.1$ ) y con más del 5% de sus muestras nulas. De esta manera, la base de datos mineralógica consta de 75 muestras con información de concentración para 16 minerales pertenecientes a 6 grupos (ver Tabla 5.1), cruzados con la base de datos geoquímicos e información de mapeo: litología, alteración, zona mineral e intensidad de presencia de minerales.

**Tabla 5.1. Minerales por grupo mineral identificados en la base de datos Qemscan**

<b>Grupo</b>	<b>Minerales</b>
<b>Tectosilicatos</b>	cuarzo, ortoclasa, albita y plagioclasa
<b>Filosilicatos</b>	biotita, clorita, mica blanca/sericita, caolinita y pirofilita/esmectita
<b>Sulfuros</b>	pirita, calcopirita, calcosina
<b>Hidroxisulfato</b>	alunita
<b>Óxidos</b>	óxidos de Fe
<b>Fosfatos</b>	apatito y svanbergita

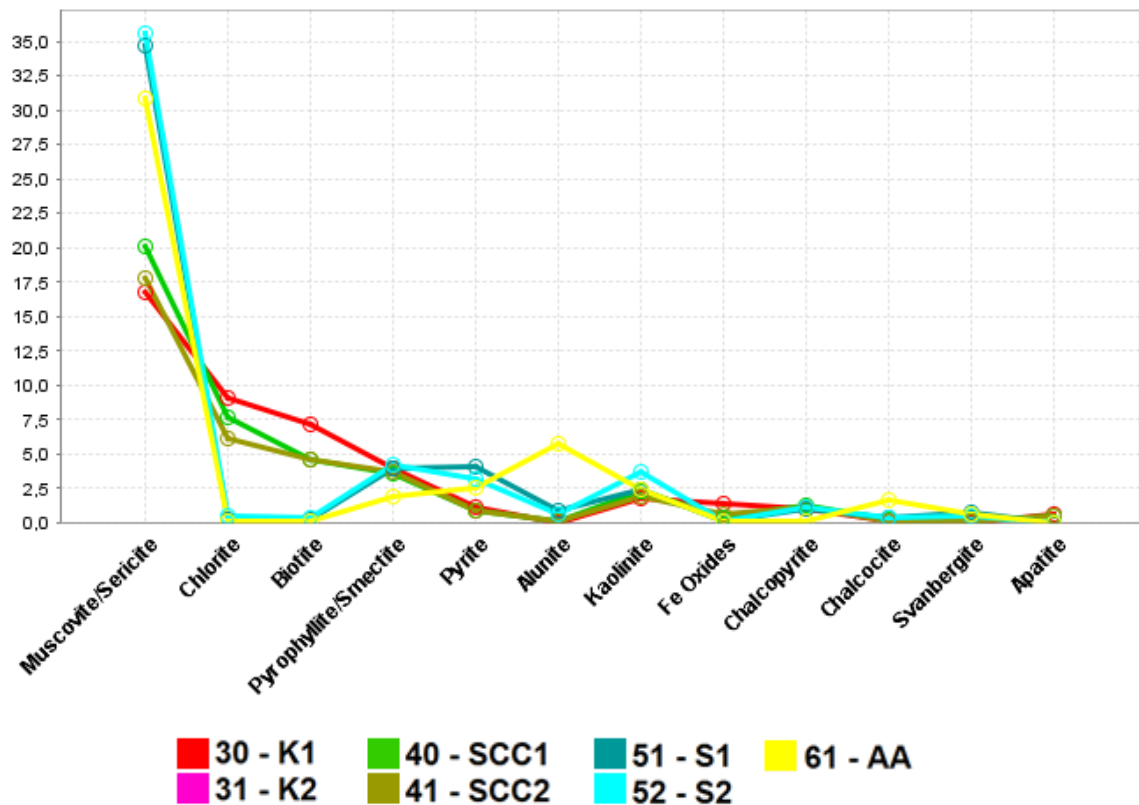
La distribución de la cantidad de muestras por alteración y litología no es homogénea (ver Tabla 5.2). Las alteraciones K2 y AA solo presentan una muestra cada una y se encuentran en tramos con superposición de alteraciones. Como es de esperar, la alteración potásica biotítica (K1) se encuentra solo en la andesita. Las alteraciones SCC y S se encuentran preferentemente en la andesita y pórfido feldespático, respectivamente. A excepción de las SCC, estas alteraciones presentan un número de muestras mayor por litología.

**Tabla 5.2. Cantidad de muestras de mineralogía QEMSCAN por litología y alteración.**

<b>Alteración</b>	<b>Pórfido Feldespático</b>	<b>Andesita</b>
<b>K1</b>	0	4
<b>K2</b>	1	0
<b>SCC1</b>	1	11
<b>SCC2</b>	5	11
<b>S1</b>	13	6
<b>S2</b>	13	10
<b>AA</b>	1	0
<b>Total</b>	35	42

### 5.1.2 Mineralogía Soluble

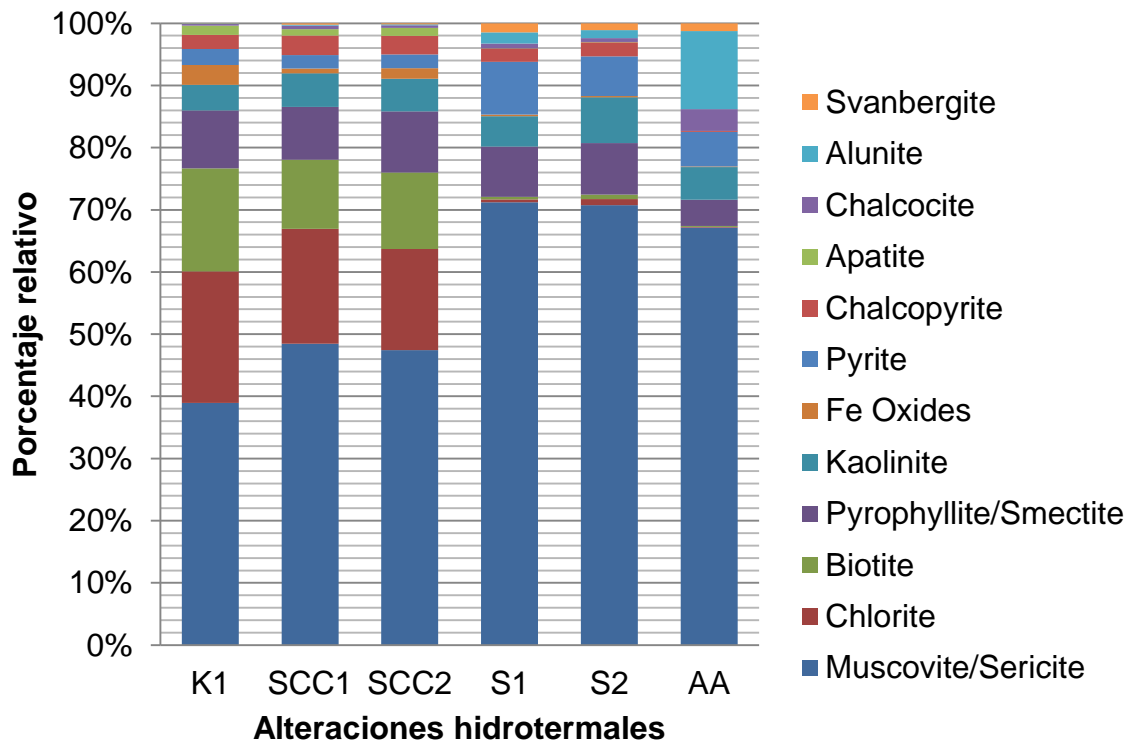
Dado que los tectosilicatos no son solubles en agua regia, su presencia no se verá reflejada en la geoquímica, y por lo tanto, no se considerarán para el análisis mineralógico. De esta manera, la abundancia de minerales por alteración hidrotermal muestra un predominio de los filosilicatos por sobre los demás minerales (ver Figura 5.1).



**Figura 5.1. Concentraciones promedio de minerales Qemscan por alteración hidrotermal.**

En la Figura 5.2, se observan las proporciones minerales promedio para 6 alteraciones hidrotermales. Los minerales más abundantes son la sericita, biotita, clorita, pirofilita/esmectita y caolinita, seguido por óxidos de hierro, sulfuros, fosfatos y alunita.

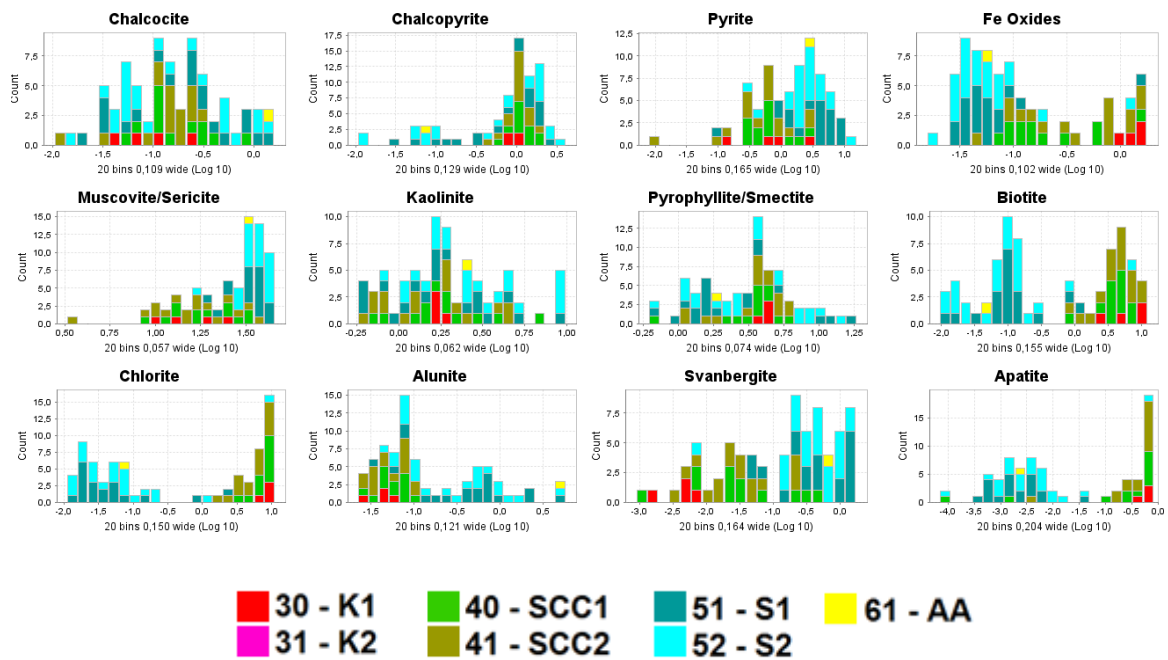




**Figura 5.2. Proporciones relativas de minerales solubles por alteración hidrotermal.**

Según la clasificación de las alteraciones hidrotermales en función de su pH, temperatura y profundidad (Corbett & Leach, 1997), es posible distinguir dos familias de alteraciones: neutras y ácidas. En la primera se encuentran las alteraciones potásica (K1 y K2) y clorita-sericita (SCC1 y SCC2), mientras que en la segunda familia se encuentra las alteraciones fílicas (S1 y S2) y argílica supérgena (AA).

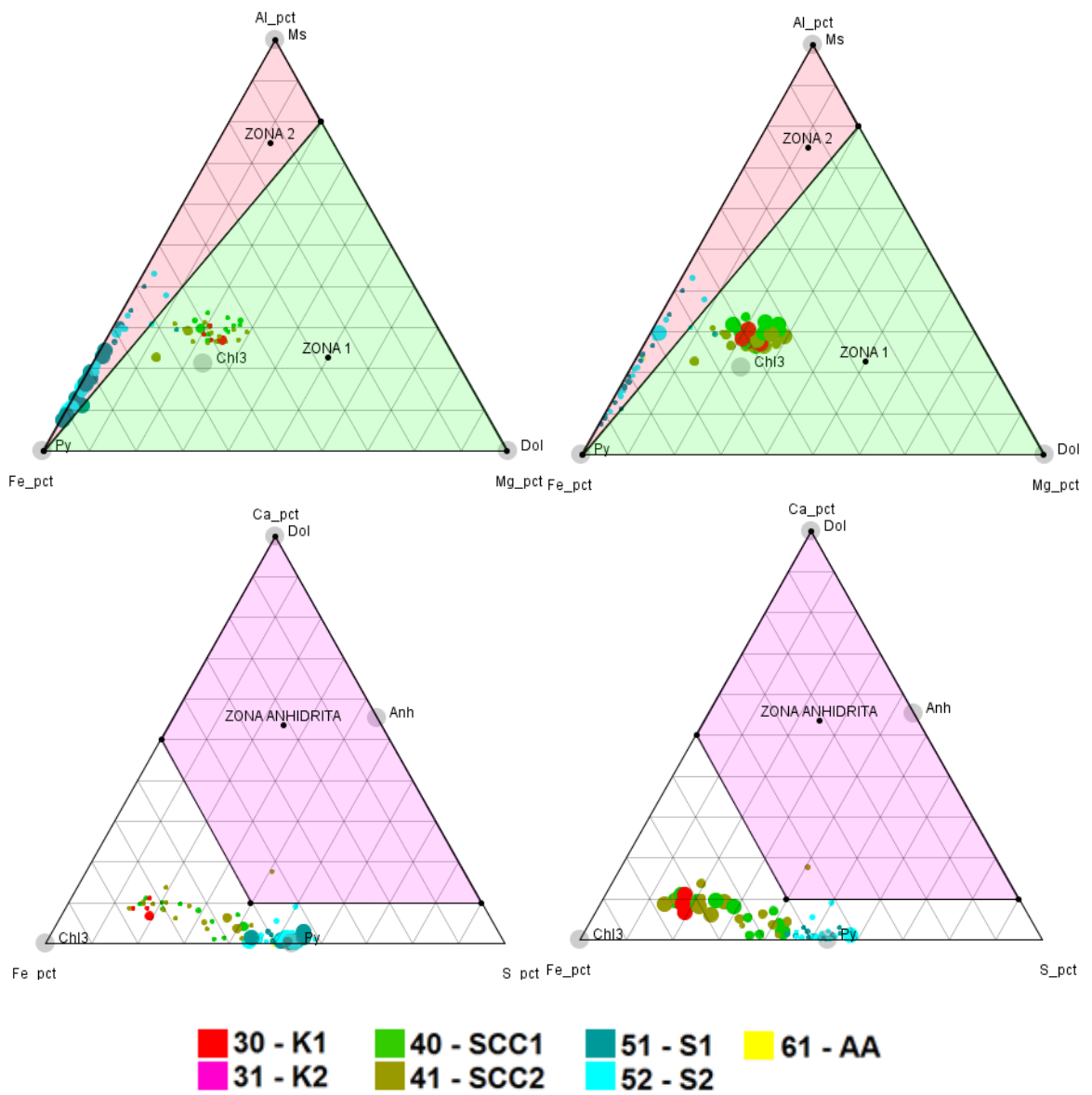
La sericita y piritita están presentes en todas las alteraciones, pero en mayor proporción en las alteraciones ácidas. Por otro lado, la biotita, clorita y óxidos de hierro se encuentran preferentemente en las alteraciones neutras. La alunite es un mineral que solo se encuentra en concentraciones importantes en la alteración argílica avanzada, y por lo tanto, es un mineral índice. Los fosfatos presentan un comportamiento opuesto, el apatito y la svanbergita se particionan preferentemente en las alteraciones neutras y ácidas, respectivamente. El grupo de las arcillas, conformado por pirofilita/esmectita y caolinita, y los sulfuros de cobre, calcopirita y calcosina, no presentan una distribución preferencial entre las alteraciones (ver Figura 5.3).



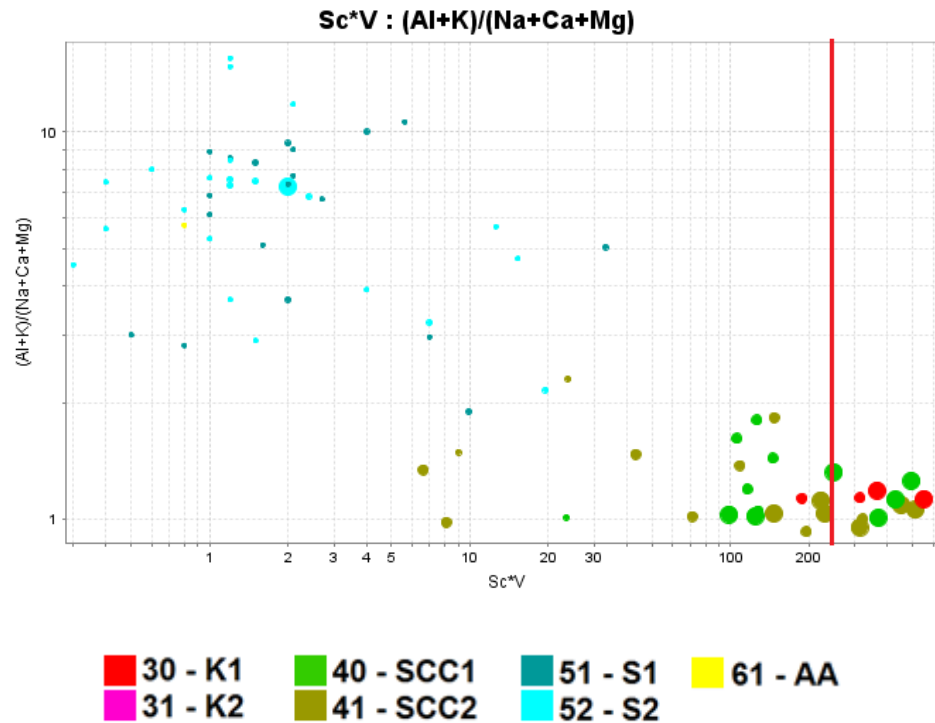
**Figura 5.3. Histogramas de distribución de mineralogía cuantitativa Qemscan por alteración hidrotermal.**

Los minerales que mejor se particionan en función de las alteraciones son biotita, clorita, sericita, óxidos de Fe, pirita, alunita, apatito y svanbergita. Tomando en cuenta su distribución es posible dividir las alteraciones en neutras y ácidas. Las alteraciones neutras se caracterizan por presentar mayor contenido de biotita, clorita, óxidos de hierro y apatito, mientras que las ácidas poseen mayor proporción de pirita, sericita, alunita y svanbergita. Es decir, estos minerales presentan un comportamiento opuesto. Los demás minerales no muestran este comportamiento.

Los diagramas de clasificación de alteraciones hidrotermales propuestos por Townley et al. (2012) para las muestras de mineralogía avanzada evidencian que la separación de los datos se relaciona directamente con la mineralogía presente en la roca. Las zonas dentro de los diagramas Al-Mg-Fe separan los datos en dos grupos, dominados por minerales de pirita y biotita-clorita. El diagrama de enriquecimiento en anhidrita/yeso muestra que no existen datos presencia significativa de estos minerales, lo que concuerda con la mineralogía Qemscan (ver Figura 5.4). Finalmente, el diagrama  $(Al+K)/(Na+Ca+Mg)$  vs  $Sc*V$  muestra que efectivamente los datos con mayor proporción de biotita-clorita se encuentran en la zona definida para esta mineralogía de alteración (ver Figura 5.5).



**Figura 5.4. Diagramas de clasificación según Townley et al., 2012. El tamaño de los círculos indica abundancia relativa de pirita a la izquierda y clorita a la derecha.**



**Figura 5.5. Diagrama de clasificación según Townley et al. (2012) para alteración K1. El tamaño de los círculos indica abundancia relativa de biotita.**

### 5.1.3 Mineralogía y geoquímica

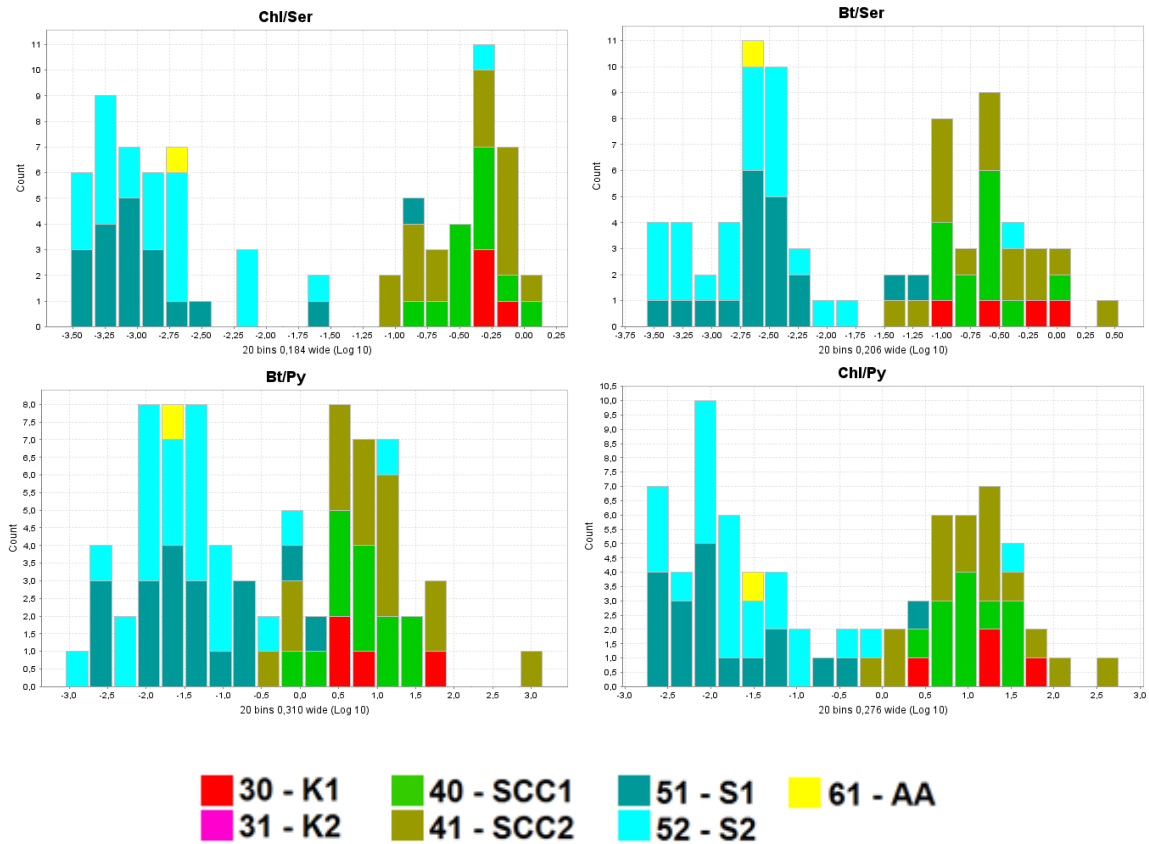
Para analizar la mineralogía y la geoquímica se estudiará el comportamiento conjunto de los elementos mayores que componen los minerales solubles en agua regia. De esta manera, se determinará qué minerales son aquellos cuya presencia se refleja en la base de geoquímica. Además, se pretenden estudiar el comportamiento de los elementos para determinar cuáles son las fuentes minerales más probables de cada uno.

En la Tabla 5.3, se muestra la estequiometría de los 14 minerales considerados solubles. Como se observa, los elementos pueden encontrarse en más de una especie mineral, como el caso del aluminio y hierro.

**Tabla 5.3. Fórmula estructural de los minerales analizados por QEMSCAN considerados como solubles en agua regia.**

<b>Mineral</b>	<b>Fórmula</b>
<b>calcosina</b>	$\text{Cu}_2\text{S} - \text{Cu}_{1,4}\text{S}$
<b>calcopirita</b>	$\text{CuFeS}_2$
<b>pirita</b>	$\text{FeS}_2$
<b>óxidos de Fe</b>	$\text{FeO}(\text{OH}) / \text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_3\text{O}_4$
<b>muscovita/sericita</b>	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$
<b>caolinita</b>	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
<b>pirofilita/esmectita</b>	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 / \text{A}_{0,3}\text{D}_{2-3}[\text{T}_4\text{O}_{10}]\text{Z}_{2,n}\text{H}_2\text{O}$
<b>biotita</b>	$\text{K}(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$
<b>clorita</b>	$(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
<b>alunita</b>	$(\text{Na},\text{K})\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
<b>svanbergita</b>	$(\text{Sr},\text{Pb})\text{Al}_3(\text{PO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$
<b>apatito</b>	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$
<b>yeso/anhidrita</b>	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} / \text{CaSO}_4$
<b>carbonatos</b>	$\text{CaCO}_3 / (\text{Mg},\text{Ca})\text{CO}_3$

Las razones de concentraciones entre minerales de alteración Qemscan muestran que existe una partición de estos en función de la alteración hidrotermal predominante en la roca. Las razones clorita/sericita y biotita/sericita son mayores en las alteraciones potásicas biotíticas (K1) y clorita-sericita (SCC1 y SCC2), a pesar de que la sericita sea un mineral predominante en la base de datos. Lo mismo ocurre con las razones de estas micas con pirita (ver Figura 5.6).



**Figura 5.6. Histogramas de razones de minerales Qemscan.**

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 se varía el tamaño de los círculos que identifican cada muestra para indicar la razón relativa de minerales Qemscan: (clorita+biotita)/sericita y (clorita+biotita)/pirita. De esta manera, las muestras de alteración potásica biotítica y clorita-sericita, con mayor concentración clorita-biotita relativa a sericita, tienden a graficar entorno a las líneas de tendencia de estos minerales. Lo contrario ocurre para las alteraciones fílicas y argílica avanzada donde ésta relación se invierte (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 5.8).

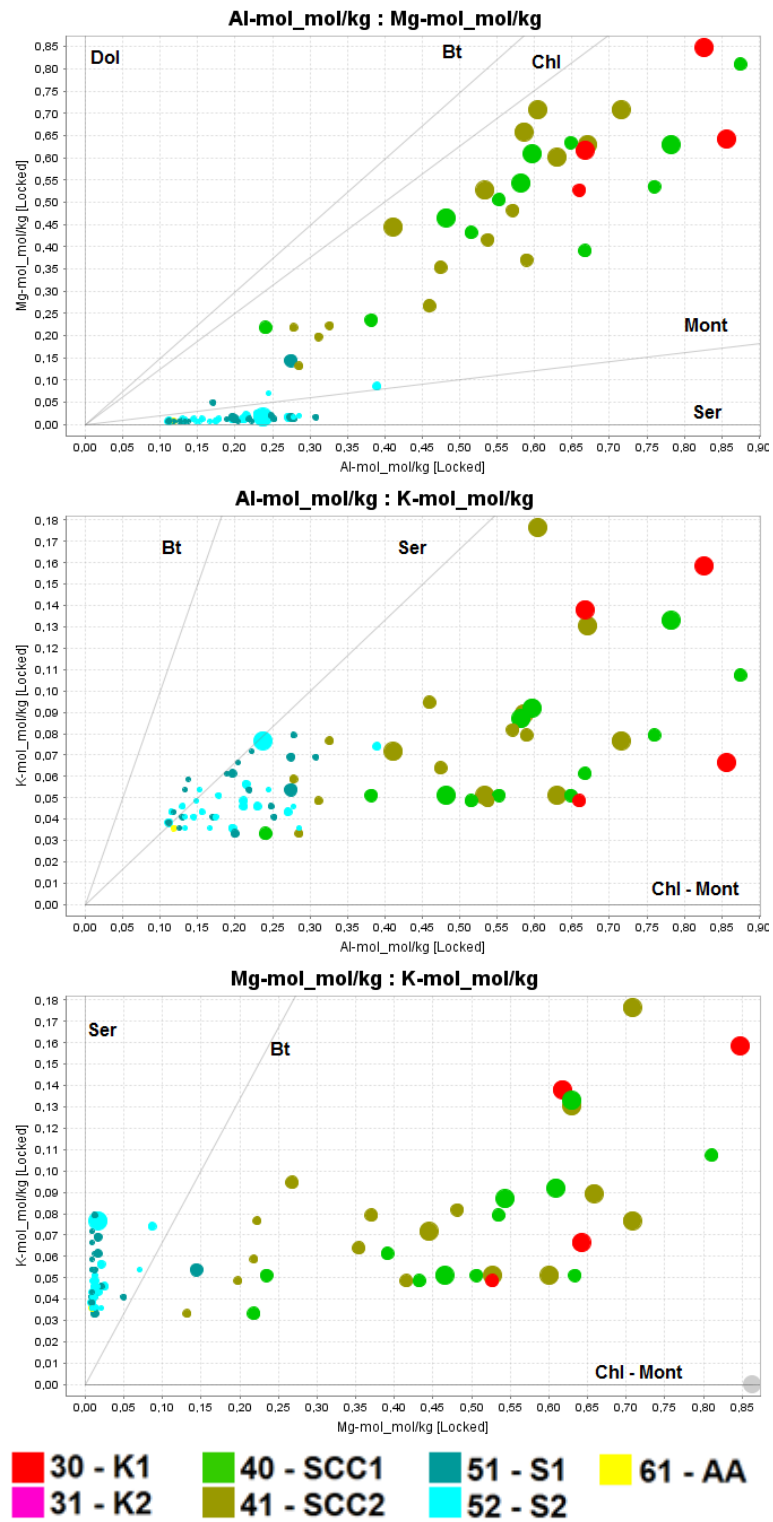
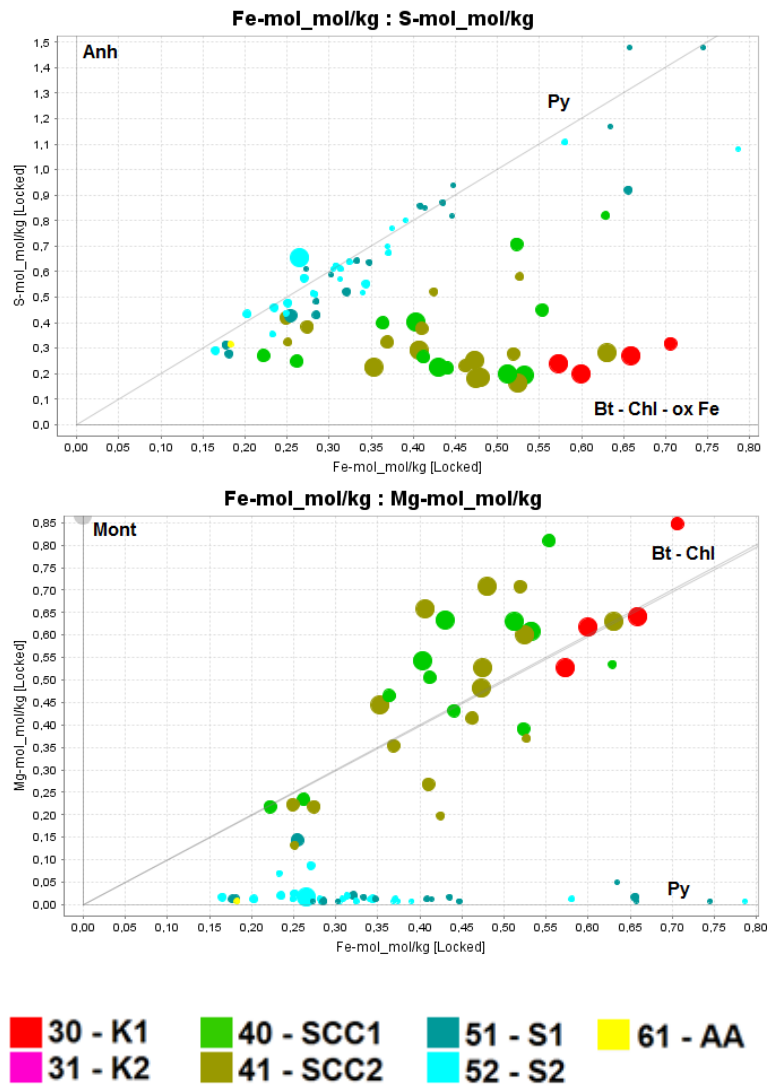


Figura 5.7. Gráficos molares de dispersión de Al-Mg, Al-K, Mg-K. El tamaño de los círculos indica la razón clorita/sericita.



**Figura 5.8. Gráficos molares de dispersión de Al-Mg, Al-K, Fe-Mg, Fe-S, Mg-K y Mg-S. El tamaño de los círculos indica la razón clorita/pirita.**

A partir de esta correlación y del hecho de que algunos grupos minerales son altamente solubles en agua regia, es posible identificar la proveniencia más probable de los elementos mayores en función de la estequiometría teórica de cada mineral. A continuación se proponen los minerales fuente de los elementos mayores usando la estequiometría de la Tabla 5.3.

El aluminio proviene preferentemente de las micas que definen las alteraciones: biotita, clorita, arcillas y, probablemente, sericita.



El magnesio proviene de biotita, clorita y en menor proporción de carbonatos (dolomita). Estos minerales son característicos de las alteraciones potásicas y SCC, por lo que se correlacionan con altas concentraciones de magnesio.

El potasio tiene como principal fuente teórica la biotita, sericita y alunita. Sin embargo, la bibliografía y las líneas de control mineral indican que este elemento proviene principalmente de la biotita y no de la sericita o alunita. Es solo debido a la ausencia de biotita que las muestras donde predomina la sericita grafiquen en su respectiva línea.

El azufre proviene preferentemente de pirita (sulfuro predominante), calcopirita y calcosina-covelina, en menor proporción. Además, puede provenir de algunos sulfatos como la anhidrita/yeso y la alunita.

El hierro posee varias fuentes, ya que puede provenir de pirita, calcopirita, óxidos de hierro (magnetita-hematita-oxihidróxidos), biotita y clorita. A excepción de la pirita, todos los minerales mencionados se encuentran preferentemente en las alteraciones potásicas y sericita-clorita.

El calcio es un elemento que se encuentra en bajas concentraciones y se correlaciona directamente con la presencia de anhidrita/yeso y calcita. Ambos minerales son altamente solubles en agua regia.

## **6 Análisis preliminar de variables y definición de gráficos de interés**

El análisis previo indica que existen minerales cuya química se ve reflejada en el comportamiento conjunto de los elementos. Algunos de estos minerales presentan una partición preferencial según la alteración hidrotermal a la que se asocien, como el caso de la biotita y clorita en las alteraciones K y SCC. Del mismo modo, existen elementos que presentan una distribución relativamente homogénea entre alteraciones y no son de interés para la clasificación.

En esta sección, se seleccionan los elementos que presenten una mayor diferenciación entre alteraciones hidrotermales, para luego utilizarlos en la construcción de la clasificación.

## 6.1 Selección de elementos

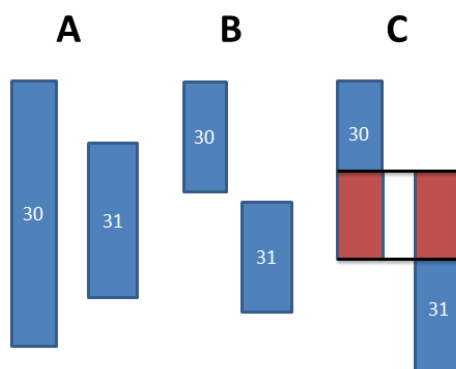
Una forma de seleccionar los elementos es mediante el cálculo de traslape entre alteraciones para cada uno de ellos, como se explica a continuación.

Por cada elemento, se consideran el 75% de los datos con solo una alteración hidrotermal por tramo, lo cual define un rango de valores comprendidos entre los percentiles 12,5 y 87,5 (ver Tabla 6.1).

**Tabla 6.1. Percentiles definidos para el 75% de los datos por alteración para magnesio.**

Alteración	Código	Mg wt%	
		percentil 12,5	percentil 87,5
30	K1	1,20	1,89
31	K2	0,19	0,50
40	SCC1	0,80	1,69
41	SCC2	0,30	1,62
51	S1	0,02	0,16
52	S2	0,02	0,09
61	AA	0,02	0,12

Para cada rango de valores por alteración, se calcula el porcentaje de datos contenidos en las demás categorías. En la Figura 6.1, se esquematizan los 3 casos posibles de traslapes. En A, el traslape es total independiente de que exista parte del rango de la alteración 30 que no está contenido en 31. En B el traslape es nulo, lo que indica que este elemento separa efectivamente las alteraciones. En C, el traslape es parcial (zona roja) y se calcula el porcentaje de traslape de 30 en 31 y viceversa, para luego obtener un promedio entre ambas poblaciones.



**Figura 6.1. Casos posibles de traslapes entre las alteraciones 30 y 31.**

De esta manera, se cuantifica cuan separables son las 21 combinaciones de pares de alteraciones hidrotermales por cada elemento químico. En el Tabla 6.2, se muestran las combinaciones de alteraciones que poseen un porcentaje de traslape mayor al 15%. En particular, las alteraciones con mayor traslape mínimo corresponderían a SCC1-SCC2 (40-41) y S1-S2 (51-52).

**Tabla 6.2. Menor porcentaje de traslape obtenido para las combinaciones de alteraciones indicadas.**

Alteraciones	Códigos	Elemento	Mínimo traslape
30-40	K1-SCC1	V (Sc, Rb, Ca)	34%
30-41	K1-SCC2	V (Sc, Na, Tl, K)	19%
40-41	SCC1-SCC2	Co (Al, Na)	67%
51-52	S1-S2	Mn	68%
51-61	S1-AA	Mn	55%
52-61	S2-AA	As	50%

Los elementos con un menor porcentaje mínimo de traslape son los que presentan una mayor diferenciación entre alteraciones. Los elementos mayores que permiten diferenciar entre alteraciones son Mg, Al, Fe, Ca, K, Na, P y Mn. Los elementos traza son V, Sc, Rb, Ga, Y, Be y Co. Esta cantidad puede reducirse aún más ya que existen elementos con una alta correlación por lo que simplemente introducen información redundante como es el caso de Mg-Ga y V-Sc (ver Tabla 6.3).

**Tabla 6.3. Pares de alteraciones con porcentaje de traslape menor a un 15%.**

	<b>Mayores</b>	<b>Traza</b>	<b>mínimo traslape</b>
<b>30-31</b>	Mg, Al, Fe, P	V, Sc, Rb, Ga, Y, Co	0%
<b>30-51</b>	Mg, Al, Ca, K, Na, P, Mn	V, Sc, Rb, Ga, Y, Co	0%
<b>30-52</b>	Mg, Al, Ca, K, Na, P, Mn	V, Sc, Rb, Ga, Y, Be	0%
<b>30-61</b>	Mg, Al, Ca, Na, P, Mn	V, Sc, Rb, Ga	0%
<b>31-40</b>	Mg, Al, Fe	Sc, Co	0%
<b>31-41</b>	Al	Co	14%
<b>31-51</b>	Mg, Mn	Ga	0%
<b>31-52</b>	Mg, Mn	Ga	0%
<b>31-61</b>	Mg, Mn	-	0%
<b>40-51</b>	Mg, Al, P, Mn	V, Sc, Ga, Y, Be	0%
<b>40-52</b>	Mg, Al, P, Mn	V, Sc, Ga, Y, Be	0%
<b>40-61</b>	Mg, Mn	V, Ga	0%
<b>41-51</b>	Mg, Mn	Ga	0%
<b>41-52</b>	Mg, Mn	Ga	0%
<b>41-61</b>	Mg, Mn	-	0%

El cálculo de traslapes entre poblaciones permite concluir que existen alteraciones hidrotermales que no pueden ser diferenciadas entre sí: SCC1-SCC2 y S1-S2-AA. Del mismo modo, es posible diferenciar las alteraciones K-SCC de las S-AA.

Al igual que para las alteraciones hidrotermales, se buscan los elementos que mejor clasifiquen las zonas de mineralización utilizando el cálculo del traslape entre las poblaciones. Siguiendo la misma metodología, los elementos mayores que presentan un menor traslape entre zonas de mineralización son Cu, Fe, S y Al. Los elementos traza son Pb, Co, Sc, V y Cd.

A pesar de que estos elementos presentan un bajo traslape, la mayoría de ellos no son capaces de separar grupos de clases. Solo en el caso del cobre es posible definir una diferencia significativa entre las muestras que presentan mineralización y las que no (ver Figura 6.2).

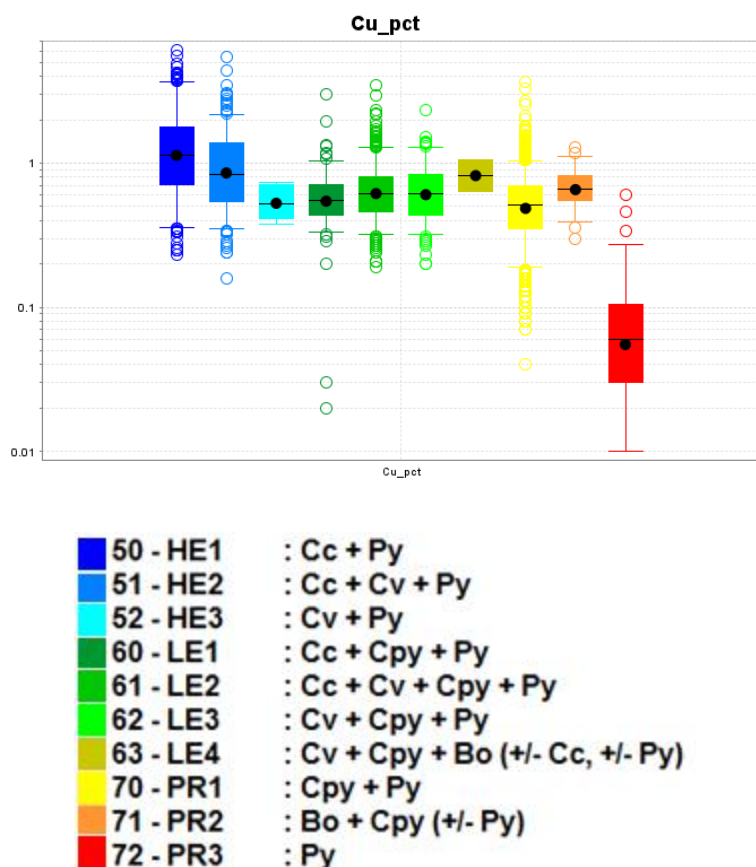


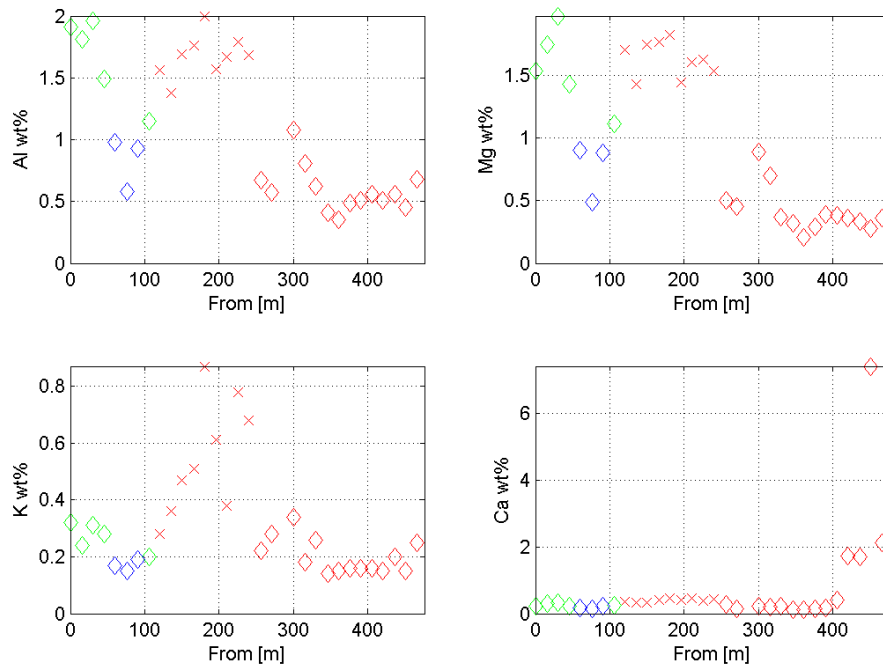
Figura 6.2. Boxplot de minzones para Cu total.

## 6.2 Alteraciones y mineralización por sondaje

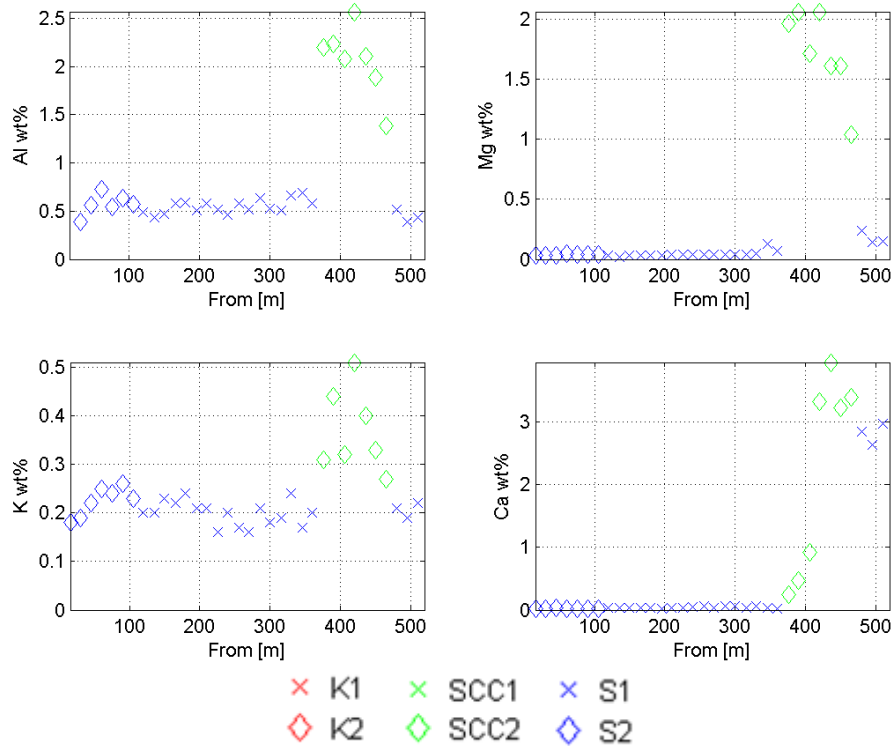
Para analizar el comportamiento de las alteraciones y minzones en función de la química dentro de un sondaje, se eligen sondajes que presenten dos o más alteraciones mapeadas y se grafican las concentraciones de elementos mayores a lo largo de estos.

Las alteraciones hidrotermales potásicas biotita y sericita-clorita se relacionan a altas concentraciones de Al, Mg y K, con respecto a las alteraciones fílicas. Es importante destacar que el contacto entre zonas de alteración puede presentarse en la química como variaciones progresivas de las concentraciones o como variaciones puntuales (ver Figura 6.3).

D-4987



RD-5044

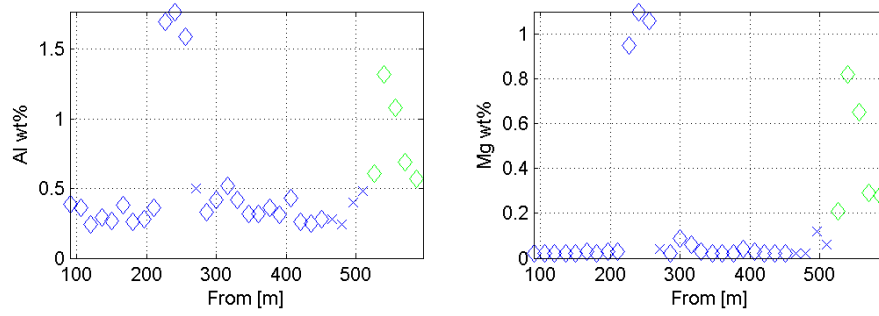


× K1    × SCC1    × S1  
 ◇ K2    ◇ SCC2    ◇ S2

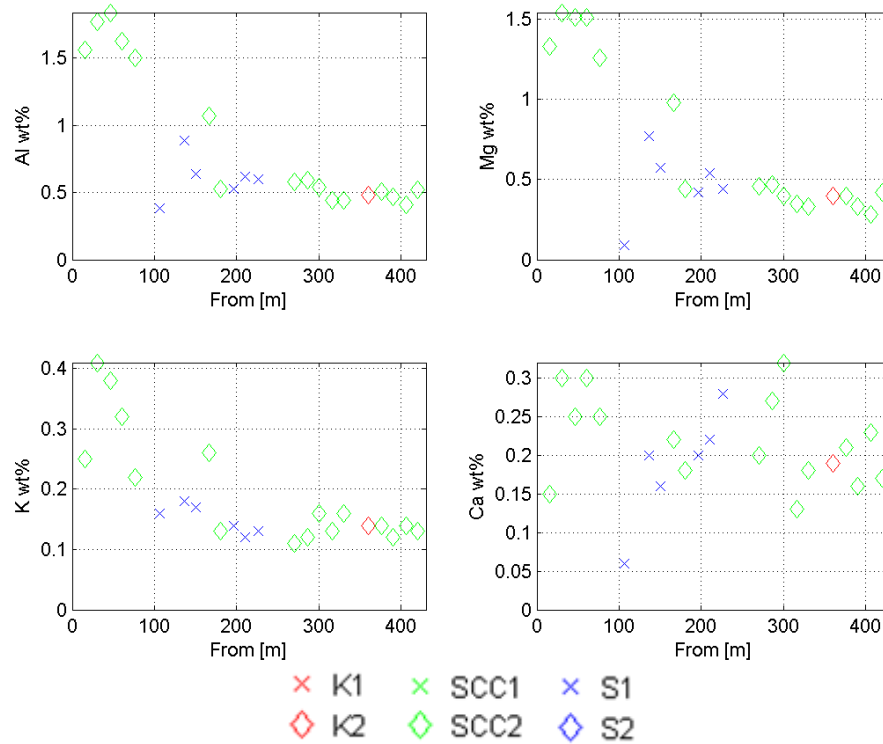
**Figura 6.3. Concentraciones de elementos a lo largo de sondajes resaltando el contacto entre alteraciones.**

De igual forma, existen sondajes con variaciones químicas no asociadas a cambios en la alteración, litología o mineralización, o que presentan un comportamiento contrario al descrito anteriormente (ver Figura 6.4), lo que puede deberse a variaciones de mineralogía no identificadas durante el mapeo de los sondajes. Las muestras que presentan esta incongruencia serían de especial interés y deberían ser revisadas con mayor detalle en futuras campañas de mapeo, con el objetivo de verificar si la geoquímica se correlaciona efectivamente con la presencia de minerales índices de las alteraciones o son variaciones propias de cada una de ellas.

D-5233



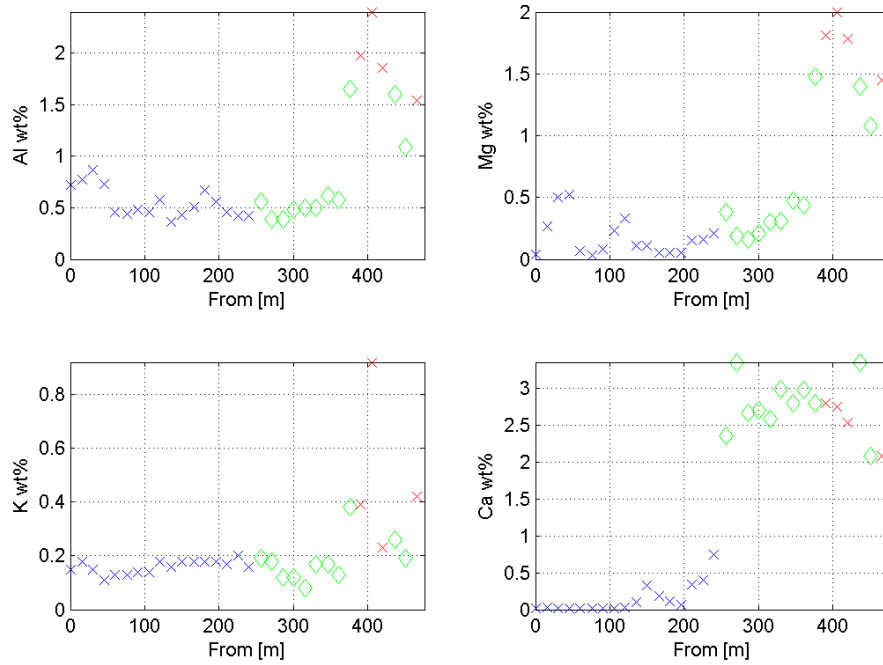
RD-4984



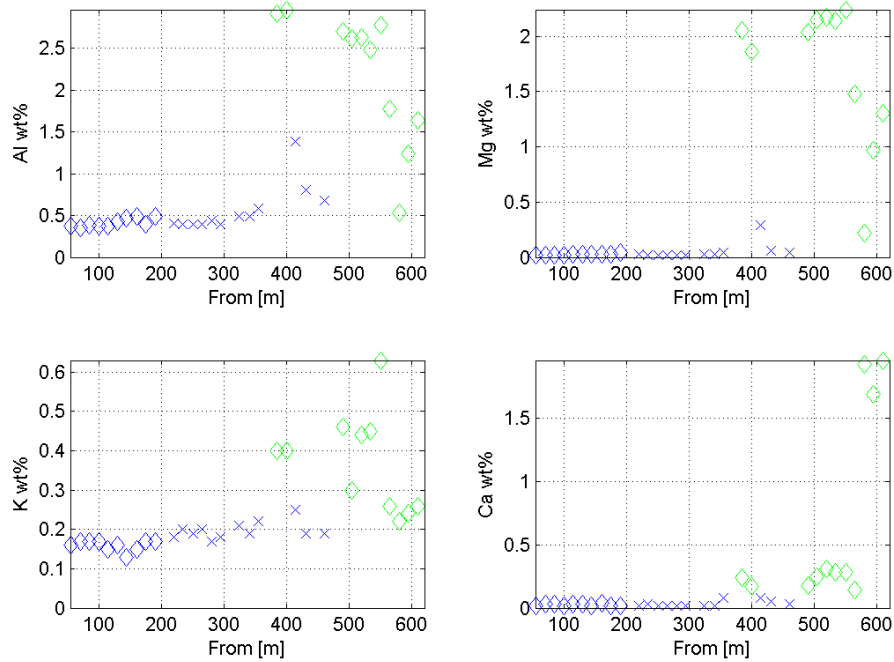
**Figura 6.4. Concentraciones de elementos a lo largo de sondajes resaltando variaciones no relacionadas al cambio de alteración.**



D-5229



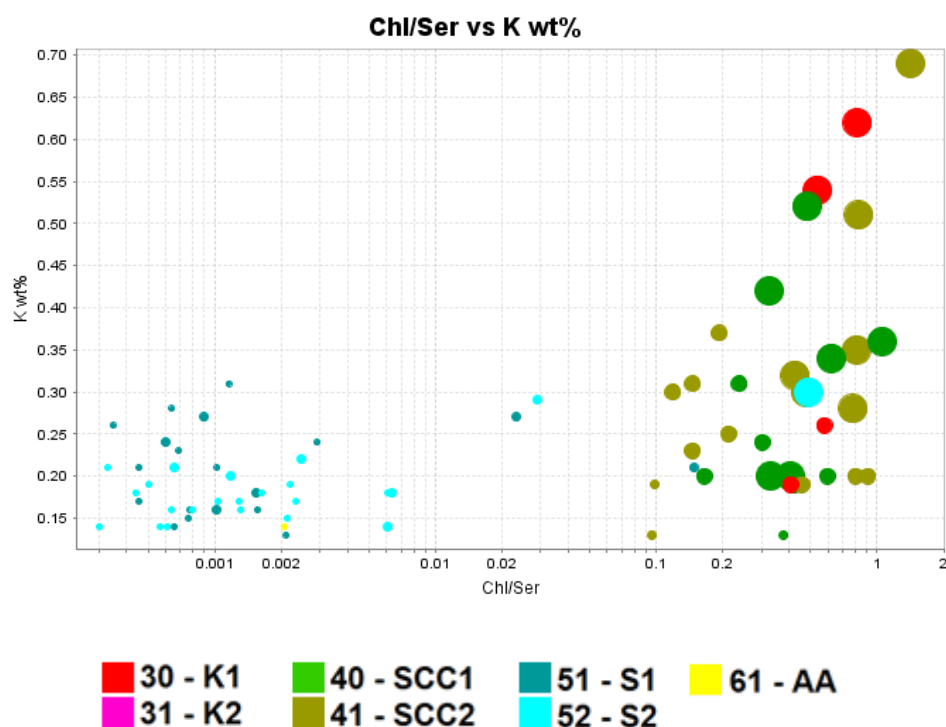
RD-4618



x K1    x SCC1    x S1  
◇ K2    ◇ SCC2    ◇ S2

**Figura 6.5. Concentraciones de elementos a lo largo de sondajes resaltando variaciones de potasio en una misma alteración.**

Las concentraciones de potasio, en general, son más altas en las muestras con alteración K1, y muy bajas en las muestras con alteraciones tipo S. Las alteraciones SCC pueden presentar cualquiera de los dos patrones (ver Figura 6.5). La Figura 6.6 indica que las muestras con mayor razón de minerales Qemscan clorita:sericita poseen una mayor concentración de K, asociada al contenido de biotita representado por el tamaño de los puntos. Este comportamiento indicaría que la principal fuente de potasio es la biotita.



**Figura 6.6. Razón de minerales Qemscan clorita:sericita vs K wt%. Tamaño indica concentración de biotita Qemscan.**

Las variaciones de las alteraciones SCC pueden ser explicadas por la razón entre clorita y sericita. Una roca con alteración SCC y una razón chl/ser baja tendería a presentar bajas concentraciones de K debido al bajo contenido en biotita remanente de la alteración potásica. Por otro lado, una roca con alteración SCC y con una razón chl/ser alta tendería a presentar altas concentraciones de K debido a que las biotitas del sistema solo se encontraría parcialmente alteradas a clorita. Esto destaca la importancia que tienen las alteraciones cercanas a una muestra en particular. Las

transiciones entre alteraciones y las relaciones entre los minerales de alteración pueden imprimir patrones geoquímicos distintos a los que presentan las alteraciones bien definidas.

### 6.3 Gráficos de control mineral

Al considerar las variables que permiten distinguir entre alteraciones y zonas de mineralización, es posible identificar rangos de valores que entregan distinta información. Estas zonas serán definidas a partir de los elementos mayores debido a que se correlacionan directamente con la mineralogía. Esta información es complementaria a la clasificación previa (Townley et al., 2012).

Los elementos mayores permiten distinguir muestras con un enriquecimiento relativo asociado a la presencia de minerales índices. Las variables Al, Mg y K permiten diferenciar entre zonas de alta y baja presencia de biotita y clorita. Los elementos Fe y S indican si las muestras se encuentran bajo el control mineral de la pirita, o si presentan un enriquecimiento/empobrecimiento con respecto a esta. Si el enriquecimiento es en Fe, la muestra se asocia a alteraciones con mayor contenido en biotita, clorita u óxidos de hierro, y si el enriquecimiento es de S, entonces la muestra presentaría un mayor contenido en sulfatos como anhidrita/yeso. Además, el CuT entrega información de si la mineralización corresponde a solo pirita (minzone PR1) o presenta mineralización económica asociada a sulfuros de cobre como calcopirita, bornita, covelina, calcosina u otros.

La Figura 6.7 muestra el sistema Cu-Fe-S en donde se resaltan tres zonas distintas. La zona central se caracteriza por el control de pirita y sulfuros de cobre. Estos minerales son disueltos totalmente por el agua regia y por lo tanto se ven 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 sulfatos para el caso del azufre. El porcentaje de datos asignados en cada zona se muestra en la

Tabla 6.4.

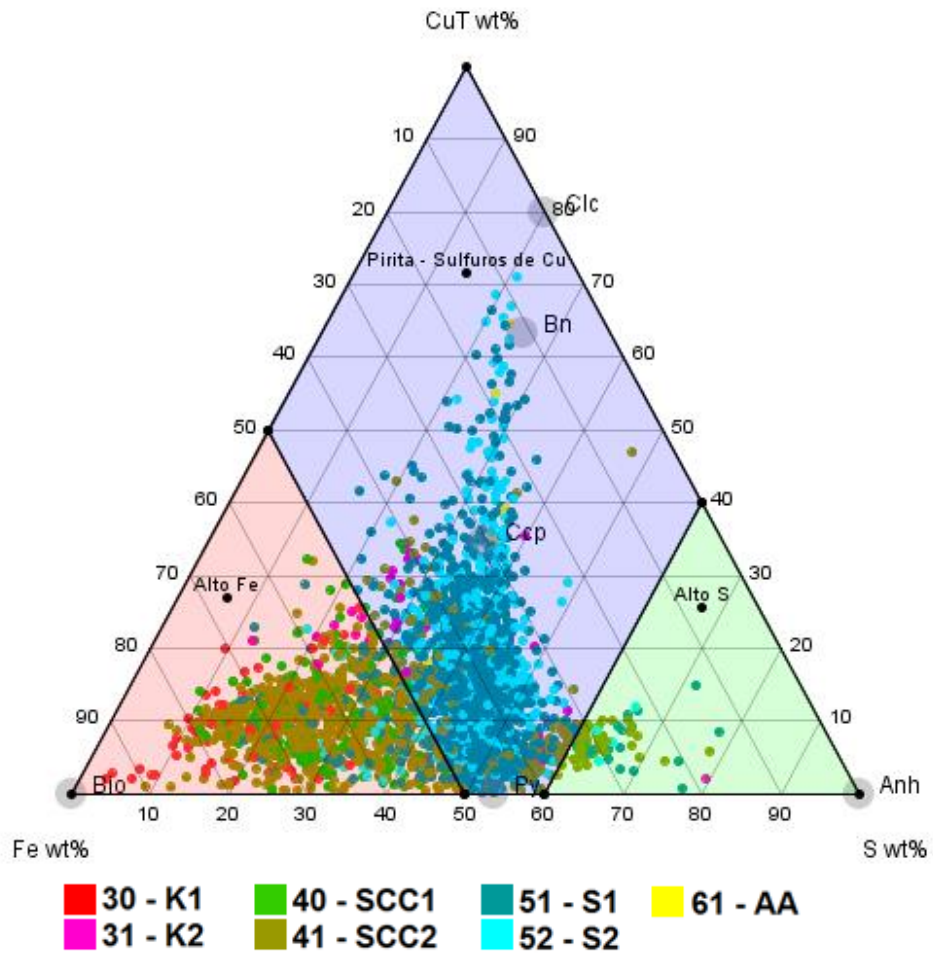
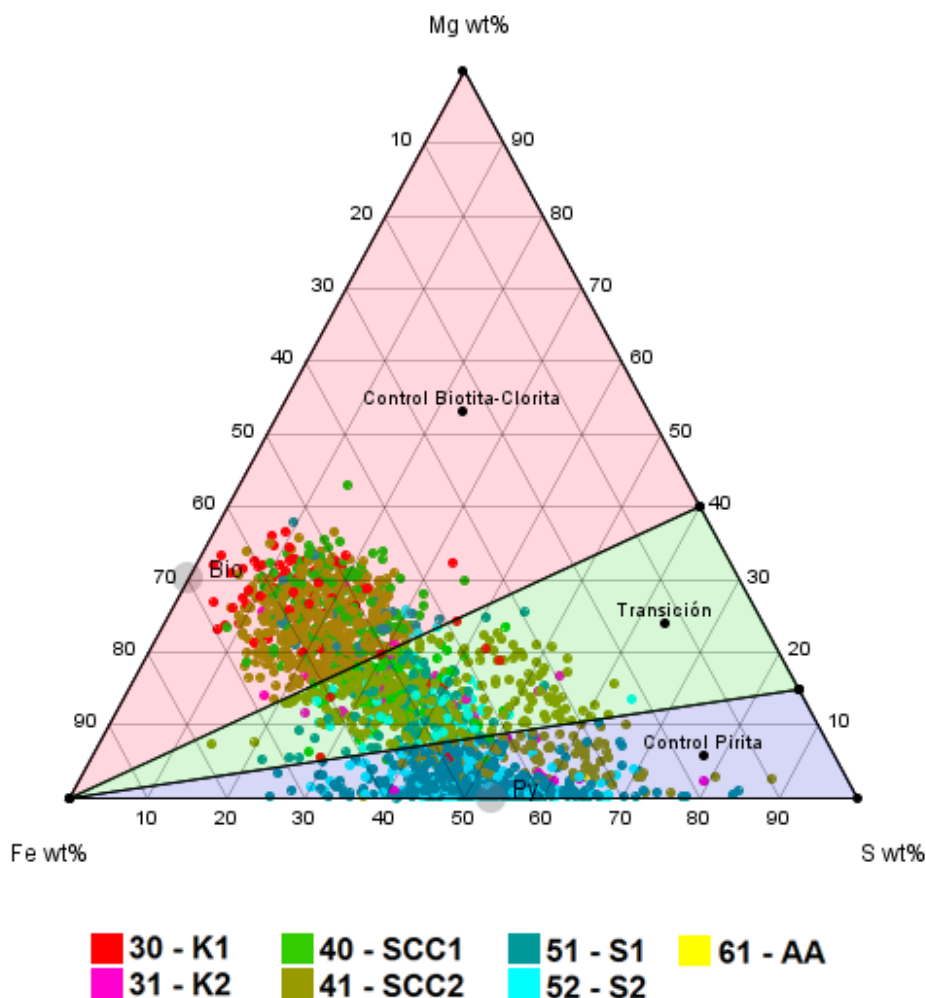


Figura 6.7. Diagrama ternario Cu-Fe-S indicando zonas de pirita-sulfuros de Cu y enriquecimiento de Fe y S.

Tabla 6.4. Porcentaje de muestras por zona en sistema Cu-Fe-S.

	Alto Fe	Pirita - sulfuros de Cu	Alto S
K1	93%	7%	0%
K2	26%	70%	4%
SCC1	88%	12%	0%
SCC2	64%	30%	6%
S1	4%	95%	1%
S2	4%	96%	0%
AA	0%	100%	0%

El sistema Mg-Fe-S (ver Figura 6.8) muestra una partición de los datos entre dos nodos definidos por biotita-clorita y pirita. Las alteraciones tipo S y AA son más cercanas al nodo de pirita, y las K1 y SCC al de biotita-clorita. También es posible definir una zona de transición entre ambos nodos en la cual se encuentra un porción importante de las alteraciones SCC y K2 (ver Tabla 6.5).

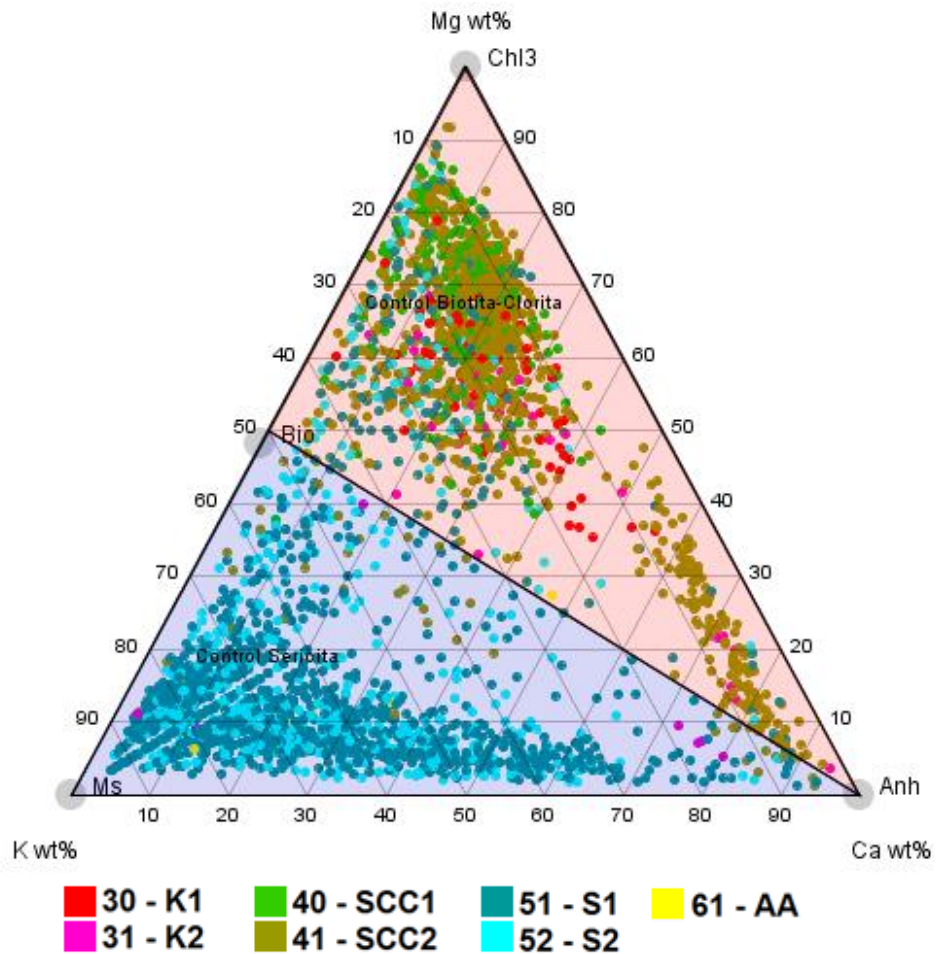


**Figura 6.8. Diagrama ternario Mg-Fe-S indicando zonas de control mineral de biotita-clorita, pirita y transición entre ambas.**

**Tabla 6.5. Porcentaje de muestras por zona en sistema Mg-Fe-S.**

	Control Pirita	Transición	Control Biotita - Clorita
<b>K1</b>	1%	8%	91%
<b>K2</b>	28%	54%	15%
<b>SCC1</b>	4%	28%	68%
<b>SCC2</b>	17%	40%	43%
<b>S1</b>	92%	7%	1%
<b>S2</b>	94%	5%	1%
<b>AA</b>	100%	0%	0%

El sistema Mg-K-Ca (ver Figura 6.9) muestra la partición entre los nodos de biotita-clorita y sericita, pudiéndose definir una zona enriquecida en calcio asociada a la presencia de anhidrita/yeso o calcita. De esta manera, se definen la zona de control Biotita-Clorita y la zona de control de Sericita. A pesar de que la biotita es la principal fuente de potasio, el diagrama muestra que el enriquecimiento relativo de este elemento sería producto de la presencia de sericita. Sin embargo, este comportamiento se explica por un empobrecimiento de Mg en las alteraciones fílicas y no a que la sericita sea la fuente de K. La partición de los datos en estos grupos se muestra en la Tabla 6.6.



**Figura 6.9. Diagrama ternario Mg-K-Ca indicando zonas de Control biotita-clorita y Control de sericita.**

**Tabla 6.6. Porcentaje de muestras por zona en sistema Mg-K-Ca.**

	Control Sericita	Control Biotita - Clorita
K1	0%	100%
K2	20%	80%
SCC1	1%	99%
SCC2	7%	93%
S1	90%	10%
S2	92%	8%
AA	95%	5%

Estos diagramas entregan información preliminar útil para la clasificación acerca de los controles ejercidos por la mineralogía soluble en agua regia. Como se aprecia, estos diagramas permiten distinguir dentro de un máximo de solo tres agrupamientos principales de los datos.

## **7 Modelo de clasificación de alteraciones hidrotermales**

Una vez identificados los elementos y parámetros que mejor diferencian entre alteraciones hidrotermales, se propone construir un modelo de clasificación supervisada, que permita cuantificar las alteraciones predominantes en una muestra. El principal supuesto es que las muestras con una misma alteración presentan un patrón geoquímico similar.

Usando criterios estadísticos y geológicos, se eligen muestras que mejor definan las alteraciones hidrotermales. Se definen clusters para cada alteración caracterizada por su media y varianza experimental.

Luego, se calcula la distancia a cada uno de los clusters con el objetivo de cuantificar el grado de pertenencia a cada uno de ellos. Por ejemplo, una muestra puede tener un porcentaje calculado de 50% K1, 40% SCC1 y 10% S1.

Finalmente, este resultado será comparado con los porcentajes de alteraciones por tramo calculadas al cruzar la base de datos geoquímicos con el mapeo geológico.

Este algoritmo de clasificación está basado en el algoritmo fuzzy c-means, el cual calcula grados de pertenencia a una cantidad  $c$  de clusters para cada una de las muestras dentro del espacio definido por las variables consideradas. A diferencia de fuzzy c-means, los clusters son predefinidos y no aleatorios, lo que introduce las características geoquímicas del sistema a la clasificación (Rojas et al., 2008; Liu et al., 2009; Pimentel & M.C.R de Souza, 2013; Nazari et al., 2013; Xing & Ha, 2014).



## 7.1 Definición de muestras por alteración hidrotermal

Los criterios que deben cumplir las muestras para definir los clusters por alteración hidrotermal son los siguientes:

1. Solo una alteración mapeada por tramo.
2. Mapeo de abundancia relativa de minerales por tramo, que será utilizado como criterio para validar el mapeo geológico.
3. Espacialmente, deben encontrarse cercanas unas de otras, y a su vez, lo más lejanas posibles de los límites con otras alteraciones.

En la sección 4.2.2, se muestran las abundancias relativas de minerales, destrucción de feldspatos y alteración de máficos. Con esta información, es posible definir muestras cuyo mapeo de minerales sea más representativo de un tipo de alteración hidrotermal. Por ejemplo, la alteración potásica biotítica (K1) debe poseer un alto índice de biotita (2 o 3) y uno bajo de sericita (0 o 1), ya que de lo contrario, es muy probable que exista sobreimposición de alteraciones.

En la Tabla 7.1 se muestran los índices de abundancia relativa que se considerarán para definir una alteración hidrotermal tipo. Estos índices se proponen a partir de los minerales que definen cada alteración. Aquellos minerales que pueden tomar cualquier índice de abundancia relativa se indican con un guión.

**Tabla 7.1. Índices de abundancia relativa de minerales para la definición de clusters.**

<b>Alteración hidrotermal</b>	<b>desfel</b>	<b>silice</b>	<b>clorita</b>	<b>biotita</b>	<b>feld K</b>	<b>sericita</b>	<b>altmaf</b>	<b>arcilla</b>
<b>K1</b>	-	-	0-1	2-3	0	0-1	1-2	0
<b>K2</b>	-	-	-	-	1-3	0-1	-	0
<b>SCC1</b>	3-4	0-1	1-3	-	0	1-3	-	1-3
<b>SCC2</b>	3-4	1-2	1-3	-	0	1-3	1-2	0
<b>S1</b>	3-4	1-3	0	0	0	2-3	-	0
<b>S2</b>	3-4	1-3	0	0	0	2-3	-	1-3
<b>AA</b>	4	-	-	-	-	2-3	-	2-3

Al cruzar la base de datos Qemscan (ver Figura 7.1) con el mapeo de abundancia relativa mineral (Tabla 7.2), se observa que existe una correlación entre ambos para el caso de los minerales de sílice (cuarzo), clorita, biotita y muscovita/sericita. Sin embargo, para el caso de las arcillas, representado por los minerales de caolinita y pirofilita/esmectita, no existe dicha correspondencia, ya que las alteraciones SCC1 y S2 son definidas por la presencia de estas y no presentan una concentración evidentemente mayor a la de las demás alteraciones.

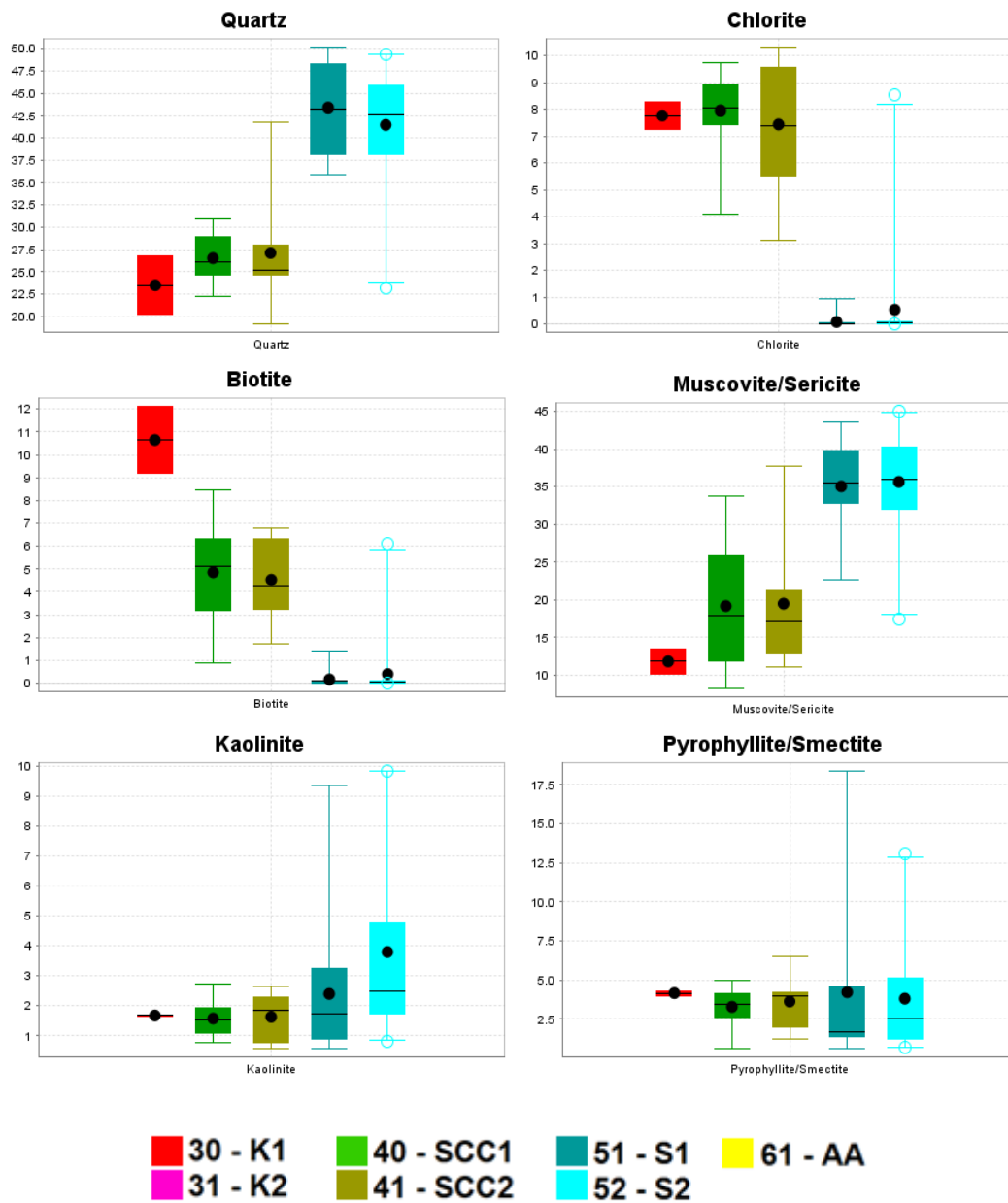


Figura 7.1. Abundancia de minerales Qemscan según alteración hidrotermal.

**Tabla 7.2. Índices de mapeo de abundancia relativa de minerales con mineralogía Qemscan.**

<b>Alteración</b>	<b>cantidad</b>	<b>sílice</b>	<b>clorita</b>	<b>biotita</b>	<b>sericita</b>	<b>arcillas</b>	<b>feldK</b>
<b>K1</b>	2	1	1	2	1	0	0
<b>SCC1</b>	10	0	1-3	0-1	1-2	1-2	0
<b>SCC2</b>	7	1-2	1-2	0	1-3	0	0
<b>S1</b>	17	1-3	0	0	2-3	0	0
<b>S2</b>	20	1-2	0	0	2-3	1-3	0

Se divide la base de datos geoquímicos en dos grupos. Cada uno de ellos con aproximadamente el 50% de los datos por alteración. La primera mitad se usa para definir los clusters para cada alteración y la segunda es utilizada para la clasificación. La Tabla 7.3 muestra la cantidad de datos asignados a cada grupo de datos.

**Tabla 7.3. Cantidad muestras por base de datos con una alteración por tramo.**

<b>Alteración</b>	<b>Definición clusters</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Total</b>
<b>K1</b>	32	53	85
<b>K2</b>	25	21	46
<b>SCC1</b>	133	148	281
<b>SCC2</b>	303	491	794
<b>S1</b>	809	810	1619
<b>S2</b>	565	507	1014
<b>AA</b>	10	10	20

## **7.2 Selección de elementos según desempeño**

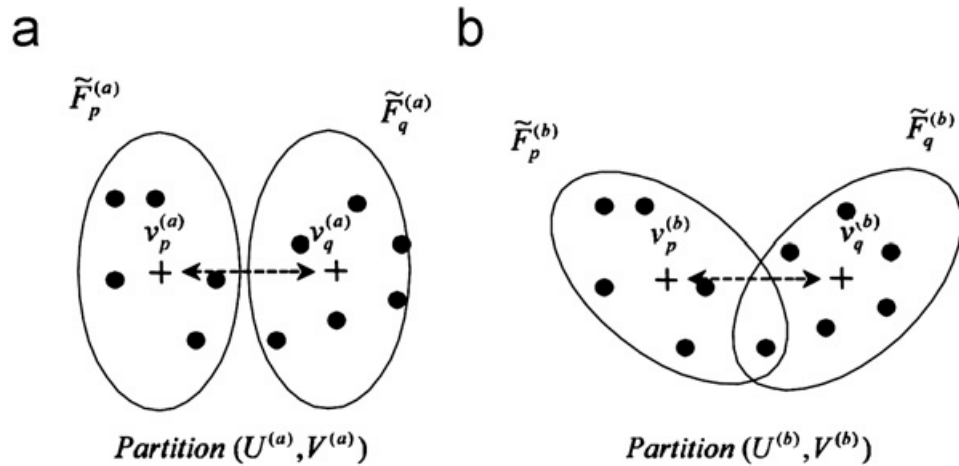
Con los datos restantes de la base de datos, se evalúa el desempeño de clasificación de los elementos químicos filtrados anteriormente mediante la comparación de los traslapes por alteración hidrotermal.

La metodología para la evaluación de los elementos por sí solos y agrupados se presenta a continuación:

1. Definición de cada alteración hidrotermal considerando las muestras seleccionadas según criterios asociados al mapeo de sondajes.
2. Cálculo de distancias de cada muestra a clasificar a cada uno de los centroides definidos por las medias de las alteraciones en el paso 1.
3. Cálculo de grado de pertenencia a cada uno de los centroides en función de las distancias. Estos valores de grado de pertenencia pertenecen al intervalo comprendido entre 0 y 1, y la suma de todos ellos es igual a la unidad para una muestra.
4. Cálculo de error entre la alteración calculada y mapeada.

De esta manera, es posible acotar el número de variables que se analizarán para muestras con más de una alteración por tramo de análisis químico.

Cada cluster se define por la media y varianza experimental de las alteraciones. La media es el punto al cual se calculan las distancias de las muestras por clasificar. Esta distancia debe considerar la covarianza existente entre las variables, dado que la dispersión caracteriza la geometría de cada cluster en el espacio definido por las variables afectando directamente la clasificación. La Figura 7.2 muestra dos particiones para el mismo set de datos, en donde un dato puede ser clasificado dentro de uno u otro grupo si se consideran distintas covarianza entre las variables (Rezaee, 2010).



**Figura 7.2. Diferentes particiones con igual distancia entre centroides pero con distinta orientación para igual set de datos (Tomado de Rezaee, 2010).**

Una manera de considerar este efecto es utilizando la distancia de Mahalanobis para calcular la distancia entre el centroide, correspondiente a la media, y la muestra (Falasconi et al., 2010; Liu et al., 2009). Esta distancia se define como:

$$d^2(x_j, a_i) = (x_j - a_i)^t \Sigma^{-1} (x_j - a_i)$$

Donde  $x_j$  corresponde a una muestra,  $a_i$  al centroide de la alteración  $i$ , y  $\Sigma$  es la matriz de covarianza de las muestras que definen la alteración  $i$ . Cuando la matriz de covarianza es igual a la matriz identidad, la distancia de Mahalanobis es igual a la Euclidiana.

Para el cálculo del grado de pertenencia, se utiliza un paso del algoritmo conocido como Fuzzy C-Means, el cual permite calcular grados de pertenencias a un número  $C$  de clusters. El grado de pertenencia para un número  $n$  de muestras y  $c$  de cluster corresponde a una matriz  $U$  de  $n$  filas y  $c$  columnas, donde la sumatoria de las columnas para cada muestra es igual a la unidad (Rojas et al., 2008; Pimentel & M.C.R de Souza, 2013; Nazari et al., 2013; Xing & Ha, 2014).

$$U = [u_{ij}]_{n \times c}, u_{ij} \in [0,1], i = 1,2, \dots, c, j = 1,2, \dots, n$$

Donde,

$$\sum_{i=1}^c u_{ij} = 1$$

El grado de pertenencia queda definido como:

$$u_{ij} = \left[ \sum_{k=1}^c \frac{d^2(x_j, a_i)}{d^2(x_j, a_k)} \right]^{-1}$$

Para cada centro definido por un grupo de muestras representativas se espera que las muestras mapeadas como este tipo de alteración sean clasificadas como tal. Por ejemplo, se espera que las muestras mapeadas como cuarzo-sericita, cuarzo-sericita-arcillas y argílicas supérgenas, estén muy distantes al centro definido por las muestras de alteración potásica biotítica y que por lo tanto no sean clasificadas como tales.

En la etapa de evaluación de las variables según la clasificación de las alteraciones, se calculan los errores con respecto a un comportamiento esperado. Según las distancias obtenidas anteriormente, la menor de ellas definirá a qué alteración se asignará, es decir, se utilizará el algoritmo del vecino más cercano, asignándoles el grado de pertenencia igual a 1 al mayor de ellos y 0 a los demás. En etapas posteriores a este análisis, se utilizarán los grados de pertenencias en lugar de los límites duros.

De esta manera, se calcula el error cuadrático de la clasificación comparando las alteraciones mapeadas y las alteraciones asignadas. Para evitar que las alteraciones con mayor cantidad de muestras adquieran un mayor peso en el cálculo, el error asociado a cada una de las alteraciones mapeadas es dividido por el número de muestras de la siguiente manera:

$$\text{MSE}(k, i) = \frac{1}{n_k} \sum_j^{n_k} (w_j - \beta_j)^2$$

Donde  $k$  es la alteración mapeada,  $n_k$  la cantidad de muestras pertenecientes a esta alteración,  $i$  es el cluster definido para la alteración  $i$ -ésima,  $w_j$  es una modificación del grado de pertenencia  $u_j$ , tal que es 1 para el grado de pertenencia mayor y 0 para los demás, y  $\beta_j$  se define como:

$$\beta_j = \begin{cases} 1, & \text{alteración mapeada } x_j = \text{alteración definida para cluster } i \\ 0, & \sim \end{cases}$$

Finalmente, se obtiene una matriz de error para cada grupo de elementos considerados para el análisis. En cada columna de esta matriz de 7x7 se encuentra el error asociado al clúster definido por la alteración  $i$ -ésima, y en cada fila, el error con respecto al comportamiento esperado. Por ejemplo, la primera columna representa el clúster definido por la alteración potásica K1, y cada fila corresponde al error asociado a todas las muestras mapeadas como alteración K1, K2, SCC1, SCC2, S1, S2 y AA. En este caso,  $\beta_j$  es igual a 1 para las muestras mapeadas como K1, y 0 para los demás. En la Tabla 7.4, se muestra la matriz de error para la clasificación obtenida usando solo el elemento magnesio. En la primera columna, el error es nulo para las alteraciones K2, S2 y AA, es decir, no existen muestras mapeadas como estas alteraciones que sean asignadas al cluster K1. Las alteraciones mapeadas como K1 asignadas al cluster K1, es decir, cuyo valor de  $\beta_j$  es igual a 1, tienen un error igual a 0.21.



**Tabla 7.4. Matriz de error asociada al Mg. Media matriz= 0.172. Media diagonal = 0.60.**

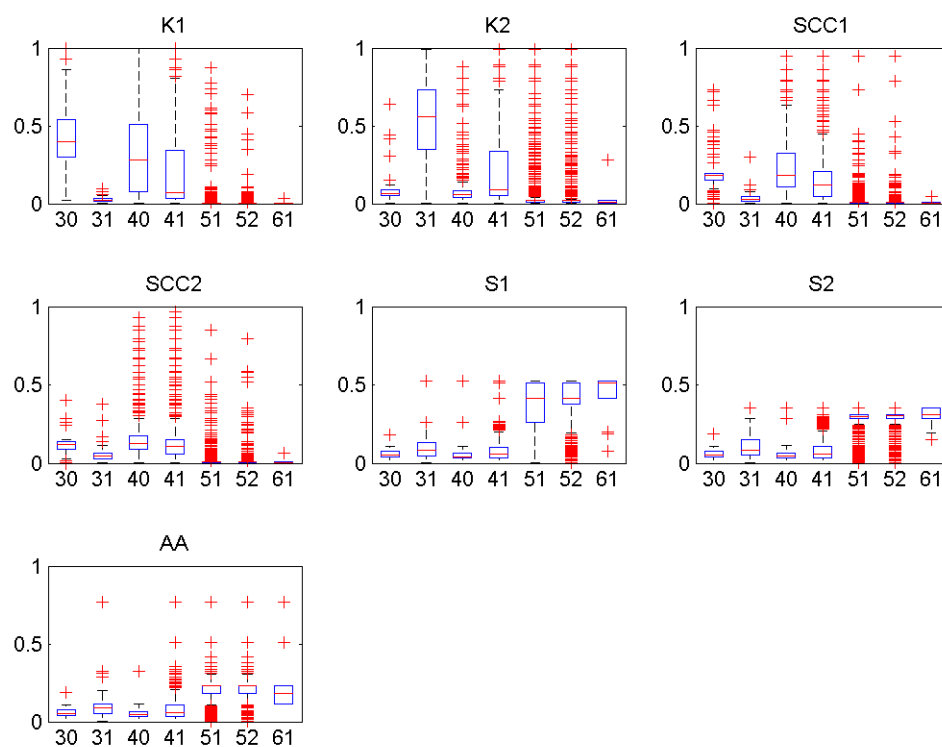
		Alteraciones por cluster						
		K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA
Alteraciones mapeadas	K1	0.21	0.00	0.15	0.06	0.00	0.00	0.00
	K2	0.00	0.24	0.00	0.05	0.00	0.00	0.19
	SCC1	0.41	0.14	0.85	0.29	0.01	0.00	0.01
	SCC2	0.20	0.41	0.12	0.81	0.07	0.00	0.01
	S1	0.01	0.09	0.00	0.01	0.93	0.04	0.77
	S2	0.00	0.08	0.00	0.02	0.07	0.96	0.80
	AA	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.10	0.20

En la Tabla 7.5, se muestra el error total de clasificación asociados a los elementos mayores. La segunda columna de la tabla corresponde al error asociado solo a las muestras con alteración mapeada igual a la definida para el cluster, es decir, para el valor de  $\beta_j=1$ . Cada columna corresponde a la media de la matriz de error y la media de la matriz de error, respectivamente. El comportamiento del magnesio (ver Tabla 7.4) se reduce a estos dos valores de la Tabla 7.5.

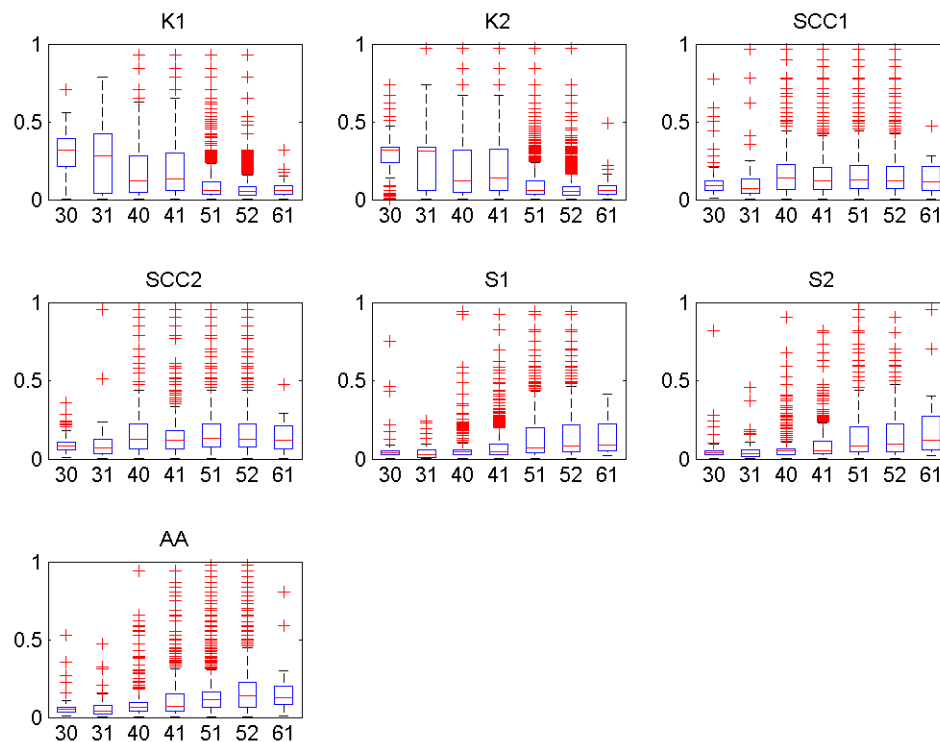
**Tabla 7.5. Errores de clasificación para elementos mayores.**

Elemento [wt%]	Media matriz de error	Media diagonal matriz de error
Mg	0.172	0.600
Al	0.199	0.695
K	0.213	0.745
Ca	0.213	0.747
Na	0.213	0.747
CuT	0.215	0.751
Fe	0.215	0.752
S	0.217	0.760

En las Figura 7.3 y Figura 7.4, se muestran boxplots de los clusters definidos por las muestras representativas de cada alteración (K1, K2, SCC1, SCC2, S1, S2 y AA). En cada uno de los boxplots, se grafican los grados de pertenencia al cluster correspondiente de las muestras mapeadas por alteración (30, 31, 40, 41, 51, 52 y 61).



**Figura 7.3. Boxplots grados de pertenencia por alteración para magnesio.**



**Figura 7.4. Boxplots grados de pertenencia por alteración para azufre.**

La principal diferencia entre los resultados obtenidos para Mg y S, es que el Mg muestra una mejor separación de las alteraciones si observamos las medias, mientras que el S tiende a presentar valores similares en la mayoría de los clusters. Por ejemplo, en el caso de la alteración S1, los datos tienen aproximadamente el mismo grado de pertenencia en este cluster al considerar solo el azufre, mientras que poseen una clara distinción al considerar el magnesio (ver Figura 7.3 y Figura 7.4).

Mediante el análisis del error y la visualización del comportamiento de los grados de pertenencia calculados para cada alteración, se concluye que los elementos mayores que mejor reflejan la separabilidad de las alteraciones hidrotermales definidas son Mg, K, Al, Na y Ca. Los demás elementos mayores no serán considerados en el análisis posterior.

Para el caso de los elementos traza, el tratamiento fue idéntico. Los errores se muestran en la Tabla 7.6.

**Tabla 7.6. Errores de clasificación para elementos traza.**

<b>Elemento [ppm]</b>	<b>Media matriz de error</b>	<b>Media diagonal matriz de error</b>
<b>V</b>	0.178	0.622
<b>Mn</b>	0.185	0.648
<b>P</b>	0.189	0.662
<b>Rb</b>	0.194	0.678
<b>Y</b>	0.198	0.692
<b>Be</b>	0.209	0.733
<b>Co</b>	0.219	0.766

Mediante el análisis del error y la visualización del comportamiento de los grados de pertenencia calculados para cada alteración, se concluye que los elementos traza que mejor reflejan la separabilidad de las alteraciones hidrotermales definidas son: V, Mn, P, Rb e Y.

Una vez obtenidos los elementos mayores y traza que individualmente reflejan mejor el comportamiento esperado para obtener una clasificación óptima en función de las alteraciones definidas previamente, se analiza el comportamiento de todos los grupos posibles de elementos.

En la Tabla 7.7, se muestran los errores de los grupos de elementos mayores en orden creciente, y el promedio de los porcentajes máximos de clasificación por alteración. Este último es una medida de qué grupos de elementos tienden a concentrar más los datos por cluster. De esta manera, se eligen los grupos de elementos que posean un error bajo y un alto promedio de clasificación. Los que cumplen mejor estos criterios son los grupos de: Al-Mg-K-Ca-Na, Al-Mg-K-Ca y Al-Mg-K-Na.

**Tabla 7.7. Error promedio y promedio de porcentajes máximos de clasificación para grupos de elementos mayores.**

<b>Grupos</b>	<b>Error promedio</b>	<b>Promedio de porcentajes máximos de clasificación</b>
<b>Al - Mg - Ca - Na</b>	0.164	64%
<b>Al - Mg</b>	0.164	50%
<b>Al - Mg - Na</b>	0.165	60%
<b>Al - Mg - Ca</b>	0.167	57%
<b>Al - Mg - K - Na</b>	0.168	67%
<b>Al - Mg - K - Ca - Na</b>	0.168	67%
<b>Mg - K - Na</b>	0.169	62%
<b>Al - Mg - K - Ca</b>	0.170	68%
<b>Mg - K</b>	0.171	58%
<b>Al - K - Ca - Na</b>	0.172	59%
<b>Al - Mg - K</b>	0.172	66%
<b>Mg - K - Ca - Na</b>	0.172	66%
<b>Mg - Na</b>	0.174	56%
<b>Mg - Ca - Na</b>	0.175	60%
<b>Mg - K - Ca</b>	0.175	67%

En general, para el caso de los elementos traza, se alcanza un menor error promedio pero también un menor promedio de porcentajes máximos de clasificación que los elementos mayores. Usando los mismos criterios anteriores, los grupos de elementos trazas elegidos son: P-Rb, P-Y-Rb y P-V-Y-Rb (ver Tabla 7.8).

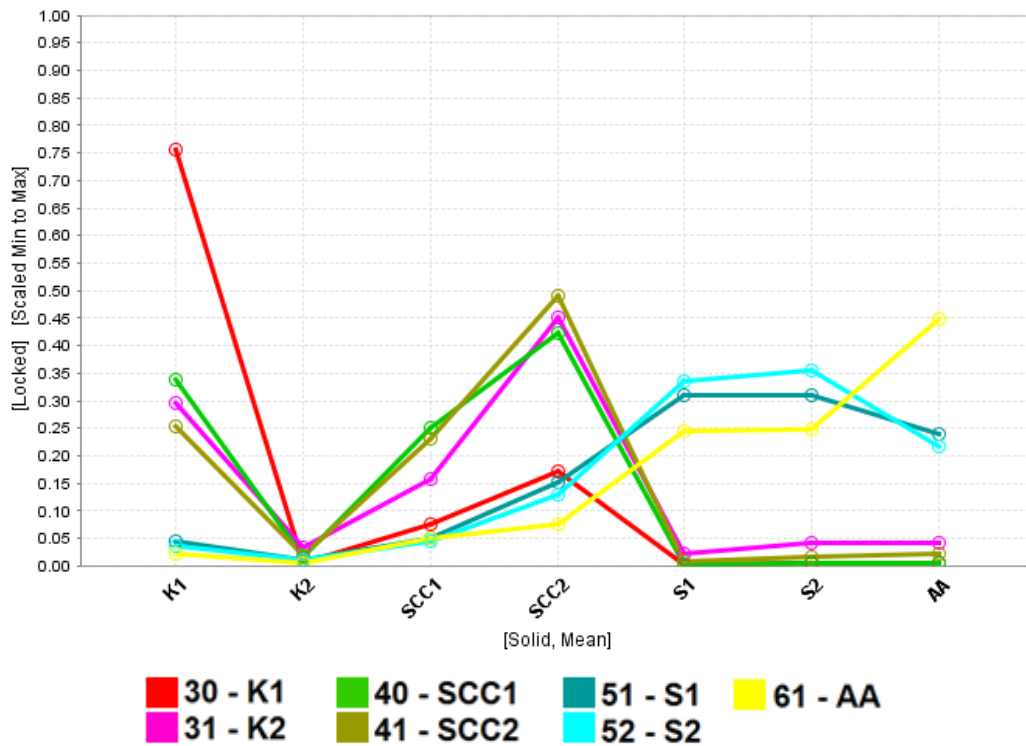
**Tabla 7.8. Error promedio y promedio de porcentajes máximos de clasificación para grupos de elementos traza.**

<b>Grupos</b>	<b>Error promedio</b>	<b>Promedio de porcentajes máximos de clasificación</b>
<b>P - Rb</b>	0.154	57%
<b>P - Y - Rb</b>	0.156	57%
<b>P - V - Rb</b>	0.161	54%
<b>Mn - V - Rb</b>	0.161	57%
<b>P - V - Y - Rb</b>	0.161	58%
<b>P - V - Y</b>	0.162	51%
<b>Mn - Y - Rb</b>	0.163	63%
<b>Mn - V - Y - Rb</b>	0.164	64%
<b>V - Y - Rb</b>	0.165	62%
<b>Mn - V - Y</b>	0.166	65%
<b>Mn - P - V - Y</b>	0.168	55%
<b>Y - Rb</b>	0.168	59%
<b>Mn - P - Y - Rb</b>	0.169	57%
<b>V - Rb</b>	0.169	49%
<b>P - V</b>	0.170	50%

### **7.3 Análisis de los clusters por alteración hidrotermal**

Cada muestra clasificada utilizando los elementos mayores Al-Mg-K-Ca-Na tiene como resultado un grado de pertenencia a cada uno de los clusters definidos por las muestras representativas.

En la Figura 7.5 se muestran los promedios de los grados de pertenencia a cada cluster. Existen alteraciones, como el caso de K1 y AA, en las que los grados de pertenencia asociados a la misma clase son los mayores. Sin embargo, en el caso de las alteraciones K2 (Potásica Feldespática), SCC (Sericita-Clorita-Cuarzo) y S (Cuarzo-Sericita), los grados de pertenencia mayores pueden ser compartidos y traslaparse entre dos o tres alteraciones, como el cluster definido para SCC2, donde las muestras mapeadas como SCC2 presentan el mayor grado de pertenencia, pero dentro del mismo rango caen los valores de SCC1 y K2. Además, las alteraciones fílicas (S1 y S2) presentan valores similares para los clusters definidos para ambas alteraciones.



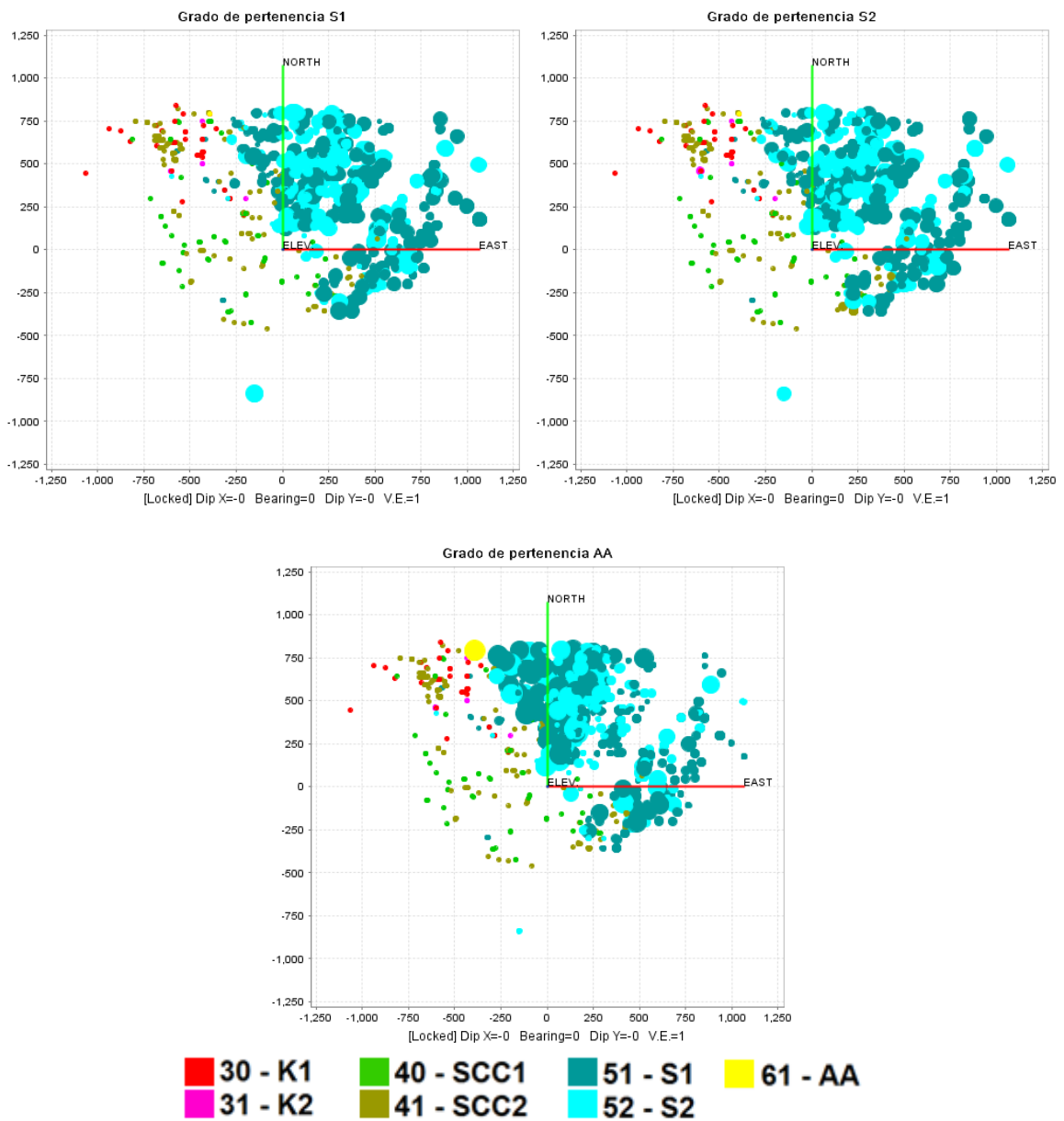
**Figura 7.5. Promedio de grados de pertenencia por alteración mapeada.**

La Figura 7.6 y Figura 7.7 muestran plantas de la zona de estudio de la mina Escondida. El tamaño del círculo asociado a las muestras se relaciona con el grado de pertenencia al cluster indicado. Nuevamente, el cluster definido para K1 muestra una alta correlación con las muestras de dicha alteración. Por otro lado, las alteraciones S1 y S2 muestran un comportamiento similar entre ellas, al igual que las SCC1 y SCC2. K2 es clasificada preferentemente como SCC2. La AA presenta un comportamiento levemente distinto a las alteraciones filicas.



**Figura 7.6. Planta Cota 2750 ± 50 m. Tamaño de las muestras representa el grado de pertenencia a un cluster.**





**Figura 7.7. Planta Cota 2750 ± 50 m. Tamaño de las muestras representa el grado de pertenencia a un cluster (continuación).**

## 7.4 Número óptimo de clusters

A pesar de que el error es un indicador de la calidad del clasificador, las matrices de confusión muestran que existen alteraciones que pueden estar clasificadas dentro de más de 2 clases a la vez como se muestra en la Tabla 7.9.

**Tabla 7.9. Matrices de confusión de Al-Mg-K-Ca-Na y Al-Mg-K-Na.**

		Al-Mg-K-Ca-Na						
		Alteración Clasificada						
		K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA
Alteración Mapeada	K1	89%	0%	8%	4%	0%	0%	0%
	K2	19%	14%	0%	48%	19%	0%	0%
	SCC1	19%	1%	43%	34%	2%	0%	0%
	SCC2	11%	6%	18%	58%	6%	0%	0%
	S1	1%	1%	2%	15%	78%	2%	1%
	S2	1%	0%	2%	9%	82%	5%	1%
	AA	0%	0%	10%	20%	70%	0%	0%
		Al-Mg-K-Na						
		Alteración Clasificada						
		K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA
Alteración Mapeada	K1	87%	0%	8%	6%	0%	0%	0%
	K2	14%	14%	0%	67%	5%	0%	0%
	SCC1	15%	3%	49%	32%	1%	0%	0%
	SCC2	9%	9%	21%	54%	7%	0%	0%
	S1	0%	2%	1%	15%	76%	3%	2%
	S2	0%	1%	2%	11%	77%	8%	2%
	AA	0%	0%	10%	30%	60%	0%	0%

Las matrices de confusión muestran que las alteraciones fílicas (S1 y S2) son clasificadas principalmente como S1, pudiendo ser asignadas también al cluster SCC2. Este comportamiento se repite en otras alteraciones, K2 que es clasificada principalmente como SCC2, S1 y K1. Esto se explica principalmente al calcular las distancias entre los centroides, las cuales muestran que las alteraciones con mayor confusión se encuentran más cercanas (ver Tabla 7.10).

**Tabla 7.10. Distancia euclidiana entre centros de alteraciones (Al-Mg-K-Ca-Na).**

	K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA
K1	-	3.52	0.27	0.50	4.46	4.64	4.27
K2	-	-	3.42	1.78	0.78	0.86	1.00
SCC1	-	-	-	0.82	3.60	3.74	3.30
SCC2	-	-	-	-	3.22	3.39	3.18
S1	-	-	-	-	-	0.00	0.04
S2	-	-	-	-	-	-	0.04
AA	-	-	-	-	-	-	-

De lo anterior, se plantea la pregunta de cuántos son efectivamente el número de clusters propios de la base de datos.

Para encontrar el número óptimo de clusters, sin imponerlo previamente, se plantea utilizar el coeficiente silhouette para el método de clasificación por partición: k-means. Este algoritmo organiza los datos en una cantidad k definida de grupos o clusters. Estos clusters se forman de tal manera que optimicen un criterio de partición como una función de disimilitud basada en la distancia, tal que los datos dentro de un cluster sean similares entre sí y disímiles a los de los demás, en función de las variables utilizadas. Cada cluster es caracterizado por su centroide, el cual corresponde al promedio de los valores asignados a cada grupo.

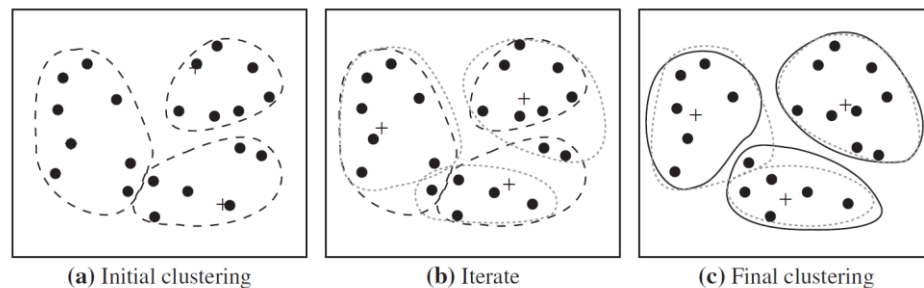
En k-means, la función objetivo a optimizar es la suma de los errores cuadráticos de los clusters. Al minimizar esta función, se intentan definir los clusters lo más compactos y separables entre sí, es decir, que la distancia entre datos de un mismo cluster sea mínima, y la distancia entre clusters sea la máxima posible. Esta función se define de la siguiente forma:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \text{dist}(x, c_i)^2$$

Donde x es un dato en el espacio,  $c_i$  es el centroide del cluster  $C_i$  y  $\text{dist}(x, c_i)$  es una función de distancia. En este caso, se usará la distancia euclidiana (Han et al., 2012).

El algoritmo de partición k-means necesita como input un set de datos definidos por una serie de variables, y un número entero definido de cluster k, y entrega como output los clusters a los que pertenece cada muestra. La metodología utilizada se describe a continuación (ver Figura 7.8):

- i) Elegir k datos del set de datos como los centroides iniciales.
- ii) Asignar cada dato al cluster al que se asemeje más. En este caso se asigna al cluster más cercano utilizando la distancia definida.
- iii) Actualizar los centroides, calculando el valor promedio de los valores pertenecientes a cada cluster.
- iv) Repetir pasos ii y iii hasta que no haya variación en los centroides.



**Figura 7.8. Metodología de agrupación de k-means (tomado de Han et al., 2012).**

Una vez asignados los datos a cada cluster, es posible usar distintos parámetros para evaluar las características de estos. Uno de los parámetros más utilizados para este método es el valor de silhouettes (Pedregosa et al., 2011), el cual consiste en calcular dos valores por cada dato, para finalmente obtener un valor promedio que caracterice la clasificación como se muestra a continuación.

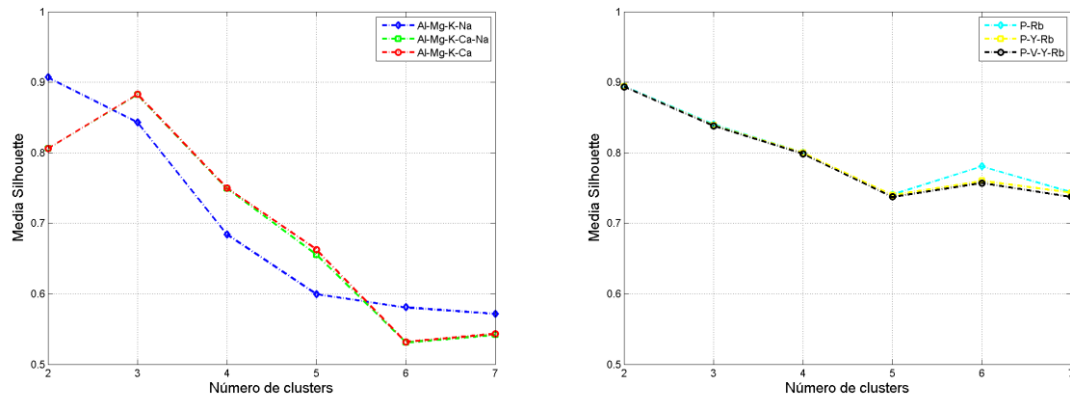
a: distancia promedio entre una muestra y todos los puntos en un cluster

b: distancia promedio entre una muestra y todos los puntos en el cluster más cercano.

s: silhouette de una muestra

$$s = \frac{b - a}{\max(a, b)}$$

Así se definido por las variables, obtiene un valor que evalúe la geometría de los clusters en el espacio mediante el cálculo del promedio de los valores de silhouette. En el caso de los grupos Al-Mg-K-Ca-Na y Al-Mg-K-Ca, este valor alcanza su máximo para un número de clusters igual a 3 (ver Figura 7.9).



**Figura 7.9. Media de silhouettes vs número de clusters para grupos de elementos mayores y trazas.**

El agrupamiento de las alteraciones en los clusters calculados por el método K-means para los distintos grupos de elementos indica nuevamente que las alteraciones S1 – S2 y SCC1 – SCC2 son afines (ver Tabla 7.11).

**Tabla 7.11. Porcentaje de clasificación de alteraciones en los clusters calculados por K-means para Al-Mg-K-Ca-Na y Al-Mg-K-Ca.**

	Al-Mg-K-Ca-Na			Al-Mg-K-Ca		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
<b>K1</b>	6%	4%	91%	5%	73%	22%
<b>K2</b>	91%	7%	2%	96%	0%	4%
<b>SCC1</b>	12%	0%	88%	9%	48%	43%
<b>SCC2</b>	36%	16%	47%	38%	26%	36%
<b>S1</b>	97%	1%	2%	97%	1%	2%
<b>S2</b>	98%	0%	2%	97%	0%	3%
<b>AA</b>	100%	0%	0%	95%	0%	5%

La distancia entre los centros de los clusters definidos para los grupos de elementos mayores y los centros de los clusters predefinidos con las muestras representativas de cada alteración, muestran que para un mismo grupo de elementos los centros más cercanos entre sí son aquellos que se clasifican dentro de un mismo cluster (ver Tabla 7.12).

**Tabla 7.12. Distancia entre centros predefinidos y calculados por K-means para Al-Mg-K-Ca-Na y Al-Mg-K-Ca.**

	Al-Mg-K-Ca-Na			Al-Mg-K-Ca		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
<b>K1</b>	2.12	2.61	0.42	2.04	0.48	0.68
<b>K2</b>	0.91	2.49	1.88	0.25	2.26	1.21
<b>SCC1</b>	1.9	2.96	0.11	1.89	0.54	0.51
<b>SCC2</b>	1.81	2.1	0.87	1.5	0.93	0.11
<b>S1</b>	0.03	3.33	1.96	0.02	2.43	1.39
<b>S2</b>	0.04	3.37	2	0.03	2.46	1.42
<b>AA</b>	0.2	3.39	1.89	0.2	2.34	1.3

De igual forma, la clasificación supervisada muestra que las alteraciones pueden ser clasificadas indistintamente como una u otra clase, como sucede con S1, S2 y AA.

Los estudios previos con esta base de datos (Townley et al., 2012), el análisis de las zonas de interés y el cálculo de las silhouettes para K-means, indican que existen 3 grupos de datos principalmente. Según la clasificación propuesta, los grupos de alteraciones hidrotermales se pueden definir de la siguiente manera.

El grupo de las alteraciones filicas, o grupo S, se define por S1, S2 y AA. El grupo de las alteraciones clorita-sericita, o grupo SCC, se define por K2, SCC1 y SCC2. El grupo K se define por la alteración K1.

La alteración K2, si bien muestra una menor distancia entre centros con S1 y S2, posee un mayor porcentaje de clasificación dentro de la alteración SCC2 para los grupos de elementos estudiados.

Según esta nueva definición de clases, las alteraciones hidrotermales quedan distribuidas según se muestra en la Tabla 7.13. Los 3 grupos de elementos considerados, si bien tienden a clasificar las alteraciones de forma similar, difieren en los porcentajes de datos. Por ejemplo, la alteración potásica biotítica (K1) muestra un porcentaje muy alto para el primer grupo de elementos y uno bajo para la alteración potásica feldespática (K2). Mientras que para el segundo grupo de elementos, la tendencia es inversa.

**Tabla 7.13. Porcentaje de clasificación de alteraciones mapeadas en clusters redefinidos para distintos grupos de elementos.**

Alteración Mapeada	Al-Mg-K-Ca-Na			Al-Mg-K-Ca			Al-Mg-K-Na		
	K	SCC	S	K	SCC	S	K	SCC	S
K1	94%	6%	0%	77%	23%	0%	92%	8%	0%
K2	14%	76%	10%	10%	86%	5%	10%	86%	5%
SCC1	18%	81%	1%	16%	83%	1%	17%	82%	1%
SCC2	9%	86%	5%	9%	80%	11%	10%	83%	7%
S1	0%	20%	80%	0%	14%	85%	0%	20%	79%
S2	0%	13%	86%	0%	11%	89%	0%	15%	85%
AA	0%	40%	60%	0%	40%	60%	0%	40%	60%

## 7.5 Grados de pertenencia de muestras con una alteración por tramo

Los grados de pertenencia calculados a partir de los datos con solo una alteración mapeada muestran los mayores valores para las alteraciones que fueron definidas. Es decir, la alteración K1 muestra sus mayores valores en el cluster K; SCC1, SCC2 y K2 al cluster SCC; y S1, S2 y AA al cluster S (ver Figura 7.10).

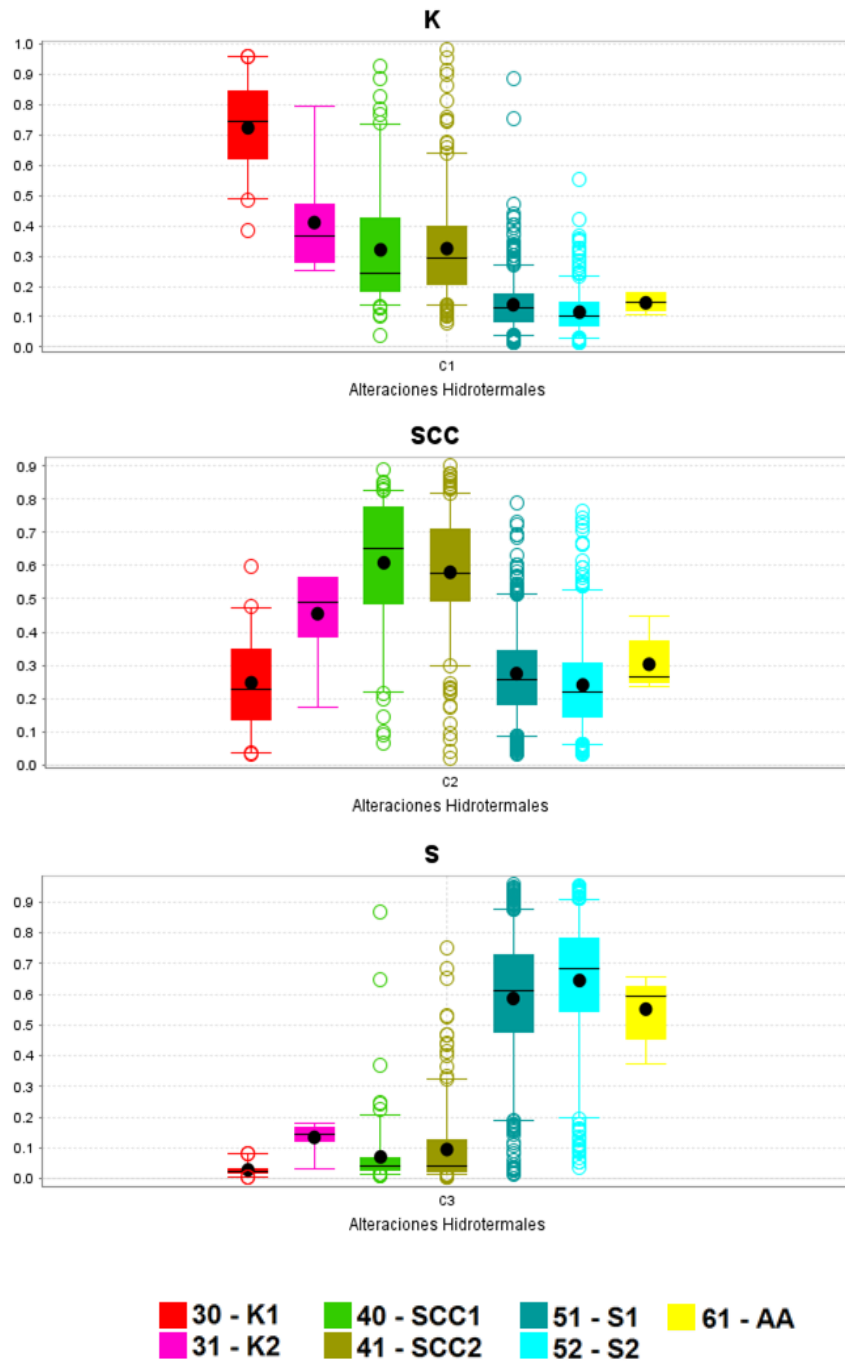
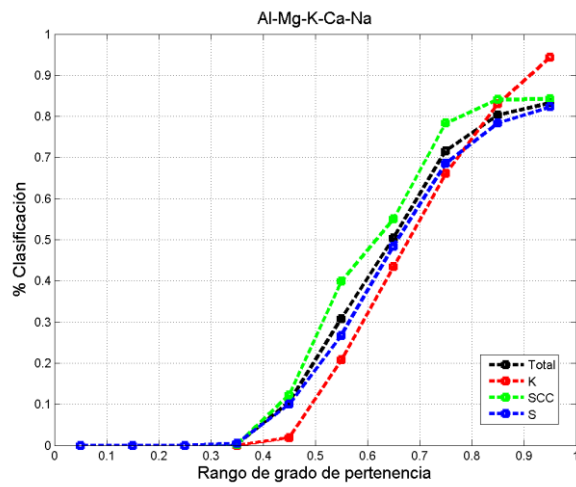
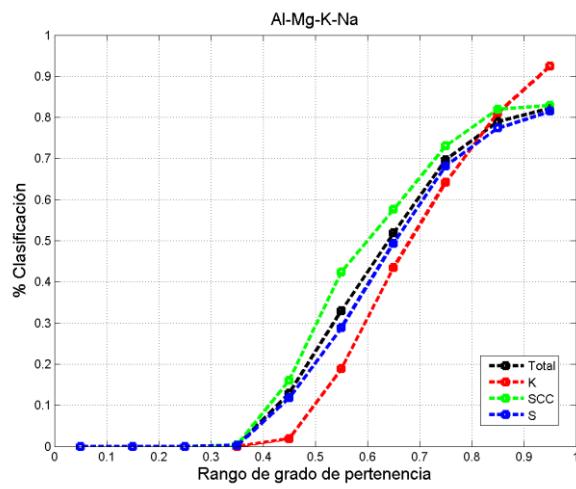
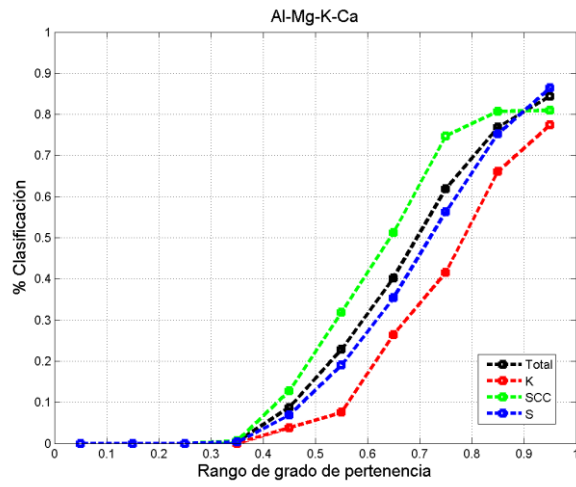


Figura 7.10. Boxplots de grados de pertenencia a clusters K, SCC y S calculados para Al-Mg-K-Ca-Na para muestras con una alteración por tramo.



La Figura 7.11 se construye calculando el porcentaje de clasificación en 10 rangos del grado de pertenencia, es decir, se consideran todos los datos pertenecientes a un intervalo del grado de pertenencia a un cluster y se calcula el porcentaje de los datos clasificados correctamente. Este gráfico muestra el comportamiento creciente de la distribución de la clasificación conforme aumenta el grado de pertenencia. La distribución de la clasificación en función de los grados de pertenencia puede ser utilizada para entregar información acerca de la incertidumbre con la que se asigna una muestra a un cluster.



**Figura 7.11. Grados de pertenencia calculados por rango para muestras con solo una alteración por tramo para diferentes grupos de elementos.**

Un ejemplo del cálculo del porcentaje de clasificación en función de los grados de pertenencia se da a continuación, en donde se distingue entre 3 rangos de valores separados por 2 inflexiones notorias para el grupo de elementos Al-Mg-K-Ca-Na. Cada uno de estos rangos de valores presenta un porcentaje de clasificación asignado de la siguiente manera:

$$\% \text{ Clasificación} = \begin{cases} 0, & u < 0.4 \\ 1.8 * u - 0.68, & 0.4 \leq u < 0.8 \\ > 0.8, & u \geq 0.8 \end{cases}$$

Donde u corresponde al grado de pertenencia asignado por la clasificación. Esta regla simple señala una de las utilidades del modelo propuesto utilizando las distancias a los cluster de cada alteración, pudiendo ser utilizado en el mapeo de sondajes tomando mayor atención a aquellos que posean un porcentaje de clasificación menor.

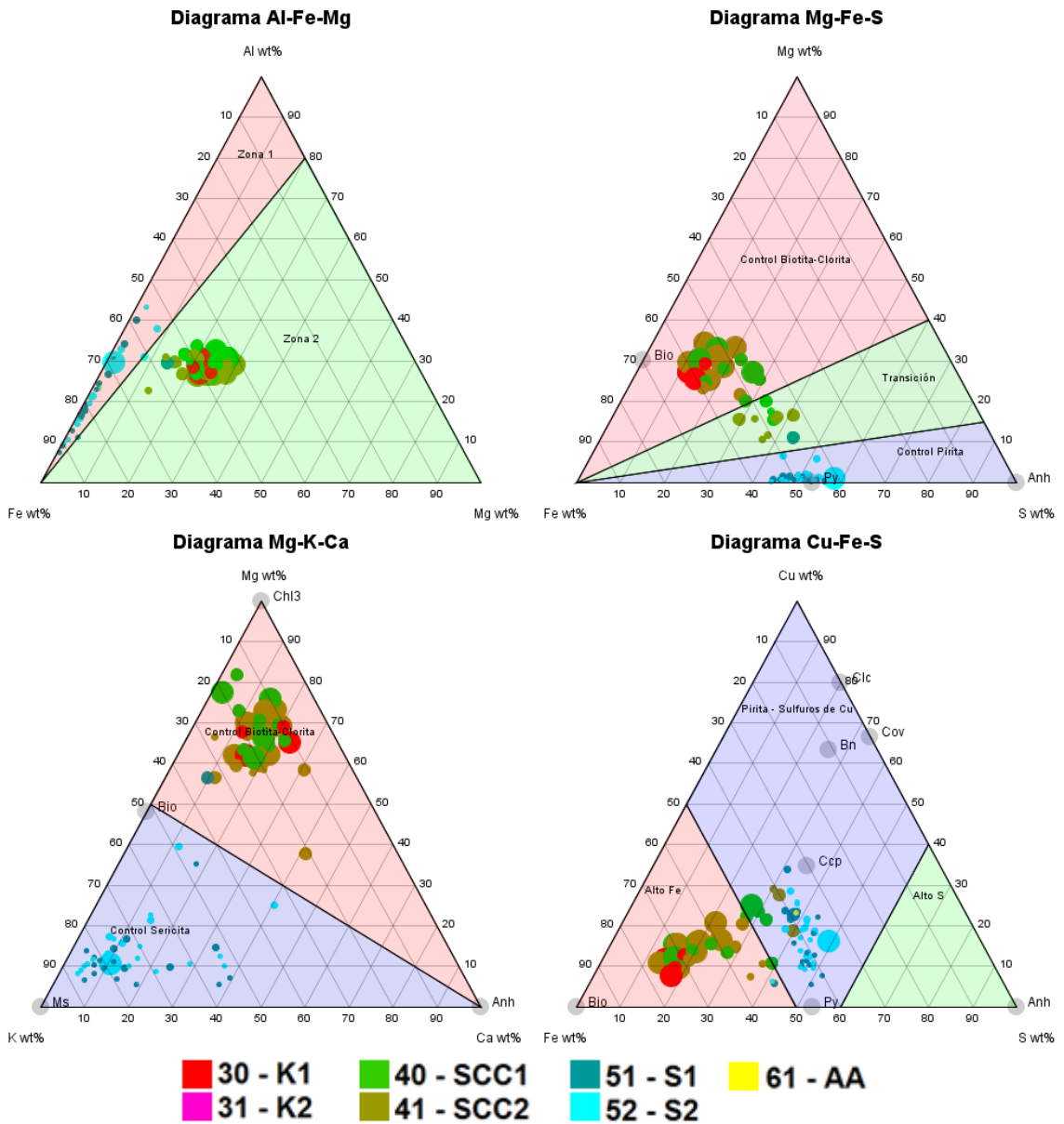
## 7.6 Patrones mineralógicos

Con los modelos geoquímicos descritos se clasifican las muestras de mineralogía avanzada Qemscan, y se analiza la razón de los errores con respecto al mapeo. Según las matrices de confusión, las alteraciones que tienden a ser asignadas erróneamente a otra clase son principalmente las alteraciones K1, SCC1 y SCC2. Dependiendo de los elementos considerados en la clasificación, entre 9 y 12 muestras de alteración SCC1 y SCC2 son asignadas al cluster K, 2 muestras de alteraciones K1 son asignadas al cluster SCC, y 2 o 3 de las S1 y S2 al cluster SCC (ver Tabla 7.14).

**Tabla 7.14. Matrices de confusión para los datos de mineralogía Qemscan.**

		Al-Mg-K-Ca-Na			Al-Mg-K-Ca			Al-Mg-K-Na			Total
		K	SCC	S	K	SCC	S	K	SCC	S	
Alt. Mapeada	K1	2	2	0	2	2	0	2	2	0	4
	SCC1	5	7	0	5	7	0	5	7	0	12
	SCC2	6	10	0	7	9	0	4	12	0	16
	S1	0	1	18	0	1	18	0	1	18	19
	S2	0	2	21	0	1	22	0	2	21	23
	AA	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1

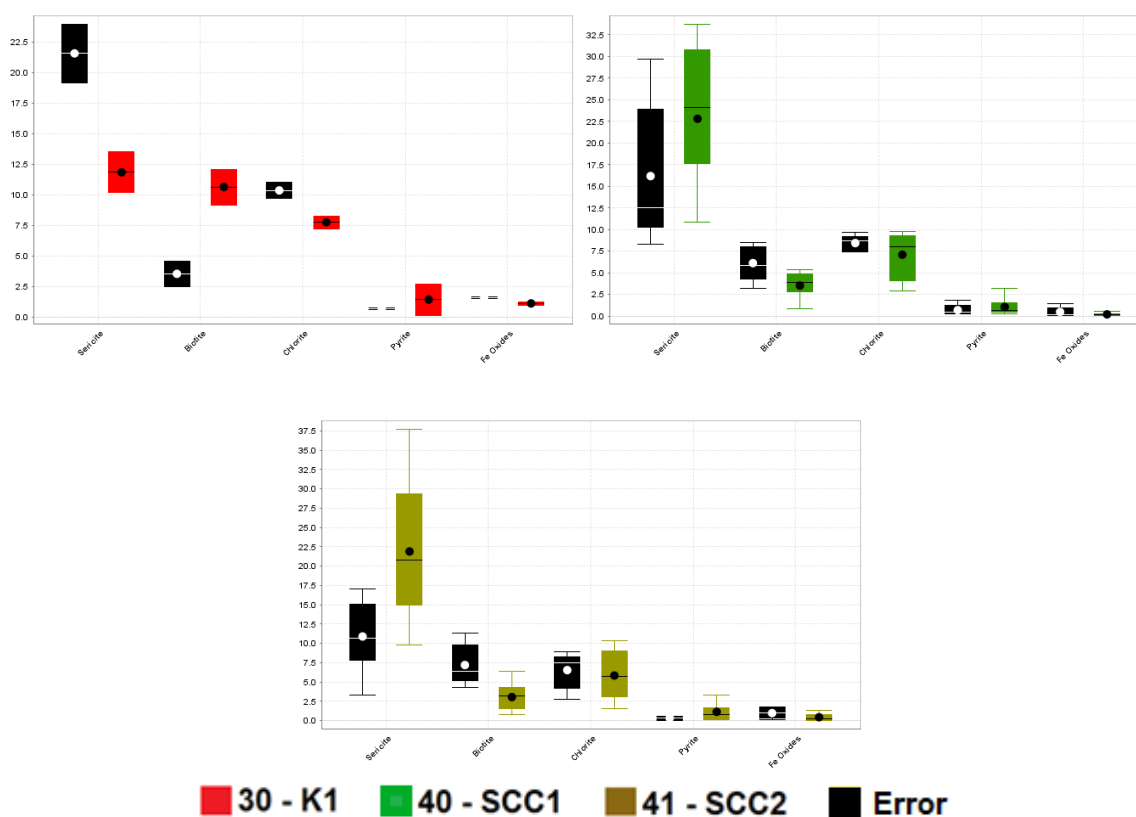
Los diagramas ternarios de elementos permiten agrupar las alteraciones en función de los minerales predominantes. El tamaño de los círculos asociadas a las muestras indica la razón (Biotita+Clorita)/Pirita, y se asocian inversamente a la distancia a los nodos definidos por la composición de estos minerales (ver Figura 7.12).



**Figura 7.12. Diagramas ternarios para las muestras Qemscan. El tamaño de los círculos indica mayor valor de la razón (Biotita+Clorita)/Pirita.**

Utilizando los datos de mineralogía cuantitativa se comparan los patrones de concentraciones de minerales de las muestras clasificadas dentro de los clusters esperados y fuera de estos. El grupo de elementos utilizado para la clasificación fueron Al-Mg-K-Ca-Na. Debido a la cantidad de muestras, solo se analizará el caso de las alteraciones K1 clasificadas como SCC, y las alteraciones SCC1 y SCC2 clasificadas como K (ver Tabla 7.14).

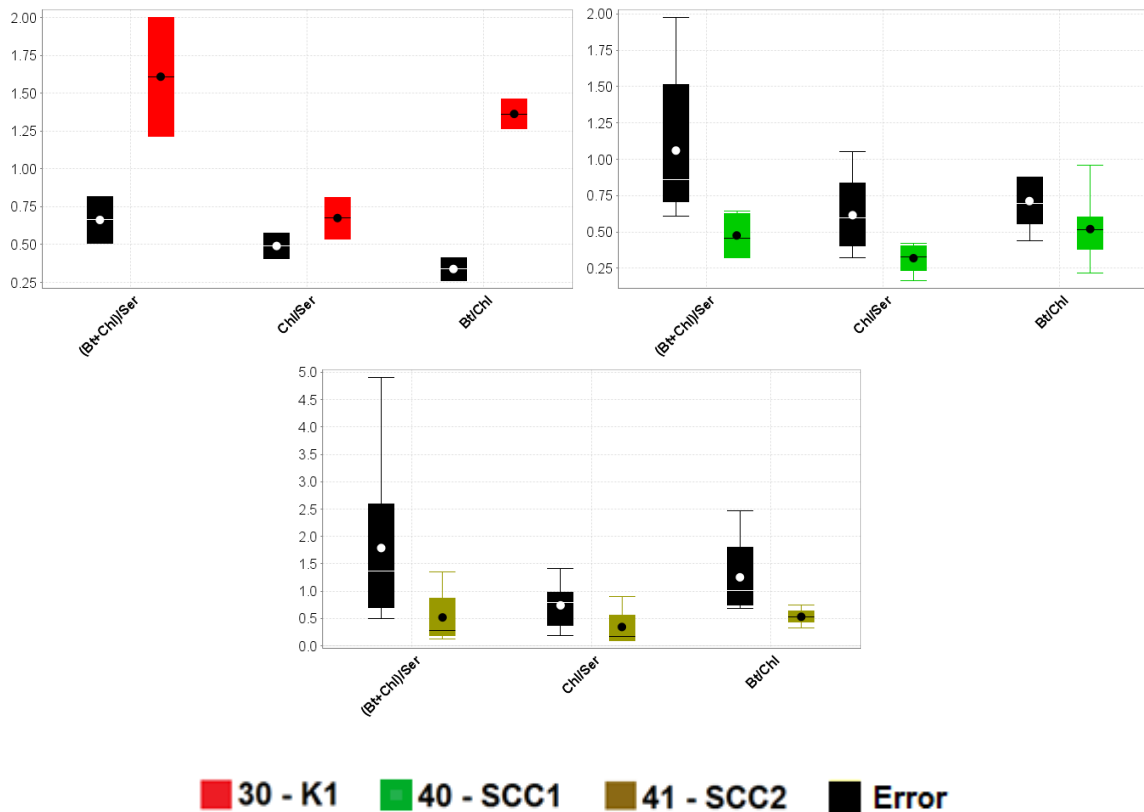
La Figura 7.13 muestra las concentraciones de minerales Qemscan promedio de los datos clasificados correctamente dentro de los cluster y de los clasificados erróneamente, según el mapeo geológico. La alteración K1 posee concentraciones de biotita mayores a las de clorita, mientras que ocurre lo contrario en SCC1 y SCC2. En estas últimas, la sericita es altamente predominante, mientras que en K1 presenta una concentración similar a la de biotita. Las muestras clasificadas dentro de otro cluster presentan un patrón claramente distinto para K1 y SCC2. Para SCC1, el patrón de las muestras con error es levemente menos pronunciado.



**Figura 7.13. Composición media de minerales para muestras clasificadas correctamente y sus respectivos errores.**

La Figura 7.14 compara las distribuciones de tres razones entre biotita, clorita y sericita. En el caso de K1, los datos clasificados correctamente muestran un marcado predominio de biotita+clorita sobre sericita, y de biotita sobre clorita, mientras que los

clasificados como SCC muestran el comportamiento opuesto. En SCC1, los datos mal clasificados muestran un predominio de biotita+clorita sobre sericita. En SCC2, muestran un predominio de biotita+clorita sobre sericita, y de biotita sobre clorita.



**Figura 7.14. Boxplots composición media de minerales para muestras clasificadas correctamente y sus respectivos errores.**

Los patrones mineralógicos de los datos pertenecientes a una alteración correctamente clasificada son distintos a los patrones de los datos clasificados incorrectamente. Es decir, las relaciones mineralógicas de las muestras se ven reflejadas directamente en su clasificación según el modelo propuesto para elementos mayores. De esta manera, el error asociado a la clasificación de datos Qemscan se debería a que presentan un patrón de minerales de alteración diferente a los de la clase mapeada.

A partir de este análisis se concluye que el modelo de clasificación propuesto en función de las concentraciones de elementos mayores es capaz de distinguir entre patrones de proporciones modales de minerales. Finalmente, se evidencia que el mapeo geológico no siempre refleja la mineralogía de la roca.

## 7.7 Reclasificación de alteración fílica indiferenciada

La alteración fílica indiferenciada (código 50) corresponde a un código de mapeo antiguo, el cuál no considera las posibles variaciones dentro de ésta categoría como, por ejemplo, el contenido en arcilla o la razón clorita:sericita. Se reclasifican las muestras con el modelo propuesto considerando el grupo de elementos Al-Mg-K-Ca-Na (ver Tabla 7.15).

**Tabla 7.15. Resultados de clasificación de alteración fílica indiferenciada.**

	<b>Cantidad de datos</b>
<b>K</b>	37
<b>SCC</b>	351
<b>S</b>	643
<b>Total</b>	1031

Si se compara la distribución de los grados de pertenencia de esta clasificación (ver Figura 7.15) a los obtenidos anteriormente (ver Figura 7.11), se pueden asociar a porcentajes de clasificación de las alteraciones si se asume un comportamiento similar de los datos. Es decir que es posible modelar el error de la clasificación usando los grados de pertenencia, ya que estos tienen un comportamiento inverso.



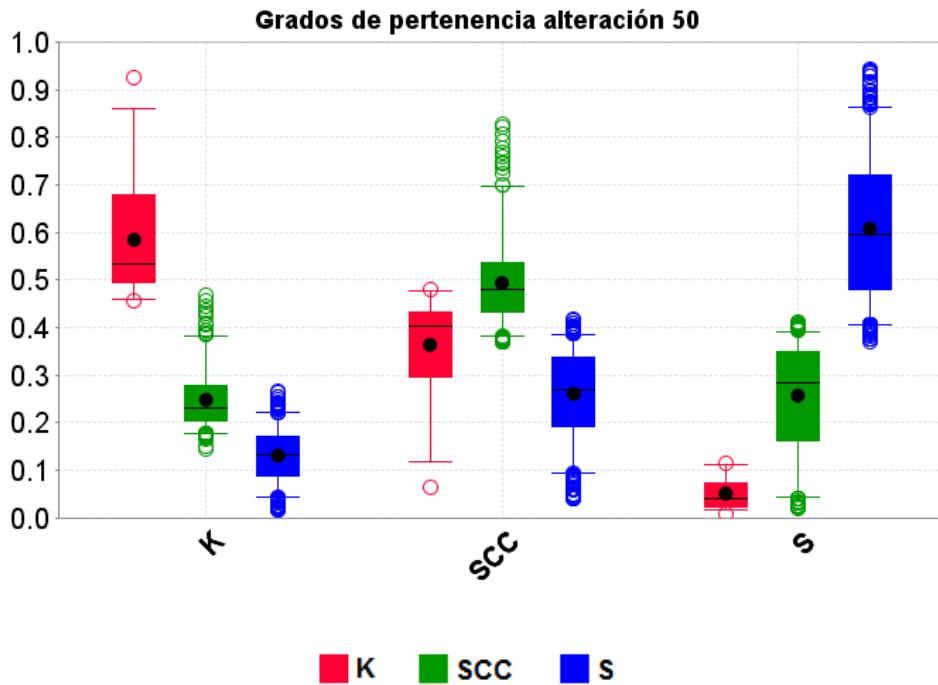
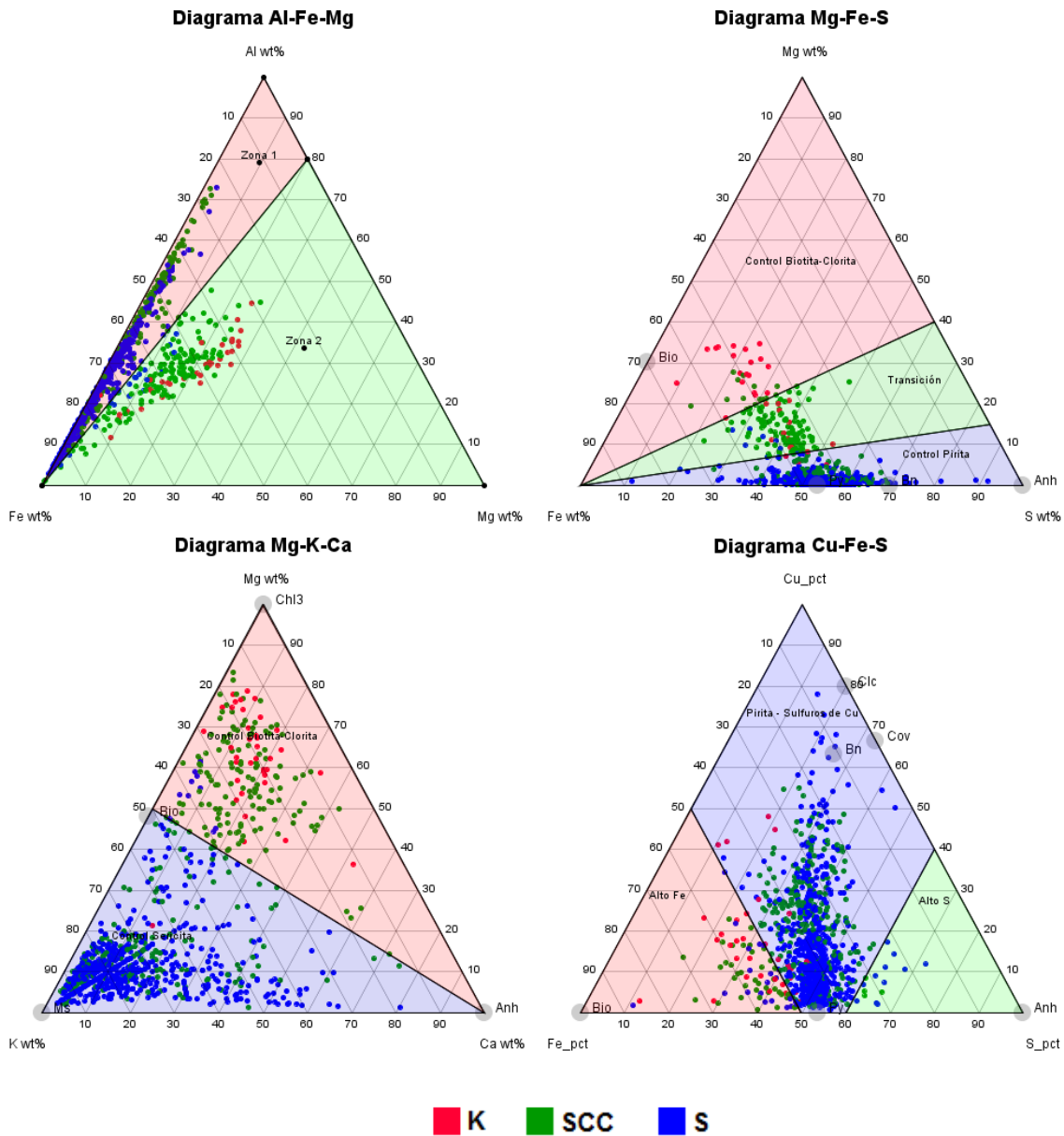


Figura 7.15. Boxplots de grados de pertenencia de alteración fílica indiferenciada.

Por otro lado, los diagramas ternarios ponen en evidencia que algunas muestras poseen un mayor control asociado a biotita-clorita, en lugar de piritita y sericitita que es lo esperado para la alteración fílica (ver Figura 7.16).

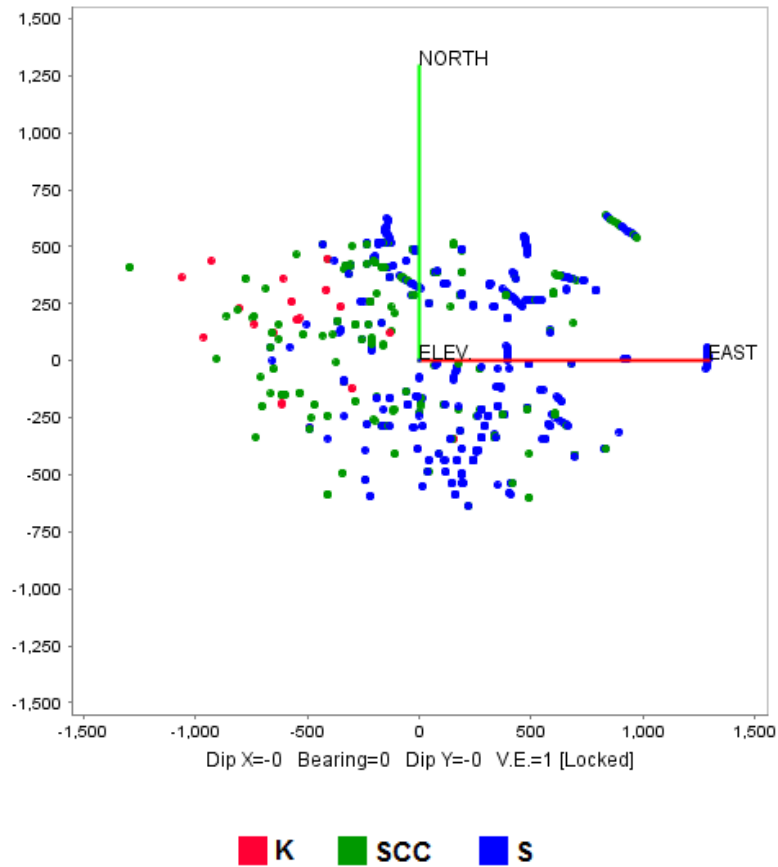


**Figura 7.16. Diagramas ternarios para alteración fílica indiferenciada.**

Al comparar la distribución espacial de la alteración fílica indiferenciada con la de las muestras clasificadas anteriormente, se observa que el modelo también refleja una correlación en estas variables. Las muestras asignadas al tipo K se encuentran en la zona NW, las SCC en la zona central y SW, y las tipo S en el Este (ver Figura 7.17 y Figura 7.18).



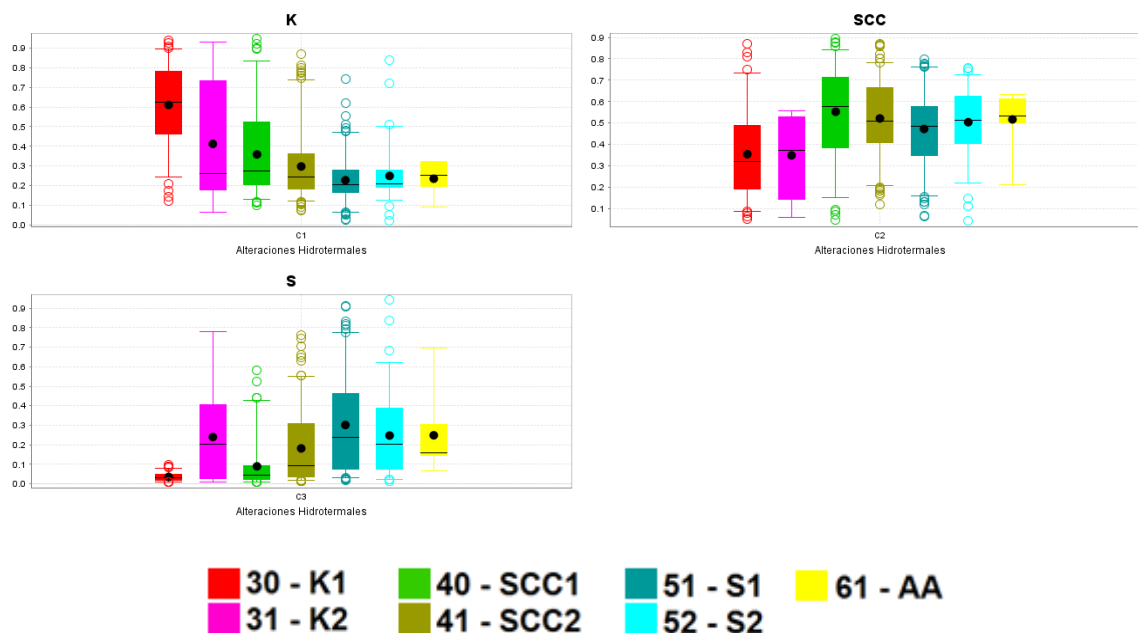
**Figura 7.17. Planta Cota= 2750 ± 50 m. Grados de pertenencia a los clusters K, SCC y S para Al-Mg-K-Ca-Na.**



**Figura 7.18. Distribución espacial de clasificación de alteración fílica indiferenciada.**

### **7.8 Grados de pertenencia de muestras con dos alteraciones por tramo**

A diferencia de los datos con una alteración, las muestras con dos alteraciones no presentan una diferencia significativa entre los grados de pertenencia por cluster (ver Figura 7.19). Este comportamiento es de esperar debido a que cada muestra contiene las dos alteraciones en distintas proporciones, es decir, existe una mezcla tanto física como química. Cabe destacar que esta separación de la base de datos se realiza a partir de la información de mapeo y no considera el efecto de la superposición natural de las alteraciones hidrotermales, en donde la roca presenta una serie de alteraciones superpuestas una sobre la otra lo que se refleja en la presencia de minerales característicos de cada una de ellas.



**Figura 7.19. Boxplots de grados de pertenencia a clusters K, SCC y S calculados para Al-Mg-K-Ca-Na para muestras con dos alteraciones por tramo.**

Para analizar la clasificación se separan los datos entre pares de alteraciones con sus respectivas proporciones, por ejemplo para el par SCC – S, una proporción igual a 0.3 equivale a una muestra con 30% de alteración S y 70% SCC (ver Figura 7.20).

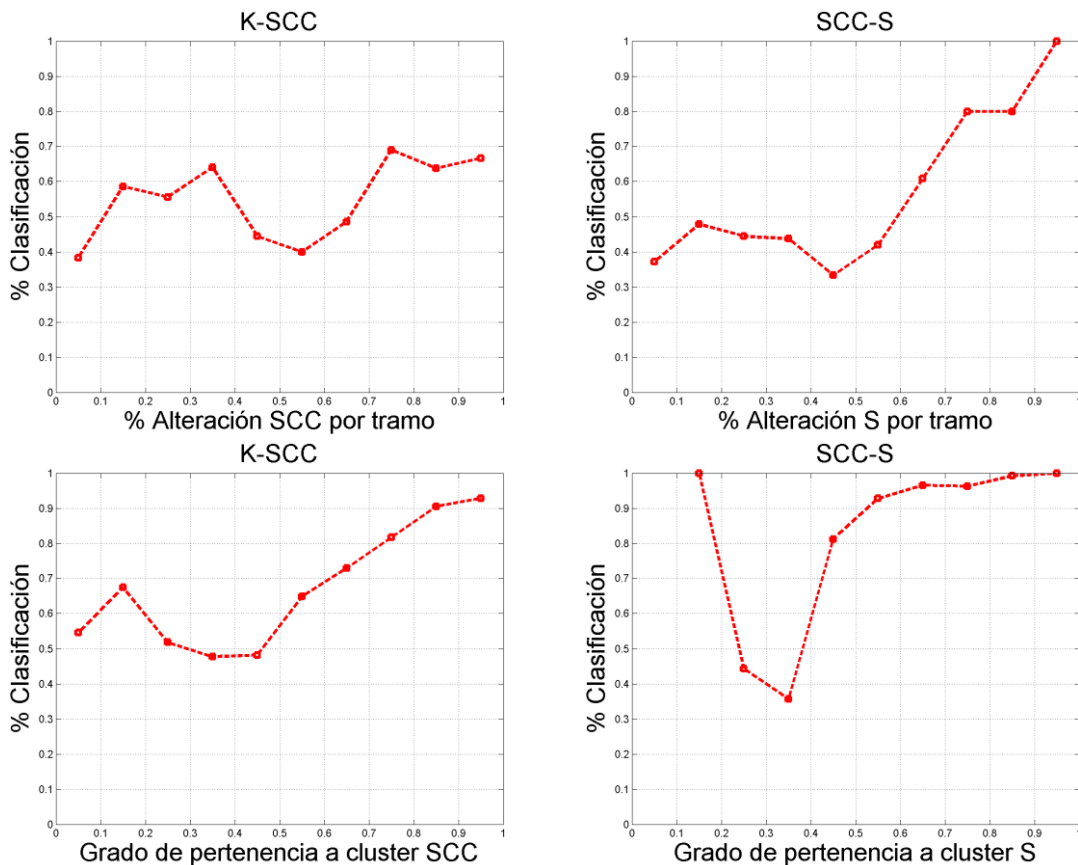


**Figura 7.20. Ejemplo del par SCC – S.**

Al igual que la sección anterior, se calcula el porcentaje de clasificación para los pares de alteraciones por rango de proporción entre ellas y grado de pertenencia para una de las alteraciones. En este caso, el grupo de elementos utilizado es Al-Mg-K-Na ya que es el que presenta un comportamiento más definido (ver Anexo: Porcentaje de clasificación versus rangos de porcentaje de alteración por tramo). Además, el par K-S no se incluye en el análisis debido a que la clasificación es tal que no contiene la

cantidad de datos necesarios que los vinculen, y por la confusión que existe entre las alteraciones SCC y K, las cuales tienden a ser asignadas con gran error.

El porcentaje de clasificación entre pares de alteraciones alcanza un mínimo cuando la diferencia en la proporción de alteraciones por sondaje disminuye, y aumenta cuando una de las dos se hace predominante. Debido a que el modelo tiende a confundir entre las alteraciones K y SCC, el porcentaje de clasificación disminuye cuando una de ellas está en mayor proporción. Por otro lado, la clasificación presenta un comportamiento similar en función de los grados de pertenencia, pudiendo tener mayores variaciones a medida que la diferencia entre los grados de pertenencia es menor (ver Figura 7.21).



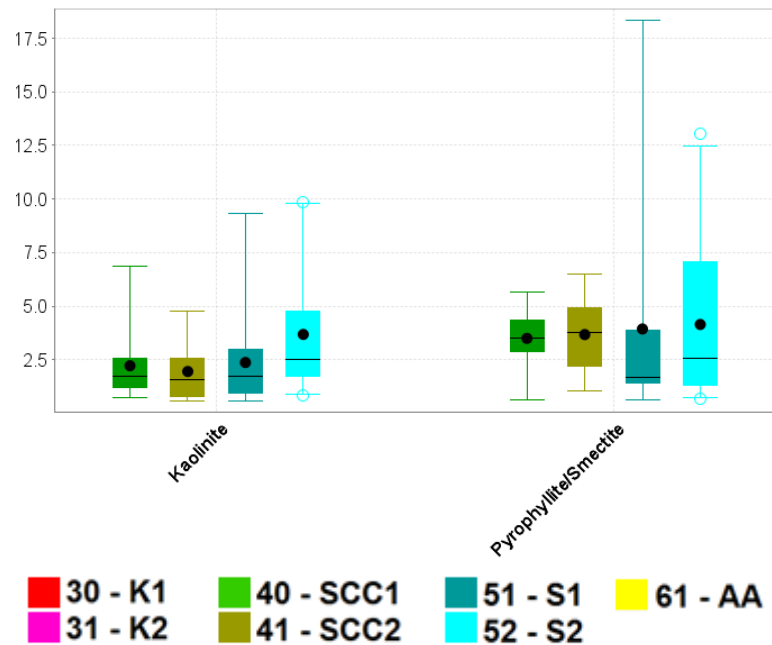
**Figura 7.21. Porcentaje de clasificación en función de las proporciones de alteración por tramo y grado de pertenencia para los pares K – SCC y SCC – S, considerando el grupo de elementos Al-Mg-K-Na.**

## 8 Discusión

El modelo de clasificación propuesto permite distinguir entre 3 zonas de alteración: K, SCC y S. La clasificación considera los elementos mayores que se distribuyen en función de las alteraciones. A su vez, estos elementos se correlacionan directamente con la presencia de minerales solubles en agua regia: biotita, clorita, óxidos de hierro y pirita, principalmente.

En el cluster K, el principal control mineral lo ejercen biotita y clorita sobre sericita, y biotita por sobre clorita. En S, la sericita y pirita predominan ampliamente por sobre los demás minerales. En SCC, la clorita y sericita ejercen el control principal de la mineralogía de alteración, pudiendo presentar distintas proporciones entre ellas.

La selección de variables mediante el cálculo de traslapes entre las alteraciones hidrotermales, permite concluir que existen grupos de alteraciones que no pueden ser diferenciados a partir de la geoquímica de elementos solubles en agua regia. Estos grupos corresponden a SCC1 – SCC2 y S1 – S2 – AA. Además, si bien la diferencia de mapeo entre estas alteraciones es la presencia de arcillas, los datos de mineralogía avanzada indican que ni la caolinita o la pirofilita presentan una partición preferencial en ninguna de estas alteraciones estudiadas (ver Figura 8.1).

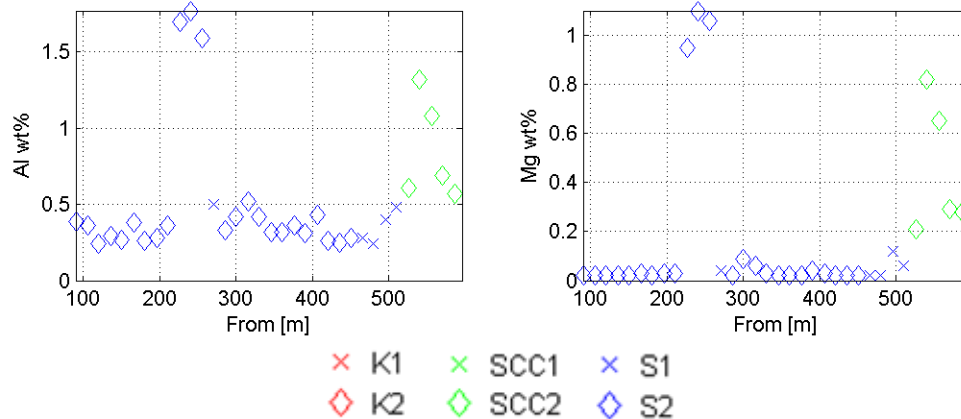


**Figura 8.1. Boxplots de concentración de arcillas por alteración.**

Los datos Qemscan muestran que los minerales predominantes en estas alteraciones son cuarzo y sericita, indicando que la distinción entre ellas en el protocolo de mapeo no se corresponde totalmente con la mineralogía cuantitativa. 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 significativo grado de error a la clasificación.

Estos errores son esperables debido a que comúnmente en el mapeo de sondajes no se considera la superposición de alteraciones. Por ejemplo, un tramo de sondaje puede ser mapeado como alteración potásica feldespática, debido a que presenta feldespatos potásicos de gran tamaño, pero no se considera que puedan estar altamente sericitizados, lo que la asociaría más a una alteración fílica. Es decir, el análisis visual que pasa por alto este tipo de detalles, puede ser incongruente con el comportamiento geoquímico. Un ejemplo de esto es el caso del sondaje D-5233 mostrado anteriormente. Este sondaje presenta muestras mapeadas como alteración fílica S2 con concentraciones altas de Al y Mg, por lo que el modelo de clasificación las asigna al cluster SCC (ver Figura 8.2).





**Figura 8.2. Sondaje con mapeos de alteración incongruente con geoquímica.**

Además, el modelo clasifica las muestras obedeciendo a los patrones de razones entre minerales de alteración como se demuestra en la sección 7.6. En esta sección, las muestras de mineralogía Qemscan clasificadas erróneamente según el mapeo presentan razones de biotita, clorita y sericita distintas a las definidas para cada alteración. De esta manera, el modelo de clasificación tiene una aplicación en el mapeo de sondajes, al sugerir alteraciones en función de la química, en zonas donde exista mayor incertidumbre para el geólogo.

Las zonas de contacto entre alteraciones pueden presentar distintos patrones de transición según la geoquímica: progresiva o a saltos. Esto dependerá de si existe o no una gradación de las razones de minerales. En el caso de los contactos entre los clusters K – SCC, la transición se daría cuando la clorita comience a predominar sobre la biotita, y los óxidos de hierro, como magnetita, disminuyan su proporción. Sin embargo, para el caso de la transición SCC-S, el límite se vuelve más difuso ya que, si bien las primeras poseen mayor proporción de clorita que la segunda, en ambos casos el cuarzo y la sericita tienden a ser los minerales predominantes. De esta manera, los mayores errores de clasificación ocurren principalmente en las alteraciones K2, SCC1 y SCC2, asignadas al cluster SCC, y las alteraciones S1 y S2 asignadas al cluster S (ver Tabla 8.1). Este error de mapeo se vincula 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.

**Tabla 8.1. Porcentaje de clasificación de alteraciones mapeadas en clusters redefinidos para distintos grupos de elementos.**

Alteración Mapeada	Al-Mg-K-Ca-Na			Al-Mg-K-Ca			Al-Mg-K-Na		
	K	SCC	S	K	SCC	S	K	SCC	S
K1	94%	6%	0%	77%	23%	0%	92%	8%	0%
K2	14%	76%	10%	10%	86%	5%	10%	86%	5%
SCC1	18%	81%	1%	16%	83%	1%	17%	82%	1%
SCC2	9%	86%	5%	9%	80%	11%	10%	83%	7%
S1	0%	20%	80%	0%	14%	85%	0%	20%	79%
S2	0%	13%	86%	0%	11%	89%	0%	15%	85%
AA	0%	40%	60%	0%	40%	60%	0%	40%	60%

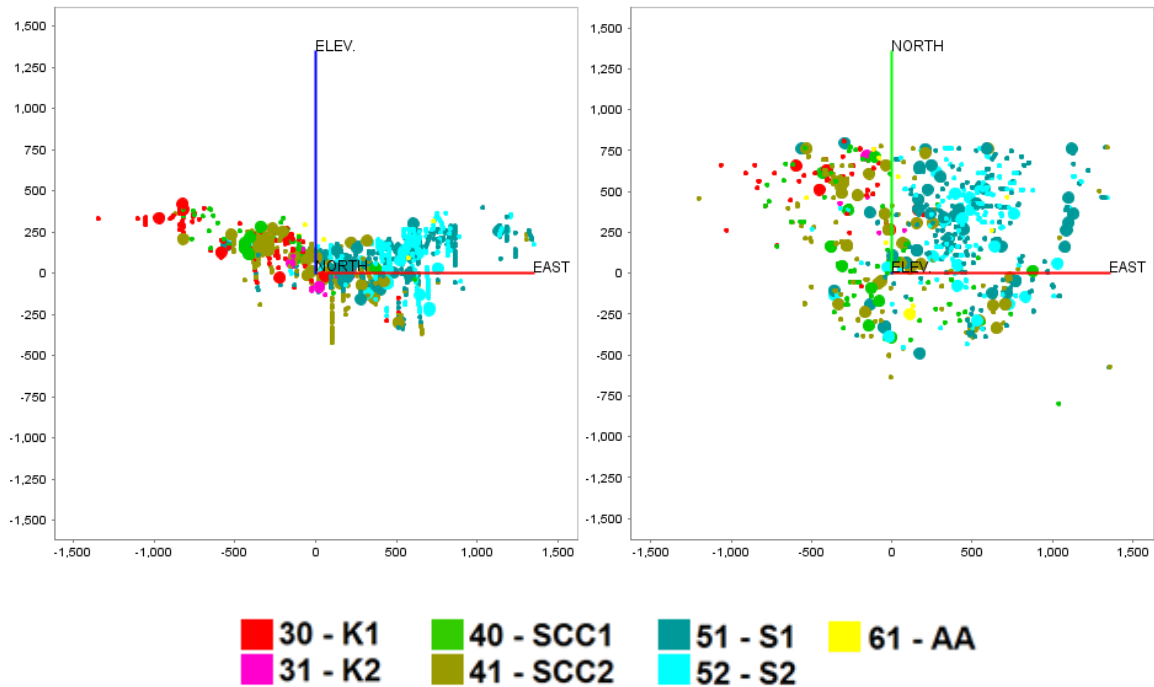
Una aproximación para la definición del contacto entre las alteraciones SCC – S, se muestra en la sección 7.8, donde se calculan los porcentajes de clasificación por rangos de proporción y por rangos de grado de pertenencia entre ambas alteraciones. Los resultados de este análisis indican que cuando el grado de pertenencia se encuentra entre 30-40% del cluster S, la clasificación es mínima, y aumenta a medida que una de las dos se hace predominante. Para el caso de las proporciones físicas entre alteraciones, no es claro dónde se encuentra el límite entre ambas, pero a medida que la proporción de S aumenta considerablemente, el porcentaje de clasificación aumenta por sobre el 70%.

En el caso de los límites entre K – SCC, el comportamiento del porcentaje de clasificación es similar pero no tan pronunciado. Por un lado, cuando el grado de pertenencia a SCC aumenta sobre un 70%, la clasificación lo hace junto con ella por sobre un 80%. Mientras que la clasificación se mantiene entre un 40% y 70% para cualquier rango de proporción física entre alteraciones. Esto puede atribuirse a un error en el mapeo, ya que como se evidencia en la clasificación de los datos Qemscan, la

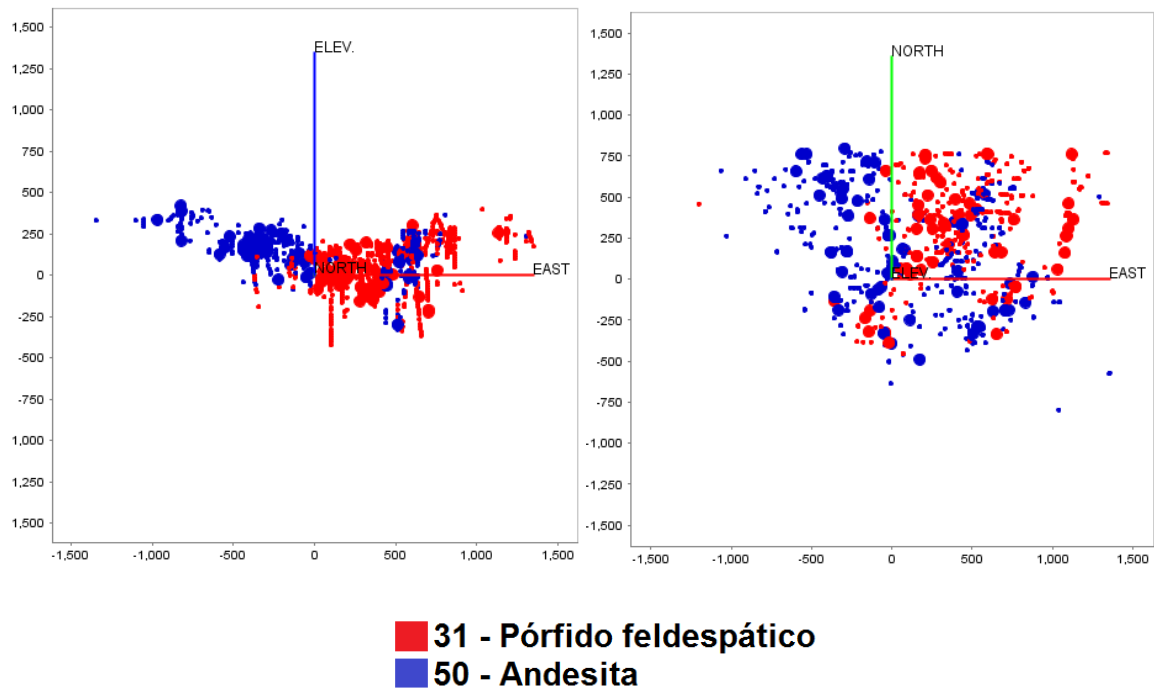
proporción biotita – clorita no siempre está correctamente determinada por el ojo geológico. Es por ello, que estas dos alteraciones tienden a ser mapeadas indistintamente, ya que el reemplazo de biotita por clorita no siempre es evidente a escala de muestra de mano.

Los grados de pertenencia para un grupo de elementos determinado entregan información de cuán cercanos son los datos a los centroides definidos para una alteración en particular. Así, es posible asociar los grados de pertenencia a un grado de incertidumbre. Se tendrá una incertidumbre alta cuando los grados de pertenencia sean muy similares entre sí, y una baja cuando uno de estos valores sea considerablemente mayor a los demás. En los siguientes perfiles y secciones, se destacan aquellas muestras que poseen un mayor grado de incertidumbre asociado al tamaño del círculo que las representa. Un mayor tamaño indica mayor incertidumbre debido a que la diferencia entre los grados de pertenencia máximo e intermedio es baja. Como evidencian las figuras, las zonas con mayor incertidumbre corresponderían a la central y Este, en donde se ubican principalmente las alteraciones sericita-clorita y fílica, respectivamente. Esta incertidumbre puede deberse a las razones de minerales de biotita-clorita con respecto a sericita, los cuales pueden estar en mayor o menor proporción debido a la propia litología o a una alteración clorítica propiamente tal. Cabe mencionar que la alteración fílica puede presentar clorita en proporciones considerable (ver Figura 8.3, Figura 8.4 y Figura 8.5).

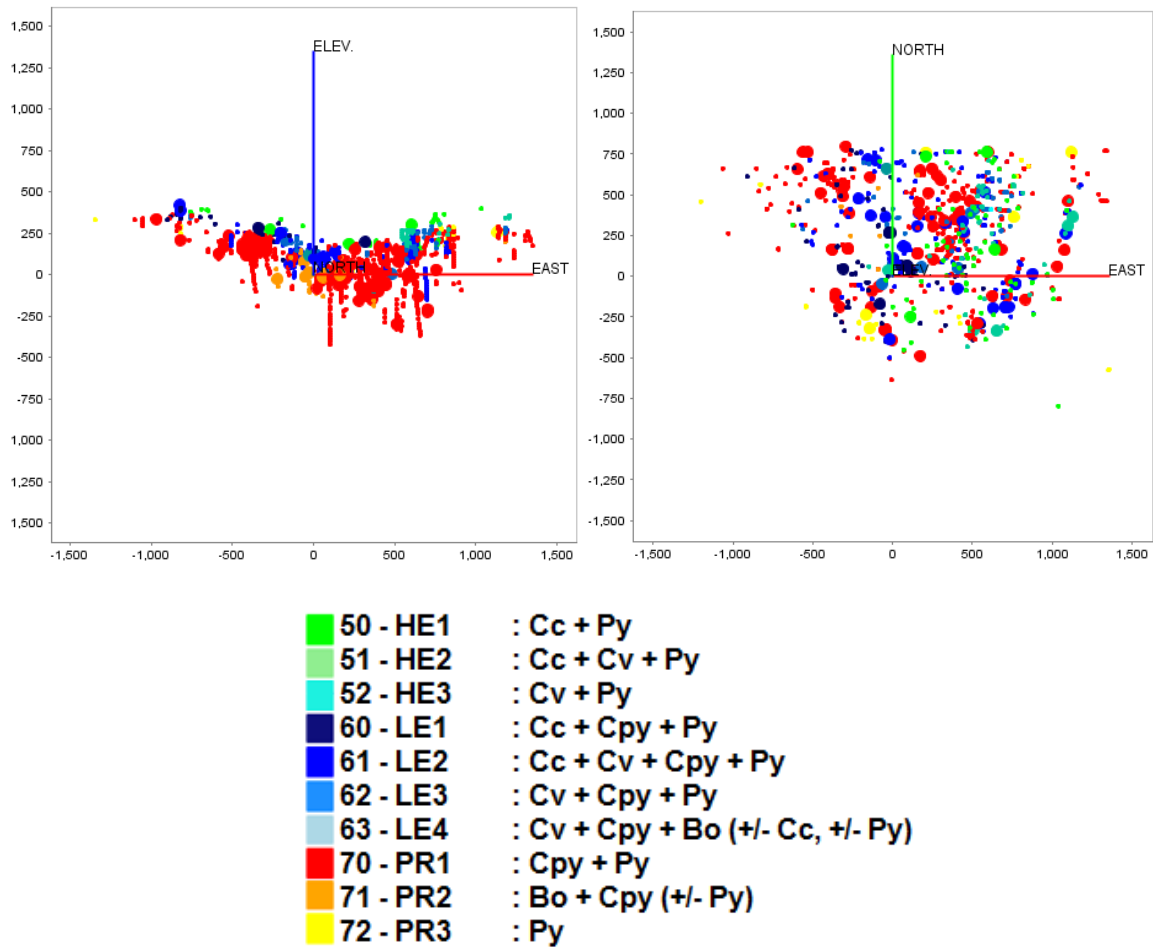
Se destaca que la clasificación emula la distribución espacial de las alteraciones, la cual se caracteriza por una zona de alteración potásica biotítica al NW, una zona de alteración fílica al E, y una zona de alteración sericita-clorita en la zona central (ver Figura 8.6).



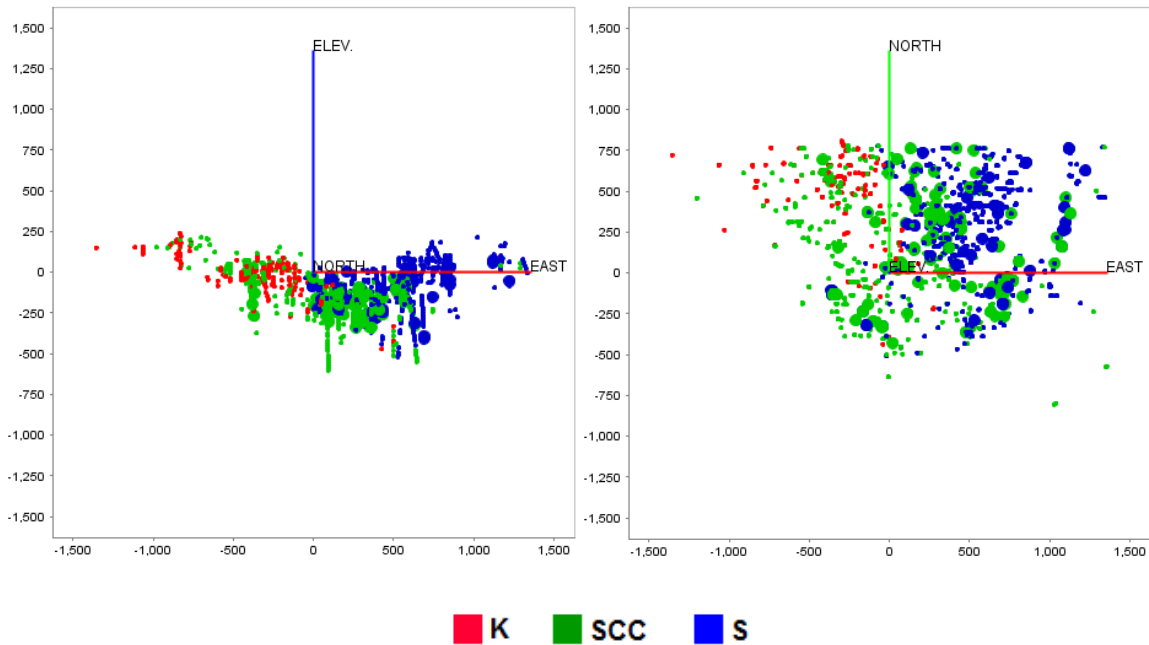
**Figura 8.3. Distribución espacial de alteraciones hidrotermales. Tamaño indica grado de incertidumbre. Perfil N = 107350 ± 50 m. Planta cota = 2750 ± 50 m.**



**Figura 8.4. Distribución espacial de litologías. Tamaño indica grado de incertidumbre. Perfil N = 107350 ± 50 m. Planta cota = 2750 ± 50 m.**



**Figura 8.5. Distribución espacial de zonas de mineralización. Tamaño indica grado de incertidumbre. Perfil N = 107350 ± 50 m. Planta cota = 2750 ± 50 m.**



**Figura 8.6. Distribución espacial de clasificación de alteraciones hidrotermales. Tamaño indica grado de incertidumbre. Perfil N = 107350 ± 50 m. Planta cota = 2750 ± 50 m.**

La metodología puede ser utilizada de varias maneras útiles considerando que las diferencias entre las clases predefinidas se relacionan a los minerales solubles en agua regia. Cada clase que se defina debería ser estudiada considerando las variables críticas. Desde el punto de vista del procesamiento minero, se deben considerar todas las etapas para estudiar las características que definen cada clase y las hace distintas para su tratamiento. Un enfoque integral consideraría las variables mineralógicas, geoquímicas, texturales, geotécnicas y metalúrgicas para definir zonas con distintos protocolos de procesamiento para la recuperación de mena. En particular, los filosilicatos son el grupo mineral que causa mayor impacto en el proceso de flotación, especialmente la muscovita y arcillas como la vermiculita y montmorillonita. Su presencia puede causar: disminución de la recuperación por la adhesión de ganga fina sobre partículas mineralizadas o en las burbujas; aumento del consumo de reactivos debido a alta área superficie de los minerales; y floculación en celdas de flotación debido a que la presencia de arcillas disminuye la capacidad espumante (Bulatovic 2007; Jorjani et al., 2011; Ndlovu et al., 2013).

## 8.1 Limitantes

El modelo no considera una serie de variables que pueden afectar a la clasificación como estructuras y texturas, principalmente. Por ejemplo, una roca puede tener una alteración biotítica de fondo con una densidad alta de vetillas de pirita con halo sericítico, lo que pone en duda cuál alteración es predominante y cuál subordinada desde el punto de vista químico. Para las texturas el efecto sería similar. Una textura de reemplazo de minerales o inclusión de otras litologías, como sería el caso de las brechas (no incluidas en el modelo), puede llevar a que una muestra sea clasificada dentro de una clase totalmente distinta. Por ejemplo, en una brecha hidrotermal con matriz de turmalina, los minerales que se disuelven en agua regia corresponderían únicamente a los que se encuentren en los fragmentos y no a la matriz, lo que conduciría a clasificar la muestra según los fragmentos predominantes. Es por ello, que el modelo necesita ser calibrado según las clases esperadas y ser utilizado como complemento del mapeo.

A pesar de que parezca una desventaja que la base de datos haya sido obtenida en agua regia y no disuelva la mayoría de los minerales, 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 más complejo.

Los grupos minerales solubles en agua regia son sulfuros, micas trioctaédricas, sulfatos, carbonatos y oxi-hidróxidos de Fe-Mn. Los demás grupos minerales, como las micas blancas, feldespatos, hornblenda y caolinita, mantienen sus proporciones 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 grupo mineral soluble en agua regia a partir del cual es posible definir alteraciones hidrotermales son los filosilicatos. 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 (número de coordinación 6) 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).

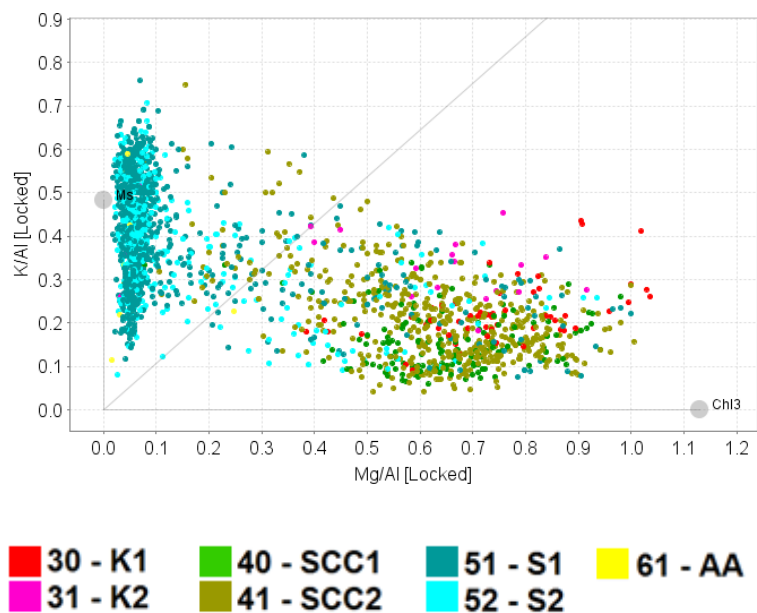
Dentro del grupo de las micas trioctaédricas, se destaca el comportamiento de las biotitas, cloritas y esmectitas, dado que son disueltas totalmente y se asocian a la liberación de Mg, Fe y Al, lo que indicaría una disolución preferencial de las capas octaédricas por sobre las tetraédricas. Además, las 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).

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 y la geoquímica, las altas concentraciones de K se correlacionan a la presencia de biotita y no a la de sericita, por lo que se corrobora la proveniencia principal de este elemento.

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. Un ejemplo de esto se tiene al revisar parámetros artificiales como K/Al y Mg/Al (ver Figura 8.7), donde las muestras con alteración S1, S2 y AA grafican



cercanas al nodo definido para sericita, y las alteraciones K1, SCC1 y SCC2 lo hacen cercanas al nodo de clorita. A pesar de que los histogramas y la mineralogía cuantitativa muestran que K proviene de las alteraciones K1, SCC1 y SCC2 principalmente, el gráfico da a entender que la sericita es una de las fuentes de este elemento. Sin embargo, esto se debe a que el rango de variación del aluminio es mucho mayor que el del potasio y por lo tanto la razón K/Al muestra valores altos para las alteraciones filicas. En este caso la conclusión es correcta pero la hipótesis de la fuente del elemento es errónea, mostrando que los parámetros artificiales pueden tener un comportamiento opuesto al esperado.



**Figura 8.7. Razón K/Al vs Mg/Al.**

## 9 Conclusiones y recomendaciones

La correlación entre la mineralogía, geoquímica y mapeo geológico permite identificar zonas de alteración hidrotermal. Una vez caracterizada cada zona, es posible definir zonas de alteración en función de la geoquímica. Los datos geoquímicos se correlacionan con la presencia de los minerales solubles en agua regia como: biotita, clorita, óxidos de hierro, sulfuros, sulfatos y carbonatos, principalmente.

Las variables geoquímicas que permiten diferenciar entre alteraciones son los elementos mayores ya que tienen directa relación con la mineralogía. Estos elementos son Al, Mg, K, Ca, Na, S, Fe y CuT. Algunos elementos traza presentan un comportamiento similar en función de las alteraciones, pero su presencia no se correlaciona directamente con la mineralogía.

El análisis de traslape entre variables y la clasificación de muestras a partir de la definición de clusters por alteración, indican que existen alteraciones que no pueden ser diferenciadas de otras a partir de la geoquímica como: S1 – S2 – AA y SCC1 – SCC2. Esto puede tener dos explicaciones posibles no excluyentes. La primera se debería a que el agua regia no disuelve las arcillas que corresponden a los minerales que las diferencian por definición en el protocolo de mapeo. La segunda, es que no existe una diferencia mineralógica entre ellas, como muestran los datos de mineralogía cuantitativa Qemscan, ya que ninguna de las alteraciones definidas por la presencia de arcillas presenta concentraciones significativamente mayores que las que no. 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, sobre todo en minerales que son difíciles de diagnosticar como las arcillas.

Los datos geoquímicos y mineralógicos indican que las alteraciones hidrotermales tendrían una evolución propia de un sistema de tipo pórfido cuprífero caracterizadas por un núcleo potásico con superposición fílica a medida que la distancia aumenta a partir de éste. La alteración SCC es una zona de alteración caracterizada por variaciones de la razón clorita:sericita con la distancia al núcleo potásico, aumentando la predominancia de la sericita (Sillitoe, 2010). Este comportamiento se aprecia en la unidad de lavas andesíticas, en la cual se predomina la alteración fílica a medida que aumenta la distancia de la unidad de pórfido feldespático.

El modelo propuesto permite distinguir entre tres zonas de alteración hidrotermal en función de la mineralogía soluble dominante. La alteración potásica se distingue con facilidad de las alteraciones fílicas. Sin embargo, las alteraciones clorita-sericita presentan el mayor problema de clasificación ya que dependiendo del predominio de uno de estos dos minerales, pueden ser clasificadas como fílicas o potásicas. Además, el modelo permite caracterizar cada muestra en función de diversos controles minerales

utilizando diagramas ternarios, pudiendo diferenciar entre muestras con control de biotita-clorita, sericita, sulfatos, piritita y otros sulfuros de cobre.

Una manera de mejorar la clasificación es considerar las muestras espacialmente más cercanas clasificadas con menor error. Este error puede ser calculado utilizando los rangos de grados de pertenencia asociados a un porcentaje de clasificación. En trabajos futuros se recomienda la utilización de puntos de control, y la utilización de la distribución espacial de las muestras para mejorar la clasificación.

Esta metodología puede ser utilizada para obtener un índice de alteración, es decir, para estimar cuán alterada se encuentra una roca. 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 un cluster con las litologías frescas y utilizar los grados de pertenencia a los demás cluster de alteraciones.

La aplicación principal de este modelo es sugerir una alteración hidrotermal en lugar de determinarla, ya que existen una serie de parámetros que no se consideran dentro de éste análisis, y puede conducir a errores si se utiliza en zonas para las que no se ha calibrado. Por ello, el modelo entrega información acerca del enriquecimiento o empobrecimiento relativo de los minerales en la roca utilizando los diagramas ternarios de elementos, además de una alteración probable dadas las clases previamente definidas.

Se recomienda revisión detallada de las muestras cuya clasificación geoquímica sea inconsistente con el mapeo geológico para determinar la fuente de las variaciones de los elementos mayores.

Como en petrografía descriptiva, la identificación de minerales no se realiza mediante solo una de sus características, sino que es la suma de ellas la que permite determinar su presencia en la roca.

## 10 Bibliografía

Amilibia, A. y otros, 2008. The role of inherited tectono-sedimentary architecture in the development of the central Andean mountain belt: Insight from Cordillera de Domeyko. *Journal of Structural Geology*, pp. 1520-1539.

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.

BHP Billiton, 2012. *Annual Report*, s.l.: s.n.

Bulatovic, S., 2007. Handbook of Flotation Reagents Chemistry, Theory and Practice: Flotation of Sulphide Ores. *Elsevier*.

Camus Infanta, F., 2003. La Faja del Eoceno Superior - Oligoceno. En: *Geología de los Sistemas Porfíricos en los Andes de Chile*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, pp. 196-201.

Camus, F. & Dilles, J. H., 2001. A Special Issue Devoted to Porphyry Copper Deposits of Northern Chile. *Economic Geology*, Volumen 96, pp. 233-237.

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.

Charrier, R., Farías, M. & Maksaev, V., 2009. Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el cenozoico en los Andes de Chile norte y central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Volumen 65, pp. 5-35.

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.
- Cornejo, P., Mpodozis, C., Rivera, O. & Matthews, S., 2009. Carta Exploradora. Región de Antofagasta y Atacama. *Carta Geológica de Chile. Serie Geológica Básica*, Issue 119, pp. 10-11.
- Falasconi, M. y otros, 2010. A stability based validity method for fuzzy clustering. *Pattern Recognition*, Volumen 43, p. 1292–1305.
- Gallego, O. F. & Covacevich, V., 1998. Conchostracos triásicos de las Regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo, Chile. *Revista geológica de Chile*, 25(2).
- 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.
- Han, J., Kamber, M. & Pei, J., 2012. *Data Mining: Chapter10 Cluster Analysis Basic Concepts and Methods*. s.l.:Elsevier.
- Hofmann, A., 2003. Sampling Mantle Heterogeneity through Oceanic Basalts: Isotopes and Trace Elements. En: A. M. Davis, ed. *Treatise On Geochemistry*. s.l.:Elsevier Pergamon.
- Jorjani, E., Barkhordari, H., Tayebi Khorami, M. & Fazeli, A., 2011. Effects of aluminosilicate minerals on copper–molybdenum flotation from Sarcheshmeh porphyry copper. *Minerals Engineering*, Volumen 24, p. 754–759.
- Kelley, D. L. y otros, 2003. The use of partial extraction geochemistry for copper exploration in northern Chile. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, Volumen 3, pp. 85-104.

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.

Liu, H.-C., Jeng, B.-C., Yih, J.-M. & Yu, Y.-K., 2009. Fuzzy C-Means Algorithm Based on Standard Mahalanobis Distances. *Proceedings of the 2009 International Symposium on Information Processing*, pp. 422-427.

Luca, R., López, L. F. & Townley, B., 2012. *Geoquímica de Asociaciones de Alteración Hidrotermal en el Sistema tipo Pórfido Cuprífero Escondida*, Santiago: s.n.

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. *Reseña Metalogénica de Chile y de los Procesos que Determinan la Metalogénesis Andina*, s.l.: s.n.

Marinovic, N. y otros, 1995. *Hoja Aguas Blancas. Región de Antofagasta*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.

Nazari, M., Shanbehzadeh, J. & Sarrafzadeh, A., 2013. Fuzzy C-means based on Automated Variable Feature Weighting. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, Volumen I.

Ndlovu, B., Farrokhpay, S. & Bradshaw, D., 2013. The effect of phyllosilicate minerals on mineral processing industry. *International Journal of Mineral Processing*, Volumen 125, p. 149–156.

Padilla-Garza, R. A., Titley, S. R. & Eastoe, C. J., 2004. Hypogene Evolution of the Escondida Copper Deposit, Chile. *Society of Economic Geologists*, Volumen Special Publication, pp. 141-165.

Padilla, R. A., Titley, S. & Pimentel, F., 2001. Geology of the Escondida Porphyry Copper Deposit, Antofagasta Region, Chile. *Economic Geology*, Volumen 96, pp. 307-324.

- Pedregosa, F. y otros, 2011. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, pp. 2825-2830.
- Pimentel, B. & M.C.R de Souza, R., 2013. A multivariate fuzzy c-means method. *Applied Soft Computing*, Volumen 13, p. 1592–1607.
- Pirrie, D. & Rollinson, G. K., 2011. Unlocking the applications of automated. *The Geologists' Association & The Geological Society of London, Geology Today*, Noviembre-Diciembre.27(6).
- Rezaee, B., 2010. A cluster validity index for fuzzy clustering. *Fuzzy sets and systems*, Volumen 161, p. 3014–3025.
- Richards, J., Boyce, A. & Pringle, M., 2001. Geologic Evolution of the Escondida Area, Northern Chile: A Model for Spatial and Temporal Localization of Porphyry Cu Mineralization. *Economic Geology*, Volumen 96, pp. 271-305.
- Richards, J. P., Noble, S. R. & Pringle, M. S., 1999. A Revised Late Eocene Age for Porphyry Cu Magmatism in the Escondida Area, Northern Chile. *Economic Geology*, Volumen 94, pp. 1231-1248.
- Rojas, J., Chavarro, J. C. & Moreno, R., 2008. Técnicas de lógica difusa aplicadas a la minería de datos. *Scientia et Technica Año XIII, Universidad Tecnológica de Pereira*.
- Romero, B. y otros, 2010. Molybdenite Mineralization and Re-Os Geochronology of the Escondida and Escondida Norte Porphyry Deposits, Northern Chile. *Resource Geology*, 61(1), pp. 91-100.
- 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.

Sillitoe, R. H. & McKee, E. H., 1996. Age of Supergene Oxidation and Enrichment in the Chilean Porphyry Copper Province. *Economic Geology*, Volumen 91, pp. 164-179.

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., Muñoz, M. & Luca, R., 2012. *Modelamiento Geoquímico Distrito Escondida: Discriminación de Ambientes Hidrotermales. Fase 2: Estudio de Distribución Espacial y Determinación de Criterios de Discriminación de Ambientes Hidrotermales en el Yacimiento Escondida*, Santiago: UNTEC.

Véliz, W., 2004. *Relación espacio-temporal del sistema pórfido cuprífero y epitermal en el yacimiento Escondida, Provincia de Antofagasta, Segunda Región, Chile. Tesis para optar al grado de magíster en geología económica mención exploración.*, Antofagasta: Universidad Católica del Norte.

Xing, H.-J. & Ha, M.-H., 2014. Further improvements in Feature-Weighted Fuzzy C-Means. *Information Sciences*.

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



**Anexo A**  
**Base de datos**

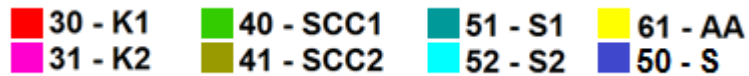
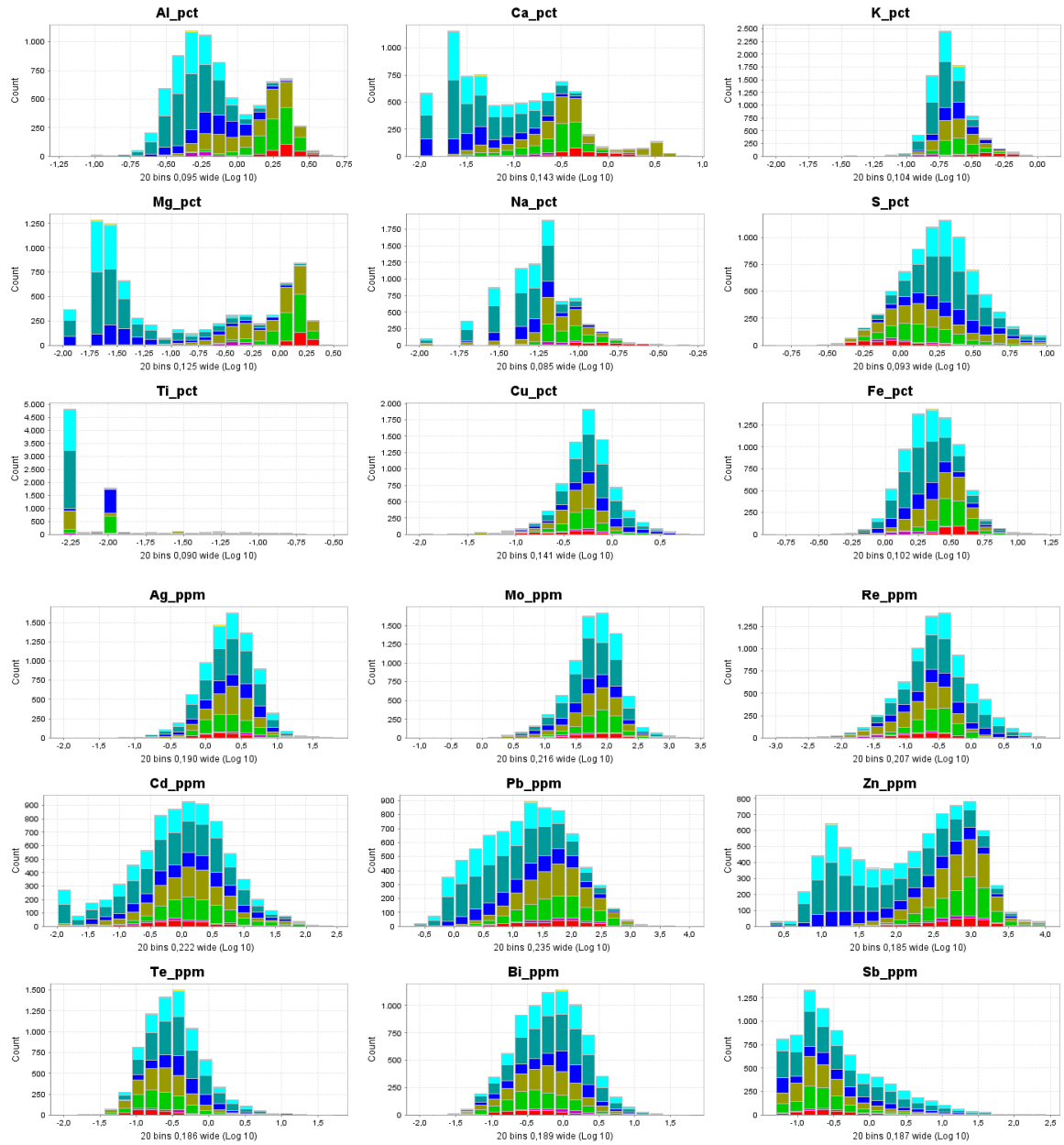
**Cantidad de datos por litología, alteración y minzone**

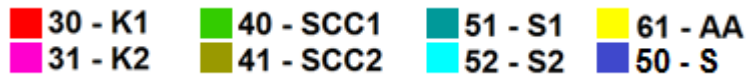
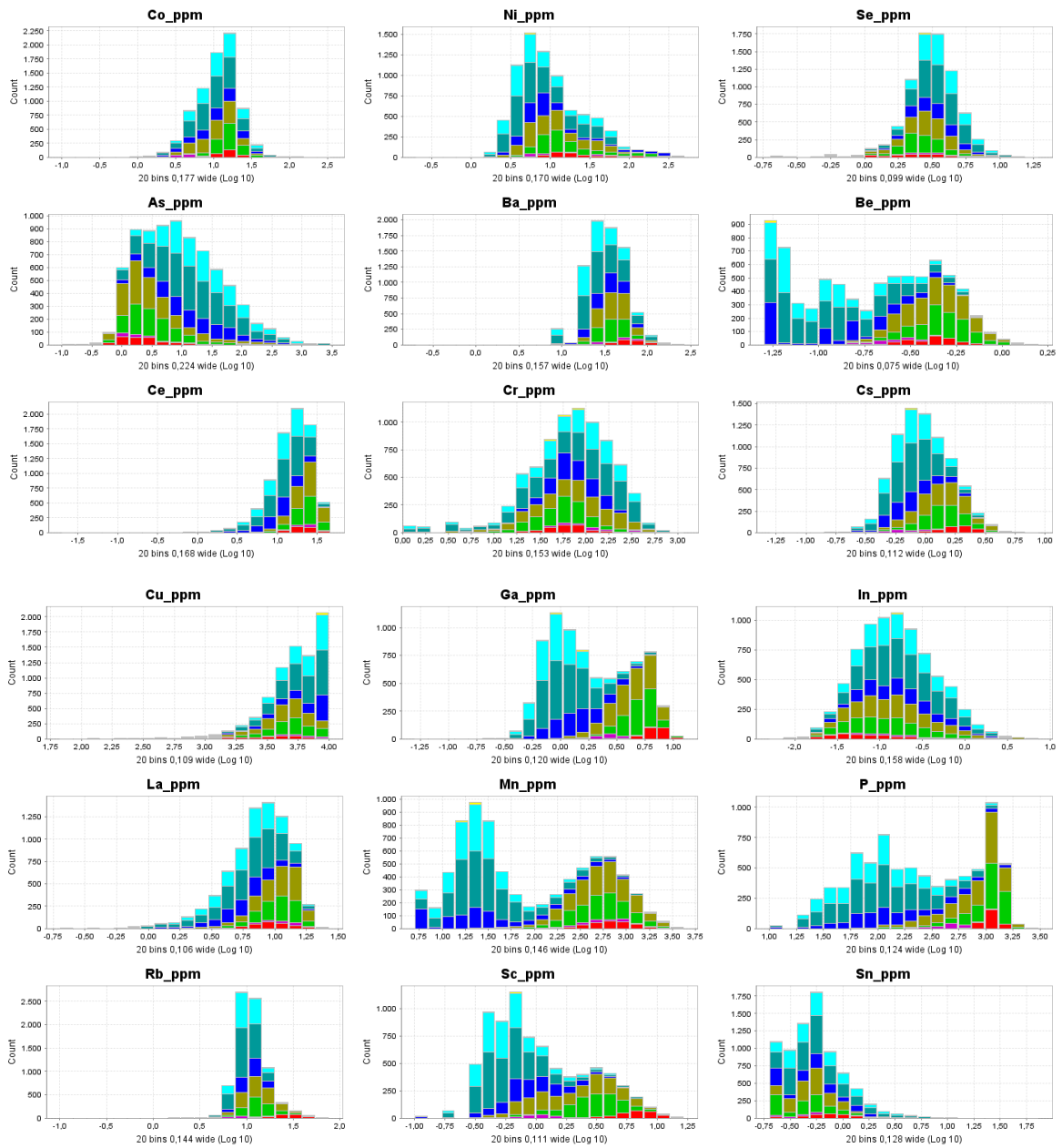
<b>Litología</b>	<b>Abrev</b>	<b>Código</b>	<b>N° 1° litología</b>	<b>N° 2° litología</b>
<b>Relleno Artificial</b>	RA	<b>1</b>	1	4
<b>Relleno Acopio</b>	RS	<b>2</b>	0	0
<b>Grava</b>	GR	<b>6</b>	4	2
<b>Roca Moteada</b>	RM	<b>10</b>	0	0
<b>Dique (en el sentido amplio)</b>	D	<b>11</b>	0	0
<b>Brecha Hidrotermal</b>	BH	<b>21</b>	287	197
<b>Brecha Tectónica</b>	BT	<b>22</b>	42	68
<b>Brecha Magmática-Ignea-Contacto</b>	BI	<b>23</b>	337	254
<b>Brecha Pebbles Dikes</b>	BP	<b>24</b>	0	0
<b>Pórfido Feldespático</b>	PF	<b>31</b>	5888	2016
<b>Pórfido Riolítico (ENorte)</b>	PR	<b>32</b>	7	3
<b>Pórfido Cuarzífero (Mina)</b>	PC	<b>33</b>	1824	484
<b>Pórfido Grueso (ENorte)</b>	PG	<b>34</b>	0	0
<b>Pórfido Dacítico (tardia)</b>	DT	<b>35</b>	19	22
<b>Diorita</b>	DR	<b>40</b>	6	10
<b>Andesita</b>	AN	<b>50</b>	6690	2617
<b>Autobrecha (Volcánica)</b>	AB	<b>51</b>	24	16
<b>Tobas Dacíticas</b>	TD	<b>53</b>	0	0
<b>Tobas Riolíticas</b>	TR	<b>54</b>	3	1
<b>Arenisca Volcánica</b>	AV	<b>64</b>	0	0
<b>Porfido Feldespático Tardío</b>	PFT	<b>70</b>	18	2
<b>Pórfido Negro</b>	PNO	<b>71</b>	46	10
<b>Porfido Dacítico de Anfíbol</b>	PDA	<b>72</b>	0	0
<b>Porfido Temprano</b>	PT	<b>73</b>	48	9
<b>Unidad Volcano-Sedimentaria</b>	UVS	<b>81</b>	0	0

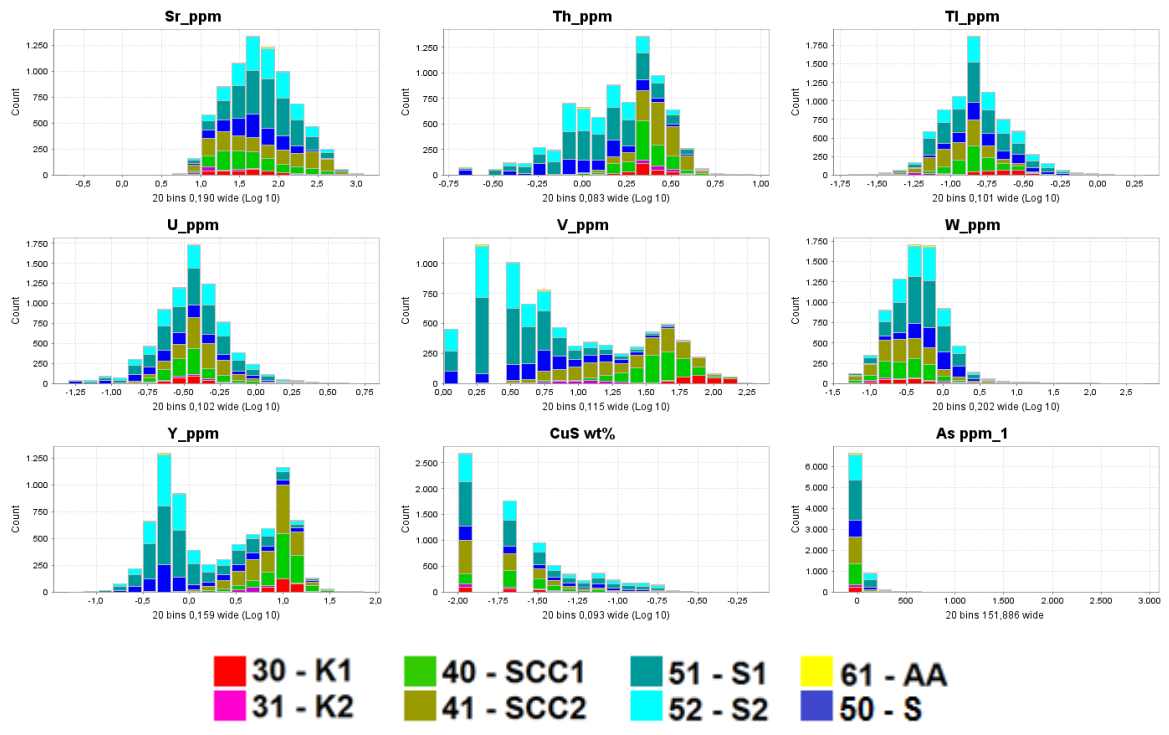
<b>Alteración</b>	<b>Abrev.</b>	<b>Código</b>	<b>Lito 31</b>	<b>Lito 33</b>	<b>Lito 50</b>
<b>Fresco: sin Alteración</b>	F	<b>10</b>	1	0	1
<b>Propilítico</b>	P	<b>20</b>	0	0	5
<b>Potásico (Sólo Bt secundaria)</b>	K1	<b>30</b>	9	0	504
<b>Feld K &gt; Bt</b>	K2	<b>31</b>	184	0	16
<b>Feld K &lt; Bt</b>	K3	<b>32</b>	0	0	2
<b>(Bt sec +/- Feld K) &gt; Cl</b>	K4	<b>33</b>	3	0	0
<b>Clorita-Sericita-Arcillas</b>	SCC1	<b>40</b>	106	6	1794
<b>Clorita-Sericita-Cuarzo</b>	SCC2	<b>41</b>	790	66	1107
<b>Clorita-Biotita +/- Feld K</b>	SCC3	<b>42</b>	3	0	4
<b>Clorita</b>	SCC4	<b>43</b>	0	0	44
<b>Fílica</b>	S	<b>50</b>	1100	92	1192
<b>Sericita-Cuarzo</b>	S1	<b>51</b>	2314	1160	883
<b>Sericita-Cuarzo-Arcilla</b>	S2	<b>52</b>	1270	500	992
<b>Sericita-Cuarzo</b>	S3	<b>53</b>	25	0	0
<b>Sericita Gris Verde</b>	S4	<b>54</b>	7	0	0
<b>Argilización Supérgena</b>	AA	<b>61</b>	62	0	123
<b>Argilización Avanzada</b>	AAV	<b>62</b>	4	0	7
<b>Silicificación</b>	Q	<b>70</b>	10	0	16

Zonas mineralógicas	Abrev.	Código	1° Minzone	2° Minzone
Lixiviado	LX	10	313	224
Oxidos Verdes (Sulfatos)	OXV	21	16	10
Oxidos Azules (Silicatos)	OXA	22	0	0
Oxidos Negros	OXN	23	0	0
Cuprita + Ox Cu	CPOX	24	12	14
Oxidos Verdes+Negro+Arcillas Cupríferas	OXVN	25	0	2
Cuprita / Cobre Nativo	CPCu	26	1	1
Fosfatos + Oxidos Verdes	POXV	27	0	0
Parcial Lixiviado (Oxidación Parcial)	Plx	31	46	28
Parcial Lixiviado (Limonitas Exóticas)	PlxE	32	78	54
Mezcla OxCu + Sulf	MX	40	81	65
Mixto + Cuprita y/o Nativo	CPMX	41	22	24
Sulfuro + Cuprita y/o Nativo	CPCCPY	42	5	11
Cc + Py	HE1	50	2061	702
Cc + Cv + Py	HE2	51	891	344
Cv + Py	HE3	52	81	55
Cc + Cpy + Py	LE1	60	928	451
Cc + Cv + Cpy + Py	LE2	61	2446	1021
Cv + Cpy + Py	LE3	62	975	427
Cv + Cpy + Bo (+/- Cc, +/- Py)	LE4	63	22	20
Py	PR1	72	446	185
Cpy - Py	PR2	70	6348	1738
Bn - Cpy (+/- Py)	PR3	71	269	162
Lixiviación Hipógena (Mg-Esp)	LxH	73	0	0
Sin Mineralización	SM	80	3	6
skarnificación	sk	90	0	0

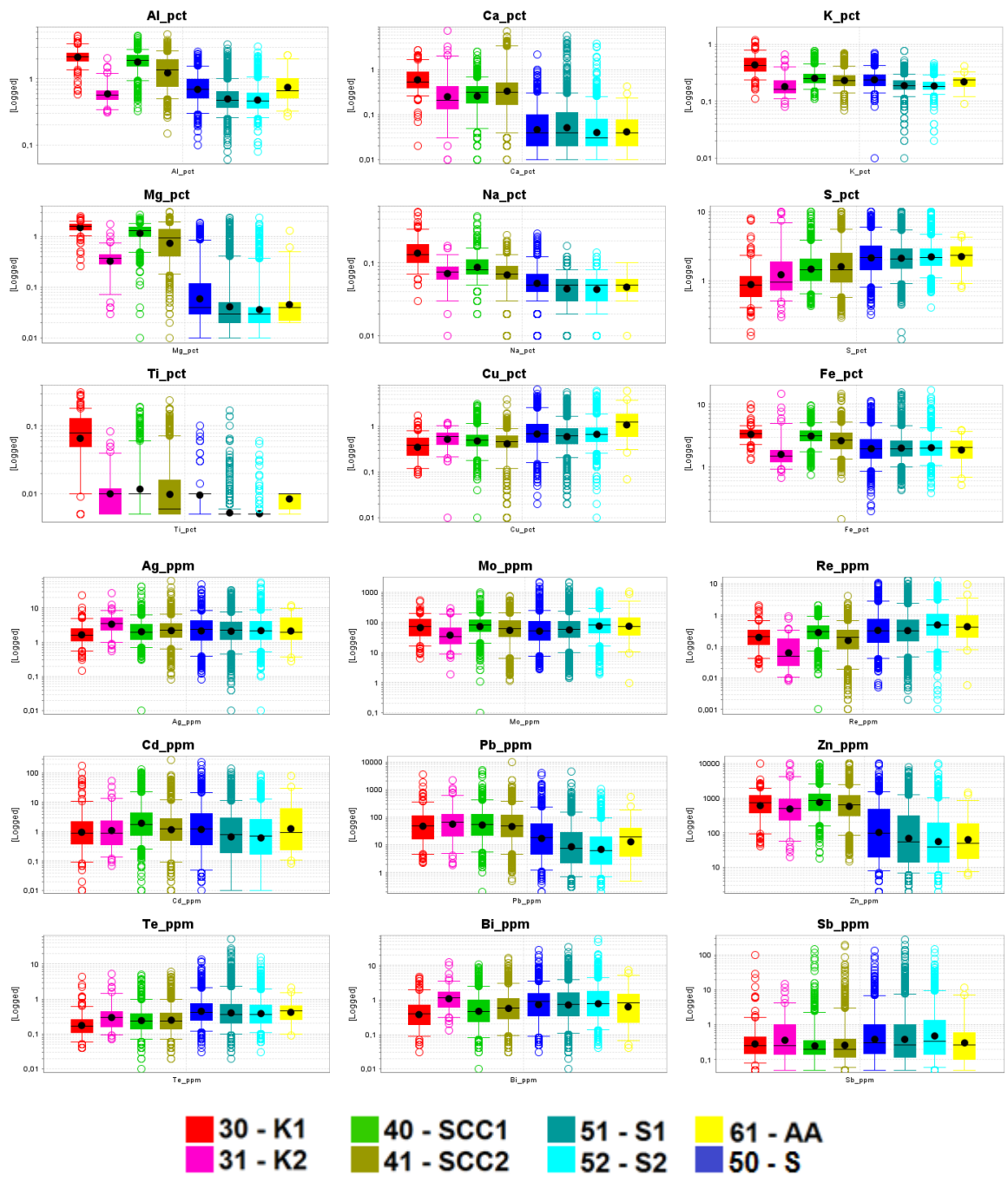
## Histogramas por alteración para elementos mayores y traza

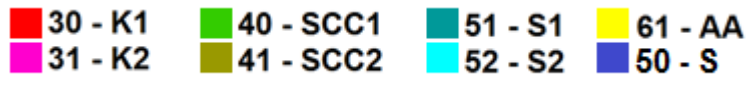
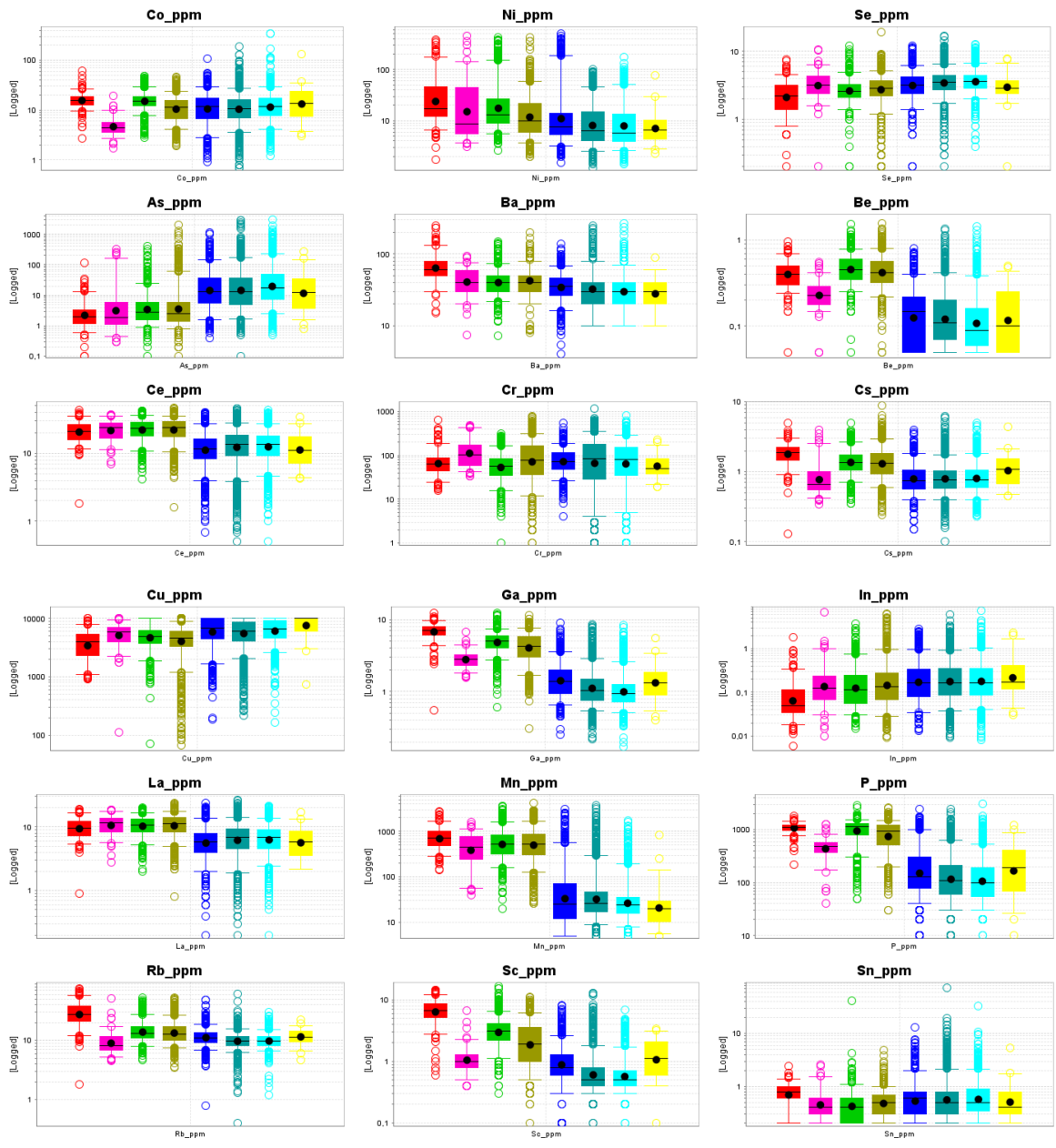




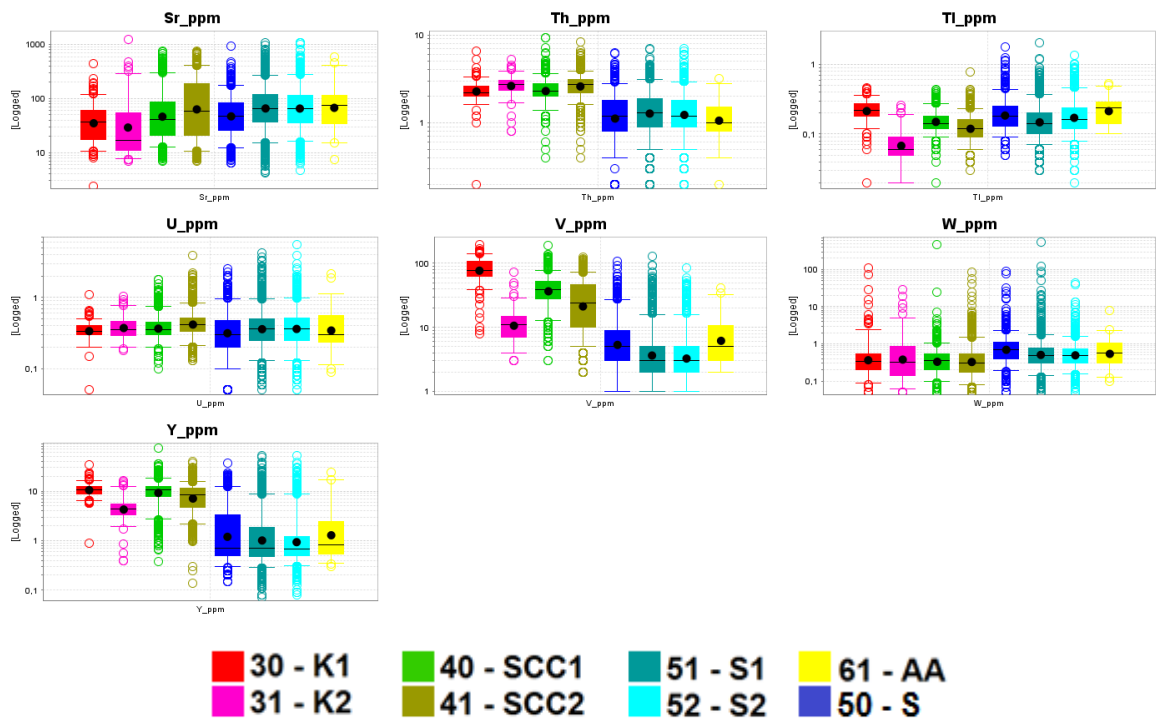


## Boxplots por alteración (log base 10)

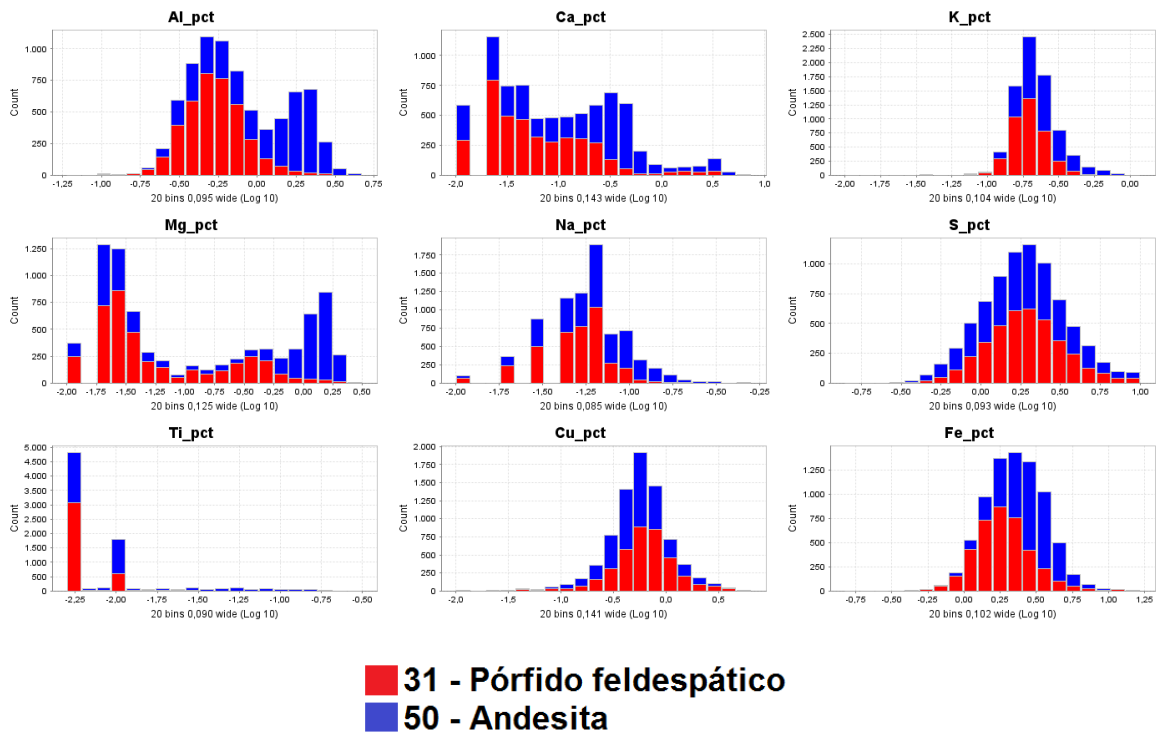


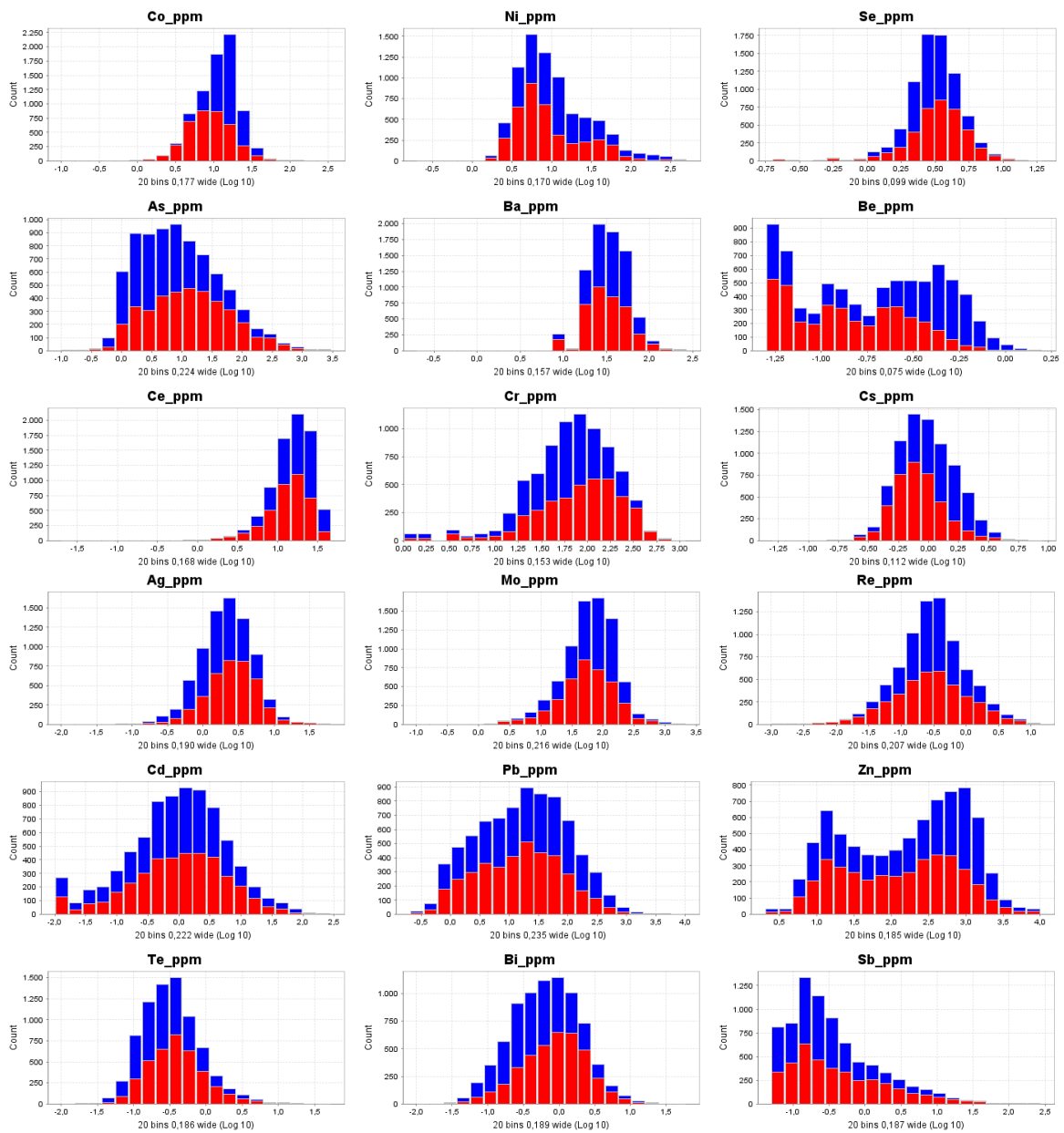


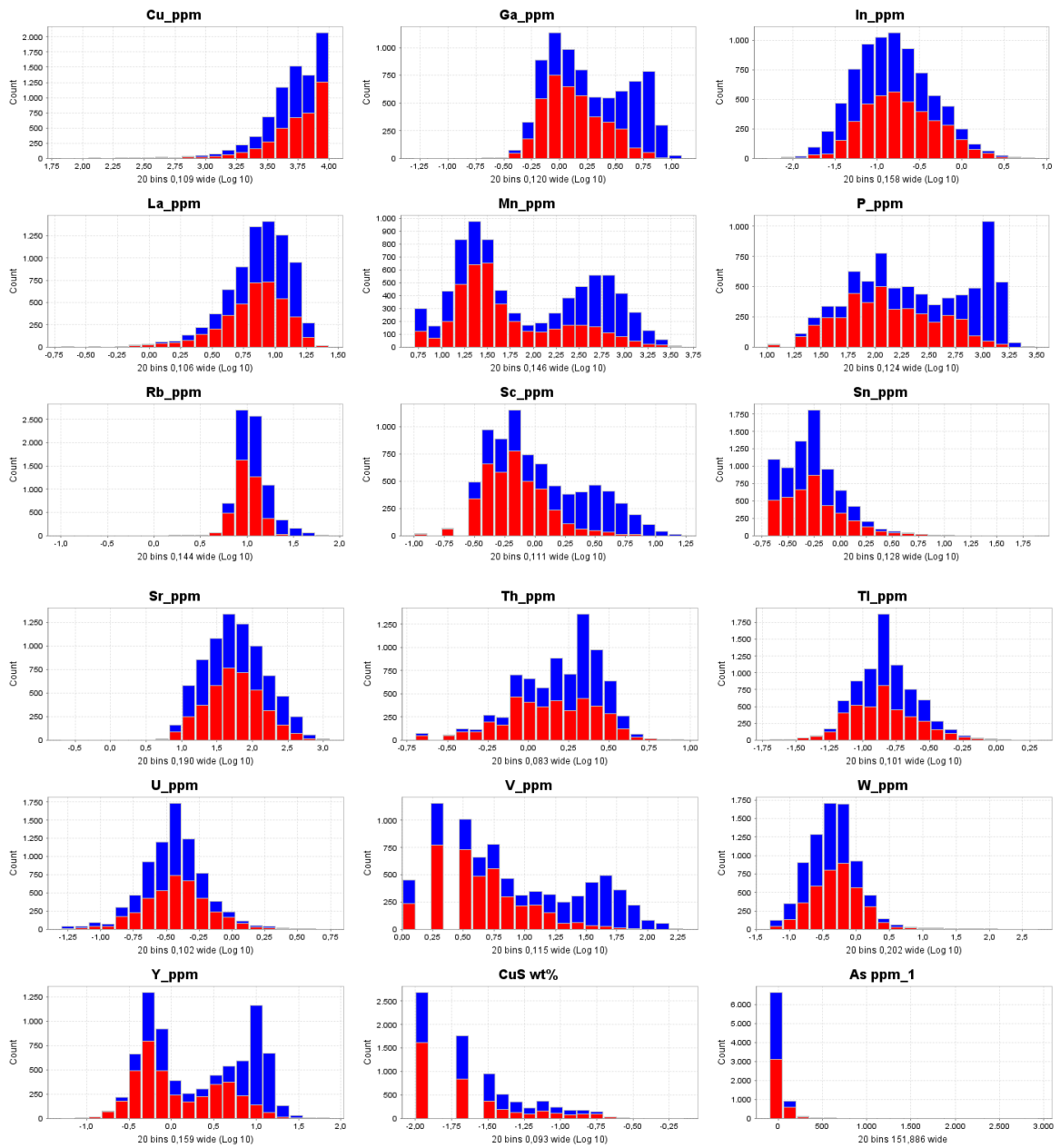




### Histogramas litologías 31 y 50

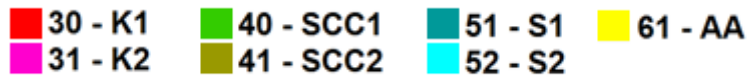
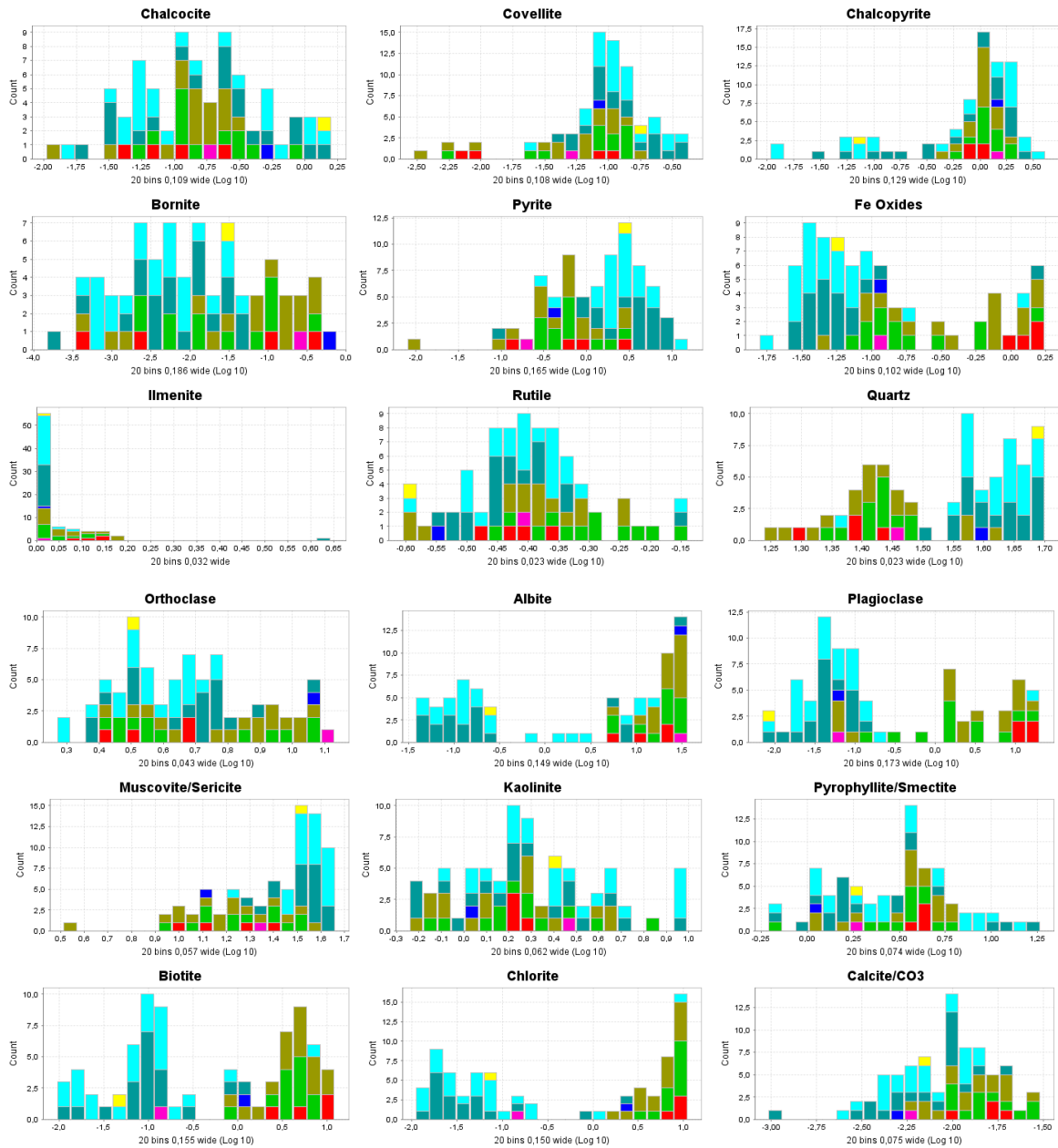


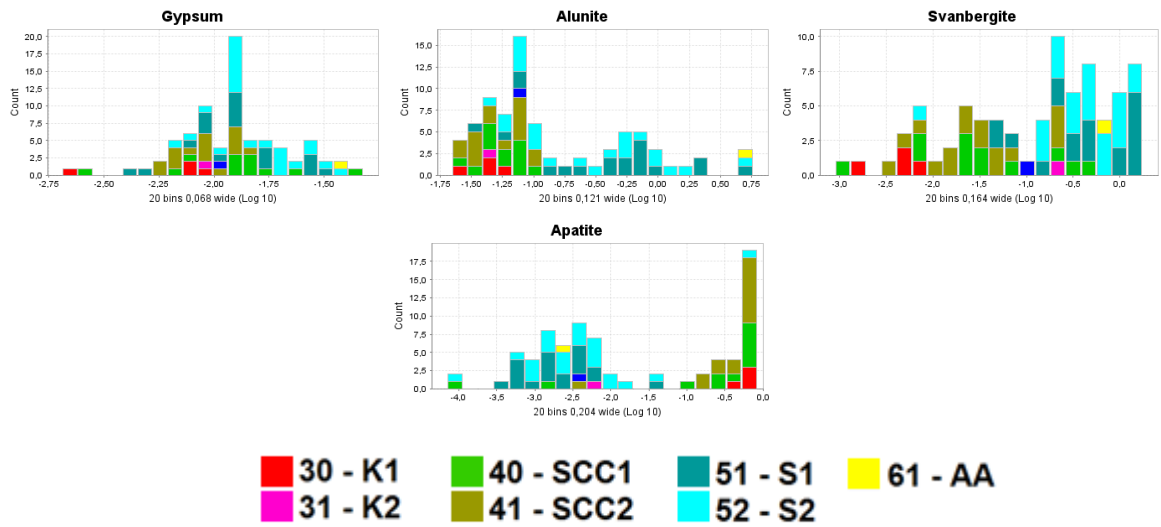




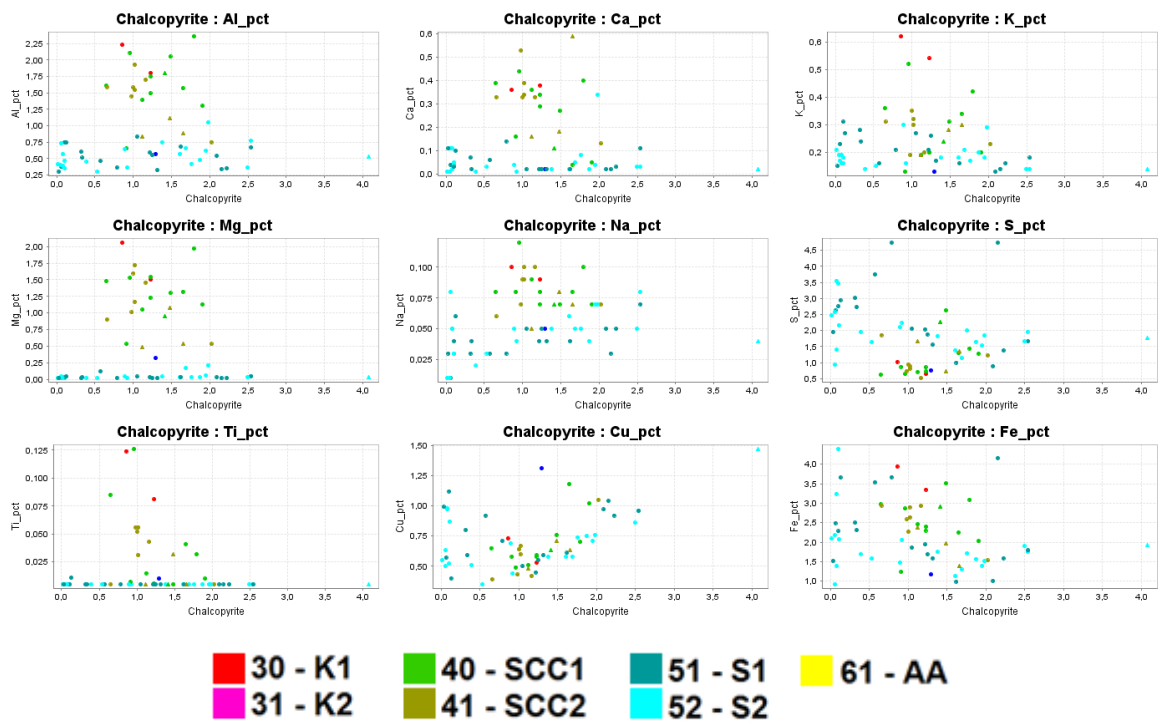
■ 31 - Pórfido feldespático  
■ 50 - Andesita

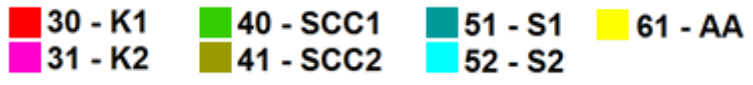
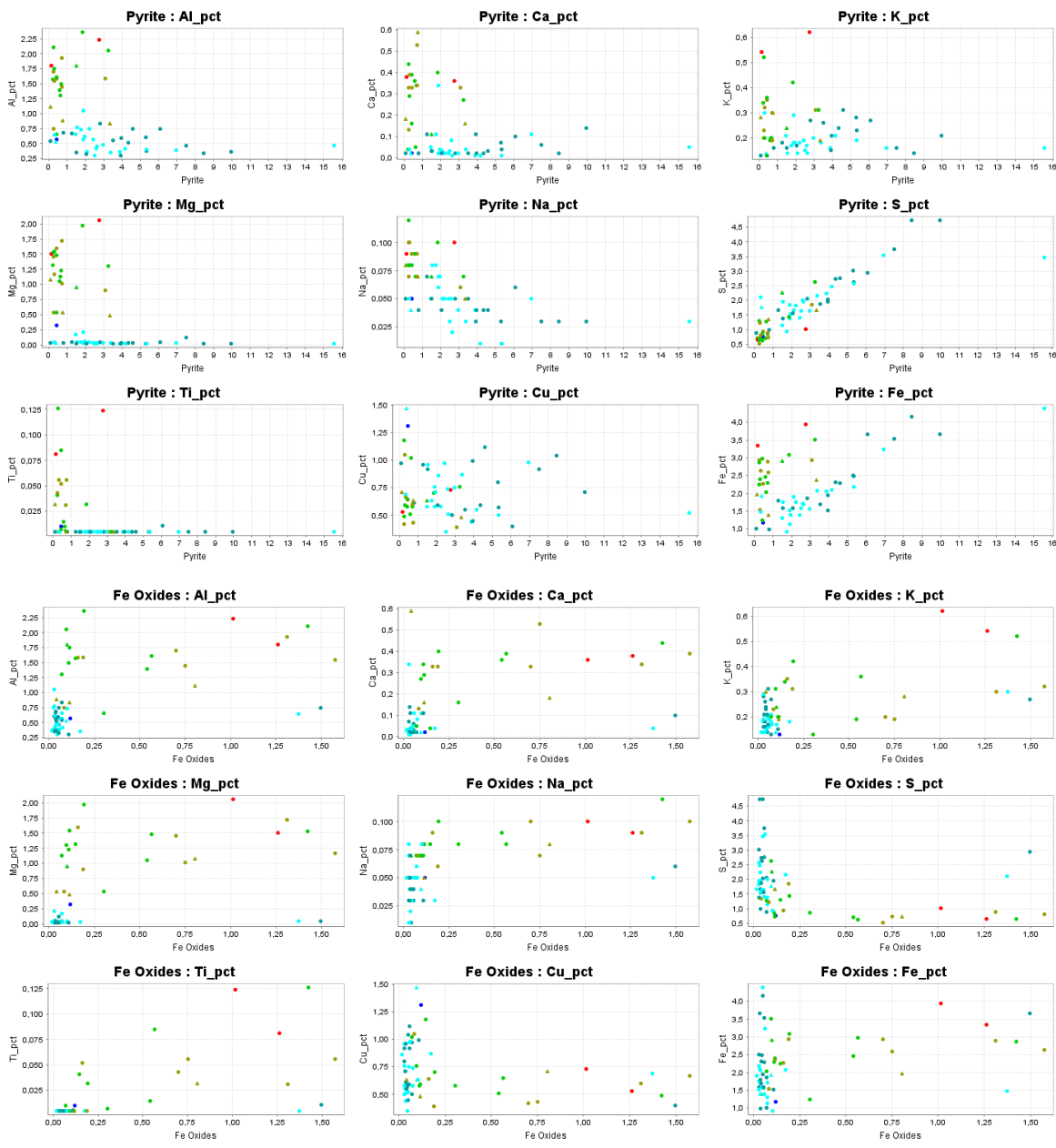
# Histogramas de minerales según alteración

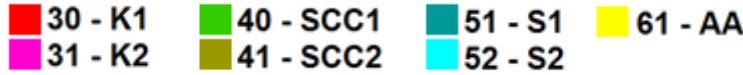


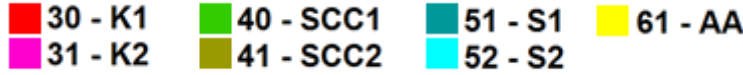
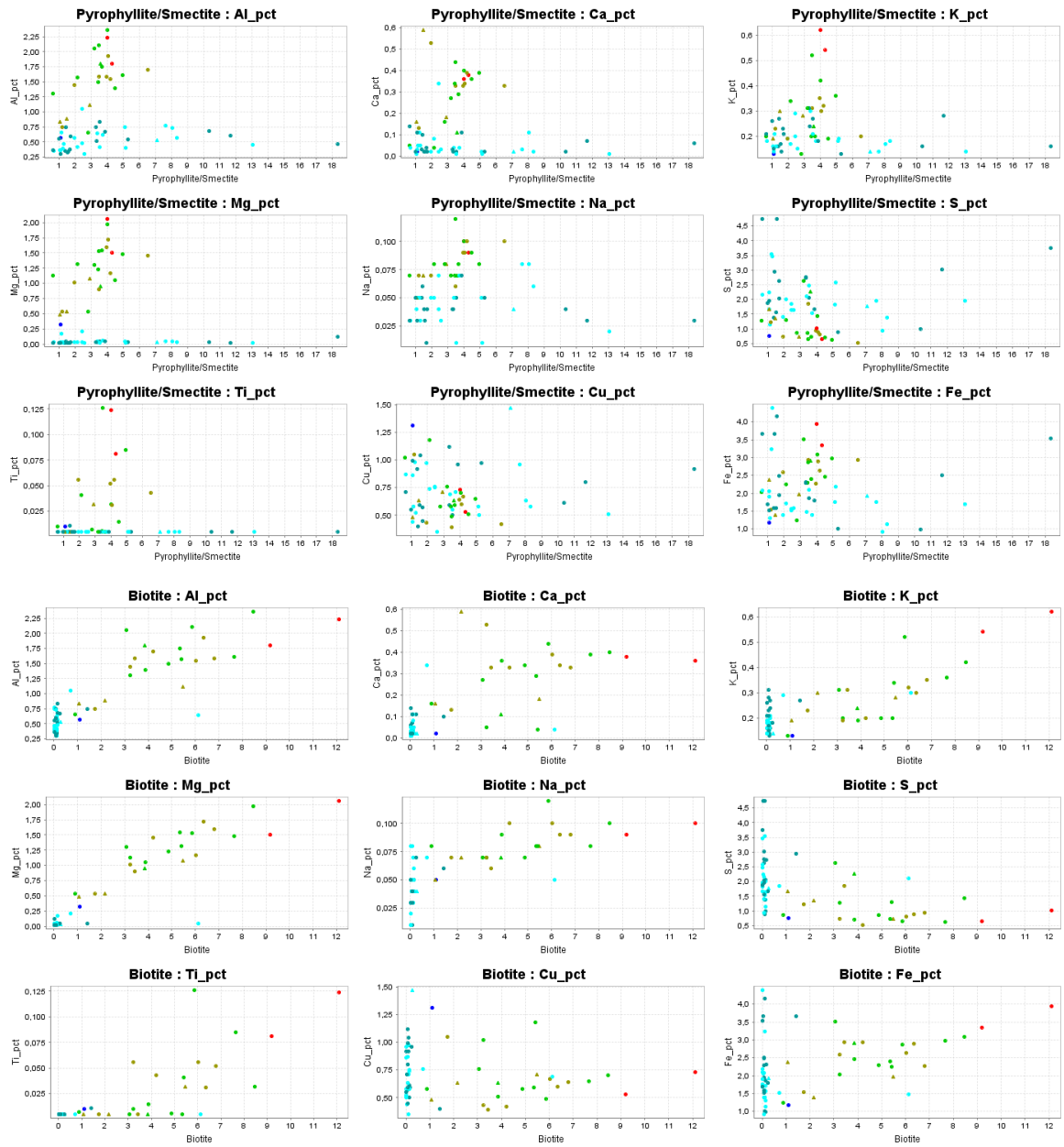


### Mineralogía vs elementos mayores

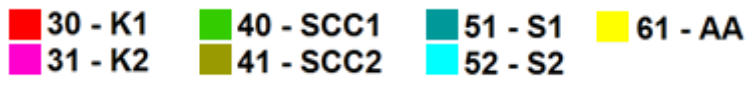
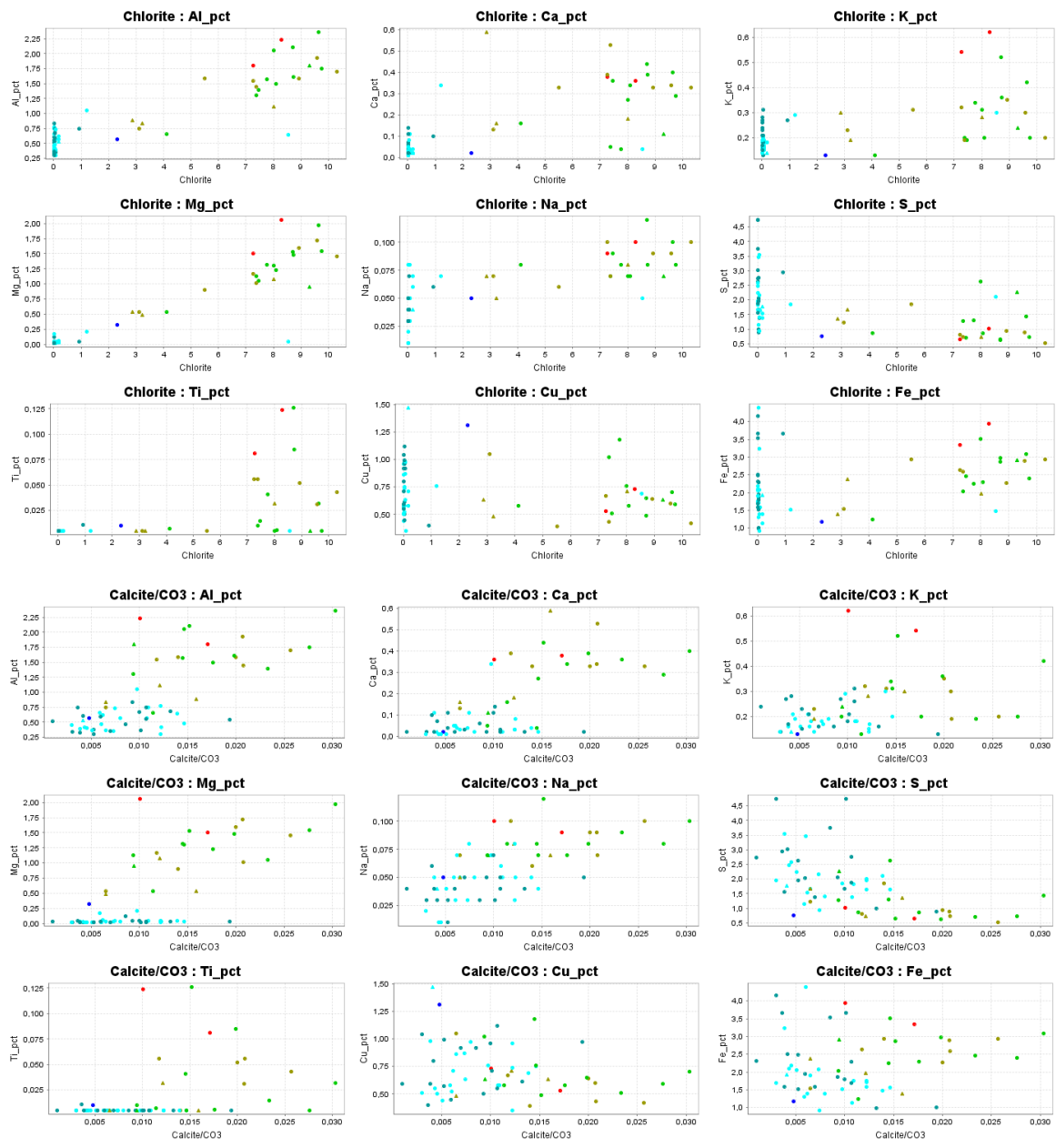


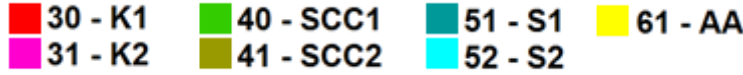


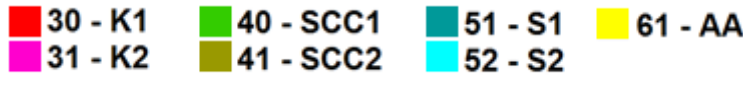
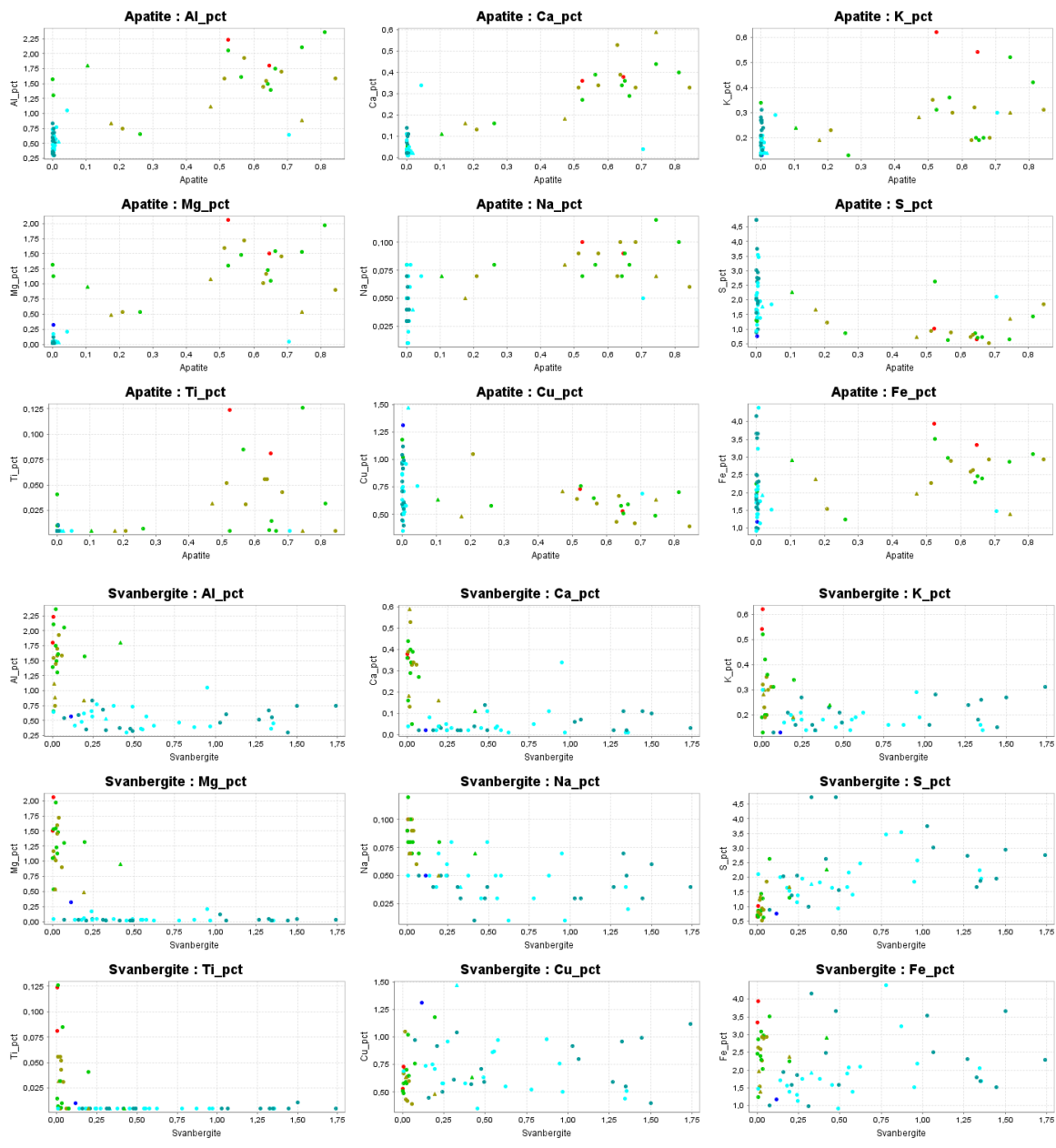






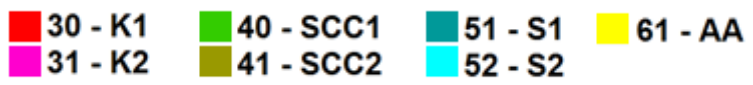




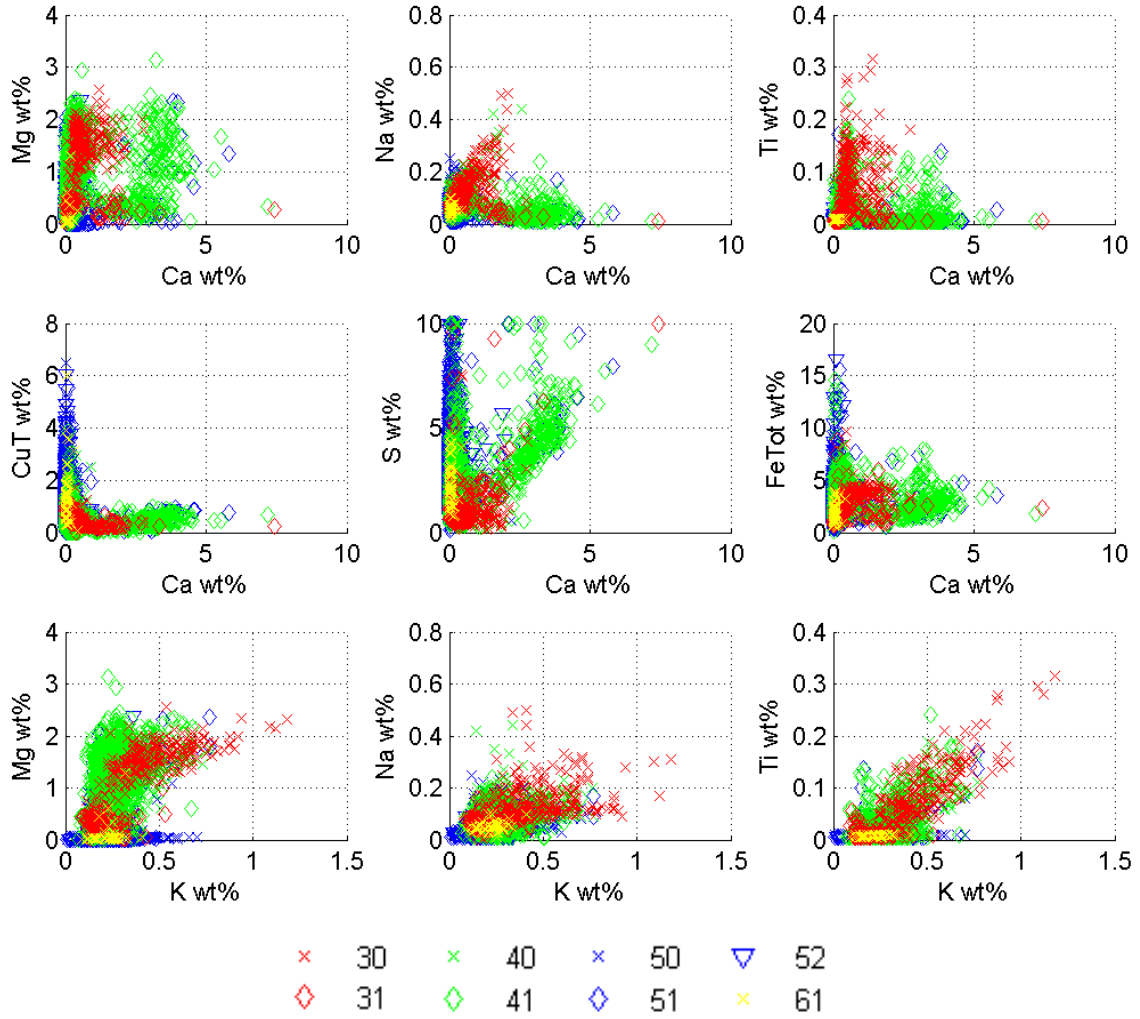


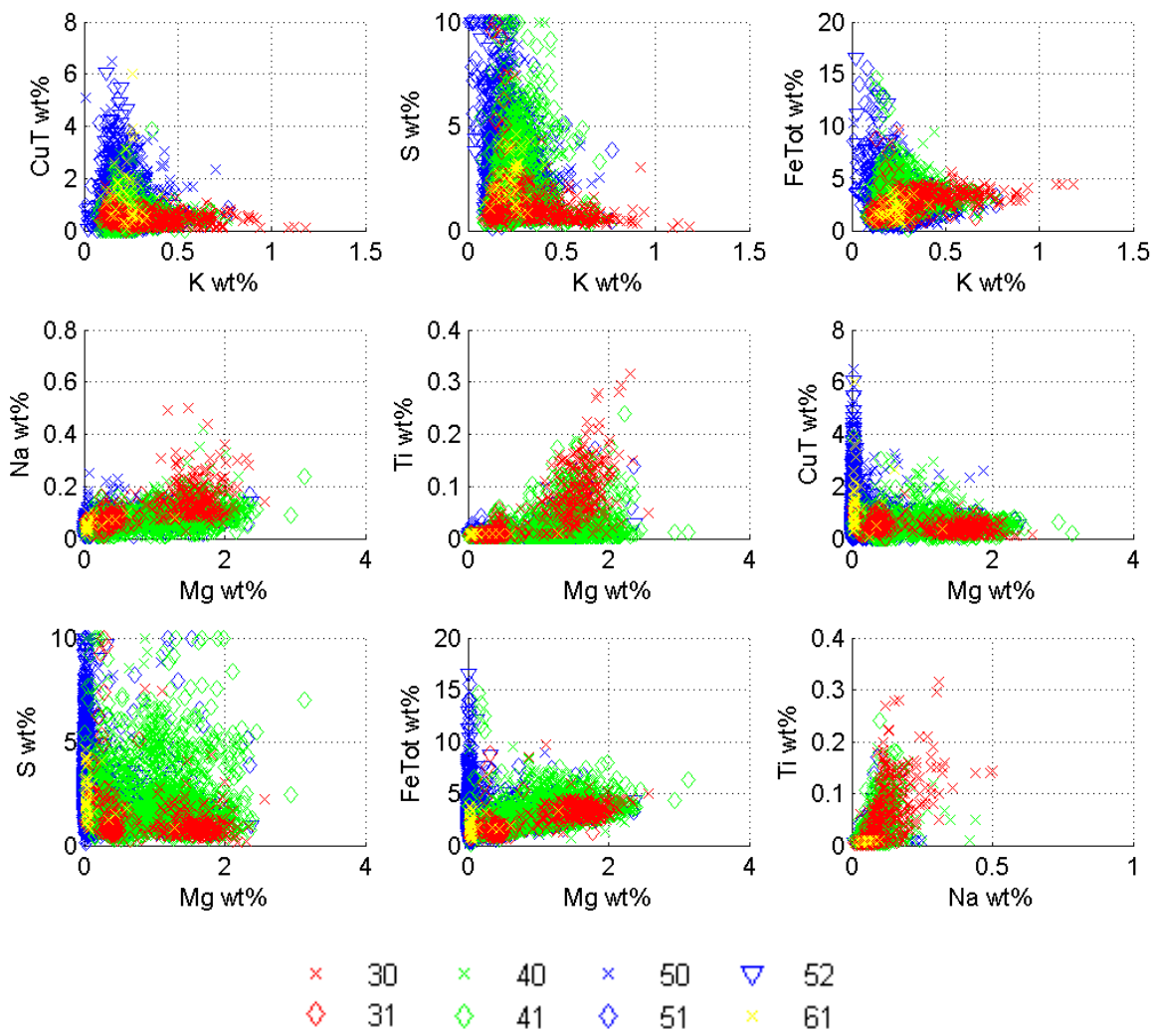
# Mineralogía vs abundancia relativa (tamaño indica mayor índice de abundancia)

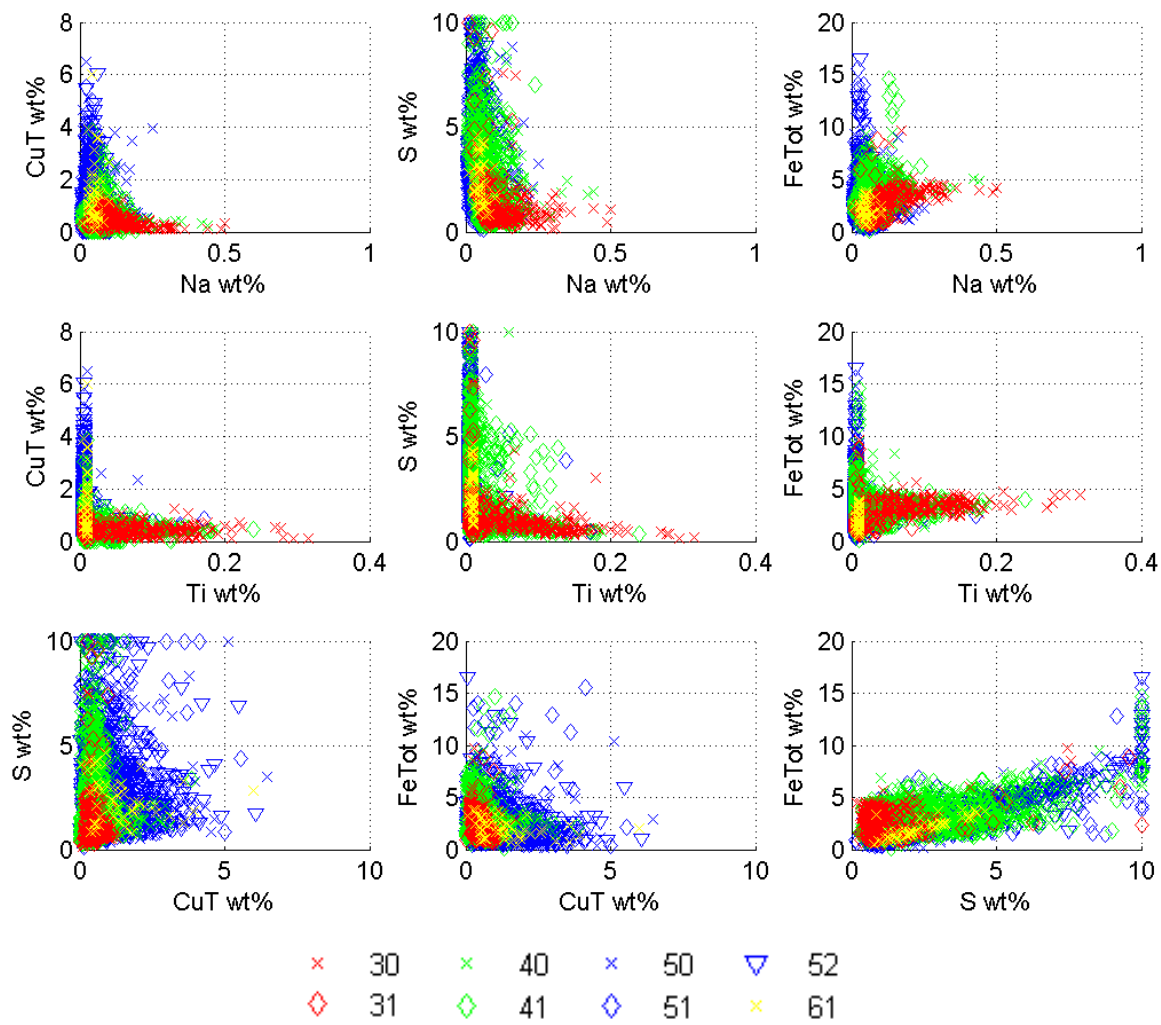




## Diagramas de dispersión de elementos mayores

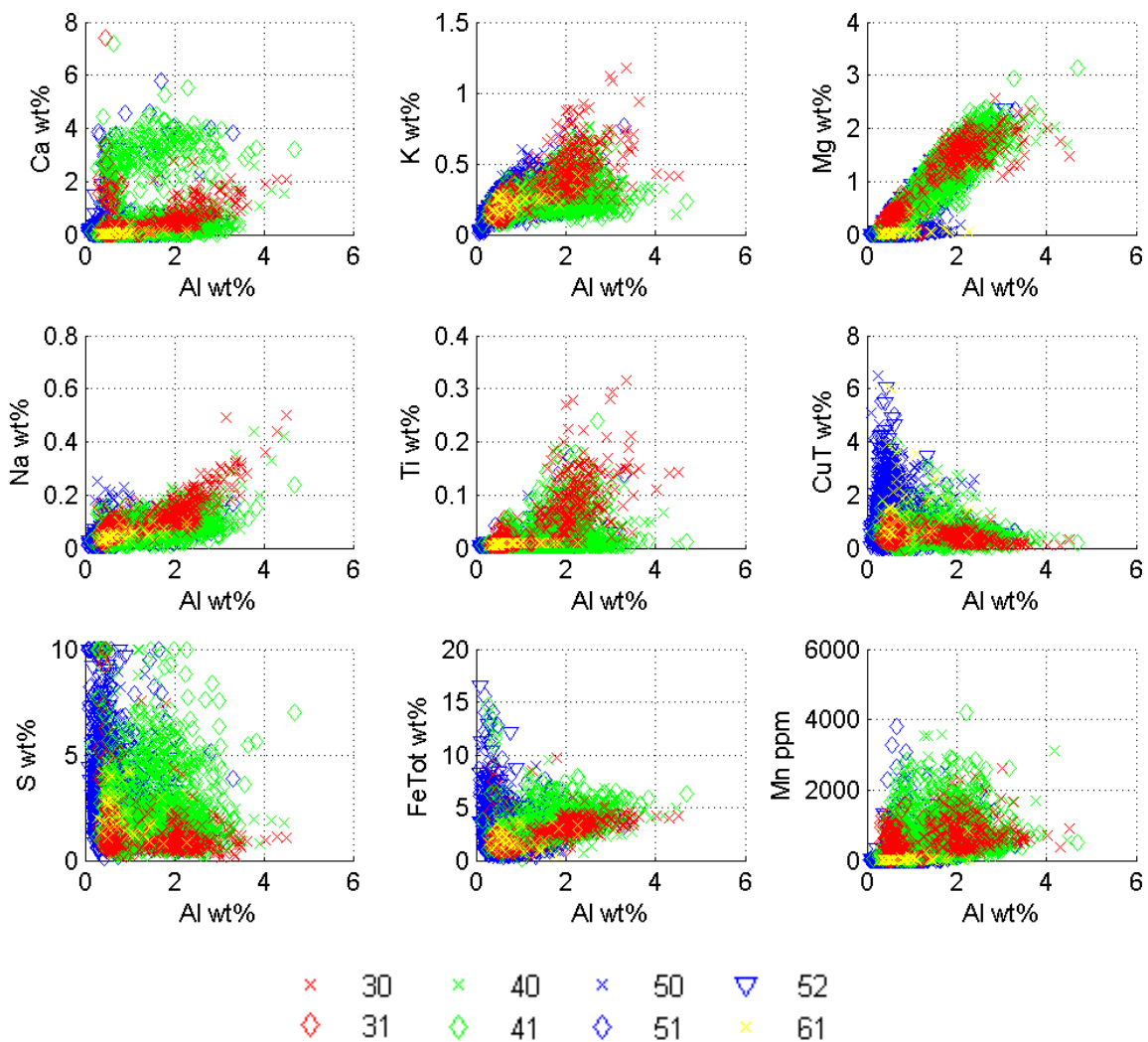


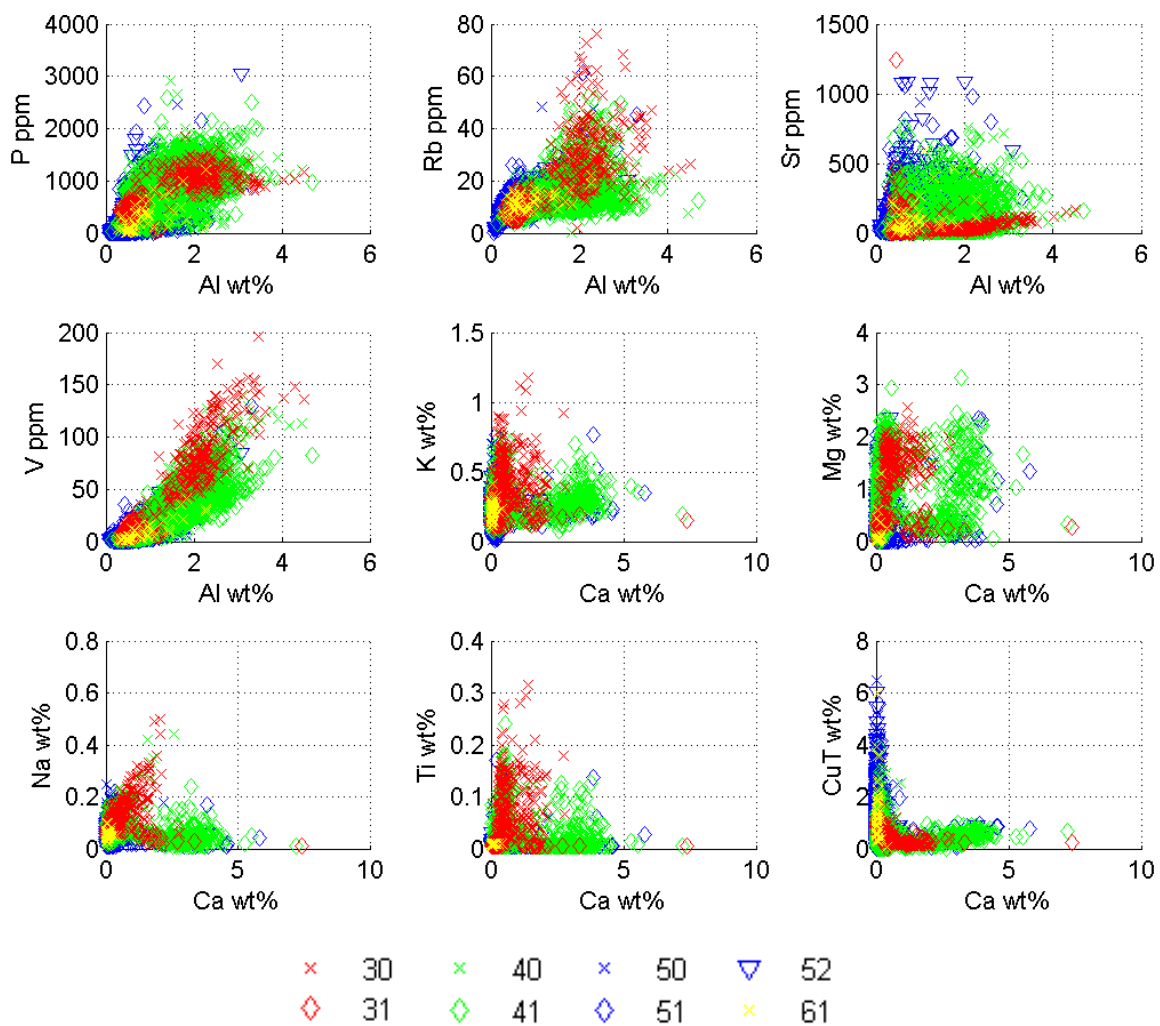


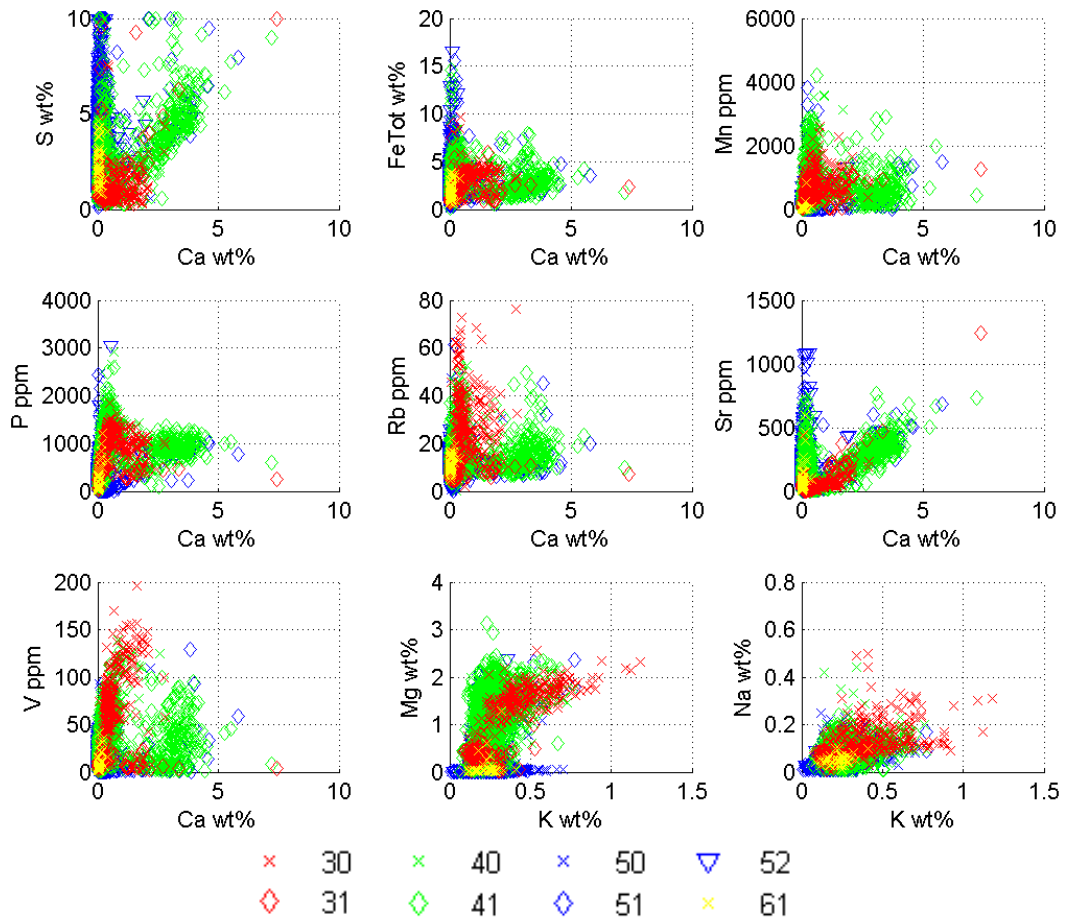


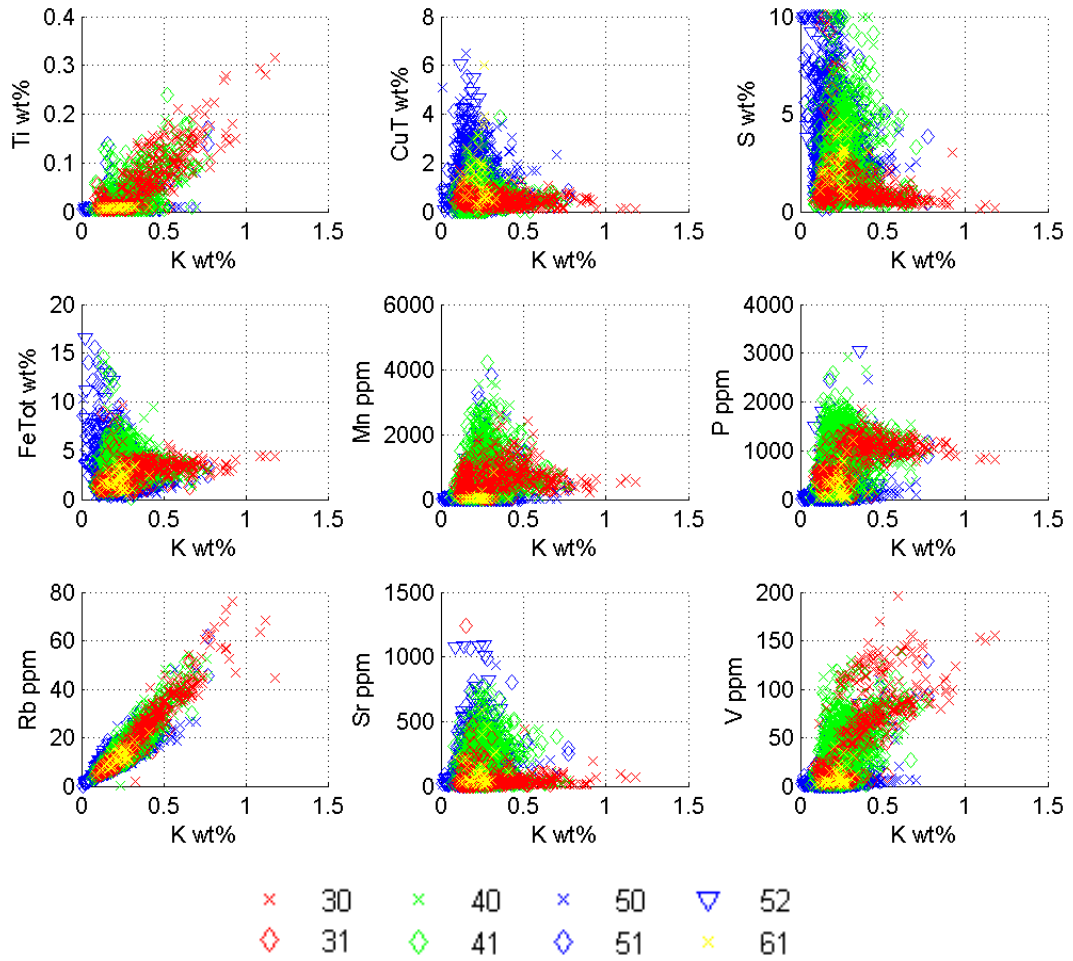


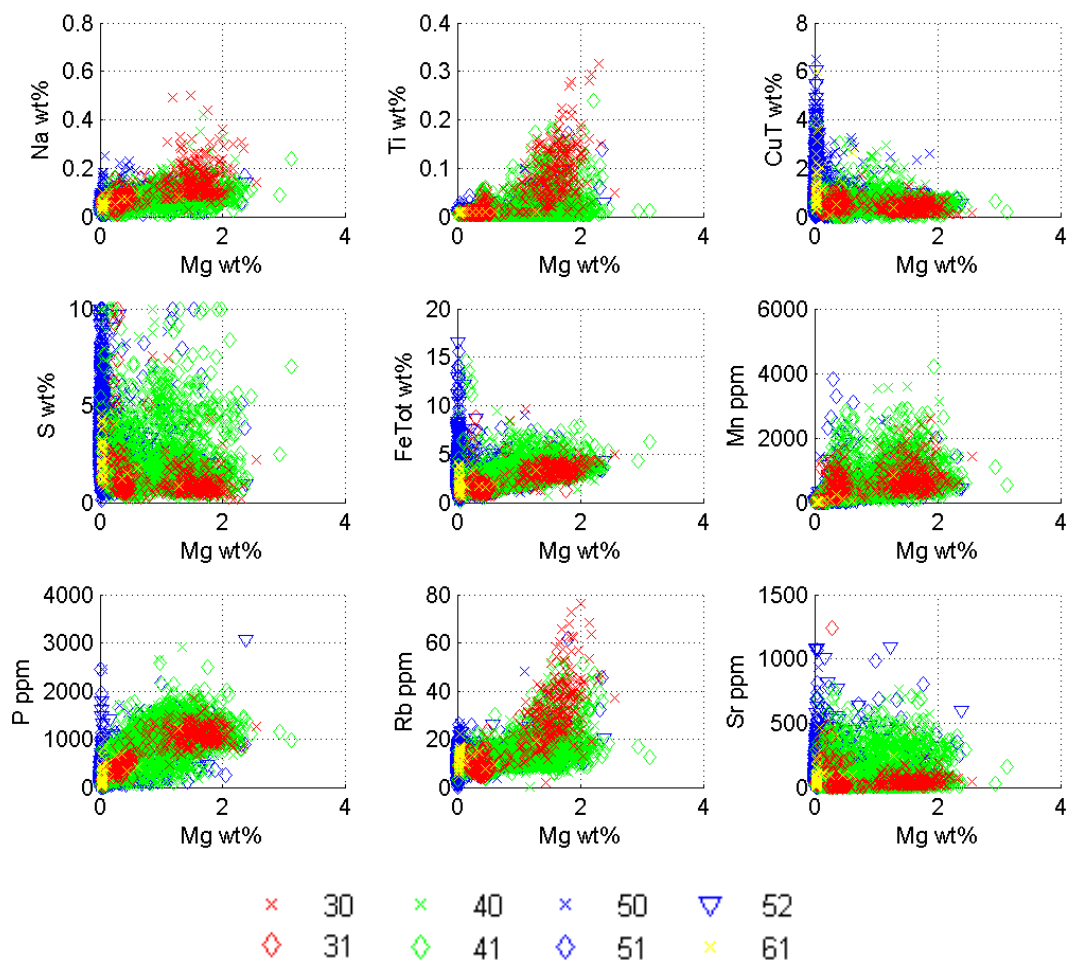
### Scatter de elementos con menor traslape entre alteraciones

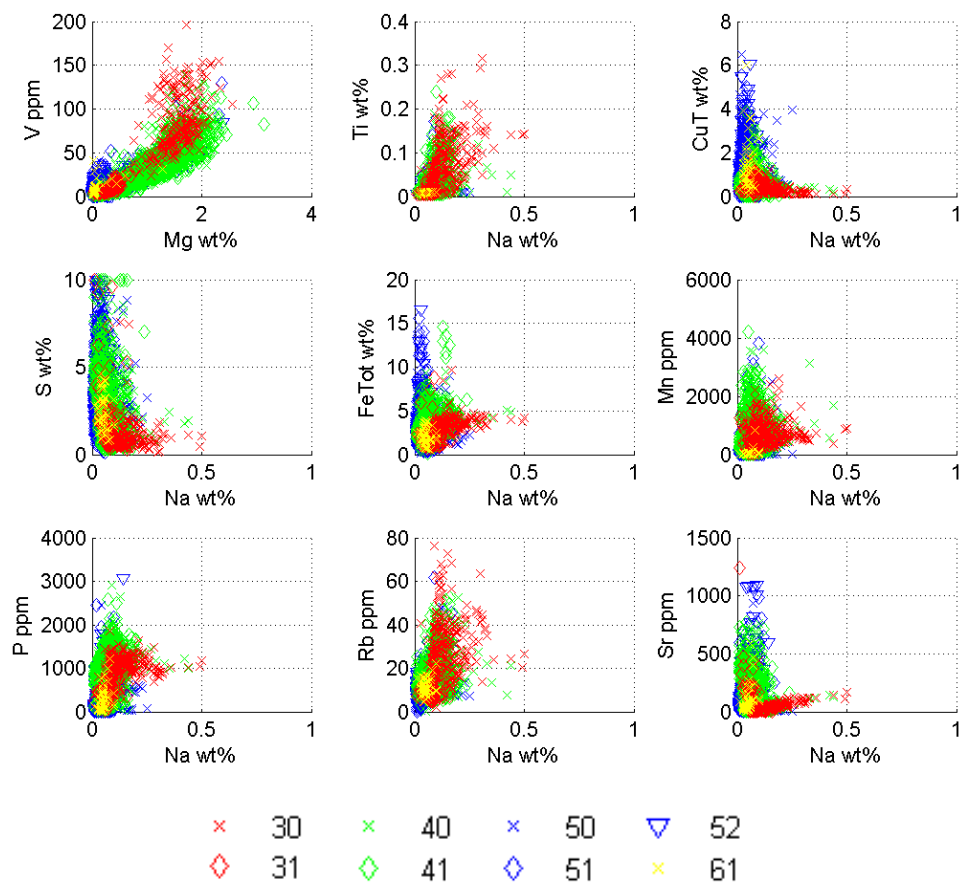


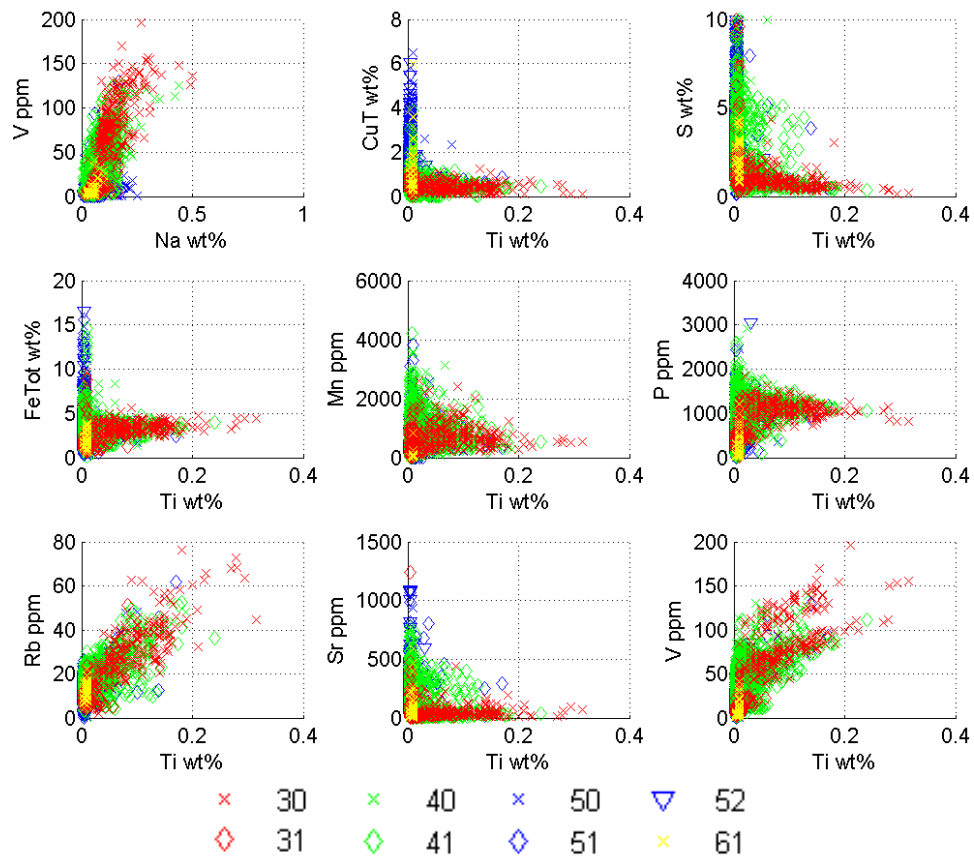


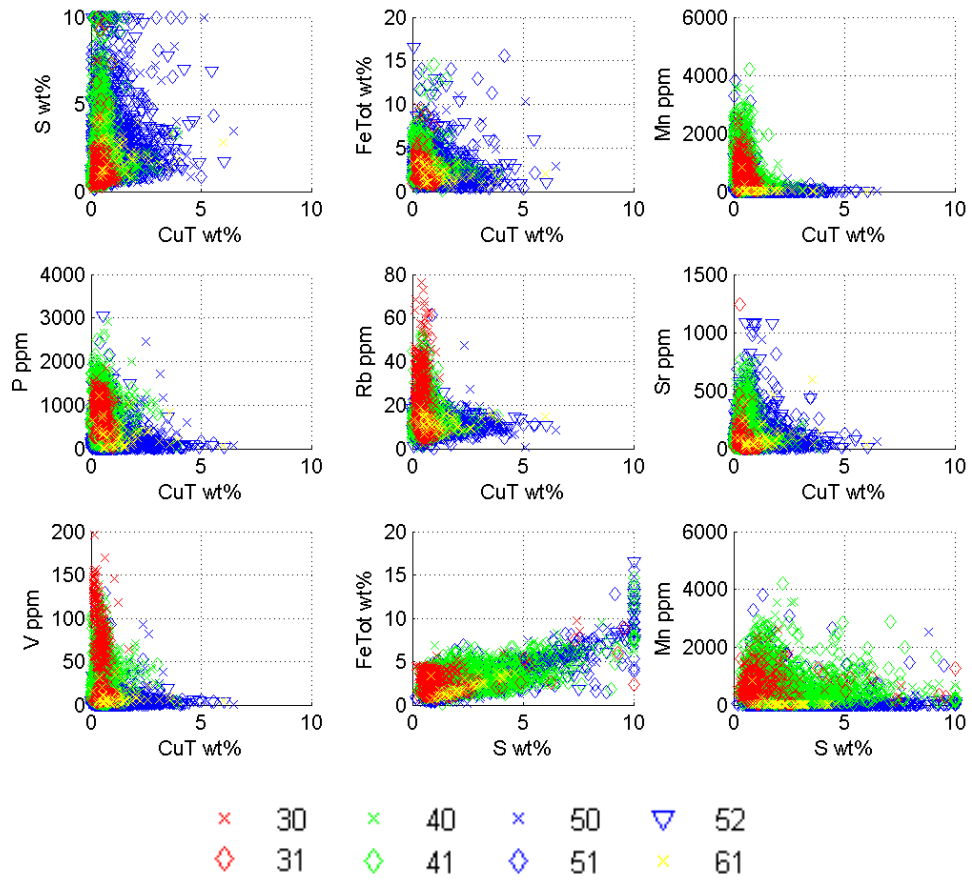




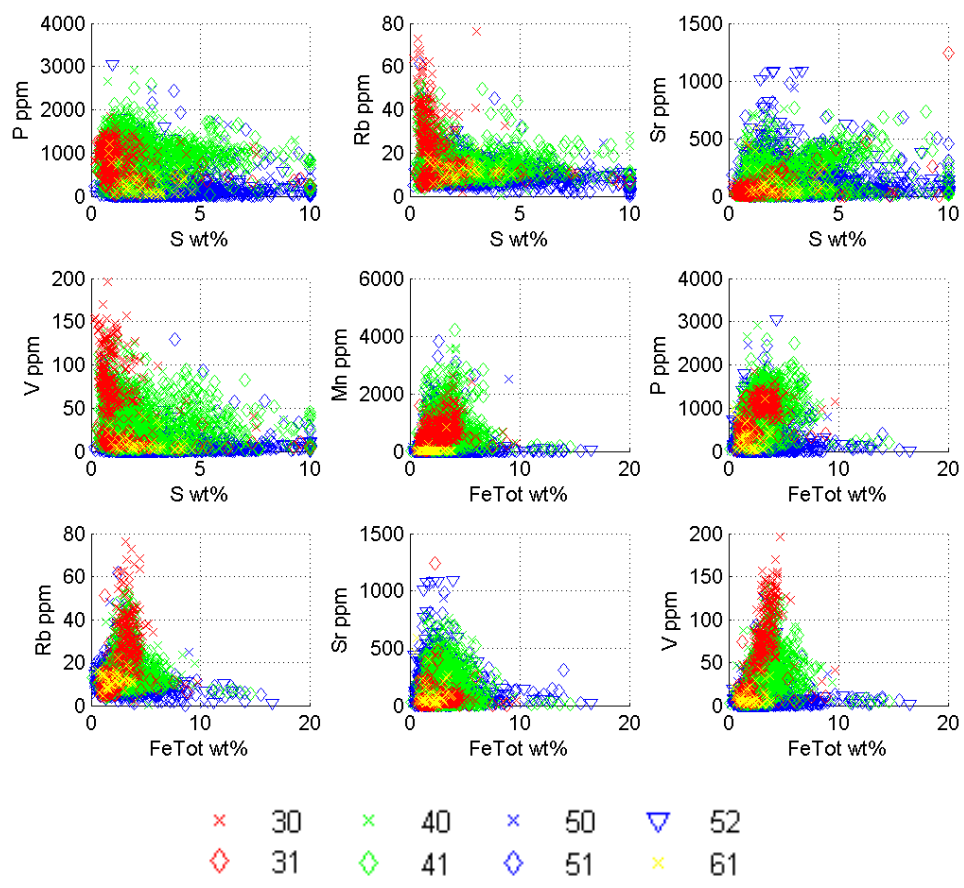


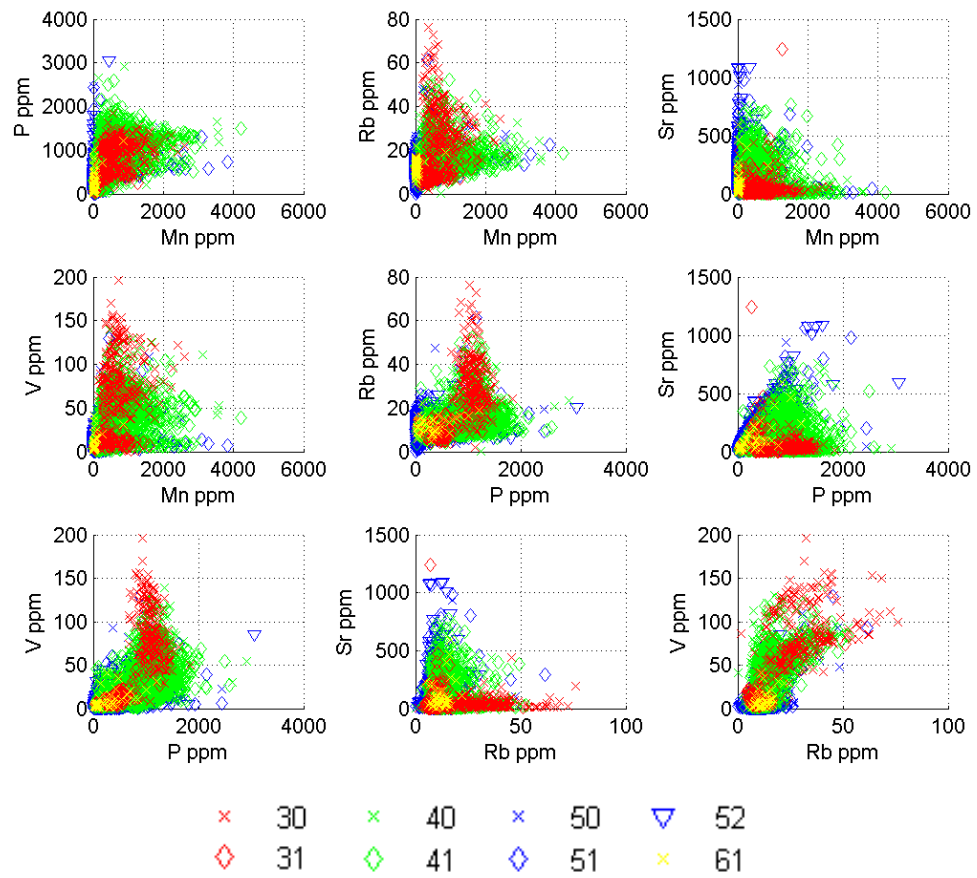












**Matrices de confusión entre clasificación y mapeo de alteraciones considerando distintos grupos de elementos mayores**

		Alteración Clasificada							Alteración Clasificada						
		Al -Mg							Al -Mg -K						
		K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA	K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA
Alteración mapeada	K1	58%	0%	32%	9%	0%	0%	0%	74%	0%	17%	9%	0%	0%	0%
	K2	0%	33%	0%	43%	10%	0%	14%	10%	14%	0%	67%	5%	0%	5%
	SCC1	27%	4%	44%	24%	1%	1%	0%	14%	3%	49%	33%	1%	0%	0%
	SCC2	21%	14%	16%	36%	12%	0%	0%	9%	11%	19%	49%	12%	0%	0%
	S1	1%	3%	0%	4%	63%	18%	10%	1%	3%	1%	7%	76%	3%	9%
	S2	0%	2%	1%	4%	63%	23%	6%	0%	1%	2%	6%	77%	8%	6%
	AA	0%	0%	10%	0%	30%	20%	40%	0%	0%	10%	10%	70%	0%	10%
		Al -K							Al -Mg -Ca						
		K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA	K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA
		Alteración mapeada	K1	77%	0%	13%	9%	0%	0%	0%	66%	0%	4%	30%	0%
K2	24%		14%	0%	14%	33%	0%	14%	0%	33%	0%	43%	10%	0%	14%
SCC1	13%		4%	55%	24%	3%	0%	1%	28%	4%	40%	27%	1%	0%	0%
SCC2	9%		9%	25%	29%	12%	1%	16%	22%	15%	15%	40%	8%	0%	0%
S1	3%		7%	1%	12%	58%	5%	14%	1%	4%	0%	5%	78%	4%	8%
S2	2%		6%	1%	7%	65%	10%	10%	0%	2%	1%	6%	84%	3%	5%
AA	0%		0%	10%	40%	50%	0%	0%	0%	0%	10%	10%	50%	0%	30%
		Al -Ca							Al -Mg -Na						
		K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA	K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA
		Alteración mapeada	K1	74%	0%	15%	11%	0%	0%	0%	85%	0%	9%	6%	0%
K2	0%		0%	0%	29%	71%	0%	0%	10%	33%	0%	48%	5%	0%	5%
SCC1	32%		0%	25%	34%	9%	0%	1%	22%	3%	43%	31%	1%	1%	0%
SCC2	17%		7%	15%	33%	24%	2%	3%	19%	12%	18%	41%	8%	1%	0%
S1	1%		1%	1%	6%	72%	6%	14%	1%	4%	1%	10%	72%	10%	2%
S2	0%		0%	0%	6%	78%	4%	12%	0%	1%	2%	8%	74%	12%	3%
AA	0%		0%	0%	50%	50%	0%	0%	0%	0%	10%	10%	60%	10%	10%
		Al -Na							Al -K -Ca						
		K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA	K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA
		Alteración mapeada	K1	66%	0%	19%	15%	0%	0%	0%	83%	0%	2%	15%	0%
K2	10%		33%	0%	52%	0%	0%	5%	29%	14%	0%	5%	52%	0%	0%
SCC1	16%		5%	42%	34%	1%	1%	0%	16%	4%	41%	34%	5%	0%	0%
SCC2	14%		11%	23%	29%	17%	2%	4%	10%	12%	21%	36%	18%	0%	2%
S1	0%		11%	1%	13%	59%	10%	6%	5%	6%	1%	8%	70%	1%	9%
S2	1%		10%	1%	8%	64%	11%	5%	2%	4%	0%	7%	79%	2%	7%
AA	0%		0%	10%	40%	40%	10%	0%	10%	0%	0%	40%	50%	0%	0%
		Mg -K							Al -K -Na						
		K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA	K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA
		Alteración mapeada	K1	79%	0%	13%	8%	0%	0%	0%	87%	0%	8%	6%	0%
K2	10%		33%	0%	33%	24%	0%	0%	29%	33%	0%	38%	0%	0%	0%
SCC1	14%		3%	39%	42%	1%	0%	0%	16%	5%	45%	32%	3%	0%	0%
SCC2	7%		15%	26%	38%	13%	0%	0%	13%	11%	25%	33%	14%	1%	3%
S1	0%		4%	1%	5%	67%	20%	3%	4%	10%	1%	18%	60%	5%	2%
S2	0%		3%	0%	5%	65%	23%	3%	2%	9%	1%	10%	65%	9%	4%
AA	0%		0%	0%	0%	80%	20%	0%	10%	0%	10%	30%	50%	0%	0%

		Alteración Clasificada							Alteración Clasificada						
		Mg -Ca							Al -Ca -Na						
		K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA	K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA
Alteración mapeada	K1	77%	0%	9%	13%	0%	0%	0%	70%	0%	15%	15%	0%	0%	0%
	K2	0%	52%	0%	24%	19%	5%	0%	29%	33%	0%	33%	5%	0%	0%
	SCC1	42%	5%	14%	38%	1%	0%	0%	25%	3%	40%	28%	3%	1%	0%
	SCC2	21%	26%	12%	32%	9%	0%	0%	20%	11%	17%	37%	12%	3%	0%
	S1	1%	5%	1%	3%	73%	17%	0%	3%	6%	1%	11%	66%	9%	3%
	S2	0%	4%	0%	4%	80%	11%	0%	4%	3%	1%	6%	71%	11%	4%
	AA	0%	0%	0%	0%	50%	50%	0%	10%	0%	10%	30%	50%	0%	0%
		Mg -Na							Mg -K -Ca						
		K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA	K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA
		Alteración mapeada	K1	91%	0%	8%	2%	0%	0%	0%	81%	0%	8%	11%	0%
K2	19%		43%	0%	19%	10%	10%	0%	10%	29%	0%	38%	24%	0%	0%
SCC1	42%		3%	16%	37%	1%	1%	0%	17%	3%	26%	53%	1%	0%	0%
SCC2	24%		18%	12%	34%	11%	1%	0%	7%	17%	19%	47%	10%	0%	0%
S1	1%		6%	0%	5%	59%	29%	0%	0%	4%	1%	5%	85%	4%	1%
S2	0%		4%	0%	6%	60%	30%	0%	0%	3%	0%	5%	88%	3%	1%
AA	0%		0%	0%	0%	40%	60%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	80%	20%
		K -Ca							Mg -K -Na						
		K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA	K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA
		Alteración mapeada	K1	83%	0%	8%	9%	0%	0%	0%	87%	0%	9%	4%	0%
K2	29%		38%	10%	5%	19%	0%	0%	24%	29%	0%	33%	14%	0%	0%
SCC1	20%		12%	28%	12%	24%	2%	1%	20%	3%	39%	37%	1%	0%	0%
SCC2	9%		29%	18%	18%	23%	1%	2%	9%	13%	26%	42%	10%	0%	0%
S1	7%		30%	5%	11%	38%	2%	7%	0%	4%	1%	9%	78%	7%	1%
S2	2%		31%	1%	6%	48%	2%	8%	0%	3%	1%	7%	76%	12%	1%
AA	10%		10%	10%	40%	30%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	80%	20%
		K -Na							Mg -Ca -Na						
		K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA	K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA
		Alteración mapeada	K1	89%	0%	11%	0%	0%	0%	0%	91%	0%	8%	2%	0%
K2	33%		29%	19%	19%	0%	0%	0%	19%	33%	0%	29%	10%	10%	0%
SCC1	24%		13%	26%	31%	5%	1%	0%	45%	2%	22%	29%	2%	0%	0%
SCC2	16%		26%	19%	22%	15%	1%	2%	27%	13%	11%	38%	10%	0%	0%
S1	17%		18%	2%	12%	41%	3%	6%	1%	2%	0%	7%	75%	14%	0%
S2	7%		18%	2%	8%	54%	3%	9%	1%	1%	0%	6%	78%	13%	0%
AA	20%		0%	0%	30%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	60%	40%
		Ca -Na							K -Ca -Na						
		K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA	K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA
		Alteración mapeada	K1	81%	0%	15%	4%	0%	0%	0%	91%	0%	8%	2%	0%
K2	33%		10%	19%	24%	10%	5%	0%	67%	19%	5%	10%	0%	0%	0%
SCC1	29%		11%	29%	16%	14%	1%	0%	34%	7%	26%	24%	9%	1%	0%
SCC2	18%		13%	21%	25%	22%	2%	0%	19%	15%	18%	32%	18%	0%	0%
S1	3%		6%	3%	11%	75%	3%	0%	19%	6%	4%	10%	59%	0%	1%
S2	2%		3%	2%	8%	83%	2%	0%	9%	5%	3%	6%	76%	0%	1%
AA	0%		0%	10%	0%	80%	10%	0%	20%	0%	10%	0%	0%	60%	0%

		Alteración Clasificada							Alteración Clasificada						
		Al -Mg -K -Ca							Al -Mg -K -Ca -Na						
		K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA	K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA
Alteración mapeada	K1	81%	0%	4%	15%	0%	0%	0%	89%	0%	8%	4%	0%	0%	0%
	K2	10%	14%	0%	62%	14%	0%	0%	19%	14%	0%	48%	19%	0%	0%
	SCC1	17%	3%	42%	36%	2%	0%	0%	19%	1%	43%	34%	2%	0%	0%
	SCC2	10%	11%	17%	53%	9%	0%	0%	11%	6%	18%	58%	6%	0%	0%
	S1	1%	2%	1%	9%	81%	0%	5%	1%	1%	2%	15%	78%	2%	1%
	S2	0%	1%	1%	8%	85%	2%	4%	1%	0%	2%	9%	82%	5%	1%
AA	0%	0%	10%	10%	70%	0%	10%	0%	0%	10%	20%	70%	0%	0%	
		Al -Mg -K -Na							Al -K -Ca -Na						
		K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA	K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA
		Alteración mapeada	K1	87%	0%	8%	6%	0%	0%	0%	91%	0%	6%	4%	0%
K2	14%		14%	0%	67%	5%	0%	0%	43%	29%	0%	19%	10%	0%	0%
SCC1	15%		3%	49%	32%	1%	0%	0%	22%	4%	44%	26%	3%	0%	0%
SCC2	9%		9%	21%	54%	7%	0%	0%	17%	9%	19%	42%	12%	0%	0%
S1	0%		2%	1%	15%	76%	3%	2%	9%	5%	1%	13%	68%	3%	1%
S2	0%		1%	2%	11%	77%	8%	2%	5%	3%	1%	6%	75%	7%	3%
AA	0%	0%	10%	30%	60%	0%	0%	30%	0%	10%	10%	50%	0%	0%	
		Al -Mg -Ca -Na							Mg -K -Ca -Na						
		K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA	K1	K2	SCC1	SCC2	S1	S2	AA
		Alteración mapeada	K1	85%	0%	8%	8%	0%	0%	0%	87%	0%	8%	6%	0%
K2	14%		29%	0%	48%	5%	0%	5%	24%	24%	0%	38%	14%	0%	0%
SCC1	25%		3%	40%	31%	1%	0%	0%	27%	3%	31%	37%	2%	0%	0%
SCC2	19%		8%	16%	50%	6%	1%	0%	15%	9%	19%	49%	9%	0%	0%
S1	1%		2%	1%	11%	75%	8%	1%	1%	2%	0%	11%	83%	4%	0%
S2	1%		1%	2%	8%	78%	9%	1%	1%	1%	1%	7%	86%	4%	0%
AA	0%	0%	10%	10%	70%	0%	10%	0%	0%	0%	0%	80%	20%	0%	

**Matriz de correlación para elementos mayores [wt%]**

	<b>Al</b>	<b>Mg</b>	<b>K</b>	<b>Fe</b>	<b>S</b>	<b>Ca</b>	<b>Na</b>	<b>Cu</b>	<b>Ti</b>
<b>Al</b>	1.00	0.94	0.59	0.38	-0.23	0.32	0.70	-0.22	0.48
<b>Mg</b>	0.94	1.00	0.55	0.38	-0.23	0.36	0.64	-0.23	0.51
<b>K</b>	0.59	0.55	1.00	0.13	-0.18	0.28	0.49	-0.15	0.71
<b>Fe</b>	0.38	0.38	0.13	1.00	0.64	0.15	0.21	-0.15	0.15
<b>S</b>	-0.23	-0.23	-0.18	0.64	1.00	0.25	-0.32	0.04	-0.22
<b>Ca</b>	0.32	0.36	0.28	0.15	0.25	1.00	0.15	-0.16	0.24
<b>Na</b>	0.70	0.64	0.49	0.21	-0.32	0.15	1.00	-0.16	0.57
<b>Cu</b>	-0.22	-0.23	-0.15	-0.15	0.04	-0.16	-0.16	1.00	-0.12
<b>Ti</b>	0.48	0.51	0.71	0.15	-0.22	0.24	0.57	-0.12	1.00

### Matriz de correlación para elementos traza [ppm]

	Ag	Mo	Re	Cd	Pb	Zn	Te	Bi	Sb	Co	Ni	Se	As	Ba	Be	Ce	Cr
Ag	1.00	0.02	0.12	0.18	0.37	0.37	0.32	0.68	0.46	-0.05	0.07	0.41	0.46	-0.11	-0.05	0.02	0.15
Mo	0.02	1.00	0.30	0.02	-0.01	-0.03	-0.03	0.04	0.01	0.04	0.02	0.18	0.03	-0.08	-0.01	0.07	-0.07
Re	0.12	0.30	1.00	0.15	-0.04	-0.07	0.03	0.16	0.04	0.13	-0.05	0.21	0.10	-0.18	-0.25	-0.14	0.00
Cd	0.18	0.02	0.15	1.00	0.24	0.32	0.03	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.04	-0.01	0.07	0.09	-0.01
Pb	0.37	-0.01	-0.04	0.24	1.00	0.58	0.07	0.10	0.27	0.02	0.20	0.04	0.07	0.06	0.15	0.15	0.01
Zn	0.37	-0.03	-0.07	0.32	0.58	1.00	0.04	0.16	0.19	0.04	0.19	0.05	0.07	0.09	0.37	0.36	0.00
Te	0.32	-0.03	0.03	0.03	0.07	0.04	1.00	0.42	0.24	0.02	0.01	0.28	0.32	-0.15	-0.15	-0.21	0.07
Bi	0.68	0.04	0.16	0.08	0.10	0.16	0.42	1.00	0.29	0.00	0.02	0.39	0.44	-0.16	-0.15	-0.10	0.14
Sb	0.46	0.01	0.04	0.08	0.27	0.19	0.24	0.29	1.00	-0.01	0.06	0.15	0.47	-0.07	-0.07	-0.10	0.05
Co	-0.05	0.04	0.13	0.08	0.02	0.04	0.02	0.00	-0.01	1.00	0.13	0.05	0.00	-0.11	0.02	-0.12	-0.10
Ni	0.07	0.02	-0.05	0.08	0.20	0.19	0.01	0.02	0.06	0.13	1.00	-0.02	-0.02	0.05	0.10	0.04	-0.15
Se	0.41	0.18	0.21	0.07	0.04	0.05	0.28	0.39	0.15	0.05	-0.02	1.00	0.19	-0.23	-0.18	-0.12	0.18
As	0.46	0.03	0.10	0.04	0.07	0.07	0.32	0.44	0.47	0.00	-0.02	0.19	1.00	-0.11	-0.14	-0.15	0.05
Ba	-0.11	-0.08	-0.18	-0.01	0.06	0.09	-0.15	-0.16	-0.07	-0.11	0.05	-0.23	-0.11	1.00	0.26	0.29	-0.03
Be	-0.05	-0.01	-0.25	0.07	0.15	0.37	-0.15	-0.15	-0.07	0.02	0.10	-0.18	-0.14	0.26	1.00	0.58	-0.11
Ce	0.02	0.07	-0.14	0.09	0.15	0.36	-0.21	-0.10	-0.10	-0.12	0.04	-0.12	-0.15	0.29	0.58	1.00	-0.01
Cr	0.15	-0.07	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.07	0.14	0.05	-0.10	-0.15	0.18	0.05	-0.03	-0.11	-0.01	1.00
Cs	0.04	-0.07	-0.16	0.09	0.19	0.31	-0.03	-0.02	-0.01	0.07	0.05	-0.23	-0.03	0.24	0.52	0.36	-0.14
Cu	0.37	0.22	0.22	0.07	-0.05	-0.04	0.12	0.28	0.09	-0.14	-0.07	0.56	0.15	-0.19	-0.21	-0.05	0.10
Ga	-0.05	-0.06	-0.24	0.07	0.18	0.40	-0.14	-0.14	-0.07	0.10	0.19	-0.23	-0.14	0.30	0.77	0.52	-0.13
In	0.45	0.05	0.28	0.27	0.20	0.46	0.18	0.38	0.19	0.07	0.04	0.23	0.20	-0.10	-0.06	0.00	0.08
La	0.03	0.07	-0.11	0.08	0.14	0.33	-0.21	-0.09	-0.10	-0.14	0.02	-0.10	-0.15	0.28	0.52	0.98	0.01
Mn	0.05	-0.03	-0.19	0.07	0.33	0.51	-0.08	-0.05	-0.02	0.03	0.15	-0.23	-0.10	0.25	0.58	0.47	-0.08
P	-0.06	0.01	-0.23	0.08	0.19	0.39	-0.13	-0.15	-0.06	0.08	0.17	-0.23	-0.13	0.24	0.77	0.60	-0.14
Rb	-0.03	0.02	-0.08	0.02	0.13	0.23	-0.12	-0.09	-0.04	0.07	0.10	-0.15	-0.09	0.41	0.43	0.35	-0.14
Sc	-0.07	-0.01	-0.16	0.05	0.11	0.27	-0.12	-0.13	-0.06	0.15	0.19	-0.18	-0.12	0.28	0.57	0.35	-0.14
Sn	0.23	0.05	0.07	-0.01	-0.02	-0.04	0.41	0.38	0.16	0.03	0.03	0.20	0.24	-0.10	-0.11	-0.19	0.02
Sr	-0.01	0.01	-0.07	0.01	-0.06	-0.07	0.01	0.00	-0.02	-0.01	-0.06	0.04	0.02	0.00	0.27	-0.01	-0.04
Th	-0.04	-0.03	-0.26	0.03	0.11	0.29	-0.22	-0.14	-0.10	-0.16	0.05	-0.15	-0.17	0.28	0.57	0.73	0.04
Tl	0.12	0.14	0.54	0.09	-0.01	-0.04	0.06	0.14	0.06	0.27	0.02	0.14	0.12	-0.05	-0.16	-0.17	-0.06
U	0.28	0.07	0.18	0.21	0.05	0.14	0.01	0.25	0.07	0.03	-0.02	0.11	0.09	0.04	0.07	0.23	0.06
V	-0.09	-0.01	-0.18	0.05	0.12	0.30	-0.12	-0.14	-0.07	0.15	0.20	-0.22	-0.12	0.29	0.62	0.38	-0.15
W	0.07	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.05	0.05	0.01	0.02	0.03	0.06	0.00	-0.01	-0.03	0.00
Y	-0.04	0.03	-0.20	0.14	0.13	0.34	-0.14	-0.13	-0.07	0.01	0.12	-0.12	-0.14	0.22	0.75	0.60	-0.11

### Matriz de correlación para elementos traza [ppm] (continuación)

	Cs	Cu	Ga	In	La	Mn	P	Rb	Sc	Sn	Sr	Th	Tl	U	V	W	Y
<b>Ag</b>	0.04	0.37	-0.05	0.45	0.03	0.05	-0.06	-0.03	-0.07	0.23	-0.01	-0.04	0.12	0.28	-0.09	0.07	-0.04
<b>Mo</b>	-0.07	0.22	-0.06	0.05	0.07	-0.03	0.01	0.02	-0.01	0.05	0.01	-0.03	0.14	0.07	-0.01	0.01	0.03
<b>Re</b>	-0.16	0.22	-0.24	0.28	-0.11	-0.19	-0.23	-0.08	-0.16	0.07	-0.07	-0.26	0.54	0.18	-0.18	0.00	-0.20
<b>Cd</b>	0.09	0.07	0.07	0.27	0.08	0.07	0.08	0.02	0.05	-0.01	0.01	0.03	0.09	0.21	0.05	0.00	0.14
<b>Pb</b>	0.19	-0.05	0.18	0.20	0.14	0.33	0.19	0.13	0.11	-0.02	-0.06	0.11	-0.01	0.05	0.12	0.01	0.13
<b>Zn</b>	0.31	-0.04	0.40	0.46	0.33	0.51	0.39	0.23	0.27	-0.04	-0.07	0.29	-0.04	0.14	0.30	0.00	0.34
<b>Te</b>	-0.03	0.12	-0.14	0.18	-0.21	-0.08	-0.13	-0.12	-0.12	0.41	0.01	-0.22	0.06	0.01	-0.12	0.03	-0.14
<b>Bi</b>	-0.02	0.28	-0.14	0.38	-0.09	-0.05	-0.15	-0.09	-0.13	0.38	0.00	-0.14	0.14	0.25	-0.14	0.05	-0.13
<b>Sb</b>	-0.01	0.09	-0.07	0.19	-0.10	-0.02	-0.06	-0.04	-0.06	0.16	-0.02	-0.10	0.06	0.07	-0.07	0.05	-0.07
<b>Co</b>	0.07	-0.14	0.10	0.07	-0.14	0.03	0.08	0.07	0.15	0.03	-0.01	-0.16	0.27	0.03	0.15	0.01	0.01
<b>Ni</b>	0.05	-0.07	0.19	0.04	0.02	0.15	0.17	0.10	0.19	0.03	-0.06	0.05	0.02	-0.02	0.20	0.02	0.12
<b>Se</b>	-0.23	0.56	-0.23	0.23	-0.10	-0.23	-0.23	-0.15	-0.18	0.20	0.04	-0.15	0.14	0.11	-0.22	0.03	-0.12
<b>As</b>	-0.03	0.15	-0.14	0.20	-0.15	-0.10	-0.13	-0.09	-0.12	0.24	0.02	-0.17	0.12	0.09	-0.12	0.06	-0.14
<b>Ba</b>	0.24	-0.19	0.30	-0.10	0.28	0.25	0.24	0.41	0.28	-0.10	0.00	0.28	-0.05	0.04	0.29	0.00	0.22
<b>Be</b>	0.52	-0.21	0.77	-0.06	0.52	0.58	0.77	0.43	0.57	-0.11	0.27	0.57	-0.16	0.07	0.62	-0.01	0.75
<b>Ce</b>	0.36	-0.05	0.52	0.00	0.98	0.47	0.60	0.35	0.35	-0.19	-0.01	0.73	-0.17	0.23	0.38	-0.03	0.60
<b>Cr</b>	-0.14	0.10	-0.13	0.08	0.01	-0.08	-0.14	-0.14	-0.14	0.02	-0.04	0.04	-0.06	0.06	-0.15	0.00	-0.11
<b>Cs</b>	1.00	-0.23	0.54	0.07	0.33	0.56	0.50	0.51	0.47	-0.04	0.14	0.27	0.01	0.11	0.51	0.00	0.44
<b>Cu</b>	-0.23	1.00	-0.27	0.19	-0.03	-0.27	-0.26	-0.12	-0.18	0.08	-0.01	-0.13	0.22	0.12	-0.22	0.00	-0.10
<b>Ga</b>	0.54	-0.27	1.00	-0.06	0.44	0.67	0.81	0.67	0.87	-0.08	0.03	0.51	-0.05	-0.01	0.91	-0.01	0.72
<b>In</b>	0.07	0.19	-0.06	1.00	0.02	0.03	-0.08	-0.04	-0.09	0.05	0.07	-0.05	0.17	0.35	-0.11	0.03	-0.08
<b>La</b>	0.33	-0.03	0.44	0.02	1.00	0.42	0.52	0.30	0.28	-0.19	-0.02	0.71	-0.16	0.25	0.30	-0.03	0.53
<b>Mn</b>	0.56	-0.27	0.67	0.03	0.42	1.00	0.66	0.42	0.50	-0.07	-0.06	0.43	-0.10	0.02	0.57	-0.01	0.50
<b>P</b>	0.50	-0.26	0.81	-0.08	0.52	0.66	1.00	0.48	0.67	-0.08	0.12	0.51	-0.13	-0.01	0.73	0.00	0.73
<b>Rb</b>	0.51	-0.12	0.67	-0.04	0.30	0.42	0.48	1.00	0.75	-0.03	-0.02	0.27	0.24	0.01	0.72	0.00	0.45
<b>Sc</b>	0.47	-0.18	0.87	-0.09	0.28	0.50	0.67	0.75	1.00	-0.04	0.00	0.35	0.07	-0.03	0.95	0.00	0.62
<b>Sn</b>	-0.04	0.08	-0.08	0.05	-0.19	-0.07	-0.08	-0.03	-0.04	1.00	-0.01	-0.17	0.09	0.01	-0.04	0.25	-0.09
<b>Sr</b>	0.14	-0.01	0.03	0.07	-0.02	-0.06	0.12	-0.02	0.00	-0.01	1.00	0.06	-0.07	0.12	-0.01	0.06	0.08
<b>Th</b>	0.27	-0.13	0.51	-0.05	0.71	0.43	0.51	0.27	0.35	-0.17	0.06	1.00	-0.30	0.19	0.36	-0.02	0.55
<b>Tl</b>	0.01	0.22	-0.05	0.17	-0.16	-0.10	-0.13	0.24	0.07	0.09	-0.07	-0.30	1.00	0.10	0.03	0.01	-0.12
<b>U</b>	0.11	0.12	-0.01	0.35	0.25	0.02	-0.01	0.01	-0.03	0.01	0.12	0.19	0.10	1.00	-0.06	0.02	0.10
<b>V</b>	0.51	-0.22	0.91	-0.11	0.30	0.57	0.73	0.72	0.95	-0.04	-0.01	0.36	0.03	-0.06	1.00	0.00	0.65
<b>W</b>	0.00	0.00	-0.01	0.03	-0.03	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.25	0.06	-0.02	0.01	0.02	0.00	1.00	-0.02
<b>Y</b>	0.44	-0.10	0.72	-0.08	0.53	0.50	0.73	0.45	0.62	-0.09	0.08	0.55	-0.12	0.10	0.65	-0.02	1.00



## Componentes principales elementos mayores

### Valores propios

	Valores propios	Porcentaje	% Acumulado
<b>PC1</b>	3.87	43.00	43.00
<b>PC2</b>	1.77	19.71	62.71
<b>PC3</b>	0.95	10.55	73.26
<b>PC4</b>	0.90	10.04	83.30
<b>PC5</b>	0.71	7.94	91.24
<b>PC6</b>	0.41	4.51	95.75
<b>PC7</b>	0.25	2.81	98.56
<b>PC8</b>	0.08	0.87	99.43
<b>PC9</b>	0.05	0.57	100.00

### Vectores propios

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9
<b>Al</b>	0.46	0.03	0.02	-0.19	0.35	0.24	-0.04	0.16	0.74
<b>Mg</b>	0.46	0.04	-0.01	-0.14	0.35	0.27	0.27	0.30	-0.63
<b>K</b>	0.40	-0.08	0.14	0.28	-0.42	0.46	-0.56	-0.15	-0.13
<b>Fe</b>	0.18	0.61	0.17	-0.40	-0.13	0.00	0.16	-0.60	-0.04
<b>S</b>	-0.12	0.69	0.14	0.08	-0.17	-0.06	-0.22	0.63	0.02
<b>Ca</b>	0.20	0.31	-0.20	0.74	0.39	-0.21	0.03	-0.26	0.01
<b>Na</b>	0.41	-0.14	0.08	-0.24	0.05	-0.75	-0.42	0.04	-0.12
<b>Cu</b>	-0.15	-0.10	0.92	0.15	0.30	0.00	0.02	-0.05	-0.01
<b>Ti</b>	0.38	-0.11	0.18	0.24	-0.54	-0.22	0.60	0.16	0.15

## Componentes principales elementos traza

### Valores propios

	Valores propios	Porcentaje	% Acumulado
PC1	8.10	23.13	23.13
PC2	4.20	11.99	35.12
PC3	2.36	6.74	41.86
PC4	2.00	5.70	47.57
PC5	1.64	4.68	52.24
PC6	1.30	3.72	55.97
PC7	1.26	3.61	59.58
PC8	1.20	3.43	63.01
PC9	1.09	3.12	66.12
PC10	0.98	2.79	68.91
PC11	0.95	2.71	71.62
PC12	0.90	2.59	74.21
PC13	0.83	2.37	76.58
PC14	0.79	2.26	78.84
PC15	0.72	2.04	80.88
PC16	0.67	1.91	82.79
PC17	0.61	1.75	84.53
PC18	0.57	1.62	86.15
PC19	0.55	1.56	87.71
PC20	0.48	1.38	89.09
PC21	0.46	1.31	90.40
PC22	0.44	1.27	91.67
PC23	0.43	1.22	92.89
PC24	0.37	1.07	93.96
PC25	0.35	1.00	94.96
PC26	0.33	0.93	95.90
PC27	0.31	0.87	96.77
PC28	0.24	0.67	97.44
PC29	0.22	0.63	98.07
PC30	0.20	0.58	98.65
PC31	0.19	0.53	99.18
PC32	0.17	0.48	99.67
PC33	0.07	0.19	99.86
PC34	0.04	0.11	99.97
PC35	0.01	0.03	100.00

## Vectores propios

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11	PC12
<b>Ag</b>	-0.05	-0.40	0.08	0.07	0.03	-0.08	0.05	0.10	0.06	0.03	-0.09	-0.02
<b>Mo</b>	-0.02	-0.06	0.01	-0.33	0.12	-0.12	-0.10	-0.44	-0.06	-0.09	-0.02	0.34
<b>Re</b>	-0.11	-0.12	-0.09	-0.46	-0.08	0.03	-0.19	-0.02	-0.09	-0.12	0.12	0.15
<b>Cd</b>	0.03	-0.17	0.04	-0.14	-0.31	0.15	0.10	-0.03	-0.03	0.22	0.02	-0.04
<b>Pb</b>	0.08	-0.22	0.02	0.15	-0.39	-0.16	0.07	-0.08	-0.02	0.19	-0.02	0.22
<b>Zn</b>	0.16	-0.27	0.08	0.07	-0.33	-0.07	0.16	0.01	-0.03	0.07	0.04	0.17
<b>Te</b>	-0.09	-0.21	-0.11	0.19	0.21	0.02	0.23	0.12	-0.07	-0.27	-0.12	0.12
<b>Bi</b>	-0.09	-0.34	0.01	0.05	0.18	0.02	0.11	0.18	-0.04	-0.20	-0.11	-0.05
<b>Sb</b>	-0.05	-0.27	-0.06	0.25	-0.04	-0.08	-0.33	-0.18	0.18	0.01	0.08	-0.10
<b>Hg</b>	-0.05	-0.27	-0.07	0.18	-0.02	0.01	-0.40	-0.25	0.07	0.06	0.18	-0.08
<b>Co</b>	0.01	-0.03	-0.30	-0.17	-0.16	0.18	0.17	-0.10	-0.06	-0.25	0.33	-0.37
<b>Ni</b>	0.06	-0.07	-0.15	0.04	-0.21	-0.16	0.17	-0.30	-0.21	0.02	-0.40	-0.51
<b>Se</b>	-0.12	-0.22	0.08	-0.17	0.24	-0.18	0.31	-0.09	0.12	0.18	0.03	-0.08
<b>As</b>	-0.09	-0.27	-0.08	0.19	0.13	0.04	-0.31	-0.06	0.16	-0.17	0.03	-0.09
<b>Ba</b>	0.15	0.05	0.02	0.05	0.01	-0.07	-0.33	0.32	-0.10	0.25	-0.34	-0.09
<b>Be</b>	0.29	-0.04	0.04	0.02	0.11	0.18	0.08	-0.14	0.11	0.00	0.05	0.03
<b>Ce</b>	0.25	-0.05	0.34	-0.11	0.07	-0.07	-0.12	-0.04	-0.13	-0.17	0.02	-0.04
<b>Cr</b>	-0.05	-0.05	0.19	0.06	0.09	-0.15	0.10	0.35	0.05	0.17	0.61	-0.17
<b>Cs</b>	0.22	-0.08	-0.10	0.04	-0.02	0.24	-0.05	0.19	0.06	-0.07	-0.09	0.25
<b>Cu</b>	-0.11	-0.17	0.14	-0.27	0.25	-0.25	0.12	-0.08	0.19	0.28	-0.15	0.00
<b>Ga</b>	0.32	-0.05	-0.15	0.01	0.07	-0.04	0.06	0.01	0.06	0.02	0.07	-0.04
<b>In</b>	-0.03	-0.30	0.08	-0.13	-0.23	0.22	0.10	0.18	0.00	0.04	-0.04	0.07
<b>La</b>	0.23	-0.05	0.37	-0.12	0.06	-0.07	-0.14	-0.03	-0.15	-0.17	0.00	-0.04
<b>Mn</b>	0.26	-0.08	-0.03	0.09	-0.11	-0.05	0.07	0.06	-0.08	-0.14	0.06	0.26
<b>P</b>	0.30	-0.04	-0.04	0.02	0.06	0.04	0.08	-0.15	0.03	-0.08	0.10	0.04
<b>Rb</b>	0.23	-0.05	-0.24	-0.13	0.10	-0.12	-0.16	0.24	0.05	0.17	-0.13	0.02
<b>Sc</b>	0.28	-0.03	-0.27	-0.07	0.12	-0.10	0.03	0.06	0.09	0.11	0.04	-0.11
<b>Sn</b>	-0.07	-0.16	-0.17	0.13	0.33	0.05	0.11	0.03	-0.45	-0.11	-0.05	0.12
<b>Sr</b>	0.02	-0.01	0.05	0.03	0.19	0.62	0.08	-0.18	0.31	0.28	-0.12	0.04
<b>Th</b>	0.24	0.00	0.32	0.02	0.09	-0.02	-0.06	-0.04	-0.08	-0.06	0.03	-0.15
<b>Tl</b>	-0.05	-0.12	-0.29	-0.42	-0.03	-0.02	-0.20	0.17	0.00	0.01	0.03	0.01
<b>U</b>	0.02	-0.18	0.22	-0.22	-0.02	0.36	-0.11	0.18	-0.11	-0.10	-0.12	-0.32
<b>V</b>	0.29	-0.03	-0.27	-0.04	0.11	-0.10	0.05	0.04	0.07	0.07	0.06	-0.07
<b>W</b>	-0.01	-0.06	-0.06	0.08	0.16	0.18	-0.09	-0.13	-0.63	0.49	0.21	0.05
<b>Y</b>	0.28	-0.05	0.04	-0.05	0.14	0.01	0.08	-0.14	0.06	-0.01	0.05	-0.06

### Valores propios elementos traza (Continuación)

	PC13	PC14	PC15	PC16	PC17	PC18	PC19	PC20	PC21	PC22	PC23	PC24
Ag	0.10	0.16	-0.01	0.05	-0.19	0.09	0.24	-0.14	0.02	0.24	0.09	0.00
Mo	0.24	-0.41	-0.18	0.43	-0.02	0.14	-0.07	-0.05	0.12	0.10	-0.03	0.09
Re	-0.01	-0.08	-0.17	-0.36	0.07	-0.12	0.15	-0.13	-0.25	-0.06	0.21	-0.29
Cd	-0.72	-0.31	0.04	0.07	-0.04	0.29	0.05	0.04	0.06	0.09	0.11	-0.07
Pb	0.18	-0.13	0.26	-0.09	-0.38	-0.18	0.11	-0.22	0.19	-0.23	-0.04	0.03
Zn	0.06	0.07	0.00	0.04	0.24	-0.10	0.05	0.06	0.05	-0.06	-0.21	0.06
Te	-0.13	-0.28	0.20	-0.16	0.19	-0.04	-0.51	-0.43	-0.02	-0.01	0.03	0.13
Bi	0.05	0.09	-0.14	0.08	-0.05	0.15	0.34	-0.04	0.07	0.10	0.47	0.23
Sb	-0.03	-0.05	0.07	0.00	-0.13	-0.27	-0.20	0.10	-0.17	0.62	-0.03	-0.21
Hg	-0.05	-0.02	0.00	-0.03	0.15	-0.08	-0.12	0.26	-0.05	-0.46	0.34	0.36
Co	0.20	0.00	0.50	0.25	0.08	0.09	0.08	0.08	0.06	0.09	-0.01	0.08
Ni	0.22	-0.13	-0.29	-0.30	-0.02	0.22	-0.15	0.10	-0.01	0.00	-0.01	-0.05
Se	0.09	0.00	0.29	0.06	0.10	-0.05	-0.04	0.08	-0.24	-0.25	0.17	-0.50
As	-0.08	0.08	-0.05	0.05	0.14	0.40	0.17	-0.22	0.15	-0.26	-0.48	-0.30
Ba	0.16	-0.39	0.27	0.14	0.32	0.08	0.23	-0.04	-0.31	0.05	0.00	0.08
Be	0.02	-0.03	0.02	-0.13	0.03	-0.02	0.12	-0.01	-0.23	0.04	-0.09	0.10
Ce	-0.02	0.05	0.17	-0.14	0.05	0.07	-0.06	0.03	0.20	0.07	0.06	-0.04
Cr	0.21	-0.40	-0.24	-0.14	-0.08	0.18	-0.09	0.07	0.04	0.03	-0.09	0.06
Cs	0.10	0.09	0.07	0.01	-0.26	0.39	-0.35	0.38	-0.09	-0.05	0.10	-0.13
Cu	-0.09	0.21	0.10	-0.01	-0.04	0.11	-0.11	0.16	-0.10	0.01	-0.26	0.33
Ga	-0.04	0.03	-0.12	0.02	0.06	-0.09	0.04	-0.08	-0.02	-0.02	0.04	-0.02
In	0.12	0.13	-0.26	0.11	0.51	-0.18	-0.16	0.15	0.11	0.13	-0.11	0.00
La	0.00	0.05	0.19	-0.14	0.04	0.07	-0.08	0.04	0.23	0.07	0.08	-0.06
Mn	0.15	0.04	-0.07	-0.01	-0.05	0.18	0.03	0.06	-0.39	-0.07	-0.05	-0.07
P	-0.02	-0.01	-0.03	-0.09	0.04	0.03	0.12	-0.09	-0.12	0.08	-0.04	0.07
Rb	0.04	-0.01	0.05	0.07	-0.05	-0.06	-0.15	0.07	0.35	-0.02	0.08	-0.13
Sc	-0.08	0.02	-0.15	0.13	-0.01	-0.14	-0.03	-0.10	0.15	-0.04	0.06	-0.07
Sn	-0.14	-0.22	0.02	-0.08	-0.10	-0.27	0.26	0.49	0.11	-0.04	-0.26	-0.07
Sr	0.23	-0.19	0.04	-0.25	0.01	-0.02	0.10	-0.02	0.22	0.04	0.05	-0.04
Th	-0.01	-0.01	0.00	-0.06	0.07	-0.16	0.03	0.00	0.12	-0.08	0.02	-0.08
Tl	0.05	0.07	0.15	-0.41	-0.09	0.03	0.02	-0.05	0.05	0.07	-0.21	0.25
U	0.02	-0.04	-0.13	0.30	-0.40	-0.26	-0.17	-0.15	-0.21	-0.23	-0.17	0.03
V	-0.07	0.01	-0.15	0.11	0.00	-0.08	-0.01	-0.09	0.06	-0.02	0.05	-0.04
W	0.05	0.30	0.01	0.04	0.02	0.15	-0.13	-0.25	-0.05	0.10	0.04	-0.02
Y	-0.19	-0.01	-0.02	-0.02	-0.04	-0.05	0.04	-0.05	-0.23	0.01	-0.13	0.24

### Valores propios elementos traza (Continuación)

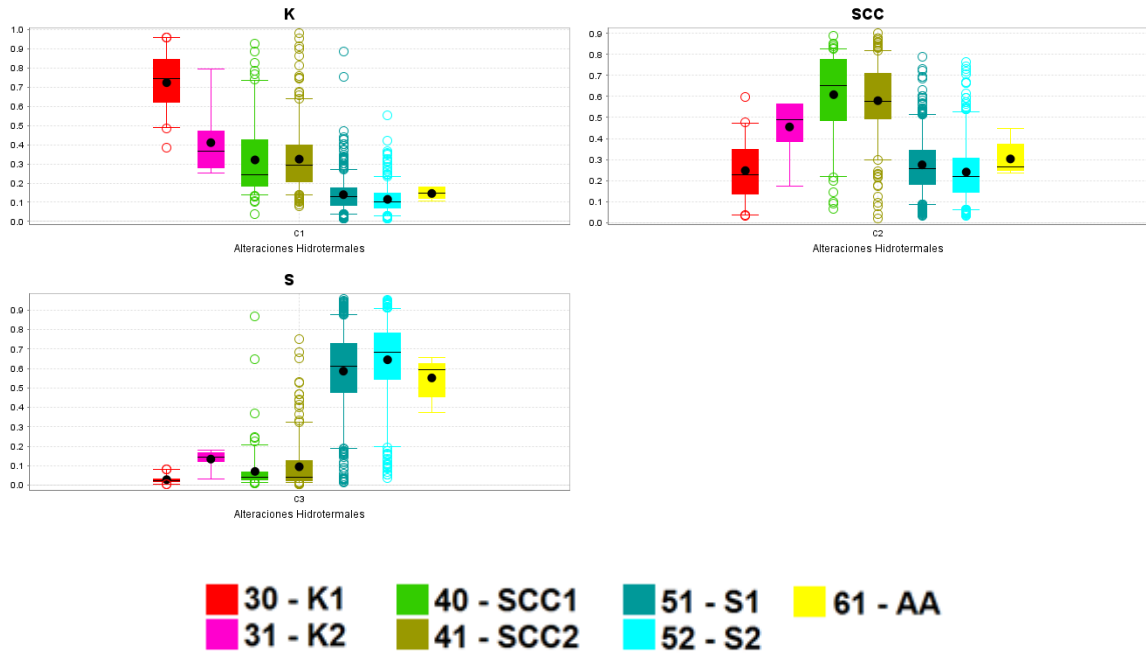
	PC25	PC26	PC27	PC28	PC29	PC30	PC31	PC32	PC33	PC34	PC35
<b>Ag</b>	0.03	-0.11	0.05	-0.23	0.25	-0.46	-0.47	-0.03	-0.02	-0.01	0.00
<b>Mo</b>	-0.02	0.13	0.05	-0.04	0.07	0.01	-0.04	0.01	0.03	0.01	0.00
<b>Re</b>	0.15	-0.35	0.17	0.24	-0.02	-0.11	0.04	-0.05	0.02	0.01	0.00
<b>Cd</b>	-0.15	0.05	0.00	-0.07	0.01	-0.03	0.04	0.02	-0.01	0.00	0.00
<b>Pb</b>	0.17	-0.15	0.12	-0.19	-0.12	0.18	0.21	0.06	0.00	-0.01	0.00
<b>Zn</b>	-0.01	0.19	-0.13	0.66	0.18	0.02	-0.20	-0.10	0.03	0.01	0.00
<b>Te</b>	-0.06	-0.07	0.06	0.04	0.04	-0.08	-0.02	-0.01	-0.01	0.00	0.00
<b>Bi</b>	0.00	0.16	0.03	0.20	-0.17	0.29	0.30	0.01	0.00	0.00	0.00
<b>Sb</b>	-0.06	0.04	0.01	0.10	-0.08	0.14	0.10	0.02	0.01	0.00	0.00
<b>Hg</b>	-0.05	-0.02	-0.08	-0.09	0.06	-0.12	-0.09	-0.01	-0.02	-0.01	0.00
<b>Co</b>	-0.03	-0.19	0.13	0.06	-0.06	-0.09	0.03	0.00	0.01	0.01	0.00
<b>Ni</b>	0.04	0.01	0.00	0.02	-0.01	-0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
<b>Se</b>	0.04	0.30	-0.13	-0.12	0.00	0.11	-0.03	-0.01	0.00	-0.01	0.00
<b>As</b>	0.06	-0.01	0.04	0.02	-0.07	0.05	0.10	0.03	0.01	0.00	0.00
<b>Ba</b>	0.07	-0.10	0.03	-0.01	0.03	0.10	-0.05	-0.01	0.01	0.01	0.00
<b>Be</b>	0.15	0.18	0.08	-0.02	0.44	-0.27	0.48	0.31	-0.24	-0.05	-0.01
<b>Ce</b>	0.05	-0.10	-0.23	-0.02	-0.01	0.06	-0.03	0.13	0.03	0.01	-0.73
<b>Cr</b>	0.06	-0.03	-0.02	0.03	-0.01	-0.02	0.02	-0.01	0.00	0.01	0.00
<b>Cs</b>	0.26	-0.04	0.24	0.04	0.16	0.18	-0.10	-0.10	0.03	0.03	0.00
<b>Cu</b>	-0.16	-0.42	0.12	0.13	-0.02	0.04	0.19	-0.05	0.03	0.02	0.01
<b>Ga</b>	-0.09	-0.05	0.01	-0.11	0.17	0.06	0.06	0.13	0.81	0.28	0.05
<b>In</b>	0.13	-0.06	0.06	-0.42	-0.14	0.06	0.12	0.06	-0.05	-0.02	0.00
<b>La</b>	0.04	-0.11	-0.24	0.00	0.00	0.06	-0.03	0.18	-0.03	-0.03	0.68
<b>Mn</b>	-0.59	-0.04	-0.10	-0.08	-0.36	-0.13	0.00	0.20	-0.11	0.01	0.00
<b>P</b>	0.02	-0.09	-0.31	-0.22	0.05	0.12	0.10	-0.77	-0.10	0.05	0.04
<b>Rb</b>	-0.01	0.14	-0.07	0.13	-0.25	-0.53	0.30	-0.20	0.03	-0.04	0.00
<b>Sc</b>	-0.03	-0.15	0.01	0.04	0.06	0.21	-0.17	0.18	-0.49	0.54	0.00
<b>Sn</b>	0.01	-0.09	-0.02	-0.04	0.03	-0.01	-0.04	0.03	0.01	0.01	0.00
<b>Sr</b>	-0.19	-0.10	-0.08	0.12	-0.16	0.03	-0.15	0.05	0.04	-0.01	0.00
<b>Th</b>	-0.33	0.17	0.72	-0.03	0.02	0.05	-0.05	-0.25	-0.05	-0.04	0.00
<b>Tl</b>	-0.17	0.45	-0.03	-0.18	0.08	0.20	-0.14	0.04	-0.01	-0.01	0.00
<b>U</b>	-0.07	0.01	-0.18	0.06	0.06	0.01	0.04	-0.05	0.02	-0.01	-0.01
<b>V</b>	-0.05	-0.18	-0.02	0.01	0.10	0.22	-0.13	0.12	-0.04	-0.78	-0.01
<b>W</b>	0.02	0.03	0.03	0.04	-0.02	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Y</b>	0.48	0.18	0.13	0.04	-0.56	-0.09	-0.27	0.08	0.05	0.00	0.03

## Anexo B

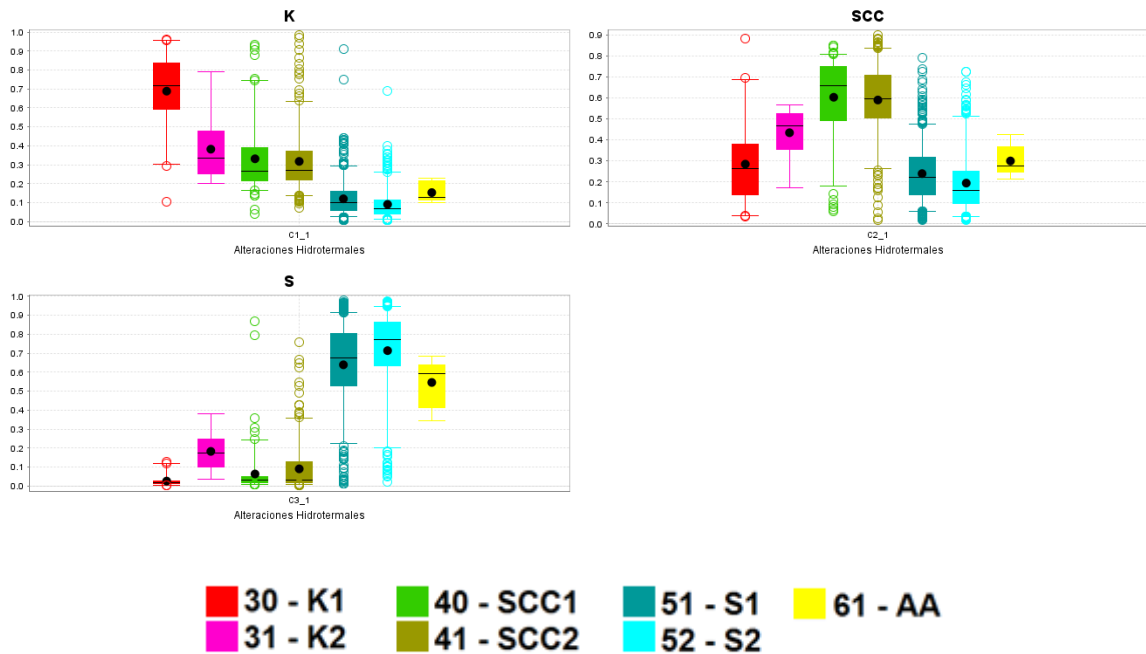
### Clasificación usando grupos de elementos con menor traslape

#### Boxplots muestras con una alteración

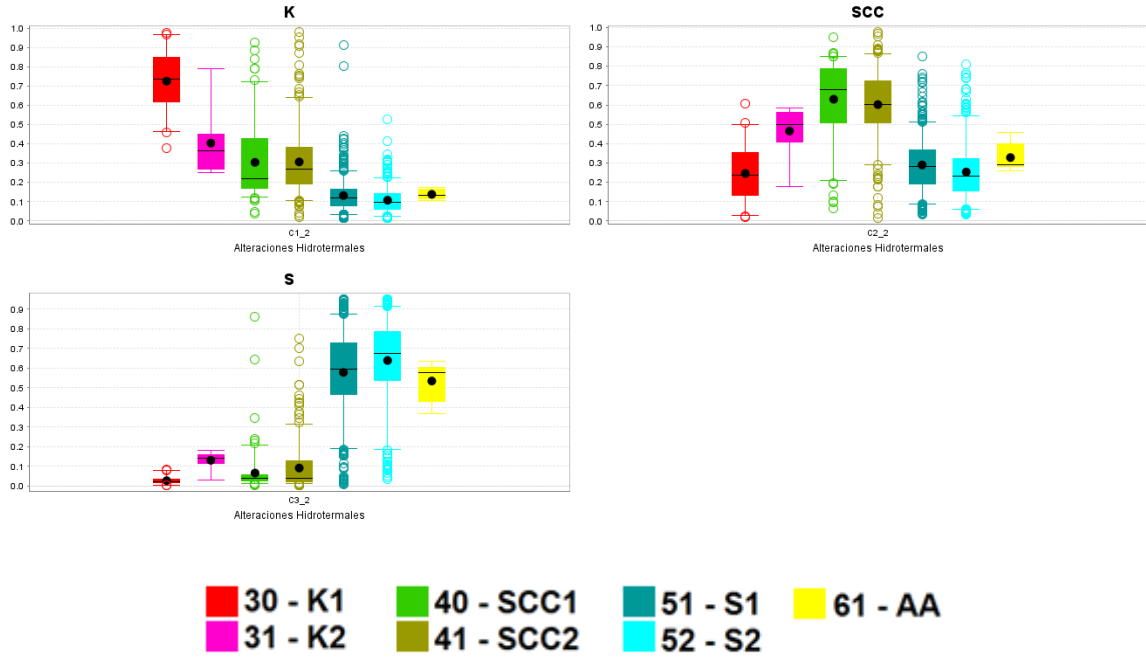
#### Al-Mg-K-Ca-Na



#### Al-Mg-K-Ca

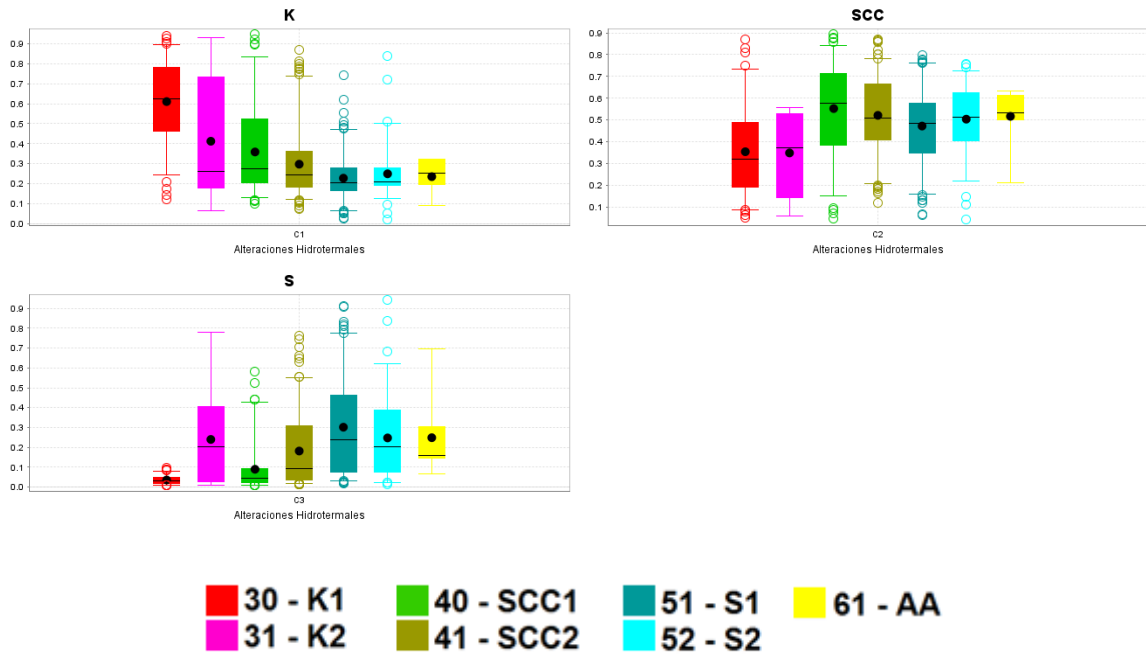


## Al-Mg-K-Na

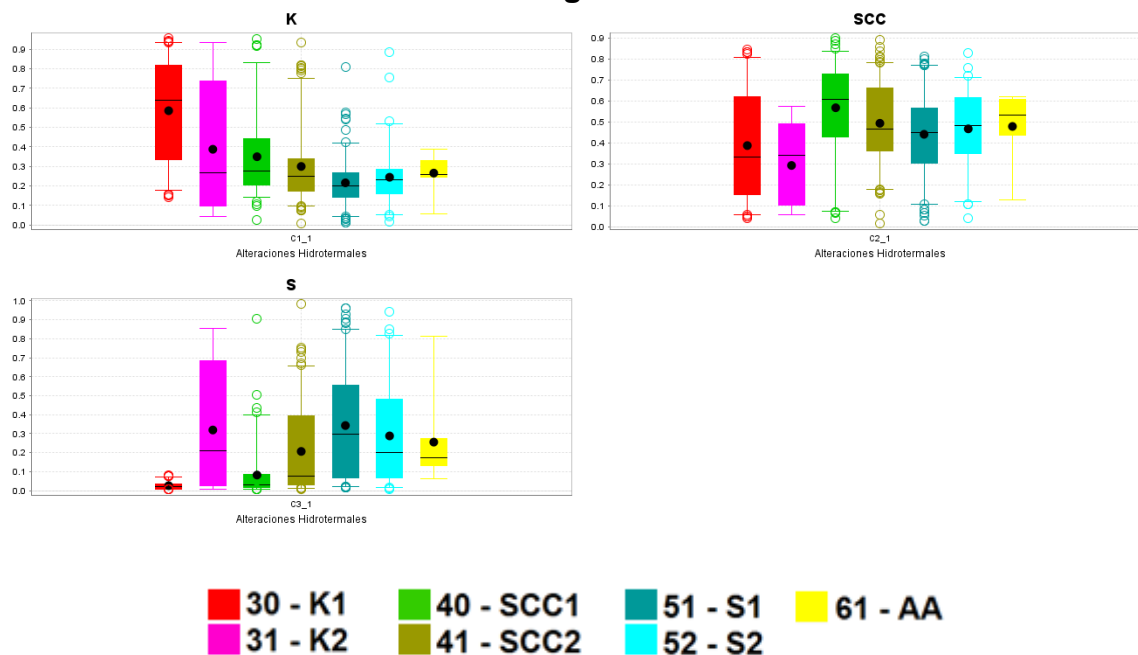


## Boxplots muestras con dos alteraciones

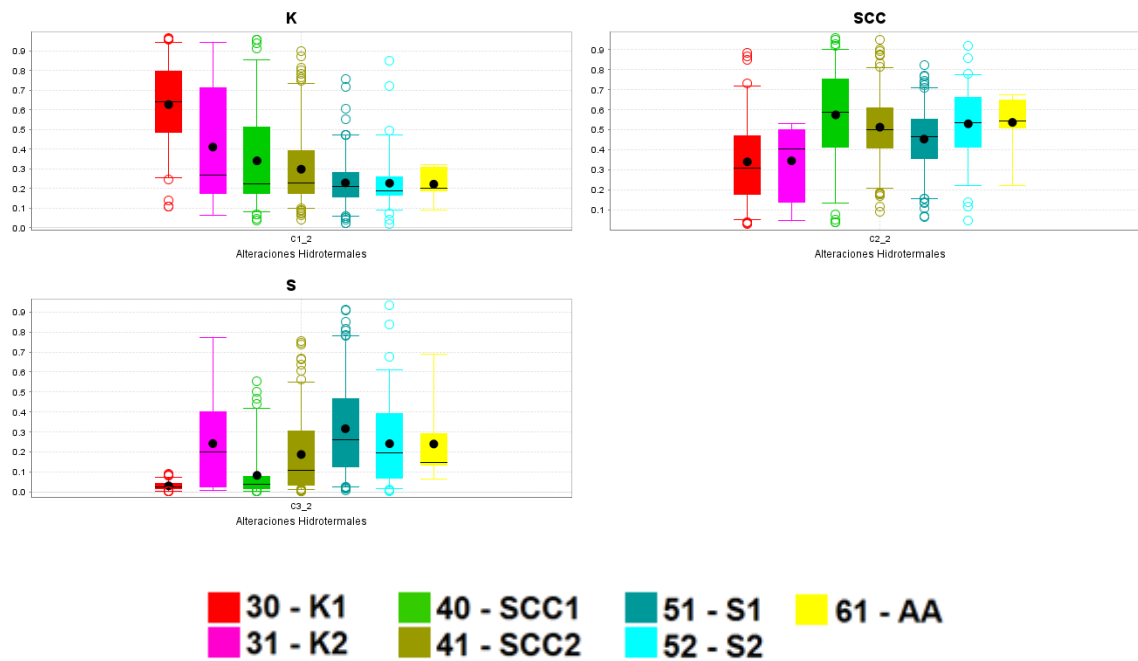
### Al-Mg-K-Ca-Na



## Al-Mg-K-Ca



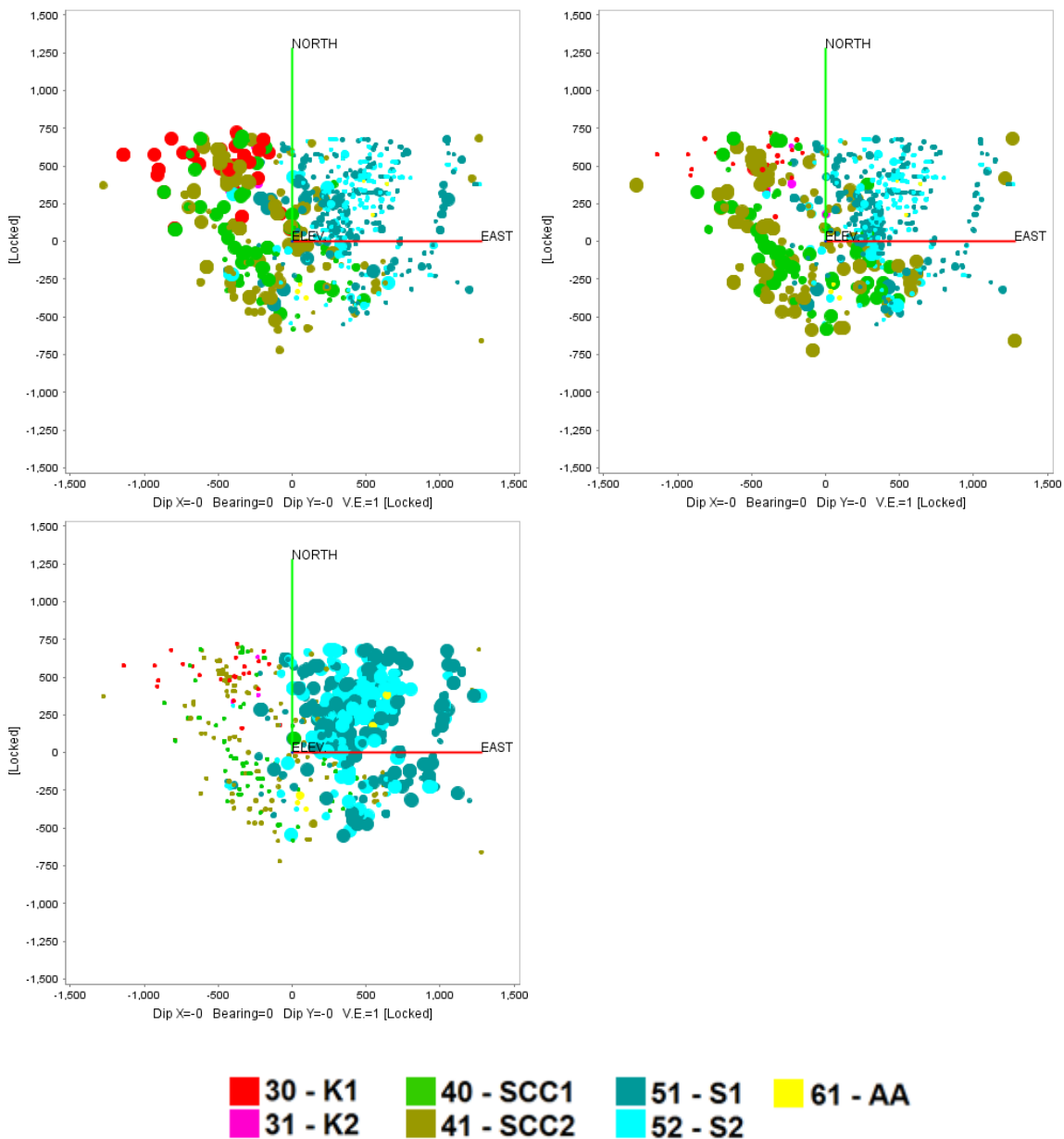
## Al-Mg-K-Na



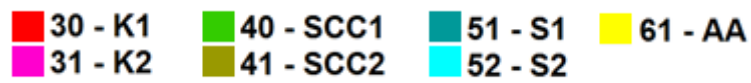
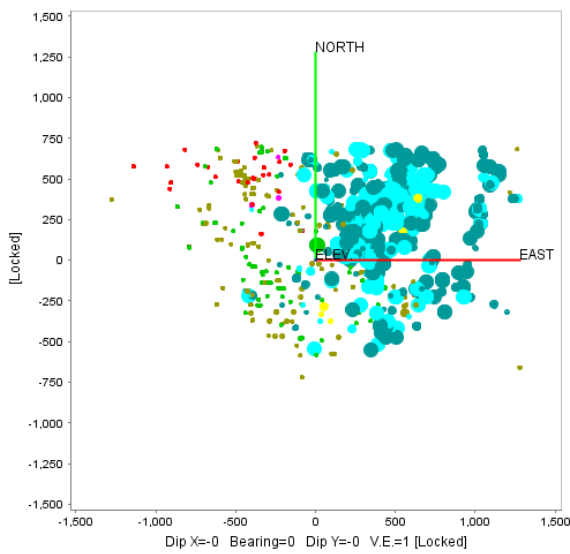
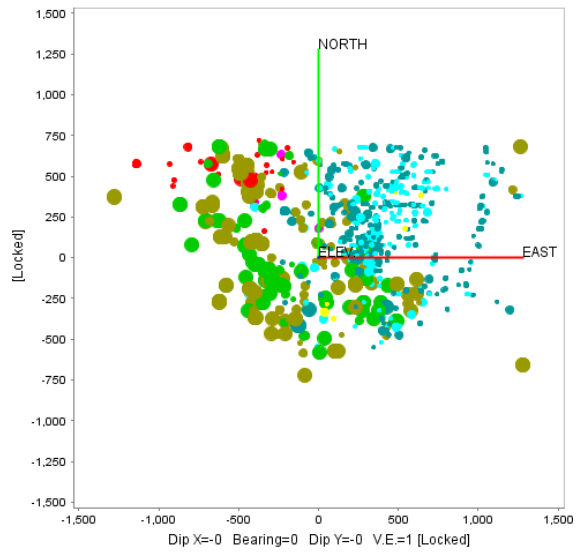
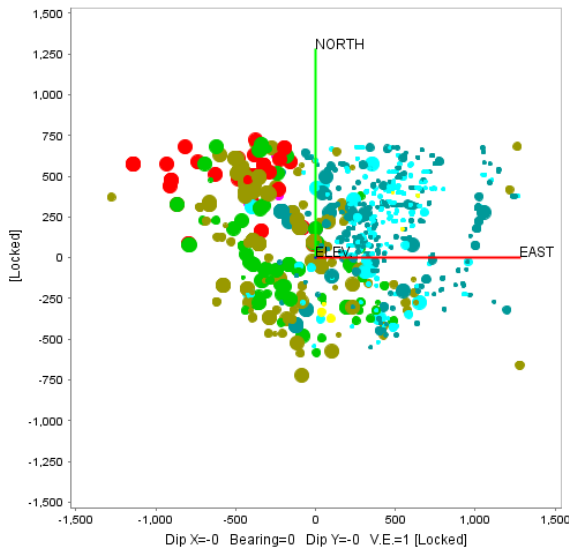


# Plantas de muestras con una alteración

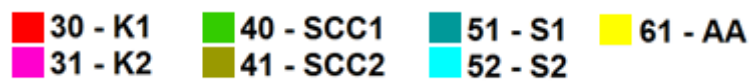
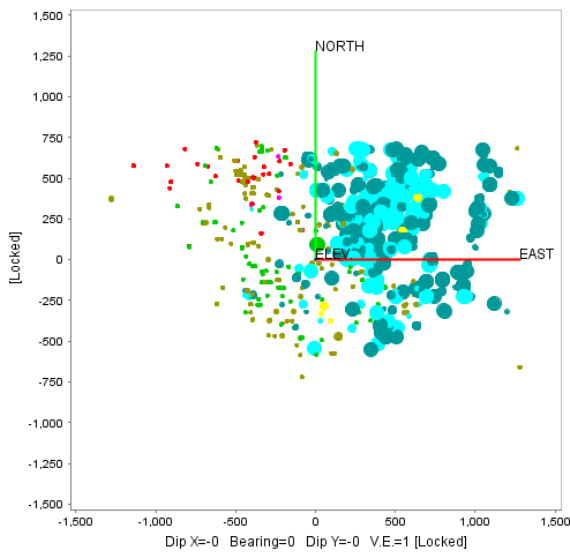
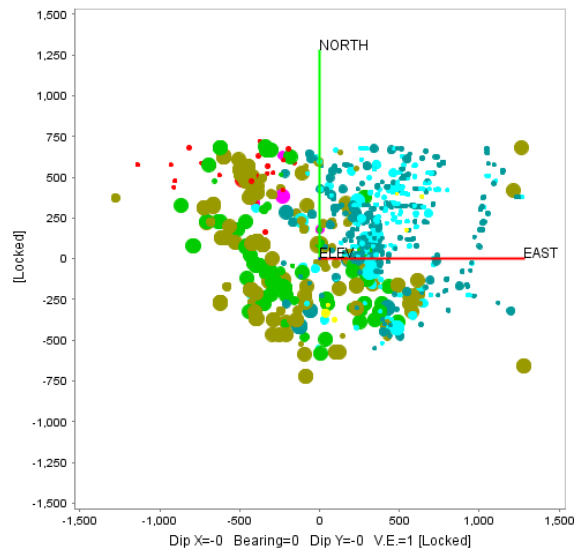
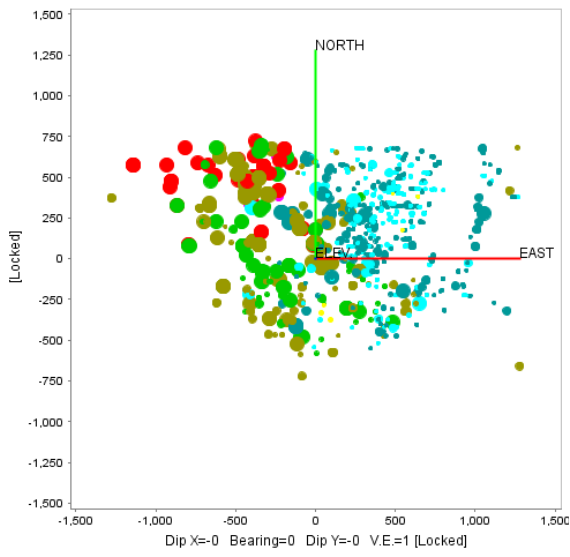
## Al-Mg-K-Ca-Na



# Al-Mg-K-Ca

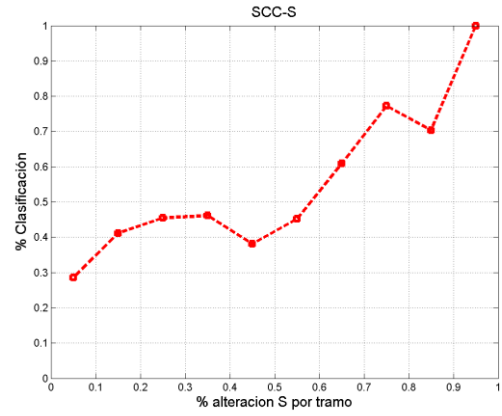
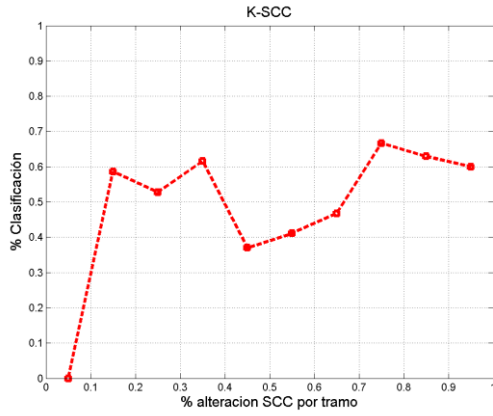


# Al-Mg-K-Na

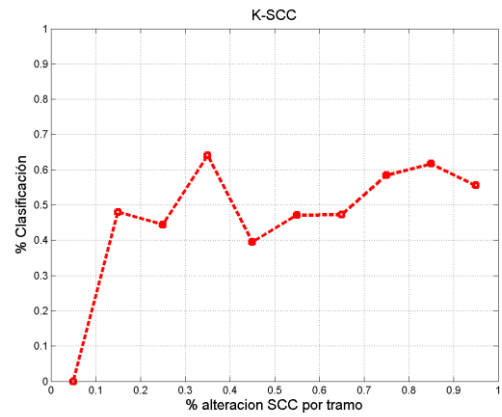
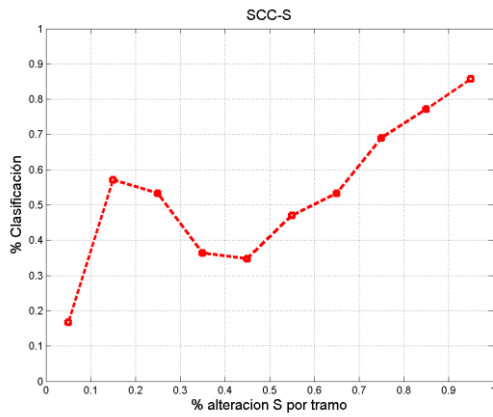


# Porcentaje de clasificación versus rangos de porcentaje de alteración por tramo

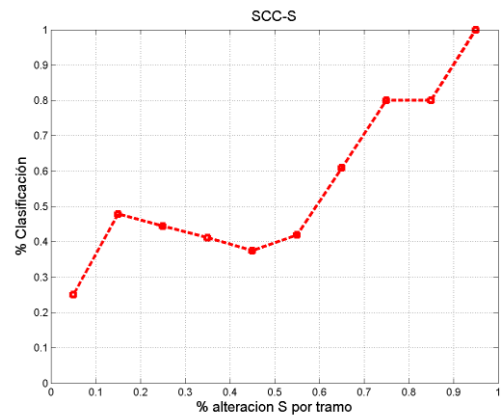
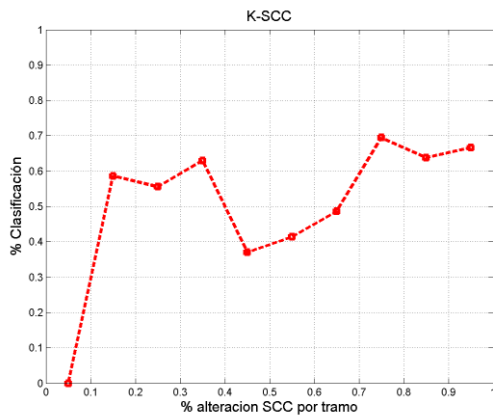
## Al-Mg-K-Ca-Na



## Al-Mg-K-Ca

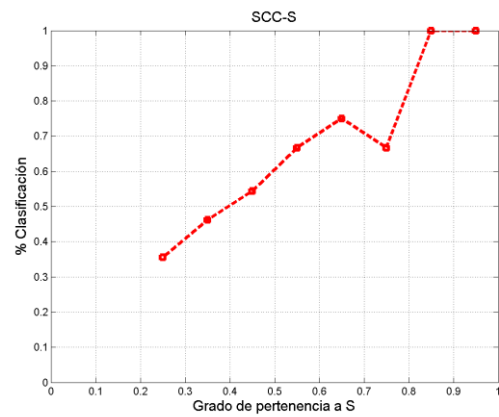
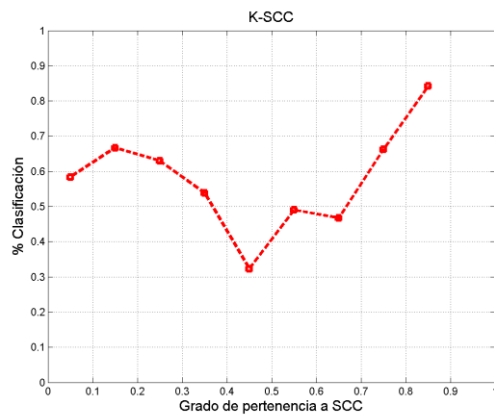


## Al-Mg-K-Na

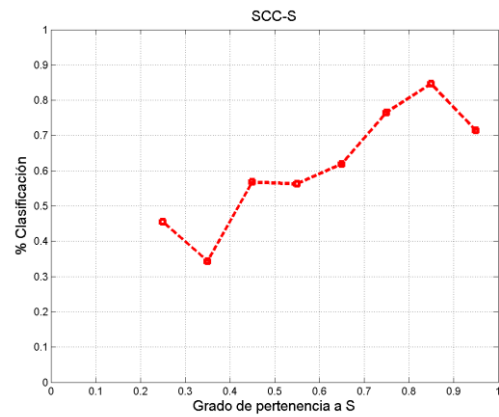
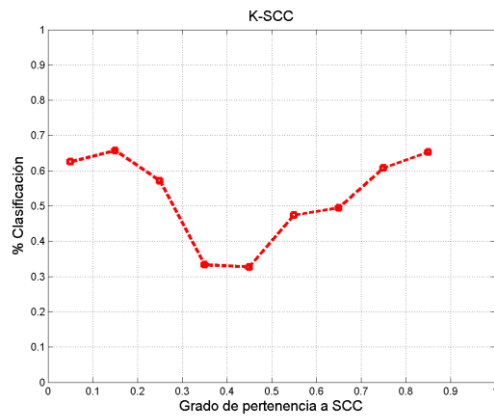


# Porcentaje de clasificación versus rangos de grados de pertenencia

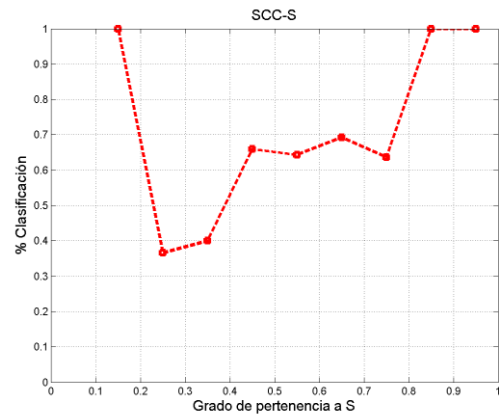
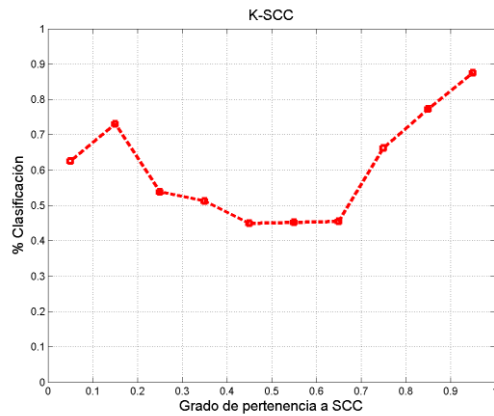
## Al-Mg-K-Ca-Na



## Al-Mg-K-Ca



## Al-Mg-K-Na



## Anexo C

### Tabla de Estadígrafos para elementos en ppm

	cantidad blancos	Media	1° cuartil	2° cuartil	3° cuartil	4° cuartil	Mínimo	Máximo	Moda	Desviación Estándar	Rango	Rango intercuartil
Au ppm	4983	0.21	0.2	0.2	0.2	4.5	0.2	4.5	0.2	0.08	4.3	0
Ag ppm	0	3.09	1.27	2.24	3.83	83.1	0.01	83.1	1	3.45	83.09	2.56
Mo ppm	0	91.68	35.3	64.6	114.26	2120	0.1	2120	107.5	109.96	2119.9	78.96
Re ppm	0	0.59	0.14	0.3	0.61	13.95	0	13.95	0.1	0.96	13.95	0.46
Cd ppm	0	4.22	0.34	1.13	3.36	601	0.01	601	0.01	13.9	600.99	3.02
Pb ppm	0	70.33	4.83	20	64.4	10000	0.2	10000	1.2	226.88	9999.8	59.58
Zn ppm	0	555.96	30	242	763.75	10000	2	10000	10	912.75	9998	733.75
Te ppm	0	0.59	0.18	0.32	0.58	52.6	0.01	52.6	0.13	1.29	52.59	0.4
Bi ppm	0	1.22	0.31	0.7	1.46	59.1	0.01	59.1	0.24	1.9	59.09	1.15
Sb ppm	0	1.79	0.13	0.25	0.77	274	0.05	274	0.05	8.44	273.95	0.64
Hg ppm	0	0.03	0.01	0.01	0.03	6.87	0.01	6.87	0.01	0.09	6.86	0.02
Co ppm	0	13.4	7.4	12.1	16.9	349	0.1	349	7.4	10.24	348.9	9.5
Ni ppm	0	21.03	4.9	8.3	18.4	502	0.2	502	4.4	40.04	501.8	13.5
Se ppm	0	3.44	2.4	3.2	4.1	19.4	0.2	19.4	2.6	1.55	19.2	1.7
Al wt%	0	0.97	0.45	0.68	1.42	4.7	0.06	4.7	0.39	0.7	4.64	0.97
As ppm	0	37.68	2.7	7.8	25.88	6640	0.1	6640	1.3	142.97	6639.9	23.18
B ppm	0	10.08	10	10	10	30	10	30	10	0.91	20	0
Ba ppm	0	40.04	30	38	50	270	0.2	270	30	21.94	269.8	20
Be ppm	0	0.27	0.09	0.21	0.4	1.57	0.05	1.57	0.05	0.21	1.52	0.31
Ca wt%	0	0.27	0.03	0.09	0.28	7.41	0.01	7.41	0.02	0.58	7.4	0.25
Ce ppm	0	17.41	10.85	16.3	23.3	46.3	0.02	46.3	21.8	8.5	46.28	12.45
Cr ppm	0	103.65	38	74	138	1560	1	1560	20	97.18	1559	100
Cs ppm	0	1.13	0.67	0.95	1.41	8.81	0.05	8.81	0.65	0.66	8.76	0.74
Cu ppm	0	5999.61	4010	5770	8140	10000	66.9	10000	10000	2624.29	9933.1	4130
Ga ppm	0	2.63	0.94	1.69	3.99	13.35	0.05	13.35	0.7	2.15	13.3	3.05
Ge ppm	0	0.06	0.05	0.05	0.07	1.16	0.05	1.16	0.05	0.03	1.11	0.02

	cantidad blancos	Media	1° cuartil	2° cuartil	3° cuartil	4° cuartil	Mínimo	Máximo	Moda	Desviación Estándar	Rango	Rango intercuartil
Hf ppm	0	0.02	0.02	0.02	0.02	0.19	0.02	0.19	0.02	0.01	0.17	0
In ppm	0	0.28	0.08	0.15	0.32	9.25	0.01	9.25	0.05	0.42	9.25	0.25
K wt%	0	0.23	0.17	0.21	0.26	1.18	0.01	1.18	0.19	0.1	1.17	0.09
La ppm	0	8.52	5.4	8	11.3	26.7	0.2	26.7	6.8	4.1	26.5	5.9
Li ppm	2058	7.27	1	4	13	39	1	39	1	7.51	38	12
Mg wt%	0	0.47	0.03	0.08	0.89	3.13	0.01	3.13	0.02	0.6	3.12	0.86
Mn ppm	0	294.7	21	55	425	6540	5	6540	15	452.22	6535	404
Na wt%	0	0.06	0.04	0.06	0.08	0.5	0.01	0.5	0.05	0.04	0.49	0.04
Nb ppm	0	0.06	0.05	0.05	0.05	0.53	0.05	0.53	0.05	0.03	0.48	0
P ppm	0	473.36	90	240	850	3060	10	3060	50	475.73	3050	760
Rb ppm	0	12.6	8.9	10.9	14.1	76.3	0.1	76.3	10.2	6.55	76.2	5.2
S wt%	0	2.22	1.23	1.85	2.7	10	0.14	10	10	1.51	9.86	1.47
Sc ppm	0	1.73	0.5	0.9	2.3	16.5	0.1	16.5	0.4	1.96	16.4	1.8
Sn ppm	0	0.72	0.3	0.5	0.8	73.8	0.2	73.8	0.4	1.29	73.6	0.5
Sr ppm	0	93.2	28	55.45	114	1240	0.2	1240	16.6	107.13	1239.8	86
Ta ppm	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.26	0.01	0.26	0.01	0	0.25	0
Th ppm	0	1.85	1	1.8	2.5	9.2	0.2	9.2	0.8	0.96	9	1.5
Ti wt%	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.32	0.01	0.32	0.01	0.02	0.31	0.01
Tl ppm	0	0.18	0.11	0.15	0.21	2.06	0.02	2.06	0.12	0.11	2.04	0.1
U ppm	0	0.43	0.27	0.36	0.5	5.56	0.05	5.56	0.3	0.29	5.51	0.23
V ppm	0	18.23	3	6	26	196	1	196	2	24.21	195	23
W ppm	0	0.96	0.25	0.44	0.74	540	0.05	540	0.25	8.57	539.95	0.49
Y ppm	0	4.94	0.6	2.43	8.8	74.2	0.05	74.2	0.5	5.54	74.15	8.2
Zr ppm	0	1	1	1	1	4	1	4	1	0.08	3	0
CuT wt%	0	0.71	0.4	0.58	0.82	6.48	0.01	6.48	0.4	0.55	6.47	0.42
CuS wt%	123	0.04	0.01	0.02	0.04	0.71	0.01	0.71	0.01	0.04	0.7	0.03
Fe wt%	0	2.53	1.63	2.27	3.13	16.55	0.1	16.55	1.71	1.34	16.45	1.5
As ppm	1	43.46	20	20.75	33.5	2938.71	-99	2938.71	20	103.81	3037.71	13.5

**Tabla de Estadígrafos para mineralogía QemScan**

Mineral	cantidad blancos	Media	1° cuartil	2° cuartil	3° cuartil	4° cuartil	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Rango	Rango intercuartil
Chalcocite	0	0.29	0.07	0.15	0.32	1.59	0.01	1.59	0.35	1.58	0.25
Covellite	0	0.12	0.07	0.10	0.14	0.42	0.00	0.42	0.09	0.42	0.07
Chalcopyrite	0	1.12	0.57	1.07	1.62	4.08	0.01	4.08	0.77	4.07	1.05
Bornite	0	0.06	0.00	0.01	0.06	0.77	0.00	0.77	0.13	0.77	0.05
Enargite/Tennantite	16	0.03	0.00	0.00	0.01	0.46	0.00	0.46	0.08	0.46	0.01
Native Copper	76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cuprite	70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Malachite/Azurite	31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Brochantite	1	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.03	0.01	0.03	0.00
Atacamite	11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Turquoise	72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Psuedomalachite	15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cu-Mn Wad	54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Chrysocolla	0	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00
Cu-bearing Clays	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Cu-bearing Fe Ox/OH	53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Other Cu Mins	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Pyrite	0	2.39	0.53	1.66	3.34	15.58	0.01	15.58	2.62	15.57	2.82
Galena	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.11	0.01	0.11	0.00
Sphalerite	7	0.06	0.00	0.03	0.08	0.52	0.00	0.52	0.08	0.52	0.07
Molybdenite	0	0.02	0.01	0.01	0.03	0.09	0.00	0.09	0.02	0.09	0.02
Fe Oxides	0	0.32	0.05	0.08	0.27	1.75	0.02	1.75	0.49	1.73	0.22
Ilmenite	1	0.04	0.00	0.01	0.04	0.64	0.00	0.64	0.08	0.64	0.04
Rutile	0	0.41	0.35	0.40	0.45	0.73	0.25	0.73	0.10	0.48	0.10
Corundum	0	0.04	0.00	0.01	0.02	1.24	0.00	1.24	0.14	1.24	0.02
Quartz	0	35.60	26.81	37.22	43.23	50.15	17.32	50.15	9.40	32.83	16.42
Orthoclase	0	5.33	3.17	4.54	6.35	13.52	1.86	13.52	2.81	11.66	3.18



Mineral	cantidad blancos	Media	1° cuartil	2° cuartil	3° cuartil	4° cuartil	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Rango	Rango intercuartil
Albite	0	10.75	0.14	5.75	21.22	36.59	0.04	36.59	11.72	36.55	21.09
Plagioclase	0	2.52	0.04	0.09	1.81	20.15	0.01	20.15	4.80	20.14	1.77
Muscovite/Sericite	0	27.70	17.71	30.80	36.42	45.68	3.25	45.68	11.08	42.44	18.71
Kaolinite	0	2.62	1.17	1.85	3.01	9.83	0.57	9.83	2.22	9.26	1.84
Pyrophyllite/Smectite	0	3.79	1.68	3.38	4.50	18.35	0.62	18.35	3.07	17.74	2.82
Biotite	0	2.22	0.08	0.24	3.87	12.11	0.01	12.11	3.01	12.10	3.78
Chlorite	0	3.16	0.03	0.18	7.38	11.05	0.01	11.05	3.84	11.04	7.34
Hornblende	0	0.03	0.00	0.01	0.02	0.22	0.00	0.22	0.05	0.22	0.02
Epidote	76	0.05	0.00	0.00	0.00	3.65	0.00	3.65	0.42	3.65	0.00
Calcite/CO3	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.03	0.01	0.03	0.01
Gypsum	0	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05	0.00	0.05	0.01	0.05	0.01
Alunite	0	0.51	0.05	0.08	0.49	5.77	0.02	5.77	1.15	5.75	0.43
Jarosite	0	0.01	0.00	0.00	0.01	0.06	0.00	0.06	0.01	0.06	0.00
Mg-SO4	38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Barite	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00
Svanbergite	0	0.38	0.03	0.21	0.54	1.74	0.00	1.74	0.45	1.74	0.52
Fe-Al PO4	1	0.01	0.00	0.00	0.01	0.25	0.00	0.25	0.03	0.25	0.00
Apatite	0	0.21	0.00	0.01	0.52	0.84	0.00	0.84	0.29	0.84	0.52
Monazite	0	0.05	0.04	0.05	0.05	0.08	0.02	0.08	0.01	0.06	0.02
Zircon	1	0.01	0.00	0.00	0.02	0.16	0.00	0.16	0.02	0.16	0.02
Sphene	34	0.02	0.00	0.00	0.01	0.45	0.00	0.45	0.07	0.45	0.01
Others	0	0.08	0.05	0.06	0.08	0.24	0.02	0.24	0.05	0.22	0.03