



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

# **DESARROLLO DE UN INDICADOR DE MINERALIZACIÓN DE MOLIBDENO BASADO EN CARACTERIZACIÓN HIPERESPECTRAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS  
**MATÍAS NICOLÁS PAINEPÁN JORQUERA**

PROFESOR GUÍA  
**LEANDRO VOISIN ARAVENA**

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
**VÍCTOR MONTENEGRO GONZÁLEZ**  
**PAULA MARTÍNEZ RAMÍREZ**

SANTIAGO DE CHILE  
2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas  
**POR:** Matías Nicolás Painepán Jorquera  
**FECHA:** 16/05/2017  
**PROFESOR GUÍA:** Leandro Voisin Aravena

## **DESARROLLO DE UN INDICADOR DE MINERALIZACIÓN DE MOLIBDENO BASADO EN CARACTERIZACIÓN HIPERESPECTRAL**

El molibdeno comúnmente se encuentra asociado con cobre en depósitos porfíricos, sin embargo, en ocasiones su continuidad espacial es baja, por ende, su estimación es compleja en los modelos de recursos tradicionales.

Recientemente, ha aumentado el uso y relevancia del análisis hiperespectral, no tan solo en exploración, sino que también en el área de la geometalurgia, específicamente reconociendo el comportamiento de minerales de ganga en procesos aguas abajo y permitiendo la determinación de minerales valiosos a partir de la caracterización de minerales de ganga, utilizando para esto indicadores. En comparación con otros métodos de caracterización, la información hiperespectral presenta ventajas tales como: una alta velocidad de escaneo, gran objetividad en relación al registro geológico tradicional, carácter no destructivo y bajos a nulos requerimientos de preparación de muestras.

El presente trabajo corresponde a un caso de estudio de un depósito tipo pórfido granodiorítico con una marcada mineralización de molibdeno, localizado en el norte de Chile (Proyecto Esperanza Sur, Antofagasta Minerals S.A.). En el estudio, se cuenta con información hiperespectral de diferentes zonas del depósito utilizando la tecnología del Hylogger-3, junto con información de análisis químico y análisis mineralógico tipo QEMSCAN, para generar un indicador que permite entregar probabilidades espaciales de mineralización de molibdeno asociado a los minerales de ganga identificados.

La metodología, primeramente, evalúa la información mineralógica en términos de continuidad y correlación espacial con los datos químicos disponibles de molibdeno, a continuación, la información se discretiza y categoriza, definiendo umbrales de leyes de molibdeno para definir lo que se considera mineral o estéril, tercero, se asignan probabilidades utilizando el Teorema de Bayes, considerando las características de los minerales seleccionados y finalmente, se realiza una validación cruzada del modelo.

Los resultados obtenidos agregan información a un 15.5% del total de muestras analizadas, en las que no se registra mineralización de molibdeno según la ley de corte establecida, pero que dadas las condiciones de los minerales estudiados, existe una alta probabilidad de que esta ocurra, conclusión obtenida a partir de la información misma del depósito, factor que podría atribuirse al efecto pepita.

El indicador generado busca identificar y predecir la existencia y tendencia de la mineralización de molibdeno en el depósito, reduciendo la incertidumbre e incrementando el valor agregado del negocio minero.

# **DEVELOPMENT OF A PROXY TO IDENTIFY MOLYBDENUM MINERALIZATION BASED ON HYPERSPECTRAL CHARACTERIZATION**

Molybdenum is commonly associated with copper in porphyry deposits, however, sometimes its presence is less continuous spatially, thus it is more difficult to estimate it in resource models.

Recently, hyperspectral analysis has gained increased relevance and utilization not only in exploration but also in geometallurgy, especially for clarifying the behavior of gangue minerals in downstream processes and allowing identification of valuable minerals from the characterization of gangue minerals by using proxies. In comparison to other characterization methods, hyperspectral has advantages such as: faster scanning rate, greater objectivity relative to traditional logging, being a non-destructive technique and almost no sample preparation requirements.

The present work involves a case study of a granodioritic copper porphyry deposit with a remarkable molybdenite mineralization, located in north Chile (Esperanza Sur project, Antofagasta Minerals S.A). In the study, hyperspectral data from different zones of the deposit obtained with Hylogger-3 technology, together with chemical and QEMSCAN mineralogical analyses, were used to generate a proxy which allows spatial estimation of probability of occurrence of molybdenum, associated with gangue minerals.

The methodology was divided into the following stages: first, mineralogical information was evaluated in terms of continuity and correlation with chemical data related to molybdenum, second, data was categorized and discretized, defining thresholds for mineral grade to establish valuable mineral or waste, third, probabilities using The Bayes theorem were assigned considering selected minerals characteristics and finally, a cross validation of the model was performed.

The results add information to 15.5% of the samples, in which no molybdenum mineralization is recorded under the established cut-off grade, but given the conditions of the minerals studied there, is a high probability of its occurrence, conclusion obtained from the deposit data itself, a factor that could be attributed to the nugget effect.

The generated proxy tries to identify and predict existence and tendency of molybdenum into the deposit, reducing uncertainty and increasing the added value of the mining business.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer a todos los que me apoyaron en la realización de este trabajo y en acompañarme esta etapa única.

A los miembros de la comisión, los profesores Leandro Voisin, Víctor Montenegro y Paula Martínez, por ser verdaderos guías en este proceso, por creer en este proyecto, por su dedicación para entregar correcciones y disposición por realizar este trabajo, sin su ayuda nada de esto hubiese existido.

A todo el equipo del Proyecto de Caracterización Mineralógica y Metalúrgica Avanzada de AMTC-CSIRO, por estar siempre dispuestos a resolver dudas, al mismo tiempo que enseñaban desde su experiencia.

A AMSA por facilitar la información necesaria para realizar el estudio.

A mis amigos del colegio, de la universidad, de minería y de la vida.

A mi hermana, tíos, primos y abuelos por siempre creer en mí.

A mis padres, todo se lo debo a ustedes.

A Paula.

## TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Presentación del tema.....	1
1.2	Problemática .....	2
1.3	Alcances.....	4
1.4	Objetivo .....	5
1.4.1	Objetivo general.....	5
1.4.2	Objetivos específicos.....	5
CAPÍTULO 2	ANTECEDENTES .....	6
2.1	Descripción de la faena.....	6
2.1.1	Minera Centinela.....	6
2.1.2	Ubicación geográfica .....	6
2.1.3	Sistema de explotación y ritmo de producción anual.....	7
2.1.4	Métodos de procesamiento de minerales .....	7
2.2	Proyecto Esperanza Sur .....	9
2.2.2	Yacimiento .....	9
2.3	Caracterización de muestras del yacimiento.....	15
2.3.1	Análisis hiperespectral.....	15
2.3.2	Análisis mediante QEMSCAN.....	22
2.3.3	Análisis elemental.....	23
2.4	Indicador .....	25
2.4.1	Construcción del indicador .....	26
CAPÍTULO 3	METODOLOGÍA .....	29
3.1	Estudio exploratorio de datos.....	31
3.1.1	Identificación de las muestras.....	31
3.1.2	Análisis mineralógico .....	32
3.1.3	Análisis elemental.....	36
3.1.4	Estadísticas básicas .....	37
3.2	Estudio de continuidad y correlación.....	39
3.2.1	Estudio de continuidad espacial .....	39
3.2.2	Estudio de correlación entre variables.....	41
3.3	Procesamiento de la información .....	47
3.3.1	Enmascarado.....	47

3.3.2	Mineralogía hiperespectral .....	49
3.3.3	Análisis de firma espectral y creación de escalares .....	55
3.3.4	Comparación del conjunto de escalares vía mineralogía QEMSCAN .....	63
3.4	Agrupamiento de la información.....	65
3.5	Aplicación del Teorema de Bayes.....	67
3.5.1	Programa.....	67
3.6	Influencias de minerales en el indicador .....	69
3.6.1	Metodología de cálculo de influencias por mineral .....	69
3.7	Validación.....	70
3.7.1	Validación cruzada .....	70
3.8	Técnica de agrupación de las probabilidades puntuales.....	71
3.8.1	Alternativas de agrupación .....	72
3.8.2	Suma de errores acumulados.....	72
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS .....		73
4.1	Agrupación de la información.....	73
4.1.1	Ley de molibdeno .....	73
4.1.2	Alteraciones.....	74
4.1.3	Escalares.....	75
4.2	Aplicación del Teorema de Bayes.....	79
4.2.1	Archivo de conteo de muestras dadas las condiciones .....	79
4.2.2	Archivo de conteo de muestras sobre la ley de corte .....	80
4.2.3	Archivo de cálculo de probabilidades .....	80
4.2.4	Asignación de probabilidades.....	81
4.2.5	Comentarios .....	81
4.3	Reclasificación de muestras.....	82
4.3.1	Determinación de probabilidades de mineralización.....	82
4.3.2	Aplicación .....	82
4.3.3	Resultados por alteración.....	84
4.3.4	Análisis .....	88
4.3.5	Comentarios .....	90
4.4	Influencia de minerales en el indicador .....	91
4.4.1	Análisis .....	91
4.4.2	Comentarios .....	92

4.5	Validación.....	92
4.5.1	Aplicación de la técnica .....	92
4.5.2	Resultados obtenidos .....	93
4.5.3	Comentarios .....	94
4.6	Técnica de agrupación de las probabilidades puntuales.....	95
4.6.1	Resultados.....	95
CAPÍTULO 5	CONCLUSIÓN .....	98
CAPÍTULO 6	BIBLIOGRAFÍA .....	100
CAPÍTULO 7	ANEXOS .....	103
Anexo A:	Firmas espectrales por mineral.....	103
Anexo B:	Polinomios para características de la firma espectral por mineral .....	110
Anexo C:	Comparación reflectancia escalar con análisis QEMSCAN.....	134
Anexo D:	Escalar representativo con análisis QEMSCAN .....	158
Anexo E:	Escalar representativo con ley de Molibdeno .....	168
Anexo F:	Curvas de densidad sobre la ley de corte de Molibdeno.....	174
Anexo G:	Programa.....	184

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Muestras según largo de compósito.....	31
Tabla 3.2	Información por muestra.....	31
Tabla 3.3	Resultados análisis QEMSCAN KBT.....	33
Tabla 3.4	Resultados análisis QEMSCAN SC.....	34
Tabla 3.5	Resultados análisis QEMSCAN .....	35
Tabla 3.6	Resultados análisis ICP-OES para KBT .....	36
Tabla 3.7	Resultados análisis ICP-OES para SC.....	37
Tabla 3.8	Resultados análisis ICP-OES .....	37
Tabla 3.9	Estadísticas básicas de la ley de molibdeno en las muestras .....	38
Tabla 3.10	Separación entre muestras .....	40
Tabla 3.11	Minerales que explican la variación por componentes en la alteración KBT .....	44
Tabla 3.12	Minerales que explican la variación por componentes en la alteración SC .....	46
Tabla 3.13	Minerales identificados en las muestras en el rango TIR .....	52
Tabla 3.14	Minerales identificados en las muestras en el rango SWIR.....	53
Tabla 3.15	Minerales considerados para el estudio .....	57
Tabla 3.16	Resumen de escalares representativos por mineral.....	62
Tabla 3.17	Valorización sobre las condiciones de pertenencia a las zonas de alta ley..	69
Tabla 4.1	Extracto de resultados de la cuenta de muestras.....	80
Tabla 4.2	Extracto de resultados de la cuenta de muestras sobre la ley de corte .....	80
Tabla 4.3	Extracto de resultados del cálculo de probabilidad .....	81

Tabla 4.4 Extracto de resultados asignación de probabilidades a las muestras .....	81
Tabla 4.5 Análisis por cuadrante en resultados de alteración KBT .....	86
Tabla 4.6 Análisis por cuadrante en resultados de alteración SC .....	87
Tabla 4.7 Análisis por cuadrante de los resultados comparando las dos metodologías	90
Tabla 4.8 Influencia de minerales en el indicador según alteración .....	91
Tabla 4.9 RMSE de las diez iteraciones.....	93
Tabla 4.10 RMSE acumulado de las diez iteraciones .....	94

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 2.1 Ubicación Minera Centinela (Minera Centinela, 2014) .....	7
Figura 2.2 Procesos productivos Minera Centinela (Minera Centinela, 2014).....	8
Figura 2.3 Geología de superficie de la zona aledaña al yacimiento Telégrafo (Münchmeyer & Valenzuela, 2009) .....	10
Figura 2.4 Sección 7.456.620 N del Yacimiento Telégrafo indicando litología y sentido de desplazamiento de la falla Telégrafo. TDS: techo de sulfuro (Münchmeyer & Valenzuela, 2009) .....	11
Figura 2.5 Sección 7.456.170 N, indicando litología, techo de sulfuros (TDS) y pit final del proyecto (Geología del yacimiento esperanza, 2012). .....	11
Figura 2.6 Alteración, sección 7.456.170 N (Geología del yacimiento esperanza, 2012) .....	12
Figura 2.7 Zona de óxidos (verde) y mixto (mostaza) (Geología del yacimiento esperanza, 2012). .....	13
Figura 2.8 Zona de sulfuros (morado) (Geología del yacimiento esperanza, 2012). .....	13
Figura 2.9 Bloques de leyes de molibdeno mayores a 80 [ppm] (Geología del yacimiento esperanza, 2012). .....	14
Figura 2.10 Bloques de leyes de molibdeno mayores a 200 [ppm] (Geología del yacimiento esperanza, 2012). .....	14
Figura 2.11 Leyenda: leyes de molibdeno [ppm] (Geología del yacimiento esperanza, 2012). .....	14
Figura 2.12 Sección del modelo de bloques de leyes de molibdeno mayores a 200 [ppm] (Geología del yacimiento esperanza, 2012). .....	14
Figura 2.13 Distribución de bloques $CuT \geq 0.2\%$ en sulfuros (Geología del yacimiento esperanza, 2012). .....	14
Figura 2.14 Distribución de bloques $CuT \geq 0.5\%$ en sulfuros (Geología del yacimiento esperanza, 2012). .....	14
Figura 2.15 Leyenda: leyes de CuT (Geología del yacimiento esperanza, 2012). .....	14
Figura 2.16 Esquema del fenómeno de espectroscopía de reflectancia (Laukamp 2012). .....	16
Figura 2.17 Ejemplo de minerales resultantes de la espectroscopía de reflectancia (Hylogger-3) (Laukamp 2012). .....	16
Figura 2.18 Sistema Hylogger-3 (CSIRO CHILE-AMTC, Proyecto 4.2 Caracterización Mineralógica Avanzada, 2016) .....	18

Figura 2.19 Tecnologías espectrales en el mercado (CSIRO CHILE-AMTC, Proyecto 4.2 Caracterización Mineralógica Avanzada, 2016) .....	19
Figura 2.20 Rango de detección de grupos de minerales en silicatos (Harris, 2014).....	20
Figura 2.21 Rango de detección de grupos de minerales para no silicatos (Harris, 2014). .....	20
Figura 2.22 Visualización de imagen digital junto a espectro de una muestra (Huntington, 2013).....	21
Figura 2.23 Interfaz general TSG, resumen estadísticas totales (Huntington, 2013). ....	22
Figura 2.24 Diagrama de funcionamiento del QEMSCAN (Ayling et al., 2012) .....	23
Figura 2.25 Diagrama ICP-OES .....	24
Figura 2.26 Ejemplo de la relación entre la información hiperespectral y el mineral de oro en Kanowna Belle (Quigley, et al., 2013). ....	26
Figura 2.27 Ejemplo de datos geoquímicos en un indicador de oro (Hill et al., 2014). ...	28
Figura 3.1 Esquema de la metodología de trabajo .....	29
Figura 3.2 Sección de 200 [m] de grosor del perfil 7.456.170 N de modelo de alteraciones .....	32
Figura 3.3 Resultados análisis QEMSCAN KBT .....	33
Figura 3.4 Resultados análisis QEMSCAN SC .....	34
Figura 3.5 Resultados análisis QEMSCAN .....	35
Figura 3.6 Histograma de leyes de molibdeno por alteración .....	38
Figura 3.7 Semivariograma de molibdeno, caso Chuquicamata (Carrasco, 2010) .....	40
Figura 3.8 Semivariograma de molibdeno en yacimiento Esperanza Sur, según alteraciones (García, 2015).....	41
Figura 3.9 Diez primeras componentes del ACP para la alteración KBT .....	43
Figura 3.10 Diez primeras componentes del ACP para la alteración SC .....	45
Figura 3.11 Proceso de enmascarado .....	48
Figura 3.12 Comparación firma espectral de una muestra cualquiera, en relación a una zona fuera de mineral.....	48
Figura 3.13 Ejemplo de aplicación de TSA, referencia de muscovita.....	49
Figura 3.14 Grupos minerales detectados por el TSA. a) Grupos minerales en el rango SWIR. b) Grupos minerales en el rango TIR.....	50
Figura 3.15 Grupos minerales detectados por el TSA en la alteración KBT. a) Grupos minerales en el rango SWIR. b) Grupos minerales en el rango TIR.....	51
Figura 3.16 Grupos minerales detectados por el TSA en la alteración SC. a) Grupos minerales en el rango SWIR. b) Grupos minerales en el rango TIR.....	52
Figura 3.17 Minerales identificados en el rango SWIR.....	53
Figura 3.18 Minerales identificados en el rango TIR .....	53
Figura 3.19 Minerales identificados en el rango SWIR, alteración KBT .....	54
Figura 3.20 Minerales identificados en el rango SWIR, alteración SC .....	54
Figura 3.21 Minerales identificados en el rango TIR, alteración KBT .....	55
Figura 3.22 Minerales identificados en el rango TIR, alteración SC .....	55
Figura 3.23 Información generada por bandeja, ejemplo muestra 187 .....	56
Figura 3.24 Firma espectral referencial del yeso.....	57

Figura 3.25 Ejemplo de ajuste polinomial de sexto grado para la característica 2212D del yeso en rango SWIR .....	59
Figura 3.26 Comparación concentración QEMSCAN de yeso en relación al escalár 2212D.....	60
Figura 3.27 Comparación concentración QEMSCAN de yeso en relación al escalár 1940D.....	61
Figura 3.28 Comparación escalares y composición de cuarzo según QEMSCAN.....	63
Figura 3.29 Comparación escalares y composición de cuarzo según QEMSCAN en alteración KBT.....	64
Figura 3.30 Comparación escalares y composición de cuarzo según QEMSCAN en alteración SC.....	64
Figura 3.31 Representación gráfica general de discretizar la información en dos categorías con dos grupos cada una .....	65
Figura 3.32 Representación gráfica llevada al caso de estudio de separar la información en dos categorías con dos grupos cada una.....	65
Figura 3.33 Representación gráfica de la generalización de discretizar la información en tres categorías con dos grupos cada una .....	66
Figura 3.34 Representación gráfica de discretizar la información en tres categorías con dos grupos cada una, llevado al caso de estudio.....	66
Figura 4.1 KDE de leyes de molibdeno muestreadas, con la intersección de una recta roja y azul se muestra el punto de cambio de pendiente y l determinación de la ley de corte. ....	74
Figura 4.2 Nube de puntos del escalár de longitud de onda 8263W y reflectancia del escalár 8623D para el cuarzo en la alteración KBT .....	76
Figura 4.3 Nube de puntos del escalár de longitud de onda 8263W y reflectancia del escalár 8623D para el cuarzo en la alteración KBT, junto a la ley de molibdeno en escala de color .....	77
Figura 4.4 Curvas de nivel del KDE para cuarzo en alteración KBT .....	78
Figura 4.5 Gráfico de KDE superpuesto a la nube de puntos para escalares de cuarzo en KBT con una ley de corte de molibdeno de 150 [ppm].....	78
Figura 4.6 KDE sobre resultados de probabilidades en alteración KBT.....	83
Figura 4.7 KDE sobre resultados de probabilidades en alteración SC.....	84
Figura 4.8 Resultados de probabilidad KBT.....	85
Figura 4.9 Resultados de probabilidad SC.....	87
Figura 4.10 KDE de los datos sin segregar por alteración .....	88
Figura 4.11 Comparación de metodologías. a) Gráfico sin separar muestras por alteración. b) Gráfico separando muestras por alteración, en color verde la alteración KBT y en color negro la alteración SC .....	89
Figura 4.12 Validación cruzada de k iteraciones .....	94
Figura 4.13 Aplicación de sumas acumuladas .....	96
Figura 5.1 Diagrama simplificado de la metodología utilizada .....	99
Figura 7.1 Firma espectral de referencia de albita con valles identificados .....	103
Figura 7.2 Firma espectral de referencia de anortoclasa con valles identificados.....	104
Figura 7.3 Firma espectral de referencia de biotita con valles identificados .....	104

Figura 7.4 Firma espectral de referencia de caolinita con valles identificados .....	105
Figura 7.5 Firma espectral de referencia de cuarzo con valles identificados .....	105
Figura 7.6 Firma espectral de referencia de fengita con valles identificados .....	106
Figura 7.7 Firma espectral de referencia de flogopita con valles identificados.....	106
Figura 7.8 Firma espectral de referencia de labradorita con valles identificados .....	107
Figura 7.9 Firma espectral de referencia de montmorillonita con valles identificados..	107
Figura 7.10 Firma espectral de referencia de muscovita con valles identificados .....	108
Figura 7.11 Firma espectral de referencia de oligoclasa con valles identificados .....	108
Figura 7.12 Firma espectral de referencia de yeso con valles identificados .....	109
Figura 7.13 Polinomio ajustado a los 9040 [nm].....	110
Figura 7.14 Polinomio ajustado a los 8350 [nm].....	110
Figura 7.15 Polinomio ajustado a los 9620 [nm].....	111
Figura 7.16 Polinomio ajustado a los 9920 [nm].....	111
Figura 7.17 Polinomio ajustado a los 13830 [nm].....	112
Figura 7.18 Polinomio ajustado a los 9080 [nm].....	112
Figura 7.19 Polinomio ajustado a los 9600 [nm].....	113
Figura 7.20 Polinomio ajustado a los 8725 [nm].....	113
Figura 7.21 Polinomio ajustado a los 2250 [nm].....	114
Figura 7.22 Polinomio ajustado a los 2360 [nm].....	114
Figura 7.23 Polinomio ajustado a los 1916 [nm].....	115
Figura 7.24 Polinomio ajustado a los 1400 [nm].....	115
Figura 7.25 Polinomio ajustado a los 1915 [nm].....	116
Figura 7.26 Polinomio ajustado a los 2207 [nm].....	116
Figura 7.27 Polinomio ajustado a los 8623 [nm].....	117
Figura 7.28 Polinomio ajustado a los 12300 [nm].....	117
Figura 7.29 Polinomio ajustado a los 8490 [nm].....	118
Figura 7.30 Polinomio ajustado a los 12800 [nm].....	118
Figura 7.31 Polinomio ajustado a los 12500 [nm].....	119
Figura 7.32 Polinomio ajustado a los 9275 [nm].....	119
Figura 7.33 Polinomio ajustado a los 1412 [nm].....	120
Figura 7.34 Polinomio ajustado a los 1915 [nm].....	120
Figura 7.35 Polinomio ajustado a los 2212 [nm].....	121
Figura 7.36 Polinomio ajustado a los 2440 [nm].....	121
Figura 7.37 Polinomio ajustado a los 1914 [nm].....	122
Figura 7.38 Polinomio ajustado a los 2246 [nm].....	122
Figura 7.39 Polinomio ajustado a los 2324 [nm].....	123
Figura 7.40 Polinomio ajustado a los 8500 [nm].....	123
Figura 7.41 Polinomio ajustado a los 8750 [nm].....	124
Figura 7.42 Polinomio ajustado a los 9940 [nm].....	124
Figura 7.43 Polinomio ajustado a los 1415 [nm].....	125
Figura 7.44 Polinomio ajustado a los 2212 [nm].....	125
Figura 7.45 Polinomio ajustado a los 1910 [nm].....	126
Figura 7.46 Polinomio ajustado a los 2200 [nm].....	126
Figura 7.47 Polinomio ajustado a los 1915 [nm].....	127

Figura 7.48 Polinomio ajustado a los 2348 [nm].....	127
Figura 7.49 Polinomio ajustado a los 1412 [nm].....	128
Figura 7.50 Polinomio ajustado a los 8350 [nm].....	128
Figura 7.51 Polinomio ajustado a los 8750 [nm].....	129
Figura 7.52 Polinomio ajustado a los 9650 [nm].....	129
Figura 7.53 Polinomio ajustado a los 9990 [nm].....	130
Figura 7.54 Polinomio ajustado a los 1940 [nm].....	130
Figura 7.55 Polinomio ajustado a los 1748 [nm].....	131
Figura 7.56 Polinomio ajustado a los 1448 [nm].....	131
Figura 7.57 Polinomio ajustado a los 1536 [nm].....	132
Figura 7.58 Polinomio ajustado a los 2412 [nm].....	132
Figura 7.59 Polinomio ajustado a los 2112 [nm].....	133
Figura 7.60 Comparación escalar 8450H.....	134
Figura 7.61 Comparación escalar 9040D.....	134
Figura 7.62 Comparación escalar 9620H.....	135
Figura 7.63 Comparación escalar 9920H.....	135
Figura 7.64 Comparación escalar 13830H.....	136
Figura 7.65 Comparación escalar 8725H.....	136
Figura 7.66 Comparación escalar 9600D.....	137
Figura 7.67 Comparación escalar 9080D.....	137
Figura 7.68 Comparación escalar 1916D.....	138
Figura 7.69 Comparación escalar 2250D.....	138
Figura 7.70 Comparación escalar 2360D.....	139
Figura 7.71 Comparación escalar 1400D.....	139
Figura 7.72 Comparación escalar 1915D.....	140
Figura 7.73 Comparación escalar 2207D.....	140
Figura 7.74 Comparación escalar 8490H.....	141
Figura 7.75 Comparación escalar 8623D.....	141
Figura 7.76 Comparación escalar 12300D.....	142
Figura 7.77 Comparación escalar 12500H.....	142
Figura 7.78 Comparación escalar 12800H.....	143
Figura 7.79 Comparación escalar 9275H.....	143
Figura 7.80 Comparación escalar 1412D.....	144
Figura 7.81 Comparación escalar 1915D.....	144
Figura 7.82 Comparación escalar 2212D.....	145
Figura 7.83 Comparación escalar 2440D.....	145
Figura 7.84 Comparación escalar 1914D.....	146
Figura 7.85 Comparación escalar 2246D.....	146
Figura 7.86 Comparación escalar 2324D.....	147
Figura 7.87 Comparación escalar 8500H.....	147
Figura 7.88 Comparación escalar 8750H.....	148
Figura 7.89 Comparación escalar 9170D.....	148
Figura 7.90 Comparación escalar 9940H.....	149
Figura 7.91 Comparación escalar 1415D.....	149

Figura 7.92 Comparación escalar 2212D.....	150
Figura 7.93 Comparación escalar 1910D.....	150
Figura 7.94 Comparación escalar 1412D.....	151
Figura 7.95 Comparación escalar 1915D.....	151
Figura 7.96 Comparación escalar 2200D.....	152
Figura 7.97 Comparación escalar 2348D.....	152
Figura 7.98 Comparación escalar 8350H.....	153
Figura 7.99 Comparación escalar 8750H.....	153
Figura 7.100 Comparación escalar 9650H.....	154
Figura 7.101 Comparación escalar 9900H.....	154
Figura 7.102 Comparación escalar 1448D.....	155
Figura 7.103 Comparación escalar 1536D.....	155
Figura 7.104 Comparación escalar 1748D.....	156
Figura 7.105 Comparación escalar 1940D.....	156
Figura 7.106 Comparación escalar 2212D.....	157
Figura 7.107 Comparación escalar 2412D.....	157
Figura 7.108 Escalar de albita en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN .....	158
Figura 7.109 Escalar de albita en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN .....	158
Figura 7.110 Escalar de anortoclasa en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN.....	159
Figura 7.111 Escalar de anortoclasa en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN.....	159
Figura 7.112 Escalar de caolinita en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN .....	160
Figura 7.113 Escalar de caolinita en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN .....	160
Figura 7.114 Escalar de cuarzo en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN .....	161
Figura 7.115 Escalar de cuarzo en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN .....	161
Figura 7.116 Escalar de labradorita en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN.....	162
Figura 7.117 Escalar de labradorita en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN .....	162
Figura 7.118 Escalar de mica blanca en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN.....	163
Figura 7.119 Escalar de mica blanca en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN.....	163
Figura 7.120 Escalar de mica negra en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN.....	164
Figura 7.121 Escalar de mica negra en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN.....	164

Figura 7.122 Escalar de montmorillonita en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN.....	165
Figura 7.123 Escalar de montmorillonita en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN.....	165
Figura 7.124 Escalar de oligoclasa en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN.....	166
Figura 7.125 Escalar de oligoclasa en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN .....	166
Figura 7.126 Escalar de yeso en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN .....	167
Figura 7.127 Escalar de yeso en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN .....	167
Figura 7.128 Escalares de albita, en color concentración de Molibdeno.....	168
Figura 7.129 Escalares de anortoclasa, en color concentración de Molibdeno.....	169
Figura 7.130 Escalares de caolinita, en color concentración de Molibdeno .....	169
Figura 7.131 Escalares de cuarzo, en color concentración de Molibdeno .....	170
Figura 7.132 Escalares de labradorita, en color concentración de Molibdeno .....	170
Figura 7.133 Escalares de micas blancas, en color concentración de Molibdeno.....	171
Figura 7.134 Escalares de micas negras, en color concentración de Molibdeno .....	171
Figura 7.135 Escalares de montmorillonita, en color concentración de Molibdeno .....	172
Figura 7.136 Escalares de oligoclasa, en color concentración de Molibdeno .....	172
Figura 7.137 Escalares de yeso, en color concentración de Molibdeno.....	173
Figura 7.138 Curvas de densidad de escalares de albita para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno.....	174
Figura 7.139 Curvas de densidad de escalares de albita para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno .....	174
Figura 7.140 Curvas de densidad de escalares de anortoclasa para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno.....	175
Figura 7.141 Curvas de densidad de escalares de anortoclasa para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno.....	175
Figura 7.142 Curvas de densidad de escalares de caolinita para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno .....	176
Figura 7.143 Curvas de densidad de escalares de caolinita para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno .....	176
Figura 7.144 Curvas de densidad de escalares de cuarzo para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno .....	177
Figura 7.145 Curvas de densidad de escalares de cuarzo para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno .....	177
Figura 7.146 Curvas de densidad de escalares de labradorita para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno.....	178
Figura 7.147 Curvas de densidad de escalares de labradorita para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno.....	178
Figura 7.148 Curvas de densidad de escalares de micas blancas para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno.....	179

Figura 7.149 Curvas de densidad de escalares de micas blancas para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno.....	179
Figura 7.150 Curvas de densidad de escalares de micas negras para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno.....	180
Figura 7.151 Curvas de densidad de escalares de micas negras para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno.....	180
Figura 7.152 Curvas de densidad de escalares de montmorillonita para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno.....	181
Figura 7.153 Curvas de densidad de escalares de montmorillonita para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno.....	181
Figura 7.154 Curvas de densidad de escalares de oligoclasa para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno.....	182
Figura 7.155 Curvas de densidad de escalares de oligoclasa para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno.....	182
Figura 7.156 Curvas de densidad de escalares de yeso para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno.....	183
Figura 7.157 Curvas de densidad de escalares de yeso para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno.....	183
Figura 7.158 Interfaz de ingreso de datos.....	184

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1 Teorema de Bayes .....	27
Ecuación 3.1 Semivariograma teórico univariable.....	39
Ecuación 3.2 Semivariograma experimental univariable .....	39
Ecuación 3.3 Teorema de Bayes .....	68
Ecuación 3.4 Aplicación Teorema de Bayes .....	68
Ecuación 3.5 Posibles valores para los minerales según los escalares.....	68
Ecuación 3.6 Minerales considerados.....	68
Ecuación 3.7 Componentes para definir pertenencia al área.....	68
Ecuación 3.8 Aplicación del Teorema de Bayes con la definición de Laplace .....	68
Ecuación 3.9 Simplificación.....	68
Ecuación 3.10 Cuenta final del algoritmo .....	69
Ecuación 3.11 CUSUM .....	72
Ecuación 4.1 RMSE para cada grupo .....	92
Ecuación 4.2 RMSE para j grupos .....	93

# CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 PRESENTACIÓN DEL TEMA

---

El desarrollo de la minería metálica del cobre en Chile, ha traído con el paso del tiempo, una marcada participación en la producción a nivel mundial de uno de sus principales subproductos, el molibdeno.

El molibdeno, un metal de transición de color grisáceo, de número atómico 42, de característico alto punto de fusión y de consumo sostenido en la sociedad actual, presenta la particularidad de no existir en estado puro en la naturaleza y generalmente se encuentra asociado a otros elementos, como es el caso de los minerales sulfurados.

Las principales características de este metal son la durabilidad, resistencia y capacidad para soportar corrosión agresiva, así como altas temperaturas. Por tales motivos, el molibdeno es un metal que principalmente se usa como materia prima para obtener aleaciones, entre las que destaca el acero inoxidable, mercado que abarca alrededor de las dos terceras partes de las ventas de este metal (International Molybdenum Association, 2015).

La importancia relativa de Chile dentro de la industria del molibdeno es amplia y durante el 2015 el país se posicionó en el tercer lugar de producción del metal a nivel mundial, con una producción de 49.000 [ton], mismo lugar que ocupa en cuanto a las reservas del mineral, con un registro de 1,8 [Mton] al año 2016 (Polyak, 2016).

En relación a la extracción en mina, el molibdeno es parte de diversos minerales, pero solo es posible llevarlo a producción industrial para productos comercializables cuando este se presenta como molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ) (International Molybdenum Association, 2015). El mineral de molibdenita puede encontrarse como una mineralización por sí sola, pero a menudo ocurre asociado a los sulfuros de otros metales, entre los que destaca el cobre (International Molybdenum Association, 2015).

En términos microeconómicos, la producción de molibdeno en una operación minera de cobre, es considerado un subproducto, que, dado su gran valor en relación al precio del cobre, 6.65 [USD/lb] (Cochilco, 2017) promedio el 2015 frente a un 2,49 [USD/lb] promedio al mismo año en valores nominales, tiene un impacto a considerar en el funcionamiento de una operación minera, principalmente porque para determinar los costos de caja C1, indicador correspondiente a los costos directos de operación usado para medir en el corto plazo una empresa minera, se restan los ingresos que provienen de metales como el molibdeno.

Dados los puntos mencionados, resulta de gran relevancia tener una correcta caracterización de las reservas de molibdeno en un yacimiento minero. El presente trabajo busca entonces mostrar la aplicación de una técnica para entregar información sobre mineralización de molibdeno con miras a la exploración minera, logrando de este modo agregar valor al negocio minero, guiando las etapas siguientes de exploración.

## 1.2 PROBLEMÁTICA

---

La mineralización de molibdeno en forma de molibdenita asociada a pórfidos cupríferos presenta en ciertos casos un marcado efecto pepita natural (Carrasco, 2010), fenómeno que puede ser generado por factores como un evento geológico de altas presiones o una mineralización alojada en vetas, entre otros casos, lo que tiene como resultado una particular baja continuidad espacial de la ley del mineral (Dominy, Platten, & Raine, 2003). Esta característica dificulta la interpolación de modelos geológicos, la generación de cuerpos en tres dimensiones, estimaciones de leyes de mineral y procesos aguas abajo, debido principalmente a la complejidad de determinar los límites de la mineralización y con esto, una pobre determinación y predicción de la mineralización en la distribución espacial.

Un segundo aspecto a considerar y que de igual modo complejiza la determinación de los límites de mineralización, tiene relación con el carácter de subproducto del molibdeno en relación al mineral principal de interés que es el cobre. Lo que, dependiendo del depósito, podría influir en las campañas de sondajes que se desarrollan, las cuales se enfocan en primer lugar en las zonas en que los minerales de cobre presentan una ley atractiva con el fin de tener una mejor confiabilidad de leyes, ubicaciones que usualmente se asocian a altas leyes de molibdeno debido a un comportamiento geoquímico similar, aunque no siempre se tiene tal caso, con lo que se podría tener una menor información del subproducto al momento de generar modelos geológicos, fenómeno conocido como muestreo preferencial (Lange, 2012). Ambos factores dificultan la tarea de establecer límites de mineralizaciones y en algunos casos obligan a determinarlos de forma manual, conectando regiones de datos de sondajes y formando cuerpos mineralizados tridimensionales sin un mayor sustento (Hill et al., 2014).

Debido a la situación expuesta, han surgido una serie esfuerzos por superar este tipo de problemas. Una de estas líneas de estudio, se basa en incorporar información adicional para guiar el ejercicio de definir los límites de mineralización. El conjunto de información adicional complementaria para lidiar con la problemática presente recibe el nombre de indicadores y guarda como característica principal una mayor continuidad espacial que la variable de estudio, convirtiéndose de este modo en una herramienta útil en el proceso de delimitación del cuerpo geológico del mineral estudiado.

Dado el gran valor del oro y su característico efecto pepita, esta industria presenta diversos ejemplos de este tipo de enfoques en la literatura, en la cual se han desarrollado indicadores con información geológica (Dominy, 2014), tales como la presencia e intensidad de alteraciones que se asocian a la mineralización, la presencia de unidades litológicas que favorecen la mineralización, la presencia de características estructurales que favorecen el transporte y deposición de minerales, entre otras. Del mismo modo también se tiene documentación del uso de información geoquímica para este mineral (Hill, Oliver, Fisher, Cleverley, & Nugus, 2014a), considerando elementos como el arsénico, antimonio, azufre, rubidio y cromo, entregando resultados alentadores y que además permiten una automatización del proceso. En la misma línea, se han

logrado resultados similares para el oro utilizando información hiperespectral de minerales de alteración, como clorita, micas blancas y carbonatos, en conjunto con información geológica (Painepán, Hill, Mcfarlane, Laukamp, & Ortiz, 2014).

Este último ejemplo es de gran interés, dado el auge de la tecnología hiperespectral y las ventajas que presenta frente a otros sistemas de caracterización de minerales, tales como: una alta velocidad de escaneo, gran objetividad en relación al registro geológico tradicional, carácter no destructivo y bajos a nulos requerimientos de preparación de muestras (Whitbourn, Huntington, & Munday, 2013), tecnología utilizada en el presente estudio.

Finalmente, considerando las características de continuidad espacial que presenta el molibdeno en determinados yacimientos del tipo pórfidos cupríferos, las que se encuentran en concordancia con las identificadas en el oro pepítico, existe una oportunidad de proyectar trabajos realizados para la minería del oro a fin de disponer de un indicador que a partir de la caracterización de minerales de ganga en etapas de prospección y/o evaluación del yacimiento permita predecir la aparición y tendencia del molibdeno, buscando así definir su mineralización y aumentar el valor del negocio minero.

El presente caso de estudio, reúne las características ya mencionadas, correspondientes a un yacimiento del tipo pórfido cuprífero con mineralización de molibdeno en forma de molibdenita, bajo un marcado efecto pepita, correspondiente al proyecto Esperanza Sur de la empresa Antofagasta Minerals S.A.

### **1.3 ALCANCES**

---

El trabajo a desarrollar se realiza sobre un caso de estudio particular, el cual corresponde al proyecto Esperanza Sur de AMSA., trabajo que dadas las características que presenta no permite extrapolar los resultados obtenidos a otro yacimiento, principalmente, ya que las condiciones de cada depósito son particulares y no garantizan una similitud a tal escala, pese a lo anterior, la metodología propuesta podría utilizarse para futuros casos de estudio.

El presente indicador se desarrolla para el elemento molibdeno en forma de molibdenita, no así para otros minerales de molibdeno.

El indicador busca entregar información de mineralización de molibdeno, no así de leyes, objetivo abordado por estudios geoestadísticos.

El indicador a construir utiliza información hiperespectral proveniente del equipo Hylogger-3, disponible en los laboratorios del AMTC de la Universidad de Chile. La razón de la elección de este equipo tiene directa relación con sus ventajas frente a otras técnicas de caracterización, disponibilidad de su uso y el contexto en que se desarrolla el trabajo, el que se enmarca en el proyecto P4.2-AMTC-CSIRO, Proyecto de caracterización mineralógica y metalúrgica avanzada. Este proyecto administra actualmente el funcionamiento del Hylogger-3 en la Universidad de Chile, equipo que se encuentra prestando servicios tanto para fines de investigación, como para análisis en la industria.

Dada la naturaleza de la información, perteneciente a un proyecto que aún no se encuentra en marcha y del cual se tiene información limitada, se realizará la validación del indicador mediante metodologías acordes a la situación, como lo es la validación cruzada.

## **1.4 OBJETIVO**

---

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Este trabajo tiene por objetivo utilizar la información hiperespectral como indicador de mineralización de molibdeno, evaluando con esto las características propias de un indicador, la información que entregaría y su aporte a la cadena de valor.

La base que sustenta este objetivo tiene relación con los trabajos realizados para la minería del oro y busca utilizar la tecnología hiperespectral a modo de acotar el estudio, debido al contexto del mismo, fundamentando la elección de este equipo con las ventajas que presenta sobre otras tecnologías de su tipo.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Dentro de los objetivos específicos que permiten desarrollar lo señalado en el punto anterior se presentan:

- Realizar un estudio exploratorio de datos, de continuidad y correlación.
- Caracterizar hiperespectralmente las muestras disponibles.
- Generar gráficos de dispersión de los escalares según alteración y minerales.
- Determinar zonas de mineralización según las características espectrales y definir sus límites.
- Calcular probabilidades de mineralización a partir del indicador.
- Reclassificar las muestras según los resultados obtenidos.
- Identificar oportunidades de mejora de los minerales a considerar en el indicador.
- Evaluar la agrupación de los resultados para tener una escala de información de mayor envergadura.
- Validar el indicador mediante la técnica de validación cruzada.

## CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

El presente capítulo muestra los tres principales temas que permiten comprender la mayor parte de los conceptos en los que se enmarca el trabajo, los que corresponden a:

1. Descripción de la faena: Condiciones físicas y geológicas del caso de estudio
2. Caracterización de muestras: Información disponible para el desarrollo del trabajo, sus características y análisis.
3. Indicador: Concepto de indicador, base matemática de su construcción y ejemplos de su uso.

### 2.1 DESCRIPCIÓN DE LA FAENA

---

El presente caso de estudio corresponde al proyecto Esperanza Sur de la empresa AMSA, proyecto brownfield que se encuentra en la actual operación de Minera Centinela, condiciones que se detallan a continuación.

#### 2.1.1 MINERA CENTINELA

Minera Centinela es una empresa del Grupo AMSA, que nace en julio de 2014 a partir de la integración de las operaciones de las compañías mineras El Tesoro y Esperanza.

Esta nueva compañía emerge a partir de la visión de capturar las sinergias de ambas operaciones, aprovechando las condiciones geográficas, técnicas y logísticas que hacen posible una planificación y operación minera integrada y mayores economías de escala, logrando así una posición más competitiva en la industria.

De esta forma, Minera Centinela se posiciona como una de las compañías mineras más grandes del país, aplicando altos estándares de desempeño en sus operaciones y procesos, rigiendo su actuar sobre la base de los principios y políticas de AMSA.

Su estructura societaria está compuesta en un 70% de propiedad de AMSA y un 30% de Marubeni Corporation (Bisso, Lazcano, Guzmán, González, 2009).

La empresa presenta una producción de cátodos y concentrados de cobre, además de oro como subproducto principal y se posiciona como al séptimo productor de cobre en el país y duodécimo a nivel mundial (Minera centinela, 2016).

#### 2.1.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Minera Centinela se ubica a 180 kilómetros hacia el noreste de la ciudad de Antofagasta, a 100 kilómetros al suroeste de la ciudad de Calama y a una altitud aproximada de 2.300 m.s.n.m.

La minera cuenta con un muelle desde donde se embarca su concentrado de cobre, uno de los productos que produce la compañía, que se ubica en la comuna de Mejillones, específicamente en la localidad de Michilla (Minera Centinela, 2014).

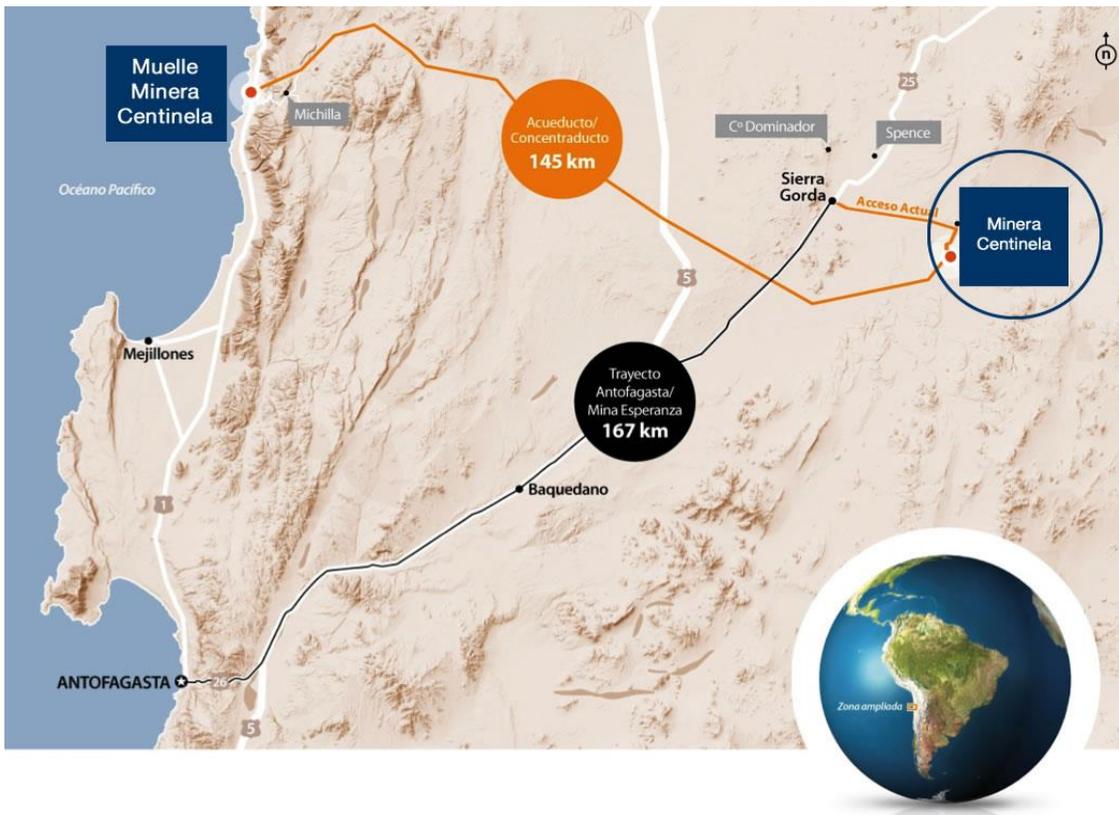


Figura 2.1 Ubicación Minera Centinela (Minera Centinela, 2014)

### 2.1.3 SISTEMA DE EXPLOTACIÓN Y RITMO DE PRODUCCIÓN ANUAL

La extracción del mineral se realiza mediante la explotación de un método de cielo abierto, conformado de una serie de rajos: Rajo Sulfuros, Rajo Central Óxidos, Rajo Noroeste Óxidos y Rajo Mirador.

Para el año 2016 se espera que la compañía produzca 230.000 toneladas de cobre fino en concentrado y cátodos, mientras que su producción de oro bordeará las 206.000 onzas. Para el año 2015 Minera Centinela obtuvo una producción anual de 145.181 toneladas de cobre fino en concentrado, 75.934 toneladas de cátodos de cobre y 162.467 onzas de oro y en 2014 registró una producción de 172.800 toneladas de cobre fino en concentrado, 93.800 toneladas de cobre fino en cátodos y 204.400 onzas de oro (Cochilco, 2016).

### 2.1.4 MÉTODOS DE PROCESAMIENTO DE MINERALES

Minera Centinela cuenta con dos líneas de producción para la obtención de cobre, las que se describen a continuación.



Figura 2.2 Procesos productivos Minera Centinela (Minera Centinela, 2014)

#### 2.1.4.1.1 PROCESO PRODUCTIVO ÓXIDOS

El proceso de producción utilizado en la línea de óxidos es la lixiviación en pilas dinámicas del mineral chancado y aglomerado, el que posteriormente ingresa a la fase de extracción por solventes y de electro obtención que proporciona como producto final el cobre catódico. Los paquetes de cátodos son transportados en camiones hasta la estación de transferencia Los Arrieros del Ferrocarril Antofagasta – Bolivia, posteriormente son trasladados al puerto de Antofagasta vía ferrocarril para su embarque y destino final en los principales mercados mundiales (Taboada, 2013).

#### 2.1.4.1.2 PROCESO PRODUCTIVO SULFUROS

El proceso de esta línea comienza con la extracción del mineral proveniente del yacimiento y prosigue hacia las etapas de chancado, molienda, flotación y concentrado, con el particular uso de agua de sal en sus procesos. Dicho concentrado es transportado por gravedad a través de una tubería que recorre 145 kilómetros, desde el sector de la planta de sulfuros hasta el muelle situado en la localidad Michilla. Allí el concentrado es lavado mediante un proceso denominado filtrado, que utiliza agua desalada, para finalmente embarcar directamente a las bodegas de los barcos a través de una correa transportadora encapsulada (Minera Centinela, 2014).

## **2.2 PROYECTO ESPERANZA SUR**

---

### **2.2.1.1 DESCRIPCIÓN**

El proyecto Esperanza Sur, corresponde a un proyecto brownfield que contempla el desarrollo de una nueva mina a rajo abierto para extraer mineral sulfurado al sur de la actual operación Esperanza.

El proyecto se encuentra dentro del plan de Desarrollo Minera Centinela en el cual también se contempla desarrollar una planta de molibdeno para el año 2017.

En una primera etapa, se considera que los minerales extraídos podrán ser enviados a la actual planta de Minera Esperanza, que está siendo optimizada y en una segunda etapa, se contempla la construcción de una nueva planta concentradora con capacidad de procesamiento de 100 [ktpd], la ampliación del muelle de Michilla, con la construcción de nuevos ductos de captación de agua de mar y un concentrado de aproximadamente 150 [km] de longitud.

### **2.2.2 YACIMIENTO**

El depósito en que se desarrolla el proyecto Esperanza Sur, se conoce como Telégrafo Sur, yacimiento que deriva de un cuerpo mineralizado previamente conocido como Telégrafo.

Telégrafo corresponde a un pórfido de Cu-Au-(Mo) que está situado inmediatamente al sur del yacimiento Esperanza, a una altura de 2.300 m.s.n.m. Antes del inicio de las actividades de AMSA en el distrito, la zona de alteración de Telégrafo fue objeto de exploración por otras compañías entre 1984-1986 y 1991-1992, las que no encontraron evidencias significativas de mineralización. Con posterioridad, el conocimiento geológico adquirido por AMSA durante la exploración del Esperanza (Perelló, et al., 2001), definió un modelo que consideró un sistema mineralizado inclinado aproximadamente 50°E, conformado por envolventes de alteración y mineralización fílica en torno a una zona potásica central con mineralización de Cu-Au. El modelo fue validado por nuevos sondajes efectuados y permitieron el descubrimiento de Telégrafo Sur el año 2001 (Perelló, et al., 2003). El depósito continuó reconociéndose mediante campañas de sondajes hasta el año 2003, las que permitieron definir el orden de magnitud y leyes de Cu, Au y Mo de Telégrafo Norte y Telégrafo Sur. Posteriormente, durante los años 2007 y 2008, se procedió a perforar una malla sistemática de relleno con el objetivo de establecer los recursos del depósito tal como se conocen en la actualidad (Grego & Münchmeyer, 2008).

Telégrafo forma parte de la franja metalogénica del Eoceno Superior-Oligoceno Inferior (Cochilco, 2016), del corredor de pórfidos de edad eocena media expuestos en el Distrito Centinela y que incluye los sistemas de Polo Sur, Pilar, Centinela, Telégrafo, Caracoles, Esperanza y Mirador, Figura 2.3. La edad de Telégrafo Sur está confirmada mediante dataciones K/Ar de 43.8±1.1 y 44.3±1.4 Ma en alteración potásica rica en biotita hidrotermal en andesita de caja y pórfido mineralizado.

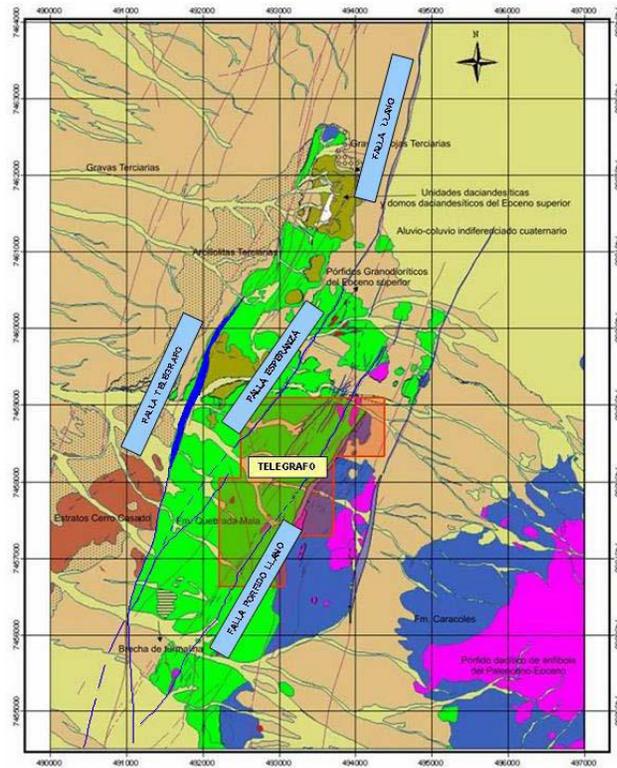


Figura 2.3 Geología de superficie de la zona aledaña al yacimiento Telégrafo (Münchmeyer & Valenzuela, 2009)

### 2.2.2.1 LITOLOGÍA

El yacimiento está hospedado en una secuencia de rocas estratificadas inclinadas al oeste, constituida, de base a techo, por areniscas calcáreas jurásicas del Grupo Caracoles, que incluyen, en el techo, un nivel de yeso, Figura 2.4. La serie calcárea jurásica está cubierta, en discordancia, por rocas volcánicas andesíticas del Cretácico superior de la Formación Quebrada Mala, en la cual se han obtenido edades U/Pb en circones de 73,7 y 69,7 Ma.

Por el oeste, este panel de rocas estratificadas está en contacto por falla inversa, con inclinación de 40°-50°W (Falla Telégrafo) sobre una serie de tobas e intrusivos subvolcánicos de probable edad eocena, Figura 2.4. Un conjunto de filones porfíricos de composición granodiorítica, subparalelo a la Falla Telégrafo, intruye a las rocas estratificadas y genera los sistemas de pórfido de Cu-Au-Mo Telégrafo Norte y Telégrafo Sur (Cáceres, 2008).

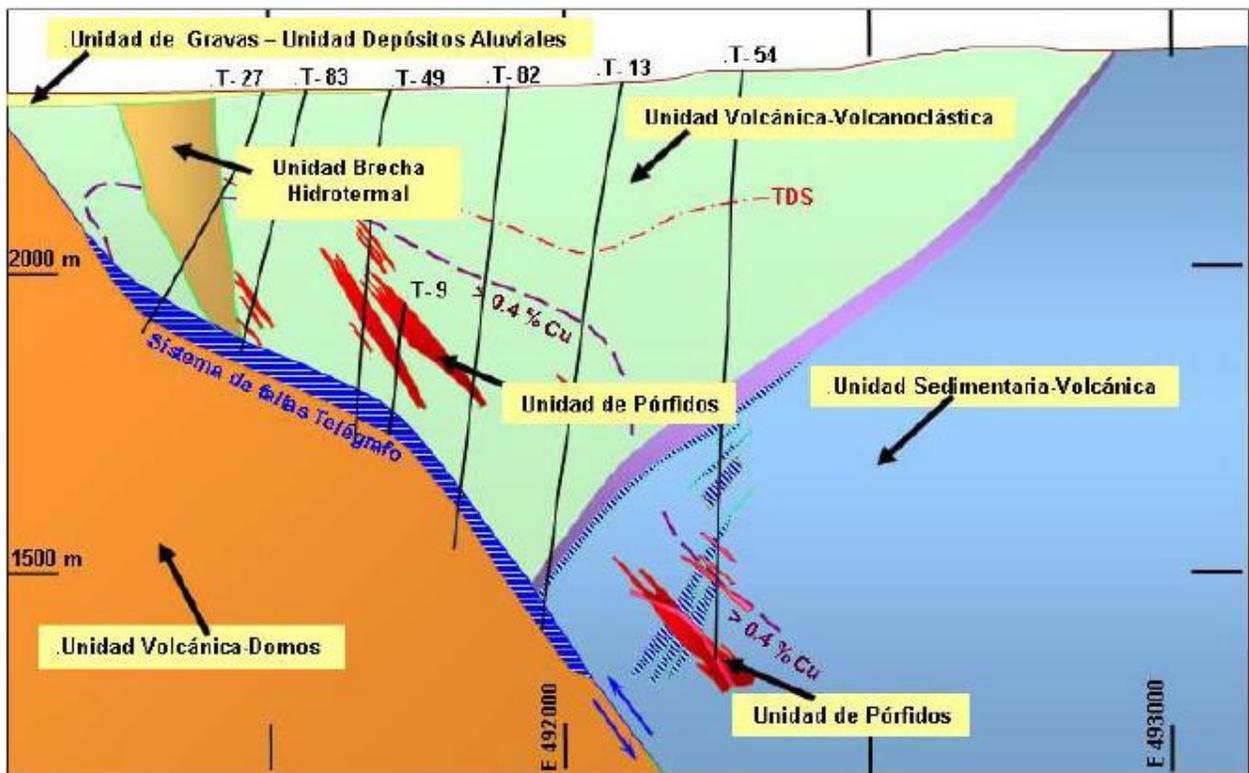


Figura 2.4 Sección 7.456.620 N del Yacimiento Telégrafo indicando litología y sentido de desplazamiento de la falla Telégrafo. TDS: techo de sulfuro (Münchmeyer & Valenzuela, 2009)

La sección 7456.17 N de la Figura 2.5, muestra la ubicación del punto medio de los compósitos de sondajes disponibles en el presente estudio, en su mayoría en la litología de tobas andesíticas. Se muestra con una línea negra el rajo final del proyecto Esperanza Sur, en concordancia con la falla que aloja la mineralización.

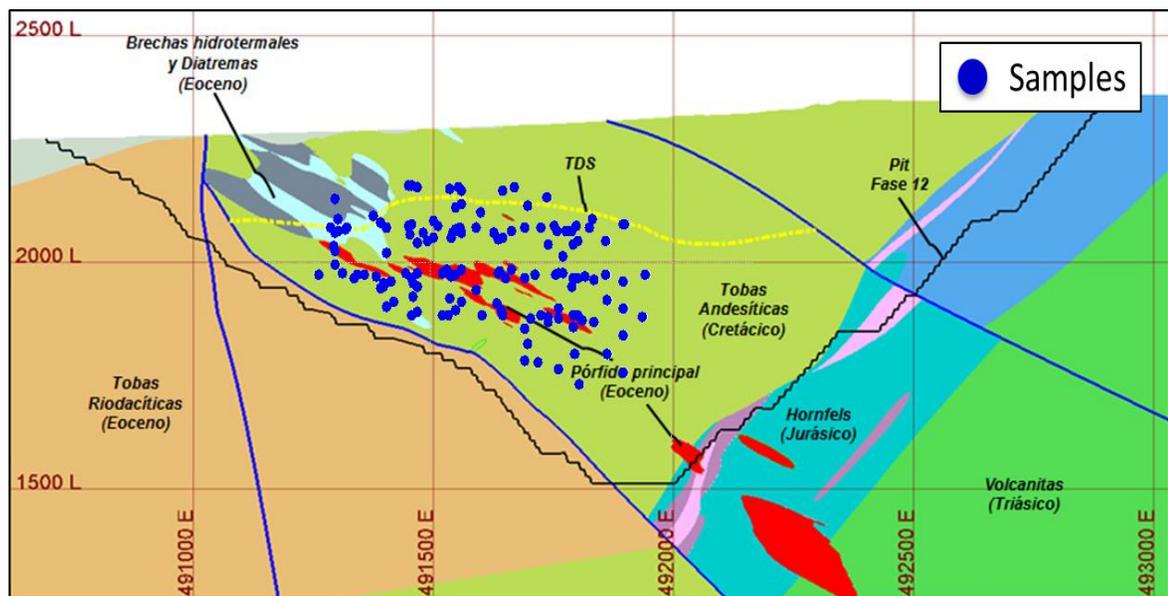


Figura 2.5 Sección 7.456.170 N, indicando litología, techo de sulfuros (TDS) y pit final del proyecto (Geología del yacimiento esperanza, 2012).

### 2.2.2.2 ALTERACIONES

La geometría de alteración-mineralización de Cu-Au-Mo incluye una zona central con alteración potásica rica en biotita-feldespato potásico-calcopirita-bornita-magnetita (KBT, Figura 2.6), asociada a los diques de pórfido y en la roca de caja andesítica inmediatamente adyacente. Esta zona está rodeada por aureolas de clorita-sericita-calcopirita-pirita, alteración Sericítica (SC) y cuarzo-sericita, alteración Cuarzo-Sericita o fílica (QS), Figura 2.6, mientras que las zonas más externas del depósito desarrollan alteración propilítica con epidota-clorita-calcita y escasa pirita. Se aprecia esta distribución de alteraciones en la Figura 2.6, junto con las muestras disponibles para este trabajo, representadas mediante puntos azules, mientras que en negro se muestra el rajo final.

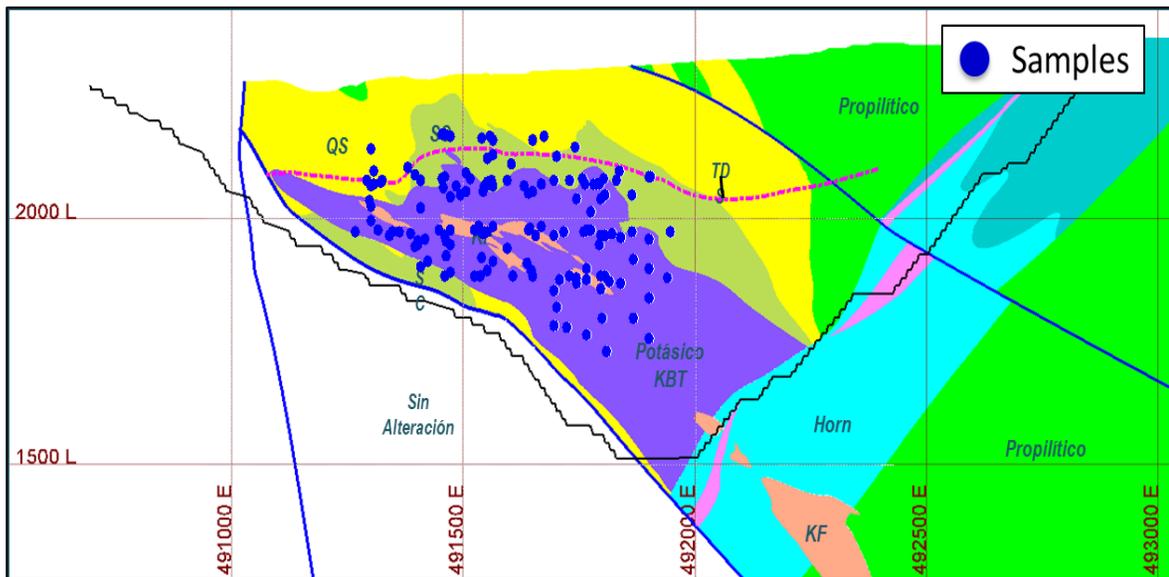


Figura 2.6 Alteración, sección 7.456.170 N (Geología del yacimiento esperanza, 2012)

### 2.2.2.3 ZONAS DE MINERAL

El depósito presenta la tradicional configuración de pórfido cuprífero (Sillitoe, 2010) con una somera zona de mineralización secundaria en la parte superior y una proyección en profundidad de una marcada zona de mineral primario.

La columna mineralizada reconocida mediante sondajes alcanza una extensión vertical de 900 [m], Figura 2.8. La mineralización hipógena se presenta fundamentalmente en vetillas, con o sin cuarzo y de manera diseminada, mediante una o más asociaciones de calcopirita y bornita, con abundante magnetita hidrotermal y escasa pirita. El sistema mineralizado incluye, además, vetillas transgresivas con halos de clorita-sericita con contenidos variables de calcopirita (Münchmeyer, 2009).

El encape lixiviado se caracteriza por la presencia de abundante caolinita en asociación con jarosita, hematita, alunita, yeso y otros sulfatos indiferenciados. El yacimiento presenta un delgado y débil desarrollo de mineralización supérgena, particularmente afectando a asociaciones de cuarzo-sericita y una zona somera con óxidos de cobre en

rocas con alteración potásica, Figura 2.7. Una muestra de alunita supérgena proveniente del encape lixiviado retornó una edad Ar-Ar de 22.9+0.4 Ma, confirmando la edad miocena para la actividad supérgena en el distrito (Münchmeyer, 2009).

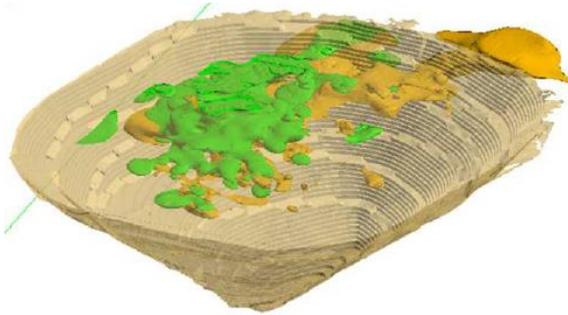


Figura 2.7 Zona de óxidos (verde) y mixto (mostaza) (Geología del yacimiento esperanza, 2012).

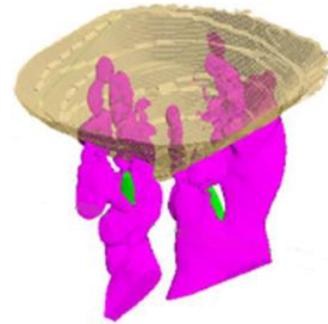


Figura 2.8 Zona de sulfuros (morado) (Geología del yacimiento esperanza, 2012).

#### 2.2.2.4 RECURSOS

Las labores de evaluación de los recursos de Telégrafo incluyeron trabajos variados como test de heterogeneidad, perforación de “twin holes”, mediciones de densidades y análisis de control de calidad (QA/QC). Paralelamente a estos trabajos se elaboró un modelo geológico considerando criterios estandarizados con definición de unidades de litología, alteración y mineralogía de sulfuros de cobre y pirita, que a su vez permitieron establecer dominios geoestadísticos. Los recursos geológicos estimados a la fecha, en las categorías de indicados e inferidos, alcanzan a 1.600 [Mt] de 0.44% Cu, 0.13 [g/t] Au y 130 [ppm] Mo, para una ley de corte de 0.3% Cu (Valenzuela et al., 2009), lo que convierte a Telégrafo en uno de los activos mineros más importantes de AMSA para sus planes de desarrollo en el distrito.

En la Figura 2.9, Figura 2.10, Figura 2.11 y Figura 2.12, se muestran vistas isométricas del modelo de bloques del depósito para el molibdeno con presencia de leyes por sobre las 200 [ppm] predominantemente en la zona hipógena, como es de esperar, en el fondo del yacimiento, mientras que en la Figura 2.13, Figura 2.14 y Figura 2.15 se muestran vistas isométricas del modelo de bloques del depósito para el caso del cobre.

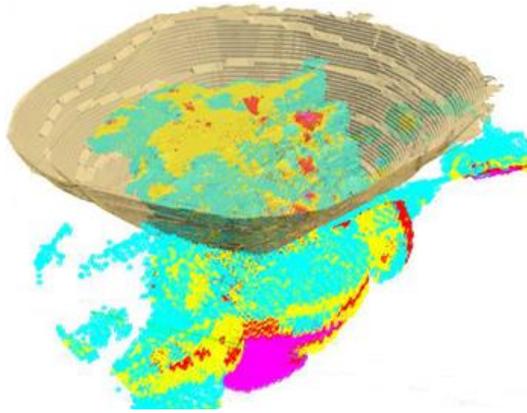


Figura 2.9 Bloques de leyes de molibdeno mayores a 80 [ppm] (Geología del yacimiento esperanza, 2012).

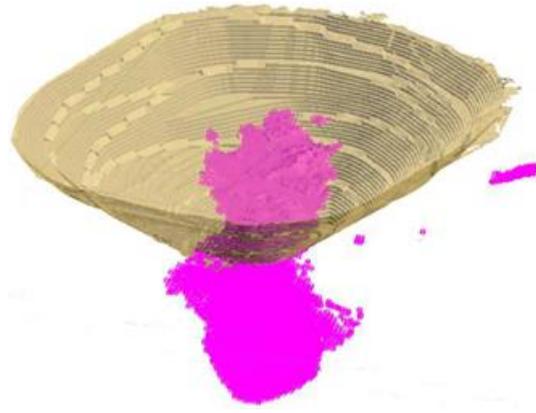


Figura 2.10 Bloques de leyes de molibdeno mayores a 200 [ppm] (Geología del yacimiento esperanza, 2012).

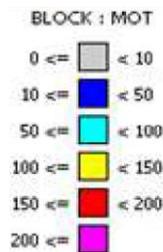


Figura 2.11 Leyenda: leyes de molibdeno [ppm] (Geología del yacimiento esperanza, 2012).

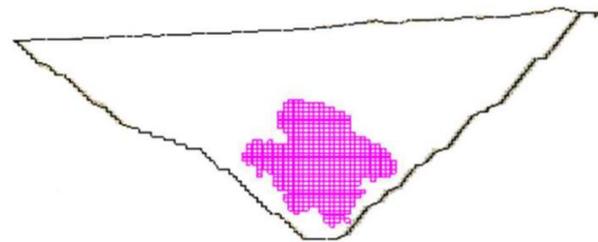


Figura 2.12 Sección del modelo de bloques de leyes de molibdeno mayores a 200 [ppm] (Geología del yacimiento esperanza, 2012).

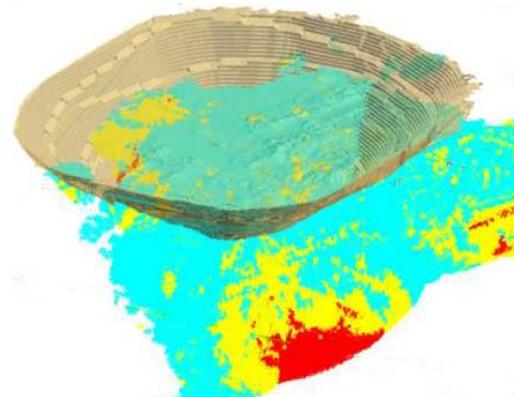


Figura 2.13 Distribución de bloques  $CuT \geq 0.2\%$  en sulfuros (Geología del yacimiento esperanza, 2012).

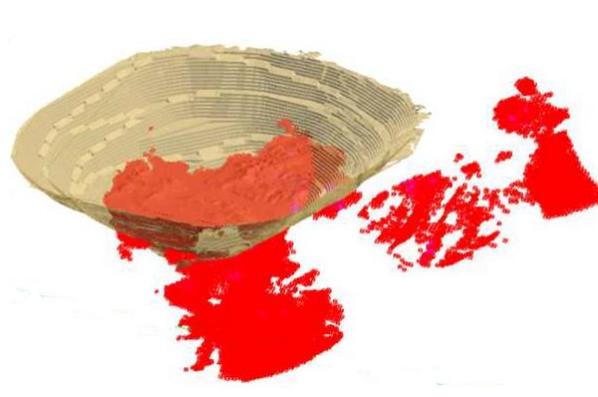


Figura 2.14 Distribución de bloques  $CuT \geq 0.5\%$  en sulfuros (Geología del yacimiento esperanza, 2012).

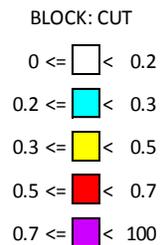


Figura 2.15 Leyenda: leyes de CuT (Geología del yacimiento esperanza, 2012).

## 2.3 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DEL YACIMIENTO

---

El estudio que se realiza para la valoración de un depósito mineral implica no tan sólo el estudio genérico de las leyes de los elementos que se espera puedan ser interesantes en el tipo de depósito, sino también, un estudio detallado de la mineralogía, factor que puede ayudar a incrementar el valor añadido de la explotación, e incluso puede ayudar a descartar o confirmar el interés del yacimiento (Melgarejo, Proenza, Galí, & Llovet, 2010).

De este modo y para el presente caso de estudio, se tiene la siguiente información en relación a las muestras del yacimiento:

- Análisis hiperespectral
- Análisis mineralógico
- Análisis elemental

Información que se tratará a continuación para la comprensión de los términos del trabajo.

### 2.3.1 ANÁLISIS HIPERESPECTRAL

La espectroscopía corresponde a un método de caracterización para la identificación de compuestos químicos que se basa en la respuesta de la interacción de energía electromagnética sobre una muestra. El rango del espectro medido definirá el tipo de espectrometría que se realiza (ultravioleta, visible, infrarroja, entre otros), el cual se selecciona según el tipo de muestra que se desea caracterizar. Se utiliza el término hiperespectral para hacer referencia a que la tecnología ocupada divide el espectro electromagnético en bandas, lo que permite que exista un registro en diferentes longitudes de onda sin necesidad de realizar un barrido entre ellas y guardando la espacialidad de los espectros (Merrill, 2016).

La identificación de los compuestos se logra mediante el análisis de los *patrones o firmas espectrales*, estos son formas características a longitudes de onda específicas que son propios de cada compuesto químico o mineral, los cuales absorben, reflejan o transmiten la radiación electromagnética producto de procesos eléctricos y vibracionales debido a la rotación y estiramiento de los enlaces moleculares de los átomos constituyentes de la muestra (Ostrooumov, 2007).

#### 2.3.1.1 ESPECTROSCOPIA DE REFLECTANCIA

En el caso particular de medir el espectro reflejado por una muestra a la cual se le irradia con una fuente de características conocidas se le conoce como espectroscopía de reflectancia y es la que se ocupa con mayor volumen en la caracterización de minerales, Figura 2.16.

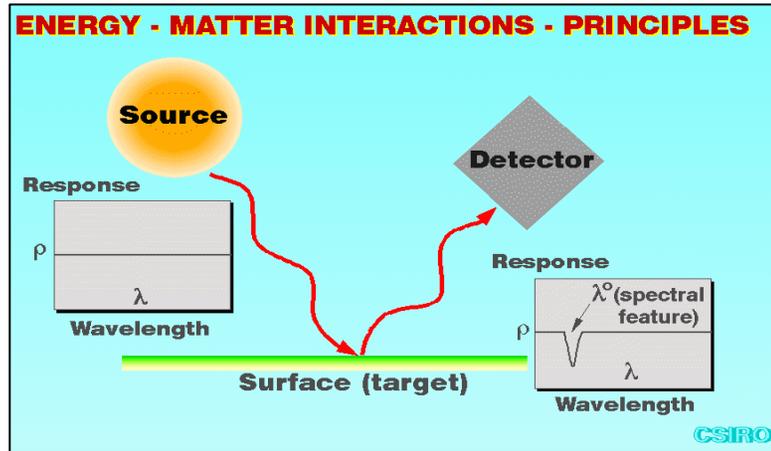


Figura 2.16 Esquema del fenómeno de espectroscopía de reflectancia (Laukamp 2012).

El registro que resulta de realizar una espectroscopía de reflectancia corresponde a una repuesta de dos variables, por un lado, la reflectancia de la onda reflejada, valor no lineal en relación a la concentración del compuesto estudiado, y por otro lado, la longitud de onda de la onda, medida en unidades de longitud, la que depende del espectro estudiado. A partir de esto se identifican los valles o peaks en las firmas espectrales, es decir, las variaciones de la reflectancia en distintas longitudes de onda, conceptos que se denominan características espectrales y que permiten detectar minerales debido a la particularidad en la combinación de ellos.

En la Figura 2.17 se muestra un ejemplo del registro de firmas espectrales de una serie de minerales que se analizan en una espectroscopía de reflectancia utilizando el equipo Hylogger-3™, se identifican con flechas algunos valles en las firmas espectrales que permiten la detección de los minerales. Tal y como se aprecia en la imagen esta técnica se aplica principalmente en la determinación de minerales de ganga, permitiendo identificar gran parte de los minerales presentes en una roca.

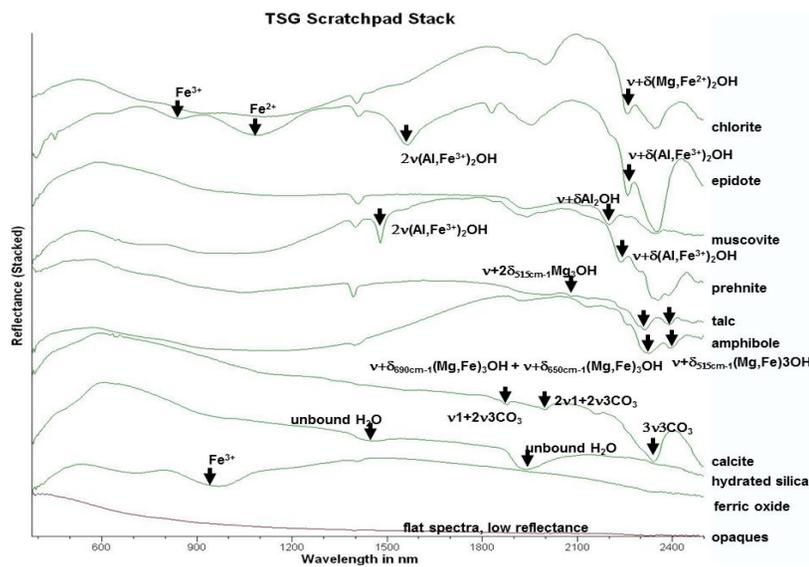


Figura 2.17 Ejemplo de minerales resultantes de la espectroscopía de reflectancia (Hylogger-3) (Laukamp 2012).

### **2.3.1.2 HYLOGGER-3**

Actualmente existen diversas tecnologías de análisis hiperespectral, desde los equipos para el análisis de muestras, hasta equipos con fines de prospección y exploración, diseñados para barrer grandes áreas por medio del uso de aviones.

Dentro de las variadas tecnologías que trabajan realizando análisis hiperespectral, se detalla a continuación la del Hylogger-3, debido a que es la utilizada en el presente estudio.

El sistema de análisis hiperespectral Hylogger-3 desarrollado por CSIRO, es un equipo de rápido registro espectroscópico y de imagen, que usa espectroscopía continua desde el visible al infrarrojo cercano (400 [nm] – 1000 [nm]), el infrarrojo de onda corta (1000 [nm] – 2500 [nm]) y el infrarrojo termal (6000 [nm] – 14500 [nm]), guardando un registro de imagen digital de las muestras, las que pueden ser procesadas desde sondajes de diamantina, chips de aire-reverso y muestras pulverizadas, sin destruirlas en el proceso (Huntington, 2013).

Este sistema presenta ciertas ventajas sobre otros métodos de caracterización, tales como:

- Análisis rápido, casi no requiere preparación de muestras:
  - Sondajes: Se analizan en bandejas porta testigos de sondajes directamente.
  - Chips y muestras pulverizadas: En bandejas o briquetas, deben estar limpios y secos.
- Información de alta densidad, objetiva, coherente y de baja incertidumbre en comparación con el logeo de sondajes.
- Análisis no destructivo.
- Maximiza el valor de los gastos de perforación.
- Es posible obtener resultados prácticamente en tiempo real.
- Imágenes digitales continuas y de alta resolución.
- Las muestras se miden en sus bandejas originales.
- Ayuda a tener una visión general de la mineralogía y su efecto en el negocio geo-minero-metalúrgico.
- Presenta una librería virtual de espectros de minerales que permite el entrenamiento de nuevos profesionales.



Figura 2.18 Sistema Hylogger-3 (CSIRO CHILE-AMTC, Proyecto 4.2 Caracterización Mineralógica Avanzada, 2016)

Comercializado actualmente por FLSmidth, la tecnología del Hylogger comienza con su prototipo original el año 2001 y a la fecha se encuentra en su tercera versión. Esta tercera versión se aprecia en la Figura 2.18, a diferencia de sus antecesoras incorpora el detector de infrarrojo termal (TIR), no es comercializable actualmente y presenta las siguientes características (Whitbourn et al., 2013):

- Muestreo robótico semi automático con dos espectrómetros uno corresponde al VNIR-SWIR y el otro al TIR, ambos alcanzan a trabajar en el infrarrojo.
- Los espectrómetros tienen una resolución espectral de 4-10 [nm] para el caso del VNIR-SWIR y de 5 [nm] en el caso del TIR.
- Rango de longitud de onda entre 400-2500 [nm] en 526 canales y rango de longitud de onda entre 6000-14500 [nm] en 341 canales.
- Imagen digital de ~0.1-0.2 [mm] de resolución.
- Procesamiento de ~ 700-800 [m] de sondaje por día, dependiendo del intervalo de muestreo usado.
- Resultados procesables en el software TSG (The Spectral Geologist).

A continuación, se muestra en la Figura 2.19, una comparación en cuanto a las características presentadas del Hylogger-3 en relación a las tecnologías similares existentes en el mercado.

DEVELOPER		CSIRO		CORESCAN	GEOTEK	SISUROCK
Model		HyLogger 1	HyLogger 3	HCI-3	MSCL-S	SisuROCK
Spectral Range	VNIR, nm	400 - 2500	400 - 2500	450 - 2500	Depend on the different sensors and configuration	400 - 2500
	SWIR, nm					8000 - 12000
	TIR, nm	N.A.	6000 - 14500	N/A		2,8 (VNIR); 10 (SWIR); 100 (TIR)
Spectral Resolution (min, max), nm		4 - 10	4 - 10 (VNIR,SWIR); 35 (TIR)	4		
Pixel Size on Target (mm)		8	8	0.5 - 5	N.I.	0,2 - 2 mm (SWIR) 0,09 - 0,64 mm (VNIR) 1,7 mm (TIR)
Image Resolution		0,2 mm	0,2 mm	60 µm	25 µm	0,016 - 0,16 mm
Max Core Scan Rates (m/d)		200 - 300	700	1000	20 m/h (resolution 50 µm)	1200
Chip Logging rates (m/d)		3000	3000	N.I.	N.I.	N.I.
Sample preparation		Minimal sample preparation, samples must be free of dust				
Processing and Data Interpretation		The Spectral Geologist software (TSG)	The Spectral Geologist software (TSG)	Coreshed	N.I.	BIL file format (ENVI/Evince compatible)

Figura 2.19 Tecnologías espectrales en el mercado (CSIRO CHILE-AMTC, Proyecto 4.2 Caracterización Mineralógica Avanzada, 2016)

En cada rango del espectro electromagnético se pueden detectar distintos tipos de minerales, los que corresponden a los siguientes:

- Visible e infrarrojo cercano (VNIR-SWIR):
  - Óxidos de Fe: hematita, goethita, magnetita masiva.
  - Grupo AlOH: paragonita, moscovita, fengita, illita, pirofilita, caolinita, halosita, dickita, gibbsita, montmorillonita, paligorskita.
  - Sulfatos: alunita, jarosita, yeso.
  - Grupo FeOH.
  - Grupo MgOH: cloritas, biotita, flogopita, antigorita, tremolita, actinolita-talco, hornblenda, brucita, serpentinas.
  - Carbonatos: calcita, dolomita, dolomita-Fe, magnesita, ankerita, siderita, malaquita.
  - Topacio, epidota y turmalinas.
- Infrarrojo termal (TIR):
  - Silicatos anhidros: cuarzo, sílice, feldespatos y olivinos.
  - Carbonatos.

- Micas y caolinitas.
- Grupo Feldespato.
- Grupo Piroxenos.
- Granates.
- Zeolitas.

A modo de resumen se tiene la Figura 2.20 y Figura 2.21, para los rangos VNIR, SWIR y TIR (LWIR) para su análisis en detalle.

	Structure	Mineral Group	Example	VNIR Response	SWIR Response	LWIR Response	
Silicates	Inosilicates	Amphibole	Actinolite	Non-Diagnostic	Good	Moderate	
		Pyroxene	Diopside	Good	Moderate	Good	
	Cyclosilicates	Tourmaline	Elbaite	Non-Diagnostic	Good	Moderate	
	Nesosilicates	Garnet	Grossular	Moderate	Non-Diagnostic	Good	
		Olivine	Forsterite	Good	Non-Diagnostic	Good	
	Sorosilicates	Epidote	Epidote	Non-Diagnostic	Good	Moderate	
	Phyllosilicates	Mica	Muscovite	Non-Diagnostic	Good	Moderate	
		Chlorite	Clinochlore	Non-Diagnostic	Good	Moderate	
		Clay Minerals	Illite	Illite	Non-Diagnostic	Good	Moderate
			Kaolinite	Kaolinite	Non-Diagnostic	Good	Moderate
	Tectosilicates	Feldspar	Orthoclase	Orthoclase	Non-Diagnostic	Non-Diagnostic	Good
			Albite	Albite	Non-Diagnostic	Non-Diagnostic	Good
		Silica	Quartz	Quartz	Non-Diagnostic	Non-Diagnostic	Good

Figura 2.20 Rango de detección de grupos de minerales en silicatos (Harris, 2014).

	Structure	Mineral Group	Example	VNIR Response	SWIR Response	LWIR Response
Non-Silicates	Carbonates	Calcite	Calcite	Non-Diagnostic	Moderate	Good
		Dolomite	Dolomite	Non-Diagnostic	Moderate	Good
	Hydroxides		Gibbsite	Non-Diagnostic	Good	Moderate
	Sulphates	Alunite	Alunite	Moderate	Good	Moderate
			Gypsum	Non-Diagnostic	Good	Good
	Borates		Borax	Non-Diagnostic	Moderate	Uncertain
	Halides	Chlorides	Halite	Non-Diagnostic	Uncertain	Uncertain
	Phosphates	Apatite	Apatite	Moderate	Non-Diagnostic	Good
	Hydrocarbons		Bitumen	Uncertain	Moderate	Uncertain
	Oxides	Hematite	Hematite	Good	Non-Diagnostic	Non-Diagnostic
		Spinel	Chromite	Non-Diagnostic	Non-Diagnostic	Non-Diagnostic
Sulphides		Pyrite	Non-Diagnostic	Non-Diagnostic	Non-Diagnostic	

Figura 2.21 Rango de detección de grupos de minerales para no silicatos (Harris, 2014).

Otro aspecto a destacar, es el uso del software The Spectral Geologist o TSG por sus siglas (Berman et al, 2011), cuya principal característica es que convierte información espectral en información geológica de interés. El software, del cual se muestran algunas de las interfaces en la Figura 2.22 y Figura 2.23, permite analizar para una misma muestra, su registro espectral en simultáneo con su imagen digital, permite obtener rápidamente estadísticas globales, así como también procesar las firmas espectrales, o incluso utilizar una versión de identificación de minerales mediante la librería propia del programa (TSA).

En el caso del análisis del espectro, permite la creación de polinomios que se ajustan a las características (peaks o valles) del patrón espectral, denominados escalares, modalidad utilizada en el presente trabajo y explicada con posterioridad.

Finalmente dispone de una aplicación de regresión de mínimos cuadrado parciales, PLS por sus siglas en inglés, que permite introducir información de composición mineral, proveniente de otros métodos, como, por ejemplo: QEMSCAN o XRD-cuantitativo y de este modo ajustar los valores registrados por el Hylogger-3 correlacionando la reflectancia con la composición, permitiendo transformar los datos mineralógicos cualitativos en cuantitativos.

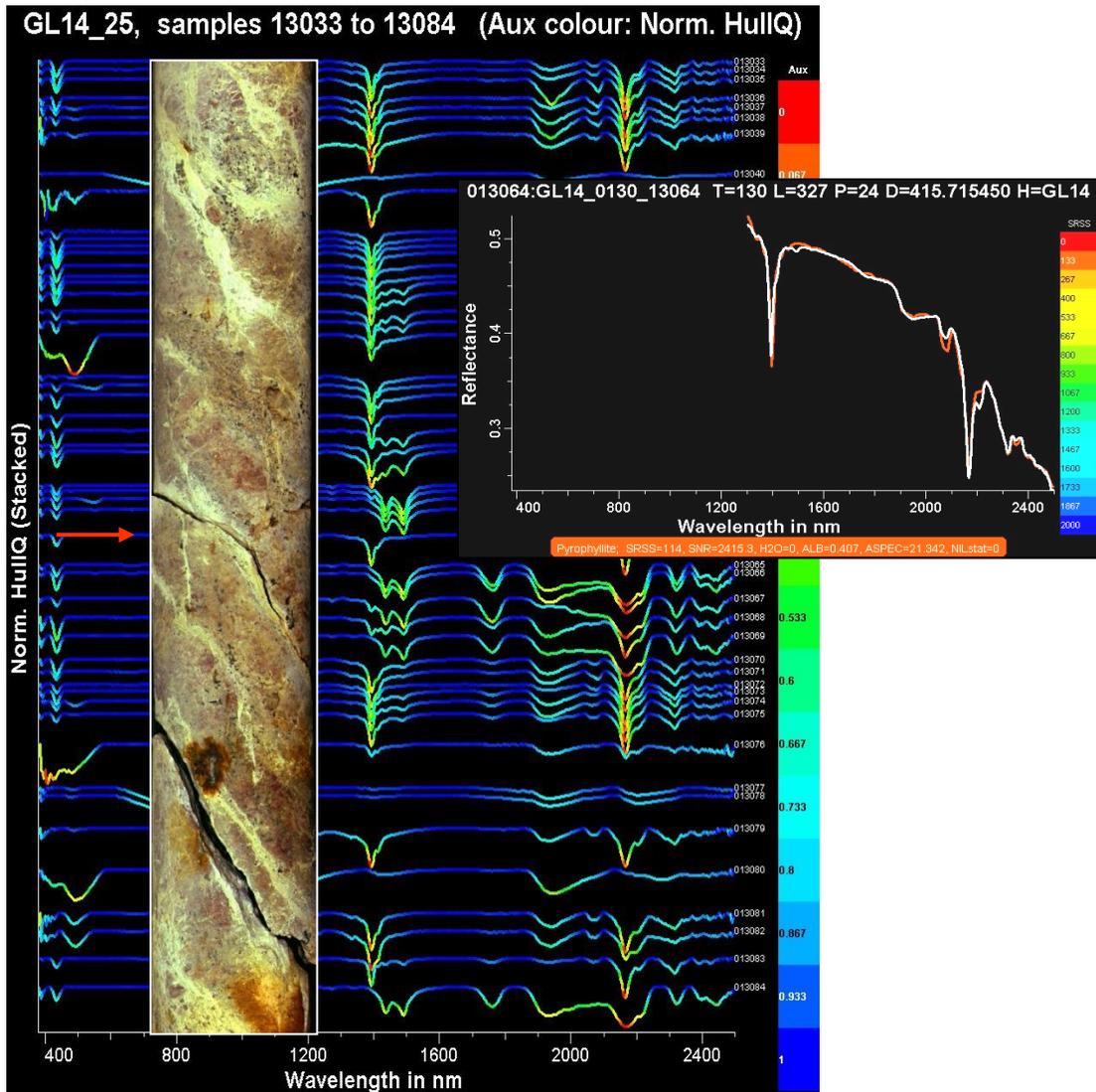


Figura 2.22 Visualización de imagen digital junto a espectro de una muestra (Huntington, 2013).

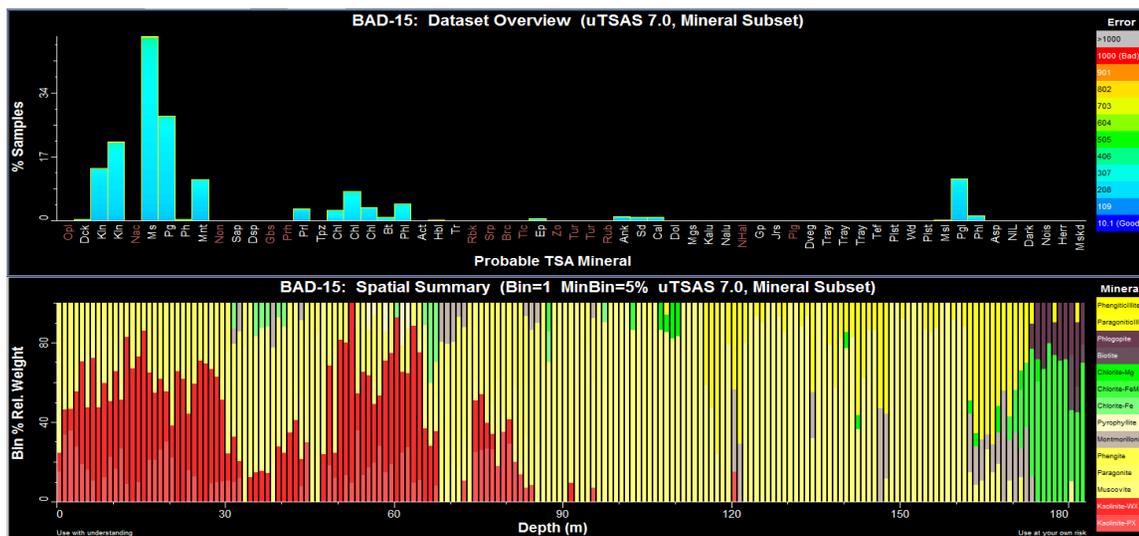


Figura 2.23 Interfaz general TSG, resumen estadísticas totales (Huntington, 2013).

### 2.3.2 ANÁLISIS MEDIANTE QEMSCAN

El análisis mineralógico semicuantitativo entrega el porcentaje relativo de las especies minerales contenidas en la muestra. Es posible efectuar el estudio de esta propiedad con diversas tecnologías, sin embargo, a continuación, se detalla el Microscopio Electrónico de Barrido, ya que corresponde al equipo del cual proviene la información utilizada en el presente trabajo, en particular de la tecnología QEMSCAN.

QEMSCAN es el acrónimo en inglés de Evaluación Cuantitativa de Minerales mediante Microscopio Electrónico de Barrido, un sistema automatizado que permite realizar análisis químicos y mapas minerales de alta resolución.

Funciona gracias a un SEM (Scanning Electron Microscope) y cuatro espectrómetros de rayos X. Al incidir el haz de electrones del SEM sobre la muestra se generan backscattered electrons (BSE) que son medidos para localizar las partículas individuales dentro de ella, posterior a esto, se realiza un barrido sobre la superficie en una grilla de espaciamiento definido, con una resolución entre 0.2 [µm] y 25 [µm]. El haz de electrones genera la emisión de rayos X producto de la liberación de energía emitida por los electrones de alta energía dentro del elemento, que a su vez ocupan los espacios dejados por electrones de niveles energéticos más bajos los que son sacados fuera de su posición. Los espectros de rayos X obtenidos son comparados con una base de datos y de esta forma se identifican todas las fases minerales presentes en cada espacio de la grilla (Ayling et al., 2012).

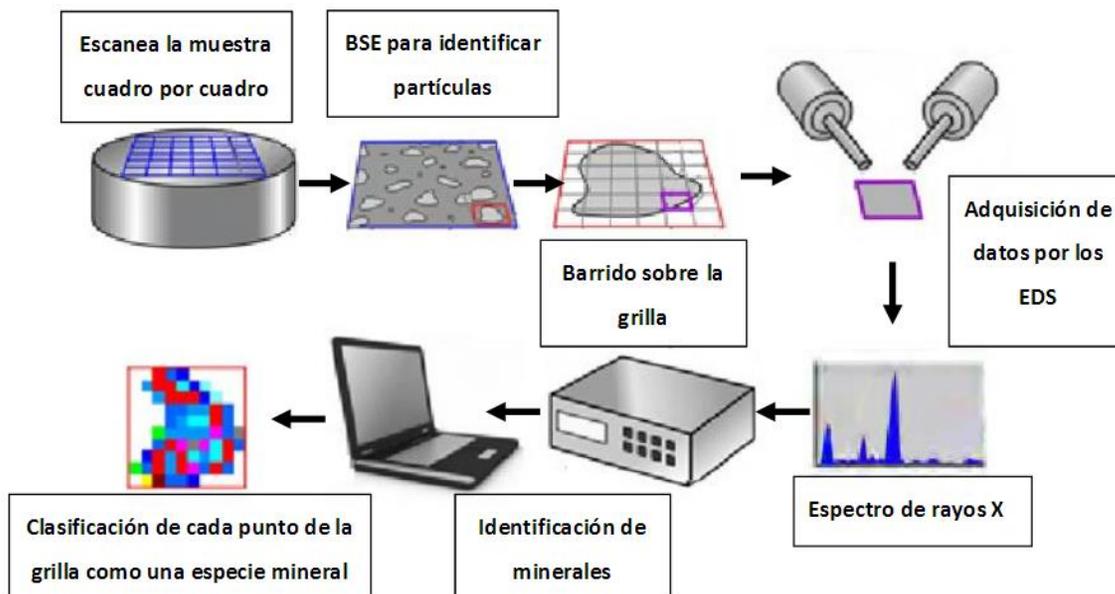


Figura 2.24 Diagrama de funcionamiento del QEMSCAN (Ayling et al., 2012)

El equipo entrega la información de los minerales solicitados previamente, entregando a partir de estos, la composición de la muestra analizada.

Con respecto al tipo de muestras que se procesan, normalmente se analizan muestras en briquetas, con material finamente molido que debe ser estable en condiciones cercanas al vacío, estas se sitúan sobre una superficie idealmente plana, cubierta por una fina capa con propiedades de conductividad eléctrica (por ejemplo, carbón). Los resultados de este análisis fueron entregados por la empresa AMSA.

### 2.3.3 ANÁLISIS ELEMENTAL

Este análisis fue realizado mediante la técnica de plasma de acoplamiento inductivo (ICP) junto a un espectrofotómetro de emisión óptica, constituyendo de este modo el análisis de espectrometría de plasma (ICP-OES), datos fueron entregados por la empresa AMSA.

#### 2.3.3.1 ESPECTROMETRÍA DE PLASMA (ICP-OES)

Esta técnica está basada en la emisión espontánea de fotones desde los iones y átomos que han sido previamente excitados. La muestra puede ser introducida directamente al instrumento si se trata de algún líquido o gas, pero en el caso de ser sólida, debe ser preparada de tal forma que se presente en forma de solución. La solución de muestra es convertida en un aerosol y se dirige al canal central del plasma. En su núcleo, el *inductively coupled plasma* (ICP) mantiene temperaturas de aproximadamente 10,000K lo que produce que el aerosol sea llevado a estado plasmático. Los elementos a analizar son liberados como átomos libres, promoviéndolos a estados excitados para luego emitir fotones y volver a su estado base. Las longitudes de onda de los fotones se utilizan para determinar los elementos

de los cuales fueron originados. El número total de fotones es directamente proporcional a la concentración del elemento que los originó en la muestra.

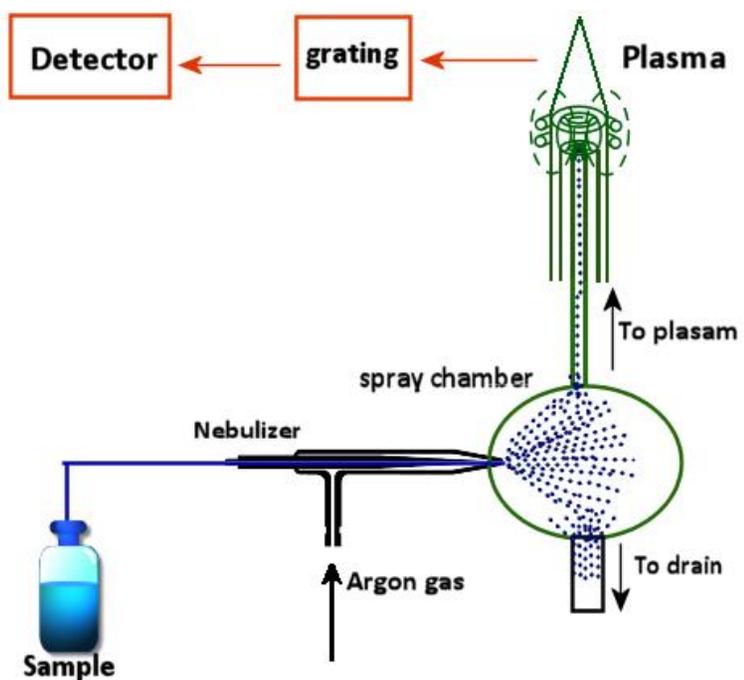


Figura 2.25 Diagrama ICP-OES

## 2.4 INDICADOR

---

Se define un indicador o *proxy*, como una construcción matemática sobre una o más variables auxiliares que guardan una buena correlación espacial y sugieren la presencia de la variable de estudio.

El indicador a construir, buscará determinar la probabilidad de ocurrencia de mineralización de molibdeno en determinadas zonas del yacimiento, utilizando para esto la información de minerales de ganga.

Los datos disponibles para construir el indicador corresponden a los presentados con anterioridad, de este modo, se utiliza información del tipo:

- Hiperespectral (Hylogger-3)
- Mineralógica (QEMSCAN)
- Elemental (ICP-OES)

A modo de ejemplo, a continuación, se muestra en la Figura 2.26 la relación existente entre las leyes de un mineral de oro y los minerales asociados que identifica la información hiperespectral, relación que se buscará identificar para el caso del molibdeno (Quigley et al., 2013).

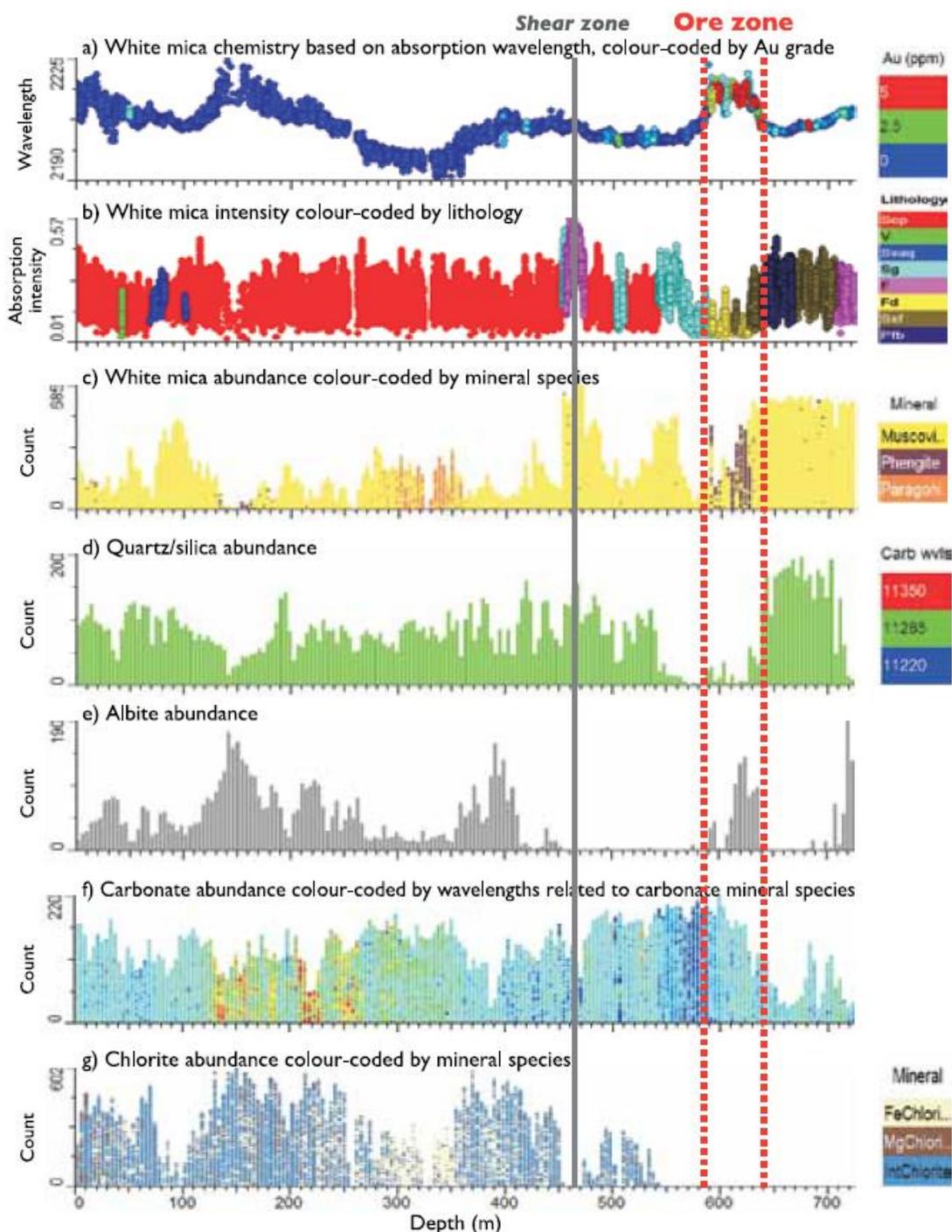


Figura 2.26 Ejemplo de la relación entre la información hiperespectral y el mineral de oro en Kanowna Belle (Quigley, et al., 2013).

## 2.4.1 CONSTRUCCIÓN DEL INDICADOR

La forma de relacionar la información disponible, para obtener la probabilidad de mineralización en el espacio, se realiza según una serie de técnicas que permiten agrupar la información para luego relacionarla. En el presente estudio se detalla la técnica de las probabilidades condicionales usando el Teorema de Bayes, debido a que

es la utilizada en este trabajo debido a su simpleza tanto matemáticamente, como de cómputo.

### **2.4.1.1 PROBABILIDADES CONDICIONALES**

El concepto de probabilidad condicional puede definirse con diversos grados de formalización. Intuitivamente se puede decir que la probabilidad condicional  $P(A/B)$  de un suceso “A” dado otro suceso “B”, es la probabilidad de que ocurra “A”, sabiendo que “B” se ha verificado.

Desde un punto de vista más formal, se define mediante la expresión:

$$P(A = a|B = b) = \frac{P(B = b|A = a) * P(A = a)}{P(B = b)}$$

*Ecuación 2.1 Teorema de Bayes*

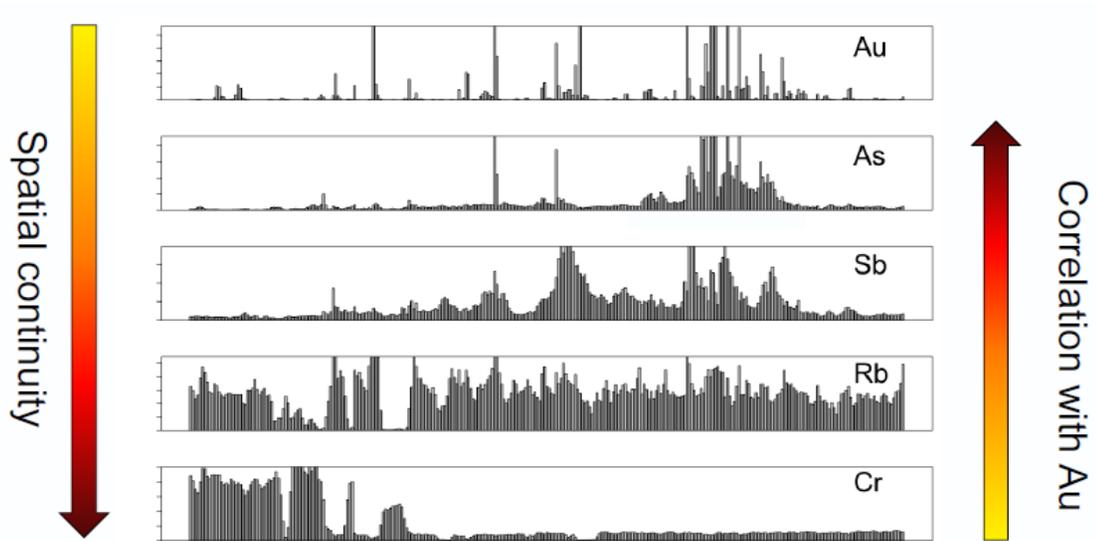
Donde, cada término se denomina:

- $P(A = a|B = b)$ : *A posteriori*
- $P(B = b|A = a)$ : *Verosimilitud*
- $P(A = a)$ : *A priori*
- $P(B = b)$ : *Evidencia*

De este modo se obtiene un valor que fluctúa entre 0 y 1, que normaliza la probabilidad “A priori”, utilizando la experiencia de la evidencia y ponderándola por la verosimilitud.

### **2.4.1.2 EJEMPLO DE INDICADOR**

A continuación, se muestra a modo de ejemplo, la adaptación del Teorema de Bayes sobre datos geoquímicos, para obtener la probabilidad de mineralización de oro. En la figura se aprecia como el oro presenta un marcado efecto pepita con una correlación bastante notoria con la concentración de arsénico y antimonio, por otro lado, la continuidad de la variable de estudio es bastante baja y es mayor si se consideran elementos tales como el rubidio o el cromo (Hill et al., 2014).



$$p(Au \geq v | G1, G2, G3...) = \frac{p(G1, G2, G3... | Au \geq v)p(Au \geq v)}{p(G1, G2, G3...)}$$

Figura 2.27 Ejemplo de datos geoquímicos en un indicador de oro (Hill et al., 2014).

# CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

La metodología propuesta se divide en una serie de etapas que se presentan en el esquema de la Figura 3.1.

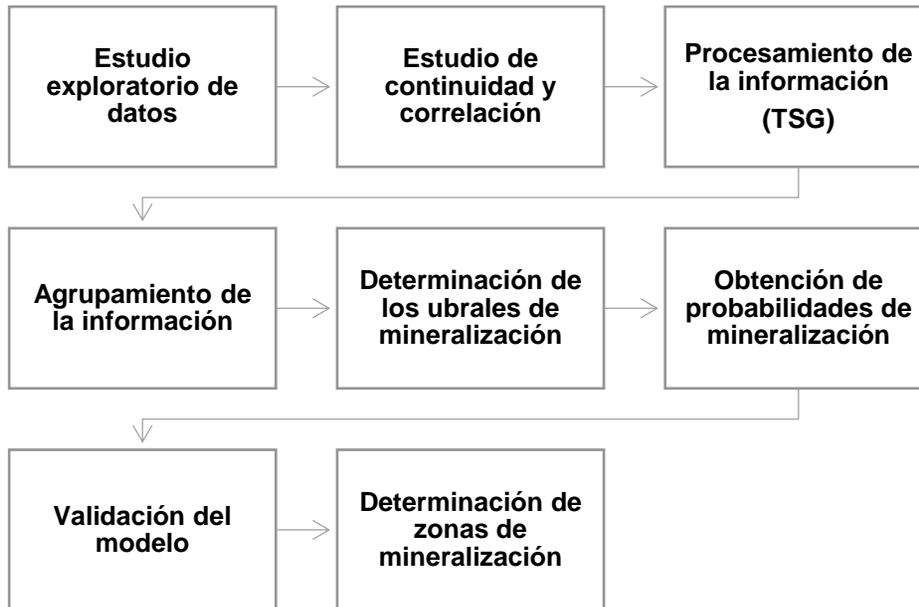


Figura 3.1 Esquema de la metodología de trabajo

Cada etapa de la metodología presentada se resume a continuación:

- Estudio exploratorio de datos: Etapa que busca estudiar la cantidad, tipo y ubicación de los datos disponibles, con el fin de analizar las variables de interés, definir zonas de estudio y anticipar dificultades en las etapas posteriores del trabajo con los datos.
- Estudio de continuidad y correlación: Etapa que consiste en analizar los datos para saber el grado de asociación entre dos o más variables, así como el grado de continuidad espacial entre cada dato por sí mismo, para así generar un indicador con tales características.
- Procesamiento de la información espectral: Utilizando el software TSG se realiza el tratamiento de información hiperespectral, de esta forma se traspasa la información disponible a un soporte escalar, concepto que permitirá condensar las características de las firmas espectrales. Por otro lado, la información elemental y la obtenida del análisis QEMSCAN se utilizarán sin necesidad de pasar por este procesamiento, por lo que no se trabajará con ellas en esta parte.
- Agrupamiento de la información: Generación de categorías con el fin de discretizar la información para su posterior estimación y aplicación del Teorema de Bayes.

- Determinación de umbrales de mineralización: Se define la concentración a la cual se considera que existe mineralización de molibdeno, así como la probabilidad de mineralización que la identifica, con esto se podrán determinar zonas de mineralización.
- Obtención de probabilidades de mineralización: Cálculo y asignación de probabilidad de las muestras, a partir de la creación de un programa para ellos, considerando la teoría presentada en antecedentes y las variables de estudio que se elijan en las etapas previas.
- Validación del modelo: Aplicación de técnicas de cuantificación del error asociado del indicador, a modo de evaluar la construcción realizada y los resultados obtenidos. En este estudio se utiliza la validación cruzada, como técnica de validación, por el número de muestras y la naturaleza de la técnica utilizada.
- Determinación de zonas de mineralización: Agrupación de resultados de probabilidades en el espacio, pasando de carácter puntuales a propuesta para establecer zonas de mineral.

### 3.1 ESTUDIO EXPLORATORIO DE DATOS

Para estudiar una o varias variables regionalizadas conocidas vía una toma de muestra, conviene realizar un estudio exploratorio de los datos disponibles, el cual tiene tres objetivos (Emery, 2013):

1. Analizar la cantidad y la ubicación de los datos disponibles.
2. Definir zonas de estudio. Una división del campo en varias sub-zonas puede ser relevante si uno observa cambios abruptos en la distribución espacial de valores, o si la geología del fenómeno lo indica.
3. Anticipar dificultades o problemas que puedan surgir en la fase de estimación local (por ejemplo, presencia de valores atípicos que se destacan de aquellos de los datos vecinos).

La información disponible corresponde a 144 bandejas muestras de rechazo de 300 [gr] provenientes de 57 sondajes, distribuidas en compósitos de 2 y 6 [m] de largo, tal y como lo muestra la Tabla 3.1, haciendo un total de 384 [m] de muestra.

Tabla 3.1 Muestras según largo de compósito

Largo compósito [m]	N° de muestras
2	120
6	24
Total	144

#### 3.1.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS

Para cada una de las muestras se dispone de la siguiente información de identificación:

Tabla 3.2 Información por muestra

Característica	Información
Identificación de la muestra	Nombre sondaje
	Coordenadas espaciales del punto medio de compósito
	Largo del compósito

Con esta información, es posible cruzar el modelo de alteraciones presentado en el apartado anteriores, con el fin de relacionar el tipo de alteración con las muestras disponibles. De este modo, se tiene la Figura 3.2, en donde se aprecia la ubicación de las muestras entre las alteraciones potásica rica en biotita (KBT) y sericítica (SC).

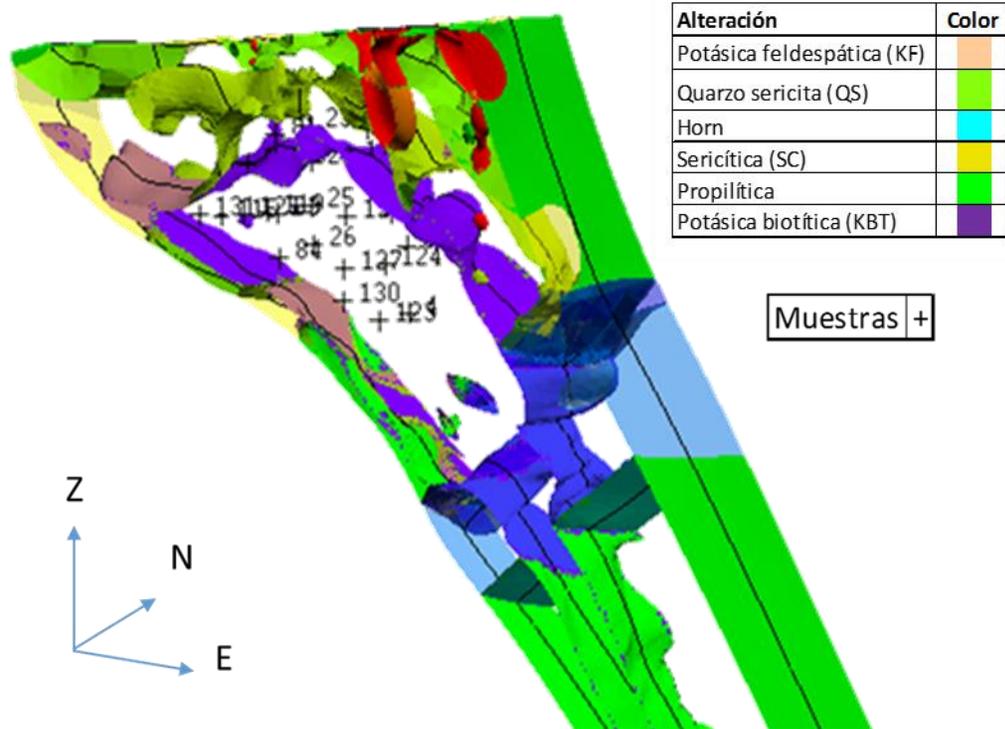


Figura 3.2 Sección de 200 [m] de grosor del perfil 7.456.170 N de modelo de alteraciones

Por otro lado, el modelo de litologías solo presenta una litología para todas las muestras, la que corresponde a la litología de Tobas Andesíticas, por lo que no existe diferenciación en ese aspecto de la información disponible.

### 3.1.2 ANÁLISIS MINERALÓGICO

En relación al análisis mediante la tecnología QEMSCAN, se busca en un inicio identificar la concentración de 47 especies minerales con respecto al total de la muestra, sin embargo, no en todas las especies buscadas se encuentra una concentración considerable del mineral, de este modo, se obtienen los resultados para la alteración KBT, SC y para el total de datos que se muestran en la Tabla 3.3, Tabla 3.4 y Tabla 3.5 respectivamente, tablas en que se marcan en color gris los minerales con una concentración igual o mayor a los 0.1%, valores que de manera complementaria, se muestran en los gráficos de la Figura 3.3, Figura 3.4 y Figura 3.5, respectivamente.

Tabla 3.3 Resultados análisis QEMSCAN KBT

Mineral	Porcentaje
Cuarzo	23.2
Albita	16.9
Feldespato Potásico	13.4
Biotita	11.1
Anhidrita/Yeso	8.6
Plagioclasa	7.1
Muscovita/Sericita	6.0
Clorita	3.6
Magnetita-Hematita	2.5
Arcillas	1.2
Turmalina	1.1
Calcopirita	1.0
Ilmenita	0.9
Rutilo	0.9
Pirita/Pirrotita	0.5
Limonita	0.4
Apatito	0.4
Calcite	0.3
Bornita	0.2
Ankerita	0.1
Siderita	0.1
Titanita	0.1
Copper Wad-Pitch	0.1
Otros Silicatos	0.0
Grosularia	0.0
Otros	0.0
Other Sulfuros	0.0
Corindón	0.0
Zircón	0.0
Molibdenita	0.0
Calcosina	0.0
Epidota	0.0
Tennantita/Enargita	0.0
Andradita	0.0
Andalucite/Sillimanita	0.0
Actinolita	0.0
Óxidos de Cu	0.0
Talco/Serpentina	0.0
Covelina	0.0
Magnesita	0.0
Spessartine	0.0
Vivianita	0.0
Piropo	0.0
Uvarovita	0.0
Almandita	0.0
Uvarovita	0.0

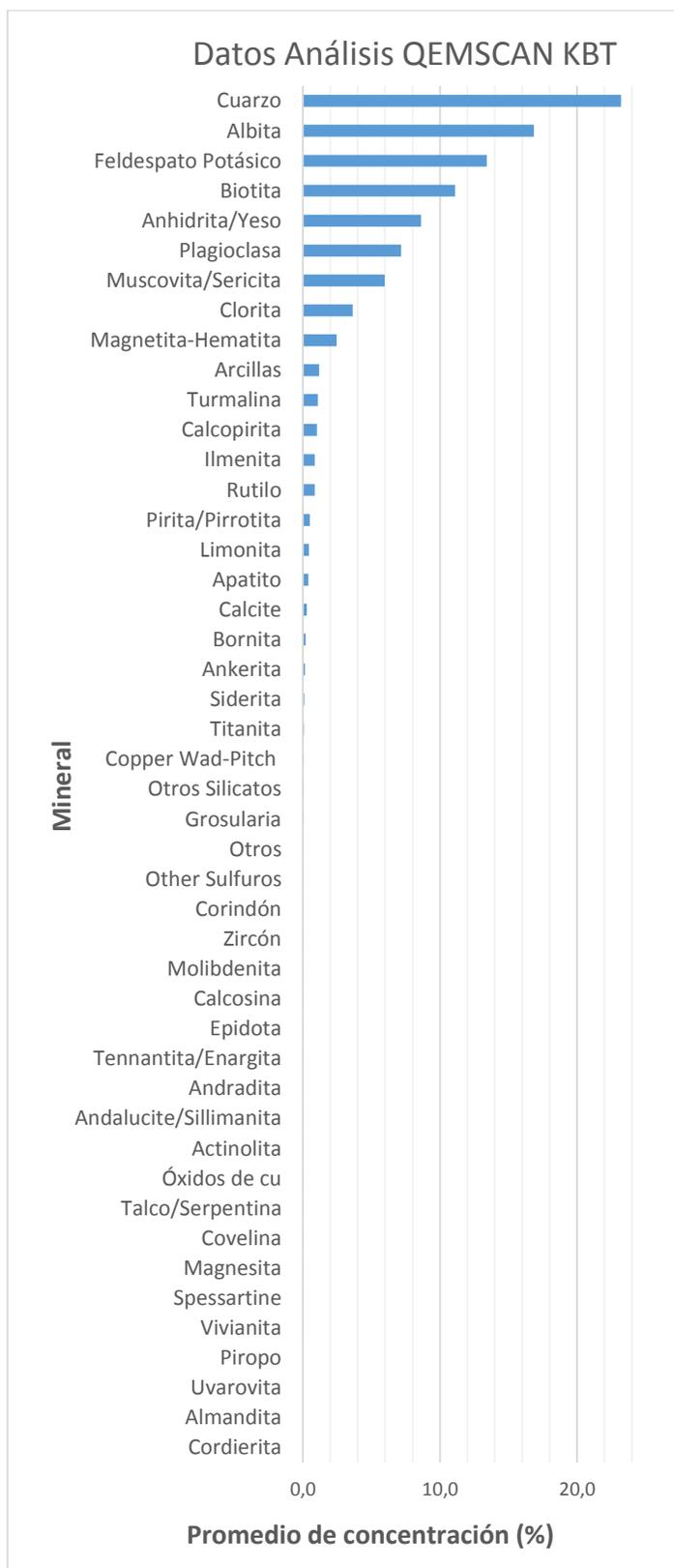


Figura 3.3 Resultados análisis QEMSCAN KBT

Tabla 3.4 Resultados análisis QEMSCAN SC

Mineral	Porcentaje
Cuarzo	24.4
Muscovita/Sericita	16.9
Albita	13.1
Anhidrita/Yeso	10.5
Clorita	7.0
Biotita	5.9
Feldespató Potásico	4.7
Plagioclasa	4.1
Magnetita-Hematita	2.6
Pirita/Pirrotita	1.8
Turmalina	1.7
Ilmenita	1.7
Arcillas	1.3
Rutilo	1.3
Calcopirita	0.8
Limonita	0.5
Apatito	0.5
Calcite	0.3
Siderita	0.2
Ankerita	0.2
Titanita	0.1
Otros Silicatos	0.1
Copper Wad-Pitch	0.1
Grosularia	0.0
Zircón	0.0
Otros	0.0
Bornita	0.0
Other Sulfuros	0.0
Corindón	0.0
Tennantita/Enargita	0.0
Molibdenita	0.0
Actinolita	0.0
Epidota	0.0
Andalucite/Sillimanita	0.0
Andradita	0.0
Calcosina	0.0
Talco/Serpentina	0.0
Óxidos de Cu	0.0
Magnesita	0.0
Spessartine	0.0
Covelina	0.0
Vivianita	0.0
Piropo	0.0
Uvarovita	0.0
Almandita	0.0
Cordierita	0.0

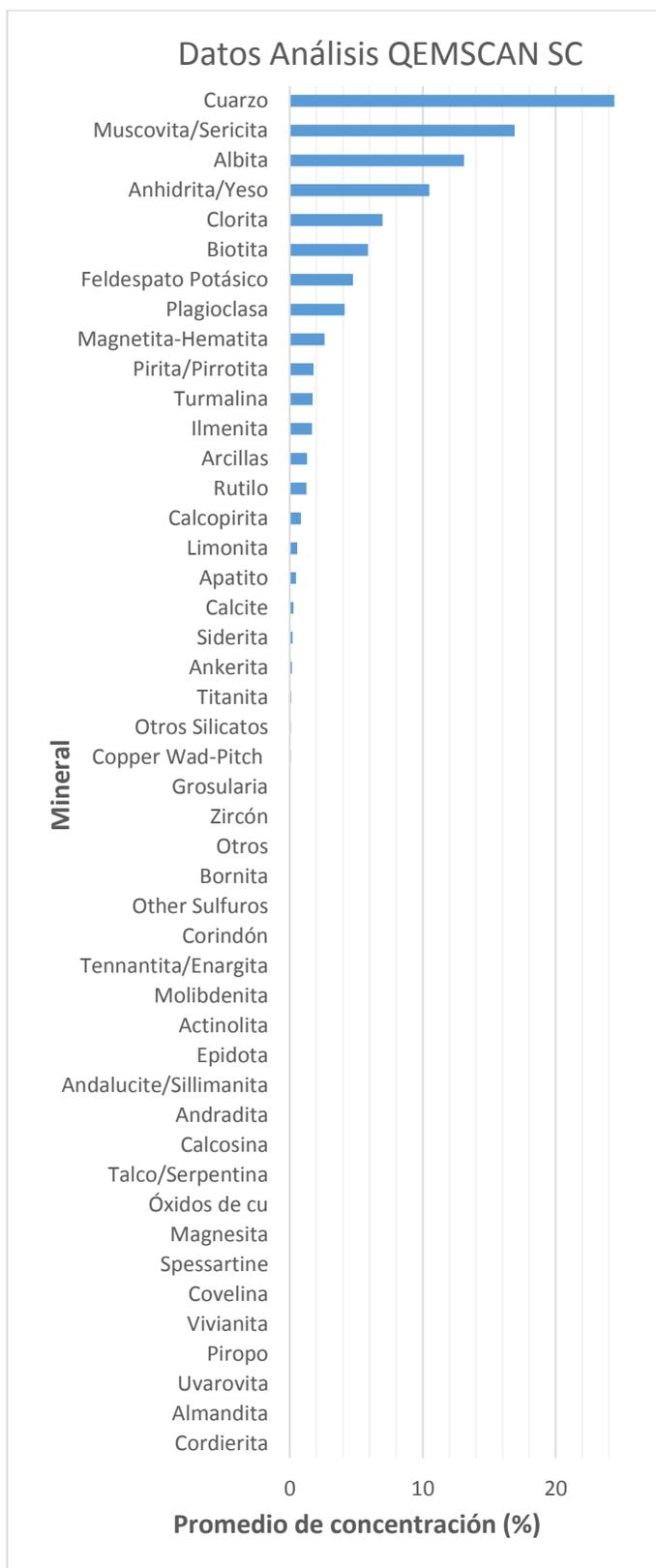


Figura 3.4 Resultados análisis QEMSCAN SC

Tabla 3.5 Resultados análisis QEMSCAN

Mineral	Porcentaje
Cuarzo	23.6
Albita	15.7
Feldespato Potásico	10.8
Biotita	9.5
Muscovita/Sericita	9.3
Anhidrita/Yeso	9.2
Plagioclasa	6.2
Clorita	4.6
Magnetita-Hematita	2.5
Turmalina	1.3
Arcillas	1.2
Ilmenita	1.1
Rutilo	1.0
Calcopirita	1.0
Pirita/Pirrotita	0.9
Limonita	0.5
Apatito	0.4
Calcite	0.3
Bornita	0.1
Ankerita	0.1
Siderita	0.1
Titanita	0.1
Copper Wad-Pitch	0.1
Otros Silicatos	0.1
Grosularia	0.0
Otros	0.0
Zircón	0.0
Otros Sulfuros	0.0
Corindón	0.0
Molibdenita	0.0
Tennantita/Enargita	0.0
Epidota	0.0
Calcosina	0.0
Andradita	0.0
Andalucite/Sillimanita	0.0
Actinolita	0.0
Talco/Serpentina	0.0
Óxidos de Cu	0.0
Magnesita	0.0
Covelina	0.0
Espesartina	0.0
Vivianita	0.0
Piropo	0.0
Uvarovita	0.0
Almandita	0.0
Cordierita	0.0

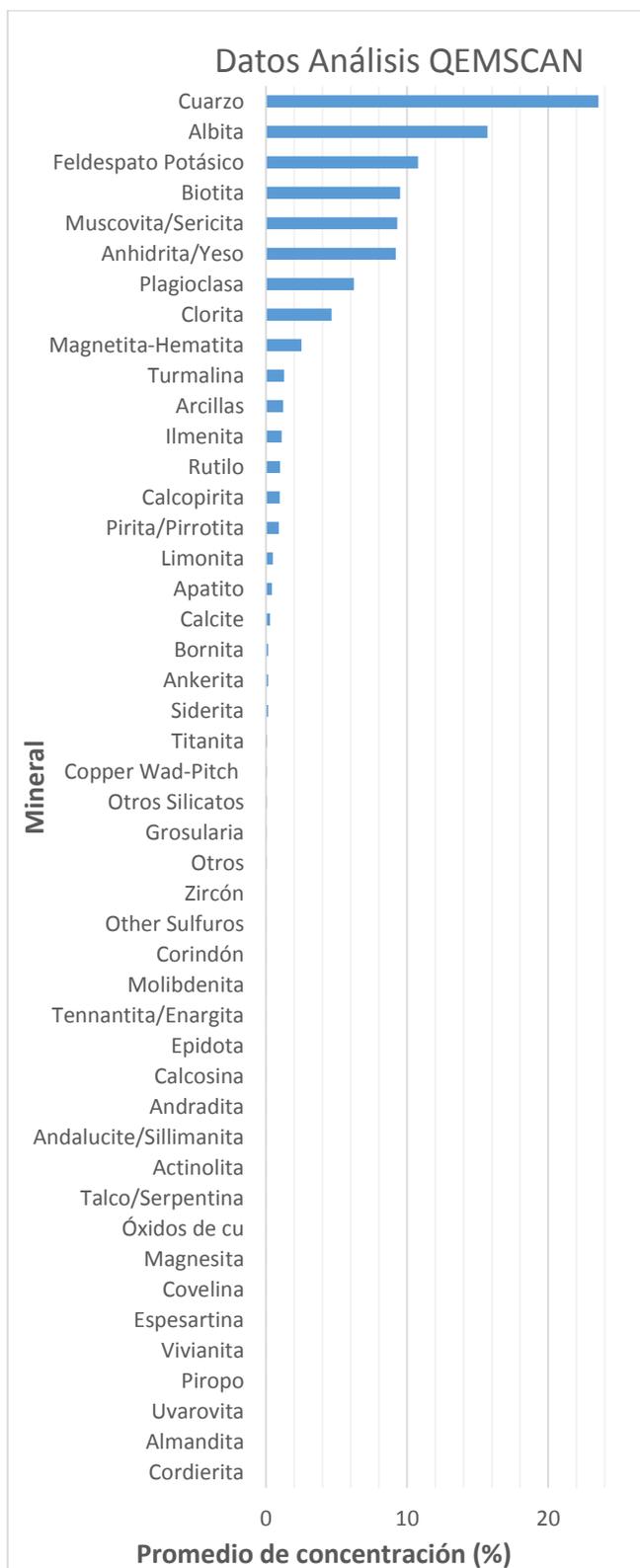


Figura 3.5 Resultados análisis QEMSCAN

### 3.1.3 ANÁLISIS ELEMENTAL

En cuanto al análisis del ICP-OES, análisis proporcionado por AMSA, se registran una serie de 34 elementos en las muestras.

Las concentraciones promedio obtenidas para la alteración KBT, SC y el total de muestras se ven reflejadas en los resultados de la Tabla 3.6, Tabla 3.7 y Tabla 3.8, respectivamente.

*Tabla 3.6 Resultados análisis ICP-OES para KBT*

<b>Concentración promedio de muestras según ICP-OES para KBT [ppm]</b>			
Al	68544	Zr	32.2
Fe	41411	Li	30.4
Ca	36795	As	24.5
S	29284	Pb	24.2
K	26575	Ga	19.4
Na	24665	Co	18.4
Mg	14701	La	17.2
Cu	4736	Y	15.8
Ti	3526	Sb	14.4
P	916	Sc	12.0
Mn	442.3	Nb	9.1
Ba	412.3	Ni	8.6
Sr	318.4	Te	5.8
Zn	170.1	W	5.1
Mo	127.2	Cd	3.5
V	117.7	Ag	2.0
Cr	39.9	Be	1.0

Tabla 3.7 Resultados análisis ICP-OES para SC

<b>Concentración promedio de muestras según ICP-OES para SC [ppm]</b>			
Al	71190.9	As	61.6
Fe	50179.5	Pb	45.0
Ca	40520.5	Li	37.2
S	33902.3	Zr	33.5
K	24763.6	Cr	26.2
Na	19136.4	Co	22.3
Mg	16902.3	Ga	21.0
Ti	3354.5	La	16.3
Cu	3159.1	Y	15.3
P	1068.2	Sc	13.0
Mn	547.8	Ni	12.0
Sr	310.0	Nb	10.4
Ba	272.4	W	7.3
Zn	270.2	Te	6.4
V	136.5	Cd	5.0
Sb	131.2	Ag	2.2
Mo	116.0	Be	1.1

Tabla 3.8 Resultados análisis ICP-OES

<b>Concentración promedio de muestras según ICP-OES [ppm]</b>			
Al	69352.8	Cr	35.7
Fe	44090.3	As	35.7
Ca	37933.3	Zr	32.6
S	28813.9	Li	32.5
K	27902.8	Pb	30.5
Na	22975.7	Ga	19.9
Mg	15373.6	Co	19.5
Cu	4254.2	La	16.9
Ti	3473.6	Y	15.6
P	962.5	Sc	12.3
Mn	474.6	Ni	9.6
Ba	369.5	Nb	9.5
Sr	315.8	Te	6.0
Zn	200.7	W	5.8
Mo	123.8	Cd	4.0
V	123.5	Ag	2.1
Sb	57.6	Be	1.1

### 3.1.4 ESTADÍSTICAS BÁSICAS

Es de particular interés una revisión de las condiciones de las muestras en relación a las leyes de molibdeno, así como su distribución en cuanto a las alteraciones que se

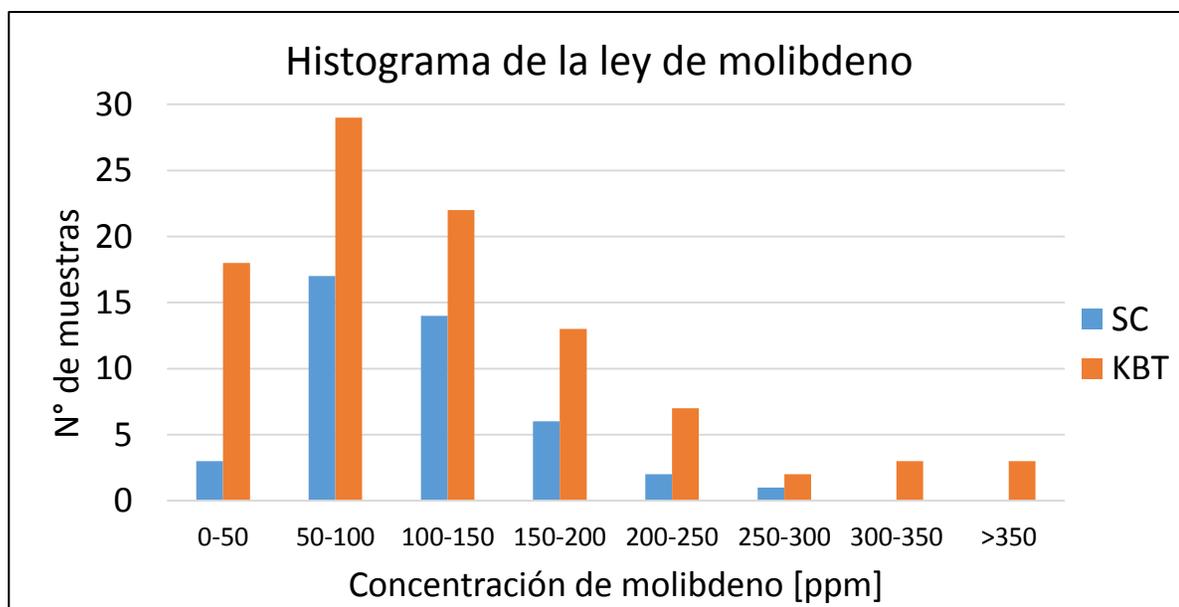
identifican. De este modo, se muestra en la Tabla 3.9 el número de muestras por alteración, el promedio de las leyes de molibdeno y su desviación estándar.

*Tabla 3.9 Estadísticas básicas de la ley de molibdeno en las muestras*

Alteración	N° Muestras	Ley Media [ppm]	Desviación Estándar [ppm]
SC	44	116	54
KBT	100	124	105

Se aprecia la mayoritaria presencia de muestras en la zona de alteración potásica rica en biotita (KBT), así como una mayor ley media de molibdeno en dicha zona, junto con una mayor desviación estándar de las muestras, por sobre la alteración sericítica (SC), valores que se obtuvieron gracias al análisis elemental vía ICP-OES.

Por otro lado, la distribución de la ley de molibdeno en las muestras, pareciera registrar la tradicional distribución log normal en ambas alteraciones, tal y como se observa en la Figura 3.6, presentando una distribución similar en ambos casos.



*Figura 3.6 Histograma de leyes de molibdeno por alteración*

## 3.2 ESTUDIO DE CONTINUIDAD Y CORRELACIÓN

---

### 3.2.1 ESTUDIO DE CONTINUIDAD ESPACIAL

Una de las hipótesis por confirmar en la realización del presente trabajo, corresponde al efecto pepita que presentaría la mineralización de molibdeno, para comprobar esta propiedad se hace necesario estudiar el comportamiento de las leyes de mineral en el espacio.

Dentro de las metodologías para cuantificar la continuidad espacial de las leyes y dado su amplio uso en la industria minera, se recurre a la herramienta del semivariograma para evaluar la continuidad espacial de la ley de molibdeno.

El semivariograma es una función que tiene por objetivo medir la variabilidad real de una determinada medición en el espacio. Lo que considera dicha herramienta es principalmente la diferencia entre pares de datos que se encuentren separados por una distancia  $h$ .

El semivariograma en el caso univariable se presenta a continuación.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E\{[Z(x) - Z(x + h)]^2\}$$

*Ecuación 3.1 Semivariograma teórico univariable*

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} [z(x) - z(x + h)]^2$$

*Ecuación 3.2 Semivariograma experimental univariable*

Donde la variable medida en terreno es  $z(x)$ , en este caso la ley de molibdeno en el punto  $x$ , mientras que  $|N(h)|$  corresponde al número de pares de datos para una separación dada por un vector  $h$ . Cabe destacar que la función semivariograma depende de la distancia, considerando un conjunto de datos en el espacio, de ahí que se diga que mide la variabilidad espacial (Gálvez, 2011).

Un ejemplo de la presencia del efecto pepita en la mineralización de molibdeno en pórfidos cupríferos se observa en el semivariograma experimental de molibdeno de la Mina Chuquicamata de la Figura 3.7, donde se observa la pérdida inmediata de la continuidad espacial, con un valor del efecto pepita cercano a la meseta del semivariograma, o en otras palabras, la zona en que el gráfico se hace asintótico y se estabiliza.

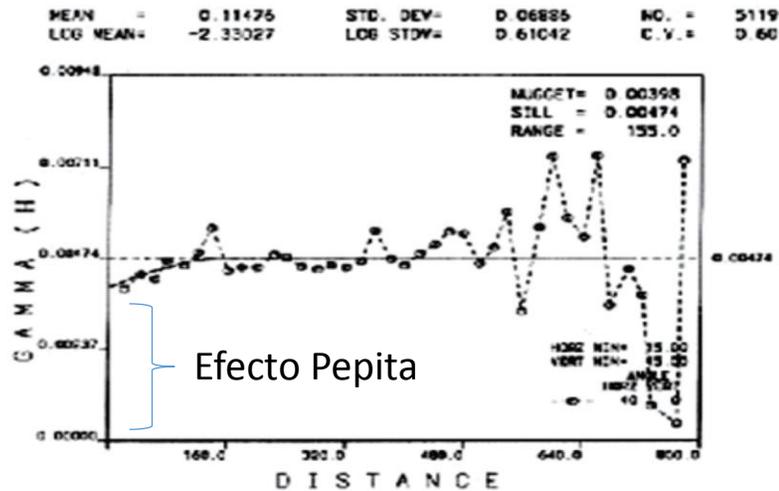


Figura 3.7 Semivariograma de molibdeno, caso Chuquicamata (Carrasco, 2010)

Para el presente caso de estudio y dada las características de las muestras disponibles, apreciables en la Tabla 3.10, no es posible identificar el impacto del cambio de las leyes en distancias cortas, debido a la gran separación de las muestras.

Tabla 3.10 Separación entre muestras

Separación	Distancia [m]
Promedio de la mínima distancia de separación entre muestras	75
Distancia de separación promedio entre muestras	435
Promedio de la máxima distancia de separación entre muestras	830

Pese a lo anterior, se obtiene una confirmación de la hipótesis gracias a los parámetros variográficos que entrega el semivariograma modelado de la ley de molibdeno en el yacimiento, tras el estudio desarrollado por AMSA para el proyecto de Esperanza Sur.

Se observa en la Figura 3.8, el semivariograma modelado normalizado de la ley de molibdeno en el depósito Esperanza Sur separado por las alteraciones estudiadas. En el semivariograma se grafica en rojo, la continuidad espacial del molibdeno en la dirección de mayor discontinuidad ubicada a un azimut de 60° y dip -76° para la alteración potásica, mientras que en color negro la alteración sericítica con una dirección de 63° de azimut y -28° de dip. En ambos casos se aprecia el marcado efecto pepita cercano al 35% de la meseta y mostrando un cambio de estructura antes de los 30 [m], lo que confirma la hipótesis en el yacimiento.

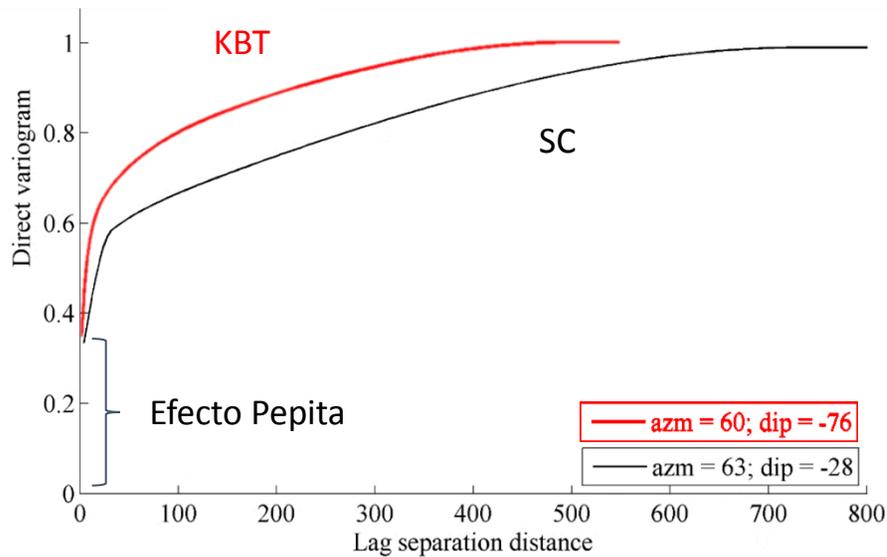


Figura 3.8 Semivariograma de molibdeno en yacimiento Esperanza Sur, según alteraciones (García, 2015)

### 3.2.2 ESTUDIO DE CORRELACIÓN ENTRE VARIABLES

Dentro de la basta información disponible para la creación del indicador, es importante relacionar los minerales identificados con los modelos geológicos disponibles, de modo de entregar causalidad al indicador por construir.

#### 3.2.2.1 ALTERACIÓN POTÁSICA

Según la literatura sobre los modelos porfíricos de cobre (Sillitoe, 2010), la biotita es el mineral de alteración predominante en las intrusiones porfíricas relativamente máficas, como por ejemplo andesitas o andesitas basálticas, así como en las rocas de caja, mientras que el feldespato potásico aumenta en abundancia en configuraciones más félsicas, granodioríticas a cuarzos monzoníticas. La plagioclasa sódica puede ser un mineral de alteración en ambos escenarios.

El mineral de calcopirita ± bornita en muchos depósitos de pórfido cuprífero se limita en gran parte a las zonas potásicas, con uno o más centros ricos en bornita, que caracterizan las partes centrales más profundas de muchos depósitos, zona conocida como el núcleo de alta ley. En algunos centros ricos en bornita, el estado de sulfuración es lo suficientemente bajo como para estabilizar incluso digenita ± calcosina, situación que no se aprecia en este depósito. Los núcleos de calcopirita-bornita gradan transicionalmente hacia afuera, en halos de Cpy-Py, los cuales, con el aumento del estado de sulfuración, se transforman en halos de pirita, característicos de las zonas propilíticas circundantes al núcleo potásico, situación que aparenta coincidir con el caso de estudio.

El mineral de mena asociado al molibdeno, la molibdenita (MoS<sub>2</sub>), corresponde a un sulfuro primario, de altas temperaturas (~300° - 500°C), asociado a intrusiones félsicas y común en la etapa de alteración-mineralización temprana de pórfidos cupríferos (Sillitoe, 2010).

### **3.2.2.2 ANÁLISIS POR COMPONENTES PRINCIPALES, ALTERACIÓN POTÁSICA**

Con el fin de comprobar de manera cuantitativa la relación entre las especies minerales por alteración con respecto a la concentración de molibdeno, se procede a realizar un análisis por componentes principales.

El análisis por componentes principales (ACP), consiste en una herramienta que tiene por objetivo esencial la reducción de la dimensión del vector de variables, calificando con diferentes niveles de relevancia a cada variable, respecto a su aporte al estudio.

La técnica consiste en obtener una rotación de los ejes de coordenadas, donde se representan las variables originales en un nuevo sistema de coordenadas que resalta las propiedades óptimas de la variación de las variables (Enguix, 2001).

La utilidad de las componentes principales es básicamente descriptiva, más que inferencial. Las componentes principales proporcionan valiosa información descriptiva para una amplia variedad de datos, información que se utilizará en este caso, para determinar las variables que más se relacionan con el fenómeno estudiado, no necesariamente con una relación directa entre ellas.

De este modo, se seleccionan las muestras que presenten una ley de molibdeno igual o superior a 100 [ppm], ley elegida de manera de abarcar al menos el 50% de las muestras disponibles, con el fin de obtener las componentes principales que explican matemáticamente la concentración de molibdeno, en una primera aproximación.

La aplicación de la técnica, se realiza utilizando el lenguaje computacional *R* y se considera para ello, la incorporación de las 23 especies minerales que registran concentraciones no despreciables según el análisis exploratorio de datos de los resultados del análisis QEMSCAN.

Para seleccionar la cantidad de componentes a considerar, estas componentes se agrupan de tal modo de explicar al menos un 75% de la variabilidad (De la Fuente, 2011).

Los resultados del ACP para la alteración KBT entregan tres primeras componentes que agrupan el 83.2% de la variación total, es decir que explican en mayor parte el fenómeno estudiado. Estos resultados son apreciables en el gráfico de la Figura 3.9, a partir de la cual se eligen estas tres primeras componentes para estudiar el impacto por mineral en la presencia de molibdeno.

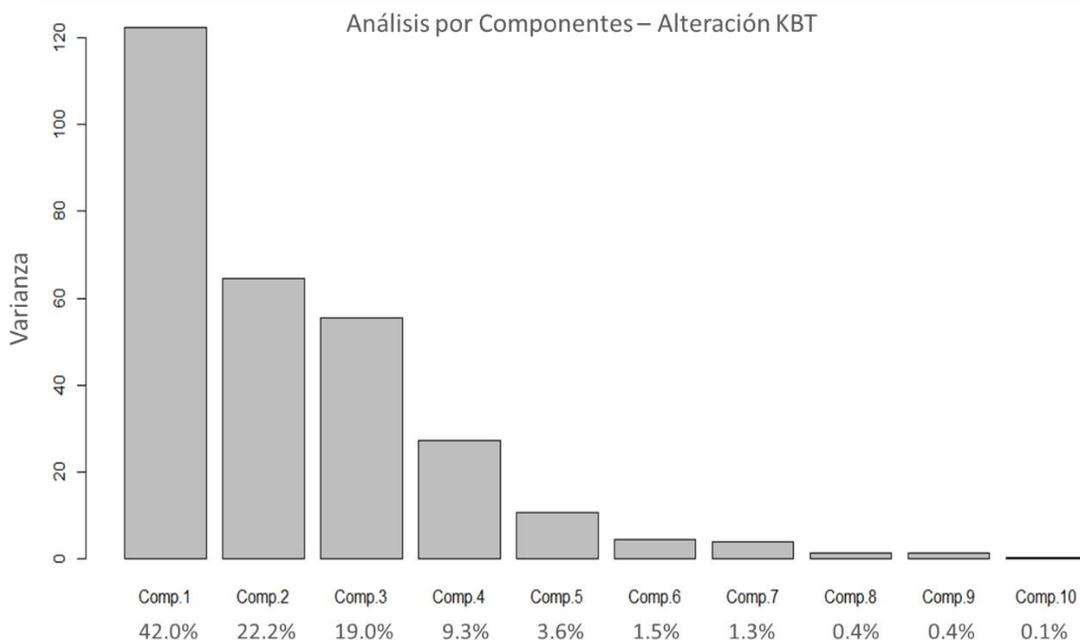


Figura 3.9 Diez primeras componentes del ACP para la alteración KBT

En la Tabla 3.11 se muestra el detalle de las tres primeras componentes, en dónde a cada una se le aplica un formato condicional de color, para de este modo identificar los valores extremos entre cada mineral y la componente, en términos simples y con el objetivo de reducir la dimensión de la información, se interpretan estos datos de forma que mientras mayor sea el valor absoluto que aporta cada mineral a la componente, mayor es la participación del mineral en la mineralización de molibdeno, lo que reflejado en colores correspondería a un tono más cercano al rojo o al verde. Entendiendo que un caso representa una relación directa y otro una relación inversa de la presencia del mineral y el molibdeno.

De la misma tabla se desprende que gran parte de los minerales no aportan a la variabilidad de las componentes, celdas que gráficamente están pintadas con colores cercanos al amarillo.

Del análisis de los tres primeros componentes se concluye que la mayor parte de la variación y por ende de la relación con la mayor ley de molibdeno, se encuentra, para esta alteración en los minerales de: albita, arcillas, biotita, feldespato potásico, plagioclasas, cuarzo y muscovita-sericita.

Tabla 3.11 Minerales que explican la variación por componentes en la alteración KBT

Mineral	Comp.1	Comp.2	Comp.3
Albita	0.0	0.6	-0.4
Yeso	0.0	-0.1	0.0
Ankerita	0.0	0.0	0.0
Arcillas	0.1	0.2	0.0
Apatito	0.0	0.0	0.0
Biotita	0.2	0.2	-0.5
Bornita	0.0	0.0	0.0
Calcita	0.0	0.0	0.0
Calcopirita	0.0	0.0	0.0
Clorita	0.1	-0.1	0.1
Ilmenita	0.0	0.0	0.0
Feldespato Potásico	-0.8	-0.3	-0.3
Limonita	0.0	0.0	0.0
Magnetita-Hematita	0.1	0.0	0.1
Copper Pitch/Wad	0.0	0.0	0.0
Muscovita-Sericita	0.2	0.1	0.3
Otros silicatos	0.0	0.0	0.0
Plagioclasa	0.4	-0.7	-0.1
Pirita-Pirrotita	0.0	0.0	0.0
Cuarzo	-0.4	0.2	0.6
Rutilo	0.0	0.0	0.0
Siderita	0.0	0.0	0.0
Titanita	0.0	0.0	0.0
Turmalina	0.0	0.0	0.1

### 3.2.2.3 ALTERACIÓN SERICÍTICA

Las alteraciones sericíticas en pórfidos de cobre normalmente se superponen y destruyen total o parcialmente las agrupaciones potásicas y de clorita-sericita previas, aunque los halos sericíticos de vetas están zonificados hacia afuera a la alteración clorita-sericita.

La alteración sericítica puede subdividirse en dos tipos diferentes: una variedad temprana de mayor temperatura, poco común, de color verdoso a gris verdoso, conocida como alteración sericita gris-verde y una variedad blanca más tardía, mucho más común y extendida.

En los pocos depósitos donde se reconoce, la alteración serítica temprana, se localiza centralmente y alberga una zona mineral de calcopirita-bornita de bajo estado de sulfuración, que es comúnmente de alta ley de mineral.

La alteración serítica tardía, por otro lado, presenta variados patrones de distribución en los depósitos de Cu pórfido. Puede ser que constituyan zonas anulares que separen los

núcleos potásicos de los halos propilíticos, aunque quizás es más común encontrarla como reemplazos controlados estructuralmente o aparentemente irregulares dentro de partes superiores de la clorita-sericita y/o zonas potásicas.

La alteración sericítica suele estar dominada por pirita como sulfuro principal, lo que implica una eliminación efectiva del Cu ( $\pm$  Au) presente en la antigua agrupación clorita-sericita y/o potásica. Sin embargo, la alteración sericítica también puede contener mineral en donde el Cu permanece con la pirita, ya sea en forma de calcopirita o en asociación, típicamente de tipo pirita-bornita, pirita-calcosina, pirita-covelina y pirita-enargita (Sillitoe, 2010).

Gran parte de la molibdenita en varios depósitos de Cu-Mo ocurre en las vetillas B, mientras que vetillas D contienen apreciables cantidades de este sulfuro (Sillitoe, 2010).

En este caso vetillas B, más tardías que los eventos de alteración potásica, ricas en cuarzo, sericita, calcopirita, pirita y molibdenita, hospedan parte del molibdeno del yacimiento (Perelló et al., 2004).

#### **3.2.2.4 ANÁLISIS POR COMPONENTES PRINCIPALES, ALTERACIÓN SERICÍTICA**

Al igual que en el caso de la alteración potásica, se realiza un ACP a las muestras con alteración sericítica que presentan una concentración de molibdeno igual o mayor a las 100 [ppm]. De este modo, se muestran las diez primeras componentes que entrega el análisis en el gráfico de la Figura 3.10. En este caso, las tres primeras componentes explican el 81,6% de la variabilidad, por lo que se eligen para una revisión más detallada del aporte de cada mineral.

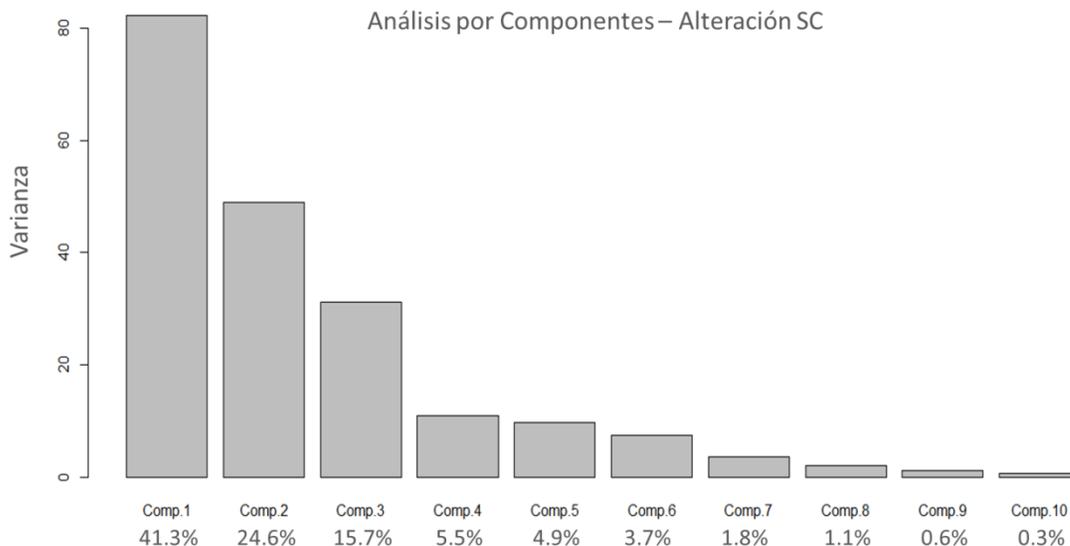


Figura 3.10 Diez primeras componentes del ACP para la alteración SC

Tabla 3.12 Minerales que explican la variación por componentes en la alteración SC

Mineral	Comp.1	Comp.2	Comp.3
Albita	-0.4	0.7	0.3
Yeso	0.1	0.2	0.0
Ankerita	0.0	0.0	0.0
Apatito	0.0	0.0	0.0
Arcillas	-0.1	0.2	0.0
Biotita	-0.2	0.0	-0.2
Bornita	0.0	0.0	0.0
Calcita	0.0	0.0	0.0
Calcopirita	0.0	0.0	0.0
Clorita	0.1	0.0	-0.1
Ilmenita	0.0	0.1	0.0
Feldespató Potásico	-0.4	-0.3	0.6
Limonita	0.0	0.0	0.0
Magnetita-Hematita	-0.1	0.0	0.0
Copper Pitch/Wad	0.0	0.0	0.0
Muscovita-Sericita	0.6	0.4	-0.1
Otros silicatos	0.0	0.0	0.0
Plagioclasa	-0.3	-0.3	-0.6
Pirita-Pirrotita	0.1	-0.1	-0.1
Cuarzo	0.4	-0.4	0.4
Rutilo	0.0	0.0	0.0
Siderita	0.0	0.0	0.0
Titanita	0.0	0.0	0.0
Turmalina	0.0	-0.2	0.0

Del análisis de los tres primeros componentes se tiene que la mayor parte de la variación y por ende de la relación con la mayor ley de molibdeno, se encuentra, para esta alteración, en los minerales de: albita, feldespató potásico, muscovita-sericita, plagioclasas, cuarzo, biotita y yeso.

### **3.3 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

---

Tras detallar dos de las tres fuentes de información, análisis ICP-OES y análisis QEMSCAN, disponibles para cada una de las muestras estudiadas, a continuación, se detalla el trabajo realizado utilizando la información hiperespectral.

La razón de detallar esta parte del procesamiento responde a que corresponde al punto central de la información que se le suministrará al indicador.

La metodología seguida, es la siguiente:

1. Se mostrará el proceso de enmascarado, etapa necesaria para comenzar a procesar las muestras de manera automática por el Hylogger-3.
2. Se presentará el análisis automático realizado por el TSA como primera aproximación de mineralogías identificadas.
3. Se realizará el análisis de las firmas espectrales para cada uno de los minerales y se procederá a la creación de escalares sobre las características de las firmas espectrales.
4. Se validará mediante la información del análisis QEMSCAN la correlación de los escalares con la abundancia de la especie.

Tras esto se obtendrá un escalar por mineral que lo identifique y que a su vez entregue dos características, la longitud de onda y su reflectancia.

#### **3.3.1 ENMASCARADO**

Antes de realizar este análisis, se hace necesario indicar las secciones correspondientes a muestras de mineral y las zonas que corresponden a otros materiales dentro de las muestras que pasarán por el equipo Hylogger-3, como, por ejemplo, la bandeja que contiene a la muestra o los componentes del mismo equipo de medición.

El proceso antes mencionado corresponde al enmascarado y se aplica dentro del programa que procesa la información TSG.

En este caso particular se trabajó con cortes de 300 [gr] de muestras en bandejas provenientes de material compositado de campañas de sondajes.

Un ejemplo de sección estudiada bajo este criterio de enmascarado se muestra en la Figura 3.11, en esta imagen se aprecia una vista en planta de la disposición de las muestras que pasan por el Hylogger-3, tal y como se ve en la parte superior de la Figura 3.11 se distingue una zona de muestra válida en el centro de la bandeja, una zona del material de la bandeja en los bordes y una zona de componentes del equipo entre bandejas. De este modo en la parte inferior de la imagen, se tiene la incorporación y consideración para el análisis del presente estudio la zona de color verde, mientras que se desecha y por ende se enmascara la zona de color rojo, la que no aporta

información de las muestras estudiadas. Finalmente se aplica el proceso anterior a la totalidad de las bandejas analizadas.

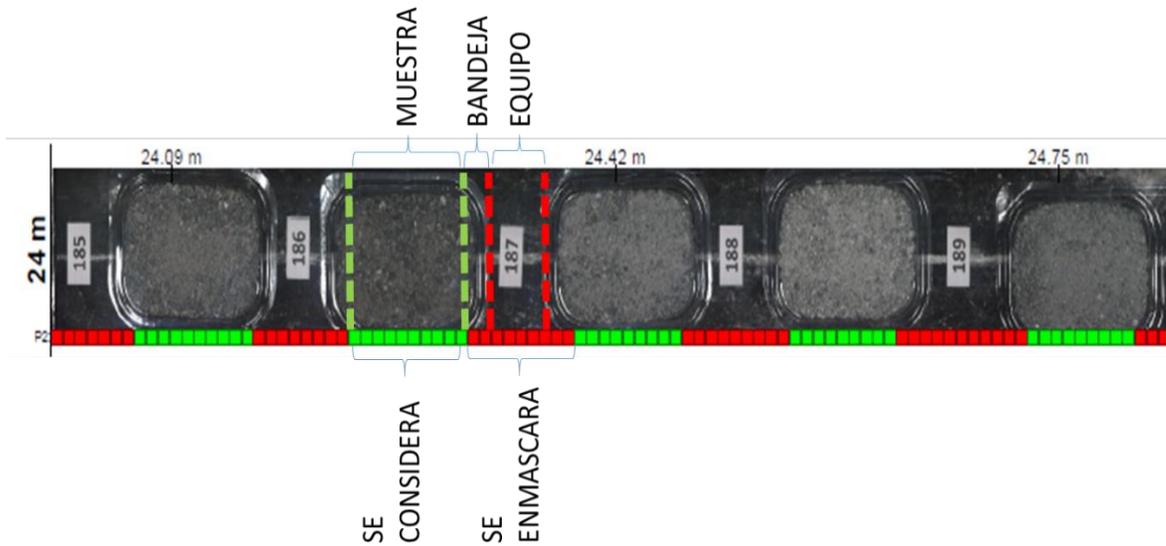


Figura 3.11 Proceso de enmascarado

En caso de no realizar el proceso de enmascarado, el ruido que genera la zona fuera de la muestra distorsiona el análisis que se puede realizar, un ejemplo de la diferencia en la firma espectral de una zona que se enmascara en relación a la zona de mineral se muestra en la Figura 3.12, en donde se ve en la zona inferior una firma en color negro, plana y sin mayor información, versus una firma de color morado con características definidas.

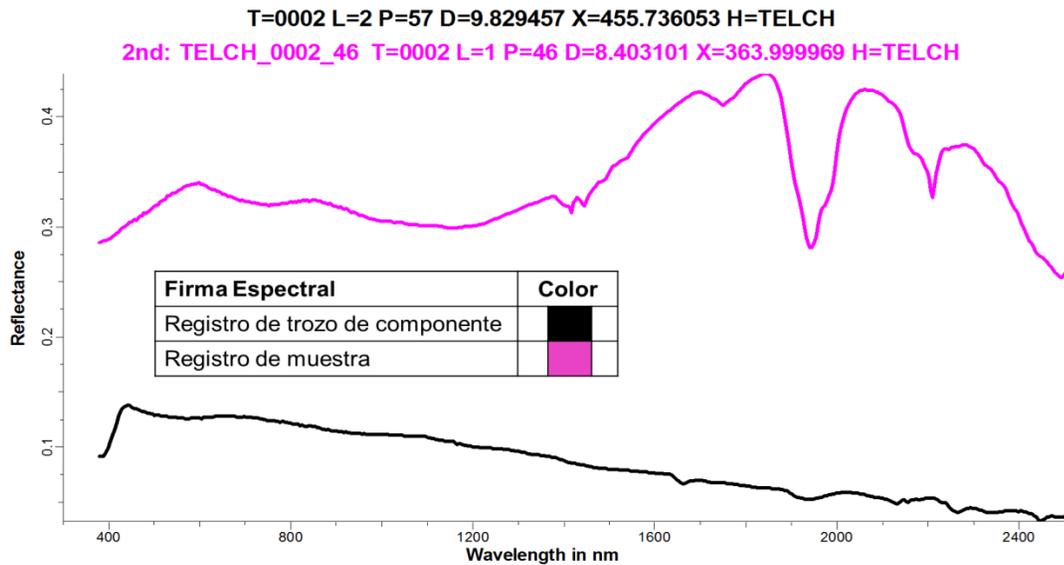


Figura 3.12 Comparación firma espectral de una muestra cualquiera, en relación a una zona fuera de mineral

### 3.3.2 MINERALOGÍA HIPERESPECTRAL

The Spectral Assistant (TSA), corresponde a un algoritmo perteneciente al TSG que procesa la información del Hylogger-3. Este asistente fue diseñado para analizar rápidamente numerosos espectros medidos en una muestra, utilizando un algoritmo de rápida aplicación para la identificación de minerales comunes, que utiliza una librería espectral de referencia que contiene la información del análisis hiperespectral de una serie de minerales puros (60 en el rango SWIR, 17 en el rango VNIR y más de 150 en el rango TIR). De esta forma, el TSA puede comparar nuevas muestras analizadas con los patrones de muestras pertenecientes a la librería y entregar una primera caracterización las muestras (Berman, Bischof, & Lagerstrom, 2011).

En la Figura 3.13, se muestra el ejemplo de la aplicación del TSA sobre la muestra 224 perteneciente a la bandeja N° 26, correspondiente a la alteración potásica rica en biotita. En este caso, el TSA identifica la presencia de muscovita en la muestra como mineral principal, esta identificación la realiza en base a las características de la firma espectral en relación a las características del espectro de referencia de muscovita de la librería espectral contenida en el TSG.

En la figura, se aprecia la firma espectral de la muestra en color negro, mientras que la referencia de la firma espectral del mineral de muscovita en color púrpura y se ve la ubicación similar de los valles en el eje de las abscisas que lleva por título *Wavelength*. Finalmente es de destacar que la forma de mostrar la firma espectral corresponde al gráfico de reflectancia normalizada, lo que permite acercar las curvas de tal modo de una rápida comparación visual entre ambas.

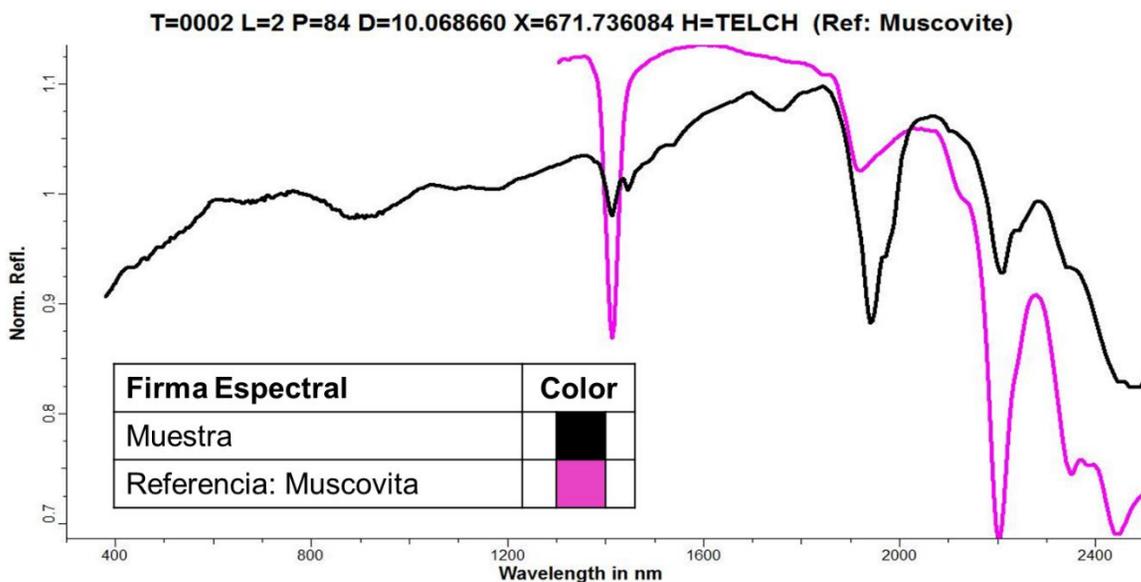


Figura 3.13 Ejemplo de aplicación de TSA, referencia de muscovita

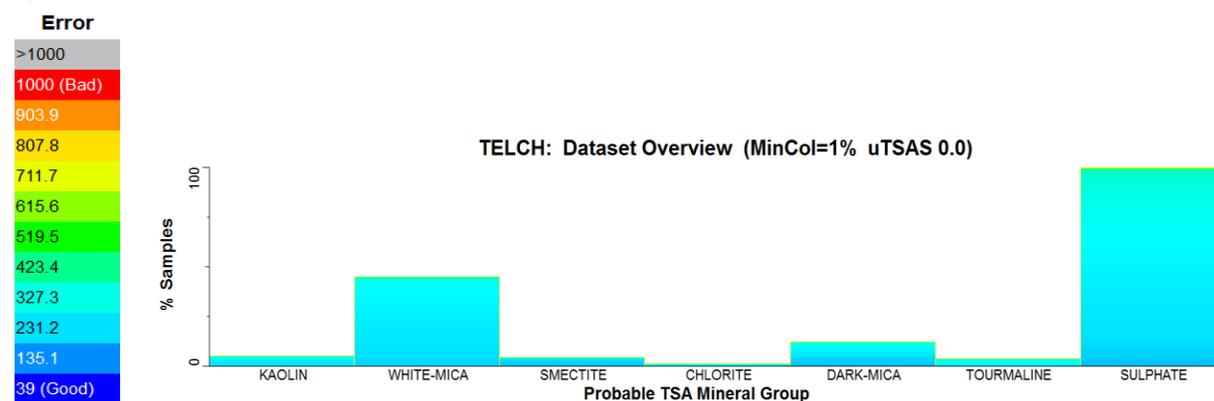
Si bien, el uso del TSA, se presenta como una potente técnica para grandes volúmenes de muestras analizadas, también presenta deficiencias, como, por ejemplo, en cuanto a la librería disponible, esto debido principalmente al hecho de tener como referencias muestras de minerales puros, que en ocasiones no presentan una relación directa con

la variabilidad intrínseca que presentan los minerales según la ubicación del estudio y no refleja la realidad donde son analizadas asociaciones de numerosos minerales.

Considerando lo anterior se procede a utilizar como primera aproximación el reconocimiento entregado por el algoritmo TSA para de este modo tener una idea de los grupos mineralógicos identificados por el Hylogger-3.

Los resultados de la primera aproximación usando el TSA, se muestran en el gráfico de la Figura 3.14.

a)



b)

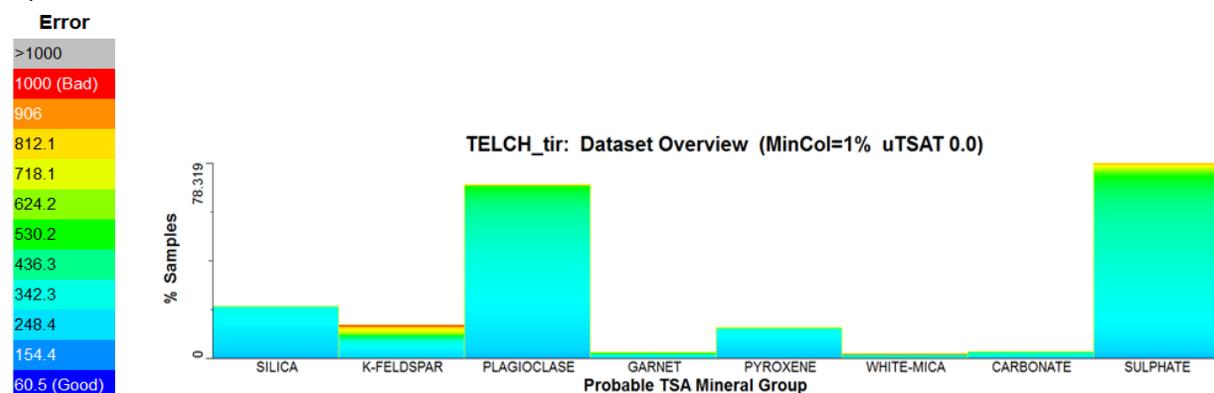


Figura 3.14 Grupos minerales detectados por el TSA. a) Grupos minerales en el rango SWIR. b) Grupos minerales en el rango TIR.

La Figura 3.14 corresponde al resultado de la aplicación del TSA sobre el total de muestras, mostrando en a) los grupos de minerales identificados en el rango SWIR, detallados en el eje de las abscisas, mientras que en b) los grupos de minerales identificados en el rango TIR, detallados del mismo modo. Por su parte, en el eje vertical izquierdo de ambos gráficos, se tiene el porcentaje de muestras clasificadas, mientras que, en una escala de colores ubicadas al lado izquierdo de los gráficos, se encuentra el error asociado a la estimación por parte del algoritmo, error que se encuentra en cada barra del gráfico y que se ordena de mayor a menor de forma ascendente, este error se debe a que las firmas espectrales de dichas muestras

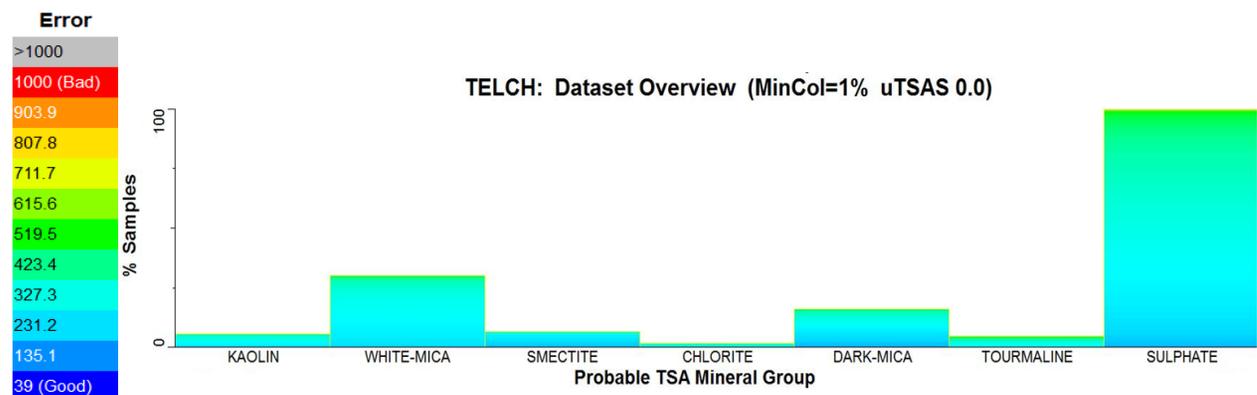
presentan una desviación con respecto a la librería en que se basa el TSA para la clasificación de minerales.

La razón de que en el eje de las ordenadas del rango SWIR aparezca un 100%, mientras que un 78% aproximadamente en el TIR, da cuenta del porcentaje que pudo clasificar del total de muestras procesadas. Lo anterior puede deberse a que el análisis TIR es bastante susceptible al tamaño de partículas de las muestras.

Los errores presentes son mínimos para el rango SWIR, mientras que para el TIR, grupos de minerales como las plagioclasas, sulfatos y feldespatos potásicos presentan un error asociado.

Se muestra en la Figura 3.15 y Figura 3.16, los resultados separación por la alteración KBT y SC respectivamente.

a)



b)

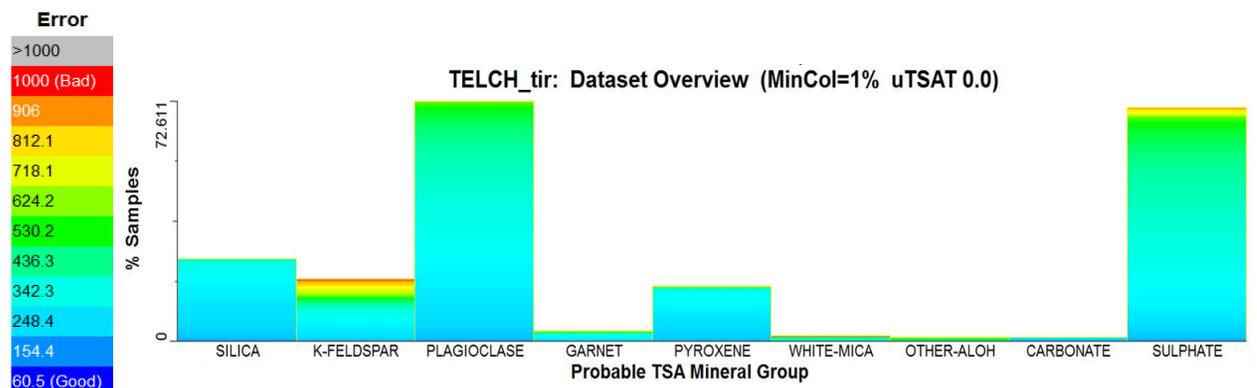
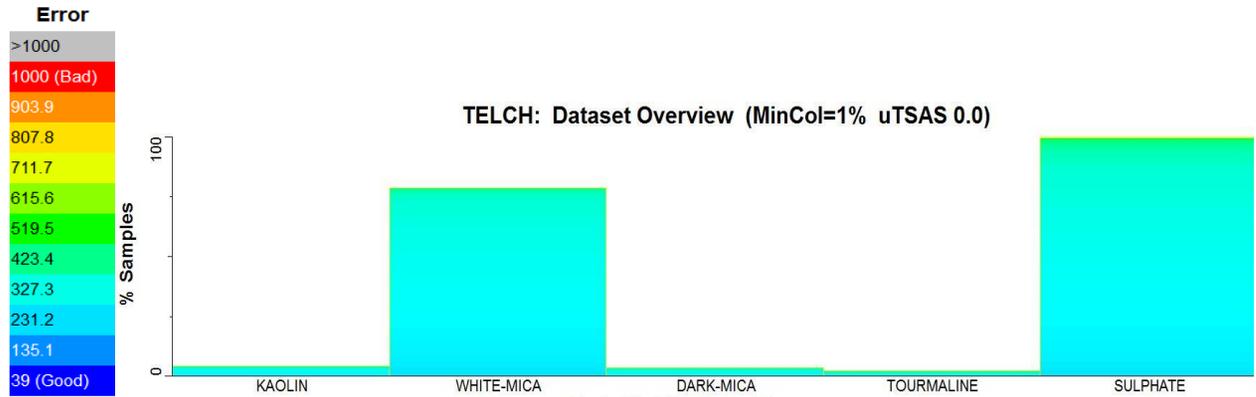


Figura 3.15 Grupos minerales detectados por el TSA en la alteración KBT. a) Grupos minerales en el rango SWIR. b) Grupos minerales en el rango TIR.

a)



b)

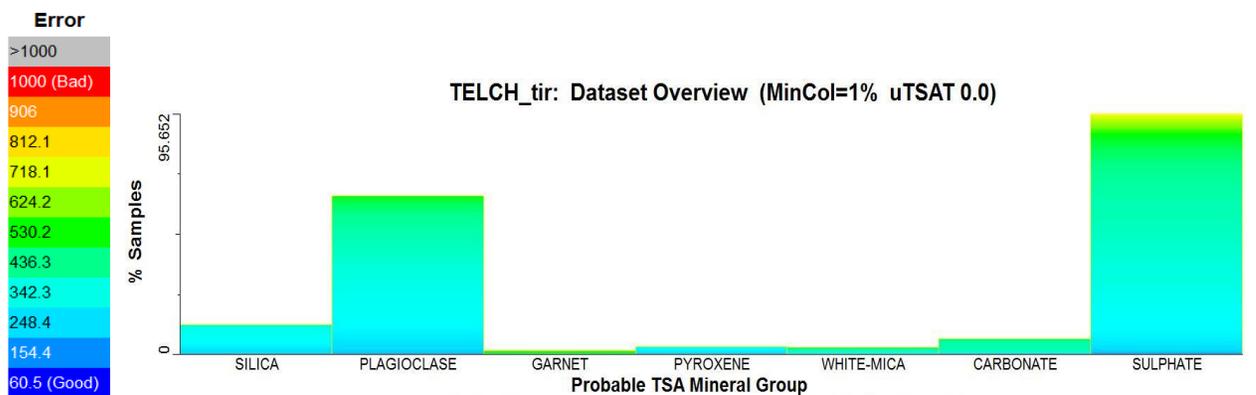


Figura 3.16 Grupos minerales detectados por el TSA en la alteración SC. a) Grupos minerales en el rango SWIR. b) Grupos minerales en el rango TIR.

Se resumen los principales minerales identificados en las muestras en esta primera aproximación en la Tabla 3.13 y Tabla 3.14, según el rango utilizado.

Tabla 3.13 Minerales identificados en las muestras en el rango TIR

TIR	
<b>Cuarzo</b>	<b>Siderita</b>
<b>Topacio</b>	<b>Albita</b>
<b>Illita</b>	<b>Labradorita</b>
<b>Hedenbergita</b>	<b>Oligoclasa</b>
<b>Diópsido</b>	<b>Anortoclasa</b>
<b>Barita</b>	<b>Calcita</b>
<b>Almandita</b>	<b>Microclina</b>

Tabla 3.14 Minerales identificados en las muestras en el rango SWIR

SWIR	
Muscovita	Turmalina
Fengita	Flogopita
Clorita	Caolinita
Yeso	Montmorillonita

Para mayor claridad se tienen la Figura 3.17 y Figura 3.18 en las que se muestra el resumen de grupos y minerales detectados en los rangos SWIR y TIR.

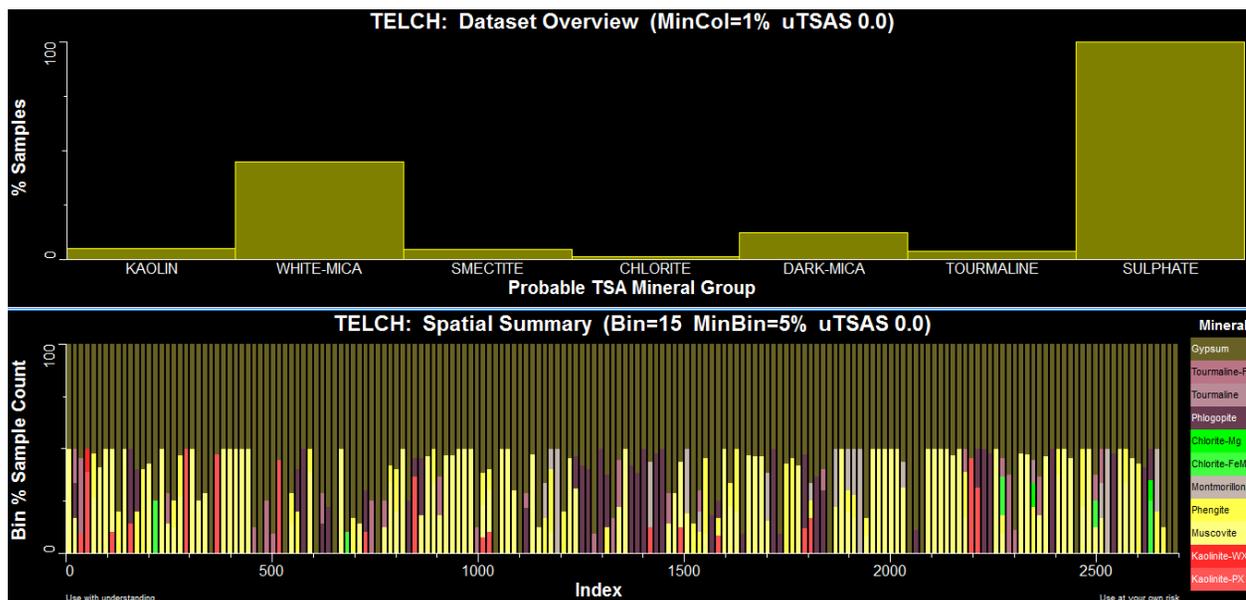


Figura 3.17 Minerales identificados en el rango SWIR

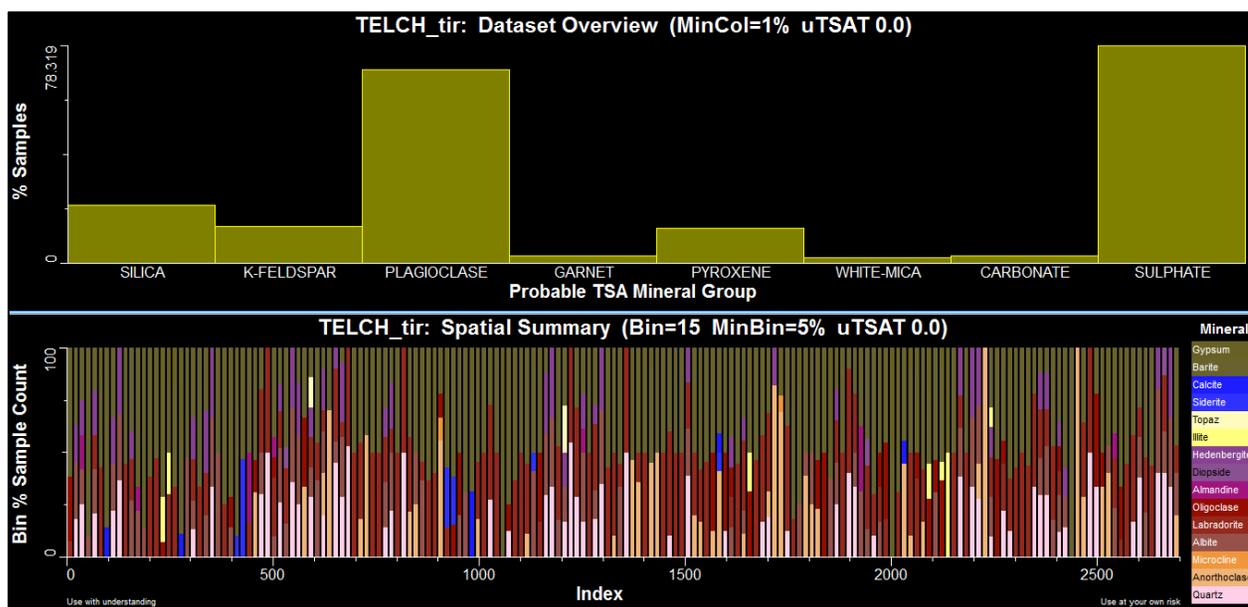


Figura 3.18 Minerales identificados en el rango TIR

Del mismo modo, se presentan la Figura 3.19, Figura 3.20, Figura 3.21 y Figura 3.22, en donde se muestra los minerales identificados en el SWIR para la alteración KBT y SC, así como los minerales identificados en el TIR en ambas alteraciones.

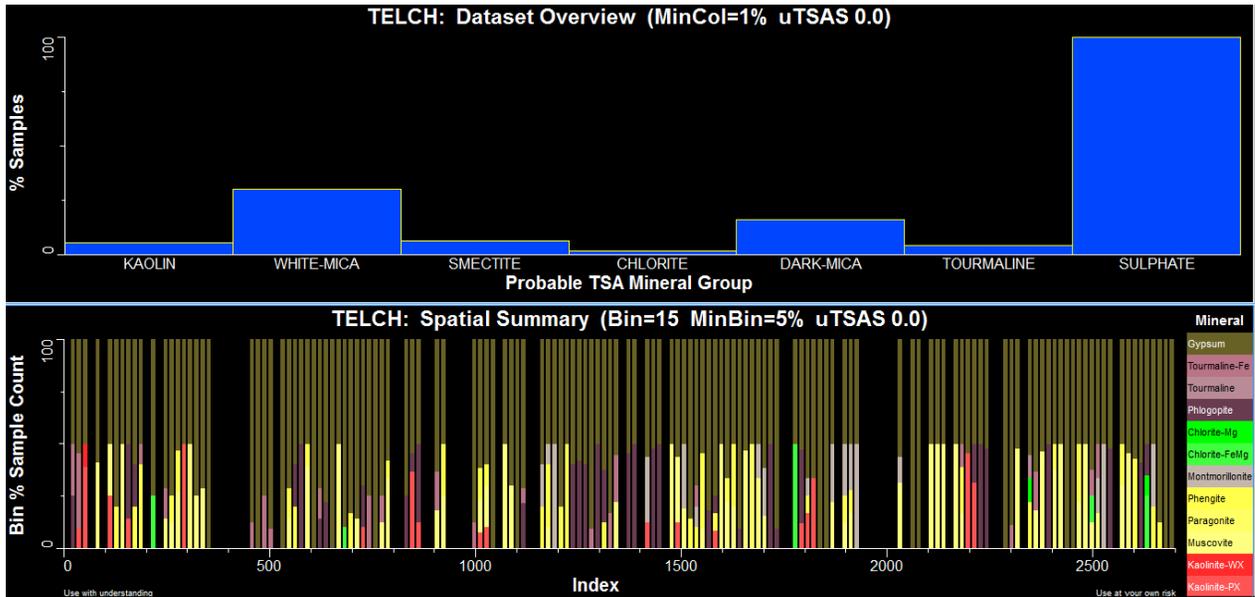


Figura 3.19 Minerales identificados en el rango SWIR, alteración KBT

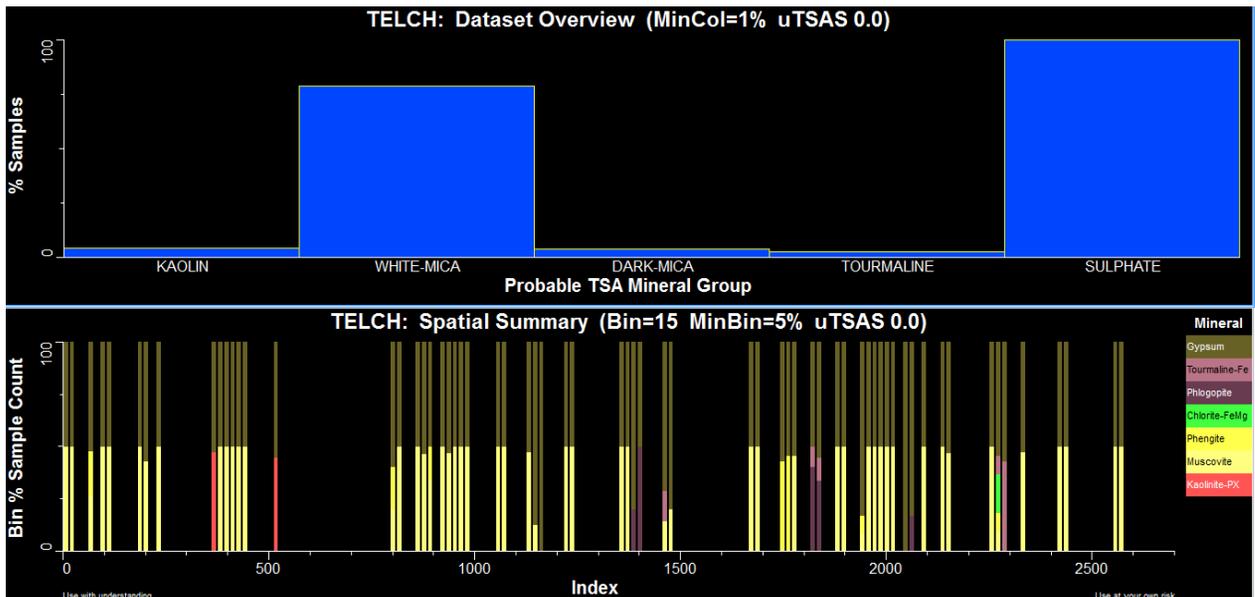


Figura 3.20 Minerales identificados en el rango SWIR, alteración SC

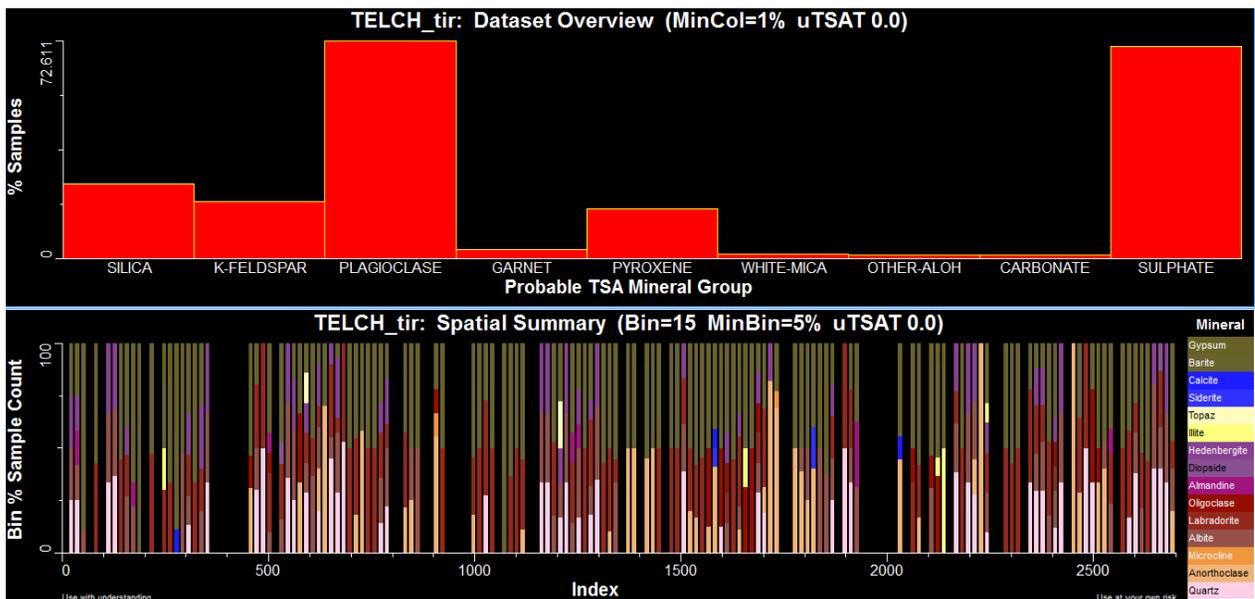


Figura 3.21 Minerales identificados en el rango TIR, alteración KBT

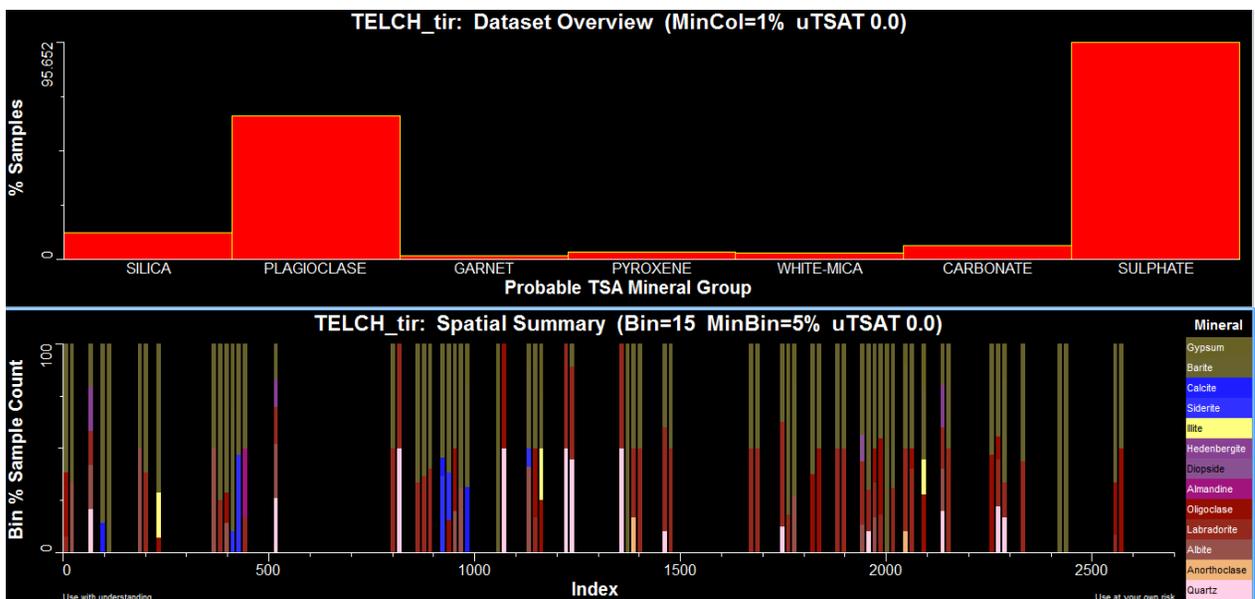


Figura 3.22 Minerales identificados en el rango TIR, alteración SC

El resultado del TSA, junto con la información geológica, el análisis ICP-OES de molibdeno, ACP y QEMSCAN, serán la guía para el análisis en detalle de las firmas espectrales.

### 3.3.3 ANÁLISIS DE FIRMA ESPECTRAL Y CREACIÓN DE ESCALARES

La firma espectral es una propiedad intrínseca de cada material, correspondiente a su respuesta ante la exposición a determinada radiación, el Hylogger-3 captura esa información y la interpreta. La firma o patrón, se representa usualmente en un gráfico que en el eje vertical registra la reflectancia de la muestra, mientras que en el horizontal

la longitud de onda asociada a la radiación recibida por la muestra. En particular el Hylogger-3 entrega una firma espectral por cada intervalo de 4 [mm] de muestra procesada, con un diámetro del spot de 8 [mm], de este modo, de las 144 bandejas de muestra analizadas, se obtuvieron 1362 firmas espectrales, con lo que finalmente se tiene una gran cantidad información por bandeja, considerando además los análisis previos realizados a cada una, resumen que se muestra en la Figura 3.23.

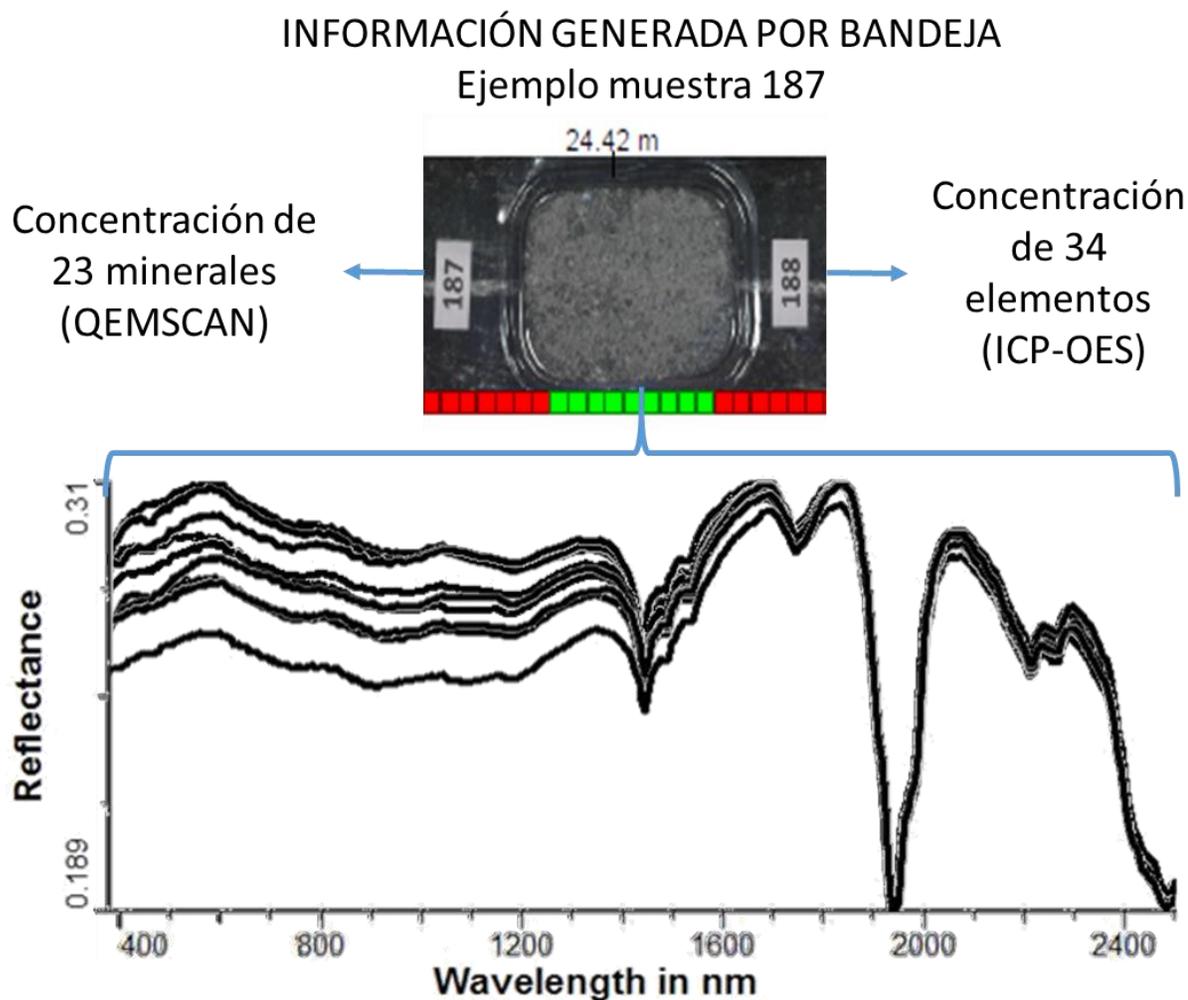


Figura 3.23 Información generada por bandeja, ejemplo muestra 187

### 3.3.3.1 PROCESAMIENTO

La metodología de trabajo desarrollada sobre las firmas espectrales se desarrolló de la siguiente forma (Merrill, 2016):

Primeramente, se identifican los minerales a estudiar a partir del análisis hiperespectral. Para esto, se revisan los estudios geológicos del sector del cual provienen las muestras, sumado a algún análisis complementario de mineralogía, como lo es en este caso, el análisis QEMSCAN, el ACP y el resultado de la aplicación del TSA, minerales que se muestran en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15 Minerales considerados para el estudio

Minerales	
Albita	Oligoclasa
Anortoclasa	Montmorillonita
Micas negras	Labradorita
Yeso	Cuarzo
Caolinita	Micas blancas

Lo anterior no excluye la identificación de mineralogías que no fueron previstas, situación que puede ocurrir al analizar la información hiperespectral.

Para llevar a cabo la identificación de las muestras, es necesario utilizar el rango de espectro idóneo para su identificación. Dado los principales minerales previamente identificados, se necesita utilizar los rangos SWIR y TIR (LWIR) para su análisis en detalle (Figura 2.20 y Figura 2.21).

Una vez se comienza con el trabajo de identificación de minerales, se aplica un ajuste polinomial a cada característica del espectro de referencia (valle o cresta de la onda), tal y como se muestra en la Figura 3.24, correspondiente a la respuesta del mineral de yeso en el rango SWIR. Se muestra este mineral a modo de ejemplo de la metodología utilizada.

En el Anexo A, se muestran las firmas y características de referencia del total de minerales considerados.

El número de características analizadas va desde tres a seis y depende de la existencia de literatura referente al respecto, tal como en casos de minerales ampliamente estudiados, como lo son: cuarzo, albita, biotita, muscovita, feldespatos potásicos, caolinita o plagioclasas.

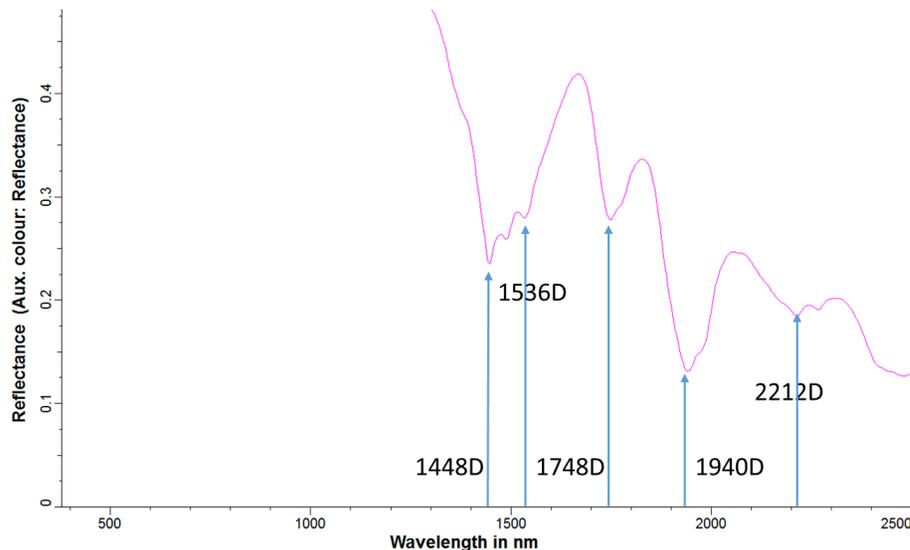


Figura 3.24 Firma espectral referencial del yeso

El ajuste polinomial consiste en el modelamiento de la característica espectral por medio de la superposición de una curva representada por un polinomio, para realizar esto, se le entrega como información al programa el grado del polinomio a ajustar, los intervalos en la longitud de onda en que ajusta el polinomio y el tipo de característica buscada (cresta o valle).

Un ejemplo del ajuste polinomial se muestra en la Figura 3.25, en tal caso, se encierra en un rectángulo segmentado color rojo la característica a ajustar, la que en este ejemplo corresponde a un valle en la longitud de onda 2212 [nm]. A continuación, se muestra con una flecha color rojo, los parámetros finales del ajuste polinomial, proceso de carácter iterativo, en el cual se indican los límites de la característica espectral y se evalúa el grado del polinomio con el fin de lograr una curva que se ajuste a la característica con un valor de ajuste superior a 0.9.

El resultado de la curva ajustada se muestra en el recuadro superior derecho de la Figura 3.25, en la cual, la curva de color naranja corresponde al polinomio final ajustado y la curva de color blanco, representa la firma espectral.

Finalmente, se indica qué valor se va registrar del polinomio, el cual para efectos de esta etapa del trabajo será la reflectancia, valor del eje vertical, información que recibe el nombre de escalar. Más adelante se creará un escalar para la longitud de onda asociada, valor del eje horizontal, una vez que se filtren los escalares de reflectancia por mineral.

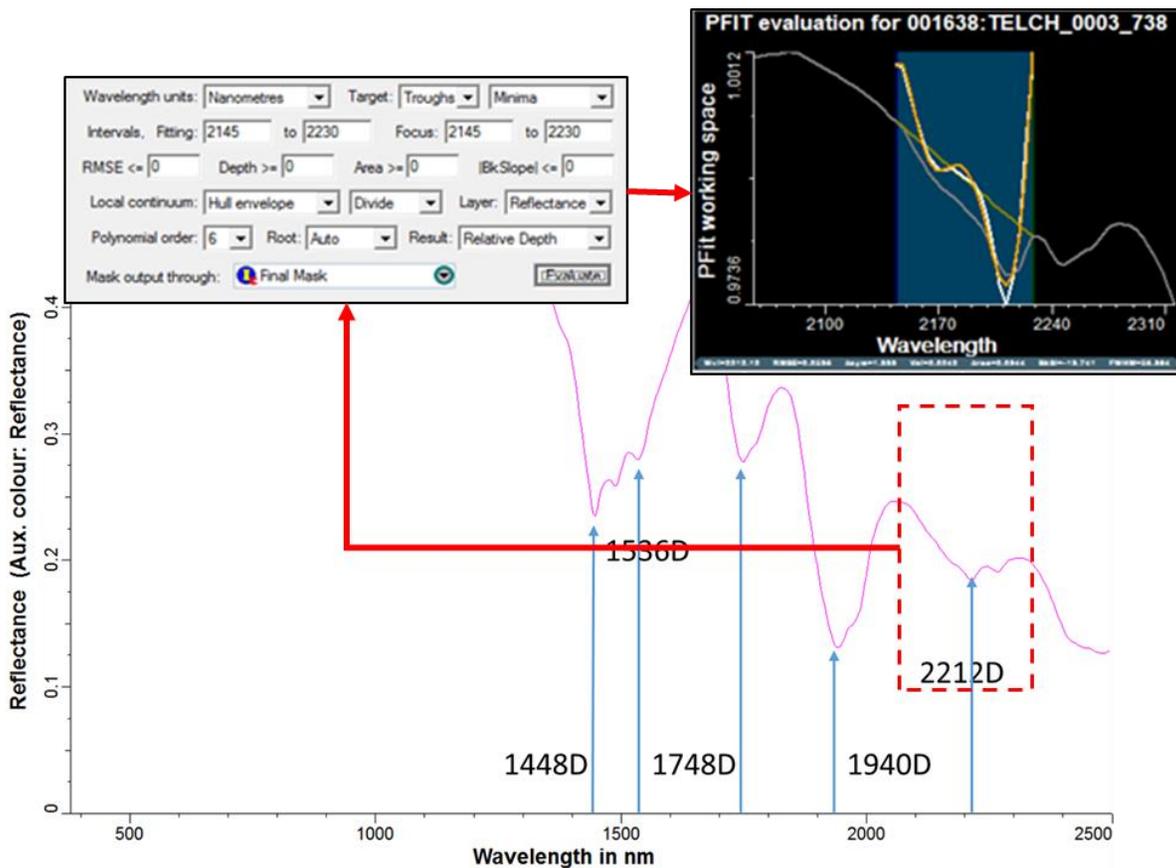


Figura 3.25 Ejemplo de ajuste polinomial de sexto grado para la característica 2212D del yeso en rango SWIR

El procedimiento presentado se realiza para todas características espectrales principales de la firma de los diez minerales identificados, imágenes que se muestran en el Anexo B.

Tras la generación de polinomios, el programa TSG compara cada muestra procesada con los escalares creados, de modo de identificar la característica modelada en las muestras.

La etapa siguiente corresponde a la comparación de cada escalar con la concentración del mineral, de modo tal de dejar el polinomio que mejor represente la presencia de cada uno de los minerales. Esto se logra comparando los escalares de reflectancia de cada característica espectral con la concentración del mineral estudiado a partir de la información del análisis QEMSCAN.

Continuando con el ejemplo del yeso, se muestra en la Figura 3.26 el resultado de comparar los valores de reflectancia en las muestras aplicando el escalar 2212D, eje horizontal, en relación a la concentración de yeso que registran los resultados de QEMSCAN, eje vertical.

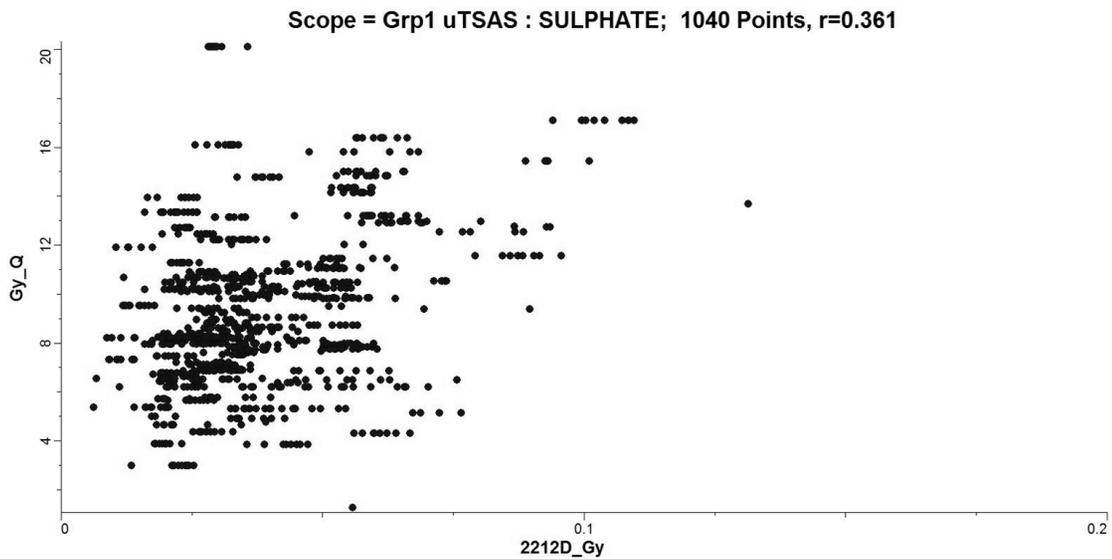
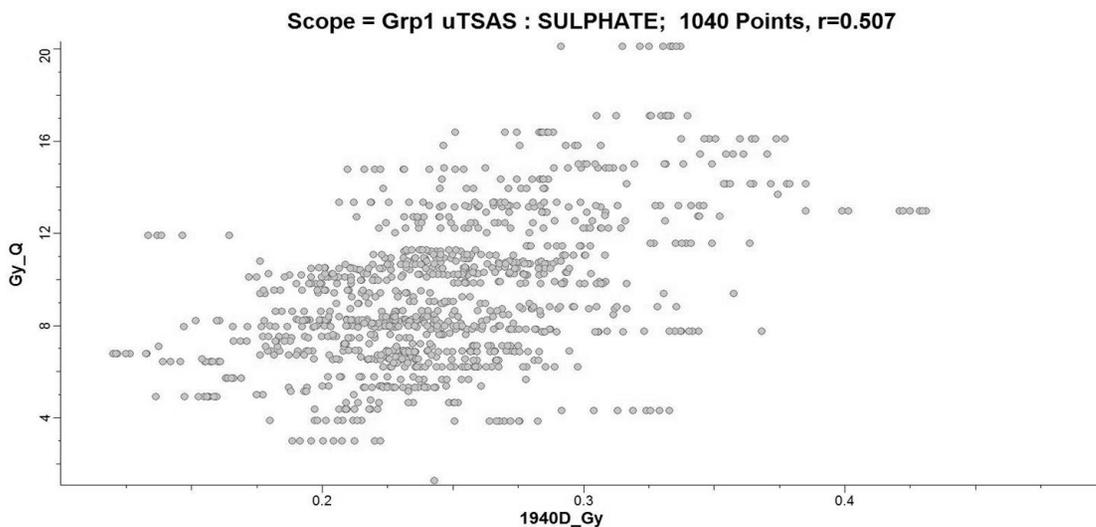


Figura 3.26 Comparación concentración QEMSCAN de yeso en relación al escalar 2212D

El resultado de la comparación entrega un ajuste de regresión lineal  $R = 0.36$ , valor bajo a primera vista, sin embargo, es necesario advertir que el gráfico obtenido muestra conjuntos de puntos que presentan igual valor de concentración según QEMSCAN y variación en la magnitud del escalar 2212D, este fenómeno se repite para todos los escalares y responde a la resolución de los análisis, en otras palabras, por bandeja se cuenta con solo un valor de análisis QEMSCAN, mientras que en promedio, ocho registros hiperespectrales. Esta relación explica en parte la baja correlación lineal de las muestras, sumado a la consideración que el indicador de reflectancia no necesariamente es lineal respecto a la concentración.

De este modo, se realiza la comparación para los cinco escalares del yeso, obteniendo la mejor correlación según la regresión lineal en el escalar 1940D con un  $R = 0.51$ , resultados que se muestran en la Figura 3.27, en la cual al igual que para la Figura 3.26, se registran 1040 puntos, los que corresponden a los puntos en que el TSG registró la presencia de la característica espectral diagnóstica de estos minerales, a través del escalar diseñado.



*Figura 3.27 Comparación concentración QEMSCAN de yeso en relación al escalar 1940D*

Con esto, en el ejemplo presentado, se selecciona el escalar 1940D como el que mejor representa la detección del mineral de yeso en las muestras estudiadas, con lo que se procede a crear un nuevo escalar, similar a 1940D, con la salvedad que esta vez entregará como valor resultado, la longitud de onda de la característica espectral.

Se repite el proceso anterior para los diez minerales seleccionados, gráficos apreciables en el Anexo C. Con esto se crean diez nuevos escalares que entregarán las longitudes de onda correspondientes, los que sumados a los escalares de reflectancia entrega veinte escalares. El resumen de los escalares por mineral, se muestra en la Tabla 3.16, en la cual se considera la longitud de onda en que se estudia el mineral y la denominación que se les asigna a los escalares por mineral, los que en su nombre indican la longitud de onda de la característica estudiada y una letra terminal: W, en caso de escalar de longitud de onda, D en caso de escalar de reflectancia para un valle y H para un escalar de reflectancia en una cresta.

Tabla 3.16 Resumen de escalares representativos por mineral

Mineral	Rango estudiado	Escalar de reflectancia	Escalar de longitud de onda	Referencia en la literatura
Albita	TIR	9040D	9040W	9500 (Ramsey et al., 2012)
Anortoclasa	TIR	9080D	9080W	9400 (Ramsey et al., 2012)
Micas negras	SWIR	2250D	2250W	2250D (Cudahy et al., 2008, Laukamp et al., 2010)
Yeso	SWIR	1940D	1940W	1760D (Cudahy et al., 2008, Laukamp et al., 2010)
Caolinita	SWIR	2207D	2207W	2200D (Cudahy et al., 2008, Laukamp et al., 2010)
Oligoclasa	TIR	9900H	9900W	10000 (Ramsey et al., 2012)
Montmorillonita	SWIR	1910D	1910W	1910D (Merrill 2016)
Labradorita	TIR	9170D	9170W	
Cuarzo	TIR	8623D	8623W	8625D (Schodlok et al., 2016)
Micas blancas	SWIR	2200D	2200W	2200D (Cudahy et al., 2008, Laukamp et al., 2010)

Dentro del resumen de resultados de la Tabla 3.16, es necesario aclarar ciertas consideraciones:

**Micas negras:** Debido a la similitud en las características de las firmas espectrales entre micas negras, apreciables en el Anexo A, para la flogopita y biotita, se generaliza en la búsqueda del Hylogger-3 al grupo de micas negras, con lo que se agrupan los resultados del análisis QEMSCAN para poder realizar la comparación con los escalares creados.

**Micas blancas:** Al igual que en las micas negras y debido a la similitud en las características de las firmas espectrales entre micas blancas, para la fengita y muscovita, apreciables en el Anexo A, se generaliza en la búsqueda del Hylogger-3 al grupo de micas blancas. En este caso no es necesario agrupar los resultados del análisis QEMSCAN para poder realizar la comparación con los escalares creados, ya que solo arroja valores para muscovita-sericita.

**Plagioclasas:** En el caso de las plagioclasas ocurre la situación similar a las micas blancas, ya que el Hylogger-3 tiene una detección con mayor detalle que la de los datos

entregados por el QEMSCAN, es decir, se tiene un solo valor de concentración para el grupo de las plagioclasas según QEMSCAN, a diferencia del Hylogger-3 que detecta minerales de labradorita y oligoclasa. Ante esa situación se dispone a comparar cada uno de los escalares de estos dos minerales con el valor de composición de QEMSCAN para la determinación de los escalares de mayor representatividad. En este caso no se considera la albita, ya que el QEMSCAN calcula su concentración de manera independiente.

### 3.3.4 COMPARACIÓN DEL CONJUNTO DE ESCALARES VÍA MINERALOGÍA QEMSCAN

Una vez que se tienen los escalares de composición y reflectancia representativos para cada una de las características de las firmas espectrales, resulta conveniente explorar los resultados parciales a modo de identificar el impacto de estas dos variables con la concentración conocida de los minerales.

Del mismo modo en que se seleccionaron los escalares representativos por minerales, se valida el conjunto de escalar de reflectancia y longitud de onda al compararlos con la concentración vía QEMSCAN. Para poder visualizar simultáneamente estas tres variables, se procede a realizar un gráfico de dispersión que presenta en el eje horizontal el valor de la longitud de onda del escalar representativo por mineral, en el eje vertical, el valor de la reflectancia del escalar representativo por mineral y finalmente en una escala de color, la concentración del análisis QEMSCAN.

En la Figura 3.28, se muestra a modo de ejemplo el procedimiento señalado sobre el mineral de cuarzo, en el gráfico se aprecia una clara forma triangular en la distribución de puntos, que presenta en su base una gran cantidad de puntos de baja concentración de cuarzo, representadas por tonalidades celestes, mientras que hacia el vértice superior existe una mayor presencia de puntos de altas concentraciones de cuarzo, representados por el color rojo y ubicados en torno a la longitud de onda de 8630 [nm].

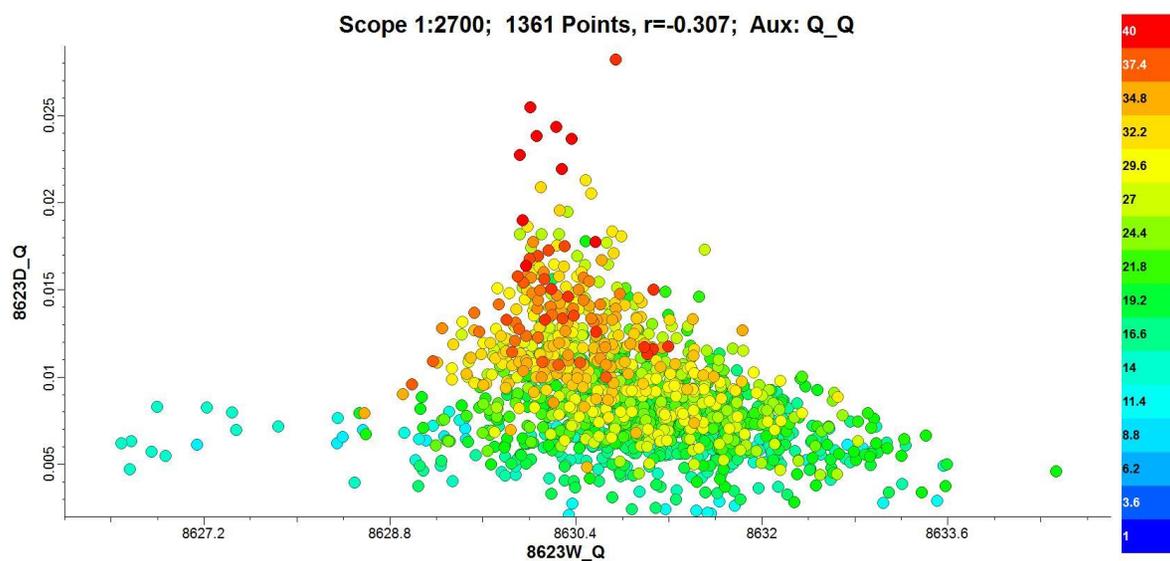


Figura 3.28 Comparación escalares y composición de cuarzo según QEMSCAN

Continuando con el análisis según alteraciones, se puede separar el gráfico de la Figura 3.28 en dos gráficos que se muestran en la Figura 3.29 y Figura 3.30, en estas figuras se muestran las alteraciones potásica y sericítica respectivamente. En ambos casos se mantiene la distribución de forma triangular de los puntos, sin embargo, es notoria la mayor presencia de valores en la alteración potásica, con 947 puntos en comparación con los 414 de la alteración sericítica, junto con un mayor rango de concentraciones de cuarzo, así como también, la menor dispersión en los puntos de la alteración sericítica, factores que podrían deberse a la cantidad de muestras disponibles de cada alteración, predominantemente potásicas.

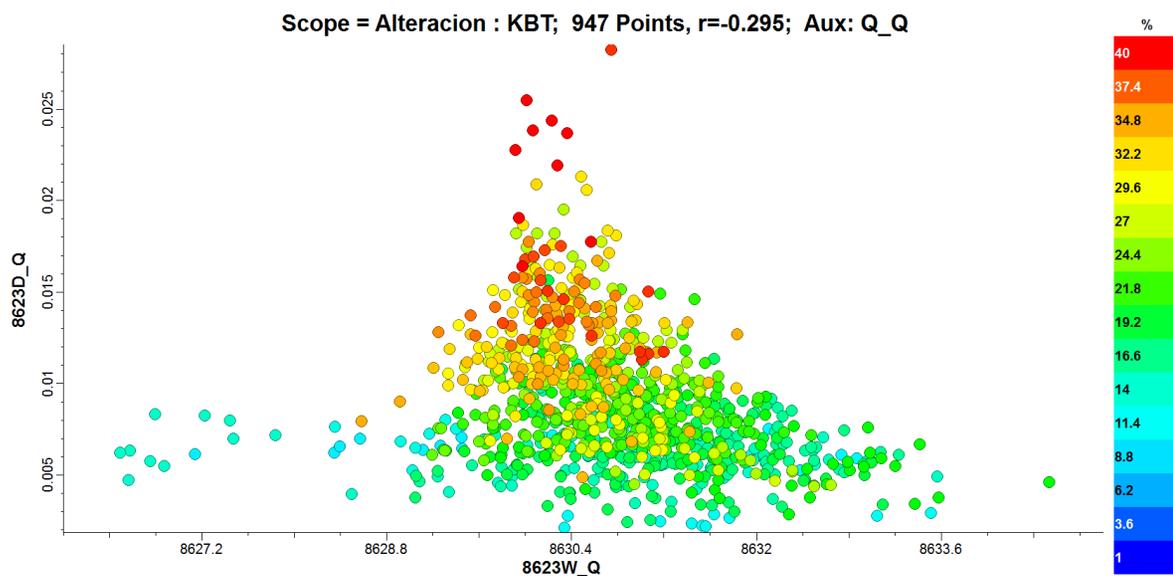


Figura 3.29 Comparación escalares y composición de cuarzo según QEMSCAN en alteración KBT

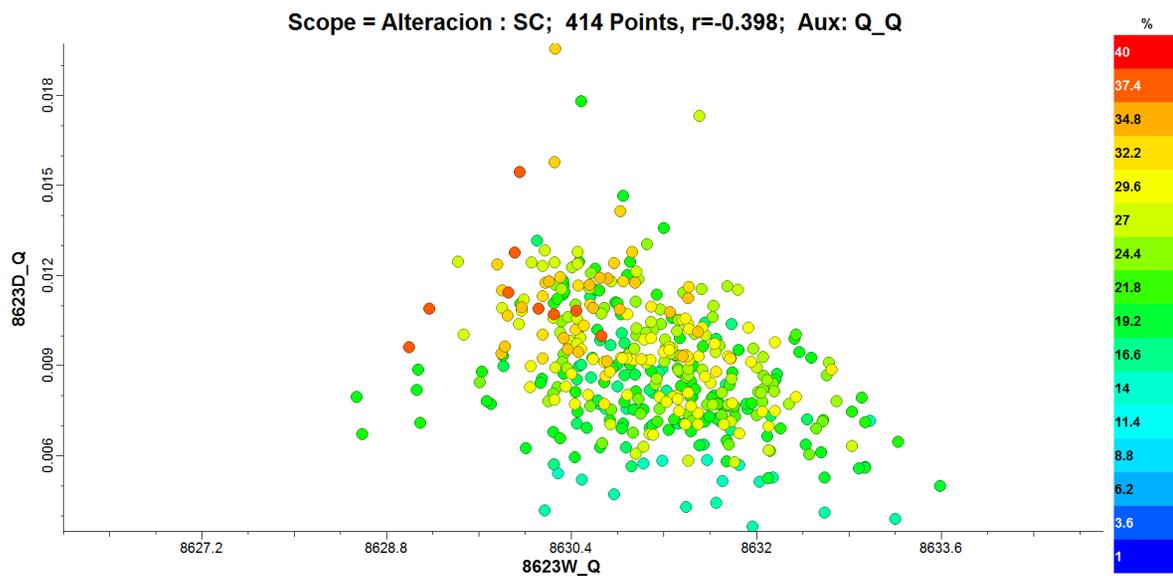


Figura 3.30 Comparación escalares y composición de cuarzo según QEMSCAN en alteración SC

Con estos tipos de gráficos es posible distinguir la distribución de puntos de los escalares del mineral, presentando en cada caso una forma diferente para la nube de puntos, relacionada a la naturaleza entre composiciones de los minerales y sus características asociadas según alteraciones.

La totalidad de gráficos por mineral y alteración se detalla en el Anexo D.

### 3.4 AGRUPAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

A continuación, se muestra la metodología en términos generales de la forma de agrupar la información para luego usar el Teorema de Bayes.

En términos gráficos, el proceso de categorizar la información se puede representar con esquemas, el que para dos categorías correspondería a un plano cuadriculado, en el que cada categoría sería una dimensión y el número de segmentos de su lado correspondería a los grupos de los que se compone la categoría, tal como se muestra en la Figura 3.31 y Figura 3.32.

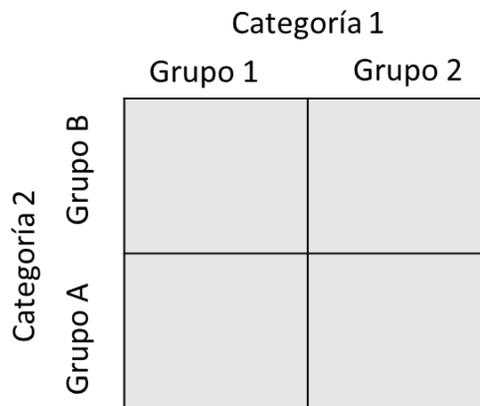


Figura 3.31 Representación gráfica general de discretizar la información en dos categorías con dos grupos cada una

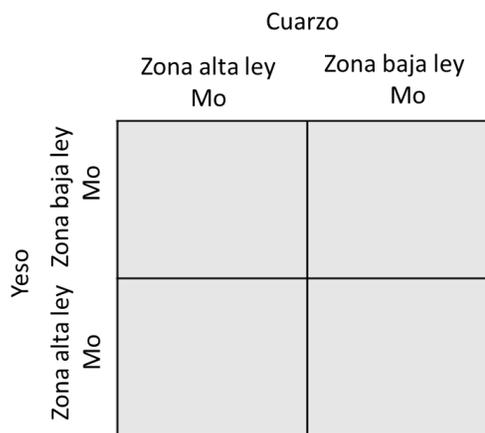


Figura 3.32 Representación gráfica llevada al caso de estudio de separar la información en dos categorías con dos grupos cada una

Si a este plano se le agregase una categoría más, gráficamente se le añadiría una dimensión, como lo que se tendría un cubo compuesto por tantos cubos como multiplicaciones entre los segmentos de los lados se tenga, los que corresponden a los grupos que componen cada categoría, esquema representado en la Figura 3.33 y Figura 3.34.

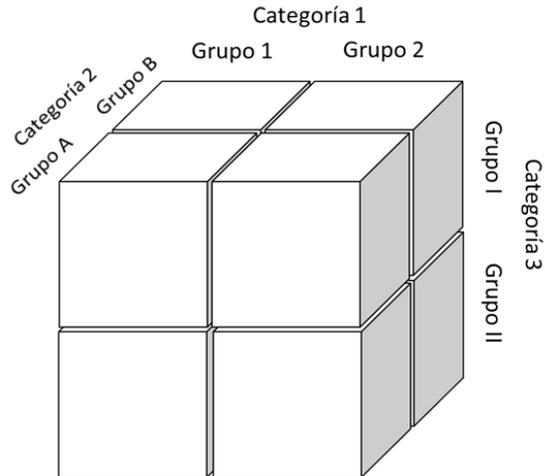


Figura 3.33 Representación gráfica de la generalización de discretizar la información en tres categorías con dos grupos cada una

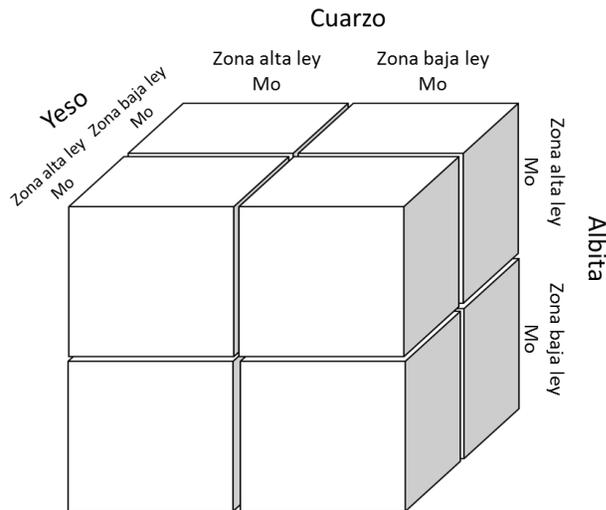


Figura 3.34 Representación gráfica de discretizar la información en tres categorías con dos grupos cada una, llevado al caso de estudio

Si se continúa con la representación, para el presente caso de estudio se busca un hipercubo de diez dimensiones, con una dimensión por cada mineral, y como cada dimensión está compuesta por dos segmentos o grupos que se calcularán, alta o baja ley de molibdeno, se tiene de esta manera  $2^{10} = 1026$  compartimientos en los que se discretiza la información.

Finalmente, al trabajar sobre dos alteraciones podría considerarse la existencia de dos de estos hipercubos, uno para la KBT y otro para la SC, en donde a cada

compartimiento de ellos se le asigna una probabilidad de mineralización de molibdeno dada la información disponible, lo que permitirá reclasificar las muestras y del mismo modo clasificar nuevas.

### **3.5 APLICACIÓN DEL TEOREMA DE BAYES**

---

Una vez discretizada la información se aplicará el Teorema de Bayes de probabilidades condicionales, con el fin de encontrar combinaciones entre regiones del espectro que le den un peso a la presencia de ciertos minerales en relación a la ley de molibdeno.

El Teorema de Bayes se aplicará en este caso sobre información categórica, la cual se compone de las áreas definidas por mineral según la alteración.

Dado el gran número de categorías, correspondientes a los diez minerales y teniendo en cuenta que para cada una de ellas existen dos posibles alternativas para una muestra, factor que genera que existan  $2^{10}$  posibles combinaciones de condiciones para cada muestra, sumado a la existencia de 1361 muestras examinadas, obliga a generar un algoritmo que permita el trabajo de la aplicación de las probabilidades condicionales para este estudio.

El algoritmo para el cálculo y asignación de probabilidades se escribe en el lenguaje *Python* y se basa en gran parte en un algoritmo preexistente (Hill, Oliver, Fisher, Cleverley, & Nugus, 2014).

Se utiliza el lenguaje *Python* en su versión 2.7 gracias a su versatilidad, su uso generalizado en aplicaciones científicas, sus variadas librerías de programas y su rápido manejo de información sin ser un lenguaje de excesiva dificultad.

#### **3.5.1 PROGRAMA**

Las partes que contempla el programa citado se dividen en:

1. Lectura información de entrada:

- El algoritmo lee el archivo que se ingresa como entrada, según el formato determinado, y procede a leer las filas guardando la información de cada una de las categorías para cada muestra, con una interfaz gráfica que se muestra en el Anexo G.

2. Comprobación de formato para ingresar la información:

- Se consideran inválidos los datos fuera de los posibles valores a adoptar por cada categoría. En este caso solo se aceptan valores iguales a uno o a dos.

3. Cálculo de la probabilidad:

- A modo de metodología general, el programa realiza dos procesos de cuentas, luego calcula probabilidades y finalmente asigna las probabilidades calculadas a las muestras.

- Ahora bien, en un detalle mayor, el programa se basa en el Teorema de Bayes, fórmula que se muestra en la Ecuación 3.3:

$$p(A|B) = \frac{p(B|A)p(A)}{p(B)}$$

*Ecuación 3.3 Teorema de Bayes*

- En este caso, la fórmula a aplicar, considerar múltiples categorías, las que corresponden a los minerales que se ven involucrados, con cierta condición sobre la ley de corte del molibdeno, de este modo, la fórmula aplicada al caso de estudio corresponde a la Ecuación 3.4:

$$p(Mo \geq v | f_1 \dots f_{10}) = \frac{p(f_1 \dots f_{10} | Mo \geq v) * p(Mo \geq v)}{p(f_1 \dots f_{10})}$$

*Ecuación 3.4 Aplicación Teorema de Bayes*

- Donde cada  $f_y$  corresponde a un mineral, el que puede tomar dos valores, según si la muestra pertenece o no al área calculada.

$$f_y(x) = \begin{cases} 1 (In), & x \text{ dentro del área} \\ 2 (Out), & x \text{ fuera del área} \end{cases}$$

*Ecuación 3.5 Posibles valores para los minerales según los escalares*

$$y \in \left[ \begin{array}{l} 1 = \text{Caolinita}, 2 = \text{Yeso}, 3 = \text{Micas Blancas}, 4 = \text{Micas Negras}, 5 = \text{Montmorillonita}, \\ 6 = \text{Albita}, 7 = \text{Anortoclasa}, 8 = \text{Cuarzo}, 9 = \text{Oligoclasa}, 10 = \text{Labradorita} \end{array} \right]$$

*Ecuación 3.6 Minerales considerados*

$$x = (\text{Longitud de onda}, \text{Abundancia})$$

*Ecuación 3.7 Componentes para definir pertenencia al área*

- Para el cálculo se considera la definición de probabilidades según Laplace, tal y como se muestra en la Ecuación 3.8, simplificando la expresión posteriormente en la Ecuación 3.9:

$$= \frac{\frac{\text{N}^\circ \text{ muestras } (f_1, \dots, f_{10} | Mo \geq v)}{\text{N}^\circ \text{ total muestras sobre ley de corte}}}{\frac{\text{N}^\circ \text{ muestras } (f_1, \dots, f_{10})}{\text{N}^\circ \text{ total muestras}}} * p(Mo \geq v)$$

*Ecuación 3.8 Aplicación del Teorema de Bayes con la definición de Laplace*

$$= \frac{\text{N}^\circ \text{ muestras } (f_1, \dots, f_{10} | Mo \geq v) * \text{N}^\circ \text{ total muestras}}{\text{N}^\circ \text{ muestras } (f_1, \dots, f_{10}) * \text{N}^\circ \text{ total muestras sobre ley de corte}} * p(Mo \geq v)$$

*Ecuación 3.9 Simplificación*

- Finalmente se calcula:

$$= \frac{\text{N}^\circ \text{muestras } (f_1, \dots, f_{10} | Mo \geq v)}{\text{N}^\circ \text{muestras } (f_1, \dots, f_{10})}$$

*Ecuación 3.10 Cuenta final del algoritmo*

## 3.6 INFLUENCIAS DE MINERALES EN EL INDICADOR

El presente indicador considera para su uso y aplicación una serie de diez minerales tanto para la determinación de mineralización en la alteración sericítica, como en la alteración potásica. Pese a lo anterior, no necesariamente todos los minerales son igual de determinantes a la hora de obtener los resultados de mineralización de molibdeno. Este concepto, que da cuenta de la importancia de tener cierto mineral en el indicador se llamará influencia. La influencia entonces, será la medida del impacto de la presencia del mineral para la determinación de la probabilidad de mineralización.

El interés en su estudio radica en la posibilidad de disminuir el número de minerales considerados en el indicador, sin perder información para la obtención de los resultados presentados. De igual modo, dada la forma en que se calcula, indica en gran medida la variabilidad de la estimación ante la presencia o ausencia de ciertos minerales, los que impactan en gran medida en la probabilidad de mineralización.

### 3.6.1 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE INFLUENCIAS POR MINERAL

En términos prácticos, la influencia se calculará de la siguiente manera:

- Valorización de pertenencia a la zona de alta ley: En primer lugar, se realiza una valorización sobre la pertenencia a la zona de alta ley de la región determinada según el gráfico de densidad de kernel, KDE por sus siglas en inglés (Scott, D., 1992), que se presentará más adelante. Como en este caso se tiene una condición con solo dos opciones, pertenecer o no pertenecer, se proceden a transformar ambas opciones a un valor numérico a fin de cuantificar la importancia de ambas zonas. De este modo, se le asocia la escala de valorización de la Tabla 3.17.

*Tabla 3.17 Valorización sobre las condiciones de pertenencia a las zonas de alta ley*

Condición	Valor
Pertenecer al área de alta ley	1
No pertenecer al área de alta ley	-1

Se elige esta valorización por sobre otras, dada la simpleza en su codificación, el potencial análisis de los resultados y su interpretación.

- Reemplazo de la valorización en los resultados de probabilidad: Una vez considerada la codificación, se procede a reemplazar los valores de pertenencia

al área de alta ley por mineral con los valores de las condiciones de la Tabla 3.17, en los resultados de probabilidades obtenidos, separados según alteración.

- Ponderación de la valorización por la probabilidad: Se procede a multiplicar en cada caso el valor de la condición de pertenencia del mineral, con la probabilidad obtenida en tal caso.
- Obtención de la probabilidad ponderada por mineral: Se procede a sumar todos los valores de probabilidades recientemente multiplicados para un mismo mineral, logrando tener de este modo, un solo valor por mineral estudiado.
- Normalización de las probabilidades ponderadas: Para comparar los resultados obtenidos, se procede a normalizar los valores, considerando para esto el total de la suma de probabilidades ponderadas de los diez minerales, equivalente a un cien por ciento.
- Obtención de resultados: Finalmente se ordenan los resultados y se genera un gráfico de barras para su mejor comprensión. Se repiten los pasos anteriores tanto para la alteración potásica, como para la alteración sericítica.

### **3.7 VALIDACIÓN**

---

Tradicionalmente la validación de un modelo consiste en obtener un grado de confianza del mismo en relación el fin al que se destina, esto generalmente se realiza comparando valores entregados por el modelo, en relación a un conjunto de prueba (Emery, 2013). El indicador construido en este caso toma como valores de entrada los análisis de concentración de molibdeno, por lo que es de gran relevancia poner a prueba la variación de los resultados tras considerar una fracción de la información de entrada, a fin de observar la robustez del modelo.

Para realizar la validación de un modelo existen numerosas técnicas según el tipo de modelo que se quiere estudiar. De este modo existen validaciones para modelos predictivos, para simulaciones, para modelos geoestadísticos, entre otros. Dado que el presente estudio trata de la creación de un indicador basado en probabilidades condicionales se pone especial énfasis en las técnicas utilizadas para la validación de modelos bayesianos, técnicas que tradicionalmente corresponden a validaciones cruzadas de  $k$  iteraciones.

#### **3.7.1 VALIDACIÓN CRUZADA**

Para la validación del indicador construido se opta por utilizar la validación cruzada de  $k$  iteraciones, principalmente debido su amplio uso en estudios de indicadores bayesianos (Olecka, 2002).

La técnica de validación cruzada de  $k$  iteraciones, consiste en una serie de etapas que se procede a explicar y que se repite  $k$  veces considerando aleatoriedad en la iteración:

1. Segregación de la información que alimenta al modelo: En esta etapa se divide la información que alimenta al modelo en una serie de  $k$  grupos, agrupación que se realiza de manera aleatoria.
2. Reducción de la información que alimenta al modelo: Luego de separar la información en una serie de grupos, se procede a eliminar de la información que alimenta al modelo uno de ellos.
3. Alimentación del modelo: Se procede a suministrar al modelo el subconjunto de información seleccionado.
4. Aplicación del modelo: Se aplica el modelo obteniendo parámetros de selección con la información entregada.
5. Clasificación de la información omitida: En esta etapa se clasifica el grupo de datos que no fueron alimentados al modelo, permitiendo de este modo estudiar su comportamiento en relación los resultados de clasificación obtenidos con la información completa.
6. Determinación del error: Se determina el error entre: la clasificación de la información omitida como alimentación del modelo y el caso base. Para el cálculo del error se obtiene la diferencia entre cada muestra y luego se calcula la raíz cuadrada del promedio de la suma de las diferencias al cuadrado.
7. Cambio del grupo a estudiar: Se repiten los pasos del 2 al 6, clasificando de esta forma todos los grupos, obteniendo un solo error de esta iteración considerando para ello el conjunto de errores según el número de grupos separados.
8.  $K$  iteraciones: Se repiten los pasos desde el 1 hasta el 7,  $K$  ocasiones, obteniendo en cada iteración el promedio acumulado del error en relación al caso base, tendiendo asintóticamente de esta forma al error del modelo.

### **3.8 TÉCNICA DE AGRUPACIÓN DE LAS PROBABILIDADES PUNTUALES**

---

Una vez obtenidos los resultados de las probabilidades de mineralización para cada una de las muestras, resulta de gran interés buscar una metodología para agrupar la información. Esto dada la gran resolución espacial que tiene el equipo hiperespectral, el que para el Hylogger-3 se ubica en los 4 [mm], con lo que entregó 1361 datos para las 144 bandejas muestreadas.

Se busca entonces, llevar los resultados asociados a las probabilidades de mineralización de la información espectral a una escala de información de mayor envergadura, para lograr de este modo utilizar el indicador como una herramienta para una eventual toma de decisiones, como, por ejemplo, de nuevas campañas de sondeos, con lo que se necesitaría evaluar la decisión a una escala mayor.

### 3.8.1 ALTERNATIVAS DE AGRUPACIÓN

Formas para agrupar los resultados obtenidos son variadas, comenzando intuitivamente con la aplicación de valores promedio, con lo que se podría agrupar resultados de probabilidades en un determinado espacio, así como también promediar inicialmente las firmas espectrales por bandeja a fin de reducir la información.

La aplicación de promedios, sin embargo, provoca pérdida de variabilidad en los valores obtenidos (Emery, 2012), situación que no es conveniente, dada la limitada información que se dispone en estudios de este tipo y los resultados que se podrían obtener.

Considerando la situación antes mencionada, se indaga en otras técnicas que permitan agrupar la información. Entre ellas destaca la gráfica de control, técnica que originalmente es una herramienta de gestión basada en métodos estadísticos utilizada para evaluar la estabilidad de un proceso y que permite detectar cambios con respecto a un valor objetivo, con lo que se podría utilizar en un espacio continuo, como lo es un sondeaje, para evaluar los cambios de probabilidades de mineralización atribuyéndolo a zonas de agrupación de información.

### 3.8.2 SUMA DE ERRORES ACUMULADOS

Dentro de las gráficas de control, destaca la suma acumulada de errores (CUSUM), por sus siglas en inglés.

Esta técnica consiste en calcular para cada observación  $x_i$ , su desviación de la media objetivo  $\mu$  e ir acumulando estas desviaciones ( $x_i - \mu$ ) desde un valor inicial, hasta uno final.

$$S_n = \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)$$

*Ecuación 3.11 CUSUM*

Se podría interpretar la aplicación de esta técnica de la siguiente forma: dada una media de probabilidad de mineralización  $\mu$  en un determinado sondeaje, las diferencias ( $x_i - \mu$ ) serán pequeños valores positivos y negativos alrededor de cero en el caso de tener pequeñas variaciones en la probabilidad, de forma que su suma será un valor próximo a cero. Cuando la probabilidad de mineralización comience a cambiar a lo largo del sondeaje, provocará un aumento o disminución en la media, las diferencias ( $x_i - \mu$ ) serán mayores a cero y al acumularlas veremos un claro cambio en la pendiente del gráfico CUSUM (Hawkins & Olwell, 1998).

La razón de su utilización entonces tiene directa relación con el poder establecer zonas en un sondeaje, a las cuales se les puede asignar una categoría de mineralización, baja, media o alta, en relación a cambios en la pendiente del gráfico.

La aplicación de la técnica se realiza entonces por sondeos, destacando su aplicación en los sondeos que presentan un mayor número de muestras de manera continua, correspondiente en este caso al sondeaje GMT13-11.

# CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

## 4.1 AGRUPACIÓN DE LA INFORMACIÓN

---

Tras el procesamiento de la información hiperespectral, las muestras presentan una serie de información útil para determinar grupos y con esto discretizar a información. Entre la que encontramos:

- La ley de molibdeno
- La alteración
- El valor de la longitud de onda para los diez escalares
- El valor de la reflectancia para los diez minerales.

Para la aplicación del Teorema de Bayes sobre categorías primero es necesario agrupar la información, de tal modo de discretizar el continuo de información disponible.

### 4.1.1 LEY DE MOLIBDENO

Como primer paso, se dispone a discretizar la ley de molibdeno, tal y como se mencionó, existen dos grupos naturales para su clasificación, como lo son las denominaciones de estéril y mineral, condiciones que tradicionalmente se separan por el límite impuesto por la ley de corte.

La complejidad de la definición de una ley de corte para el mineral de molibdeno tiene directa relación con el carácter de subproducto que este elemento tiene en la operación, esto, ya que el molibdeno se separa muchas veces por flotación selectiva de los minerales de cobre, para su posterior procesamiento y venta. Por ende, los costos de su extracción, no consideran los costos de la extracción mineral, ni del proceso de conminución.

Pese a la condición de subproducto del molibdeno, para efectos de este estudio y de la determinación de un indicador de mineralización de dicho elemento, se torna necesario definir un límite en la distribución de leyes para indicar una zona de mineralización frente a una zona estéril.

El concepto usado desde este punto en adelante será entonces el de una ley de corte estadística, basada en la distribución de leyes de las muestras disponibles y no mediante restricciones económicas. Para determinar la ley de corte se utiliza la distribución de las leyes del mineral de interés y se determinan las poblaciones de leyes presentes, reflejadas por su cambio de pendiente en un gráfico de función de densidad, esta metodología coincide con una agrupación de mineral entre un 70 a un 85% de las muestras según la literatura (Hill, 2014).

Para determinar el valor escogido, se procede a realizar un KDE (Kernel density estimator) por sus siglas en inglés. El KDE corresponde a un gráfico que permite llevar un conjunto de datos, desde un histograma a una distribución.

El KDE de las leyes de molibdeno de las muestras se aprecia en la Figura 4.1, en este gráfico se distingue la distribución característica de leyes en un yacimiento, tendiendo a la distribución log normal, pese a que su construcción por temas de simpleza no fue bajo dicho supuesto, sino que bajo gaussianidad.

El eje horizontal del gráfico de la Figura 4.1 corresponde a las leyes de molibdeno en partes por millón, mientras que el eje vertical corresponde al valor de la función de densidad. Con una línea vertical segmentada se determina el valor en las leyes de molibdeno en que ocurre un cambio de pendiente de la curva, valor que se encuentra en los 150 [ppm], que agrupa al 75% de las muestras y que será el que distinguirá a las muestras de mineral, de las de estéril.

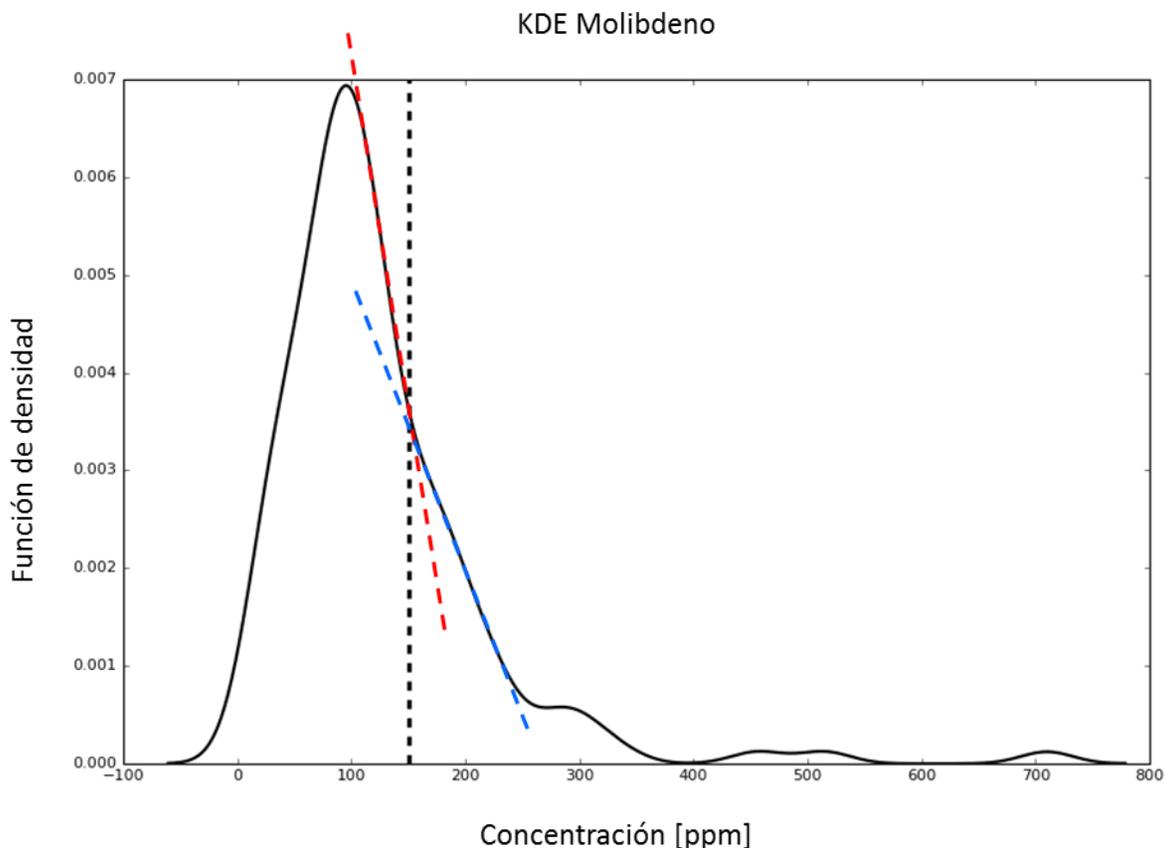


Figura 4.1 KDE de leyes de molibdeno muestreadas, con la intersección de una recta roja y azul se muestra el punto de cambio de pendiente y l determinación de la ley de corte.

Una vez definidos los de la categoría correspondiente a la ley de molibdeno, se procede a definir los grupos de las siguientes categorías.

#### 4.1.2 ALTERACIONES

Para el caso de la categoría alteración, no es necesario determinar grupos, ya que sus valores corresponden a valores categóricos, como lo son la denominación SC (sericítica) y la KBT (potásica). Por ende, se considera una categoría con dos grupos de manera inmediata.

Un factor de gran relevancia en el caso de las alteraciones, radica en que presentan distintas formas de mineralización, es decir, los minerales que participan en cada caso son diferentes o se encuentran en diferentes proporciones, básicamente por originarse en eventos diferentes y a profundidades, temperaturas y tiempos distintos, lo que entrega diferentes condiciones para la presencia de molibdeno. Por lo anterior, es necesario separar la información de ambas alteraciones con el fin de que el indicador se alimente de un solo tipo de mineralización por vez, para evitar que la información de mayor cantidad afecte a la que presenta menos valores y distorsione los resultados de ambos (Painepán, Hill, Mcfarlane, Laukamp, & Ortiz, 2014).

### **4.1.3 ESCALARES**

Con respecto a la información hiperespectral, es necesario agrupar su información para cada una de las categorías correspondientes a los diez minerales. Un primer acercamiento para resolver este problema, podría enfocarse en replicar la metodología utilizada para la ley de molibdeno, sin embargo, a diferencia de dicho caso, el hecho de tener dos variables para una misma categoría, en este caso, por cada mineral (longitud de onda y reflectancia), provocaría un sesgo en la información en el caso que se determinasen umbrales para cada una de ellas, ya que no necesariamente una mayor reflectancia va a indicar una zona de mayor mineral de molibdeno, sino que va a depender de la longitud de onda, como se vio con anterioridad.

Dada la condición bivariable de la información hiperespectral, se opta por la categorización mediante un área, que relacione de este modo la longitud de onda con la reflectancia, para lograrlo, dicha área se determina sobre el gráfico que relaciona ambos escalares.

A modo de ejemplo de la metodología, se dispone a mostrar el caso del escalár representativo para el cuarzo en la alteración KBT (8623D y 8623W), gráfico de la Figura 4.2, similar al de la Figura 3.29, pero sin la comparación con la concentración vía QEMSCAN, además este gráfico corresponde al gráfico de mayor cantidad de los puntos y servirá para mostrar la metodología aplicada a los restantes nueve minerales, con sus respectivas alteraciones.

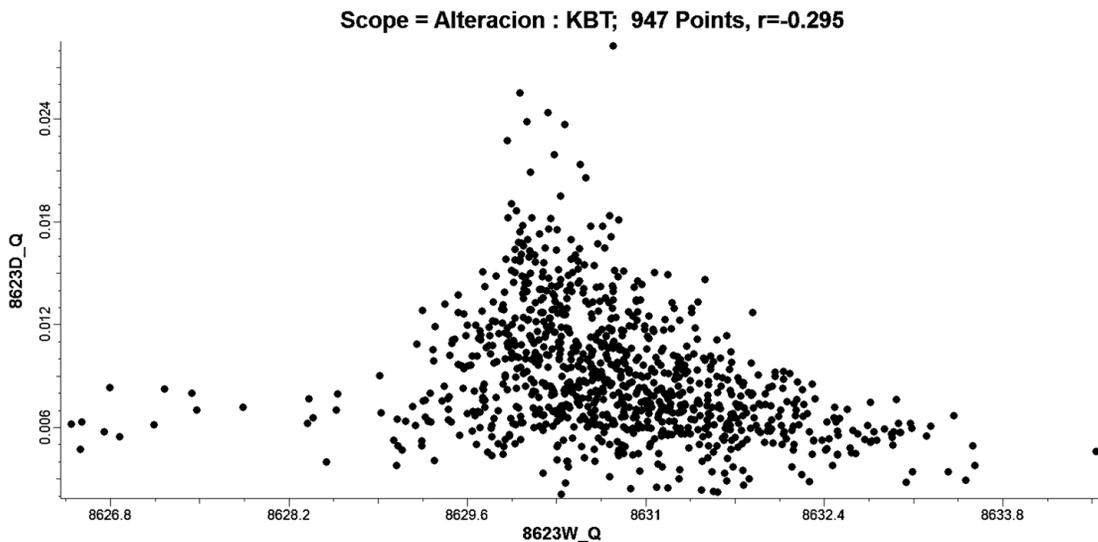


Figura 4.2 Nube de puntos del escalar de longitud de onda 8623W y reflectancia del escalar 8623D para el cuarzo en la alteración KBT

En la Figura 4.2 se muestra una tendencia de aumento de la reflectancia a medida que la longitud de onda se aproxima a los 8630.3 [nm], valor cercano al peak de cuarzo detallado en la literatura ubicado en los 8263 [nm] (Hunt, 1977). Pese a la consideración anterior, con este gráfico tal y como está no se está incorporando la componente de la ley de molibdeno, factor clave dentro del estudio.

De este modo, se utiliza la ley de molibdeno con el fin de identificar posibles zonas en el gráfico de dispersión que alberguen una mayor ley de mineral, para posteriormente, a partir de la definición de la ley de corte, definir la zona que presenta alta concentración de mineral, entendiendo mineral como las muestras sobre el valor de la ley de corte.

En la Figura 4.3 se tiene el mismo gráfico de dispersión, pero esta vez, se coloca una escala de colores para mostrar la ley de molibdeno en las muestras. La escala de la ley del molibdeno está en partes por millón y se definió como color de valor máximo al rojo, para la ley de corte de 150 [ppm], con lo que de este modo solo los puntos de ese color son los considerados mineral.

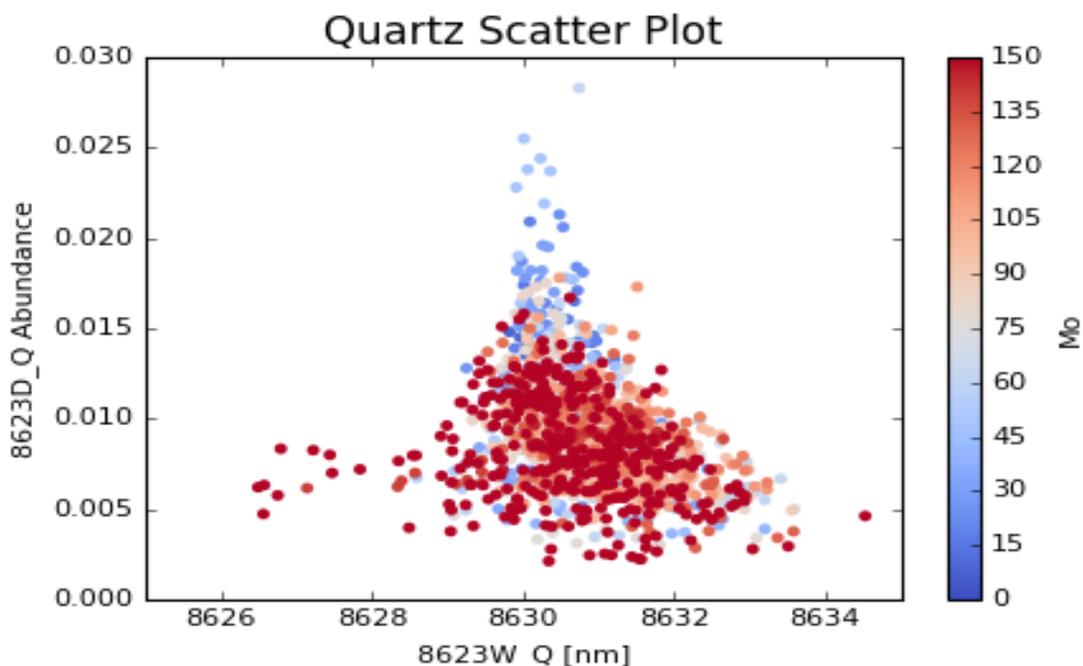


Figura 4.3 Nube de puntos del escalar de longitud de onda 8263W y reflectancia del escalar 8623D para el cuarzo en la alteración KBT, junto a la ley de molibdeno en escala de color

Del gráfico de la Figura 4.3 es necesario mencionar que, pese a la aparente predominancia de los puntos de color rojo, los que representan una alta ley de molibdeno, esto se debe al orden en que se grafican dichos puntos por sobre los demás colores, ya que se decide dejar estos puntos al frente y no al fondo para así apreciar de mejor manera la zona de alto contenido de molibdeno. Por otro lado, se hace notorio que, si bien los puntos de alta ley acompañan la distribución general de puntos, entorno a los 8630.3 [nm], estas muestras no presentan una reflectancia por sobre los 0.016, es decir, se ven acotados por esta variable para el caso del cuarzo.

De este modo, se realiza el mismo gráfico para los diez minerales, tanto para la alteración potásica, como para la sericítica, imágenes que se encuentran en el Anexo D. Estos gráficos dan cuenta de los comportamientos según el mineral estudiado, los que no presentan un patrón común en la distribución de puntos, pero que en todos los casos muestran una tendencia a concentrar los puntos de alta ley de molibdeno en una zona particular del gráfico de dispersión.

Luego de graficar la ley de molibdeno, se hace necesario definir el área que agrupará esa información, para ello se podrían utilizar diversas formas de determinar límites que agrupen los datos, sin embargo, deben ser basadas en algún criterio común y objetivo, a modo de replicar su criterio en todos los minerales.

Para responder a las consideraciones presentadas, se destaca nuevamente la aplicación del KDE, pero esta vez para dos dimensiones, de este modo el KDE entrega una función de densidad de probabilidad, con lo que genera una superficie susceptible a ser representada mediante curvas de nivel. Lo antes descrito, se muestra en la Figura

4.4, en donde se grafican solo las curvas de nivel y se colorea, según tonalidades de celeste, la concentración de puntos por sobre los 150 [ppm] que se ubican fuera de las curvas, en porcentaje.

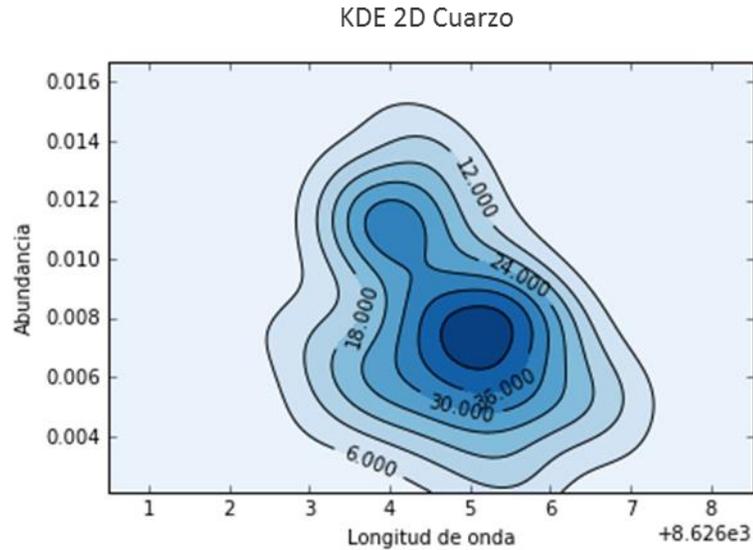


Figura 4.4 Curvas de nivel del KDE para cuarzo en alteración KBT

Las curvas permitirán entonces determinar áreas que entorno a un centro de gran concentración de puntos clasificados como mineral.

A continuación, se procede a obtener las líneas de nivel de la Figura 4.4, para ubicarlas sobre el gráfico de la Figura 4.3 considerando solo los valores por sobre la ley de corte, con el objetivo de esquematizar lo presentado, resultado que se presenta en la Figura 4.5.

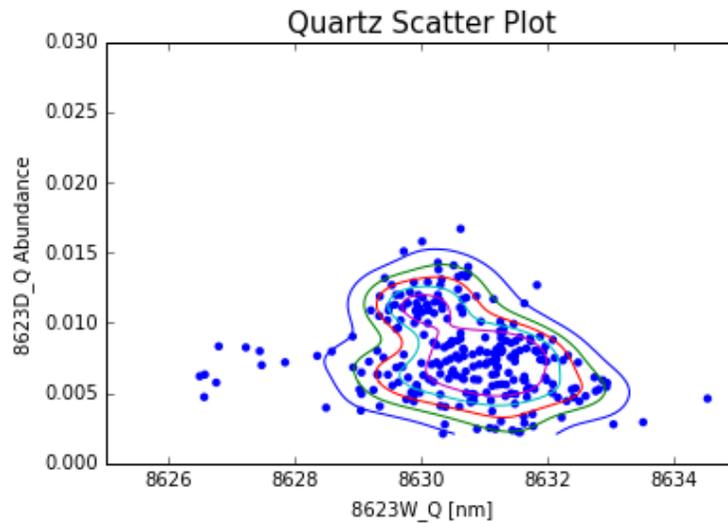


Figura 4.5 Gráfico de KDE superpuesto a la nube de puntos para escalares de cuarzo en KBT con una ley de corte de molibdeno de 150 [ppm]

Ahora bien, como ya se mencionó, se definen dos categorías por mineral, con el objetivo de no subdividir en más cuadrantes la categorización, de esta forma dentro de todas las curvas de nivel, se elige una sola para definir un área y subdividir las muestras en las que se encuentran dentro y fuera de ella.

En este punto, no existe un criterio definido sobre qué curva elegir. A primera vista se tendería a pensar que mientras más estricta es la curva entorno al centro de puntos, mayor será la confianza del método y no así a medida que la curva se aleja del centro, sin embargo, existe otro factor que influye en los resultados y tiene relación con la cantidad de puntos que cumplirán las condiciones de pertenencia a las áreas por mineral, es decir, mientras más pequeña el área por mineral, se esperaría que menos puntos coincidan dentro de ellas en los diez minerales simultáneamente, con lo que el indicador se tornaría restrictivo si es que no se alimentase con un número considerable de puntos. Finalmente, como el presente trabajo incursiona en la técnica, se tomará como primer acercamiento un enfoque general, considerando la curva que encierra sobre el 90% de las muestras, es decir, la de mayor distancia con respecto al centro de puntos.

Luego de establecer la zona que categorizará lo puntos, se procede a asignar a cada muestra analizada la pertenencia o no a dicha zona.

Se repite la metodología presentada para el total de diez minerales, teniendo en consideración dos grupos de información, el de la alteración potásica y el de la alteración sericitica, por lo tanto, se genera un total de veinte conjuntos de gráficos, que se componen de los gráficos mostrados en la Figura 4.3, Figura 4.4 y Figura 4.5, presentados en detalle en el Anexo D, Anexo E y Anexo F.

## **4.2 APLICACIÓN DEL TEOREMA DE BAYES**

---

Al aplicar el programa y el Teorema de Bayes, el algoritmo escribe cuatro archivos de salida, según el directorio escogido en la interfaz. Tres de ellos son archivos intermedios, necesarios para el cálculo final, los que se escriben para revisión en caso de dudas sobre los resultados, mientras que el cuarto son los resultados globales del algoritmo.

### **4.2.1 ARCHIVO DE CONTEO DE MUESTRAS DADAS LAS CONDICIONES**

- En este paso, se realiza el conteo de muestras que cumplen con las condiciones sobre las categorías que, en este caso, son los diez minerales.
- Un extracto de la tabla que entrega la cuenta de las muestras que cumplen las condiciones para las categorías, corresponde a la columna de la derecha de la Tabla 4.1. En la Tabla 4.1 se tiene para cada mineral, dos posibles valores, un valor de 2 que representa que la muestra se encuentra dentro de la zona de alta ley para un determinado mineral, mientras que un valor de 1, representa lo contrario.

- La tabla completa contiene 1026 filas, debido al número de combinaciones posibles ( $2^{10}$ ) de las cuales muchas de las filas presentan una cuenta igual a cero, tal y como se aprecia en la imagen para la primera y tercera fila, pese a una selección de área por mineral poco estricta, vista con anterioridad.

Tabla 4.1 Extracto de resultados de la cuenta de muestras

Kaolinite	Gypsum	White_Mica	Dark_Mica	Montmorillonite	Albite	Anhortoclase	Quartz	Oligoclase	Labradorite	Count
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	○ 1	● 2	0
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	● 2	○ 1	5
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	● 2	● 2	39
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	○ 1	○ 1	0
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	○ 1	● 2	1
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	○ 1	1
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	● 2	20
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	○ 1	13
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	12
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	17

#### 4.2.2 ARCHIVO DE CONTEO DE MUESTRAS SOBRE LA LEY DE CORTE

- En este paso, se realiza el conteo de muestras que presentan una ley de molibdeno por sobre la ley de corte (150 [ppm]) y que cumplen con las condiciones sobre las categorías de los diez minerales.
- Un extracto de la tabla que entrega la cuenta de las muestras con ley de molibdeno por sobre la ley de corte y que cumplen con las condiciones sobre las categorías corresponde a la Tabla 4.2 y Tabla 4.1. Al igual que en la Tabla 4.1, la tabla completa contiene 1026 filas, debido al número de combinaciones posibles ( $2^{10}$ ). Del mismo modo, muchas de las filas presentan una cuenta igual a cero, tal y como se aprecia en la imagen para la primera, segunda, cuarta, quinta y sexta fila.

Tabla 4.2 Extracto de resultados de la cuenta de muestras sobre la ley de corte

Kaolinite	Gypsum	White_Mica	Dark_Mica	Montmorillonite	Albite	Anhortoclase	Quartz	Oligoclase	Labradorite	Count
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	○ 1	● 2	0
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	● 2	○ 1	0
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	● 2	● 2	8
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	○ 1	○ 1	0
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	○ 1	● 2	0
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	○ 1	0
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	● 2	6
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	○ 1	7
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	2
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	8

#### 4.2.3 ARCHIVO DE CÁLCULO DE PROBABILIDADES

- Se calcula la probabilidad, como la división entre cada una de las cuentas realizadas en las dos tablas anteriores, para cada una de las posibles combinaciones de valores de las categorías.

- Un extracto de los resultados de las probabilidades se muestra en la Tabla 4.3, en ella se muestran las mismas diez filas que para la Tabla 4.1 y Tabla 4.2, lo que permite entender el cálculo realizado y el valor obtenido en la última columna de la derecha.

Tabla 4.3 Extracto de resultados del cálculo de probabilidad

Kaolinite	Gypsum	White_Mica	Dark_Mica	Montmorillonite	Albite	Anhorthoclase	Quartz	Oligoclase	Labradorite	Prob
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	○ 1	● 2	0
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	● 2	○ 1	0
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	● 2	● 2	0.21
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	○ 1	○ 1	0
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	○ 1	● 2	0
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	○ 1	0
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	● 2	0.30
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	○ 1	0.54
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	0.17
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	0.47

- Finalmente, una vez que se tienen las probabilidades para cada una de las 1026 combinaciones de categorías, se procede a asignar dichas probabilidades a las muestras.

#### 4.2.4 ASIGNACIÓN DE PROBABILIDADES

- El archivo de salida del algoritmo corresponde a uno similar a la Tabla 4.4, con la salvedad de que cuenta con 1361 filas, correspondientes al número de muestras estudiadas.
- En la Tabla 4.4, se aprecia como en este caso se le asigna la misma probabilidad a muestras que presentan las mismas condiciones para las diez categorías, como lo es el caso de la muestra TELCH\_002\_28 con la muestra TELCH\_002\_34, localizadas en la primera y séptima fila respectivamente.

Tabla 4.4 Extracto de resultados asignación de probabilidades a las muestras

Kaolinite	Gypsum	White_Mica	Dark_Mica	Montmorillonite	Albite	Anhorthoclase	Quartz	Oligoclase	Labradorite	ID Muestra	Conditional probability
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	TELCH_0002_28	0.45
● 2	○ 1	● 2	● 2	○ 1	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	TELCH_0002_29	0.17
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	TELCH_0002_30	0.45
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	○ 1	● 2	● 2	TELCH_0002_31	0.30
● 2	○ 1	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	TELCH_0002_32	0.29
● 2	○ 1	● 2	● 2	○ 1	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	TELCH_0002_33	0.17
● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	TELCH_0002_34	0.45
● 2	○ 1	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	● 2	TELCH_0002_35	0.29
○ 1	○ 1	○ 1	○ 1	○ 1	○ 1	○ 1	● 2	○ 1	○ 1	TELCH_0002_45	0
○ 1	○ 1	○ 1	○ 1	○ 1	○ 1	○ 1	● 2	● 2	● 2	TELCH_0002_46	0

#### 4.2.5 COMENTARIOS

El algoritmo presenta como característica un rápido desempeño, tardando en promedio segundos de procesamiento. Esto se debe al bajo número de datos a calcular, en comparación con grandes bases de datos y la simplicidad de las operaciones realizadas, básicamente cuentas, divisiones y búsquedas.

Por otro lado, existe más de una oportunidad de mejora de este algoritmo, primero desde el punto de vista de la eliminación de los archivos intermedios como medio de control y por otro lado la eliminación del alto número de combinaciones entre categorías que se procesan, las que originalmente son 1026, ya que, si consideramos solo las que presentan una probabilidad mayor a cero, se tiene un conjunto de 68 combinaciones relevantes en este caso.

El algoritmo permite resolver el problema de aplicar el Teorema de Bayes sobre un número considerable de muestras, entregando un método automatizable y generalizable para diversas condiciones de categorías de minerales a estudiar, número de variables por categorías y ley de corte analizada.

### **4.3 RECLASIFICACIÓN DE MUESTRAS**

---

Los resultados de probabilidades de mineralización obtenidos agregan información a cada una de las muestras, estos resultados son entendidos desde la perspectiva de las condiciones mineralógicas que, dada la información, favorecen la mineralización de molibdeno.

Para evaluar los resultados del indicador, se comparan los valores de leyes de molibdeno originales, con la probabilidad de mineralización que se le asigna a cada muestra.

#### **4.3.1 DETERMINACIÓN DE PROBABILIDADES DE MINERALIZACIÓN**

Para realizar esta clasificación inicial, se aplica la metodología de cuadrantes típica de estudios geoestadísticos que consiste básicamente en graficar las muestras considerando las leyes del elemento estudiado, junto a los valores de las probabilidades del indicador. La clasificación ocurre cuando se separan tanto las leyes, como las probabilidades, por un límite, que en el primer caso corresponde a la ley de corte, mientras que, en el segundo caso, corresponde a la probabilidad que determina mineralización, valor que, según la literatura (Hill, Oliver, Fisher, Cleverley, & Nugus, 2014), se identifica al separar poblaciones de probabilidades, las que se interpretan como formas de mineralización.

#### **4.3.2 APLICACIÓN**

Para el presente caso, la ley de corte del molibdeno fue considerada igual a 150 [ppm], lo que clasifica toda muestra sobre esta concentración como mineral y bajo esta como estéril.

Por otro lado, el límite de la probabilidad de mineralización se calculará por alteración a partir de los valores mínimos de los KDE, sobre los resultados de probabilidades por alteración, gráficos que se muestran en la Figura 4.6 y Figura 4.7, para la alteración potásica y sericítica respectivamente.

A partir de dichos gráficos, es posible identificar poblaciones de mineralización, detectables por los peaks de las curvas, las que además muestran un  $v$  cercano a cero cuando se tiene una población sin presencia de mineral, debido a esto se selecciona el mínimo como umbral de mineralización, ya que separa las poblaciones.

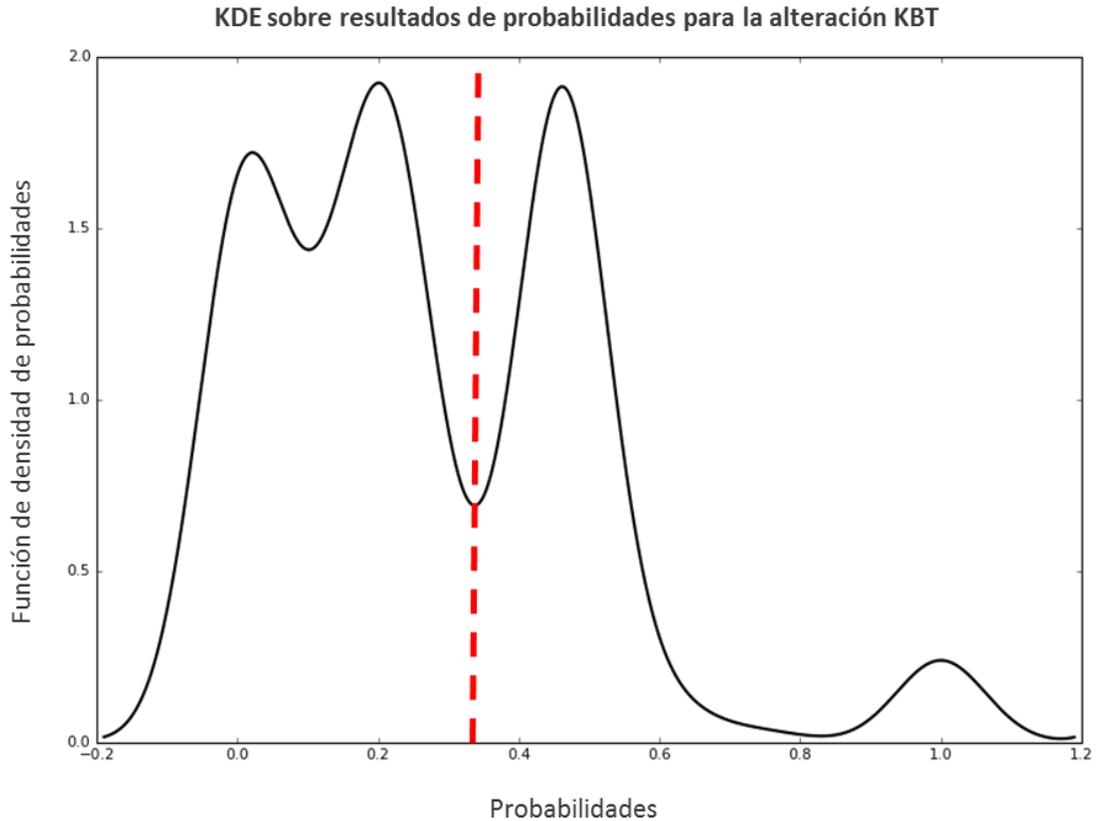


Figura 4.6 KDE sobre resultados de probabilidades en alteración KBT

En el gráfico de la Figura 4.6 se muestra el KDE de la alteración potásica, se tiene en el eje horizontal la probabilidad de mineralización de molibdeno y en el eje vertical el valor de la función de densidad que arroja el KDE, cabe destacar que al realizar el ajuste de la función de densidad asumiendo gaussianidad, se presentan valores que escapan de los resultados de probabilidad, los cuales se ubican en los extremos, a la izquierda del 0 y la derecha del 1, valores que no afectan en el uso de la curva.

Al analizar el gráfico, se identifican una serie de crestas en la curva, principalmente en las probabilidades de valores 0.02, 0.2, 0.5 y 1, lo que podría atribuirse a más de una forma de mineralización en las muestras, factor que, dada la información disponible, no es posible de diferenciar. Ahora bien, sí es posible distinguir claramente una baja en la frecuencia de los resultados en torno a los 0.33, valor que se utiliza como el límite entre las probabilidades de baja y alta mineralización para la alteración potásica.

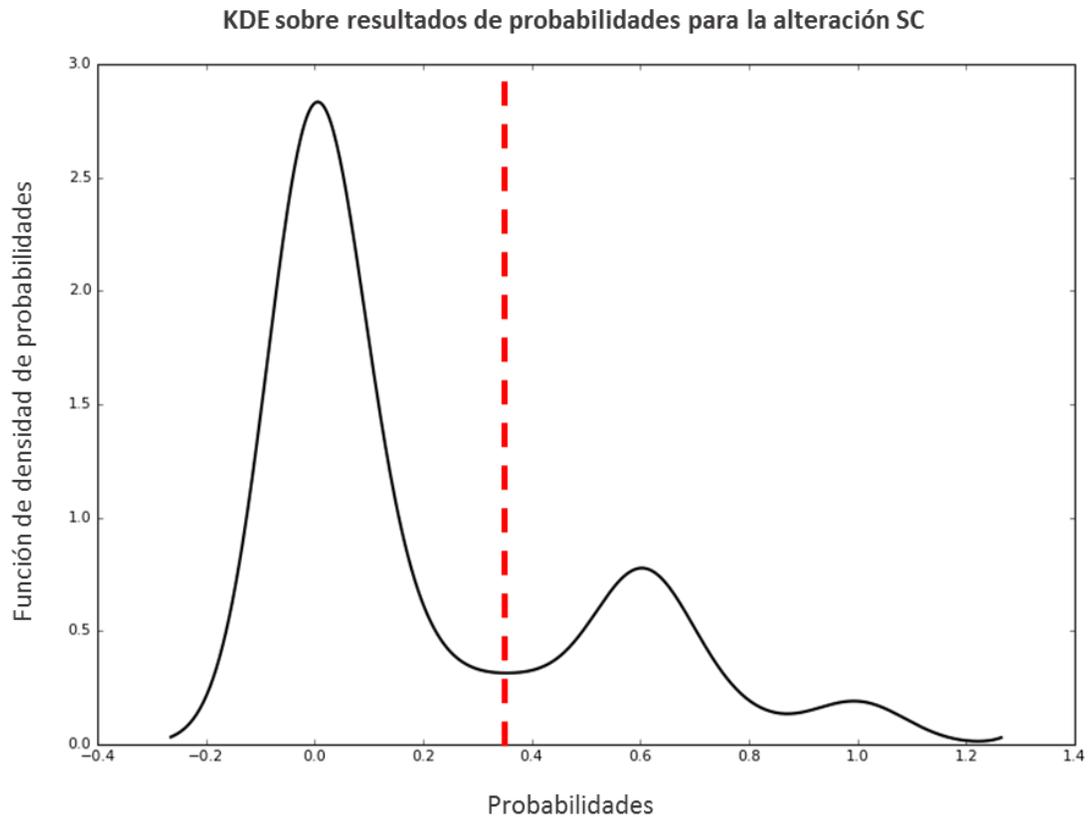


Figura 4.7 KDE sobre resultados de probabilidades en alteración SC

Los resultados de la segunda alteración, correspondiente a la alteración sericítica, se muestran en el gráfico de la Figura 4.7. En este caso se identifican principalmente dos crestas marcadas en el KDE, en las probabilidades de valores 0 y 0.6. Dado lo anterior, se ubica el mínimo entre dichas crestas, valor que se registra a los 0.35 y que se utiliza como el límite entre las probabilidades de baja y alta mineralización para la alteración sericítica.

### 4.3.3 RESULTADOS POR ALTERACIÓN

Una vez determinados los umbrales de mineralización para la probabilidad, se procede a graficar los resultados de las 1361 muestras por alteración en la Figura 4.8 y Figura 4.9.

### 4.3.3.1 ALTERACIÓN POTÁSICA (KBT)

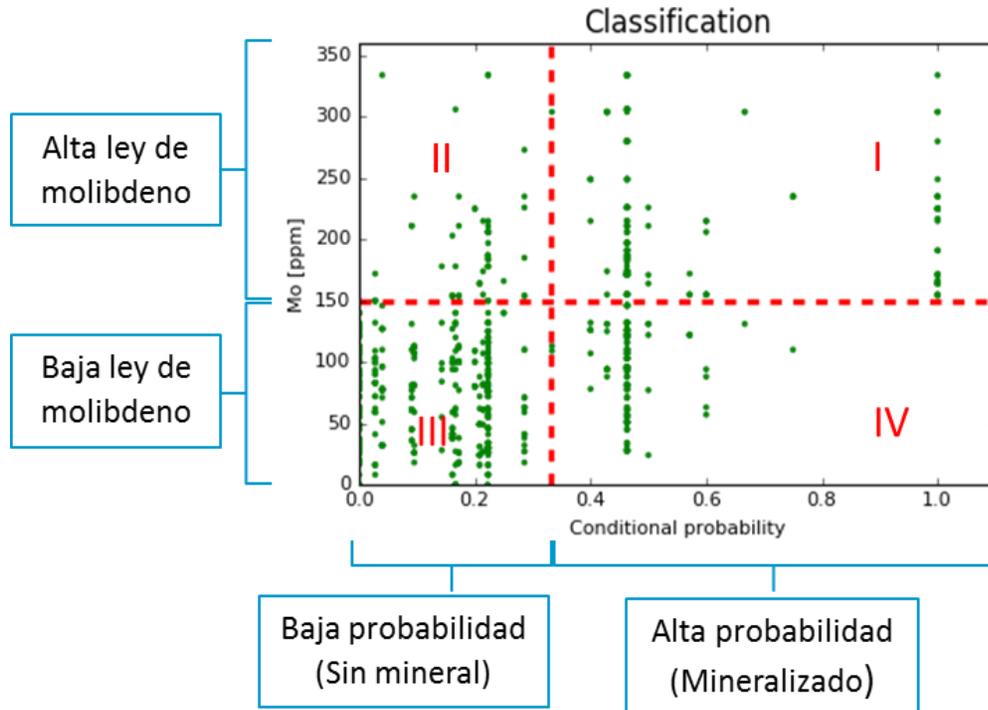


Figura 4.8 Resultados de probabilidad KBT

Los resultados de las 947 muestras de la alteración potásica se muestran en la Figura 4.8, en el eje horizontal se tiene la probabilidad de mineralización por muestra, mientras que en el eje vertical la ley de molibdeno de cada una de ellas. Se aprecia en el gráfico la línea vertical segmentada color rojo que corresponde la probabilidad de 0.33 valor de umbral de mineralización y la línea horizontal segmentada color rojo que corresponde a la ley de corte de valor 150 [ppm]. Se detalla en la Tabla 4.5 los porcentajes en los cuatro cuadrantes, los que son identificados con los números romanos I, II, III y IV, para una mejor visualización.

Tabla 4.5 Análisis por cuadrante en resultados de alteración KBT

Cuadrante	Proporción de muestras	Análisis
I	19.6%	Resultados del modelo concordante con las muestras.
II	8.6%	Error del modelo.
III	54.1%	Resultados del modelo concordante con las muestras.
IV	17.7%	Puntos de interés, zonas que podrían presentar mineral atribuible al efecto pepita.

La Tabla 4.5 contabiliza los puntos en cada cuadrante con respecto al total y su interpretación tiene relación con lo siguiente:

- Cuadrante I: representa la zona en la que tanto el modelo, como los valores de ley de molibdeno indican mineral, por lo que resulta una zona de valores esperados que en este caso corresponden a un 19.6%.
- Celda II: representa la zona en que el modelo asigna una baja probabilidad de mineralización, sin embargo, los valores de ley de molibdeno se encuentran por sobre la ley de corte, indicando de este modo presencia de mineral, por lo que resulta una zona atribuible al error del modelo que en este caso corresponde a un 8.6%. Este valor podría deberse a una forma de mineralización no predominante dentro de la alteración potásica, tal y como se evidenciaba en el gráfico de la Figura 4.6 que indicaría combinaciones y por ende condiciones distintas de minerales que predominan en la mineralización, otro factor que podría ser atribuible al error sería una incorrecta determinación de zonas de mineralización por mineral.
- Celda III: representa la zona en la que tanto el modelo, como los valores de ley de molibdeno, indican estéril, por lo que resulta una zona de valores esperados que en este caso corresponden a un 54.1%.
- Cuadrante IV: representa la zona en la que el modelo indica una alta probabilidad de mineralización, sin embargo, la ley de molibdeno se encuentra por debajo de la ley de corte. Esta zona es la que guarda mayor relevancia para el estudio, ya que se podría atribuir al efecto pepita el hecho de que existan las condiciones de una alta ley de molibdeno, pero dichas muestras no la registran. Razón que podría corresponder, quizás, a un sondaje que no cortó mineralización, en una zona que debería presentar, según las muestras de alta ley de molibdeno. En este caso estos puntos corresponden a un 17.7%.

### 4.3.3.2 ALTERACIÓN SERICÍTICA (SC)

En el caso de la alteración sericítica, se tienen 414 muestras que se grafican en la Figura 4.9, considerando para este caso la misma ley de corte de molibdeno, pero un distinto límite en la probabilidad, con un valor de 0.35.

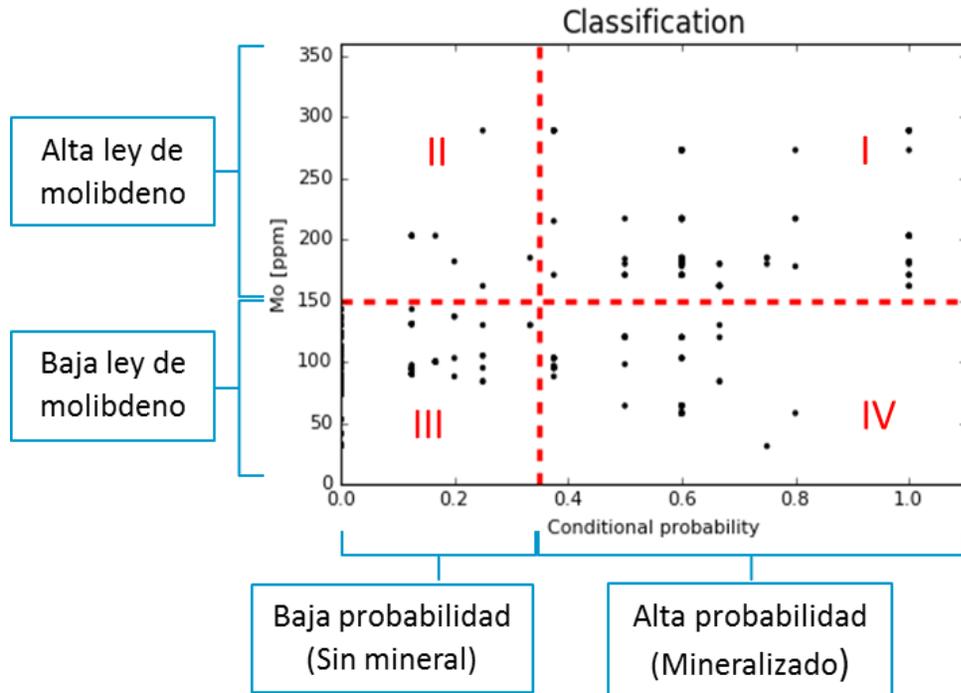


Figura 4.9 Resultados de probabilidad SC

Los resultados de los cuadrantes para la alteración sericítica se detallan en la Tabla 4.6, mostrando en este caso y en comparación con la alteración potásica un error considerablemente menor de 1.9% y conjuntamente un menor valor para los puntos de interés del cuadrante IV, con un valor de 10.4%.

Tabla 4.6 Análisis por cuadrante en resultados de alteración SC

Cuadrante	Proporción de muestras	Análisis
I	18.4%	Resultados del modelo concordante con las muestras.
II	1.9%	Error del modelo.
III	69.3%	Resultados del modelo concordante con las muestras.
IV	10.4%	Puntos de interés, zonas que podrían presentar mineral atribuible al efecto pepita.

#### 4.3.4 ANÁLISIS

Como análisis inmediato, surge la interrogante del real impacto de separar el estudio por alteración, considerando que incluso dentro de una misma alteración existe más de una forma de mineralización, como lo es en el caso de la alteración potásica. Para esclarecer dicha interrogante, se procede a comparar los resultados separando por alteración, frente a los resultados para un caso en el cual las probabilidades se calculen con los 1361 datos disponibles.

De este modo, se replica la metodología y se busca el valor de probabilidad que separa las poblaciones de probabilidades en el KDE, con el fin de determinar el límite que separa entre una alta probabilidad de mineralización de una baja probabilidad.

El KDE de los 1361 datos se muestra en la Figura 4.10, en ella se aprecia como el KDE presenta tres crestas marcadas ubicadas en los valores 0, 0.1 y 0.5. Sumado a lo anterior se distingue un valor mínimo entre dichas crestas localizado en el 0.34, valor que se utiliza como límite para el análisis por cuadrantes.

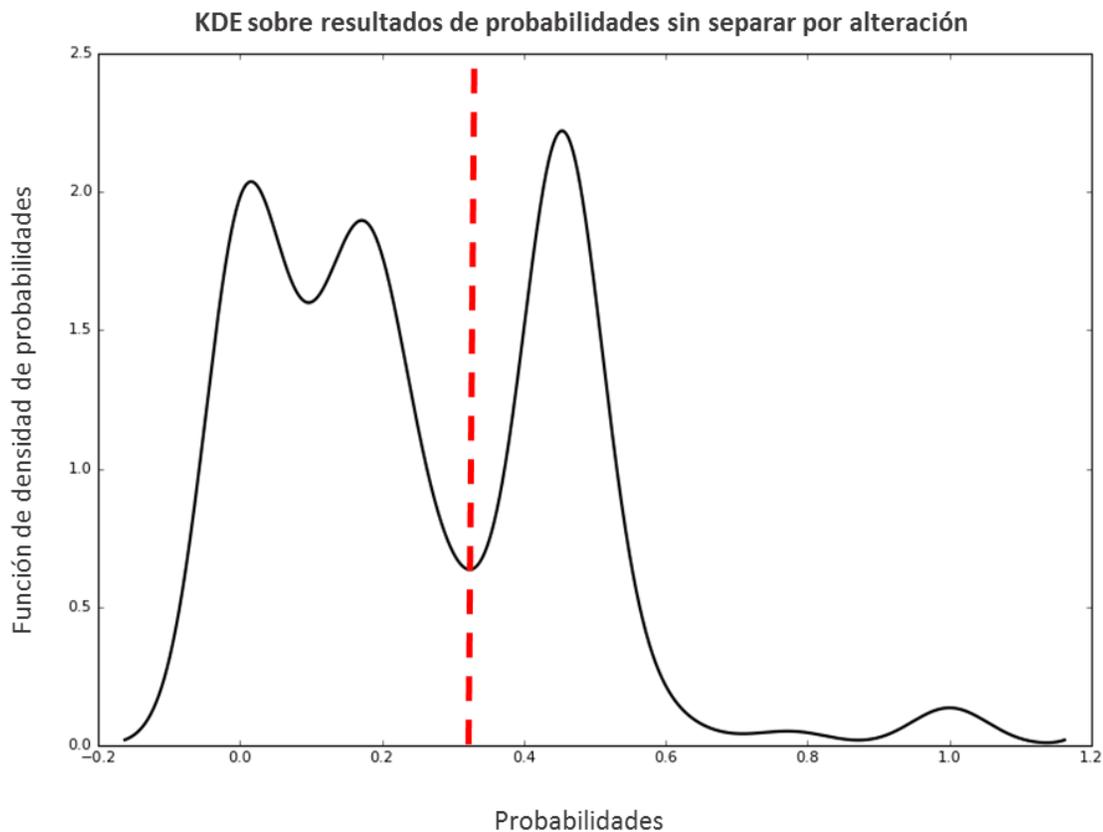


Figura 4.10 KDE de los datos sin segregar por alteración

Se grafican entonces los resultados obtenidos, considerando la ley de corte de 150 [ppm] y un límite de probabilidad de 0.34, gráfico con puntos azules que se compara con el resultado de separar por alteración en la Figura 4.11.

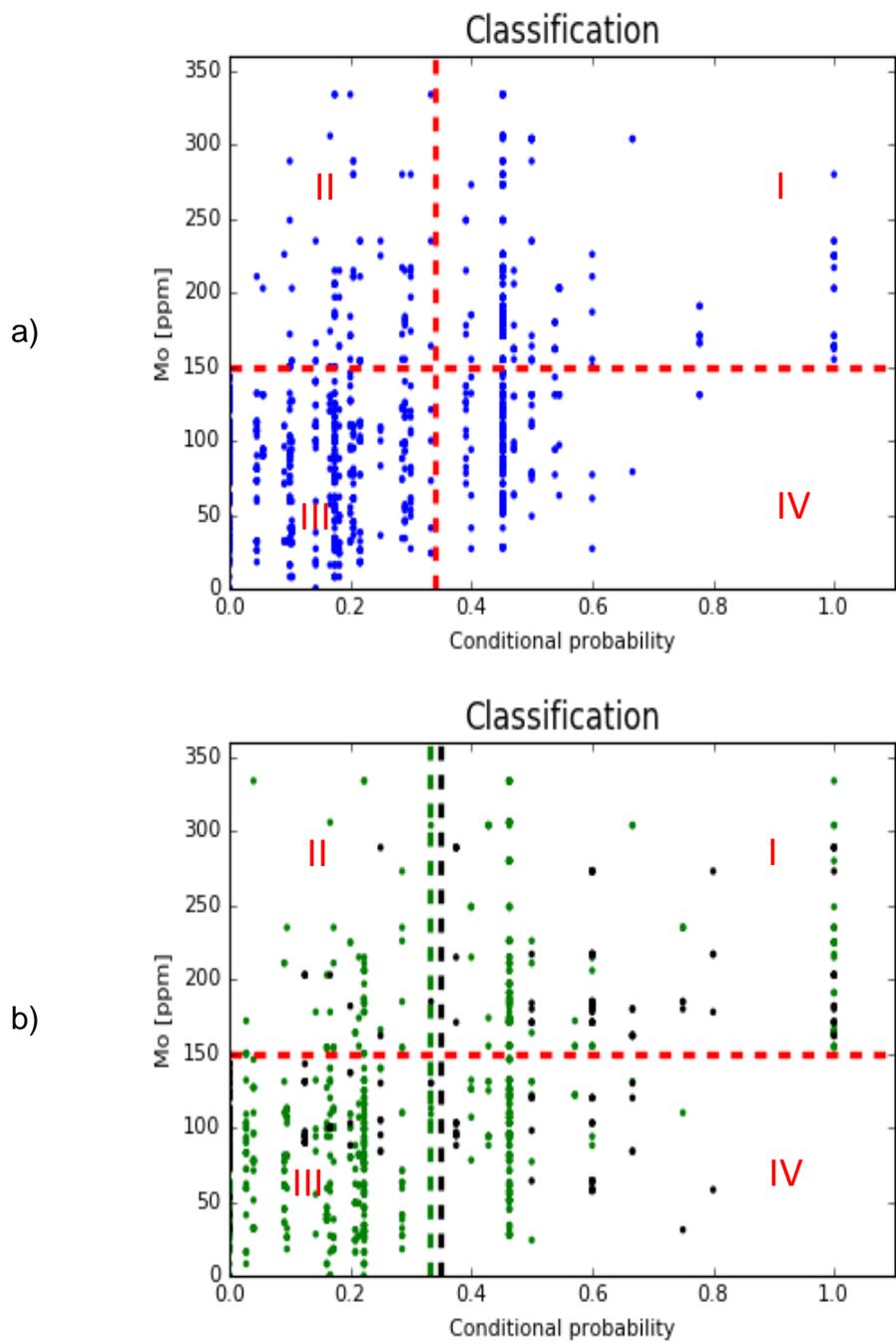


Figura 4.11 Comparación de metodologías. a) Gráfico sin separar muestras por alteración. b) Gráfico separando muestras por alteración, en color verde la alteración KBT y en color negro la alteración SC

Para comparar los resultados es necesario contabilizar los puntos por cuadrantes y de este modo ver el impacto entre las dos metodologías, en términos del error del modelo (cuadrante II) y de los puntos de interés (cuadrante IV), valores que se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Análisis por cuadrante de los resultados comparando las dos metodologías

Cuadrante	Sin separar por alteración	Separando por alteración	Análisis
I	18.1%	19.3%	Resultados del modelo concordante con las muestras.
II	7.6%	6.5%	Error del modelo.
III	55.8%	58.7%	Resultados del modelo concordante con las muestras.
IV	18.4%	15.5%	Puntos de interés, zonas que podrían presentar mineral atribuible al efecto pepita.

#### 4.3.5 COMENTARIOS

La comparación muestra una disminución de los valores tanto del segundo, como del cuarto cuadrante. Para el primer caso, el del segundo cuadrante, existe una disminución del error desde un 7.6% a un 6.5%, lo que representa en términos porcentuales un 14.5% de disminución. Por otro lado, para el caso del cuarto cuadrante existe una disminución de los valores que presentan alta probabilidad según el modelo, pero una baja ley de molibdeno, valores que originalmente correspondían a un 18.4%, pasan a corresponder a un 15.5%, por lo que el cambio porcentual se ubica en los 15.8%.

Finamente tanto los valores del primer y tercer cuadrante aumentan en el caso del modelo que analiza por alteraciones. Para el primer cuadrante existe un aumento desde un 18.1% a un 19.3%, lo que corresponde a un aumento en un 6.6% y en el tercer cuadrante un aumento desde un 55.8% un 58.7%, lo que corresponde a un 5.2%.

Debido al impacto que tiene la aplicación de la metodología por alteración, principalmente en la disminución de los valores del primer cuadrante, se recomienda considerar dicha metodología en estudios de este tipo, para de este modo, reducir los valores que el modelo subestima, aunque esto deje un menor margen para los valores pertenecientes al cuarto cuadrante, valores que se podrían explicar debido al efecto pepita.

Un aspecto relevante a considerar, tiene relación con la aplicación directa de los resultados sobre un soporte de sondajes del yacimiento estudiado, ya que el estudio fue realizado sobre un soporte de muestras de bandejas, factor que entrega una homogeneización de las muestras inexistente en sondajes, en los que por el contrario solo se tiene un análisis superficial al momento de ser analizados, condición que se podría suplir mediante un mayor banco de información. Por otro lado, el estudio sobre

bandejas entrega un sesgo dado por la distribución de los minerales en ellas, que depende en gran parte de la densidad de cada uno los constituyentes de la muestra, condición que podría haber afectado los resultados obtenidos, pudiendo ser un factor en el error conseguido.

## 4.4 INFLUENCIA DE MINERALES EN EL INDICADOR

### 4.4.1 ANÁLISIS

- Las influencias calculadas se presentan en la Tabla 4.8, en donde se muestra por alteración el valor normalizado de la influencia, de manera tal de sumar 100% en cada alteración. junto a un gráfico de barras que ejemplifica el número:

Tabla 4.8 Influencia de minerales en el indicador según alteración

KBT		SC	
Mineral	Influencia	Mineral	Influencia
Caolinita	18%	Mica Negra	14%
Mica Blanca	16%	Albita	14%
Cuarzo	14%	Mica Blanca	13%
Anortoclasa	13%	Cuarzo	11%
Albita	13%	Oligoclasa	10%
Yeso	11%	Montmorillonita	10%
Montmorillonita	9%	Caolinita	10%
Mica Negra	8%	Anortoclasa	9%
Labradorita	0%	Labradorita	7%
Oligoclasa	-2%	Yeso	3%

De los resultados, se desprende que:

- La oligoclasa en la alteración potásica, tiene como resultado una influencia de -2%, esto quiere decir que en general se tiene una mayor probabilidad de mineralización de molibdeno para muestras que no se encontraron en el área de alta ley de este mineral, las razones de esta situación, tienen directa relación con que en este caso, la cantidad de muestras que mostraban oligoclasa y a la vez, una gran ley de molibdeno, era bajo en comparación con el total de muestras con molibdeno por sobre la ley de corte.
- Minerales con baja influencia: Existen algunos minerales que presentan una baja influencia, cercana a cero, los que principalmente son la labradorita para el caso KBT y el yeso para el caso SC. En estos casos, la probabilidad de mineralización prácticamente es independiente de la zona de alta ley por lo que dichos minerales no agregan valor al indicador y podrían no ser consideradas para este caso de estudio.

- Los demás minerales presentan algún grado de influencia en los resultados del indicador, con valores de porcentajes que no superan el 20%.

#### 4.4.2 COMENTARIOS

La influencia mineral entendida como una herramienta para evaluar la utilidad de la zona para categorizar la información hiperespectral al momento de determinar la probabilidad de mineralización, entrega como resultado, para este estudio, la posibilidad de omitir minerales como la labradorita y oligoclasa para la alteración potásica y el yeso para la alteración sericítica, sin perder con esto información para alimentar al indicador y disminuyendo el tiempo de procesamiento del algoritmo.

Es importante destacar que la influencia no tiene relación directa entre la concentración de un determinado mineral y el valioso, ya que una zona de alta ley en un sector de baja abundancia para un mineral podría entregar una alta influencia si es que siempre se mantiene ese comportamiento a lo largo de las muestras, más bien, la influencia tiene relación con la capacidad de concentrar la alta mineralización de molibdeno en características espectrales comunes a las mayoría de las muestras para un determinado mineral.

### 4.5 VALIDACIÓN

---

#### 4.5.1 APLICACIÓN DE LA TÉCNICA

Del mismo modo en que se presenta la metodología de la validación cruzada de  $k$  iteraciones, se aplica al indicador creado. De este modo se dividen las muestras disponibles en diez grupos, de manera aleatoria. El número de  $k = 10$  se determina debido a su amplio uso en la literatura de este tipo de validaciones (Refaeilzadeh, Tang, & Liu, 2011).

Una vez separados los datos en diez grupos se realiza la alimentación del modelo considerando nueve de los diez grupos y aplicando el cálculo de probabilidad para esta información.

Teniendo la probabilidad de mineralización, se aplica la clasificación obtenida en el grupo de información que no se alimenta en el indicador, calculando la diferencia del caso base en relación al valor obtenido del grupo omitido.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n/10} (p_{i \text{ caso base}} - p_i)^2}$$

*Ecuación 4.1 RMSE para cada grupo*

Donde:

- $p$ : Probabilidad entregada por el indicador

- $p_{i \text{ caso base}}$ : Probabilidad de la muestra en el caso base.
- $p_i$ : Probabilidad de la muestra luego de alimentar al indicador con nueve de diez partes de la información.
- $n$ : Número total de muestras que alimentan al indicador,  $n=1362$ .
- $i$ : Número de la muestra.
- $RMSE$ : Corresponde a la raíz promedio de la suma de los errores cuadráticos, por sus siglas en inglés.

Se repite la metodología para los diez grupos de información, obteniendo de este modo diez errores para esta iteración. Una vez obtenidos los errores, se calcula el error de esta iteración (Chai & Draxler, 2014):

$$RMSE_{j \text{ grupos}} = \sqrt{\frac{RMSE_1^2 + \dots + RMSE_j^2}{j}}$$

*Ecuación 4.2 RMSE para j grupos*

Donde:

- $j$ : Corresponde en este caso al número de grupos separados, en este caso 10.

Finalmente se repite lo anterior, en  $K$  ocasiones, con  $K$  igual a  $k$ . Se consideran diez iteraciones dado lo referente en la literatura (Refaeilzadeh, Tang, & Liu, 2011), donde se tiene que se logra llegar al valor asintótico buscado.

Los resultados de este proceso se muestran en la Tabla 4.9.

*Tabla 4.9 RMSE de las diez iteraciones*

Iteración	RMSE
N° 1	0.131
N° 2	0.124
N° 3	0.079
N° 4	0.080
N° 5	0.073
N° 6	0.078
N° 7	0.079
N° 8	0.078
N° 9	0.079
N° 10	0.082

## 4.5.2 RESULTADOS OBTENIDOS

Para obtener el resultado total del error del indicador, se acumulan los valores de RMSE para las diez iteraciones, Tabla 4.10.

Tabla 4.10 RMSE acumulado de las diez iteraciones

Iteración	RMSE acumulado
N° 1	0.131
N° 2	0.128
N° 3	0.106
N° 4	0.094
N° 5	0.084
N° 6	0.081
N° 7	0.080
N° 8	0.079
N° 9	0.079
N° 10	0.080

Los resultados son graficados en la Figura 4.12, a fin de observar el comportamiento del RMSE acumulado, entregando un error que tiende a un 8%.

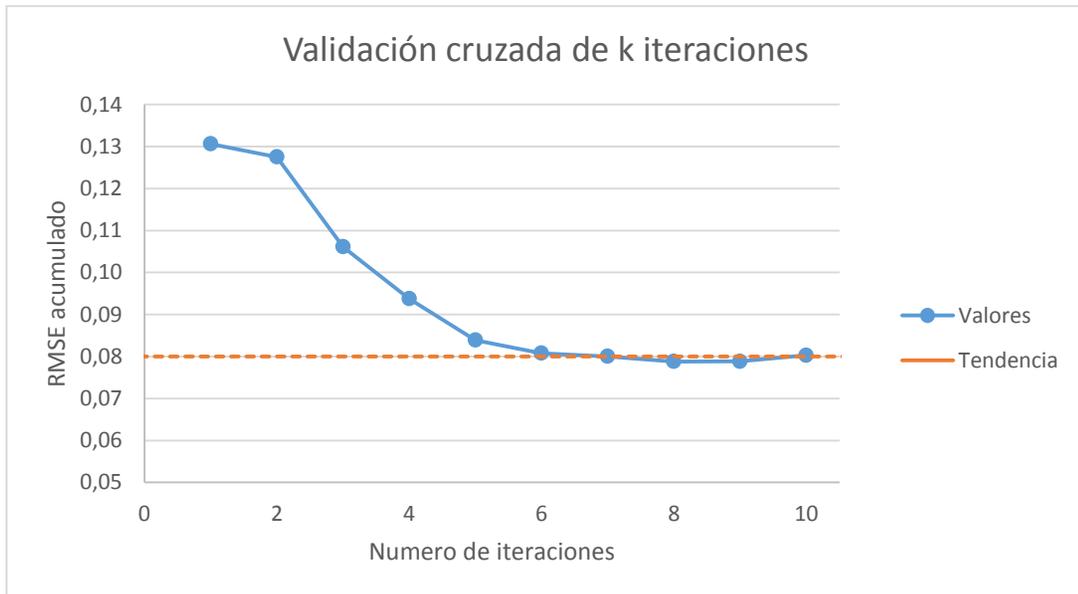


Figura 4.12 Validación cruzada de k iteraciones

### 4.5.3 COMENTARIOS

El resultado obtenido para el indicador mediante la validación, 8%, se encuentra en el orden del resultado del error esperado al momento de realizar el análisis de los datos, el que resultó de 7,6% sin separar por alteración y de 6,5% separando por alteración.

Como en todo estudio existen oportunidades de mejora, en particular en torno a los errores obtenidos tras la validación, cercanos al 8%, con lo que surgen alternativas para poder refinar la técnica, como lo son el alimentar al indicador con un número mayor de información con el fin de encontrar una mejor tendencia sustentada en los grandes números para que las probabilidades condicionales puedan tener una mayor evidencia a la hora de reclasificar las muestras. Por otro lado, se podría considerar la

incorporación de otro tipo de información al indicador, como podría ser la información elemental restante, con lo que se perdería en parte la esencia del presente estudio basado en el foco del análisis hiperespectral, pero se lograría tener un mejor entendimiento de las condiciones que favorecen la mineralización de molibdeno. Otra consideración sería el restringir el área correspondiente a la zona de alta ley en cada uno de los gráficos de los escalares representativos por mineral, con el fin de entregar un indicador más preciso, pero con esto se pasaría a tener una pérdida directa en la cantidad de muestras reclasificadas, con miras a encontrar respuesta al efecto pepita, decisiones que no están zanjadas y dependen del riesgo a tomar por quien aplique la técnica, así como la precisión que esté dispuesto a conseguir.

Otro factor relevante que no puede ser obviado en la validación del indicador, la constituye el grado de aceptación de la condición de mineralización de una zona ya que, pese a que el indicador arroja un valor numérico de probabilidad de mineralización, el hecho de validar una concentración va directamente asociado con un volumen o tonelaje a considerar, factor que en el estudio de los indicadores aún no tiene respuesta y del mismo modo limita la validación a gran escala.

## **4.6 TÉCNICA DE AGRUPACIÓN DE LAS PROBABILIDADES PUNTUALES**

---

### **4.6.1 RESULTADOS**

Los resultados de la aplicación de la técnica de sumas acumuladas se muestran en el gráfico de la Figura 4.13, el cual presenta en el eje horizontal, el sondaje GMT13-11 en profundidad, en el eje horizontal superior, el valor de la probabilidad de mineralización resultante, coloreada según un formato condicional que consideró de color rojo la menor probabilidad, la que corresponde al cero y de color verde la mayor probabilidad, correspondiente al uno.

El gráfico presenta en su eje vertical el valor obtenido para el CUSUM, valores que parten cercano al cero y terminal en el mismo valor, dada la naturaleza de la técnica.

## ZONA DE PROBABILIDAD SONDAJE GMT 13-11

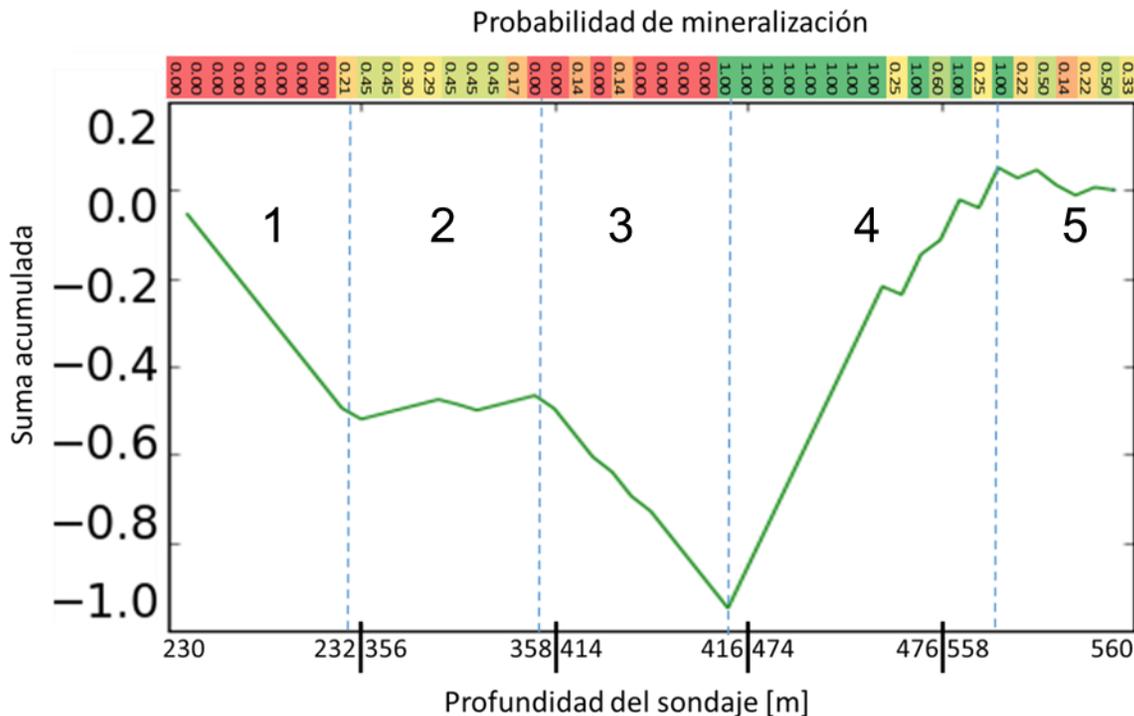


Figura 4.13 Aplicación de sumas acumuladas

Sobre el gráfico, se colocan una serie de líneas punteadas, situadas en los cambios en la pendiente del CUSUM, determinando de este modo, las zonas de probabilidad buscadas.

La segregación es identificable a simple vista, a partir de los colores de la escala del formato condicional, teniendo para el caso presentado de la Figura 4.13, desde izquierda a derecha:

1. Zona de baja probabilidad de mineralización: La pendiente del CUSUM es negativa, zona que responde a una nula probabilidad de mineralización dada por el indicador.
2. Zona de mediana probabilidad de mineralización: La pendiente del CUSUM se torna cercana a cero, zona que responde a una probabilidad promedio de mineralización dada por el indicador, valor que entrega la idea de existencia de molibdeno en las cercanías a las muestras, dada las condiciones mineralógicas y de alteraciones presentes.
3. Zona de baja probabilidad de mineralización: Al igual que el primer sector determinado, el cambio en la pendiente del CUSUM, hacia una pendiente negativa da cuenta de una pobre mineralización en la zona, a pesar de que no todas las muestras entregan una probabilidad igual a cero, de este modo se tiene un buen ejemplo de la utilidad de la agrupación de la información.

4. Zona de alta probabilidad de mineralización: En esta zona existe un cambio en la pendiente del CUSUM, hacia una pendiente positiva, que da cuenta de una alta mineralización en la zona, a pesar de que no todas las muestras entregan una probabilidad igual a igual, de este modo y al igual que en el sector anterior se tiene un buen ejemplo de la utilidad de la agrupación de la información.
5. Zona de mediana probabilidad de mineralización: Finalmente, la pendiente se estabiliza y al igual que en la zona 2, se hace cercana a cero.

Con esto, se propone la utilización de la técnica de sumas acumuladas con el fin de agrupar los valores de probabilidades obtenidos en zonas de baja, mediana o alta mineralización, según corresponda, técnica especialmente útil para la determinación de probabilidades en sondajes, llegando a agrupar los resultados del indicador de una manera automatizable.

## CAPÍTULO 5      **CONCLUSIÓN**

Es posible crear un indicador de mineralización de molibdeno con el objetivo de lidiar con su baja continuidad espacial, tal y como se ha realizado en otros minerales que comparten la característica del efecto pepita, como el caso del oro.

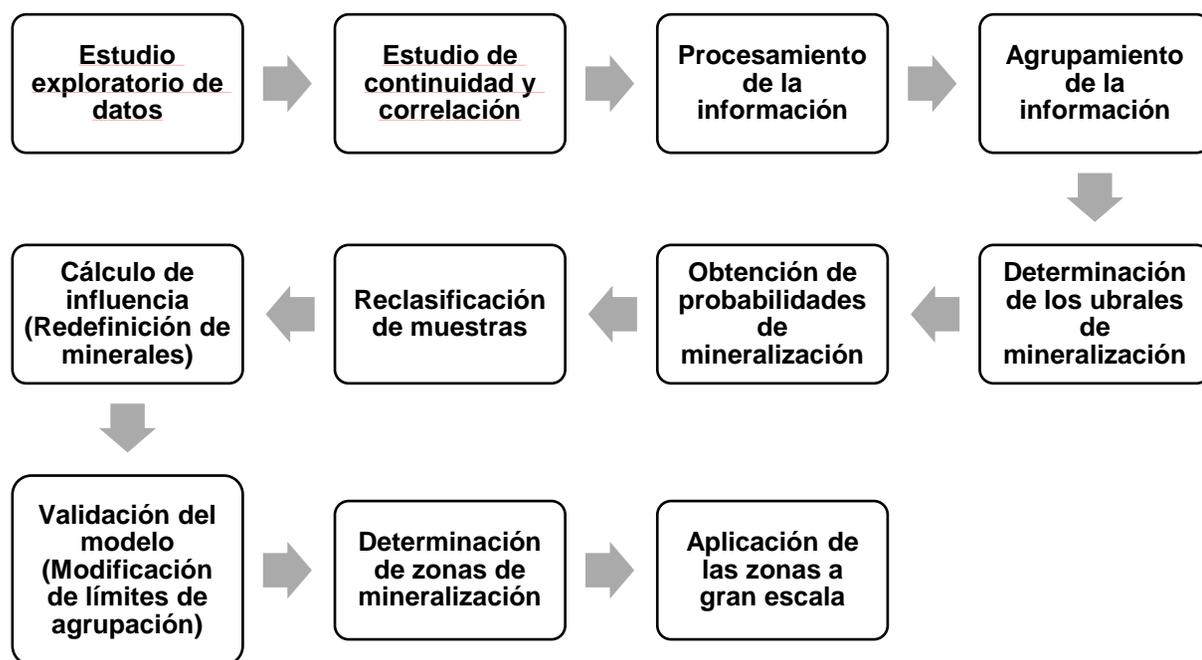
El resultado del indicador es un valor numérico entre cero y uno, que representa la probabilidad de que exista mineralización del molibdeno, considerando para esto una ley de corte que permite discernir, a partir de ella, entre el concepto de mineral y estéril. Este valor, entrega información adicional a la que actualmente se dispone del mineral, constituyendo una nueva variable, que depende de la posición, que complementa a los análisis químicos disponibles y resumen la combinación de propiedades mineralógicas que han mostrado altas leyes del valioso, lo que permitiría entregar un indicio de mineralización en el entorno de otras muestras con condiciones similares, que no registran alta ley de valioso, lo que sería atribuible al efecto pepita.

Este indicador puede ser construido mediante una serie estructurada de pasos, utilizando como entrada datos hiperespectrales, teniendo un análisis mineralógico y la ley del mineral de interés. El resultado es automatizable, objetivo y medible, mostrándose como una herramienta potente y a la vez de fácil utilización para los fines que se estimen convenientes.

Si bien el resultado numérico tiene relación con un análisis realizado a una escala milimétrica, se entrega una metodología que permite agrupar la información a lo largo de un soporte mayor de toma de decisiones, como lo puede ser un sondaje, permitiendo de esta forma buscar dar solución a un problema y guiar en un futuro en la definición de límites de mineralización, aprovechando los beneficios de la tecnología hiperespectral, lo que permite reutilizar las muestras estudiadas para otros fines, algo fundamental en la industria hoy en día.

A nivel particular se logran resultados a destacar en el presente caso de estudio, como lo es la posibilidad de reducir la cantidad de minerales a considerar en el indicador, conclusión que se logra mediante el análisis de influencia, el que arroja un menor número de minerales de entrada a posteriori. En un mayor detalle los minerales prescindibles en el cálculo de la probabilidad de mineralización se dividen según alteración, los que, para la alteración potásica, corresponden a la oligoclasa y labradorita, mientras que en la alteración sericítica se registra el caso del yeso, información útil incluso fuera del marco del indicador.

Pese a que los resultados no son aplicables directamente a otro yacimiento, dada la naturaleza errática de la geología de cada depósito, no existe limitante a simple vista para pensar utilizar la metodología presentada en la Figura 5.1 y así entregar información de mineralización de un mineral de interés de características similares al caso estudiado bajo otras consideraciones de formación, litología y alteración.



*Figura 5.1 Diagrama simplificado de la metodología utilizada*

Finalmente, queda para un trabajo futuro y dada la naturaleza del proyecto, que aún no comienza su desarrollo, la aplicación de los resultados obtenidos directamente sobre el depósito, sobre un bando de muestra de mayor envergadura, para de esta forma validar con datos y cuantificar el real impacto que podría tener el proveer de una información de este tipo a una exploración minera.

## CAPÍTULO 6 BIBLIOGRAFÍA

AMTC. 2014. CSIRO HyLogger™-3 aterriza en la AMTC de la Universidad de Chile. [en línea] <http://www.amtc.cl/?p=2587> [consulta: 05 septiembre 2016]

ARLOT, S., CELISSE, A. 2010. A survey of cross-validation procedures for model selection, *Statistics Surveys*, Vol. 4, 40–79p.

BERMAN M., BISCHOF L., & LAGERSTROM R. 2011. An Unmixing Algorithm Based on a Large Library of Shortwave Infrared Spectra. Technical Report. CSIRO. 44p.

BISSO, C., LAZCANO, E., GUZMÁN, J., y GONZÁLEZ, S. 2009. Geología y desarrollo del yacimiento Esperanza, Distrito Centinela, Antofagasta. En: XII CONGRESO GEOLÓGICO Chileno. 22-26 noviembre, 2009. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 4p.

CARRASCO, P. 2010. Nugget effect, artificial or natural?. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 110(October 2009): 21–23.

CHAI, T., & DRAXLER, R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?-Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247–1250p.

COCHILCO. 2017. Precio de los Metales. [en línea] [https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases de Datos/Precio-de-los-Metales.aspx](https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases_de_Datos/Precio-de-los-Metales.aspx) [consulta 04 enero 2017]

COCHILCO. 2016. Producción Minera. [en línea] [https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases de Datos/Producción-Minera.aspx](https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases_de_Datos/Producción-Minera.aspx) [consulta 04 enero 2017]

CONTRERAS T., L. F. 2015. Caracterización mineralógica del proceso metalúrgico y su impacto en la producción de concentrados de Cu y Mo en CMDIC. Memoria para optar al Título de Geólogo. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 123p.

DOMINY, S., PLATTEN, I., & RAINE, M. 2003. Grade and geological continuity in high-nugget effect gold – quartz reefs: implications for resource estimation and reporting, *Applied Earth Science*. 112(December), 239–260p.

EMERY, X. 2012. Co-simulating Total and Soluble Copper Grades in an Oxide Ore Deposit. *Mathematical Geosciences* 44(1), 27–46p.

EMERY, X. 2013. Apunte de Geoestadística. Santiago. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 149p.

MINERA ESPERANZA. (2012). Geología del yacimiento Esperanza. 32p.

GÁLVEZ P., I. P. 2011. Comparación de vecindades de cokriging para estimar una correogionalización. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 154p.

GRABER T., C. A. 2007. Diseño de un modelo de gestión estratégica, balanced scorecard, en Minera el Tesoro. Tesis para optar al grado de Magister en Gestión y

Dirección de Empresas. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 48p.

HARRIS, P. (2014). Mineral Detection in the Infrared using Reflectance Spectroscopy. 2p.

HECKER C, VAN DER MEIJDE M, VAN DER MEER F. 2010. Thermal infrared spectroscopy on feldspars — Successes, limitations and their implications for remote sensing. *Earth-Science Reviews*.103 (2010).60-70p.

HILL, J., OLIVER, S., CLEVERLEY, S., NUGUS, J., CARSWELL, J., & CLARK, F. 2014. Characterisation and 3D modelling of a nuggety, vein-hosted gold ore body, Sunrise Dam, Western Australia. *Journal of Structural Geology* 67(PB), 222–234.

HILL, J., OLIVER, S., FISHER, L., CLEVERLEY, S., & NUGUS, J. 2014. Using geochemical proxies to model nuggety gold deposits: An example from Sunrise Dam, Western Australia. *Journal of Geochemical Exploration* 145(March), 12–24.

HUNTINGTON, J. 2013. HyLogging Systems Overview. Sydney, Australia 59p.

INTERNATIONAL MOLYBDENUM ASSOCIATION. 2015. Global production and use of molybdenum. [en línea] <http://www.imoa.info/molybdenum/molybdenum-global-production-use.php#> [consulta 04 febrero 2017]

LANGE B., W. J. 2012. Modelamiento y co-simulación de leyes de cobre total y soluble. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 116p.

LAUKAMP, C. 2012. Mineral Spectroscopy Theory. Spectral In-House Training. Western Australian Centre of Excellence for 3D Mineral Mapping/MDU Flagship. 87p.

MELGAREJO, C., PROENZA, A., GALÍ, S., y LLOVET, X. 2010. Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana* 62(1), 1–23.

MERRILL C., J. N. 2016. Estudio del efecto de la composición mineralógica en la reología de pulpas basado en técnicas de caracterización avanzada. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Metalurgia Extractiva. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 216p.

MINERA CENTINELA. 2014. Proceso Productivo. [en línea] <http://web.mineracentinela.cl/index.php/proceso-productivo/> [consulta 11 diciembre 2016]

MINERA CENTINELA. 2014. Ubicación Minera Centinela. [en línea] <http://web.mineracentinela.cl/index.php/ubicacion/> [consulta 11 diciembre 2016]

MUHR, R., PERELLÓ, J. 2009. Exploración y descubrimiento en el Distrito Centinela: Historia y lecciones. En: XII CONGRESO GEOLÓGICO Chileno. 22-26 noviembre, 2009. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 4p.

MÜNCHMEYER, C., y VALENZUELA, D. 2009. Telégrafo: Un pórfido de Cu-Au-Mo en etapa de exploración avanzada en el Distrito Centinela. En: XII CONGRESO

GEOLÓGICO Chileno. 22-26 noviembre, 2009. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 4p.

OLECKA, A. 2002. Evaluating classifiers' performance in a constrained environment. En: Eighth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 23-26 julio. Edmonton. Alberta. Canada, University of Alberta. 7.

OSTROOUMOV, M. 2007. Espectrometría Infrarroja de Reflexión en Mineralogía Avanzada, Gemología y Arqueometría. México. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. 93p. (Serie Monografías)

PAINEPÁN, M., HILL, J., MCFARLANE, A., LAUKAMP, C., y ORTIZ, J. 2014. Datos hiperespectrales como indicador para la mineralización de oro en Sunrise Dam Gold Mine usando probabilidades condicionales. En: XIV CONGRESO GEOLÓGICO Chileno. 04-08 octubre, 2015. La Serena. Sociedad Geológica de Chile 5p.

POLYAK, D. 2016. Molybdenum. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries, January 2016, 112–113p.

REFAEILZADEH, P., TANG, L., y LIU, H. 2011. Cross-Validation, Arizona State University, Estados Unidos. 71, 1–9p.

SILLITOE, H. 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3–41p.

VILLELA, D. CANTALLOPTS, J. 2016. Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera, 61p

WHITBOURN, L., HUNTINGTON, J., MUNDAY, T., SCIENCE, E., CESRE, E., & RYDE, N. 2011. CSIRO's HyLogging™ Systems – Production Proven Technology for the Exploration and Mining Sector, 85–88p.

ZÚÑIGA B, V. A. 2012. Ocurrencia y distribución de molibdenita, esfalerita y galena en el sistema pórfido cuprífero del yacimiento Mina Ministro Hales. Memoria para optar al Título de Geóloga. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 143p.

# CAPÍTULO 7 ANEXOS

## ANEXO A: FIRMAS ESPECTRALES POR MINERAL

- Albita

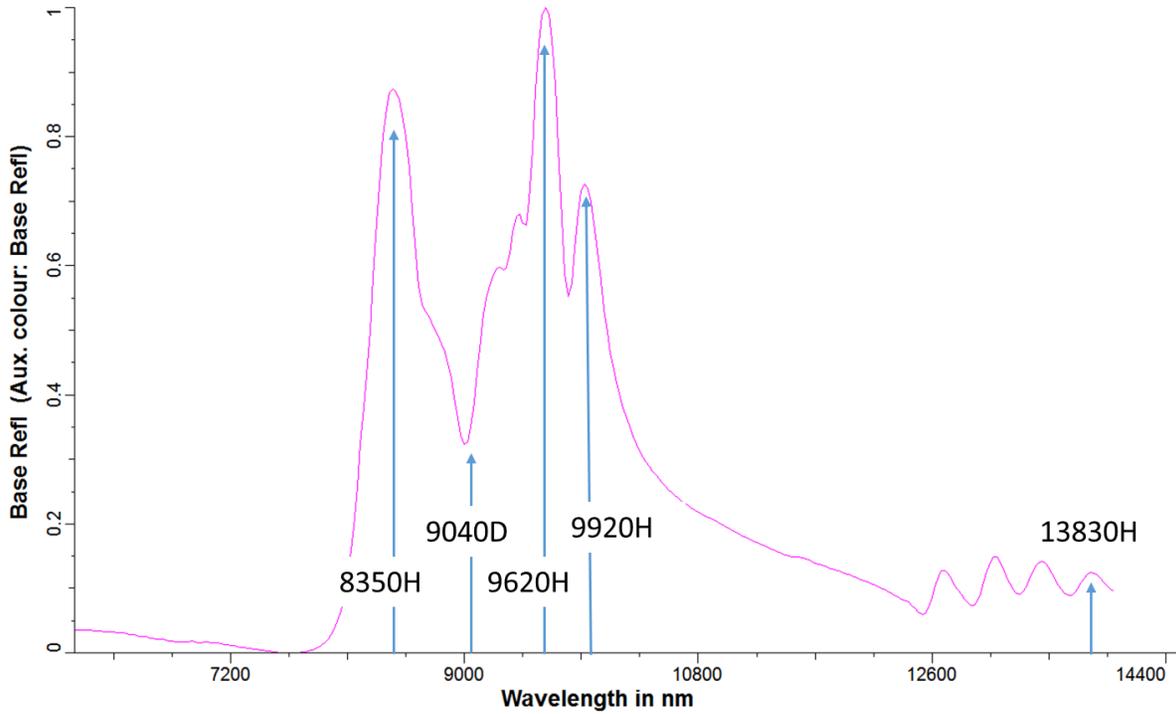


Figura 7.1 Firma espectral de referencia de albita con valles identificados

- Anortoclasa

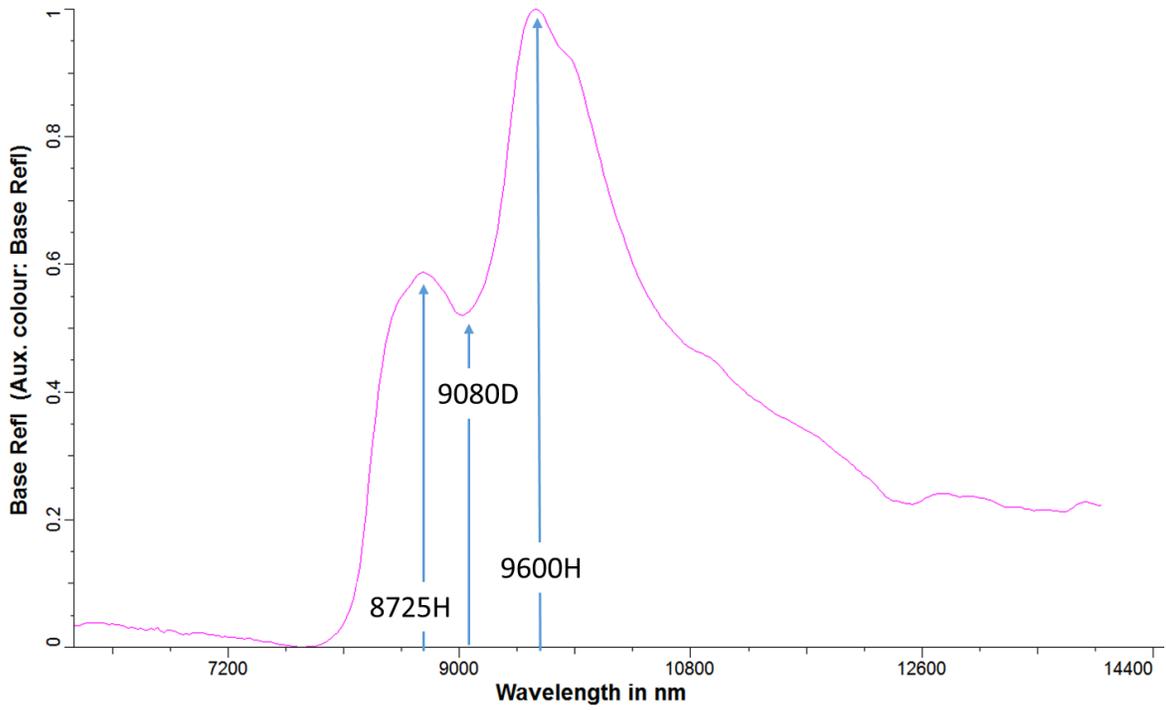


Figura 7.2 Firma espectral de referencia de anortoclasa con valles identificados

- Biotita

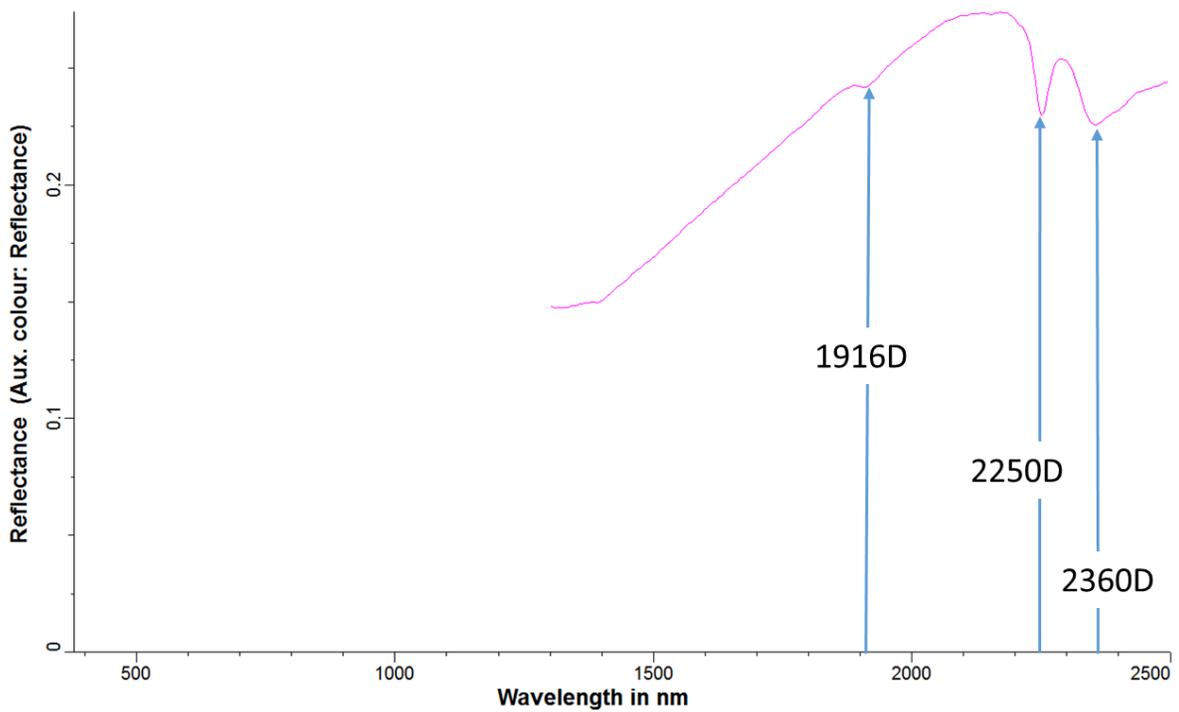


Figura 7.3 Firma espectral de referencia de biotita con valles identificados

- Caolinita

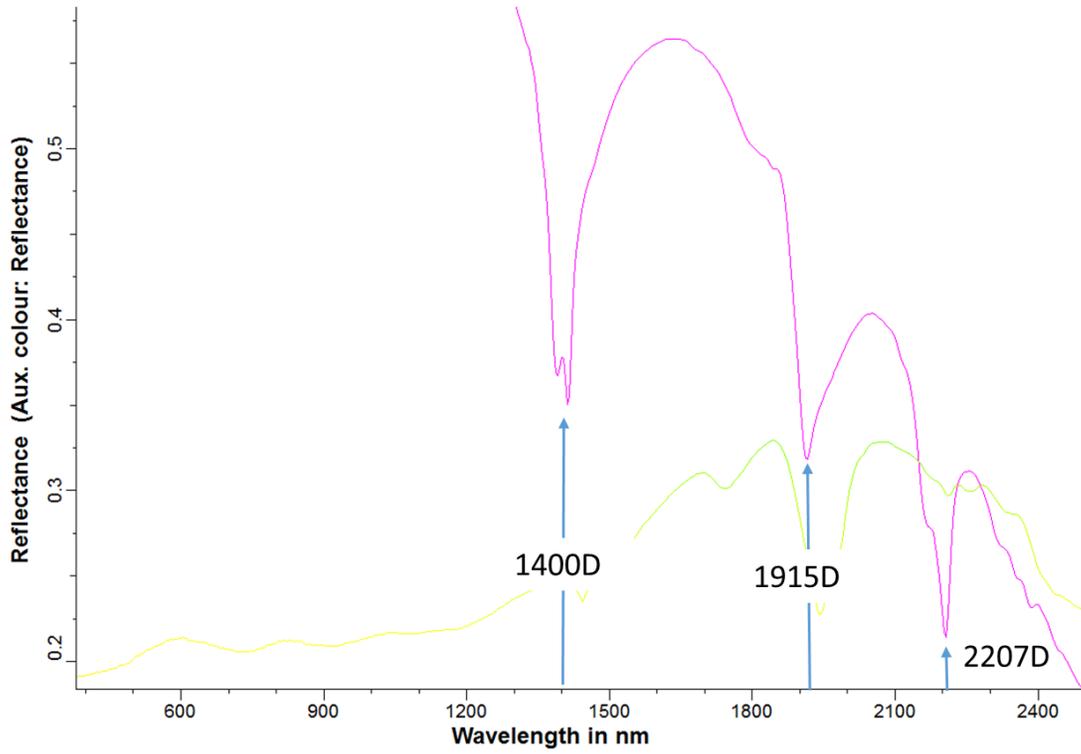


Figura 7.4 Firma espectral de referencia de caolinita con valles identificados

- Cuarzo

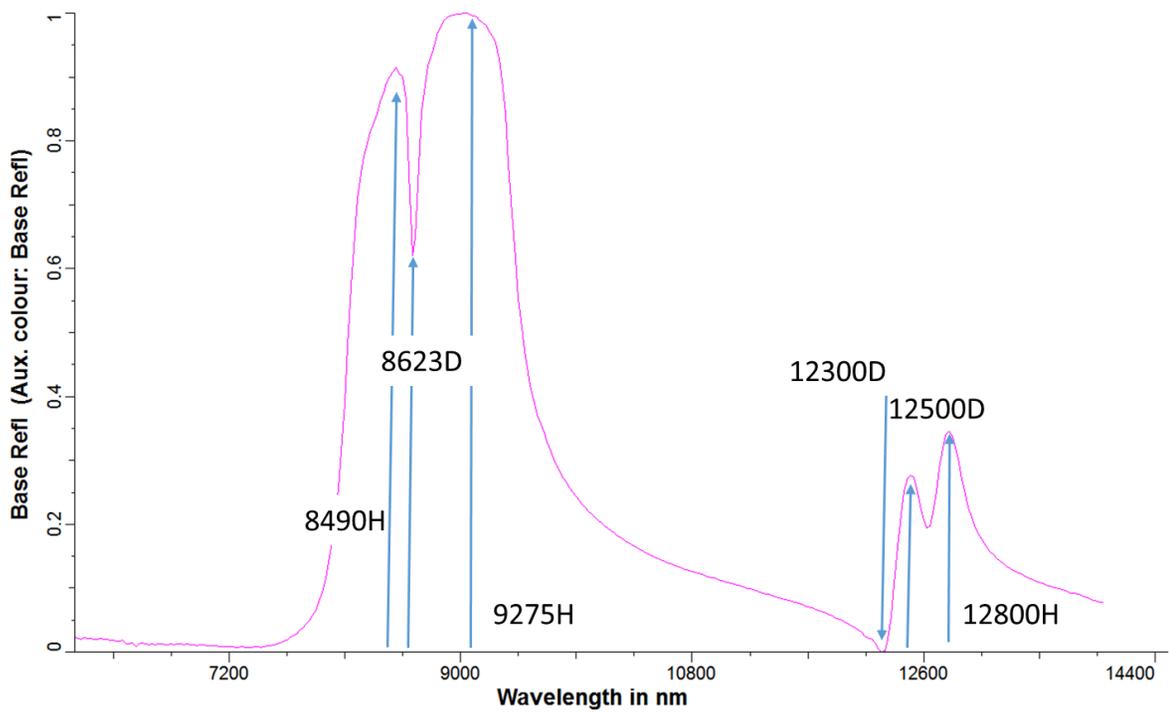


Figura 7.5 Firma espectral de referencia de cuarzo con valles identificados

- Fengita

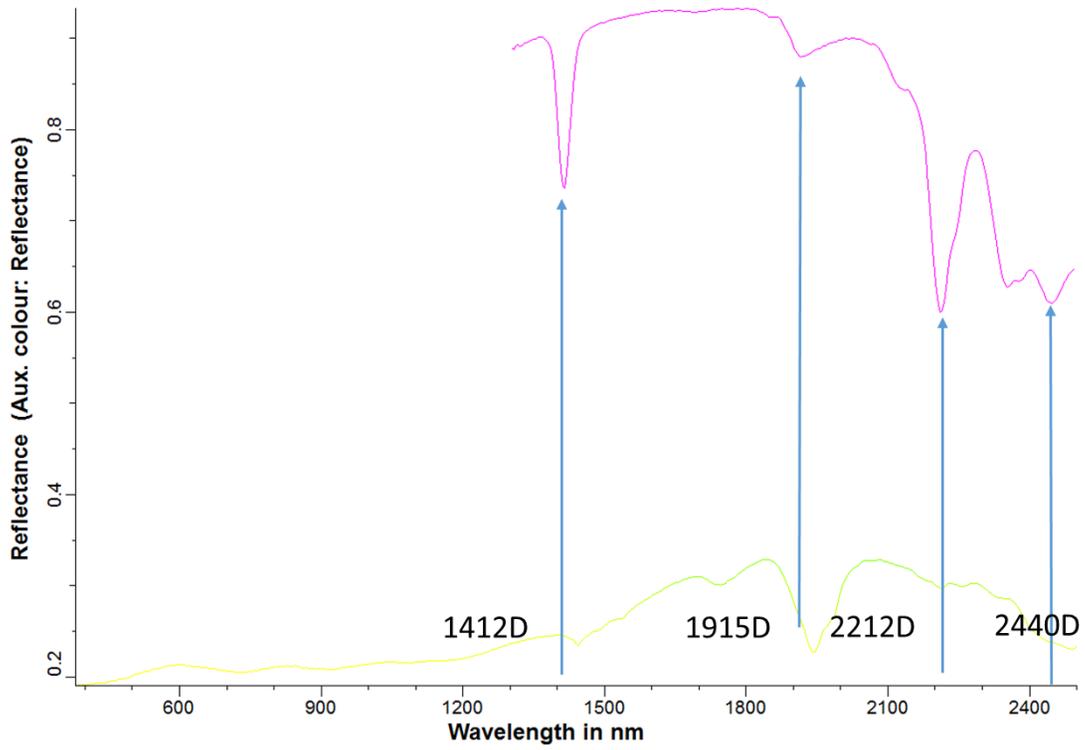


Figura 7.6 Firma espectral de referencia de fengita con valles identificados

- Flogopita

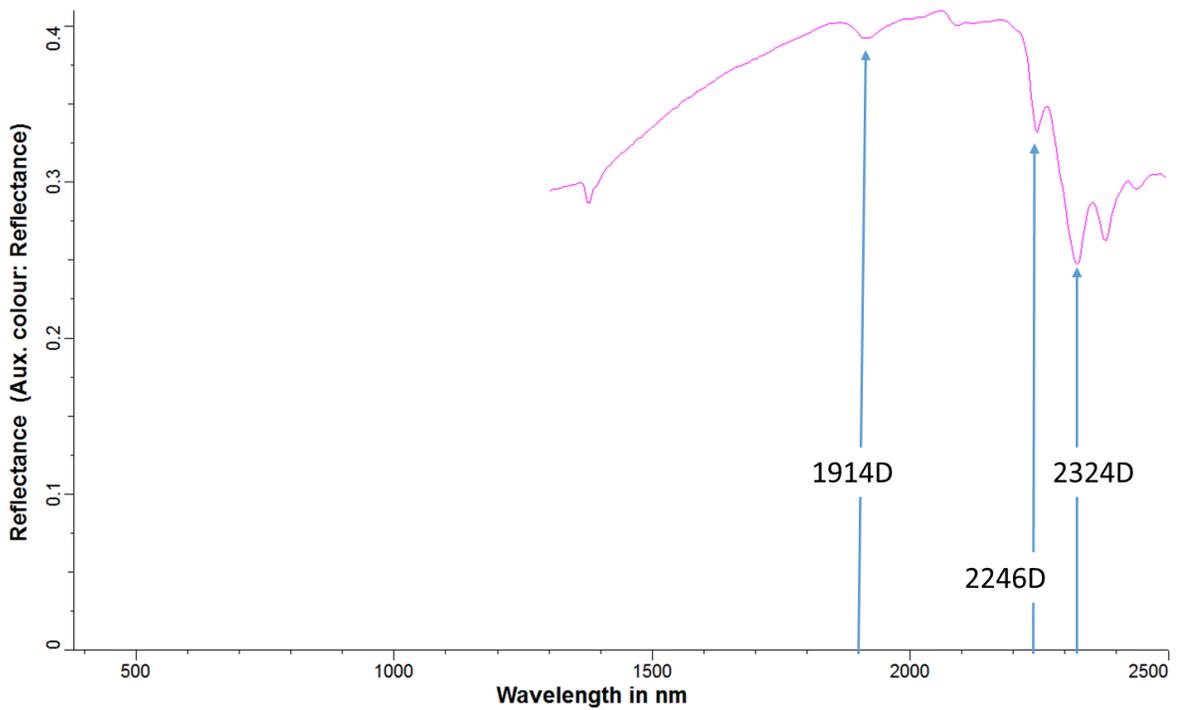


Figura 7.7 Firma espectral de referencia de flogopita con valles identificados

- Labradorita

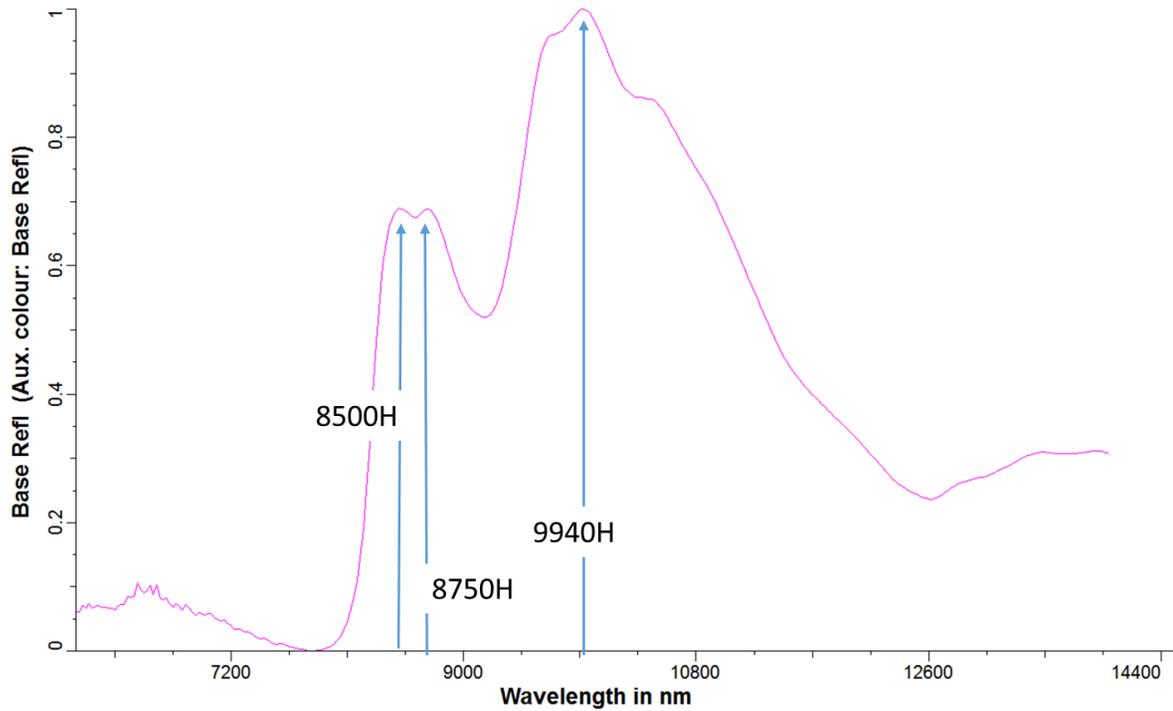


Figura 7.8 Firma espectral de referencia de labradorita con valles identificados

- Montmorillonita

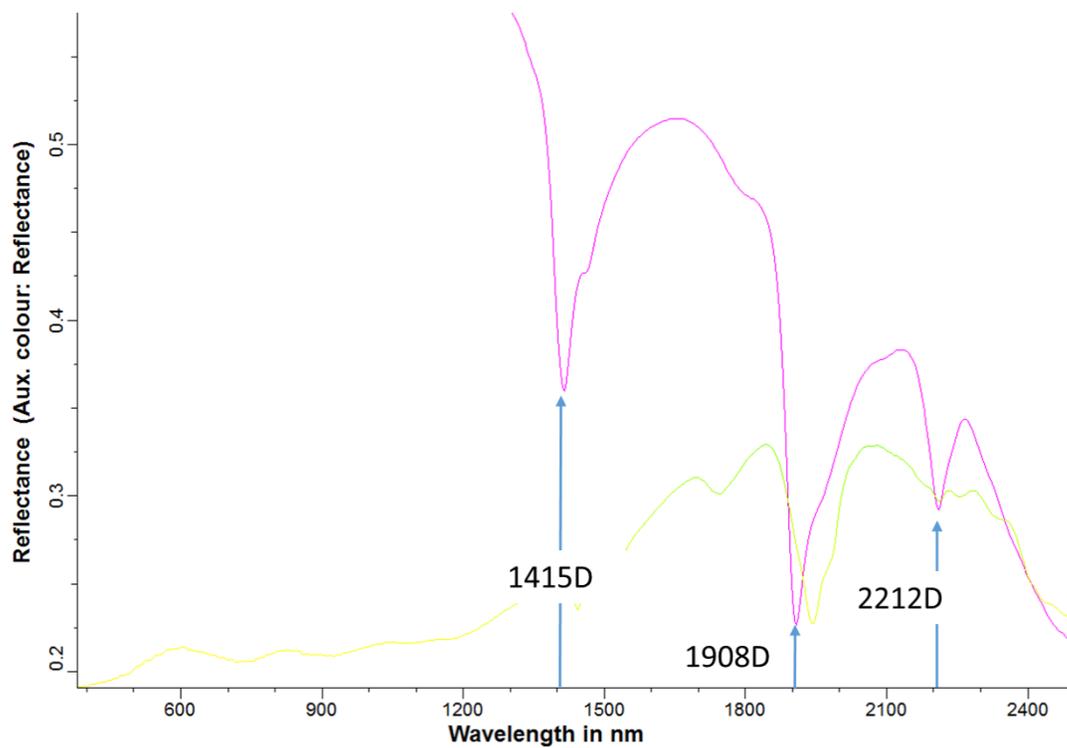


Figura 7.9 Firma espectral de referencia de montmorillonita con valles identificados

- Muscovita

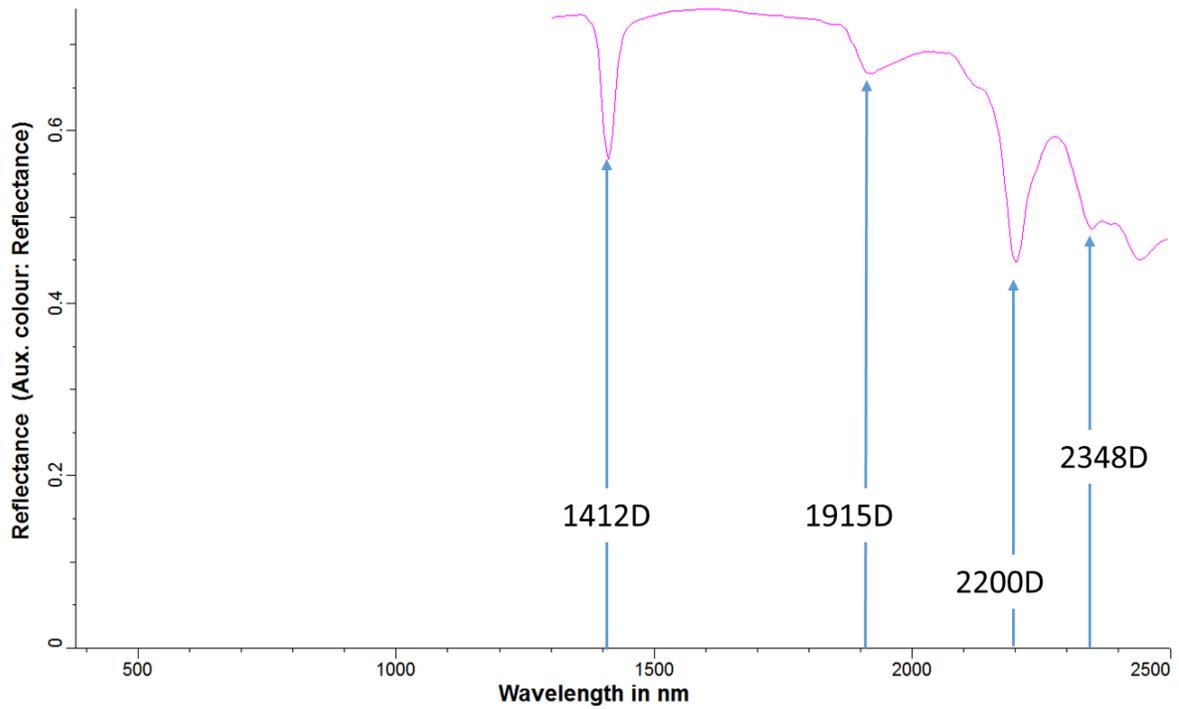


Figura 7.10 Firma espectral de referencia de muscovita con valles identificados

- Oligoclasa

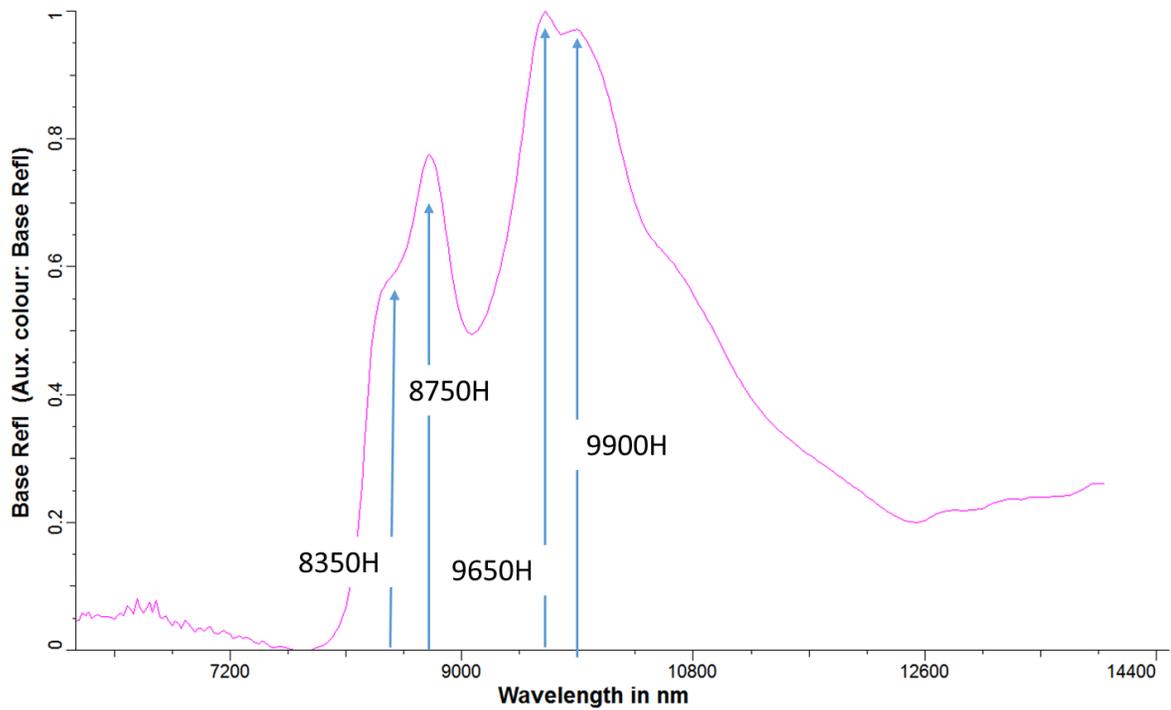


Figura 7.11 Firma espectral de referencia de oligoclasa con valles identificados

- Yeso

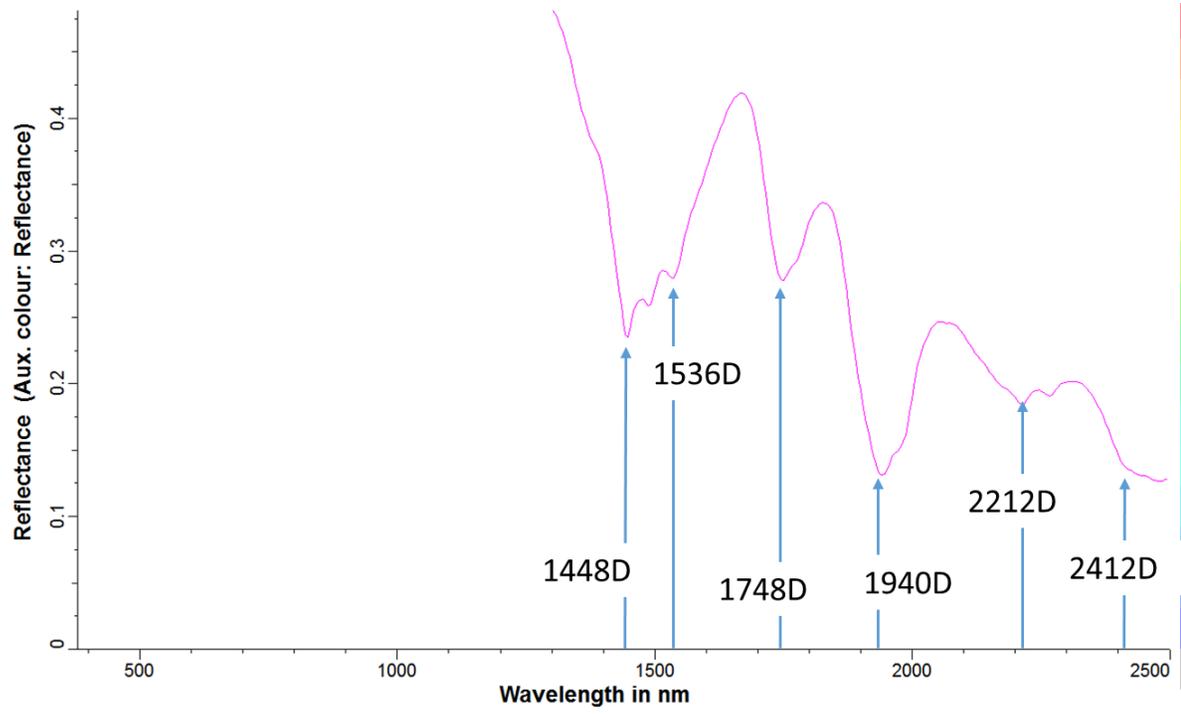


Figura 7.12 Firma espectral de referencia de yeso con valles identificados

# ANEXO B: POLINOMIOS PARA CARACTERÍSTICAS DE LA FIRMA ESPECTRAL POR MINERAL

- Albita

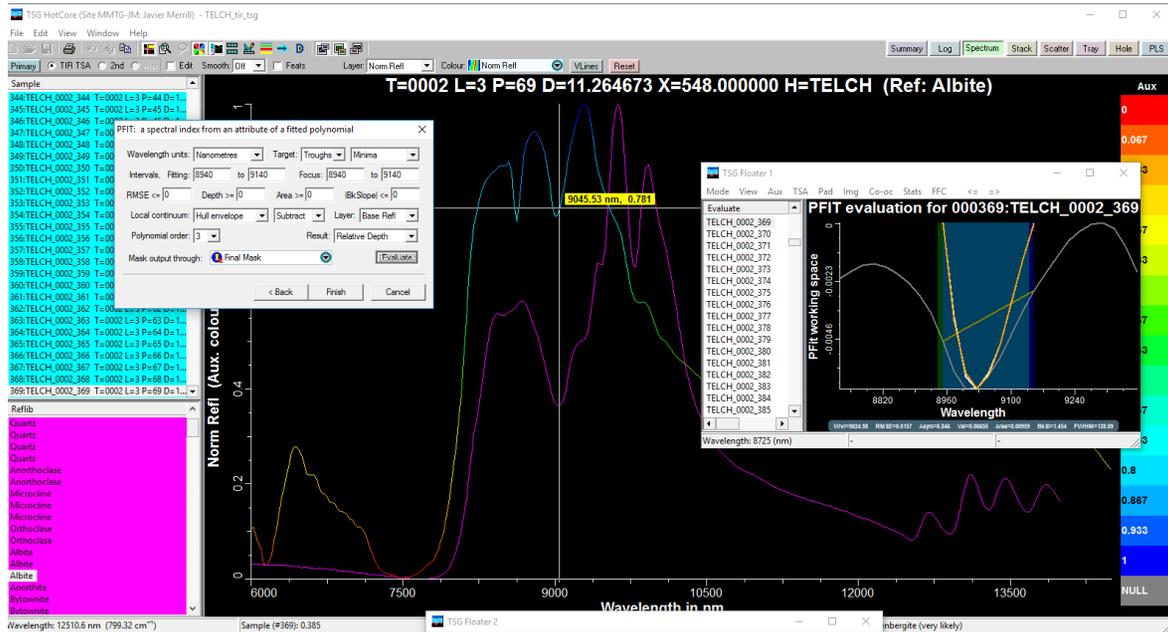


Figura 7.13 Polinomio ajustado a los 9040 [nm]

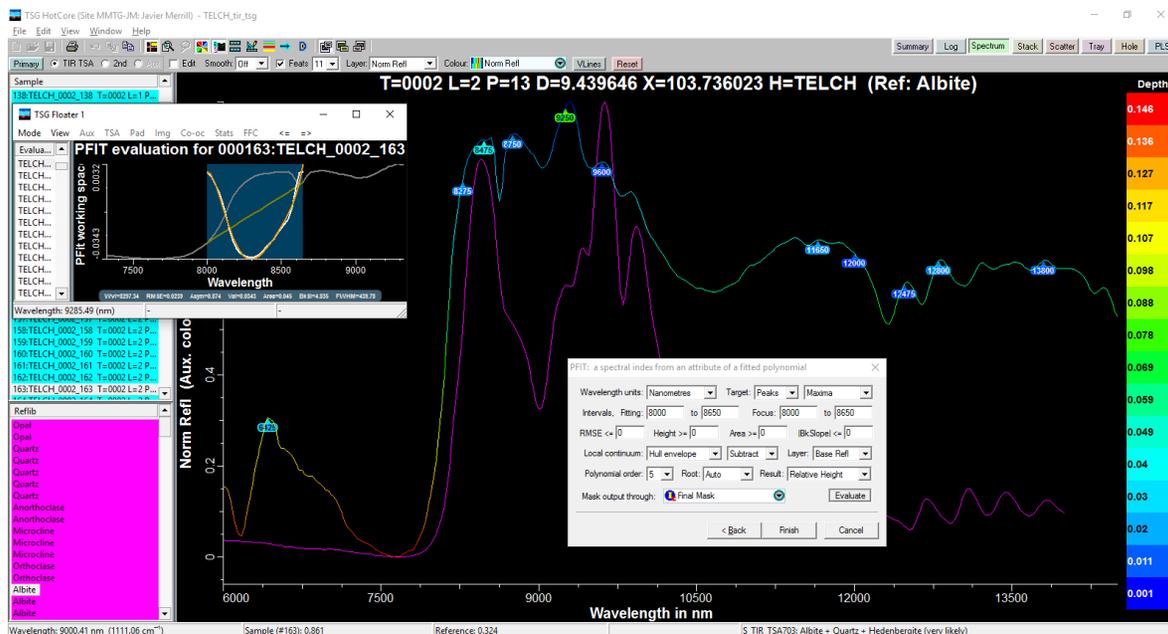


Figura 7.14 Polinomio ajustado a los 8350 [nm]



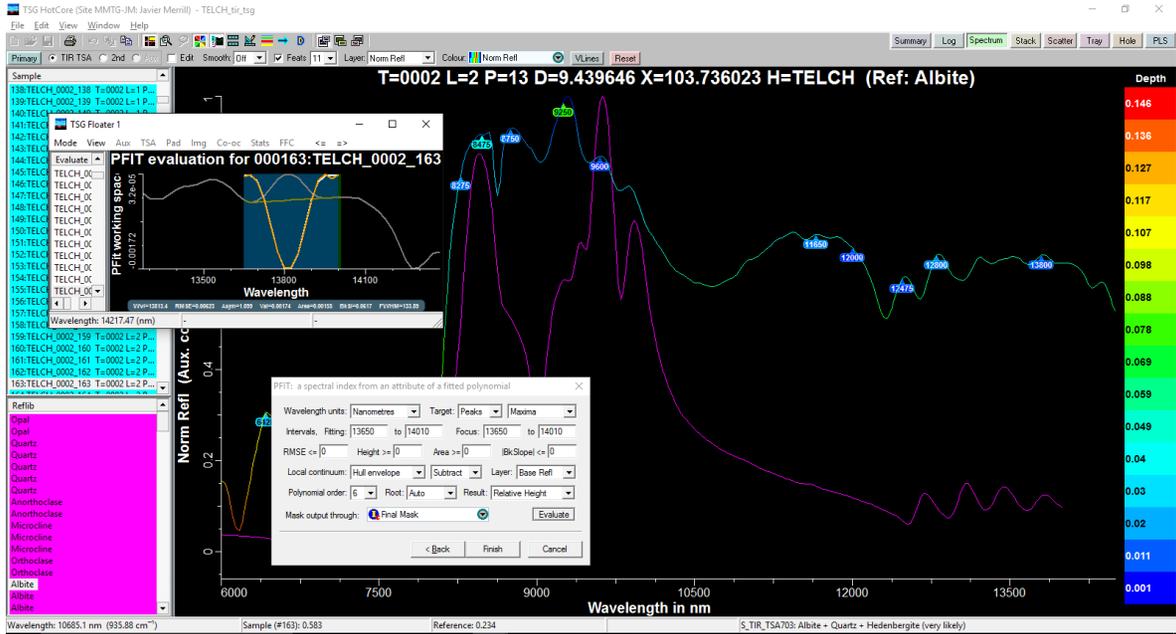


Figura 7.17 Polinomio ajustado a los 13830 [nm]

- Anortoclasa

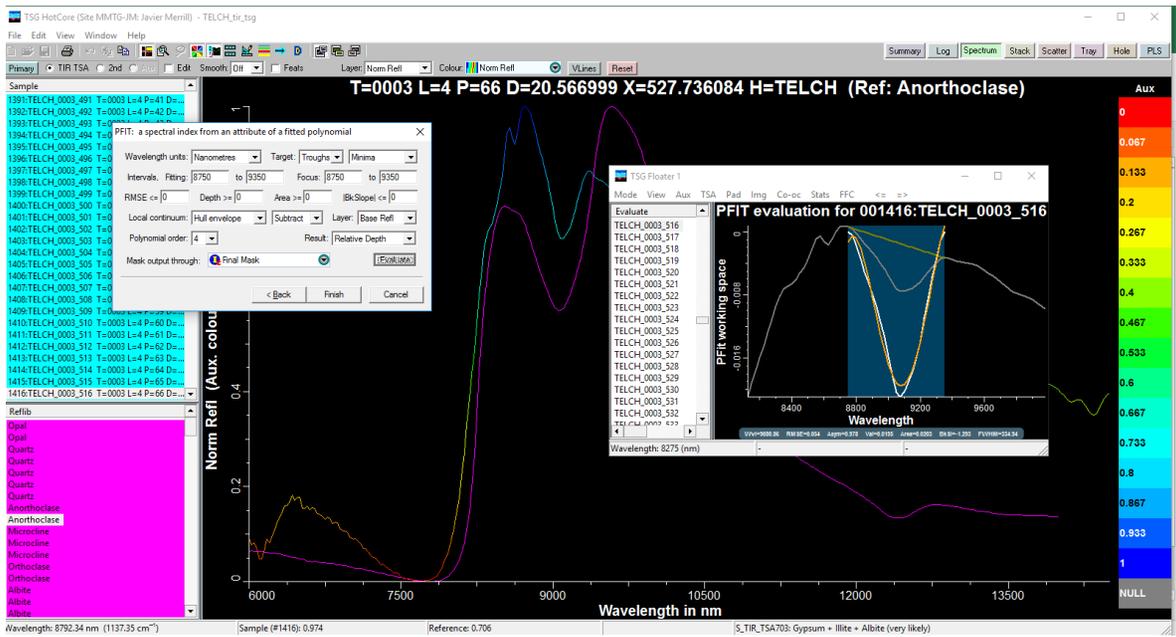


Figura 7.18 Polinomio ajustado a los 9080 [nm]

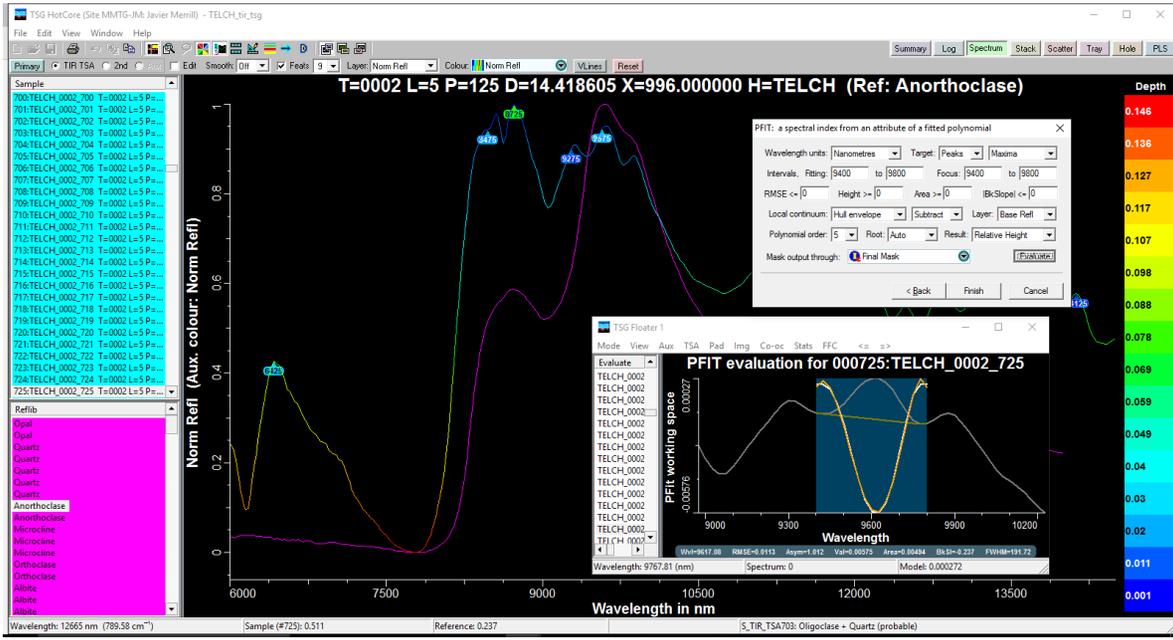


Figura 7.19 Polinomio ajustado a los 9600 [nm]

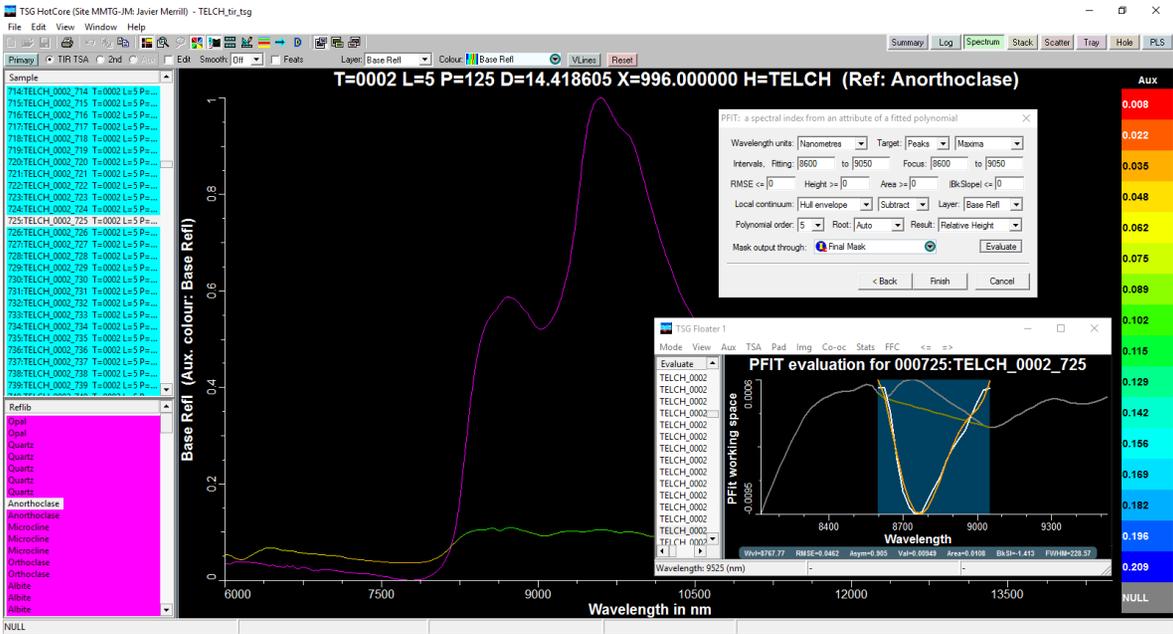


Figura 7.20 Polinomio ajustado a los 8725 [nm]

- Biotita

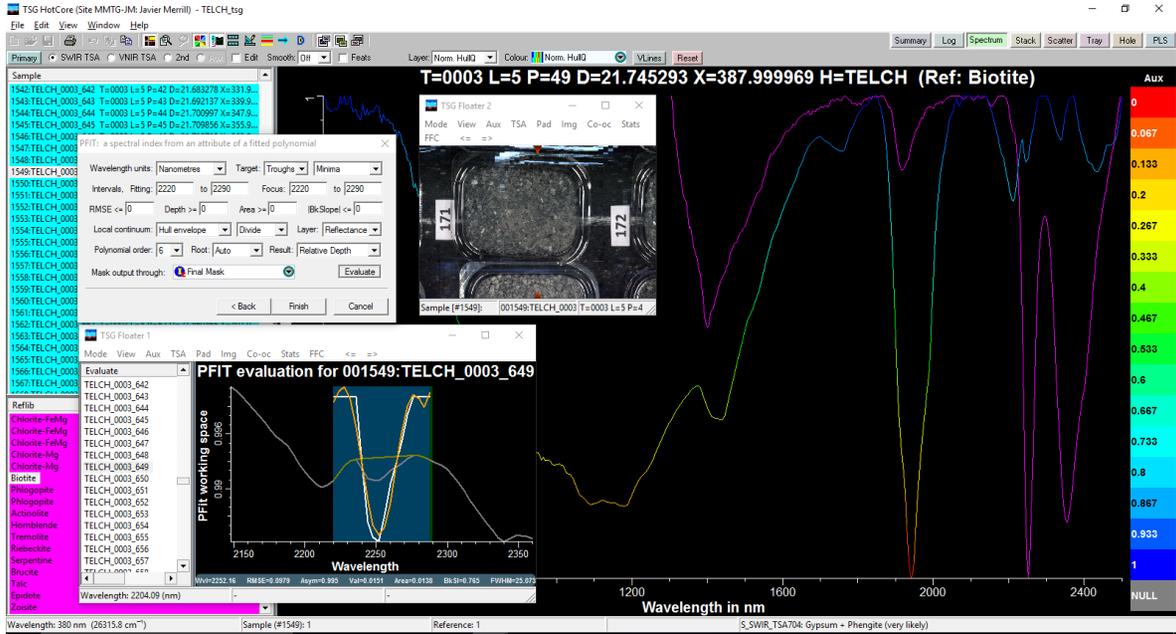


Figura 7.21 Polinomio ajustado a los 2250 [nm]

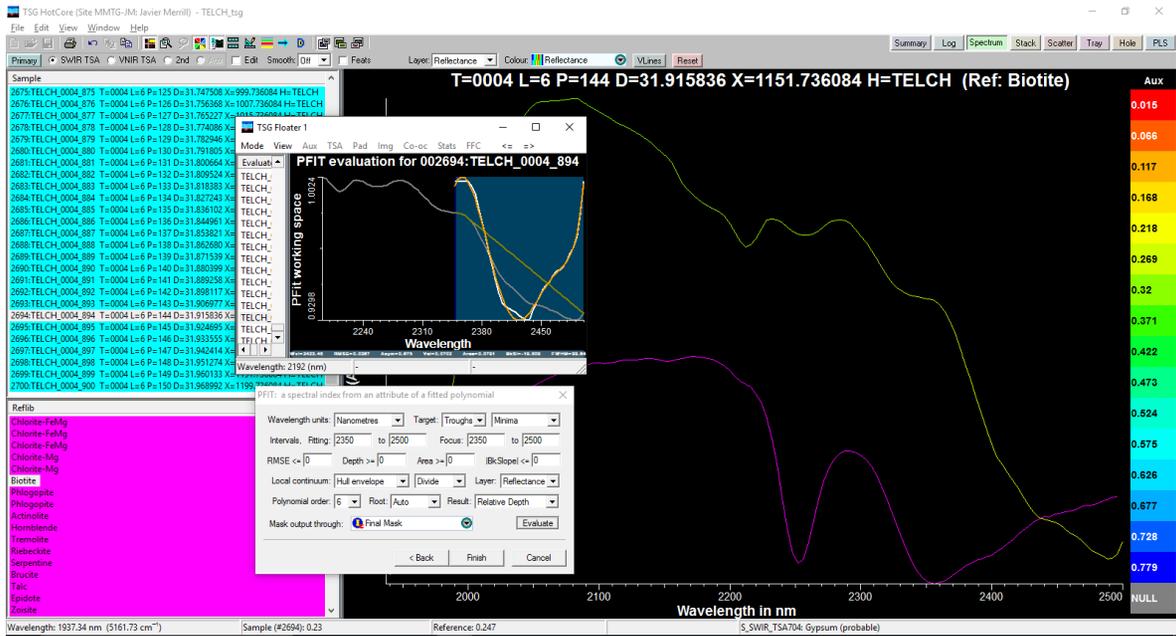


Figura 7.22 Polinomio ajustado a los 2360 [nm]



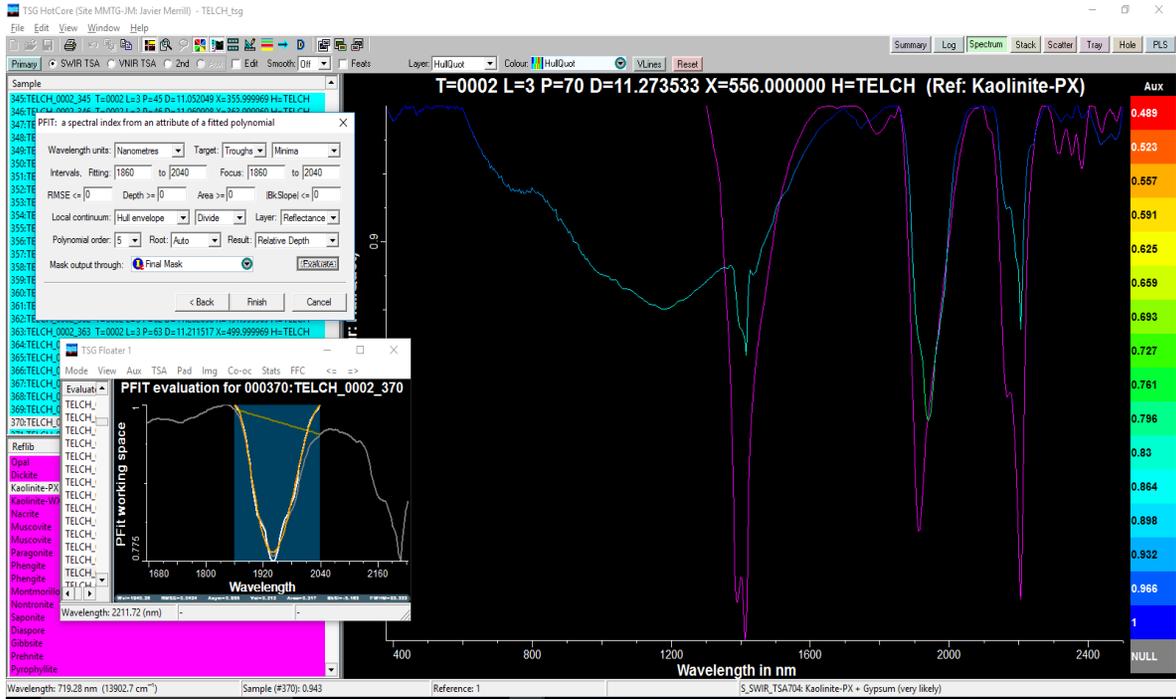


Figura 7.25 Polinomio ajustado a los 1915 [nm]

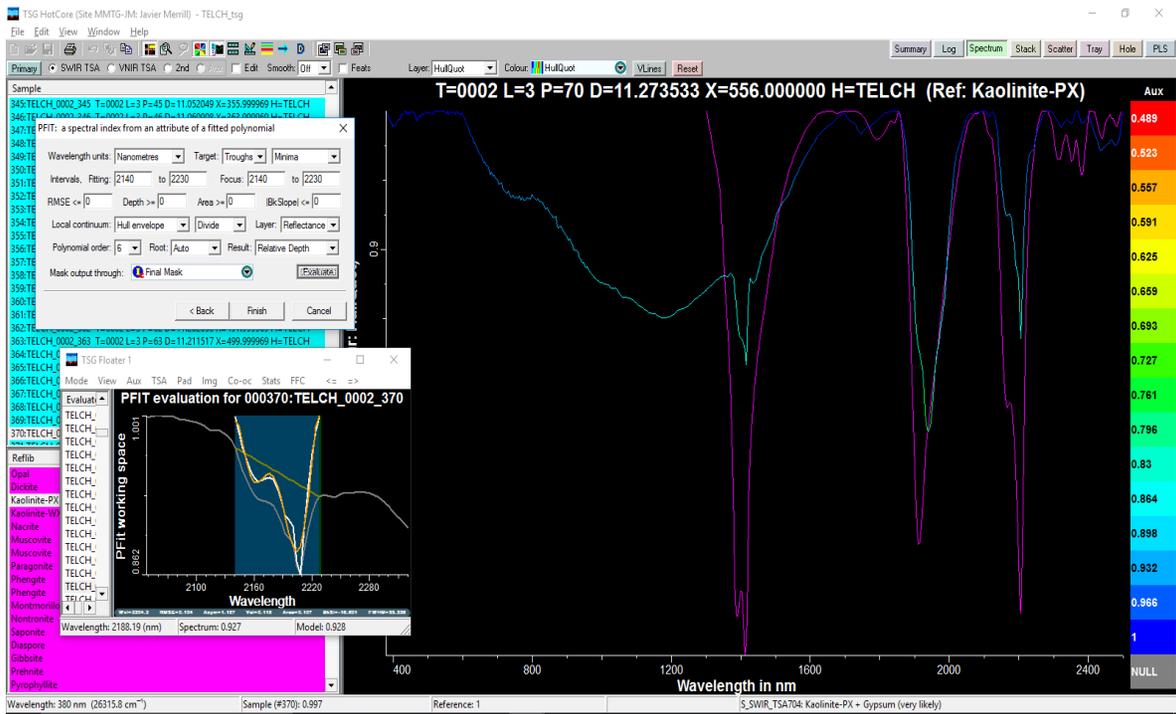


Figura 7.26 Polinomio ajustado a los 2207 [nm]

- Cuarzo

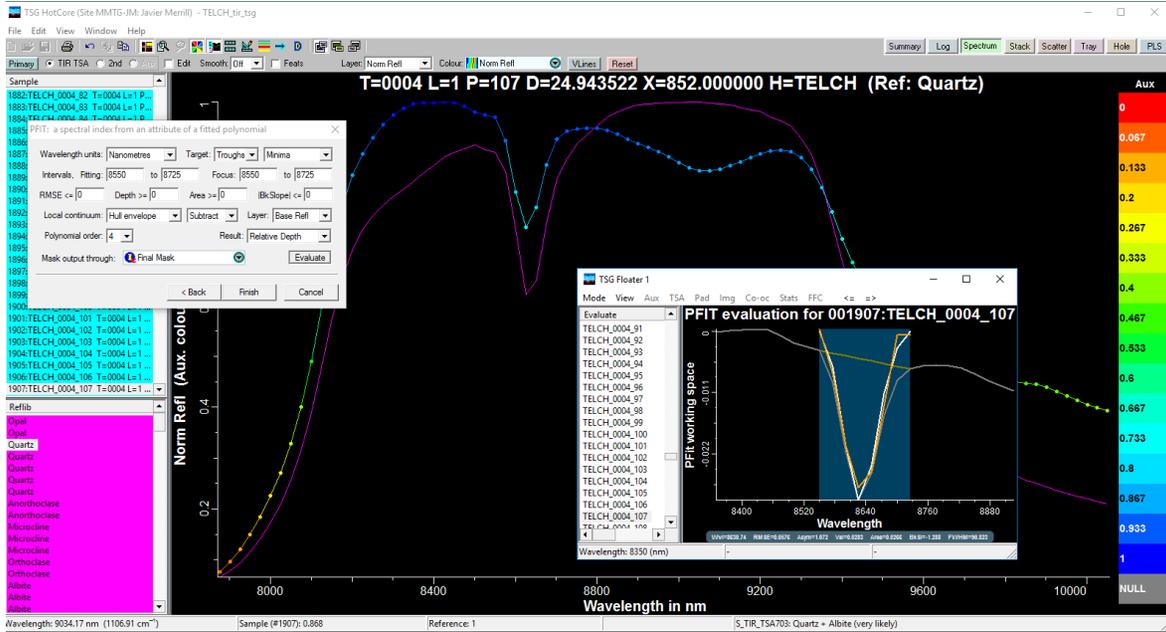


Figura 7.27 Polinomio ajustado a los 8623 [nm]

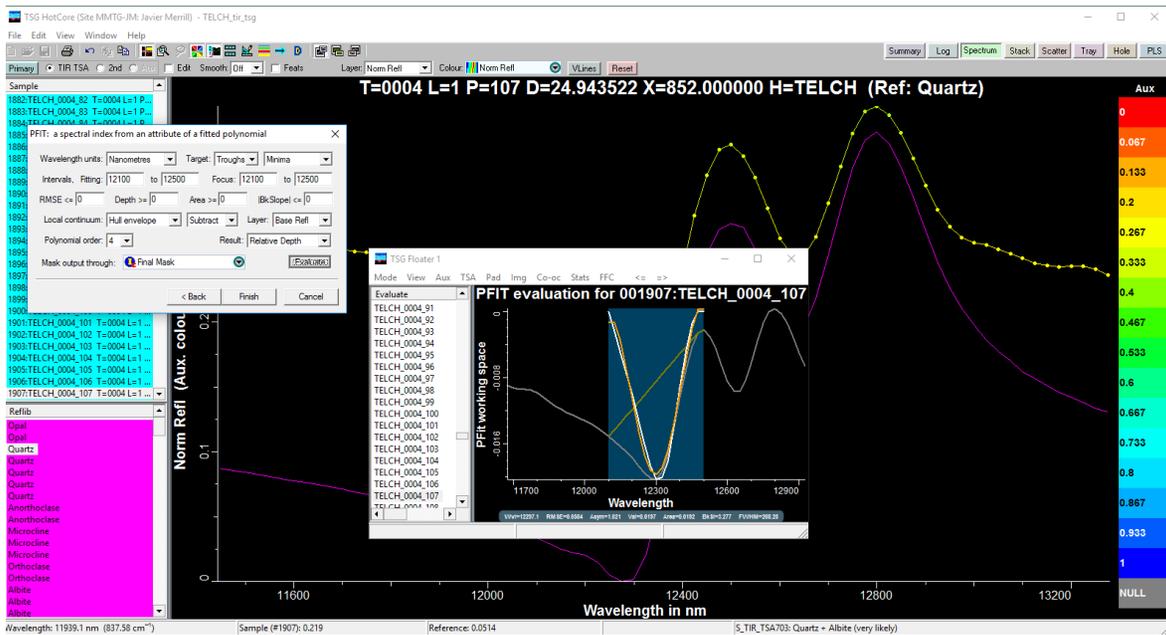


Figura 7.28 Polinomio ajustado a los 12300 [nm]

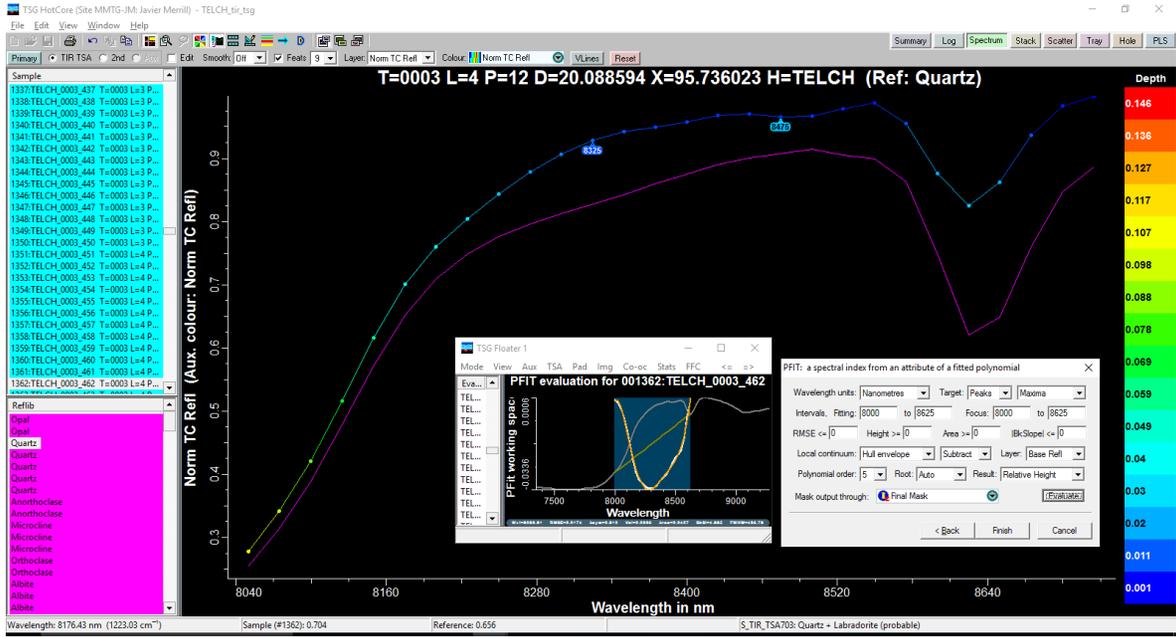


Figura 7.29 Polinomio ajustado a los 8490 [nm]

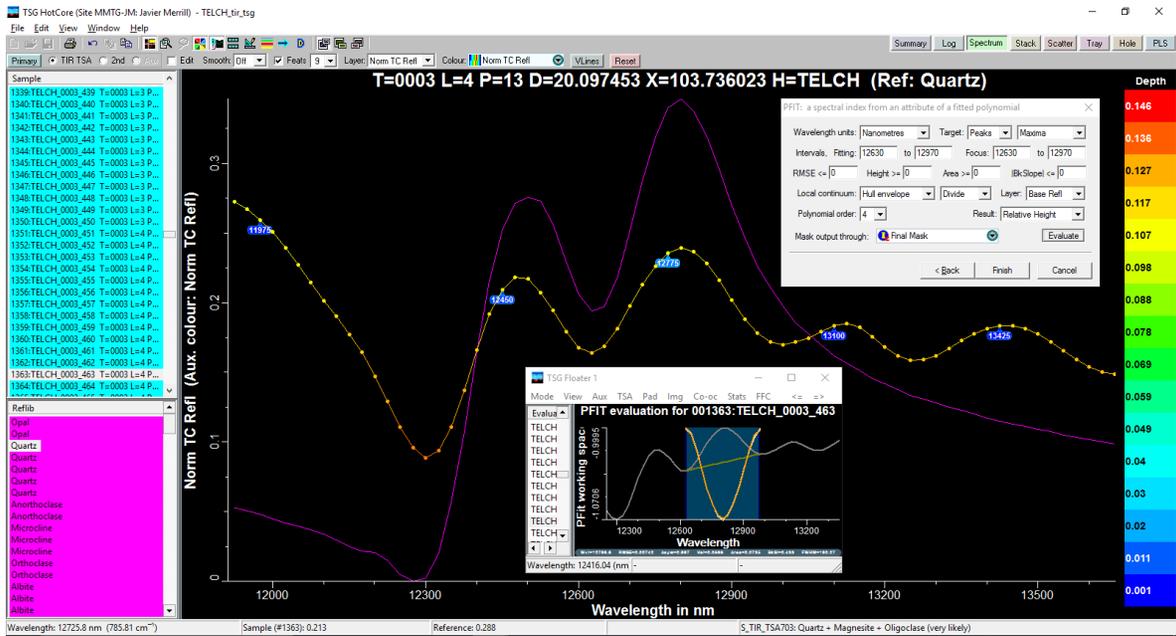


Figura 7.30 Polinomio ajustado a los 12800 [nm]

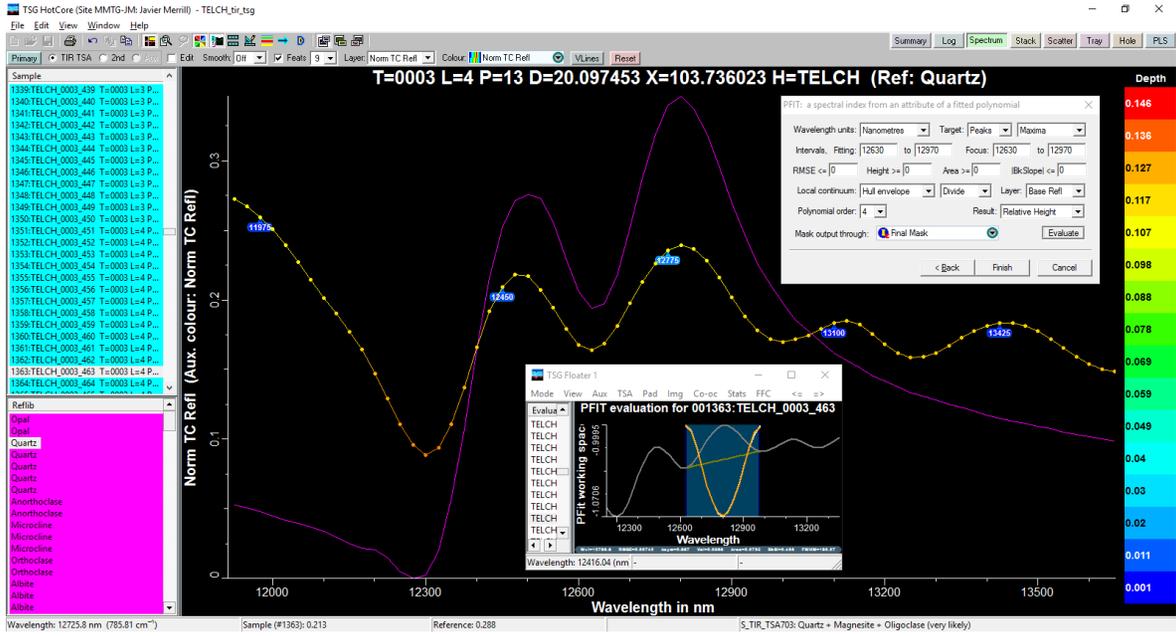


Figura 7.31 Polinomio ajustado a los 12500 [nm]

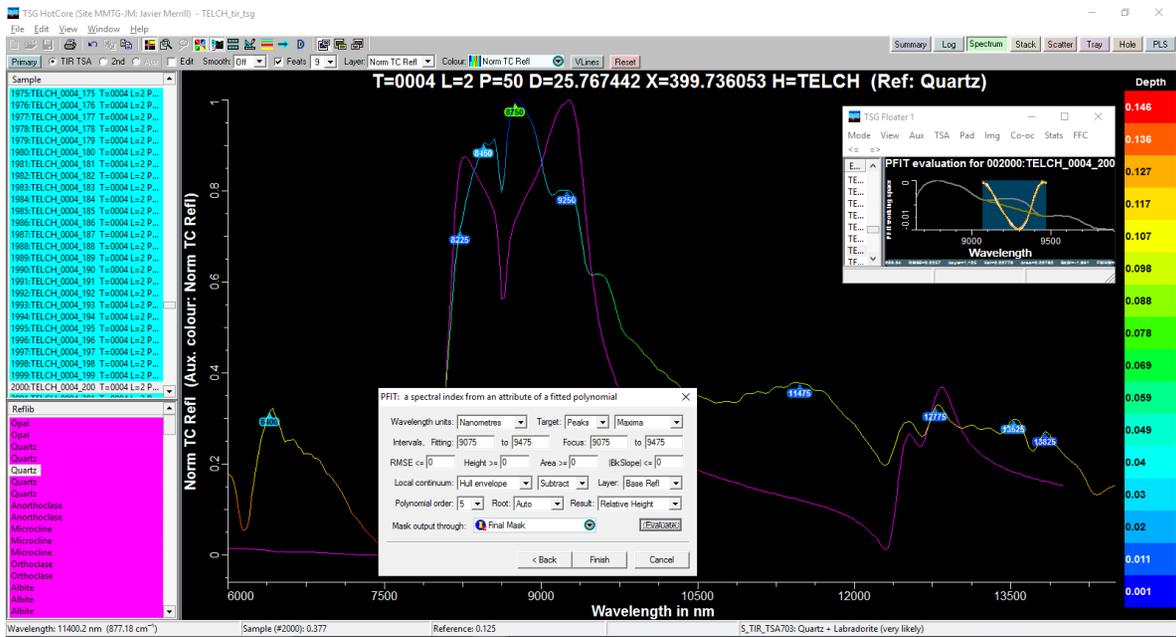


Figura 7.32 Polinomio ajustado a los 9275 [nm]

- Fengita

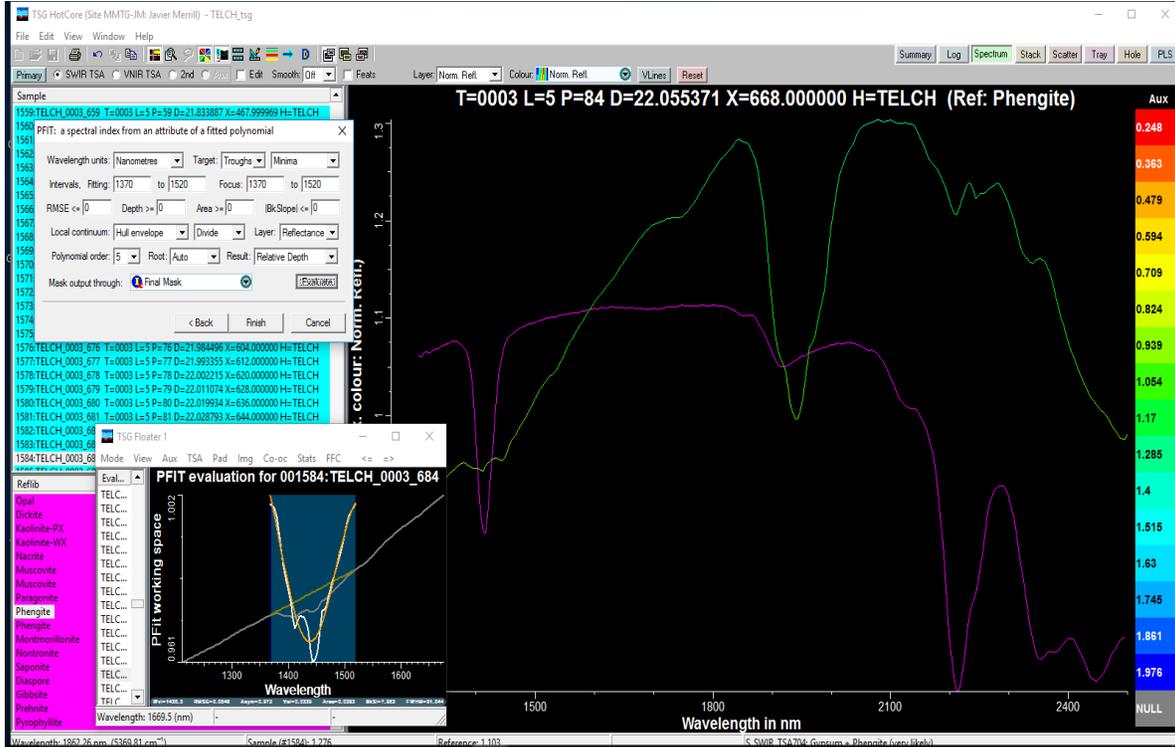


Figura 7.33 Polinomio ajustado a los 1412 [nm]

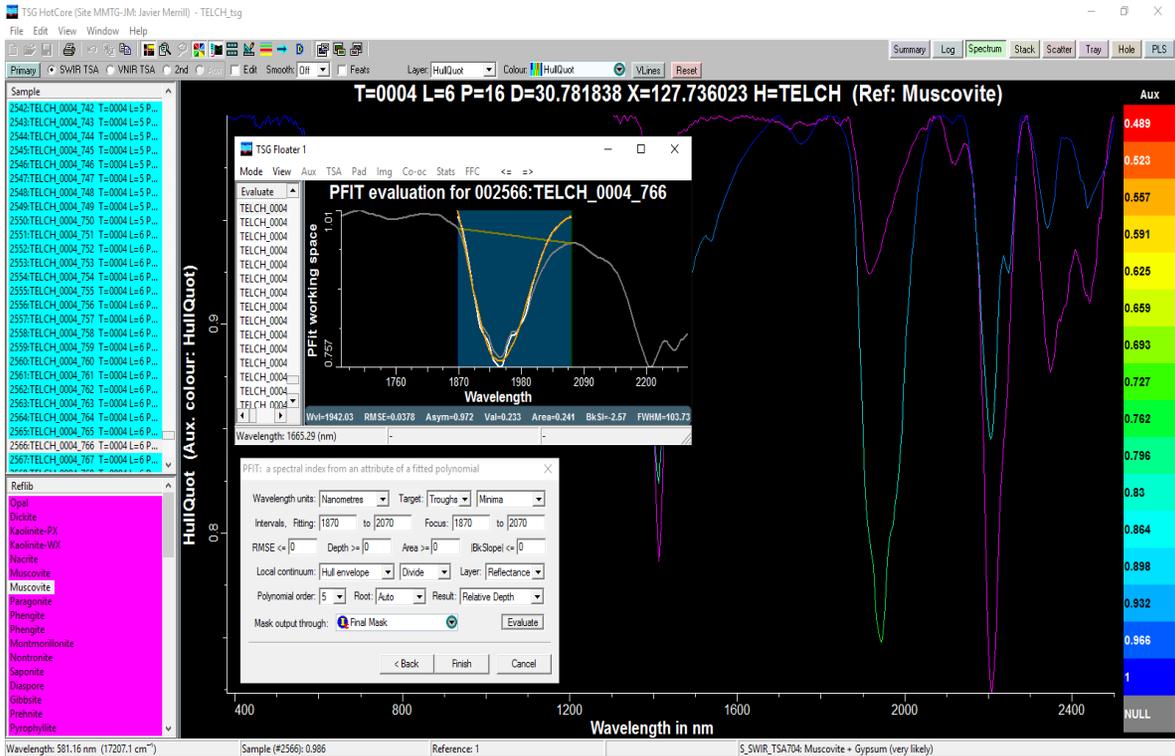


Figura 7.34 Polinomio ajustado a los 1915 [nm]

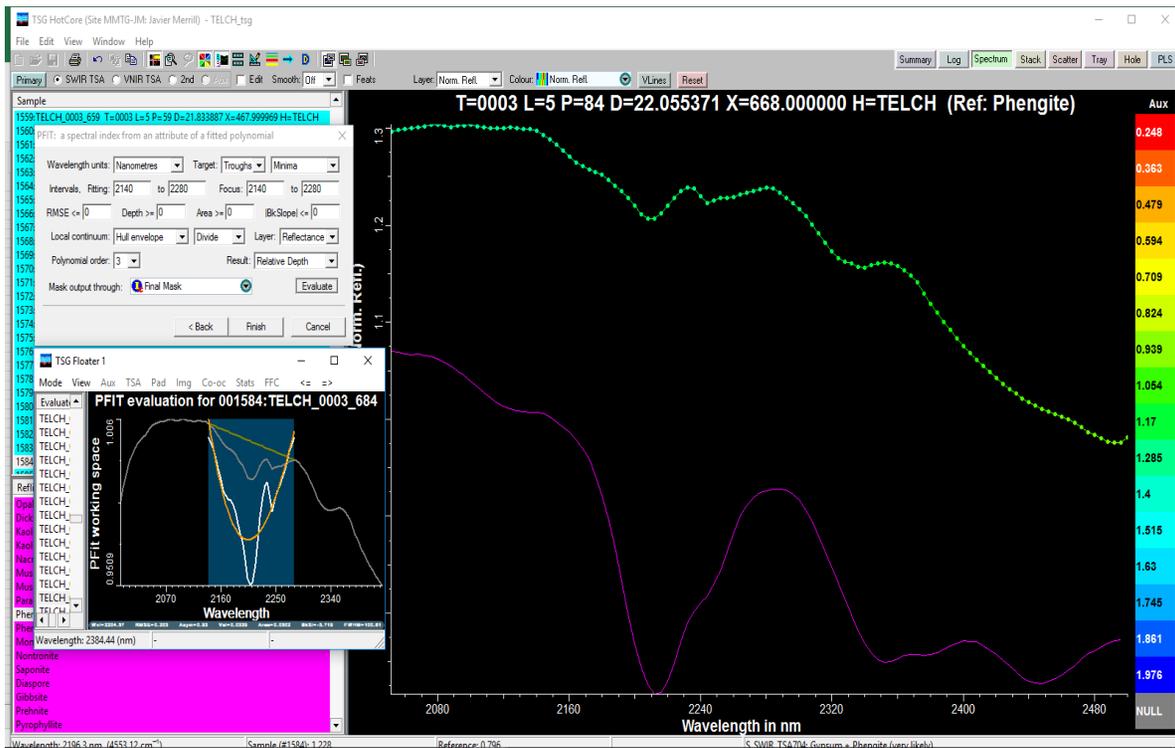


Figura 7.35 Polinomio ajustado a los 2212 [nm]

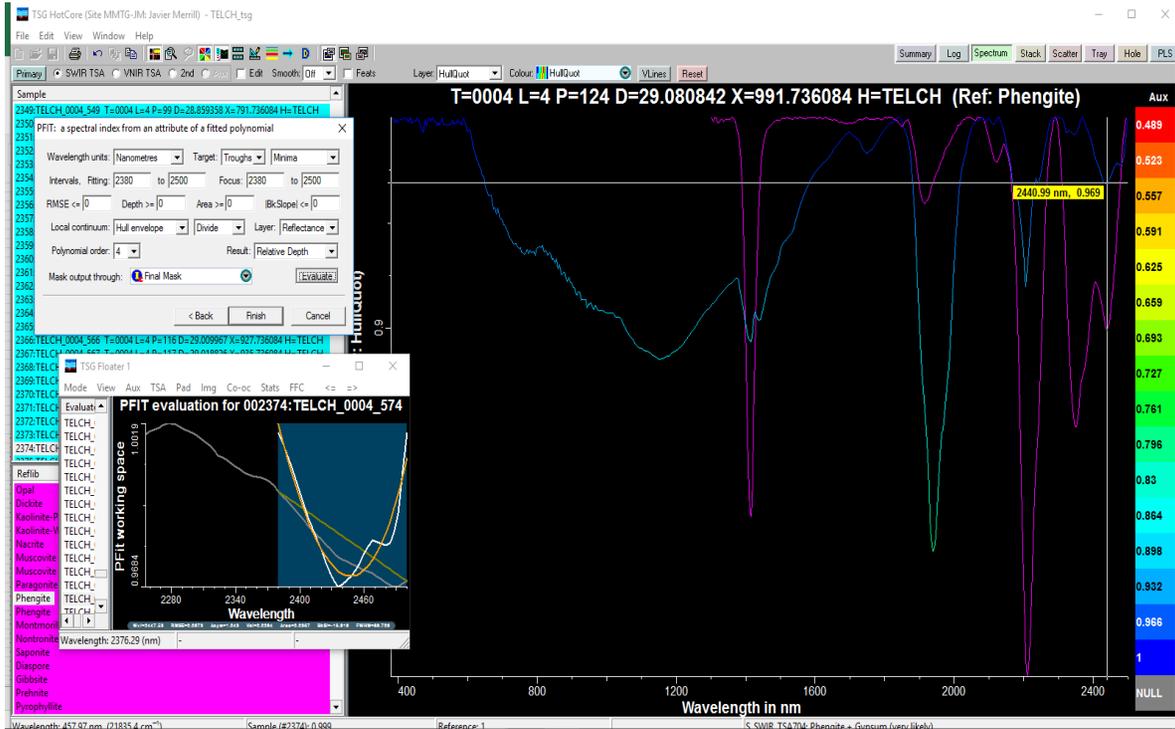


Figura 7.36 Polinomio ajustado a los 2440 [nm]

- Flogopita

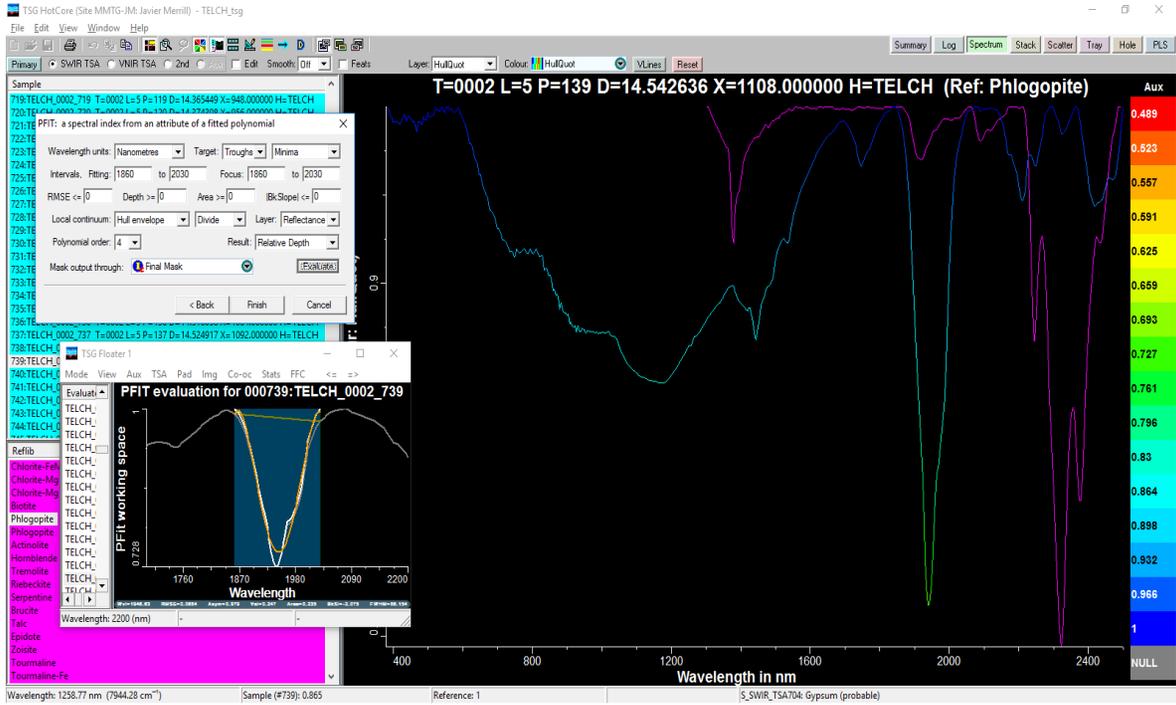


Figura 7.37 Polinomio ajustado a los 1914 [nm]

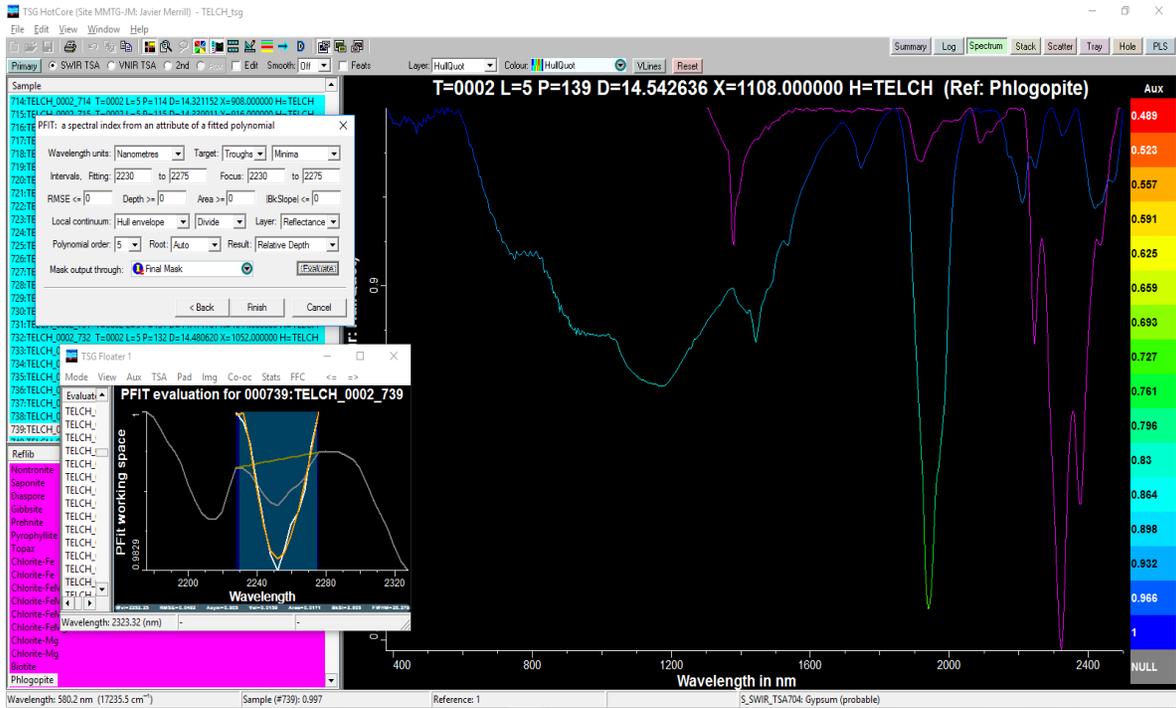


Figura 7.38 Polinomio ajustado a los 2246 [nm]

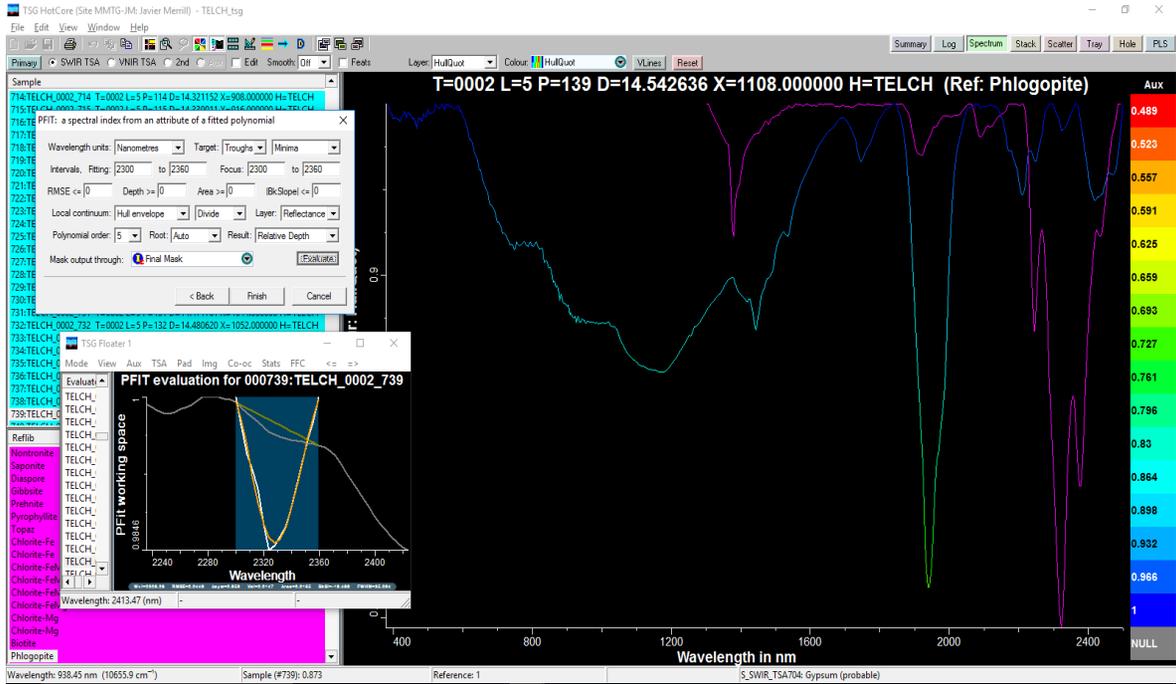


Figura 7.39 Polinomio ajustado a los 2324 [nm]

- Labradorita

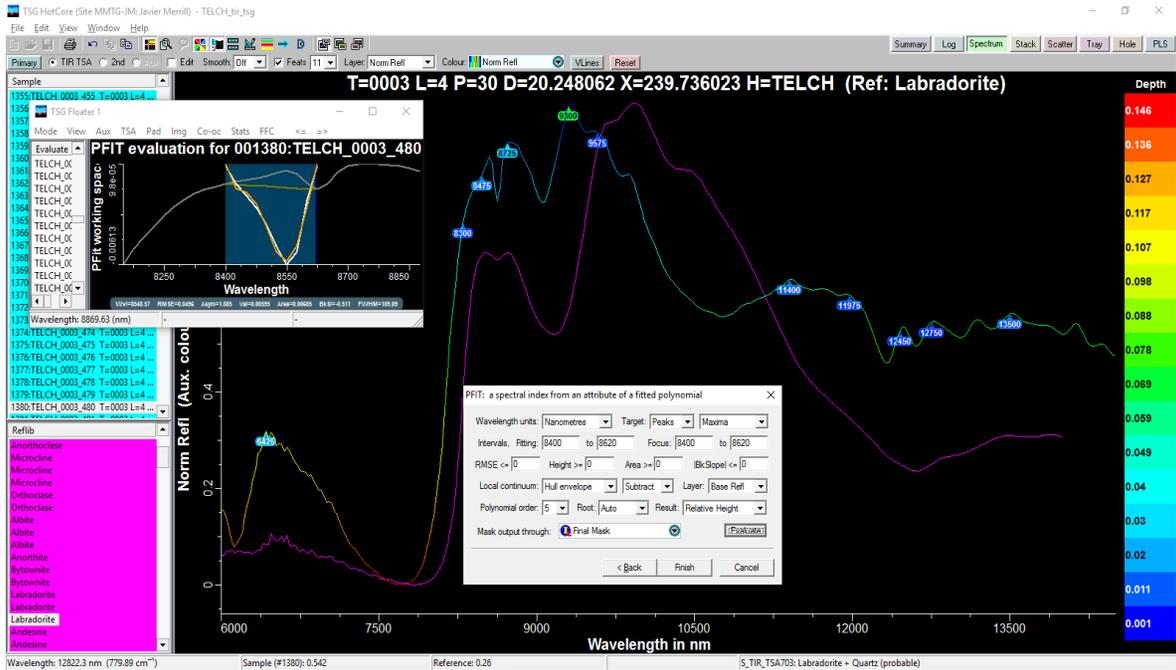


Figura 7.40 Polinomio ajustado a los 8500 [nm]

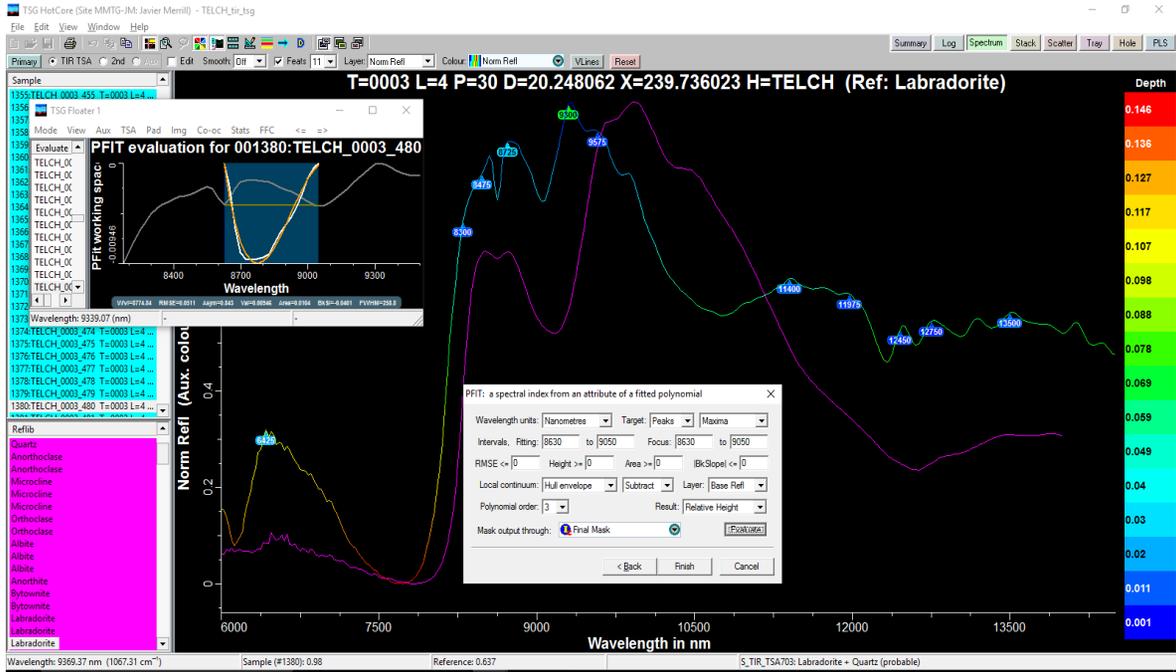


Figura 7.41 Polinomio ajustado a los 8750 [nm]

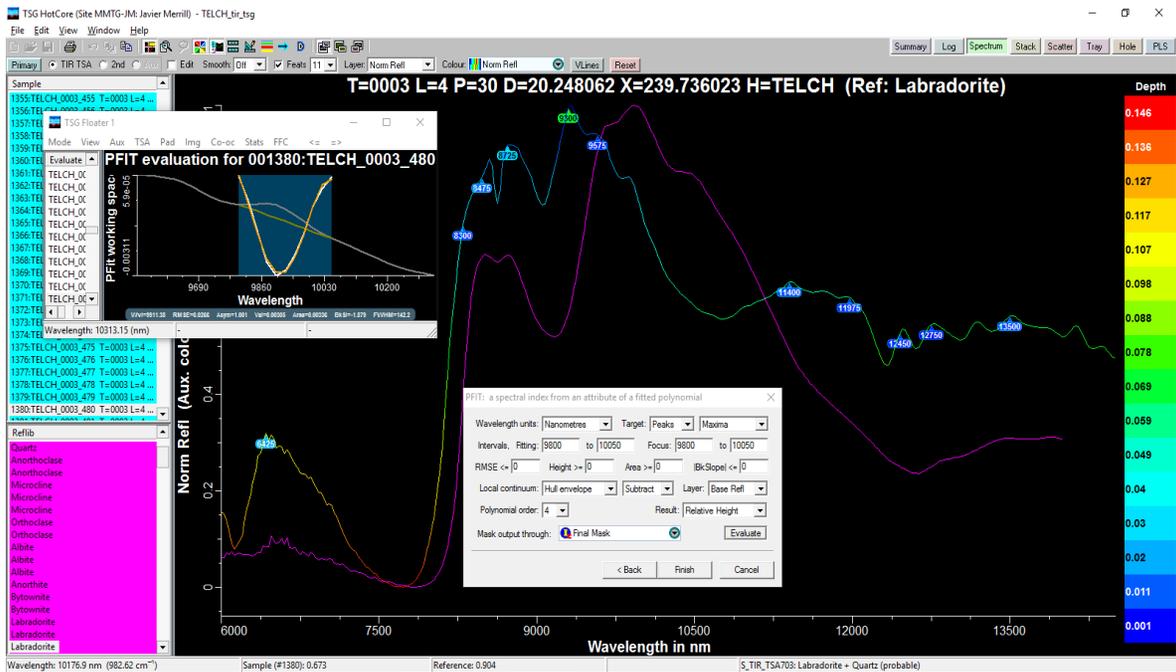


Figura 7.42 Polinomio ajustado a los 9940 [nm]

- Montmorillonita

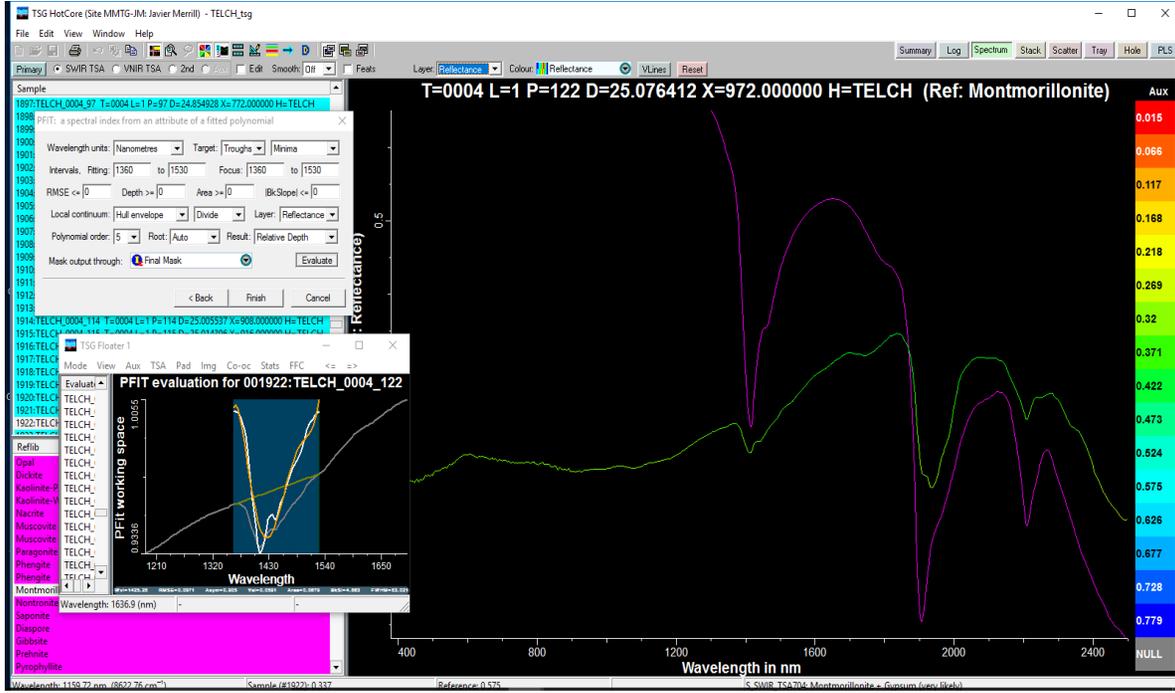


Figura 7.43 Polinomio ajustado a los 1415 [nm]

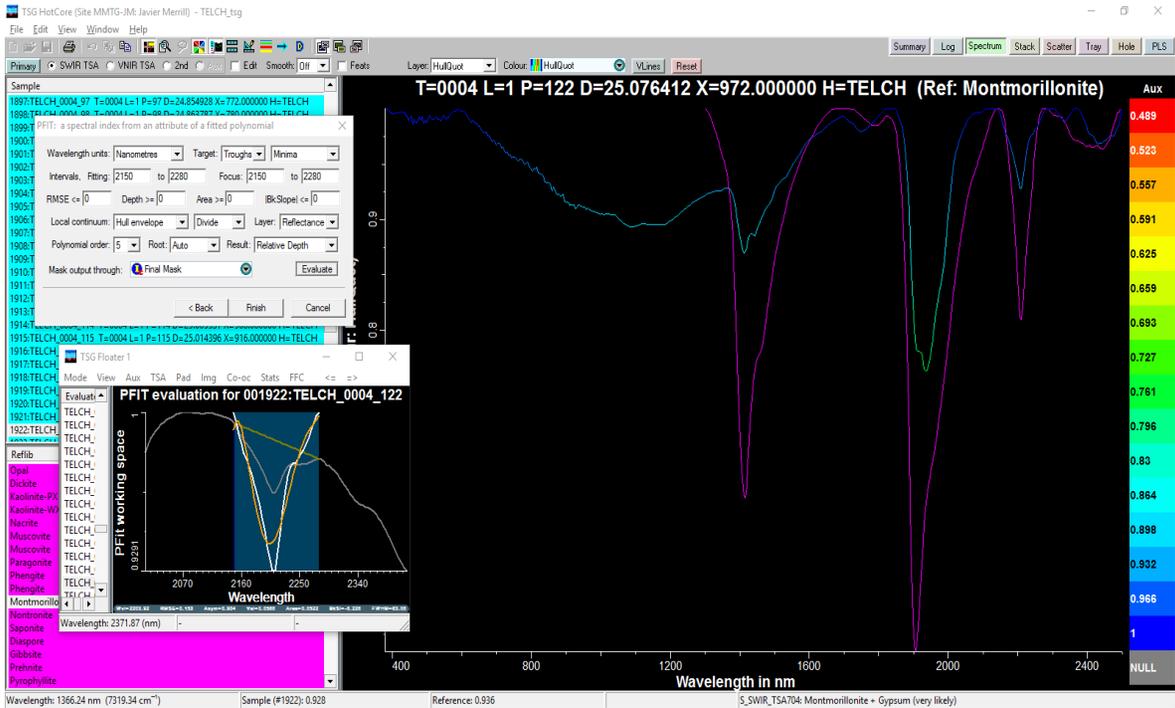


Figura 7.44 Polinomio ajustado a los 2212 [nm]

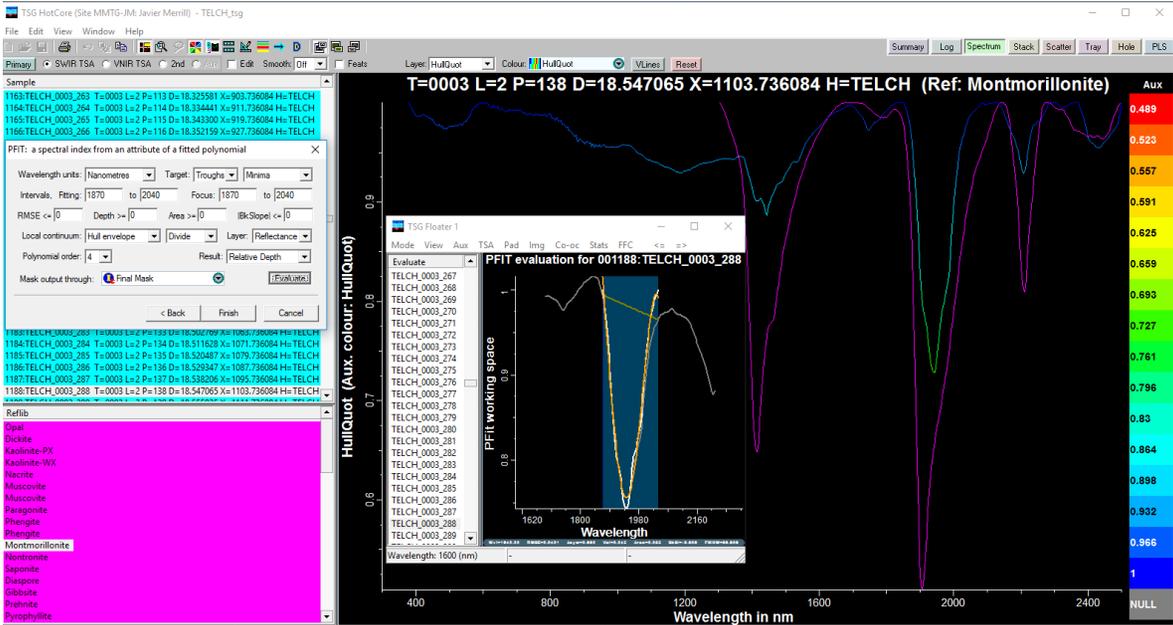


Figura 7.45 Polinomio ajustado a los 1910 [nm]

- Muscovita

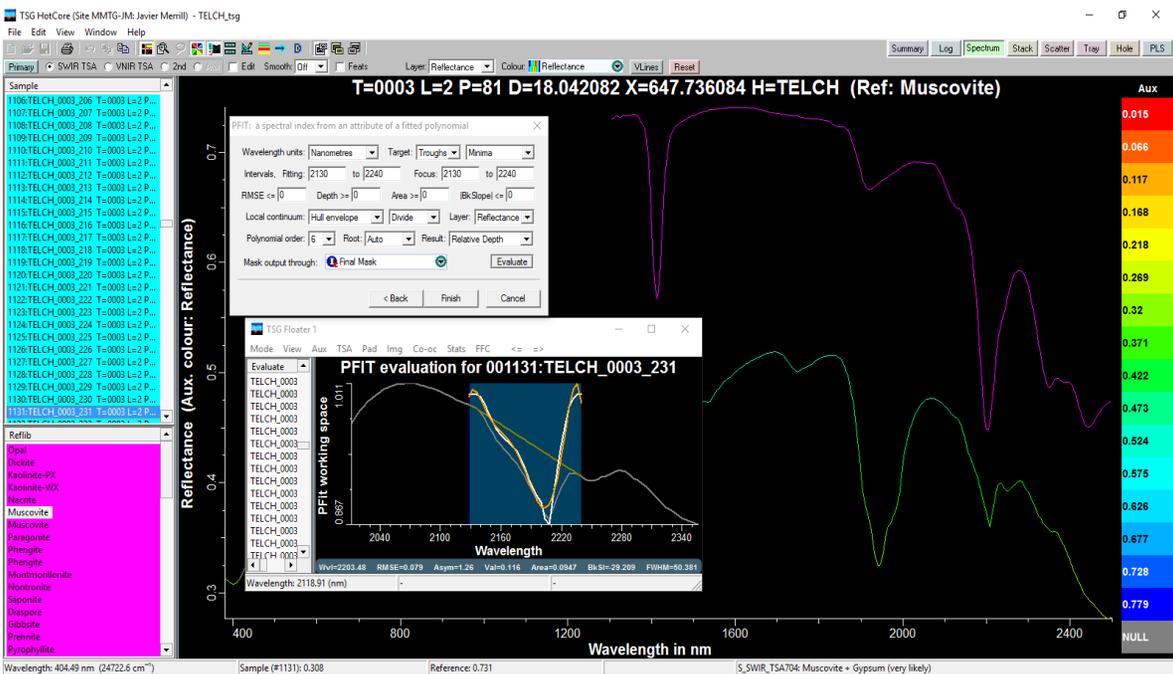


Figura 7.46 Polinomio ajustado a los 2200 [nm]

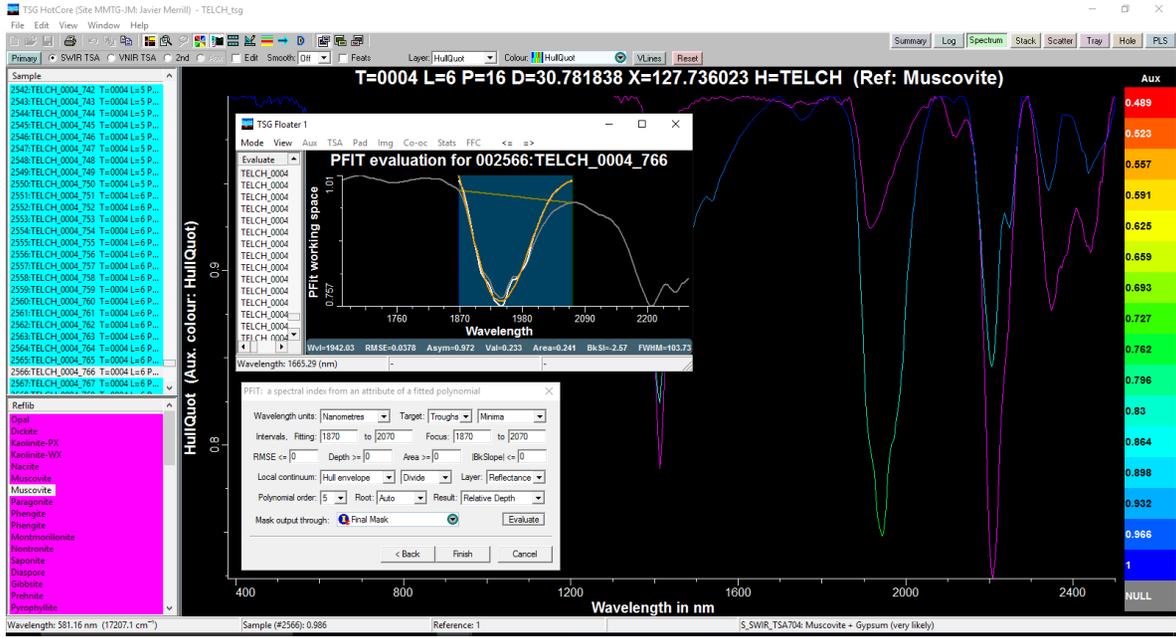


Figura 7.47 Polinomio ajustado a los 1915 [nm]

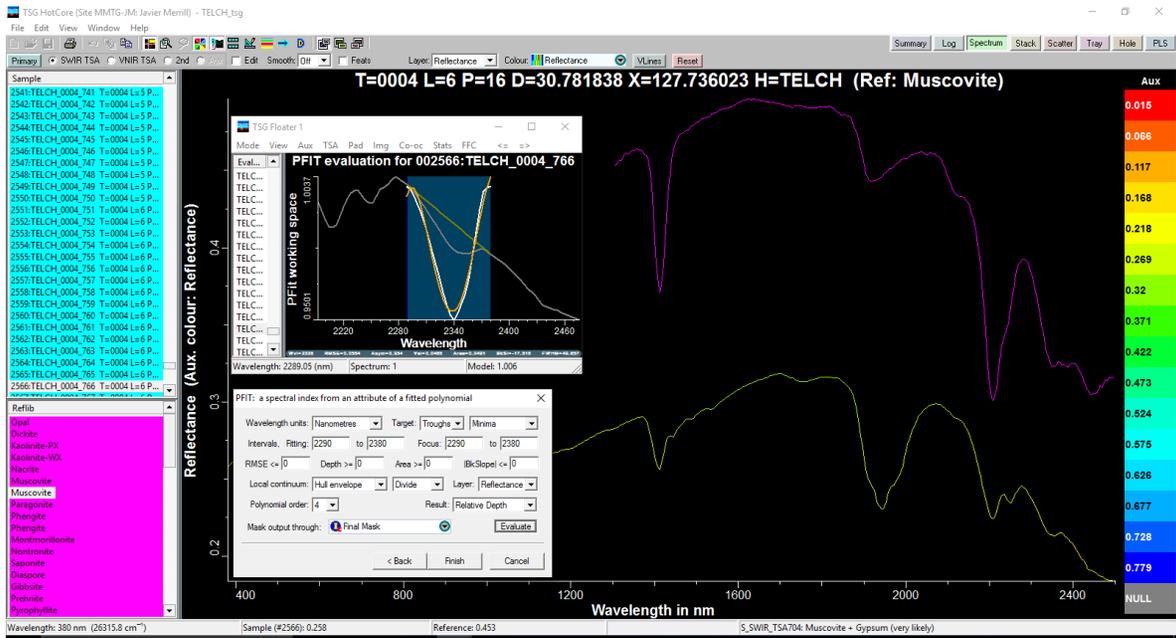


Figura 7.48 Polinomio ajustado a los 2348 [nm]

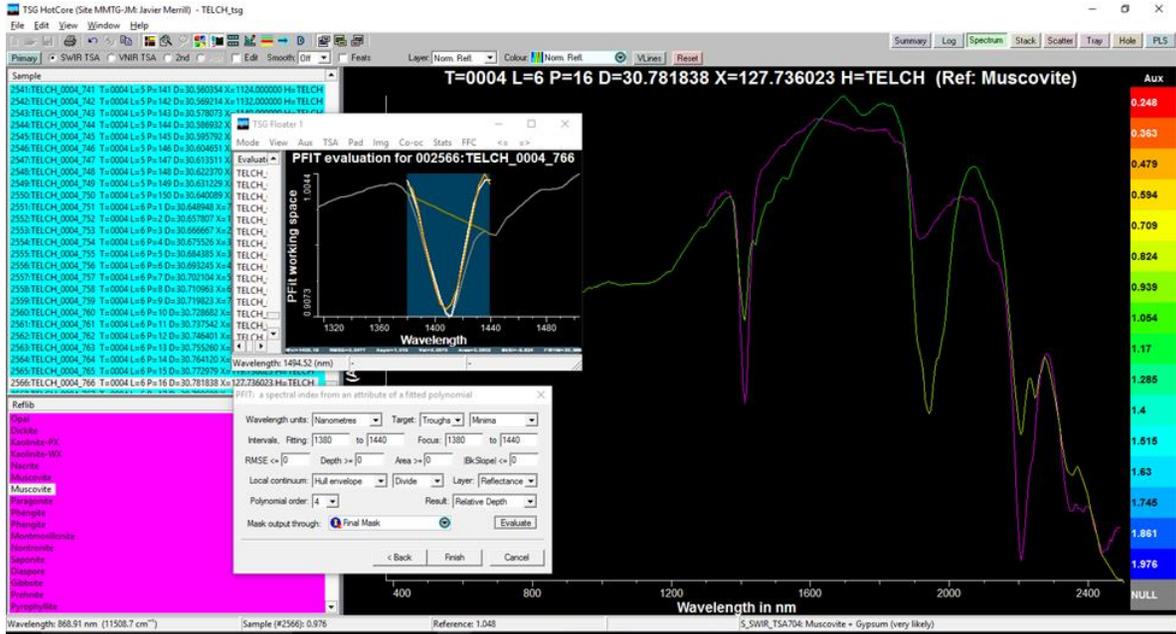


Figura 7.49 Polinomio ajustado a los 1412 [nm]

- Oligoclasa

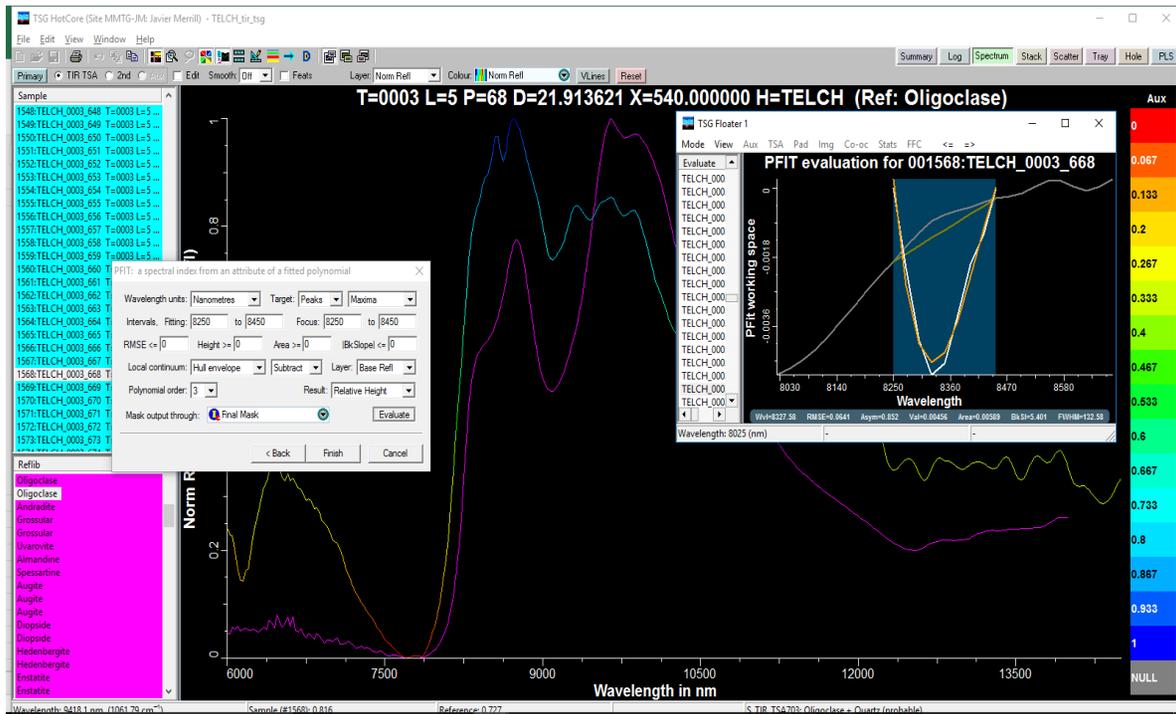


Figura 7.50 Polinomio ajustado a los 8350 [nm]

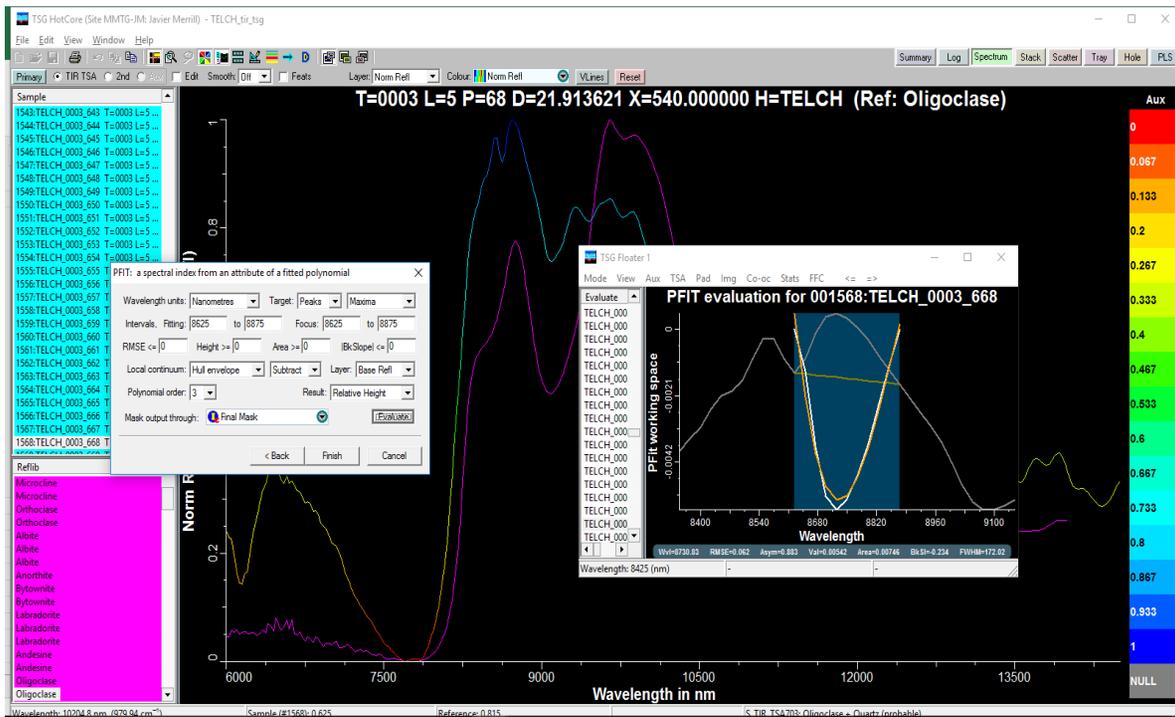


Figura 7.51 Polinomio ajustado a los 8750 [nm]

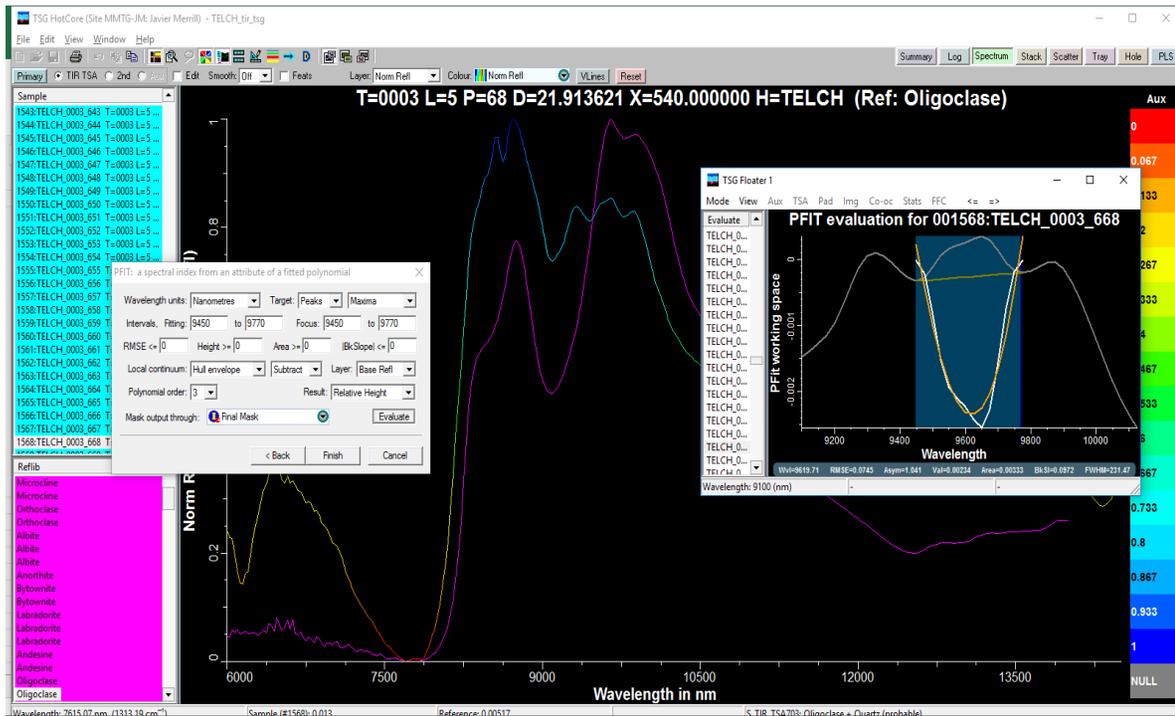


Figura 7.52 Polinomio ajustado a los 9650 [nm]

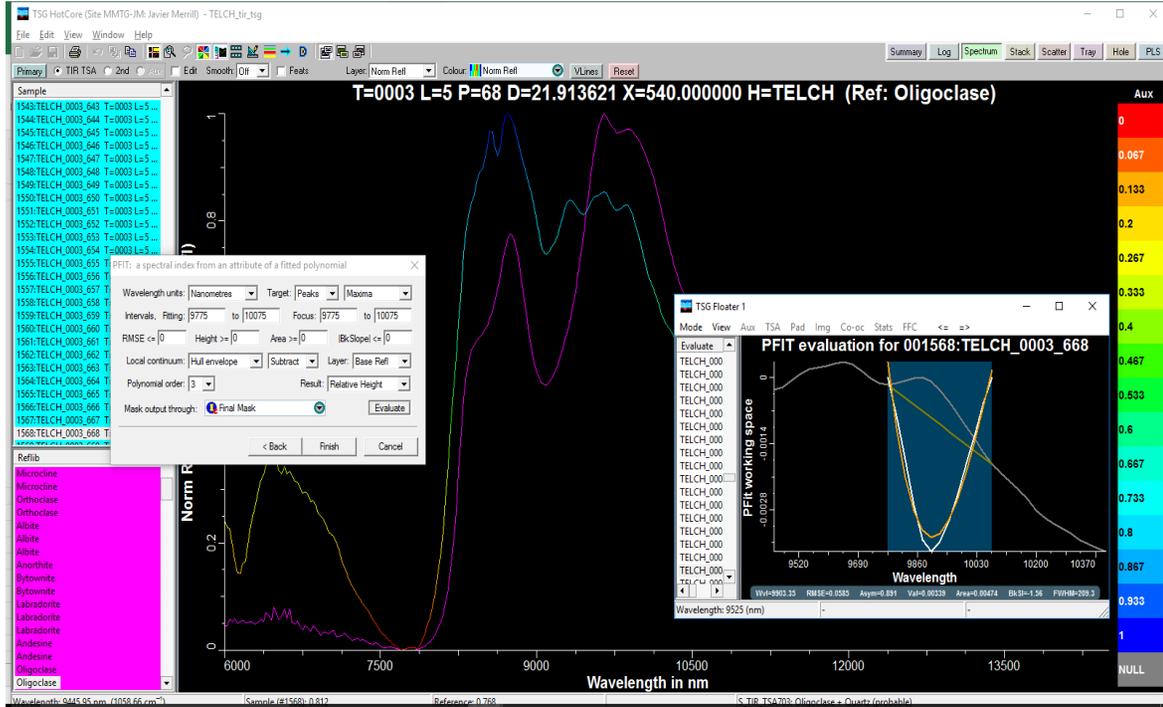


Figura 7.53 Polinomio ajustado a los 990 [nm]

- Yeso

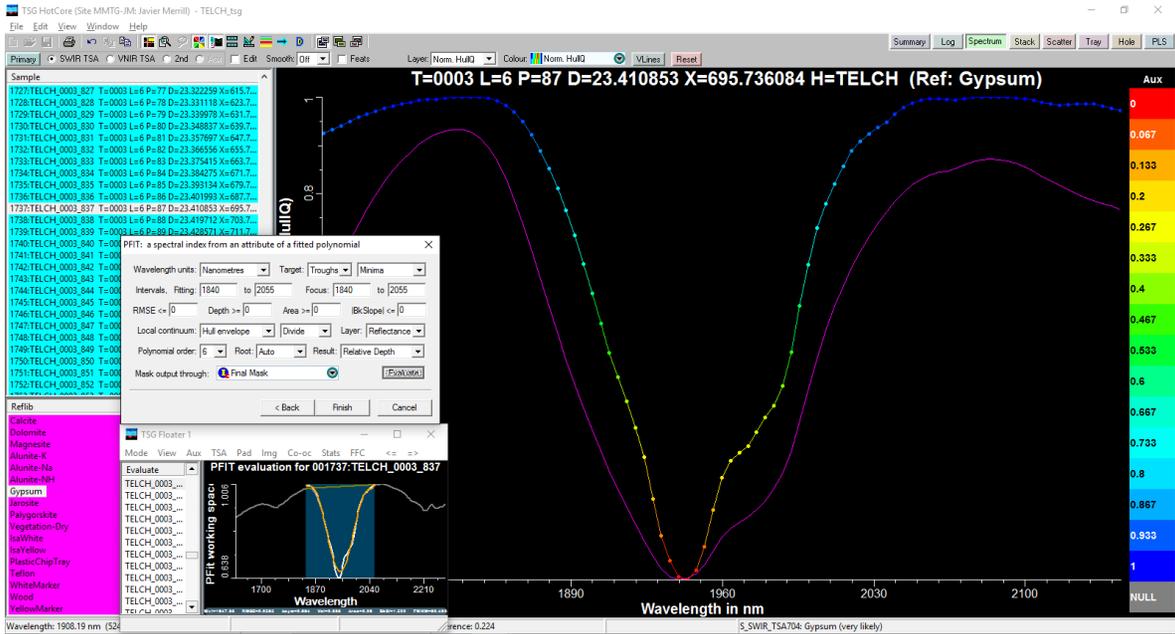


Figura 7.54 Polinomio ajustado a los 1940 [nm]

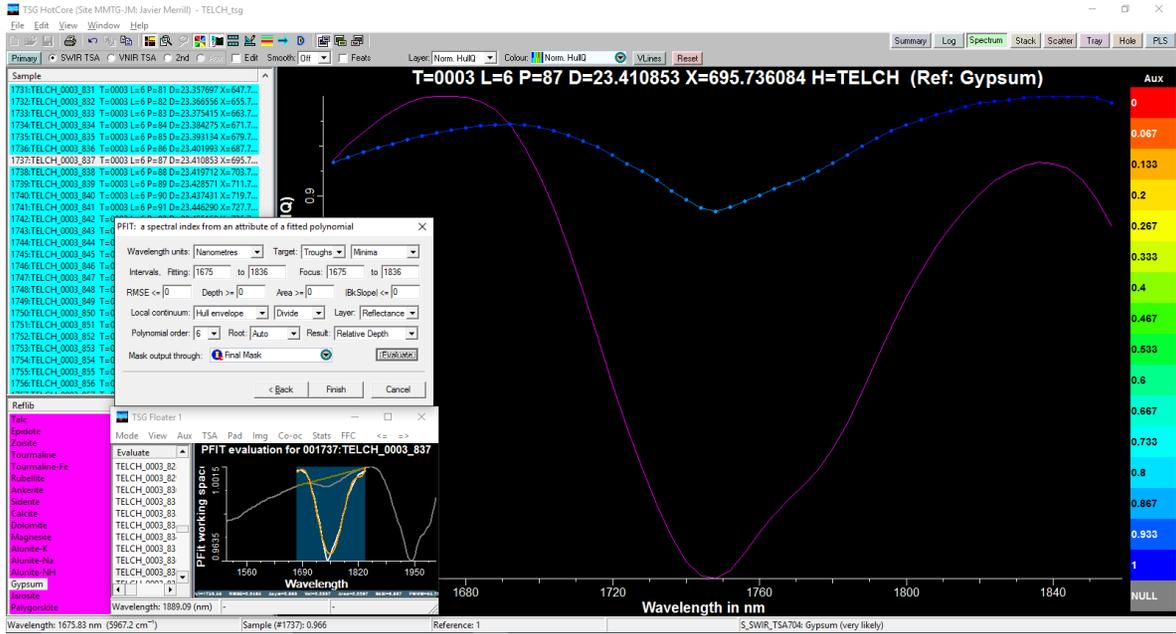


Figura 7.55 Polinomio ajustado a los 1748 [nm]

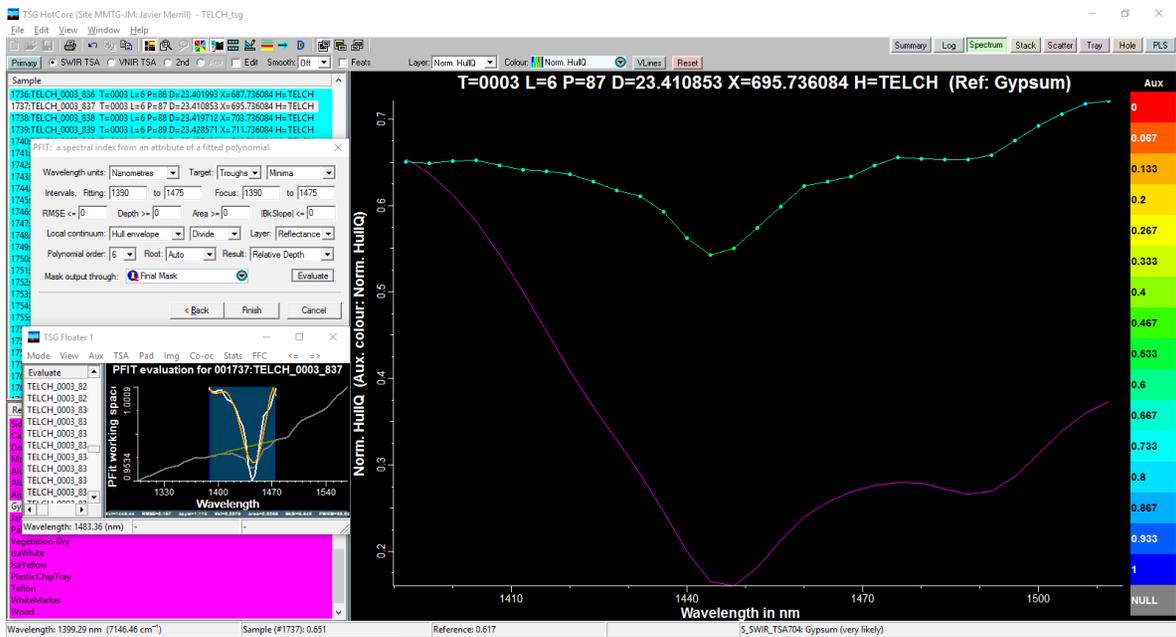


Figura 7.56 Polinomio ajustado a los 1448 [nm]

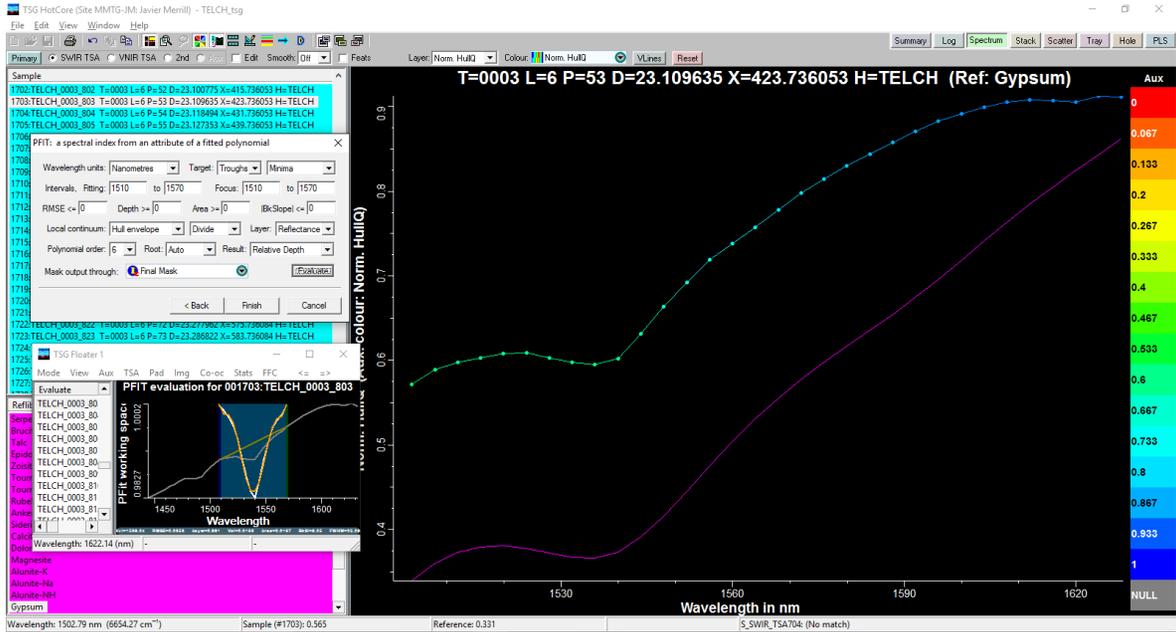


Figura 7.57 Polinomio ajustado a los 1536 [nm]

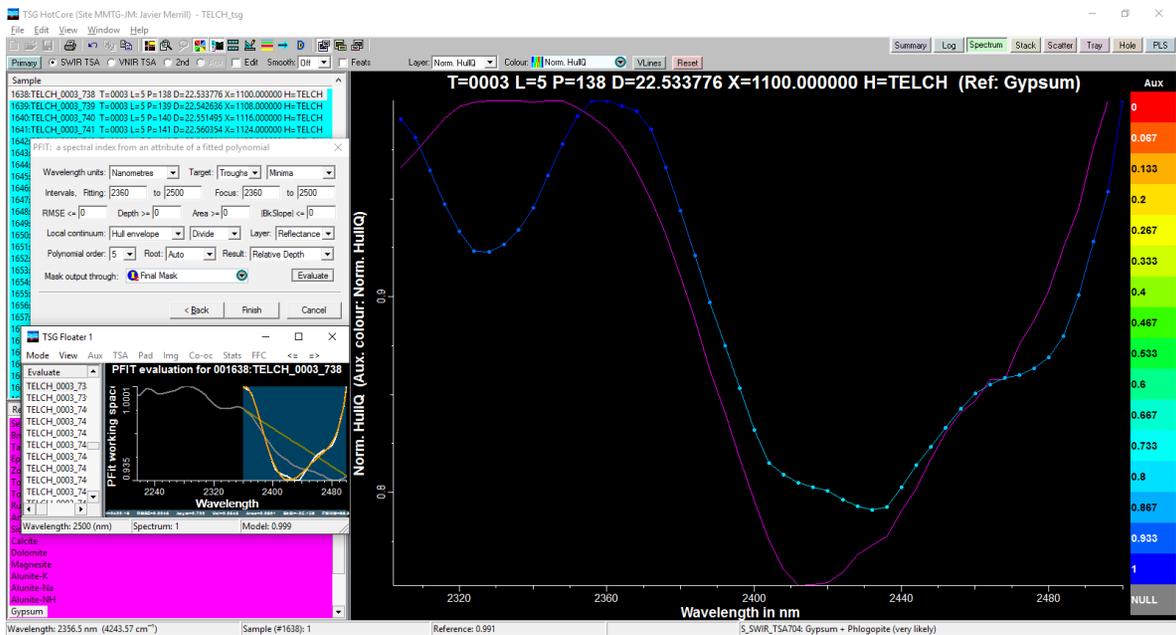


Figura 7.58 Polinomio ajustado a los 2412 [nm]

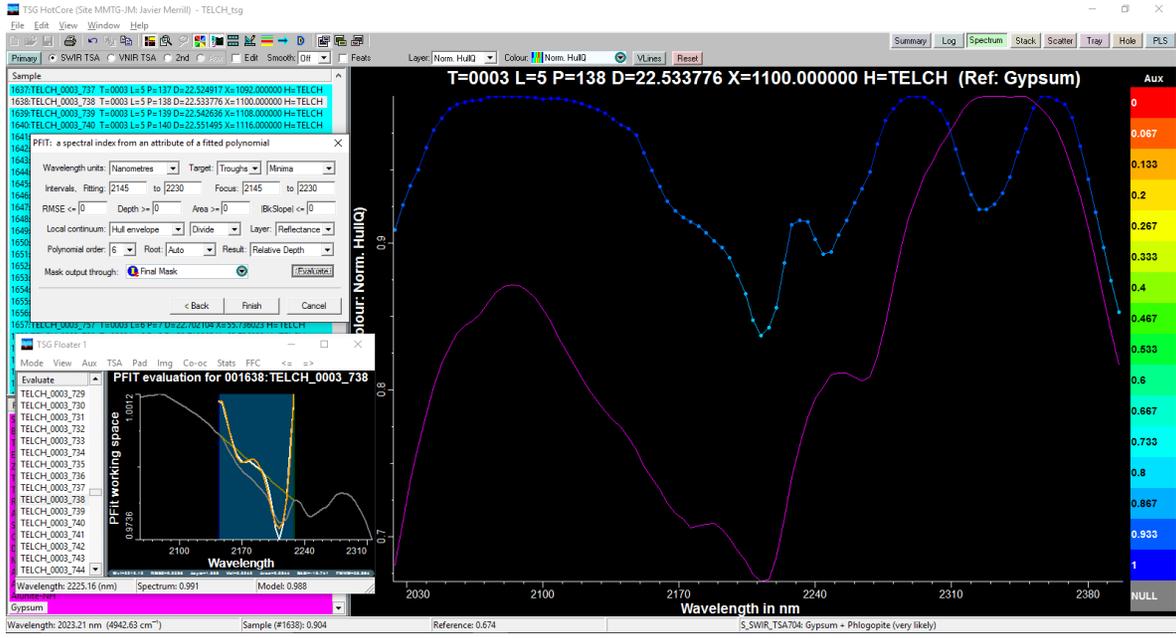


Figura 7.59 Polinomio ajustado a los 2112 [nm]

# ANEXO C: COMPARACIÓN REFLECTANCIA ESCALAR CON ANÁLISIS QEMSCAN

- Albita

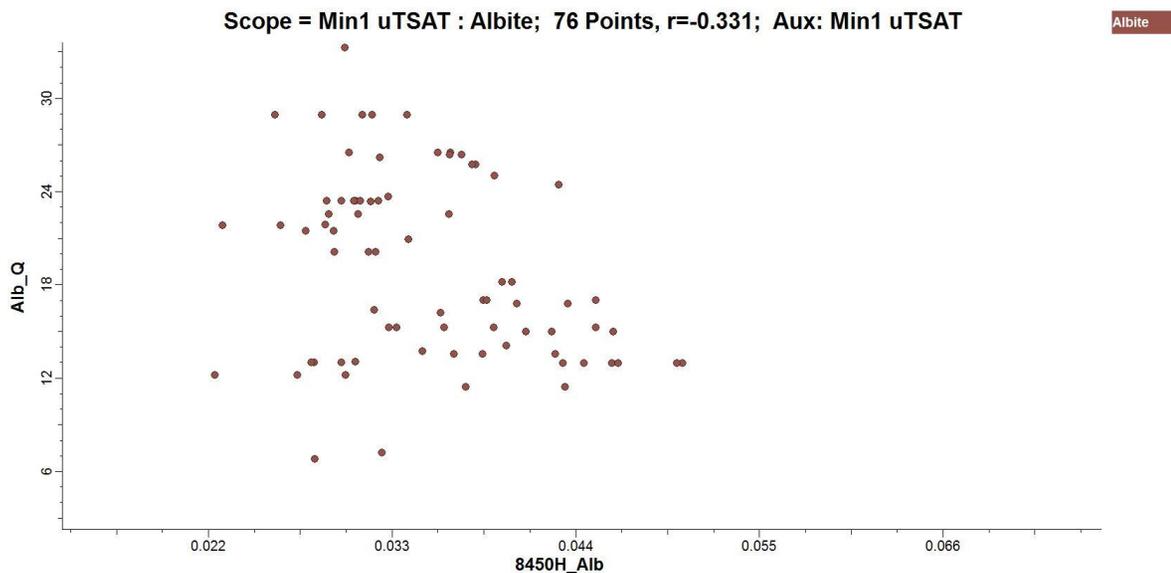


Figura 7.60 Comparación escalar 8450H

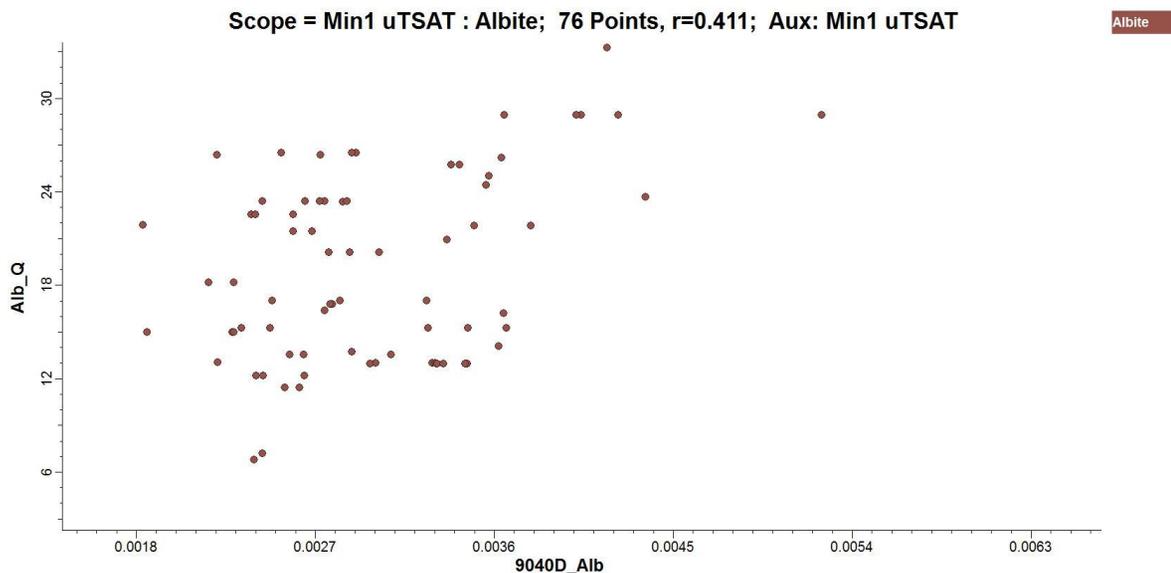


Figura 7.61 Comparación escalar 9040D

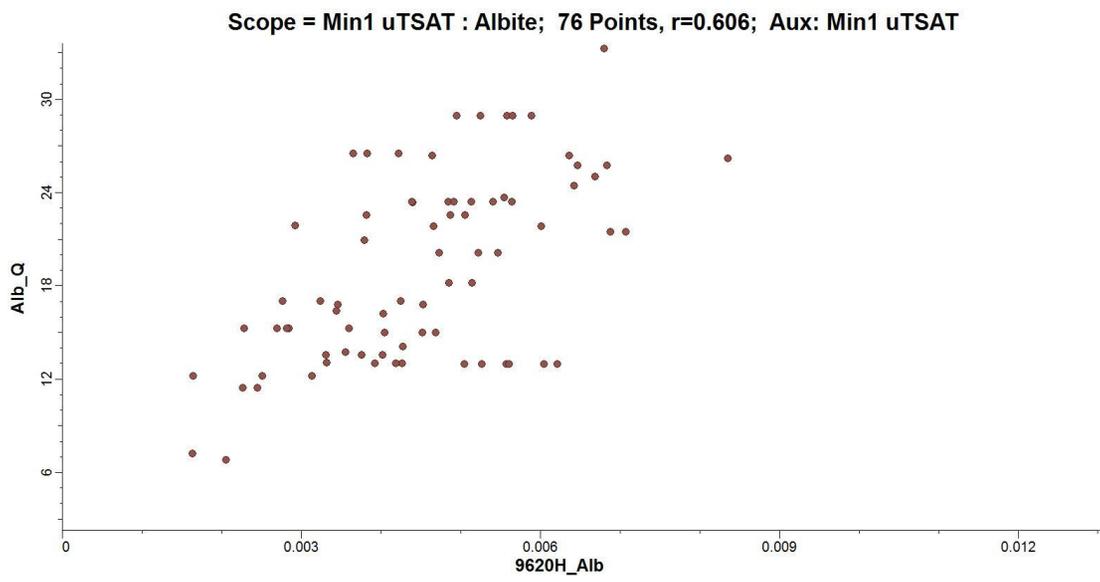


Figura 7.62 Comparación escalar 9620H

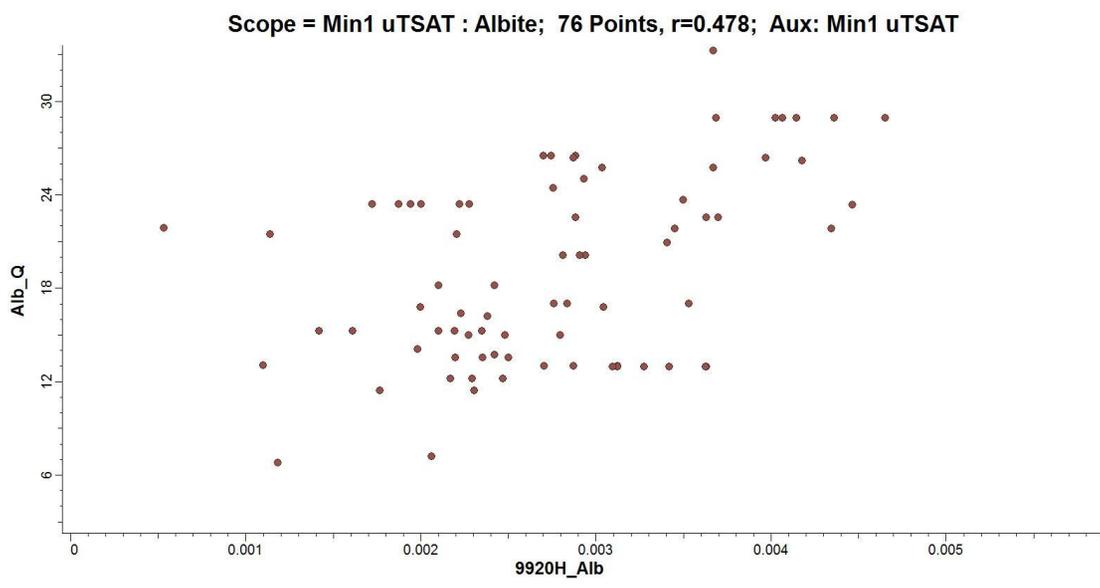


Figura 7.63 Comparación escalar 9920H

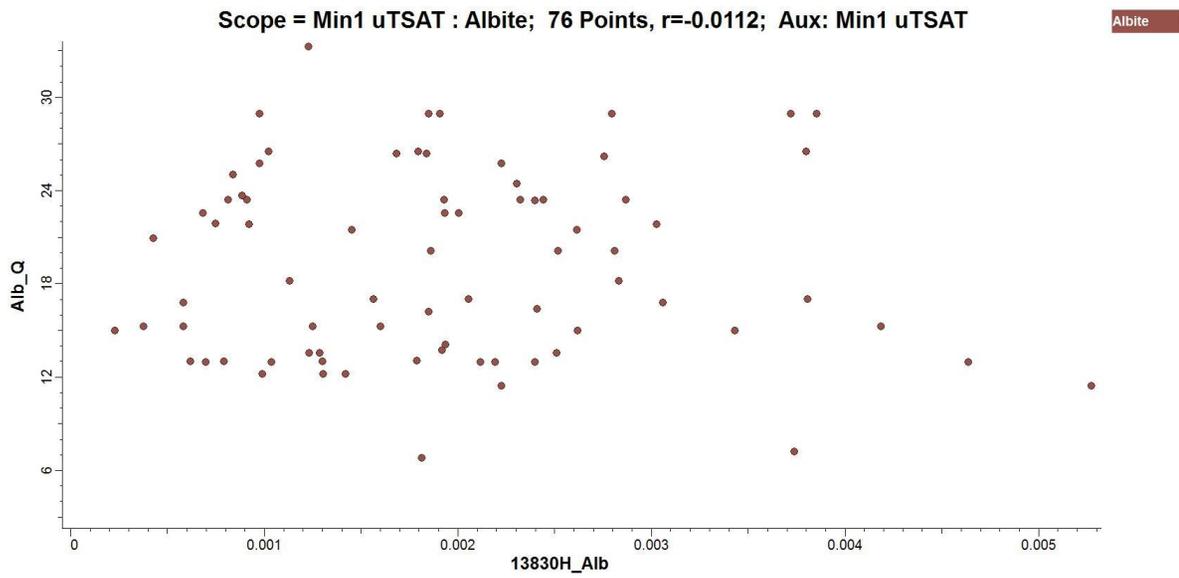


Figura 7.64 Comparación escalar 13830H

- Anortoclasa

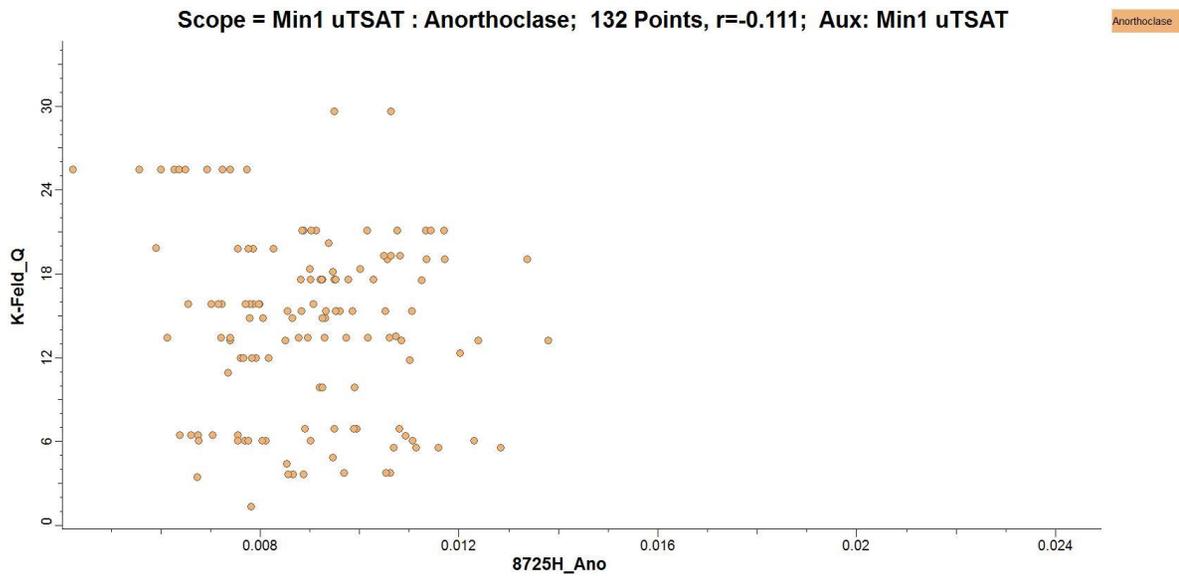


Figura 7.65 Comparación escalar 8725H

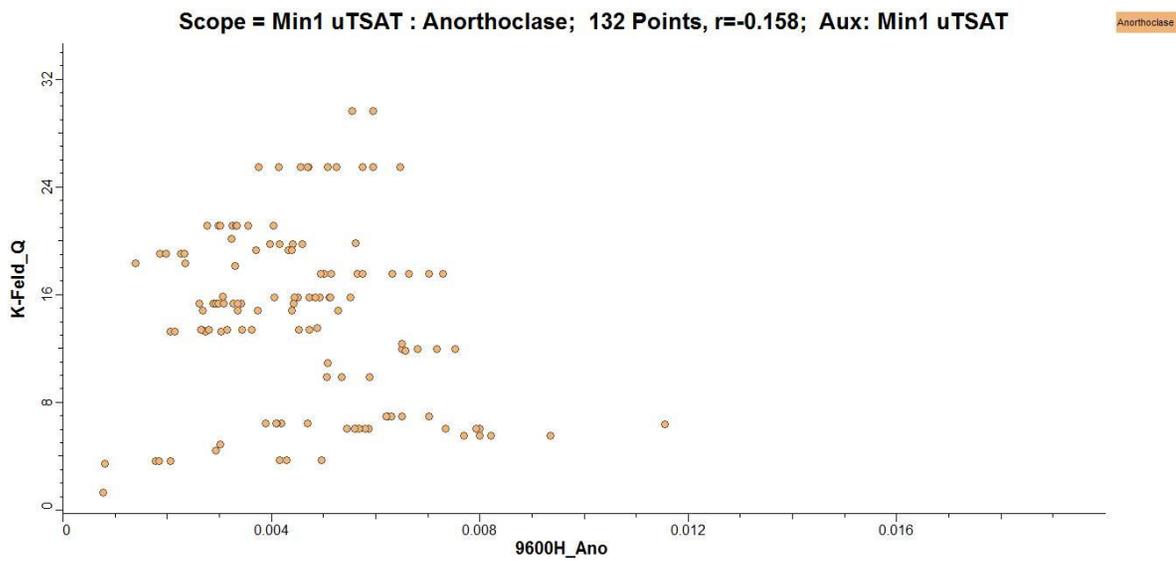


Figura 7.66 Comparación escalar 9600D

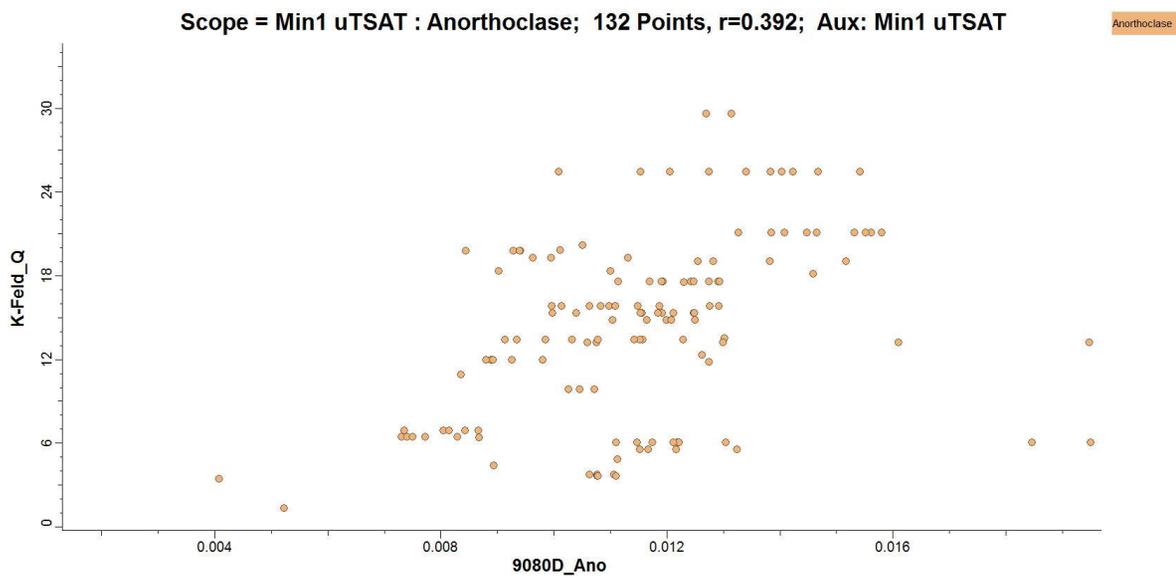


Figura 7.67 Comparación escalar 9080D

- Biotita

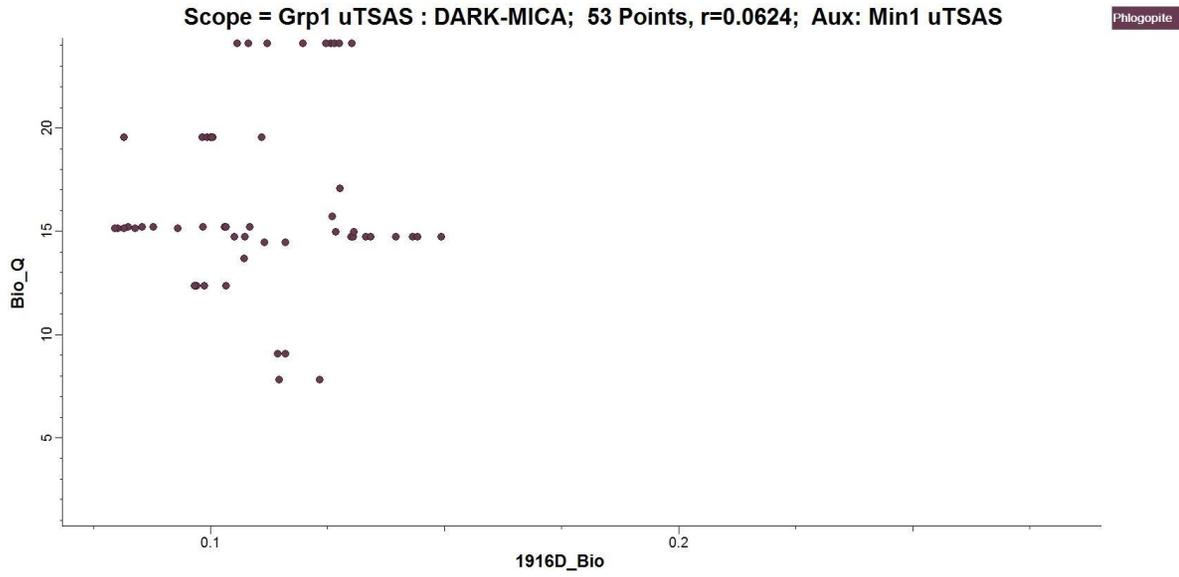


Figura 7.68 Comparación escalar 1916D

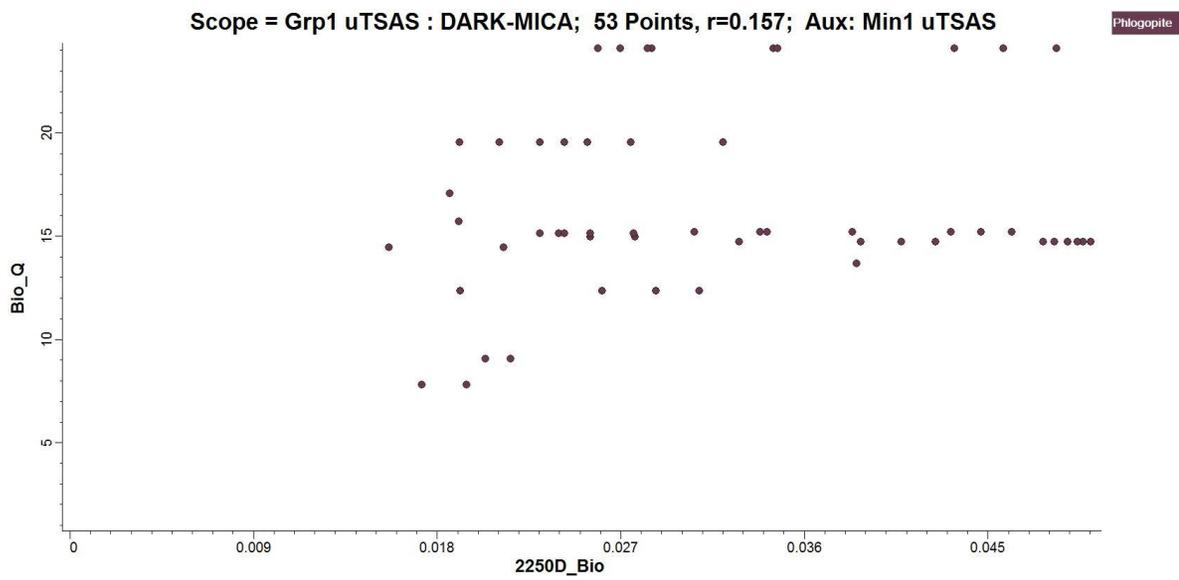


Figura 7.69 Comparación escalar 2250D

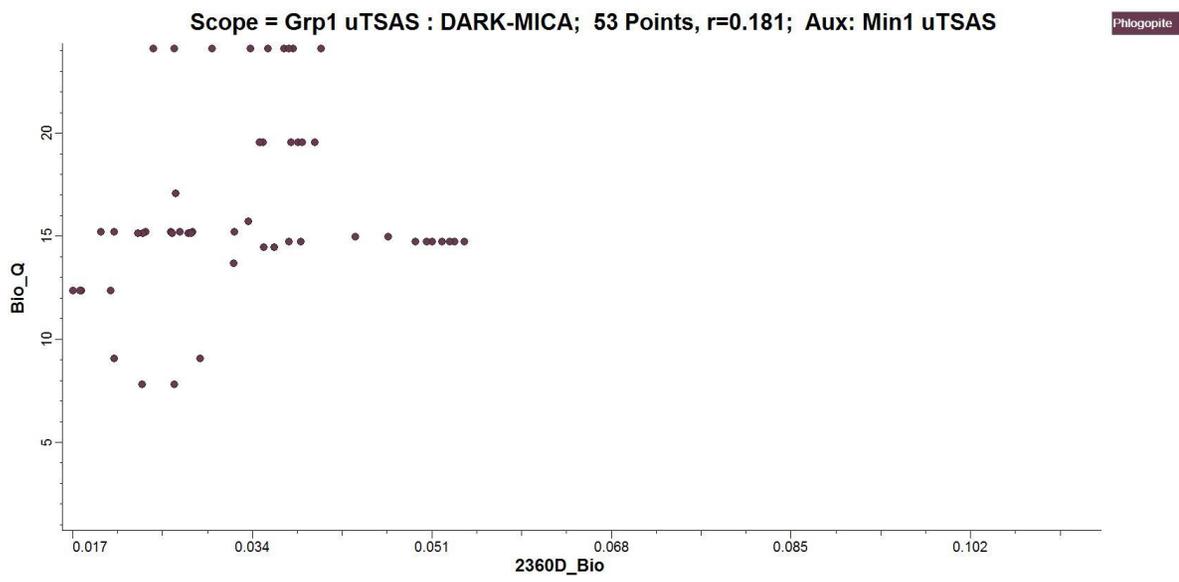


Figura 7.70 Comparación escalar 2360D

- Caolinita

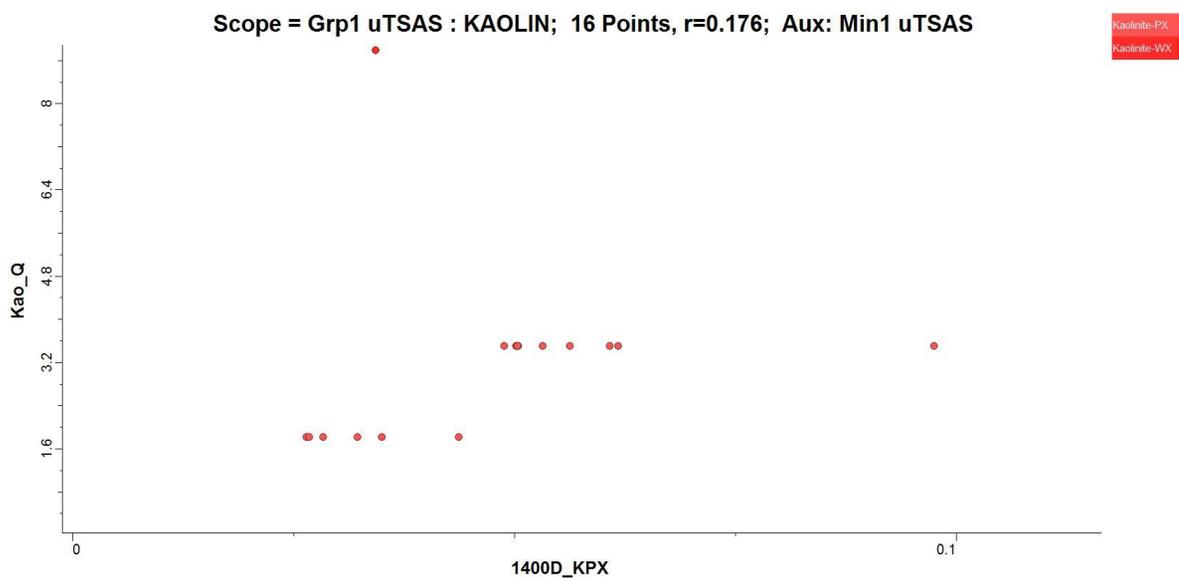


Figura 7.71 Comparación escalar 1400D

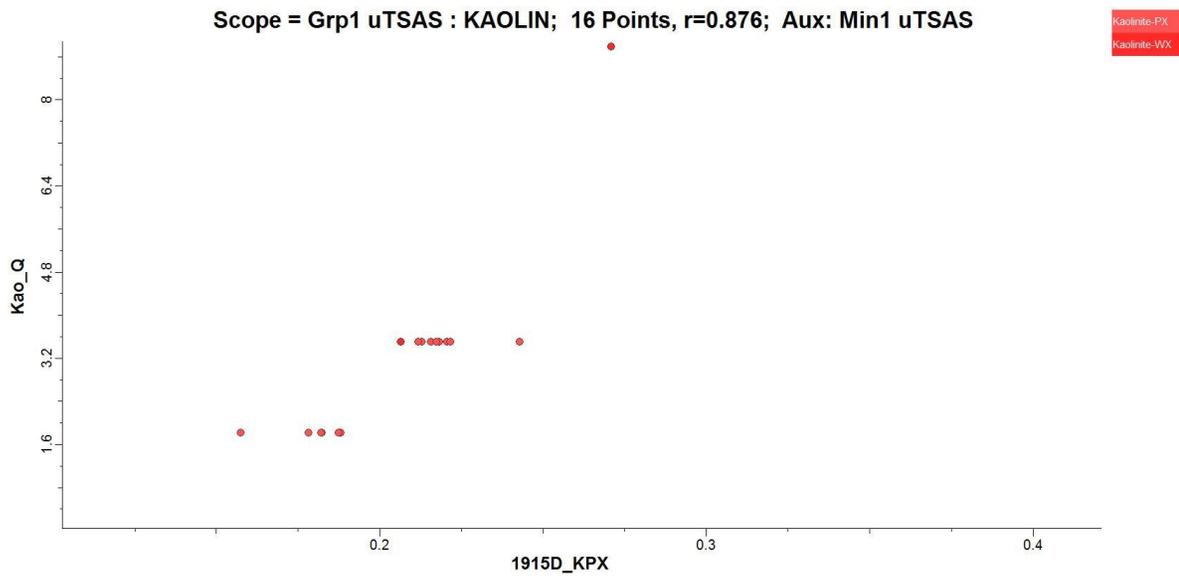


Figura 7.72 Comparación escalar 1915D

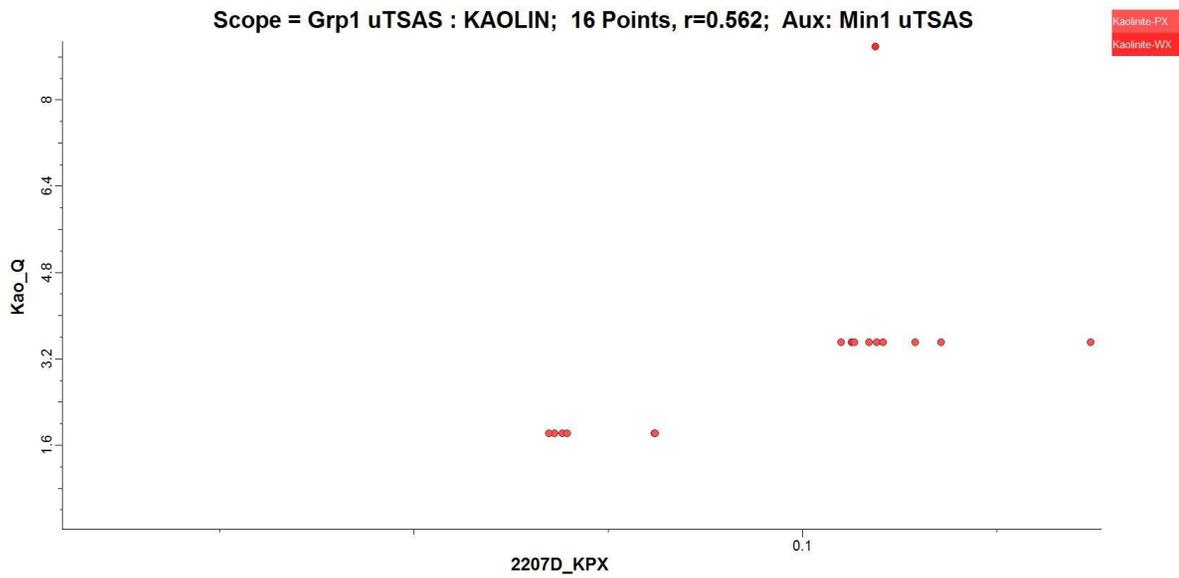


Figura 7.73 Comparación escalar 2207D

- Cuarzo

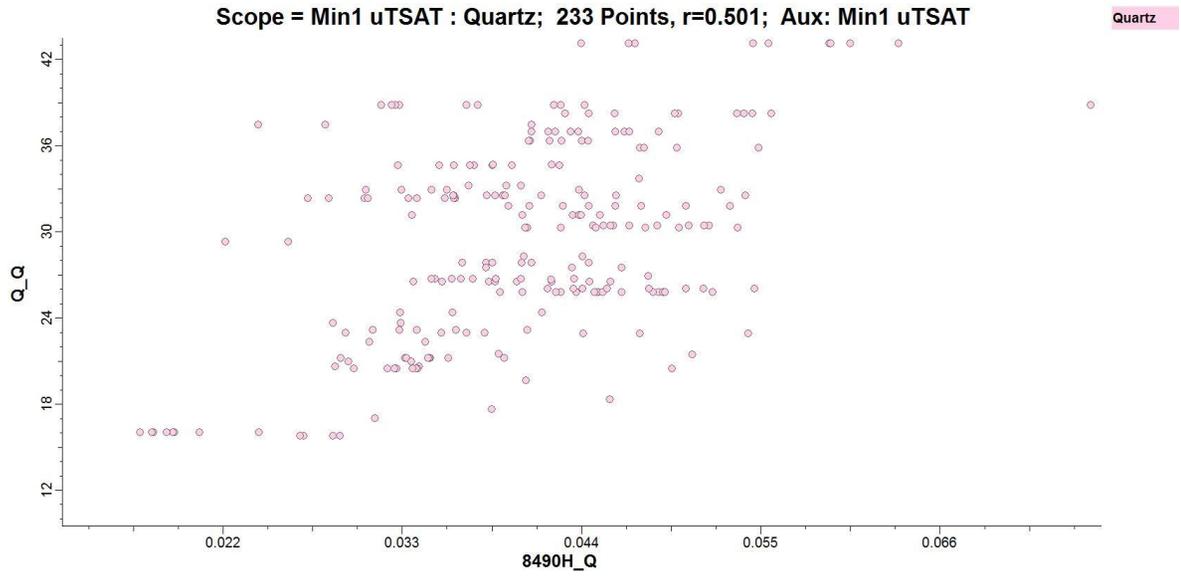


Figura 7.74 Comparación escalar 8490H

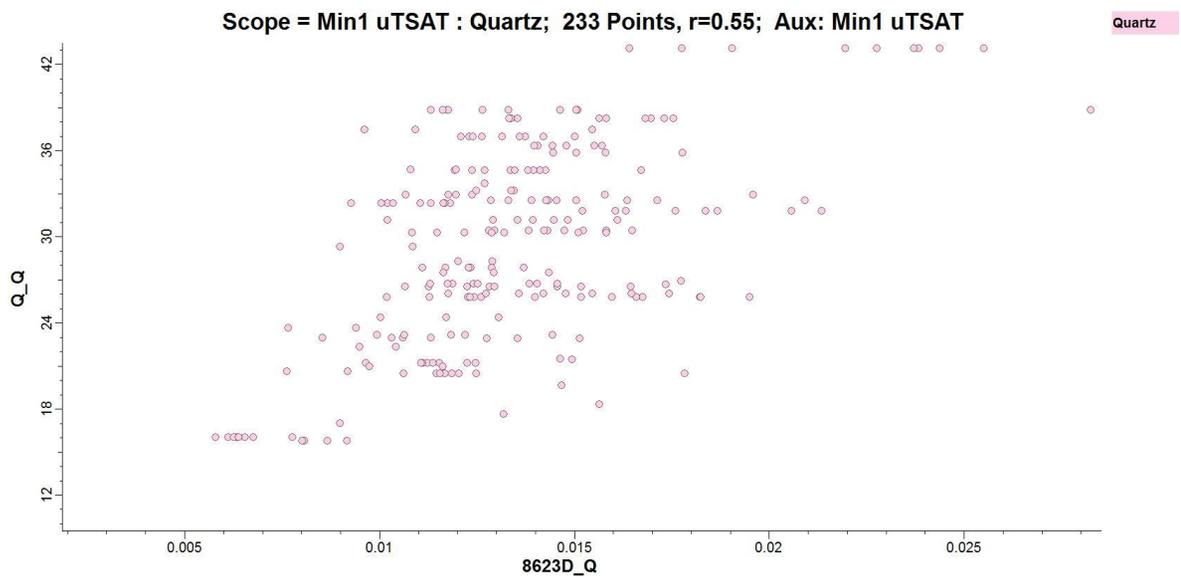


Figura 7.75 Comparación escalar 8623D

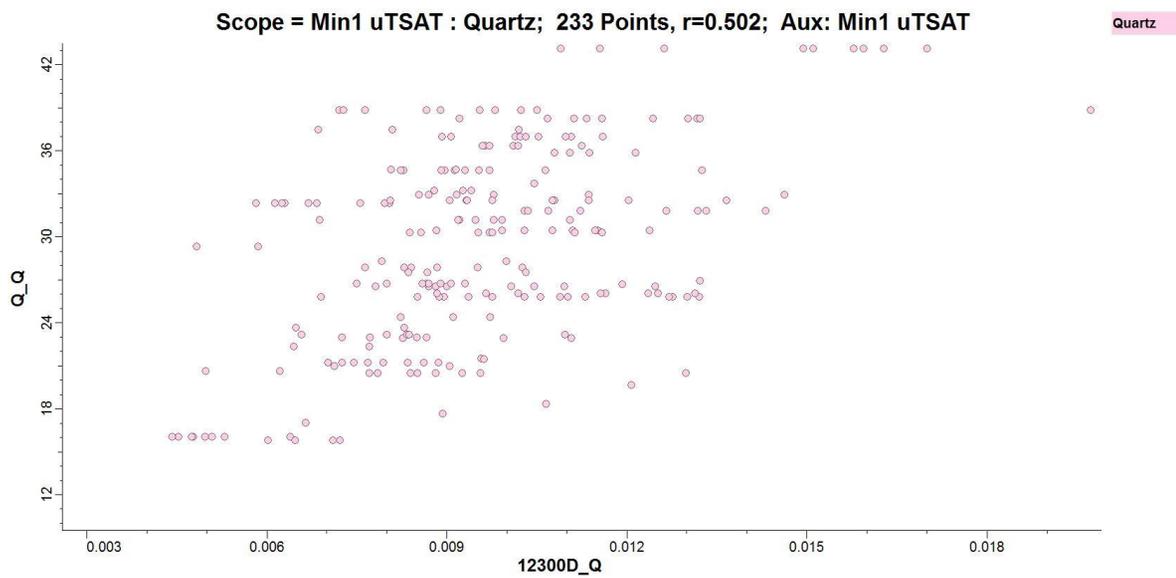


Figura 7.76 Comparación escalar 12300D

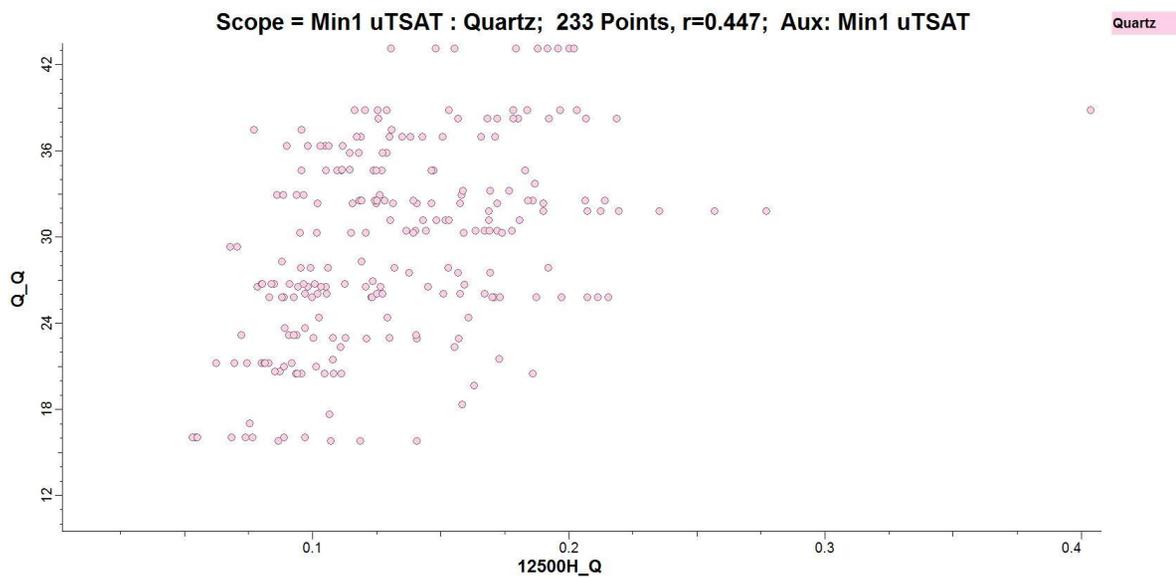


Figura 7.77 Comparación escalar 12500H

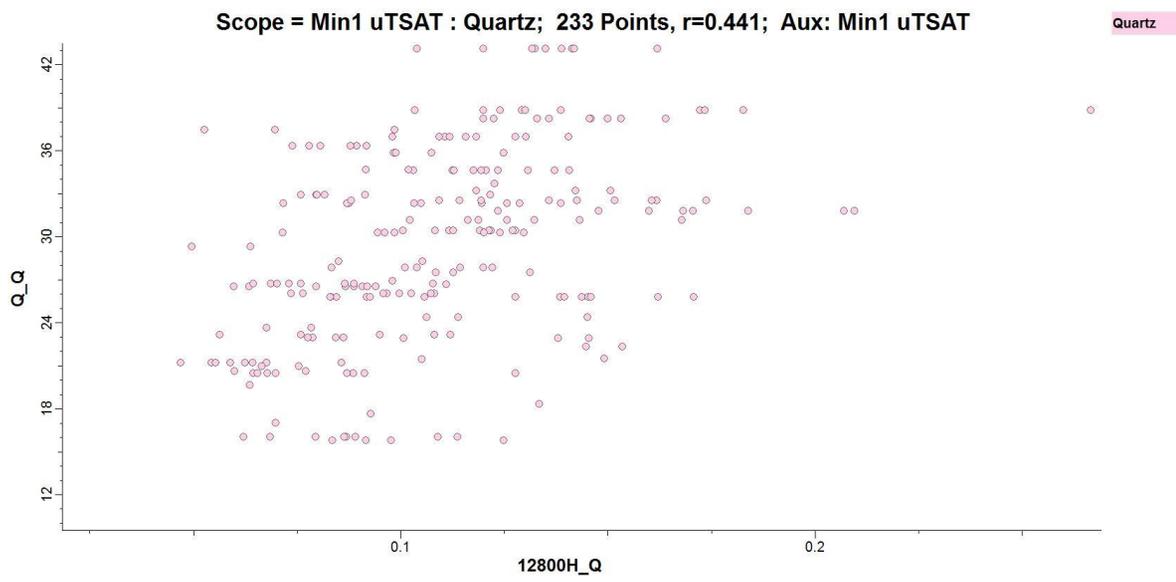


Figura 7.78 Comparación escalar 12800H

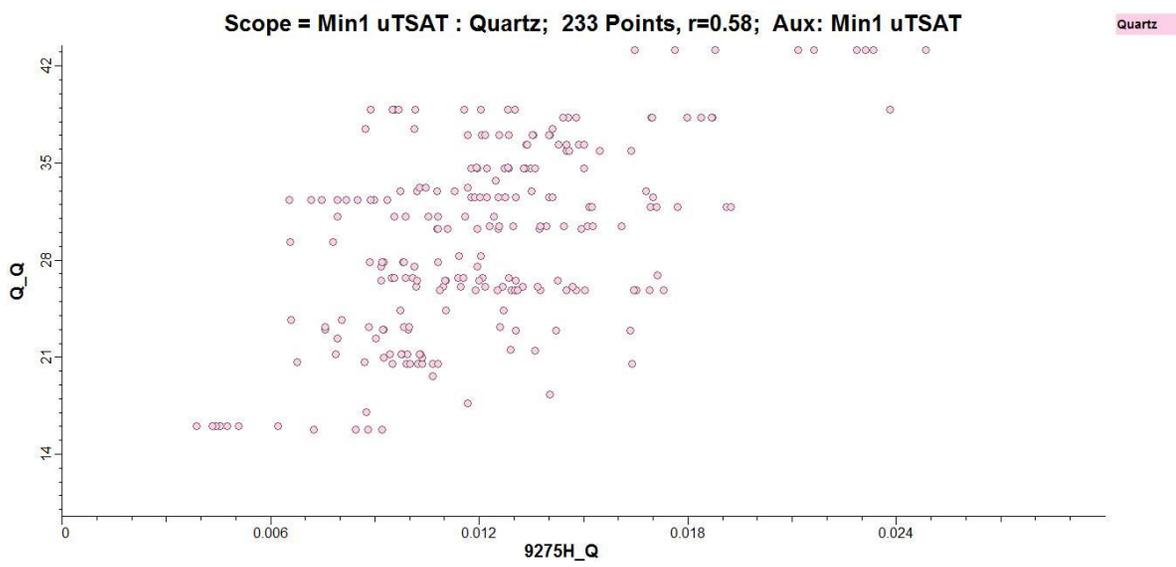


Figura 7.79 Comparación escalar 9275H

- Fengita

Scope = Min1 uTSAS : Phengite; 20 Points,  $r=0.00994$ ; Aux: Min1 uTSAS

Phengite

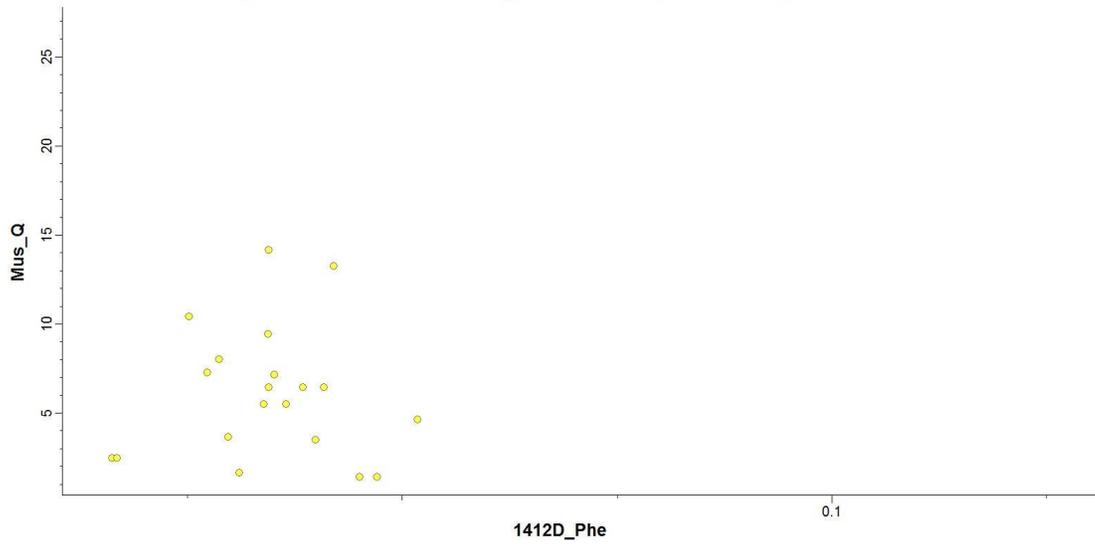


Figura 7.80 Comparación escalar 1412D

Scope = Min1 sTSAS : Phengite; 20 Points,  $r=0.168$ ; Aux: Min1 uTSAS

Phengite

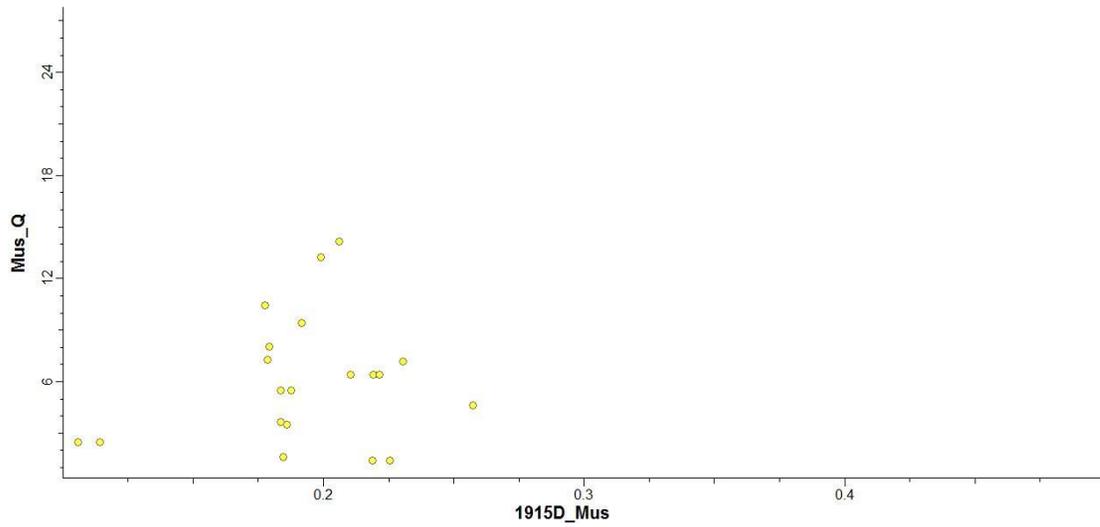


Figura 7.81 Comparación escalar 1915D

Scope = Min1 uTSAS : Phengite; 20 Points,  $r=0.143$ ; Aux: Min1 uTSAS

Phengite

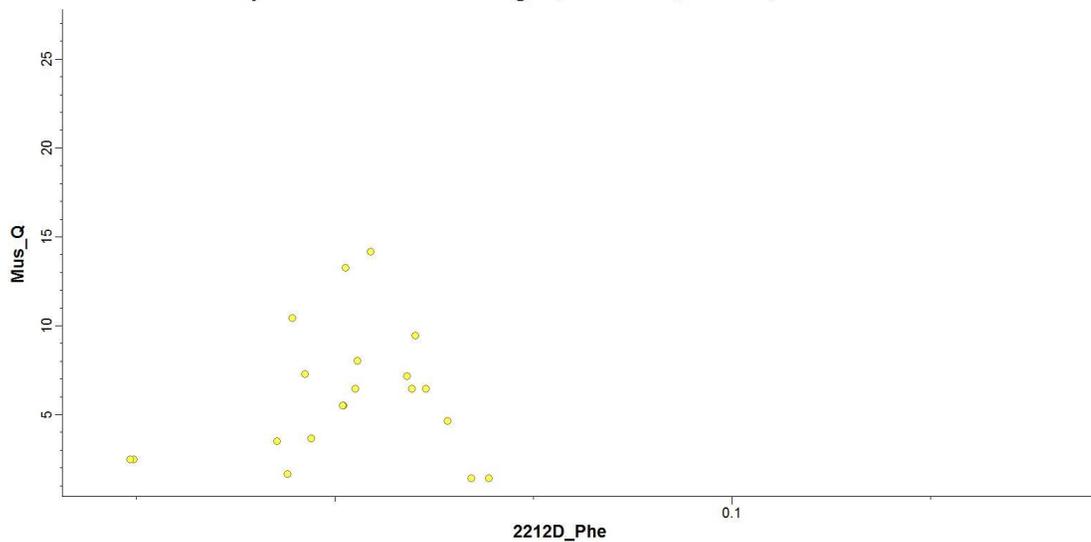


Figura 7.82 Comparación escalar 2212D

Scope = Min1 uTSAS : Phengite; 20 Points,  $r=0.272$ ; Aux: Min1 uTSAS

Phengite

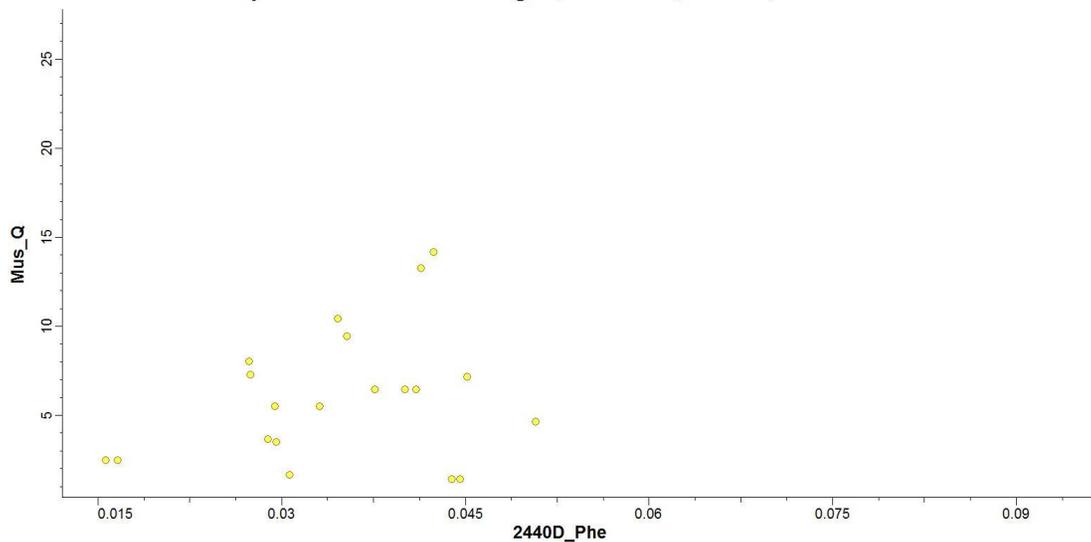


Figura 7.83 Comparación escalar 2440D

- Flogopita

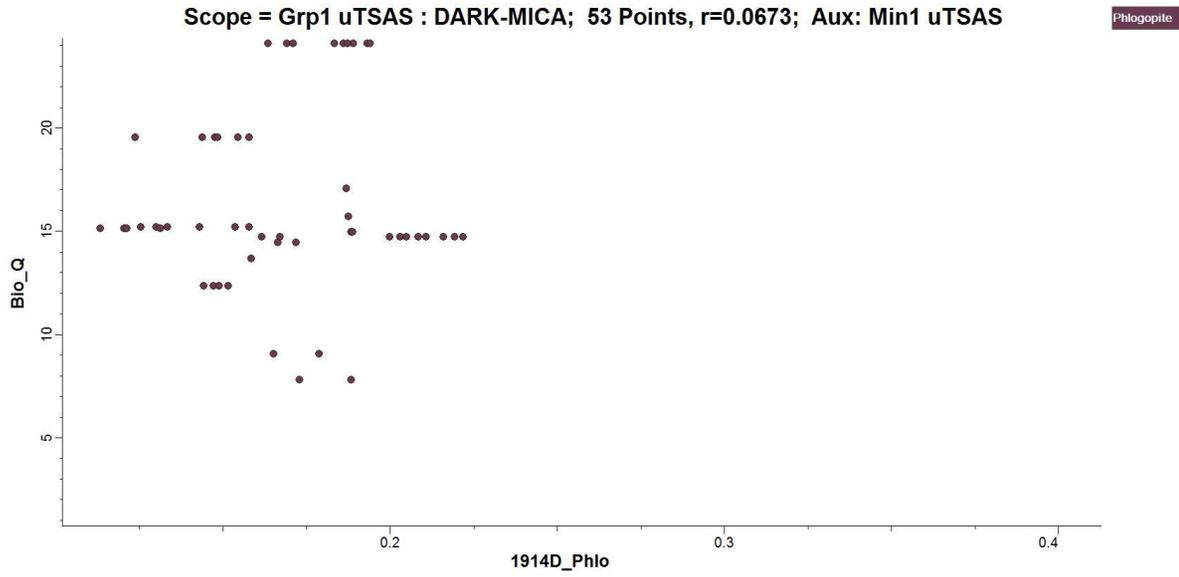


Figura 7.84 Comparación escalar 1914D

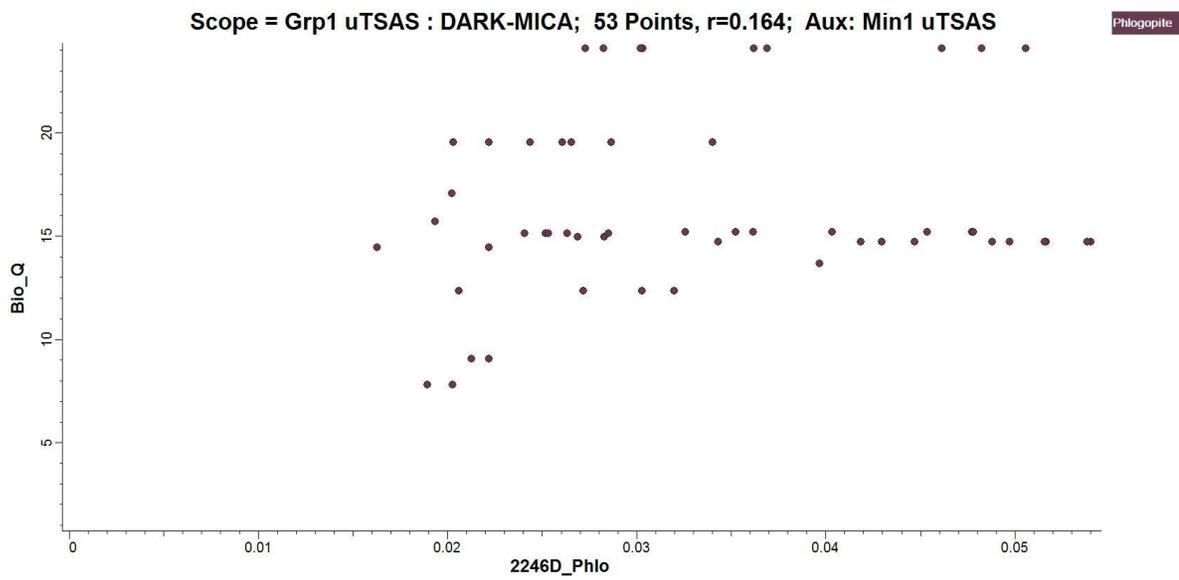


Figura 7.85 Comparación escalar 2246D

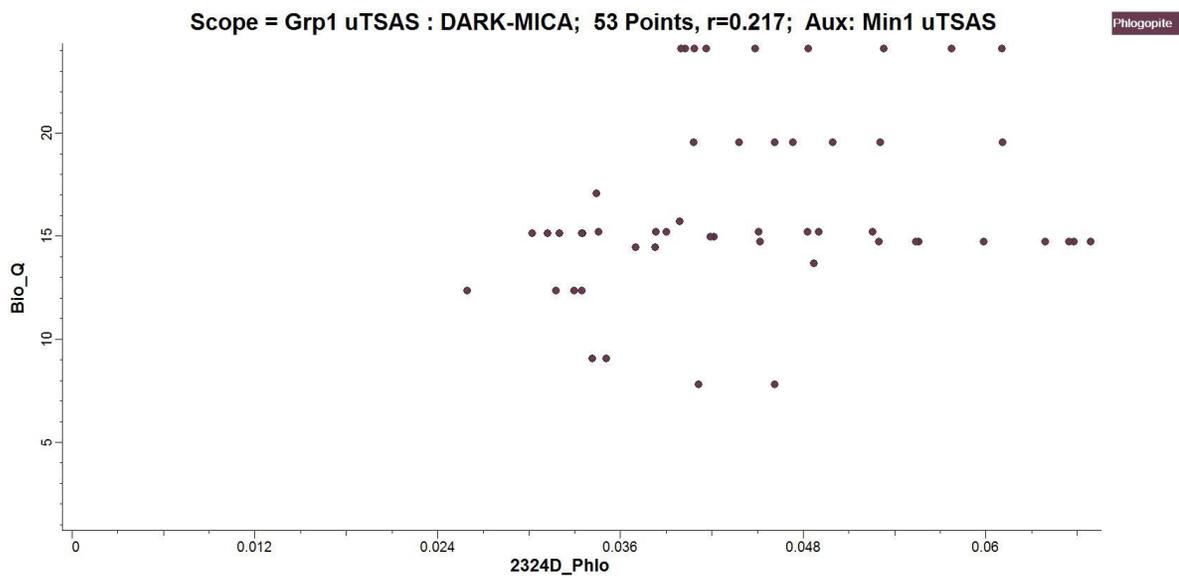


Figura 7.86 Comparación escalar 2324D

- Labradorita

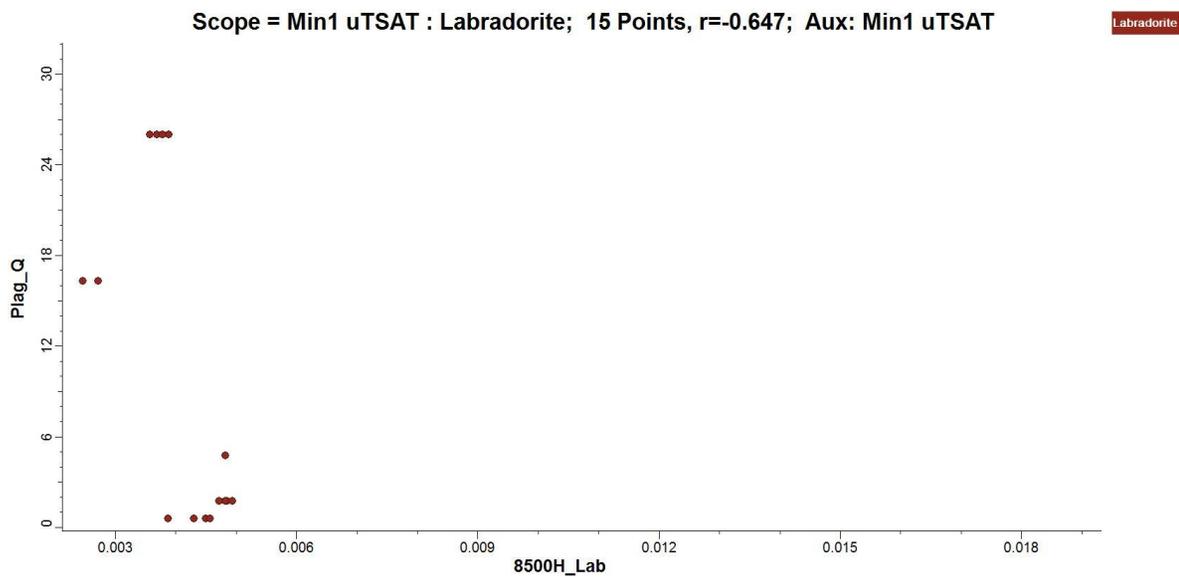


Figura 7.87 Comparación escalar 8500H



Scope = Min1 uTSAT : Labradorite; 15 Points,  $r=-0.505$ ; Aux: Min1 uTSAT

Labradorite

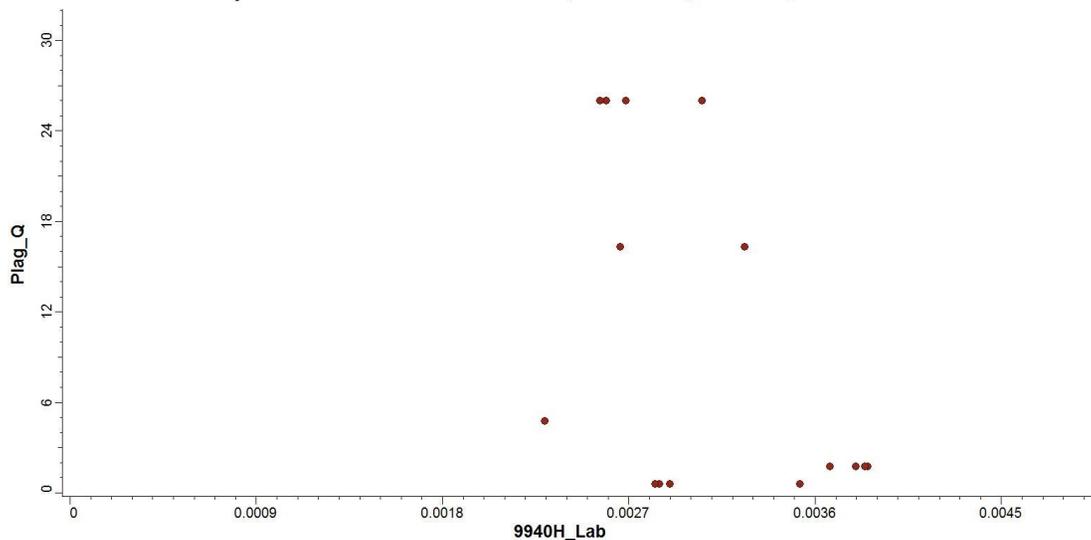


Figura 7.90 Comparación escalar 9940H

- Montmorillonite

Scope = Min1 uTSAS : Montmorillonite; 31 Points,  $r=0.22$ ; Aux: Min1 uTSAS

Montmorillonite

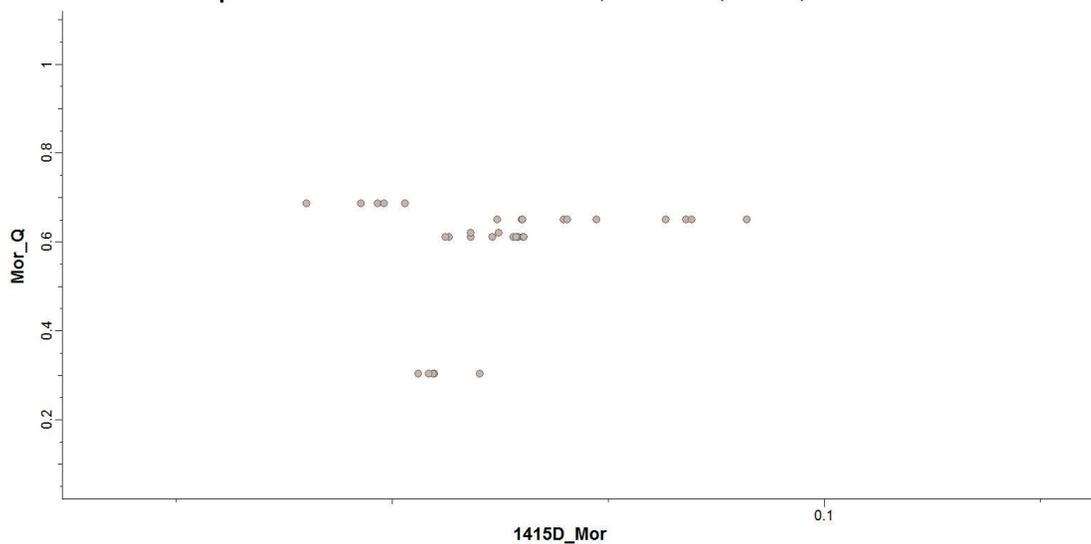


Figura 7.91 Comparación escalar 1415D

Scope = Min1 uTSAS : Montmorillonite; 31 Points,  $r=-0.0139$ ; Aux: Min1 uTSAS

Montmorillonite

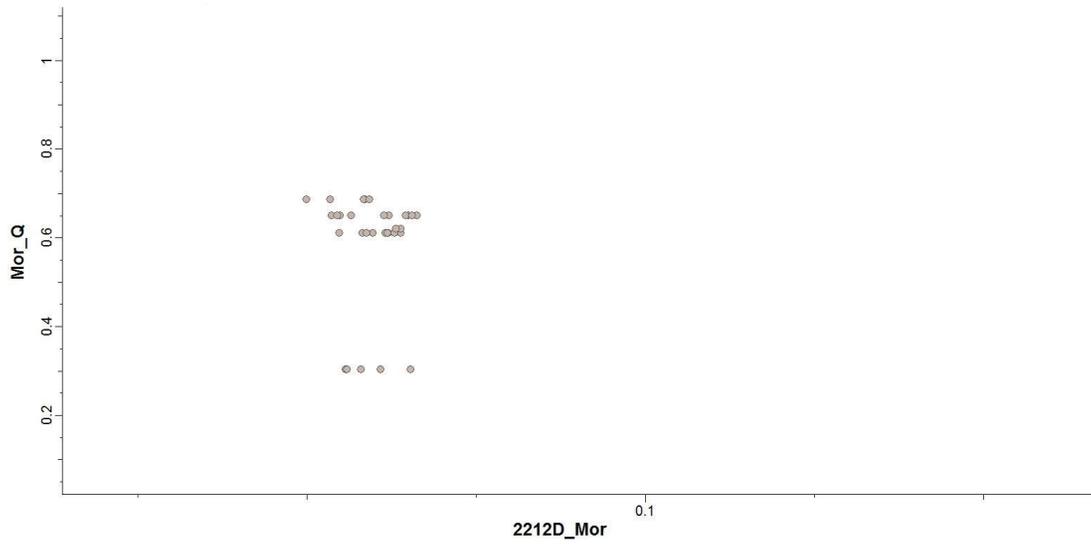


Figura 7.92 Comparación escalar 2212D

Scope = Min1 sTSAS : Montmorillonite; 31 Points,  $r=0.174$ ; Aux: Min1 uTSAS

Montmorillonite

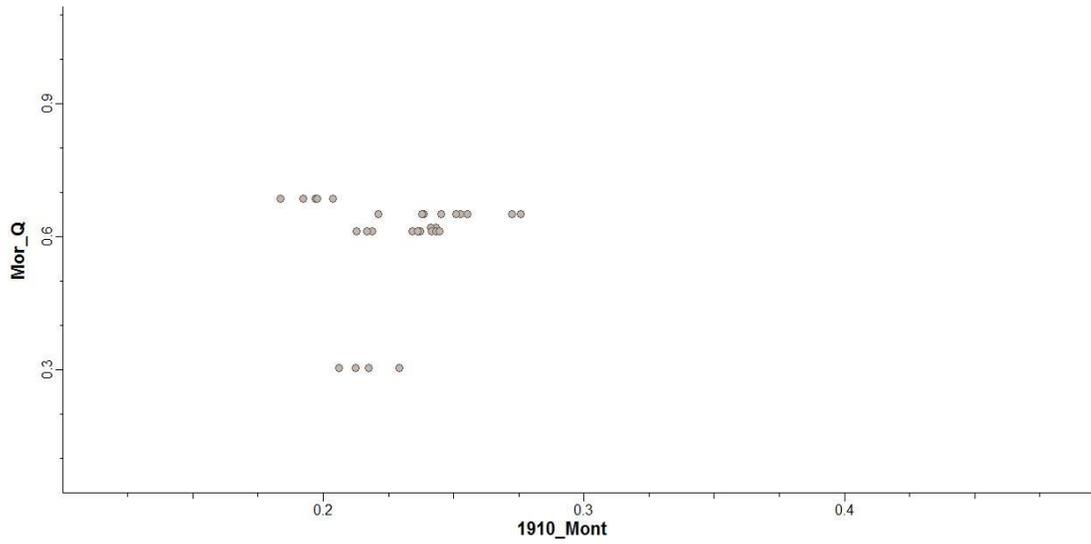


Figura 7.93 Comparación escalar 1910D

- Muscovita

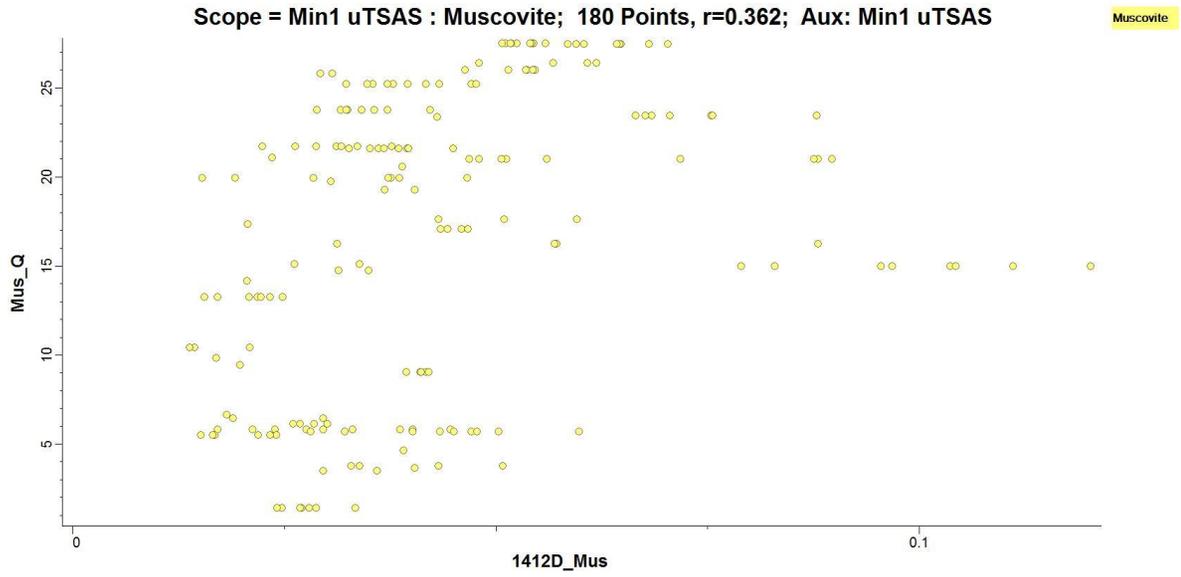


Figura 7.94 Comparación escalar 1412D

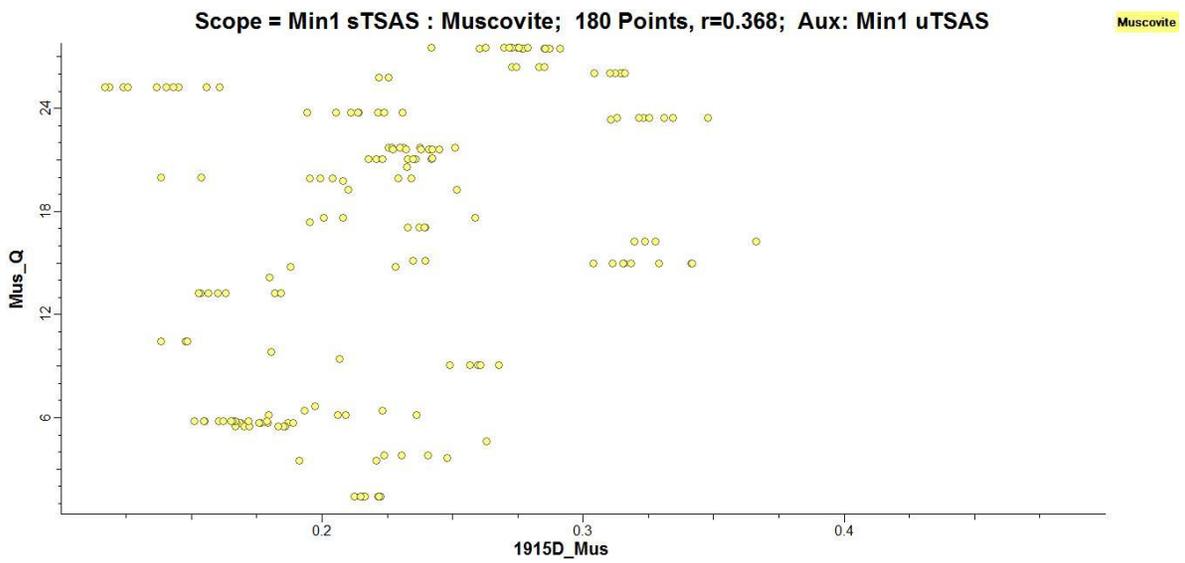


Figura 7.95 Comparación escalar 1915D

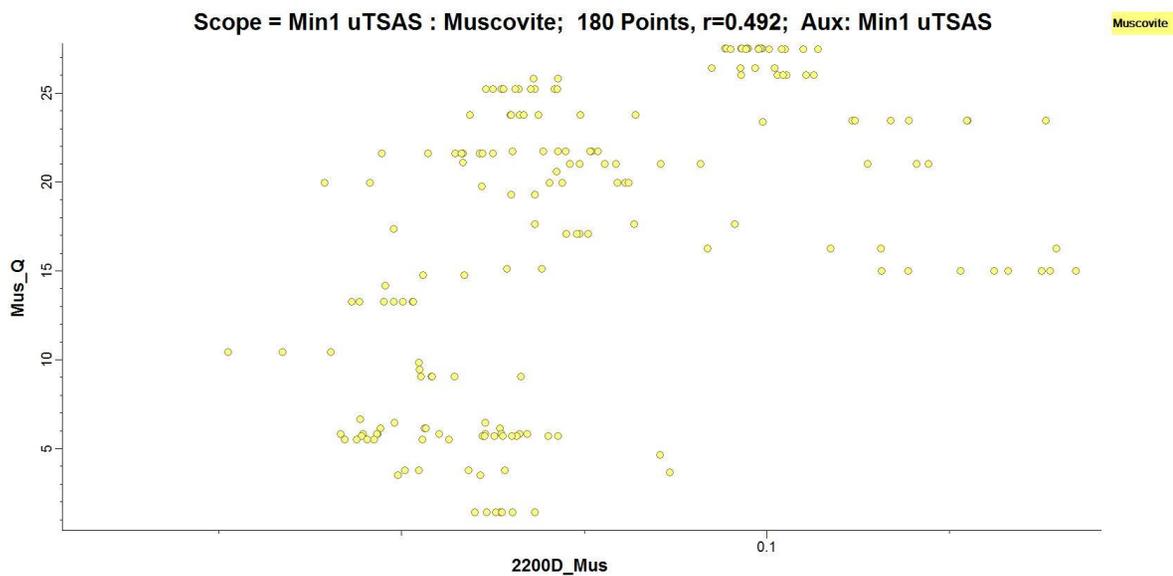


Figura 7.96 Comparación escalar 2200D

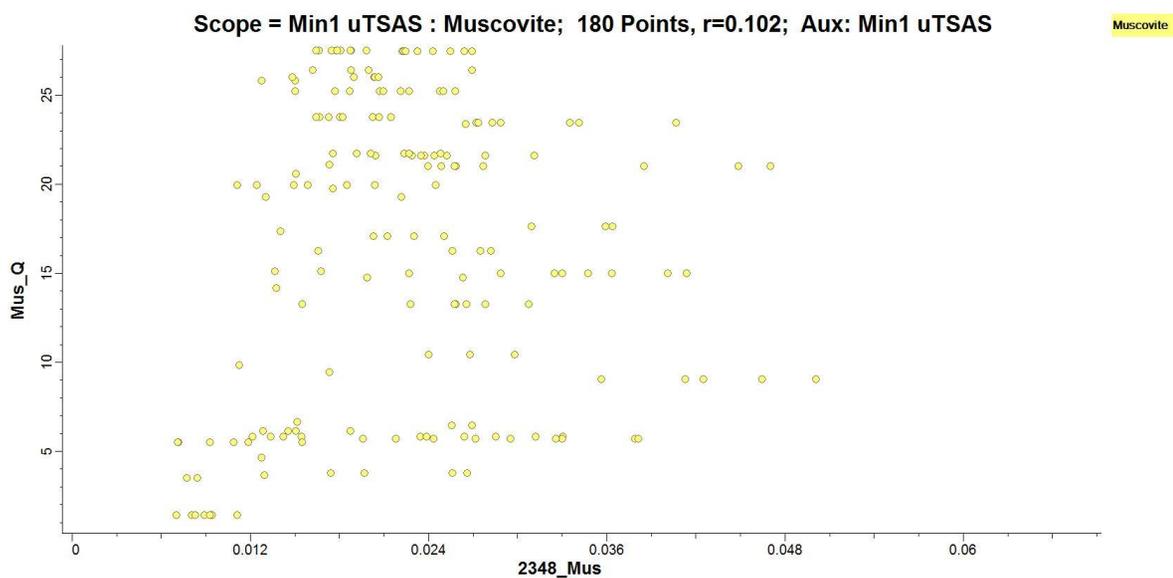


Figura 7.97 Comparación escalar 2348D

- Oligoclasa

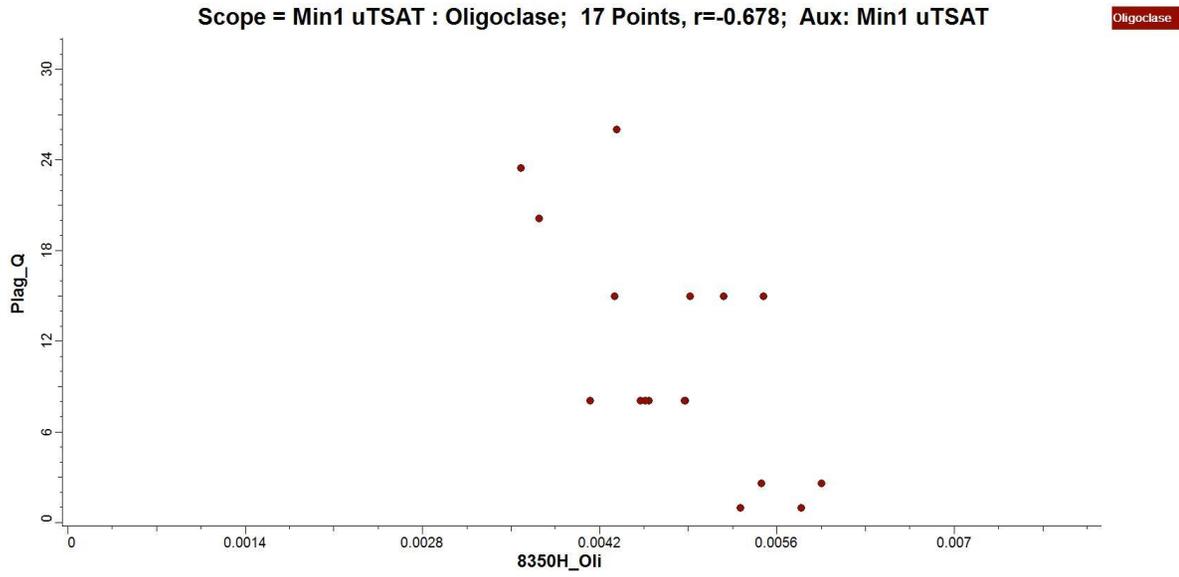


Figura 7.98 Comparación escalar 8350H

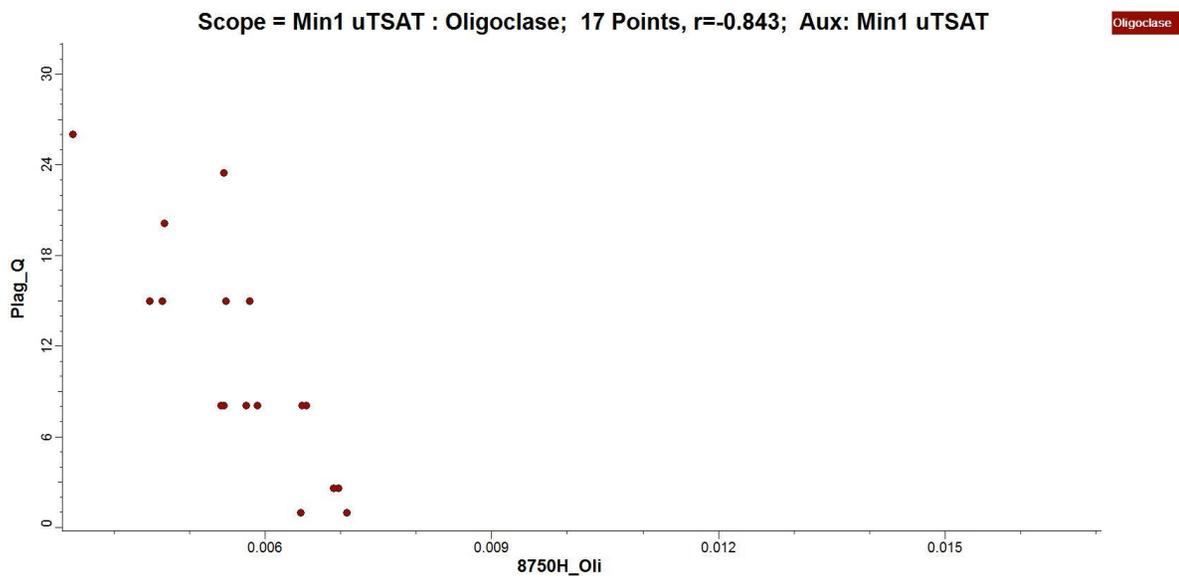


Figura 7.99 Comparación escalar 8750H

Scope = Min1 uTSAT : Oligoclase; 17 Points,  $r=-0.552$ ; Aux: Min1 uTSAT

Oligoclase

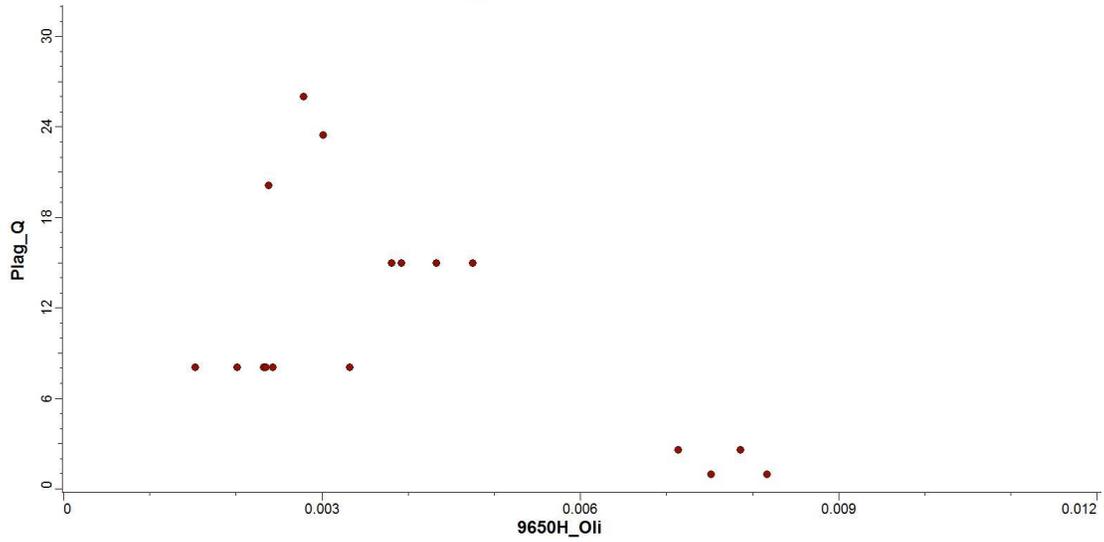


Figura 7.100 Comparación escalar 9650H

Scope = Min1 uTSAT : Oligoclase; 17 Points,  $r=-0.202$ ; Aux: Min1 uTSAT

Oligoclase

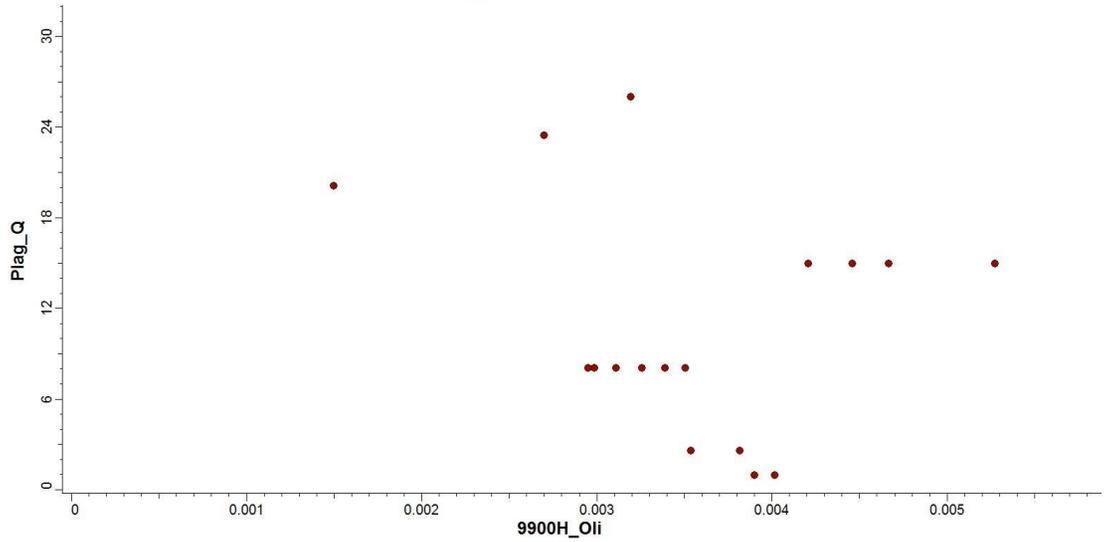


Figura 7.101 Comparación escalar 9900H

- Yeso

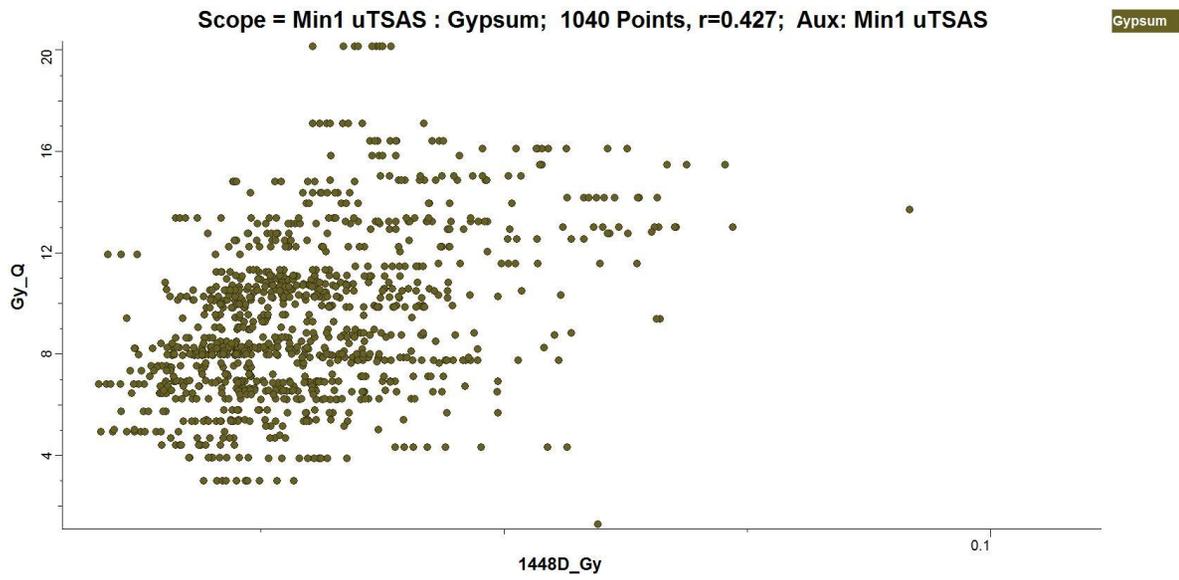


Figura 7.102 Comparación escalar 1448D

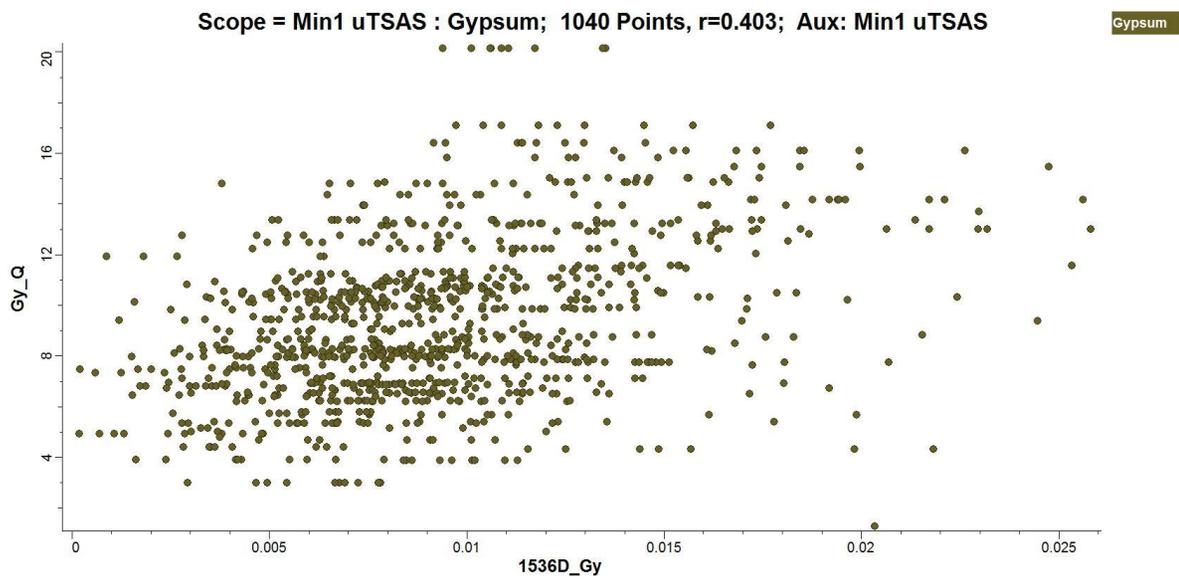
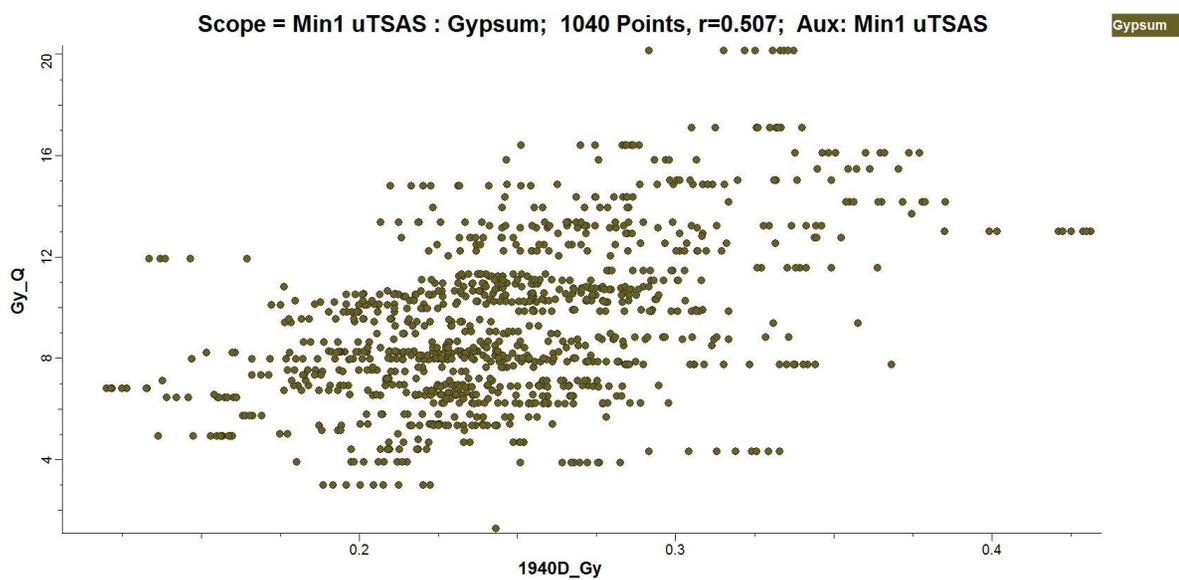
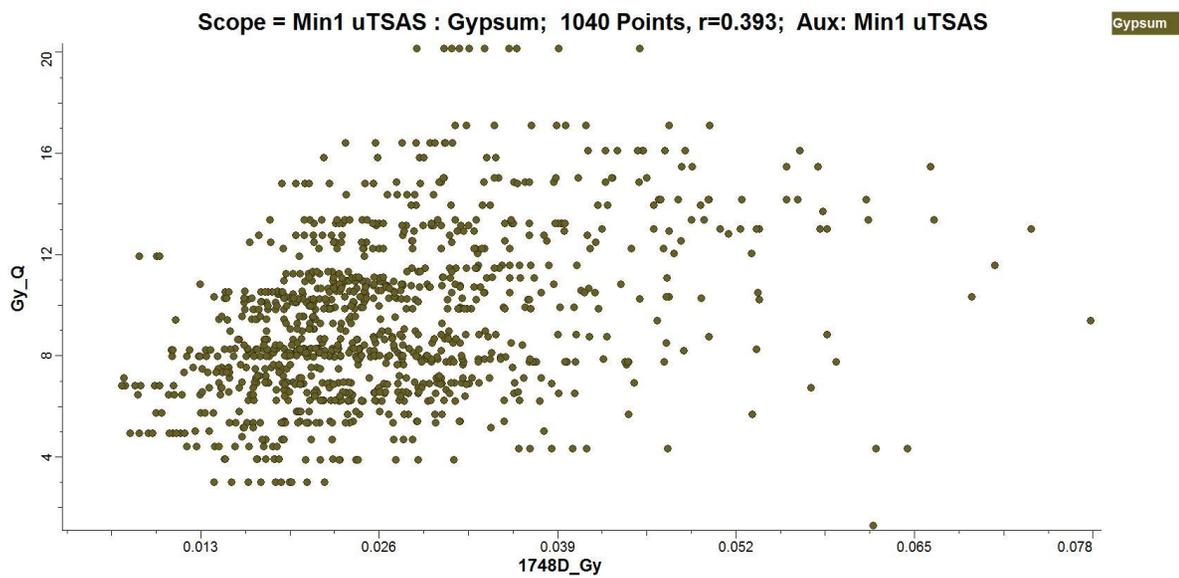


Figura 7.103 Comparación escalar 1536D



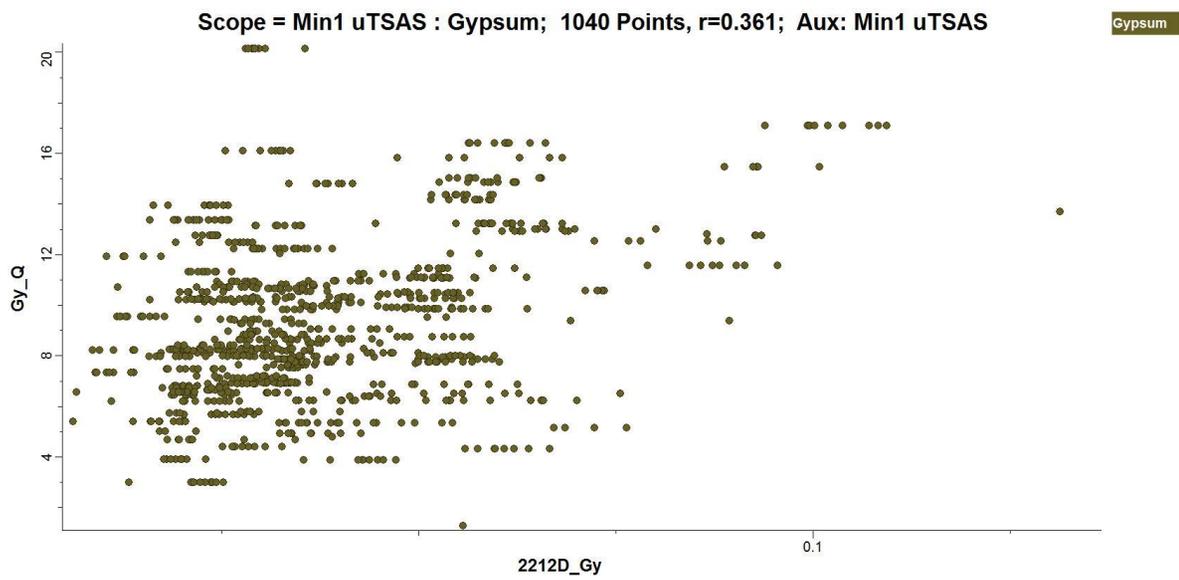


Figura 7.106 Comparación escalar 2212D

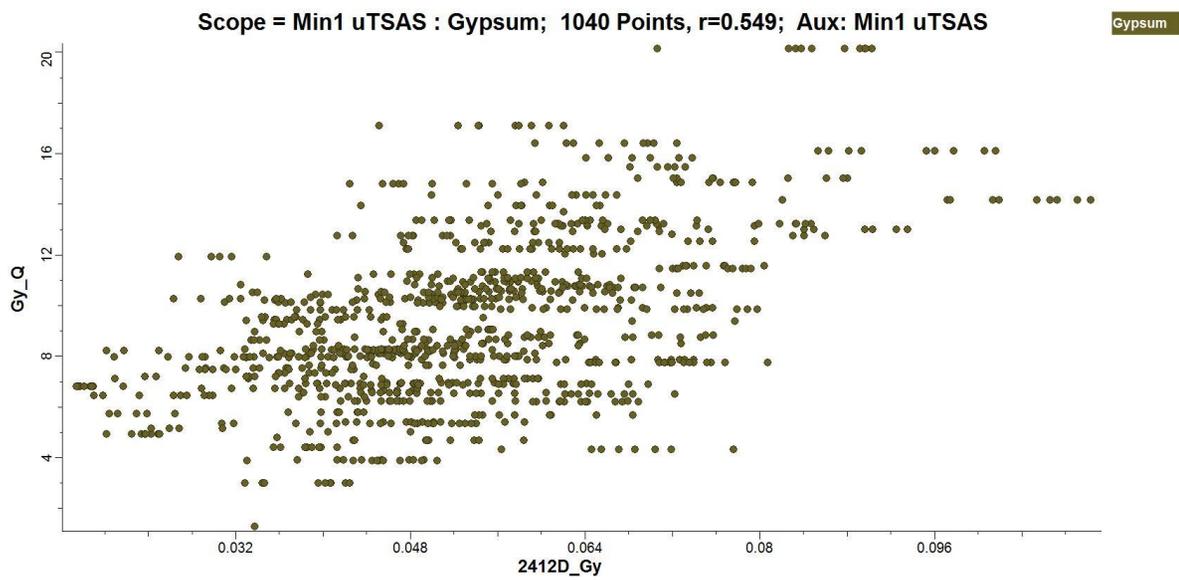


Figura 7.107 Comparación escalar 2412D

# ANEXO D: ESCALAR REPRESENTATIVO CON ANÁLISIS QEMSCAN

- Albita

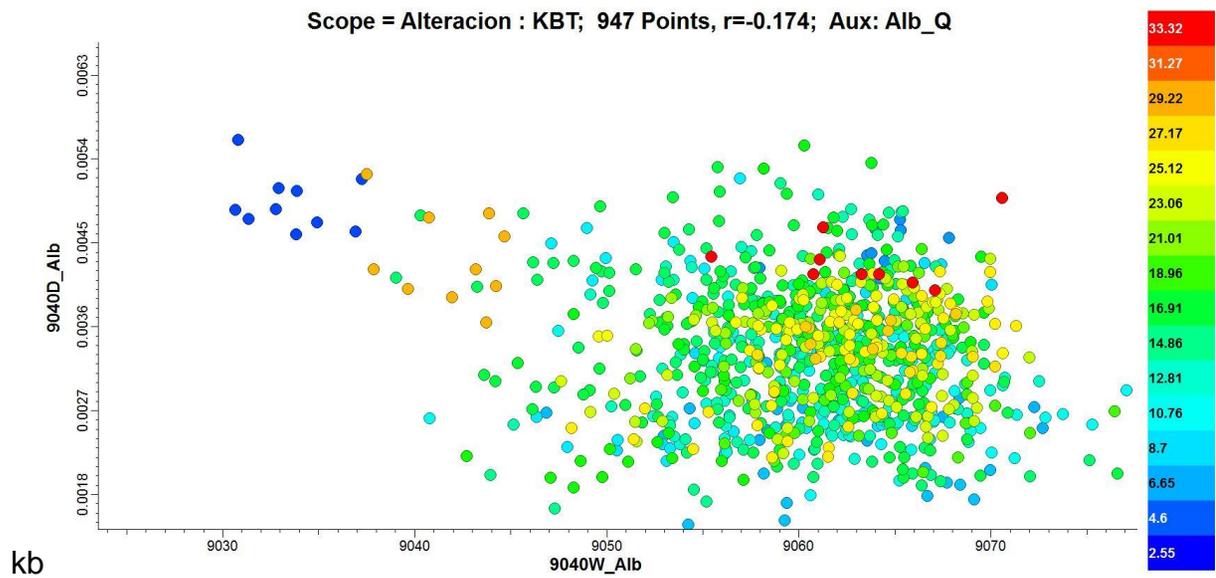


Figura 7.108 Escalar de albita en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN

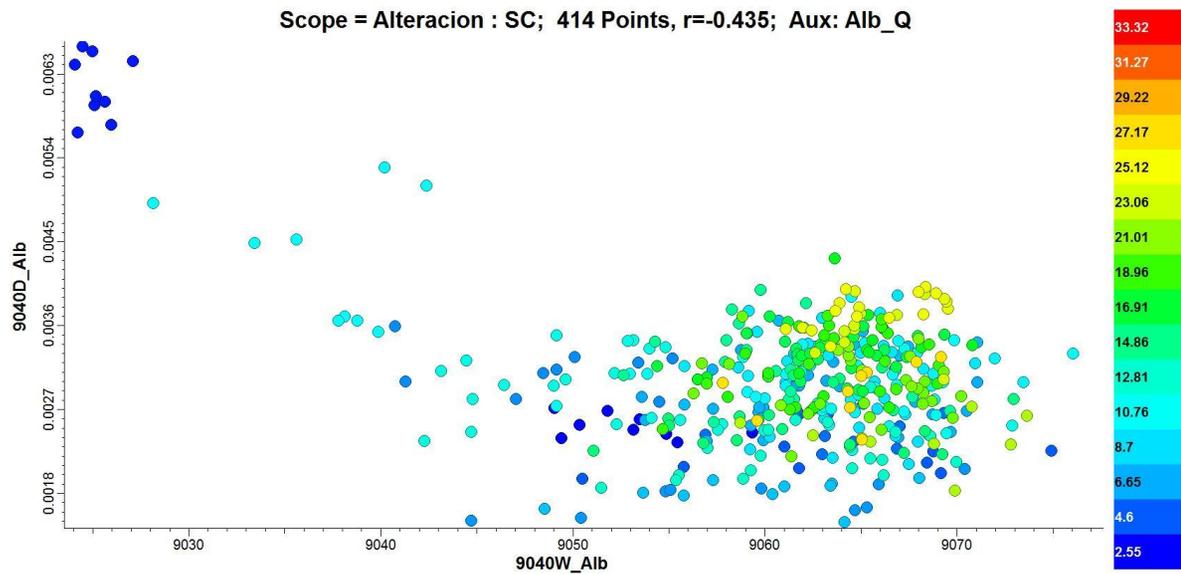


Figura 7.109 Escalar de albita en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN

- Anortoclasa

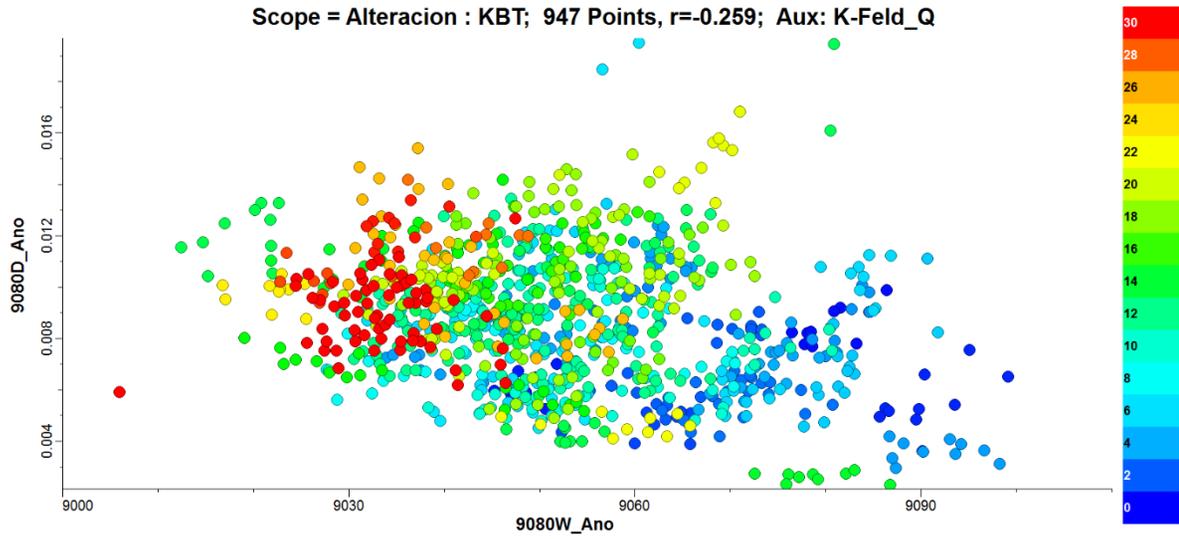


Figura 7.110 Escalar de anortoclasa en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN

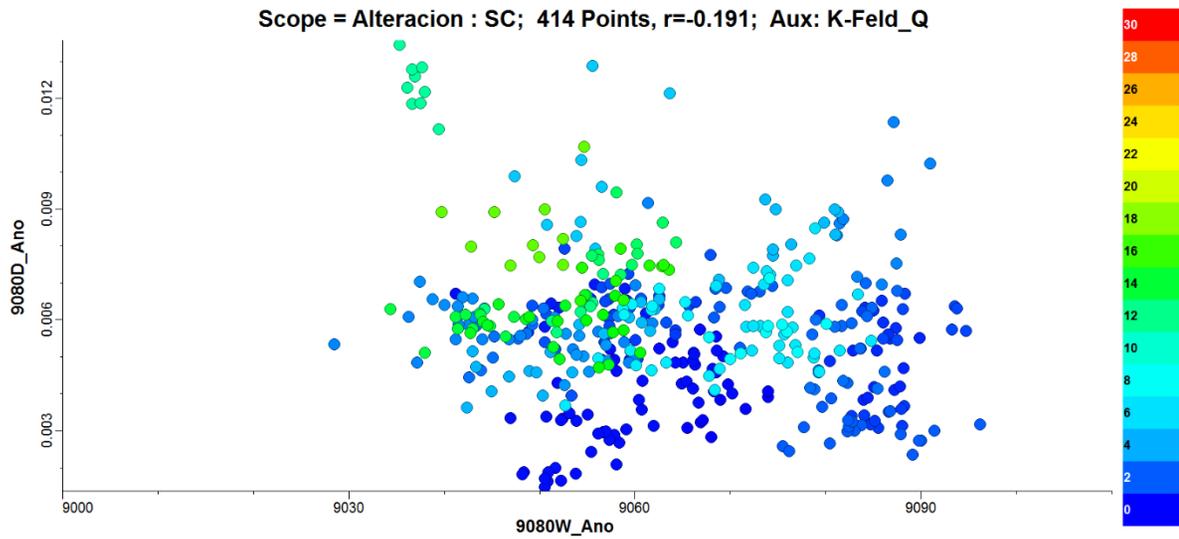


Figura 7.111 Escalar de anortoclasa en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN

- Caolinita

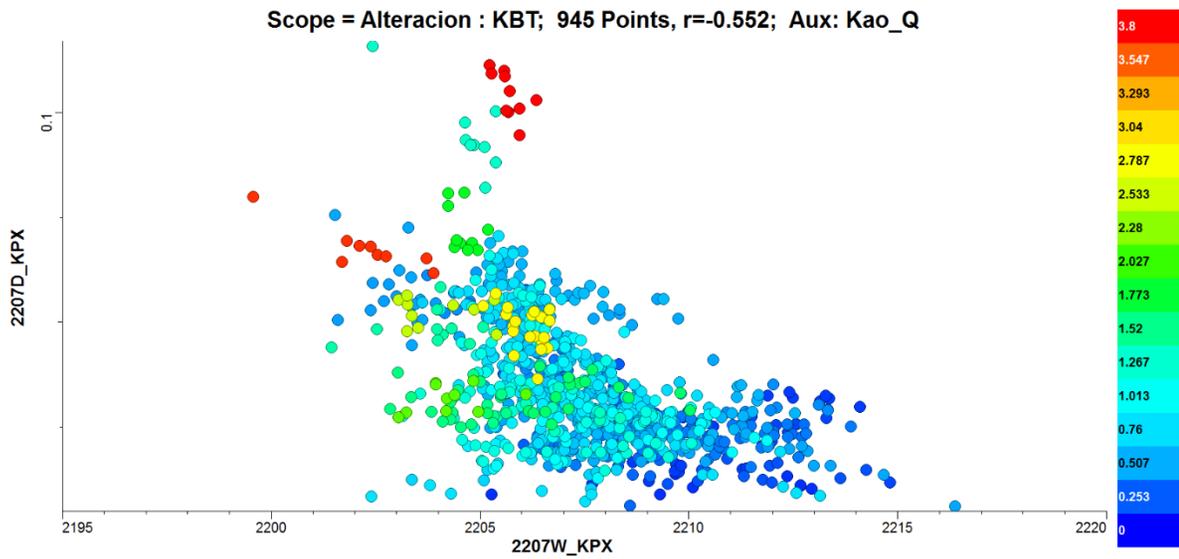


Figura 7.112 Escalar de caolinita en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN

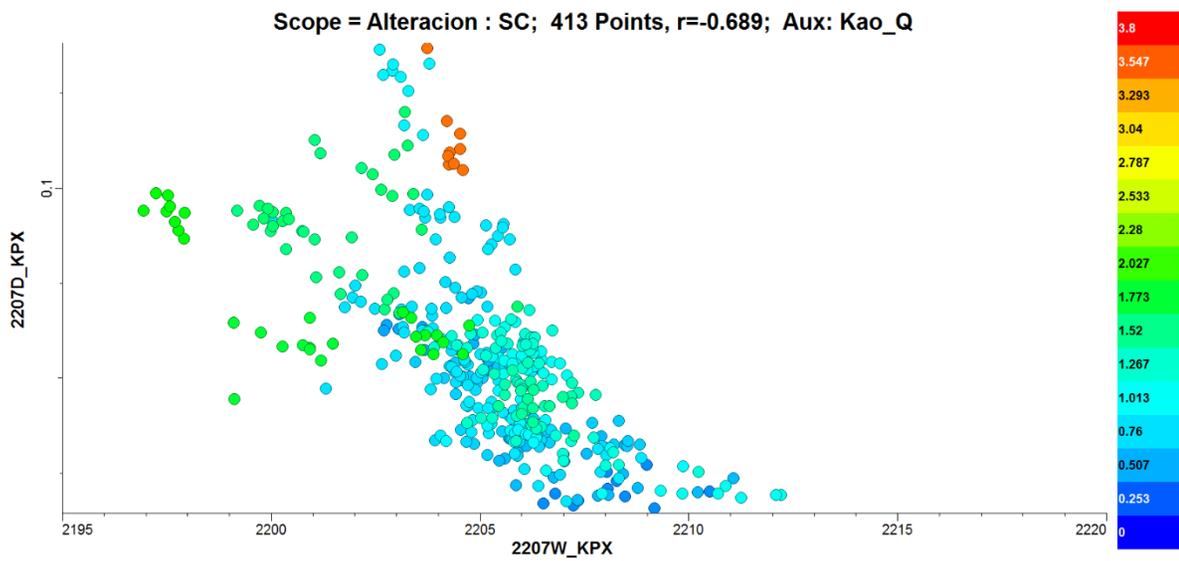


Figura 7.113 Escalar de caolinita en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN

- Cuarzo

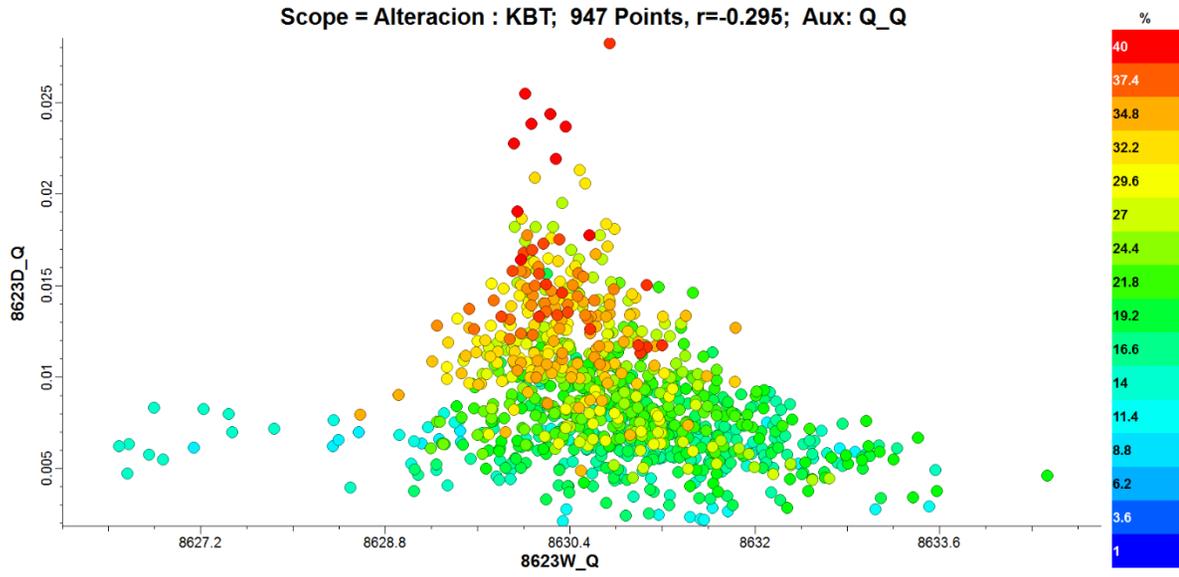


Figura 7.114 Escalar de cuarzo en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN

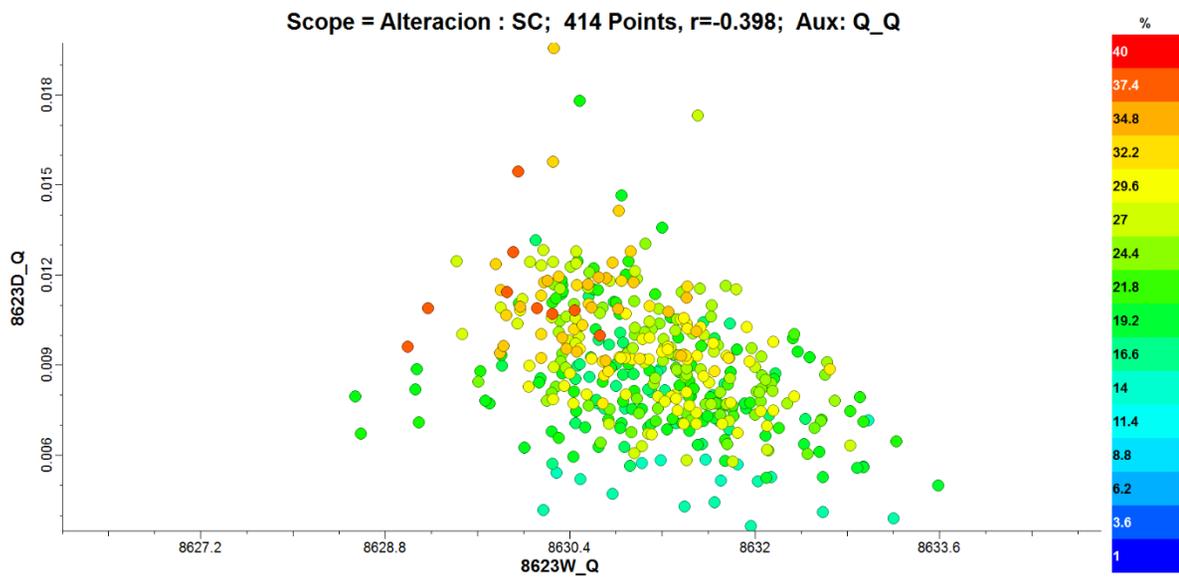


Figura 7.115 Escalar de cuarzo en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN

- Labradorita

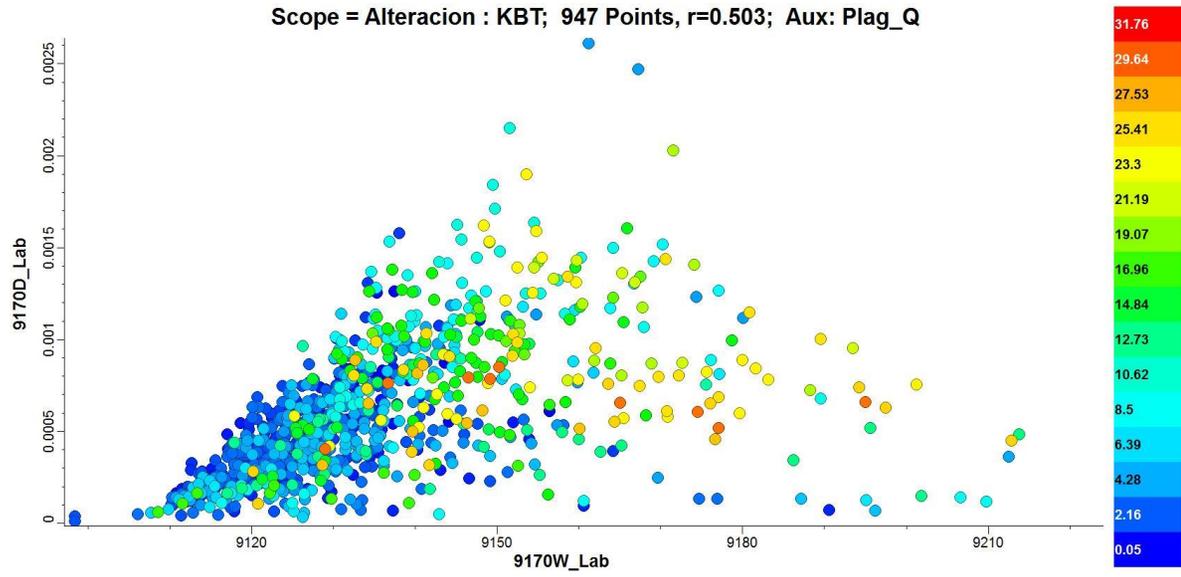


Figura 7.116 Escalar de labradorita en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN

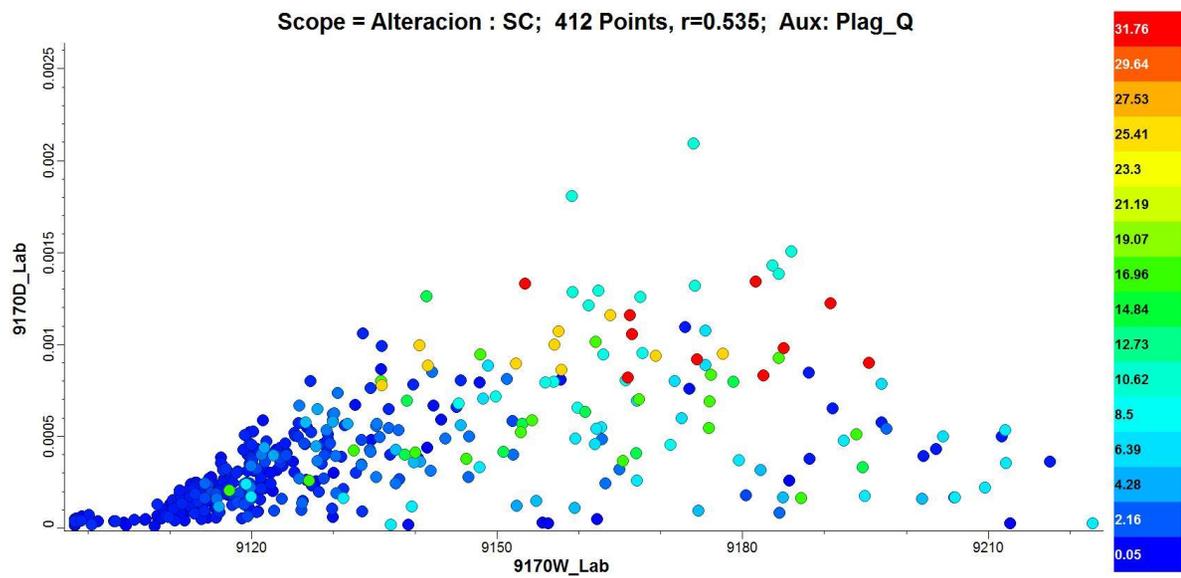


Figura 7.117 Escalar de labradorita en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN

- Micas Blancas

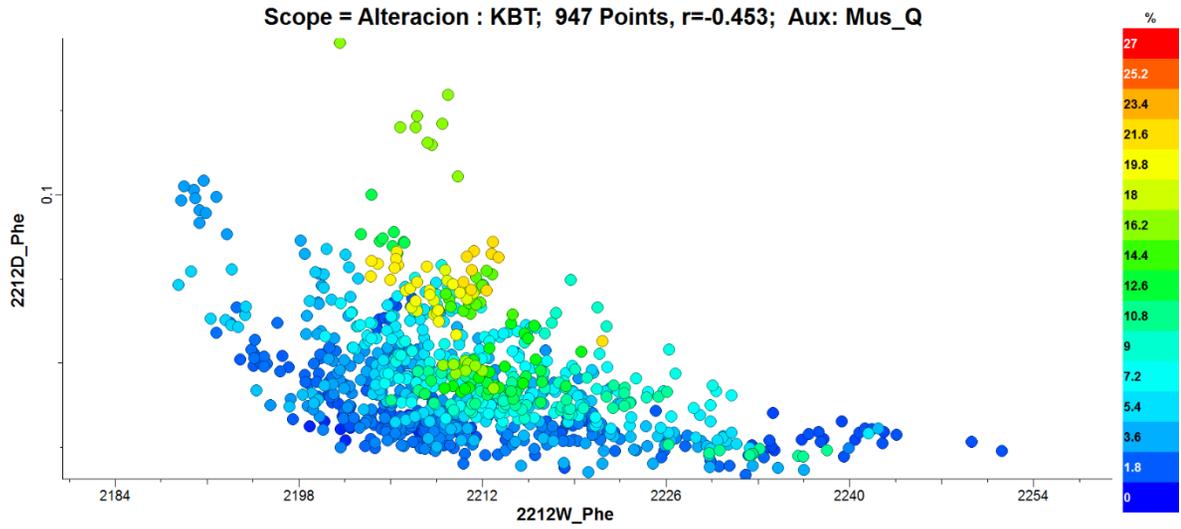


Figura 7.118 Escalar de mica blanca en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN

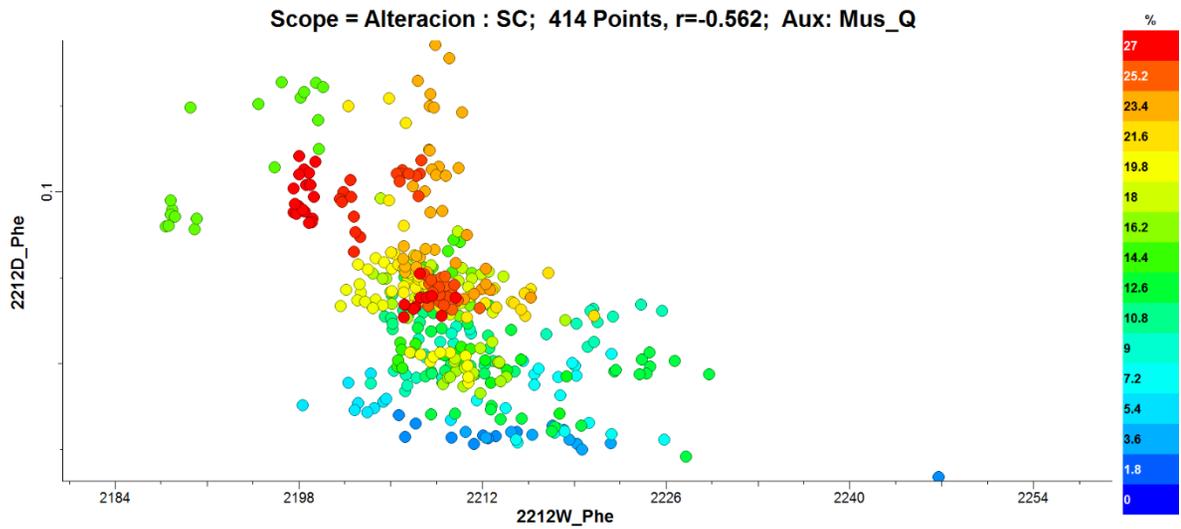


Figura 7.119 Escalar de mica blanca en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN

- Micas Negras

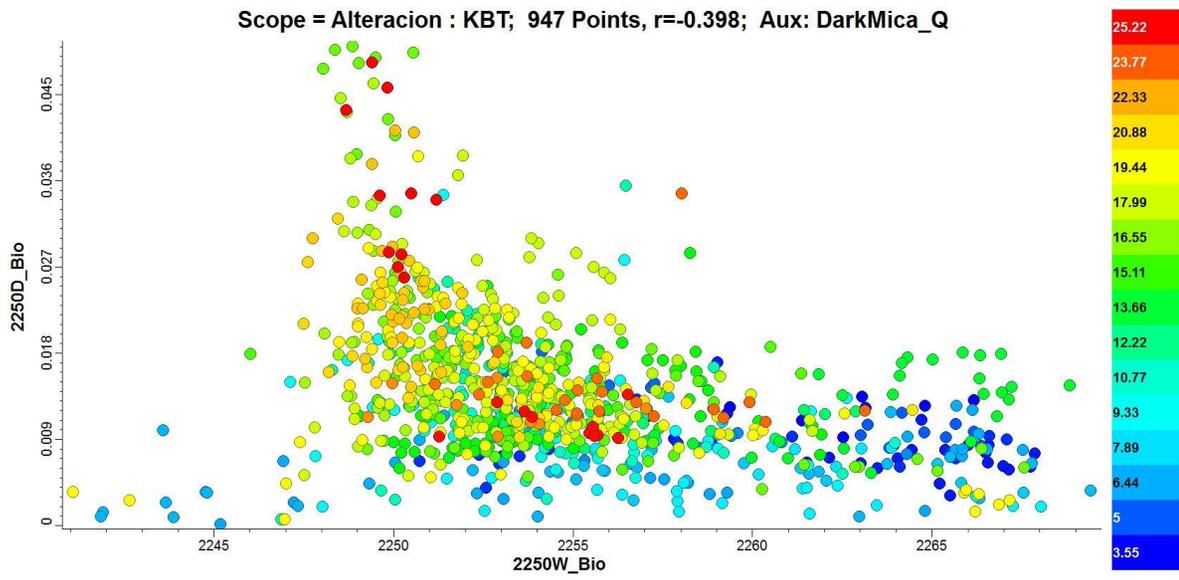


Figura 7.120 Escalar de mica negra en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN

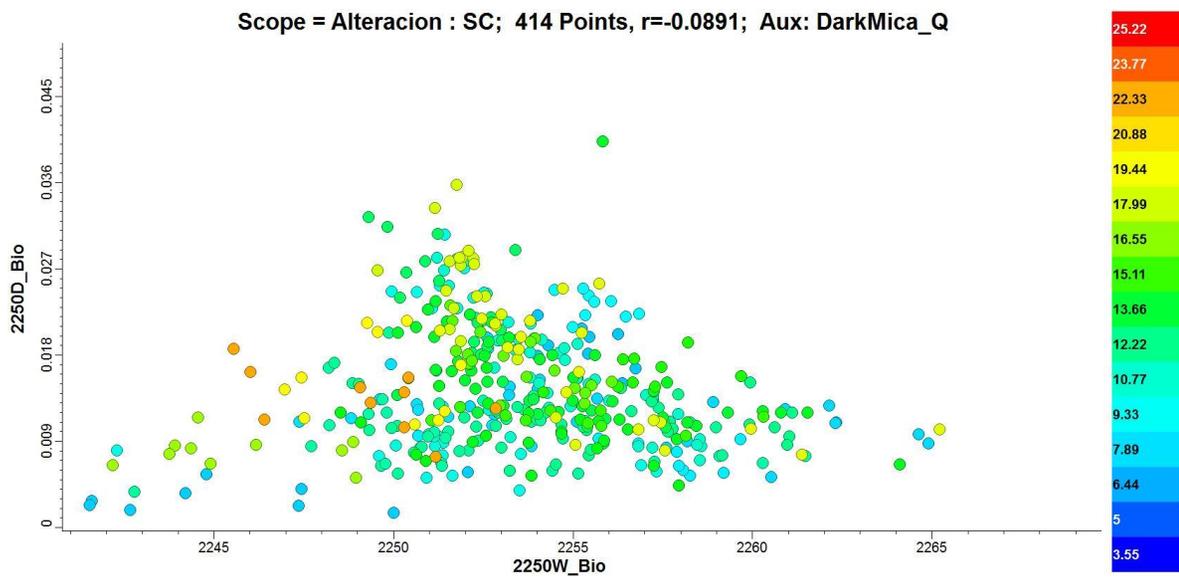


Figura 7.121 Escalar de mica negra en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN

- Montmorillonita

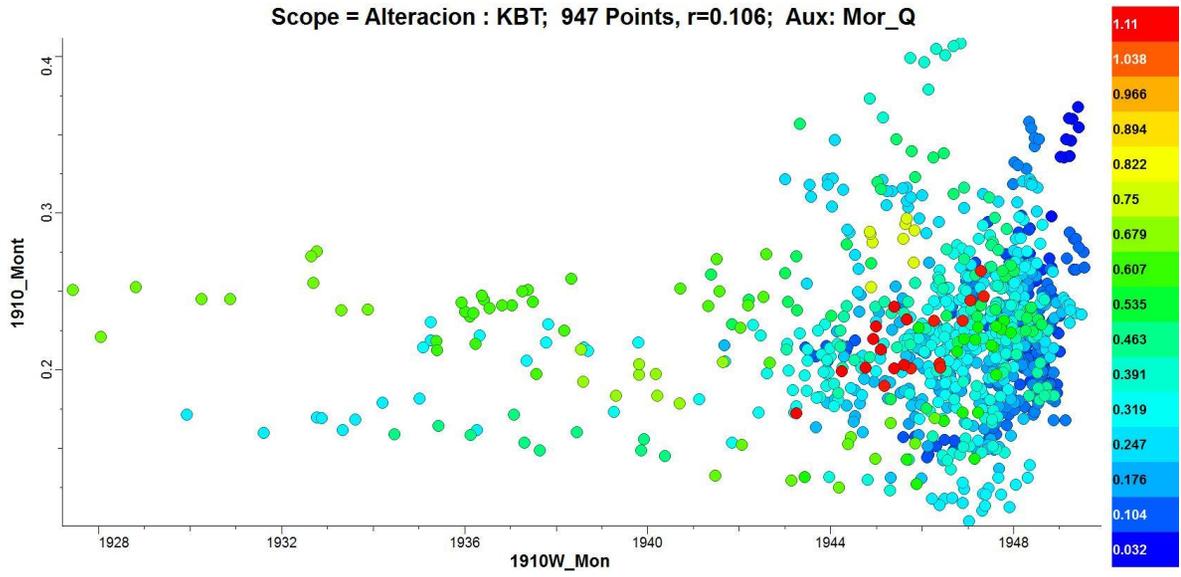


Figura 7.122 Escalar de montmorillonita en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN

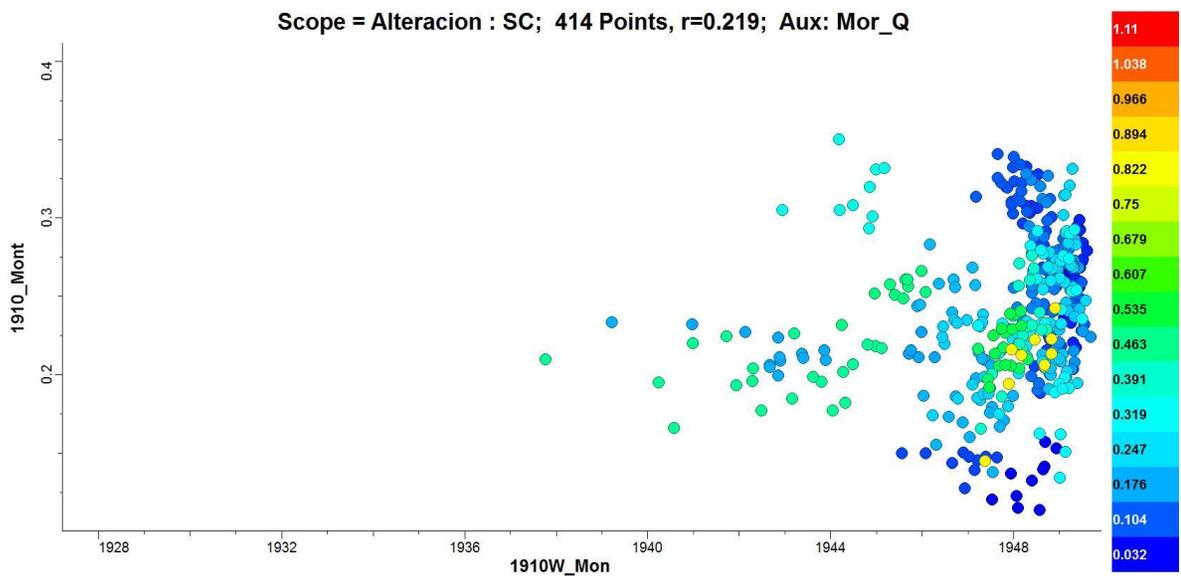


Figura 7.123 Escalar de montmorillonita en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN

- Oligoclasa

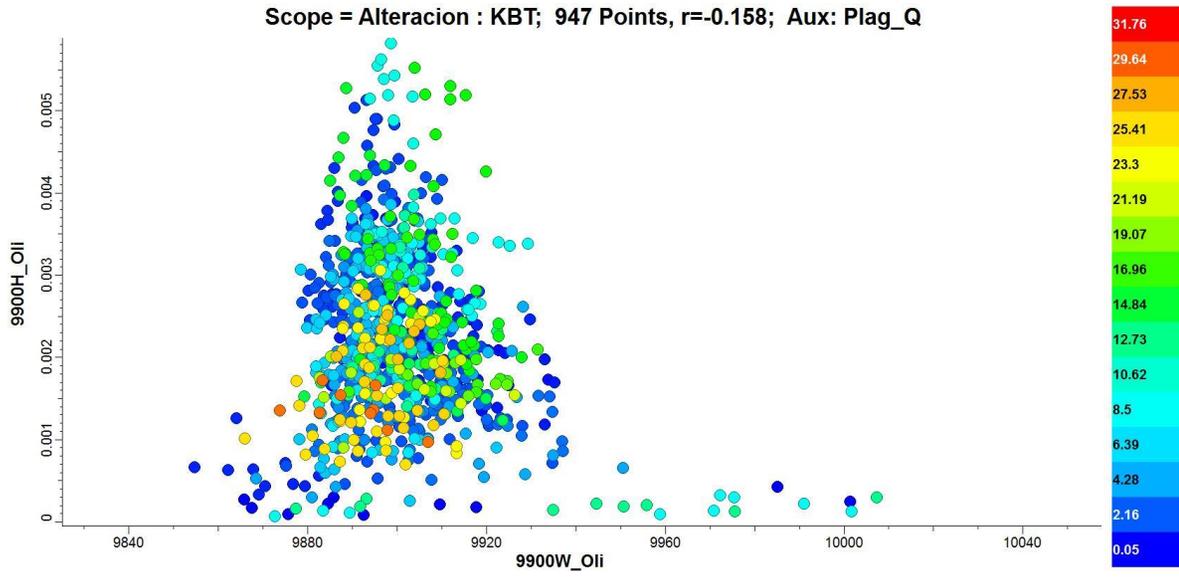


Figura 7.124 Escalar de oligoclasa en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN

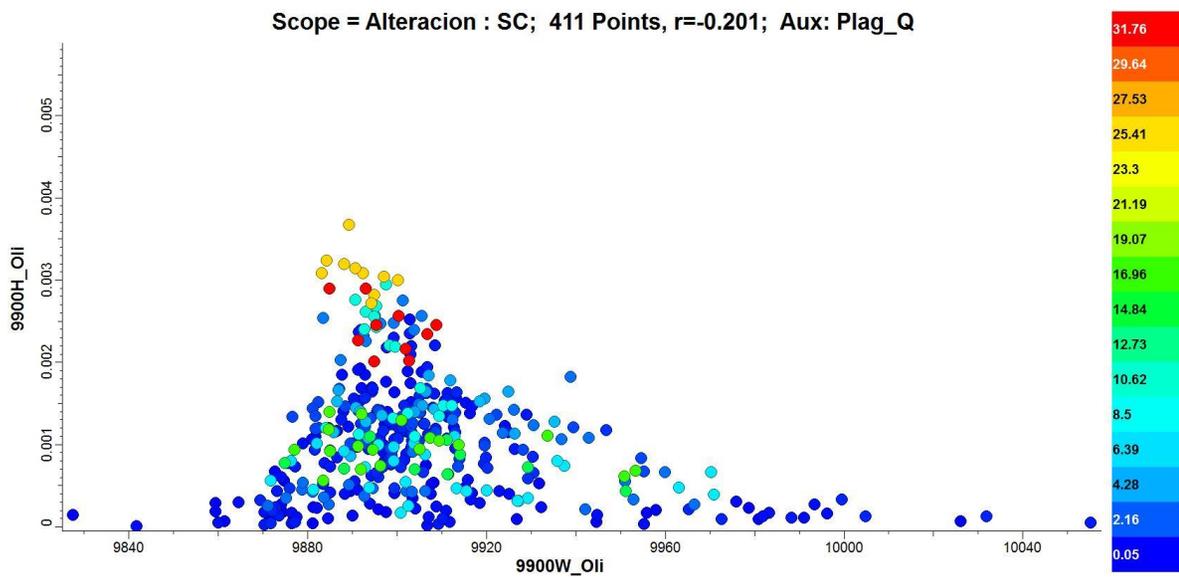


Figura 7.125 Escalar de oligoclasa en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN

- Yeso

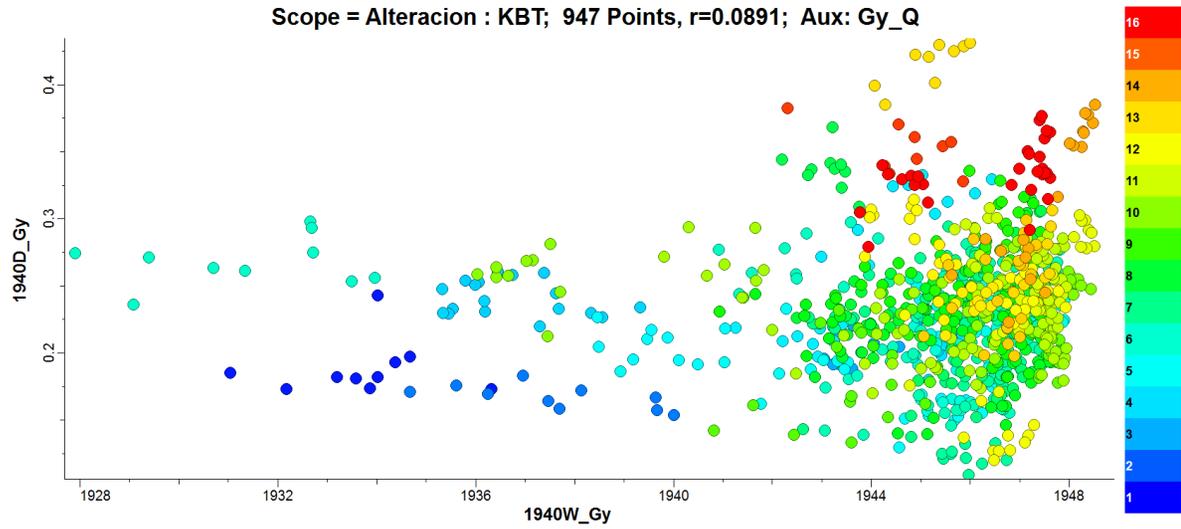


Figura 7.126 Escalar de yeso en alteración KBT, en color concentración del mineral según QEMSCAN

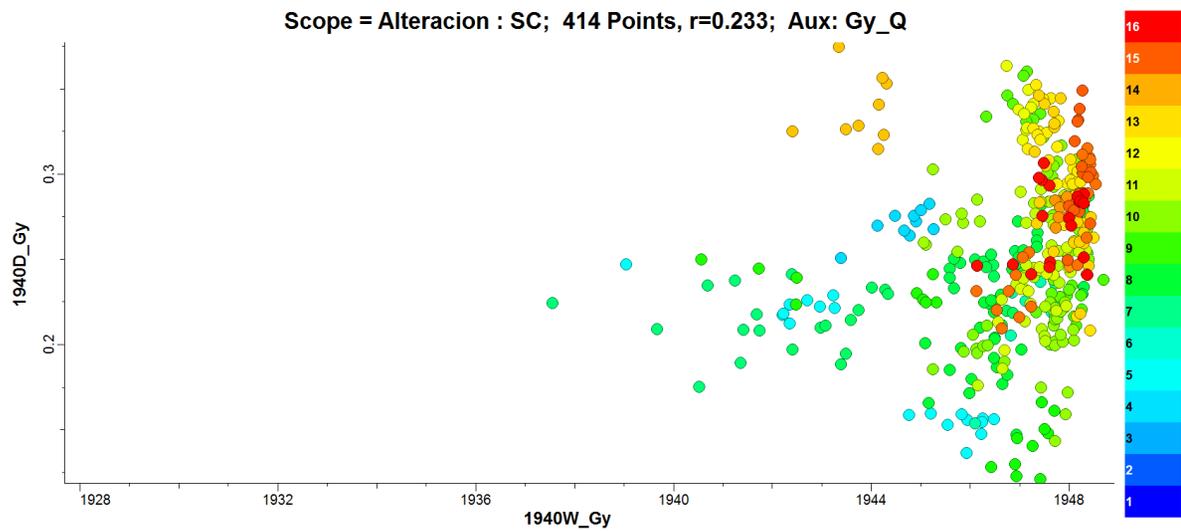


Figura 7.127 Escalar de yeso en alteración SC, en color concentración del mineral según QEMSCAN

## ANEXO E: ESCALAR REPRESENTATIVO CON LEY DE MOLIBDENO

- Albita

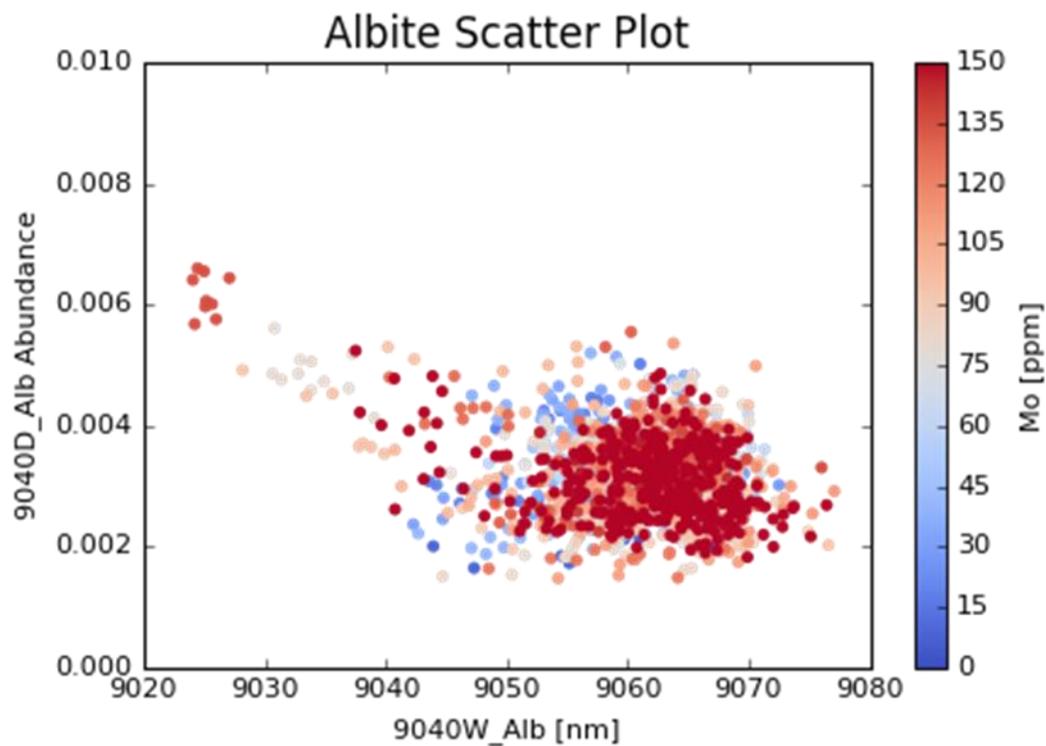


Figura 7.128 Escalares de albita, en color concentración de Molibdeno

- Anortoclasa

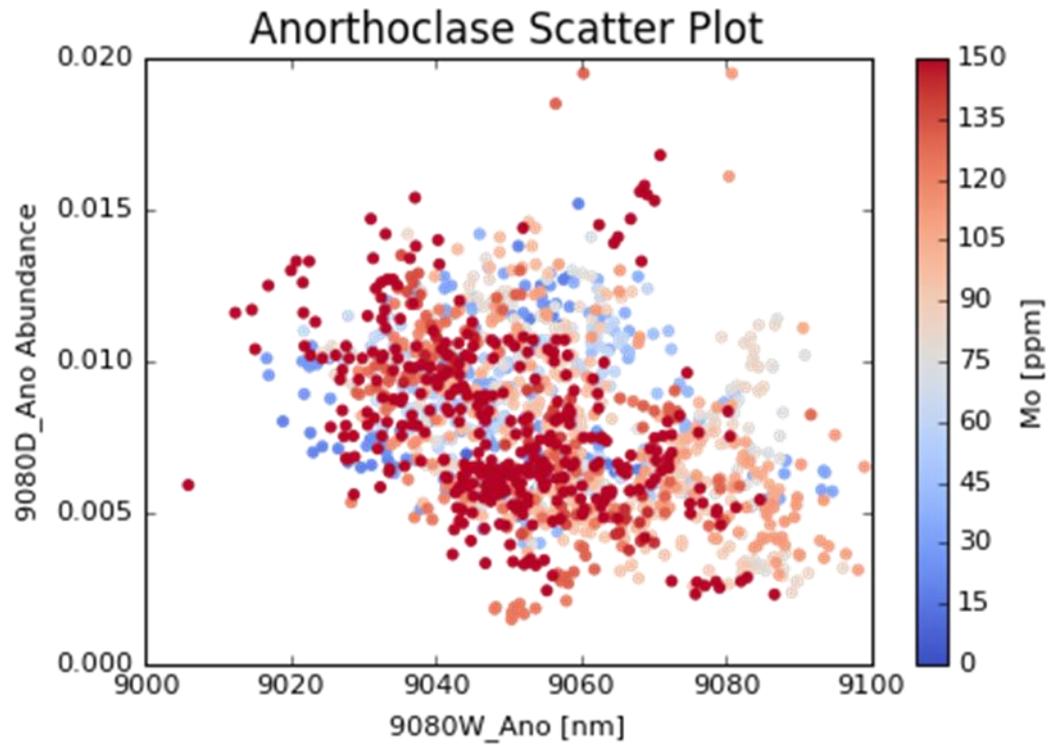


Figura 7.129 Escalares de anortoclasa, en color concentración de Molibdeno

- Caolinita

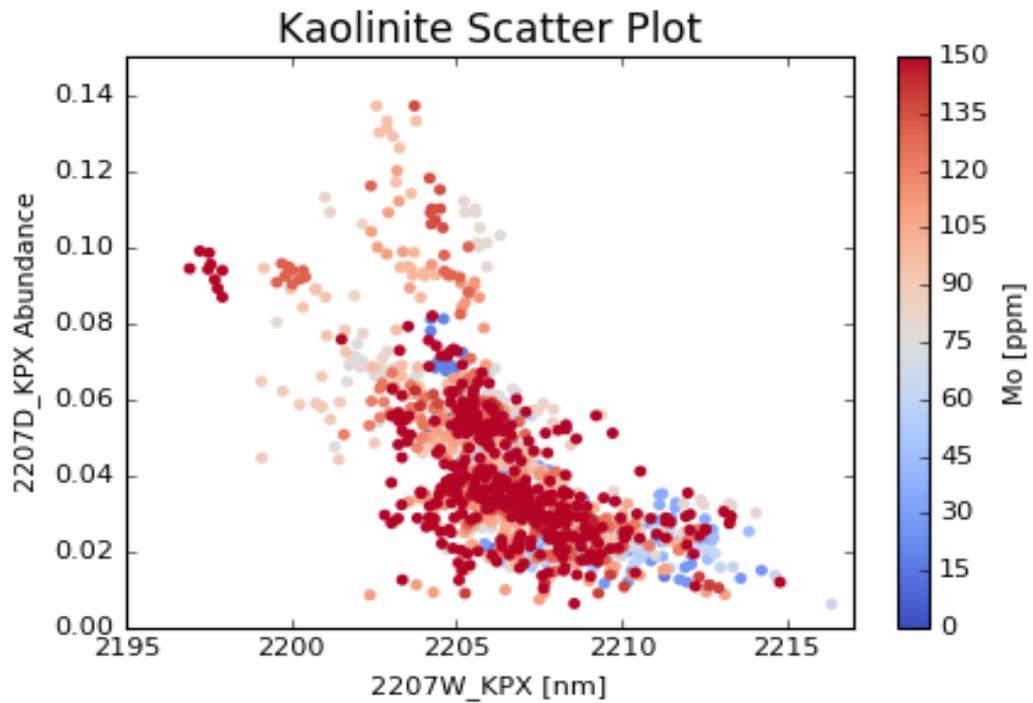


Figura 7.130 Escalares de caolinita, en color concentración de Molibdeno

- Cuarzo

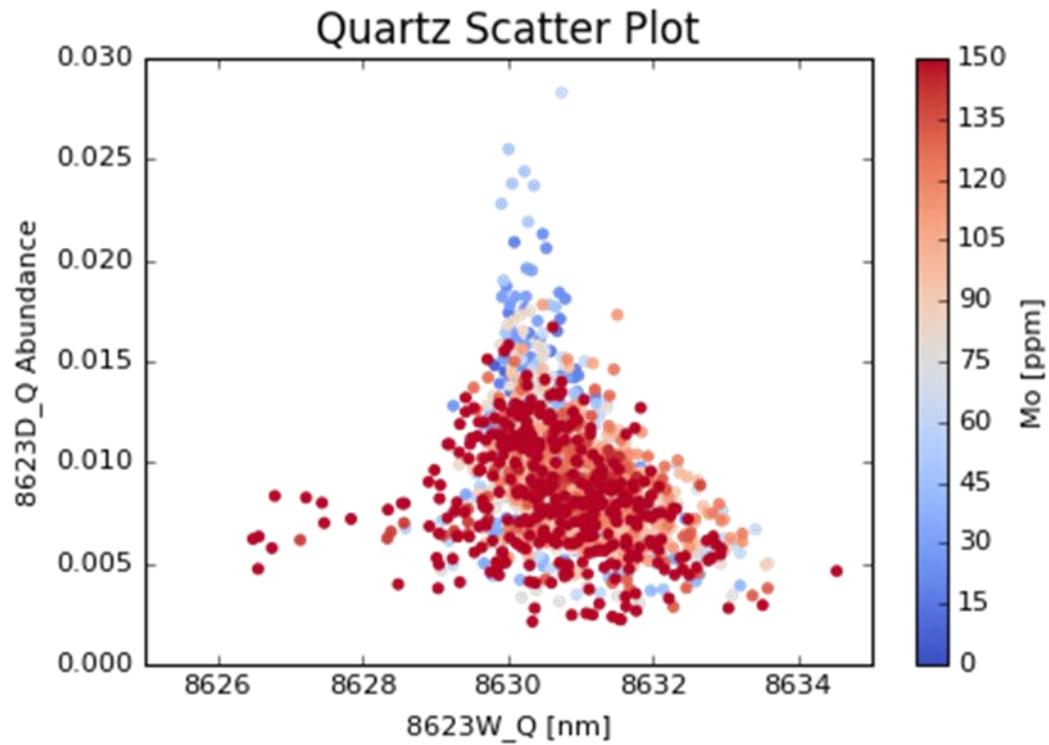


Figura 7.131 Escalares de cuarzo, en color concentración de Molibdeno

- Labradorita

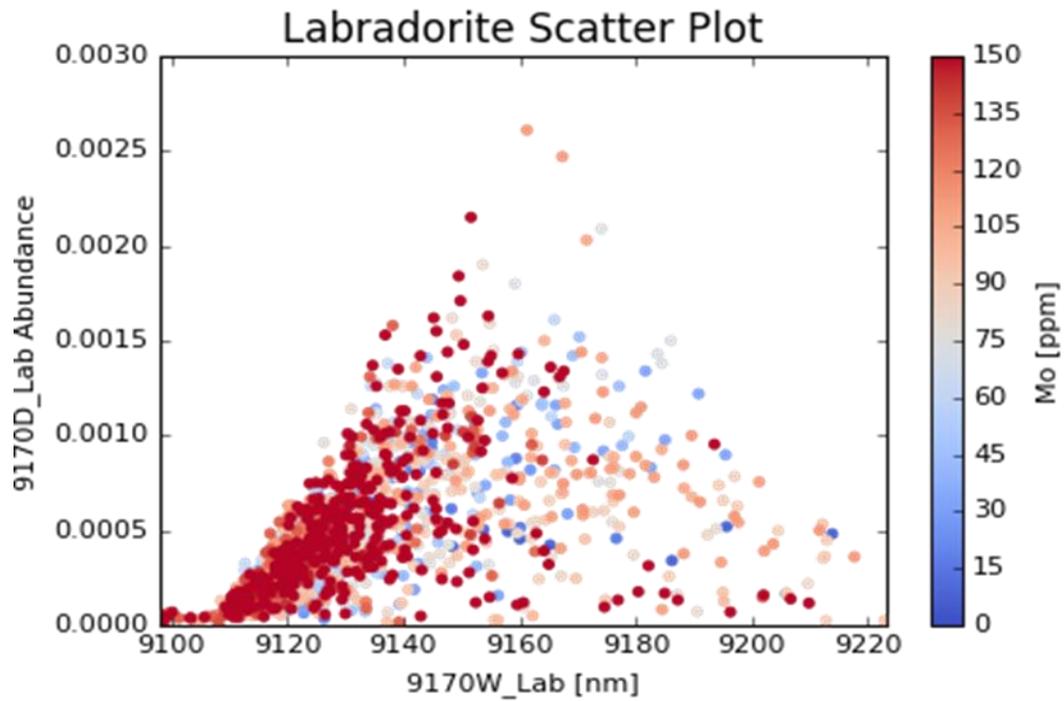


Figura 7.132 Escalares de labradorita, en color concentración de Molibdeno

- Micas Blancas

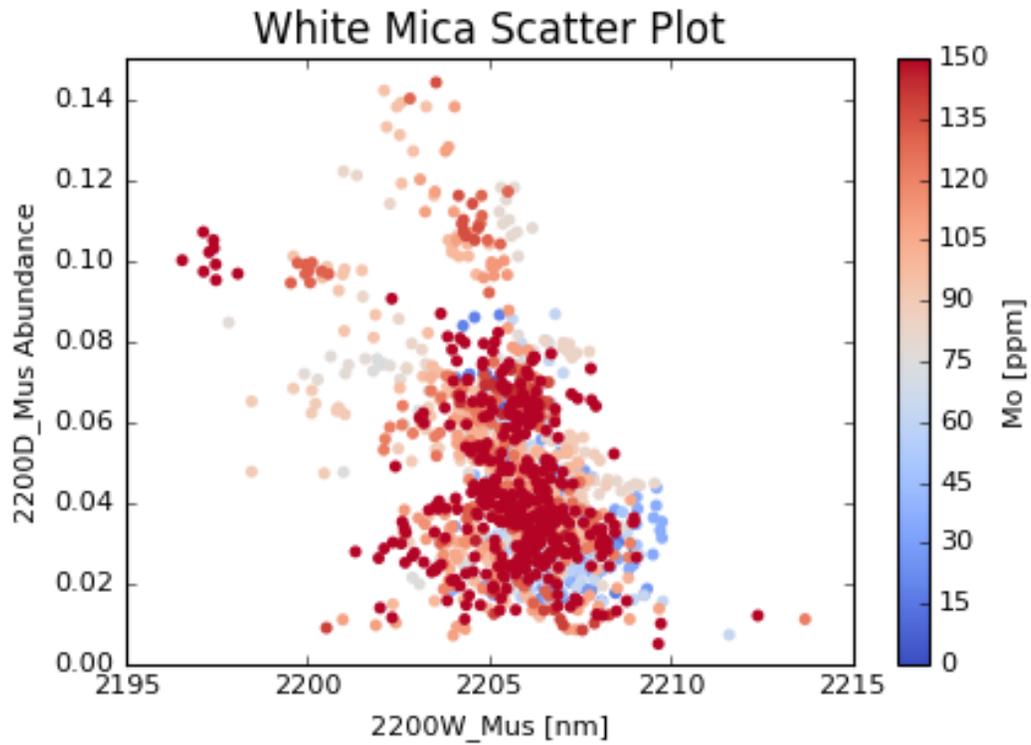


Figura 7.133 Escalares de micas blancas, en color concentración de Molibdeno

- Micas Negras

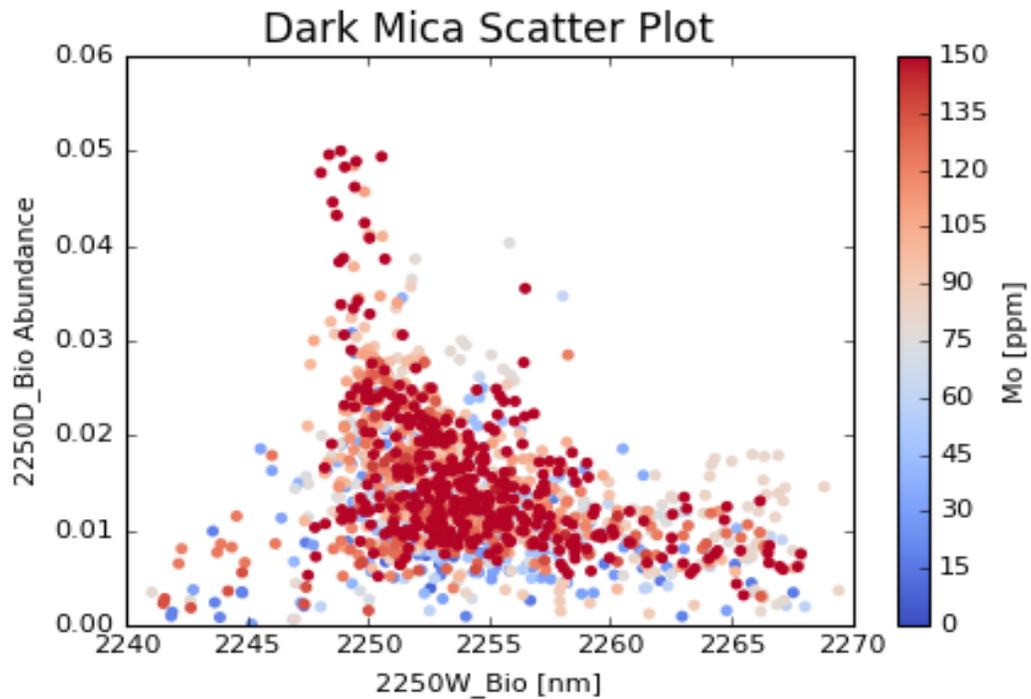


Figura 7.134 Escalares de micas negras, en color concentración de Molibdeno

- Montmorillonita

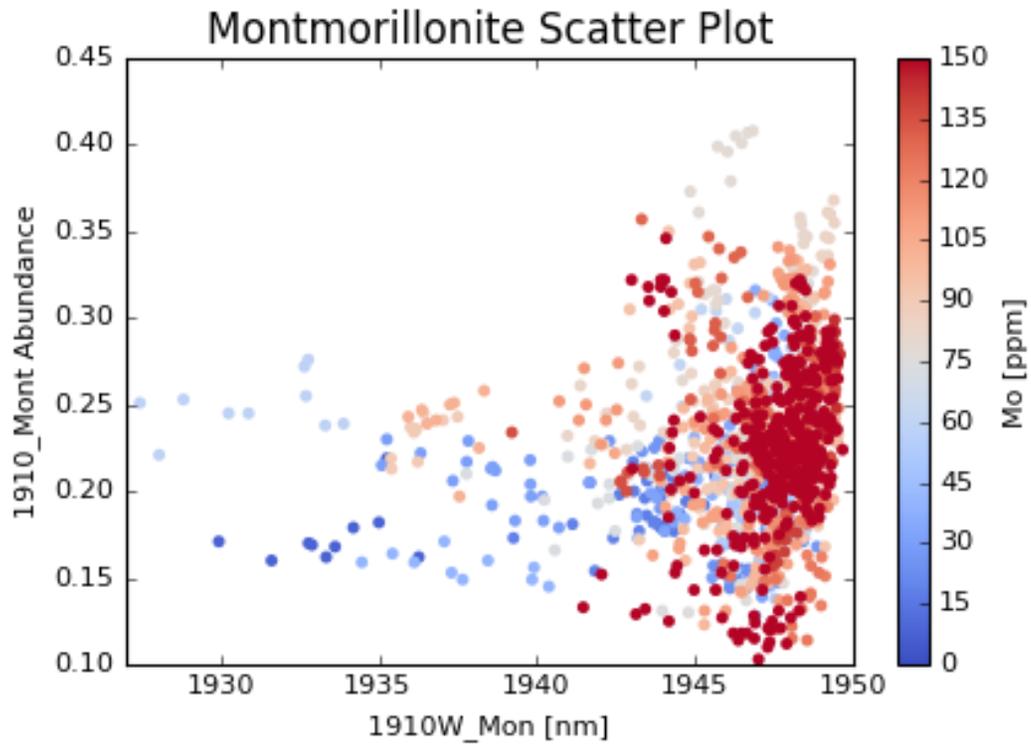


Figura 7.135 Escalares de montmorillonita, en color concentración de Molibdeno

- Oligoclase

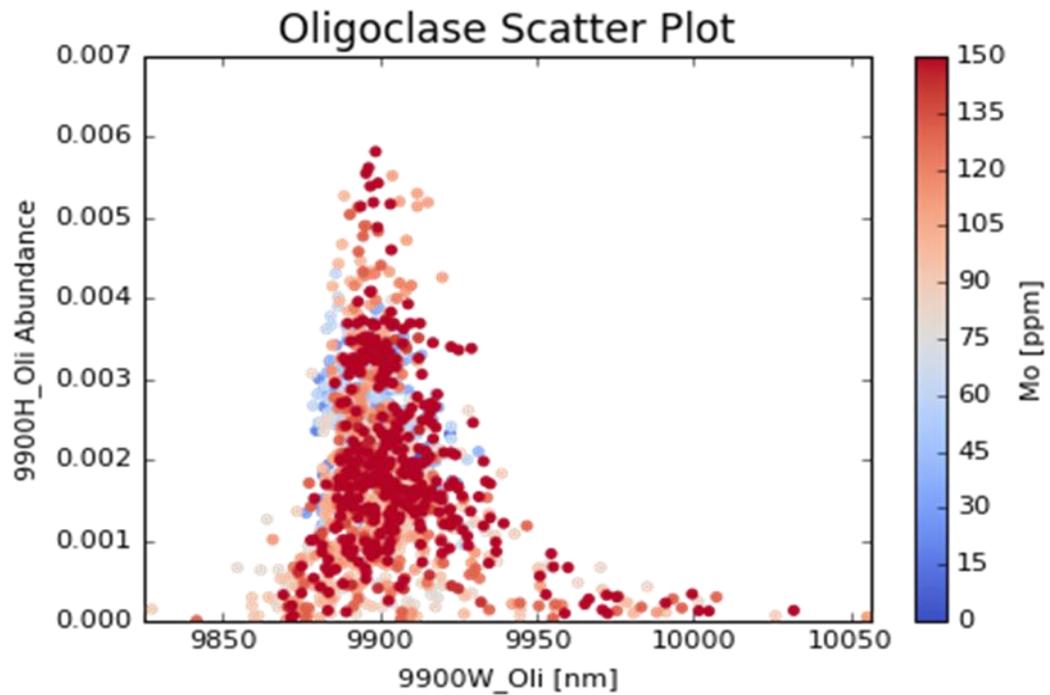


Figura 7.136 Escalares de oligoclase, en color concentración de Molibdeno

- Yeso

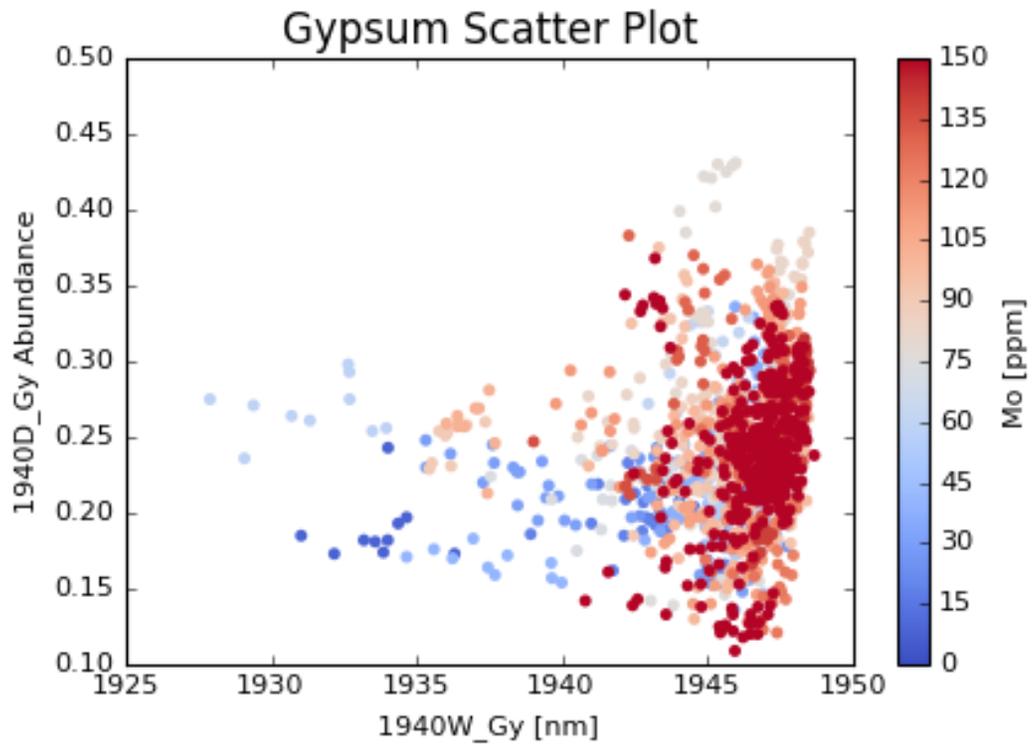


Figura 7.137 Escalares de yeso, en color concentración de Molibdeno

# ANEXO F: CURVAS DE DENSIDAD SOBRE LA LEY DE CORTE DE MOLIBDENO

- Albita

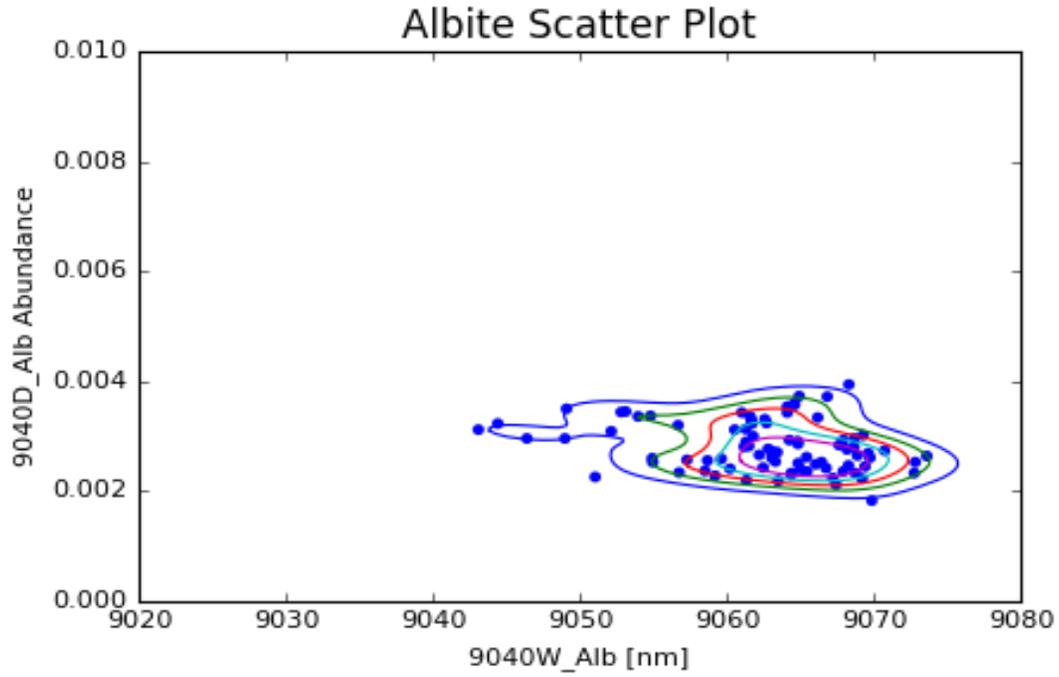


Figura 7.138 Curvas de densidad de escalares de albita para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno

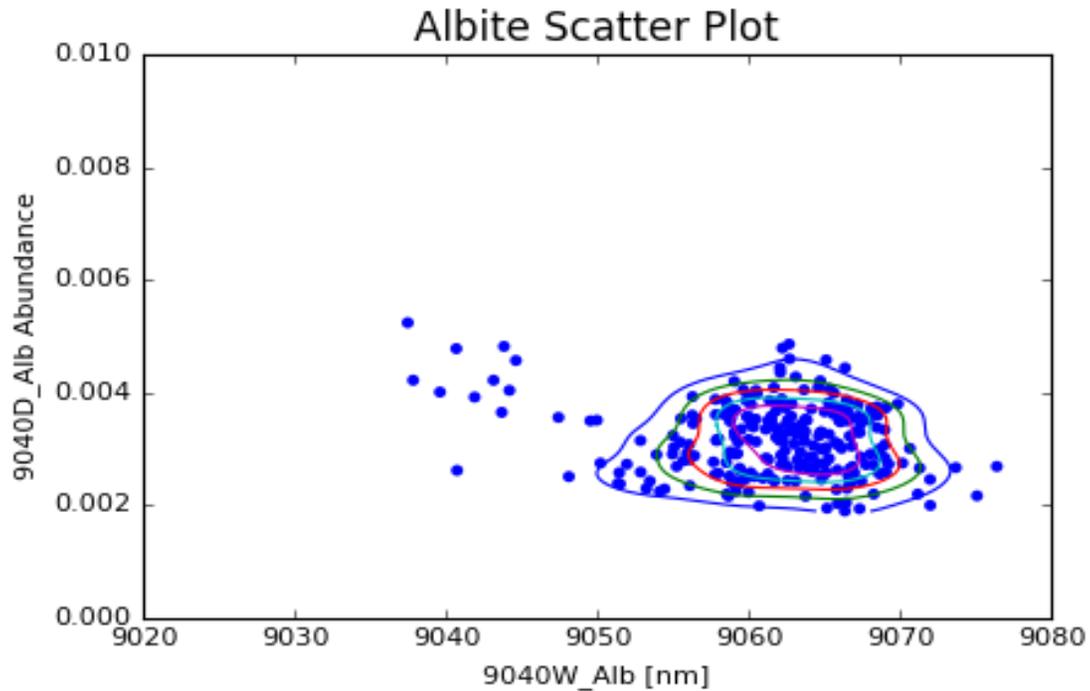


Figura 7.139 Curvas de densidad de escalares de albita para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno

- Anortoclasa

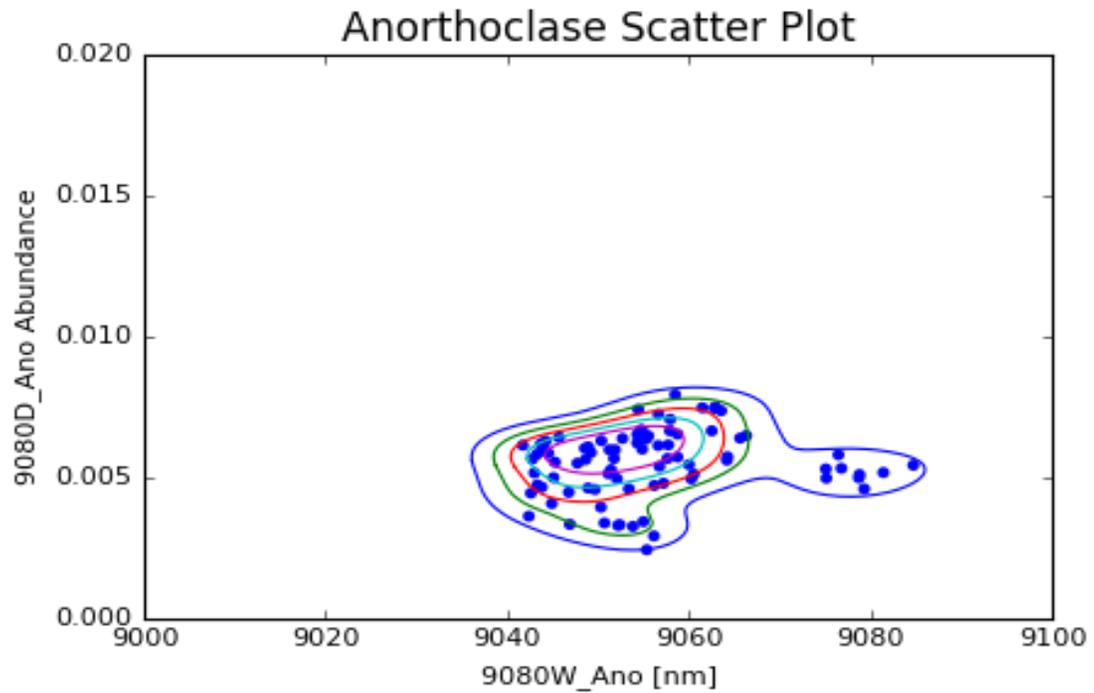


Figura 7.140 Curvas de densidad de escalares de anortoclasa para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno

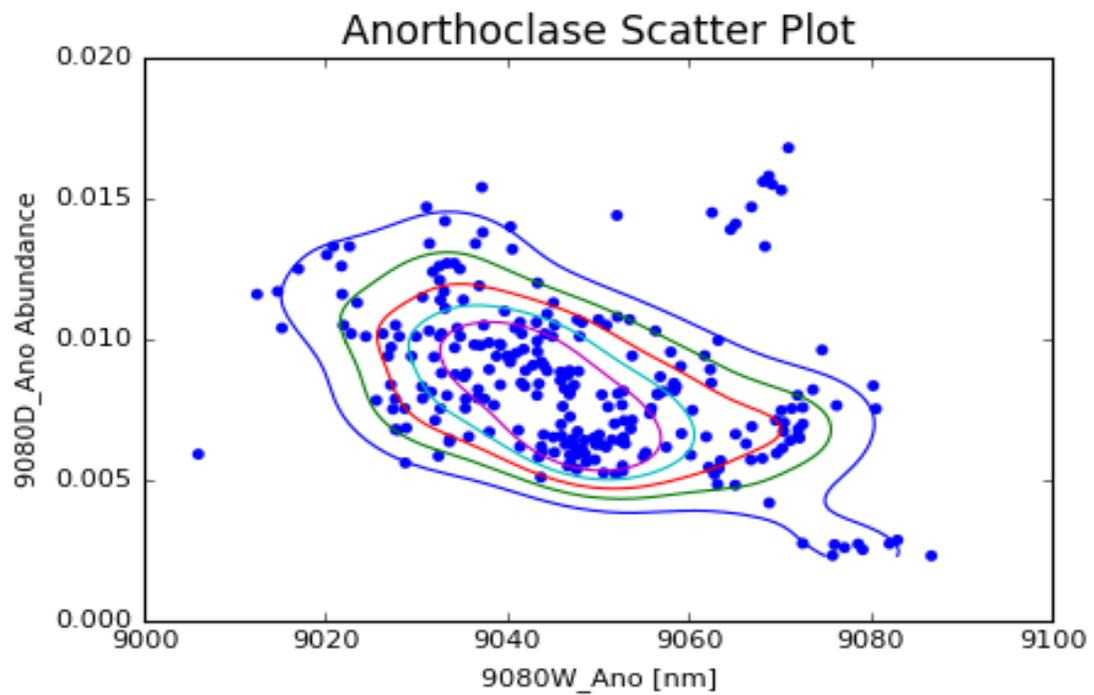


Figura 7.141 Curvas de densidad de escalares de anortoclasa para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno

- Caolinita

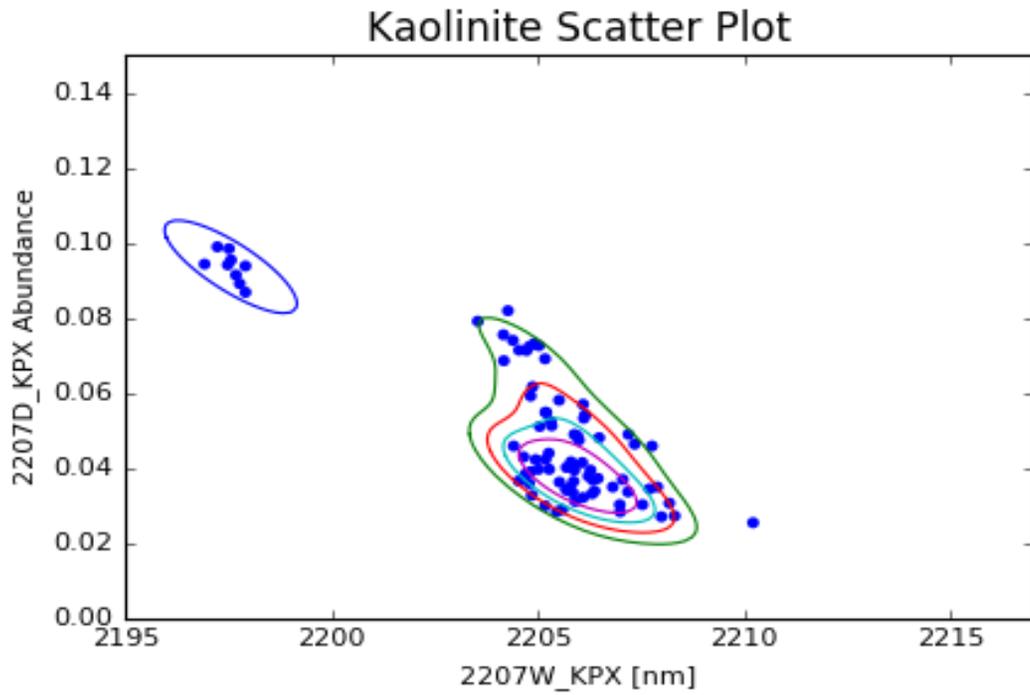


Figura 7.142 Curvas de densidad de escalares de caolinita para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno

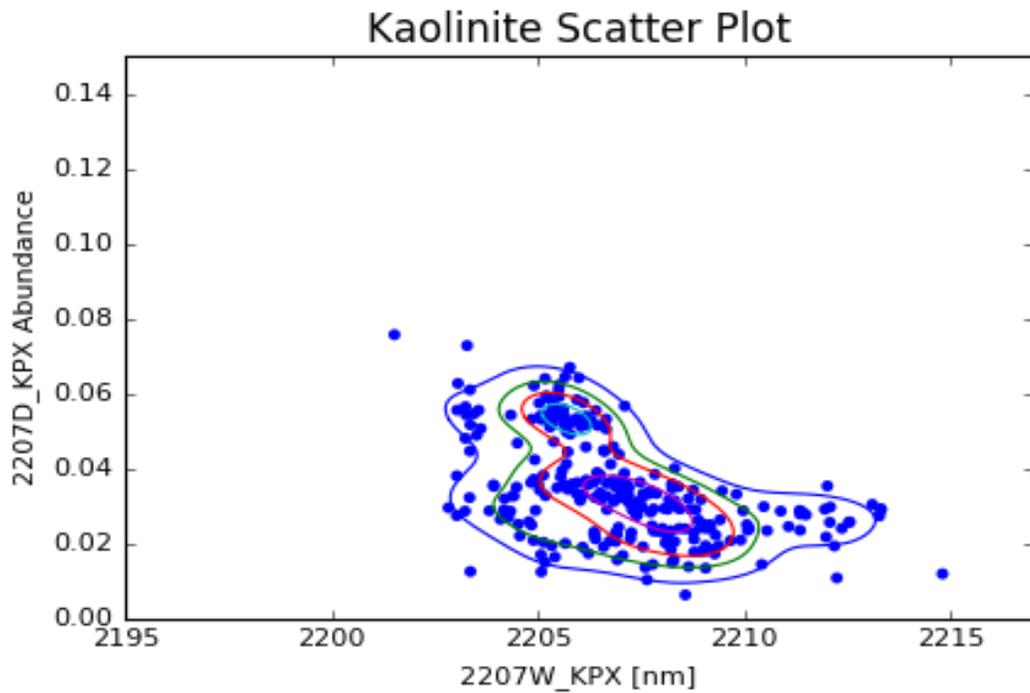


Figura 7.143 Curvas de densidad de escalares de caolinita para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno

- Cuarzo

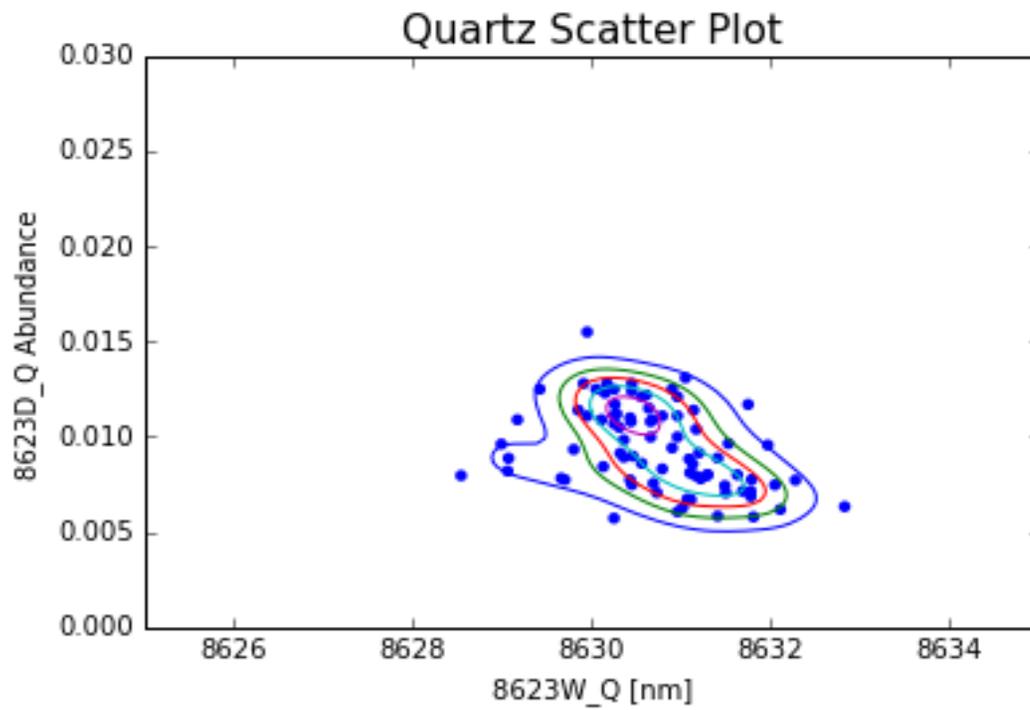


Figura 7.144 Curvas de densidad de escalares de cuarzo para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno

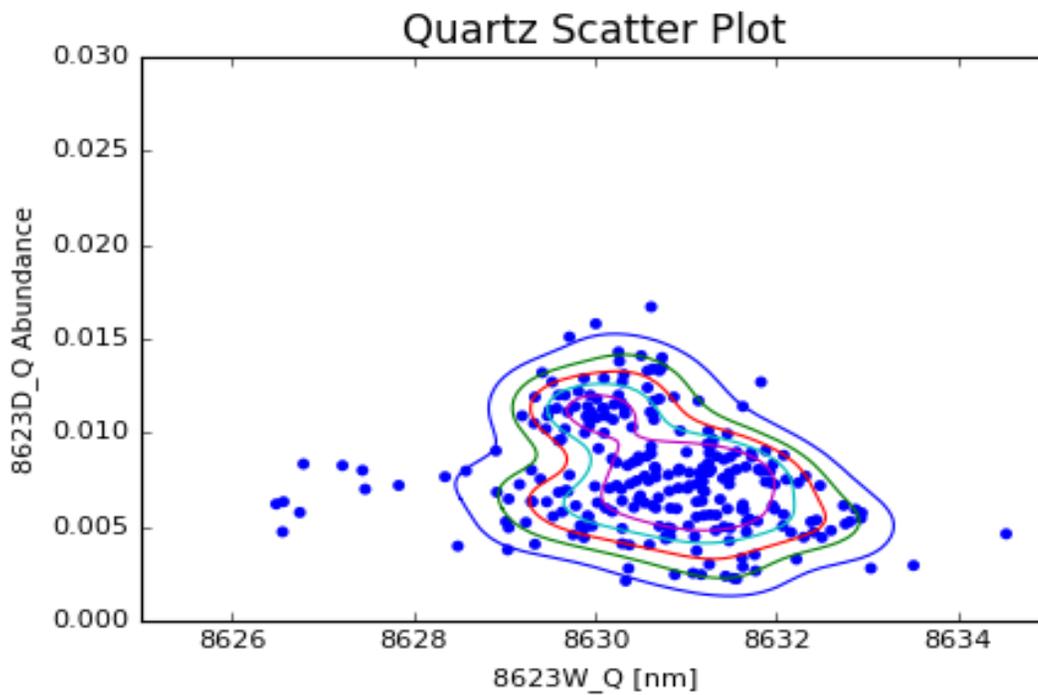


Figura 7.145 Curvas de densidad de escalares de cuarzo para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno

- Labradorita

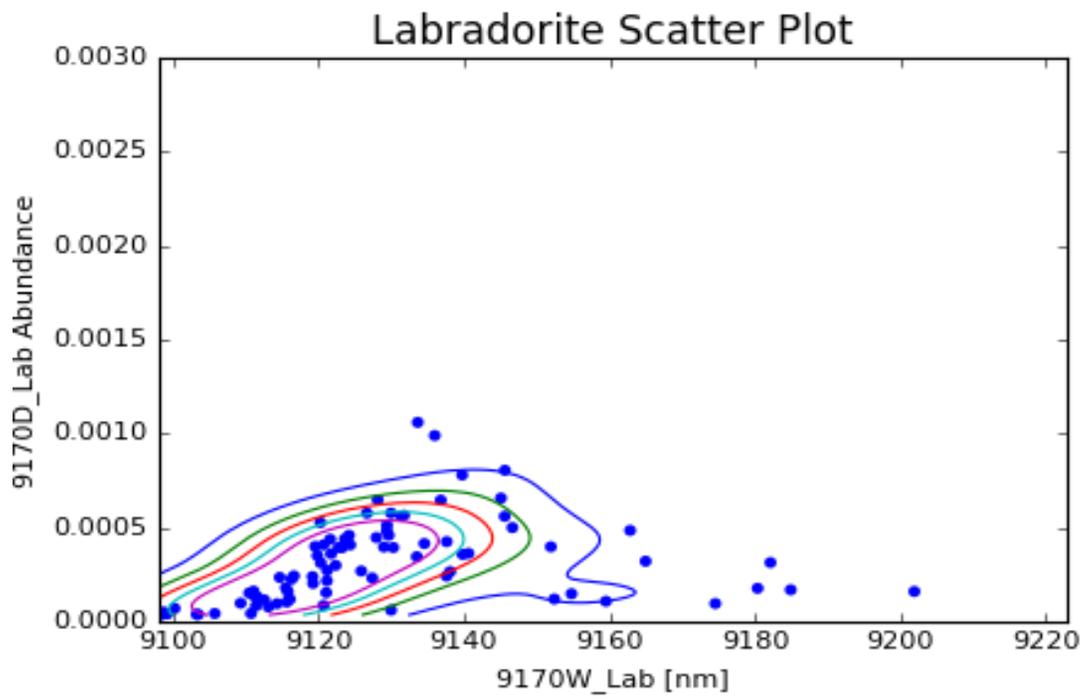


Figura 7.146 Curvas de densidad de escalares de labradorita para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno

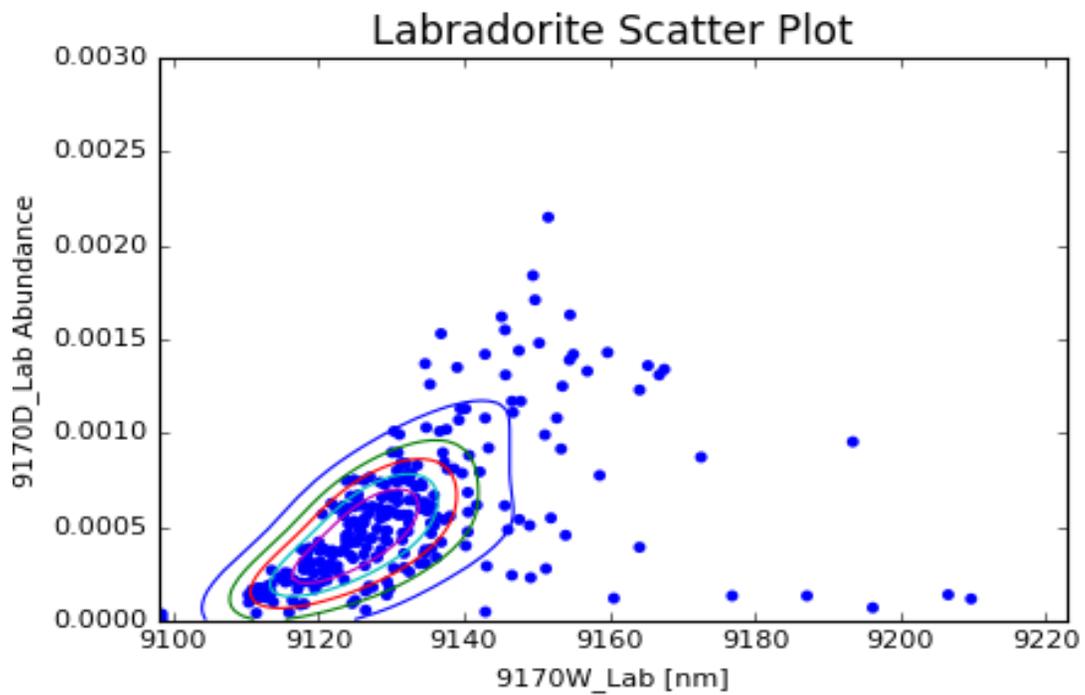


Figura 7.147 Curvas de densidad de escalares de labradorita para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno

- Micas Blancas

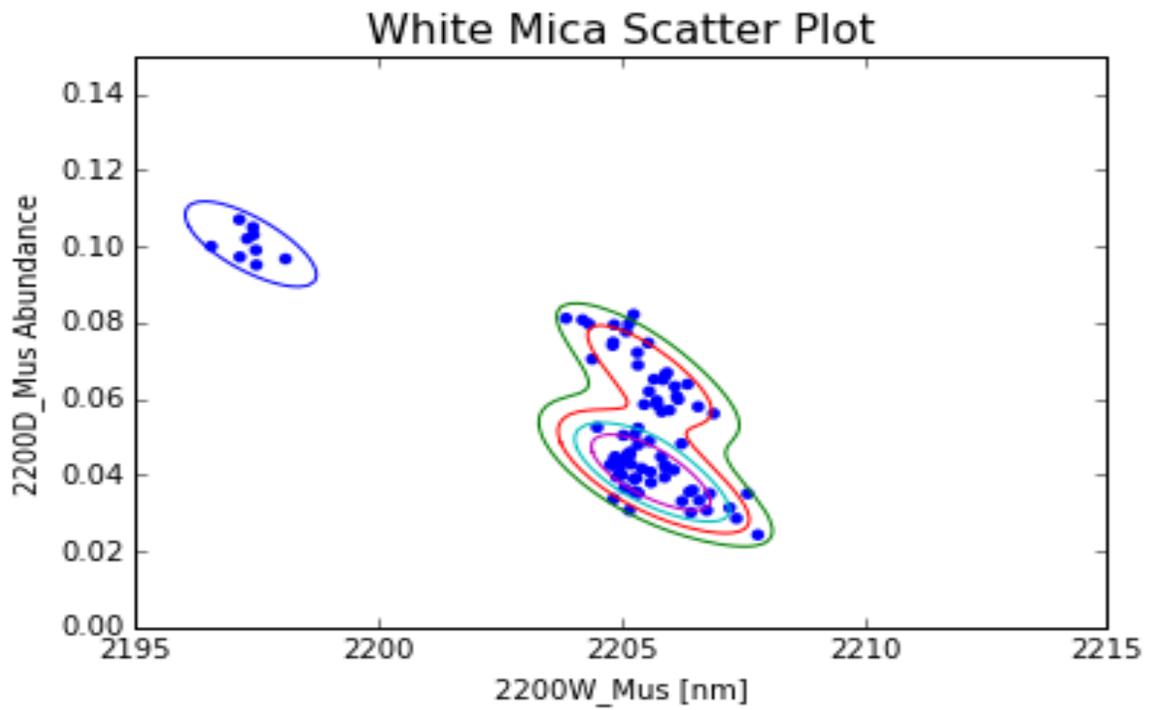


Figura 7.148 Curvas de densidad de escalares de micas blancas para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno

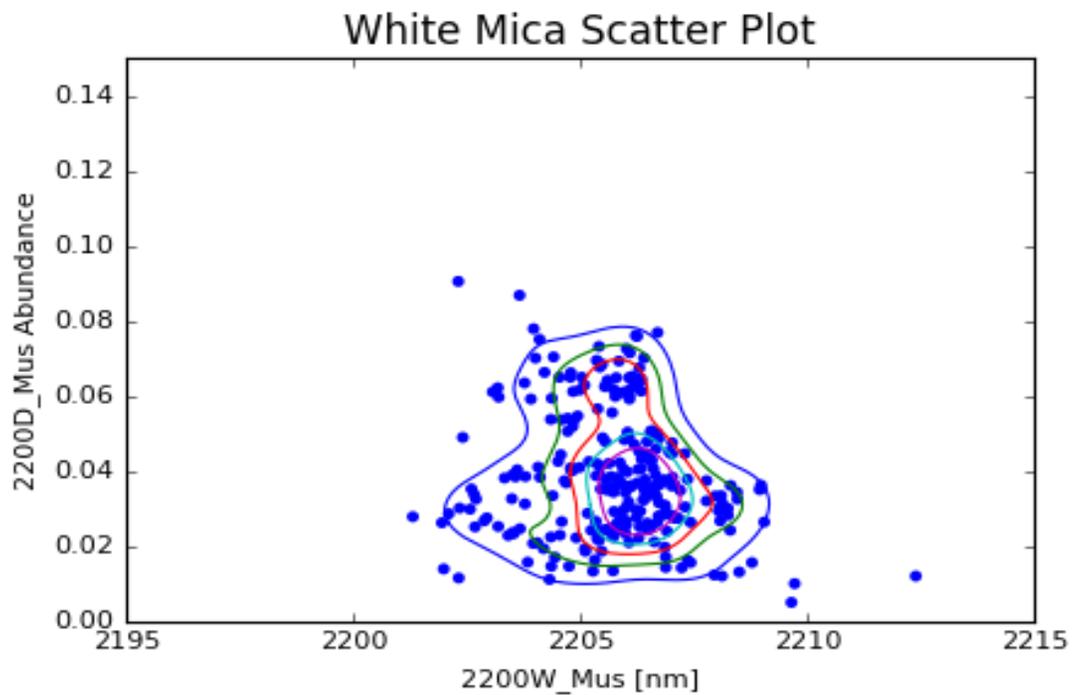


Figura 7.149 Curvas de densidad de escalares de micas blancas para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno

- Micas Negras

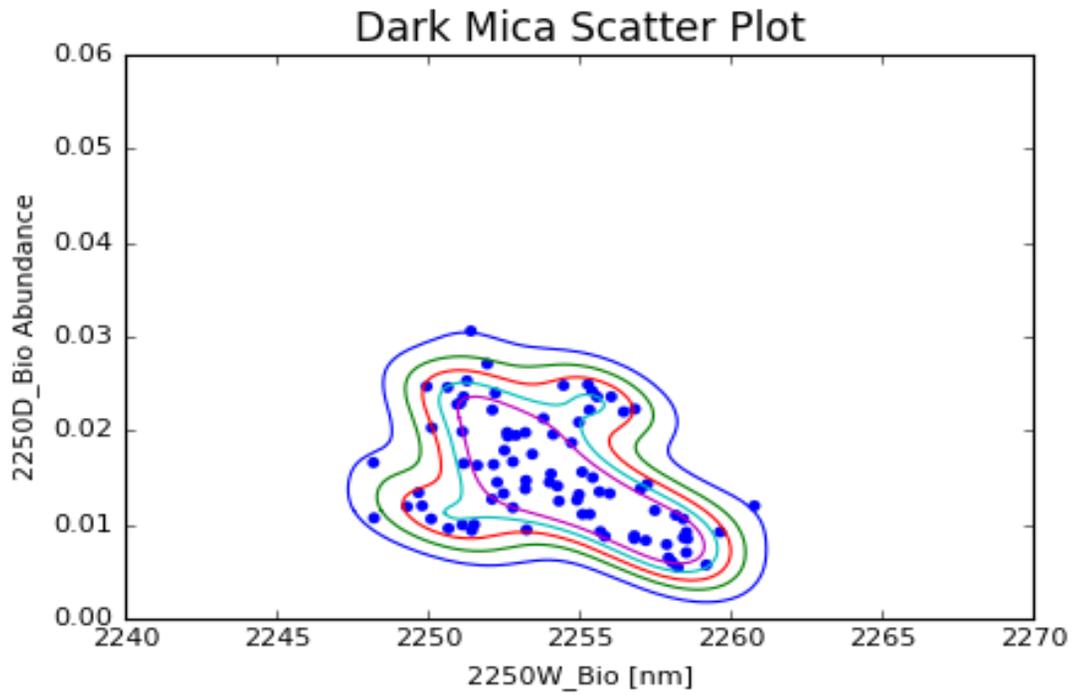


Figura 7.150 Curvas de densidad de escalares de micas negras para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno

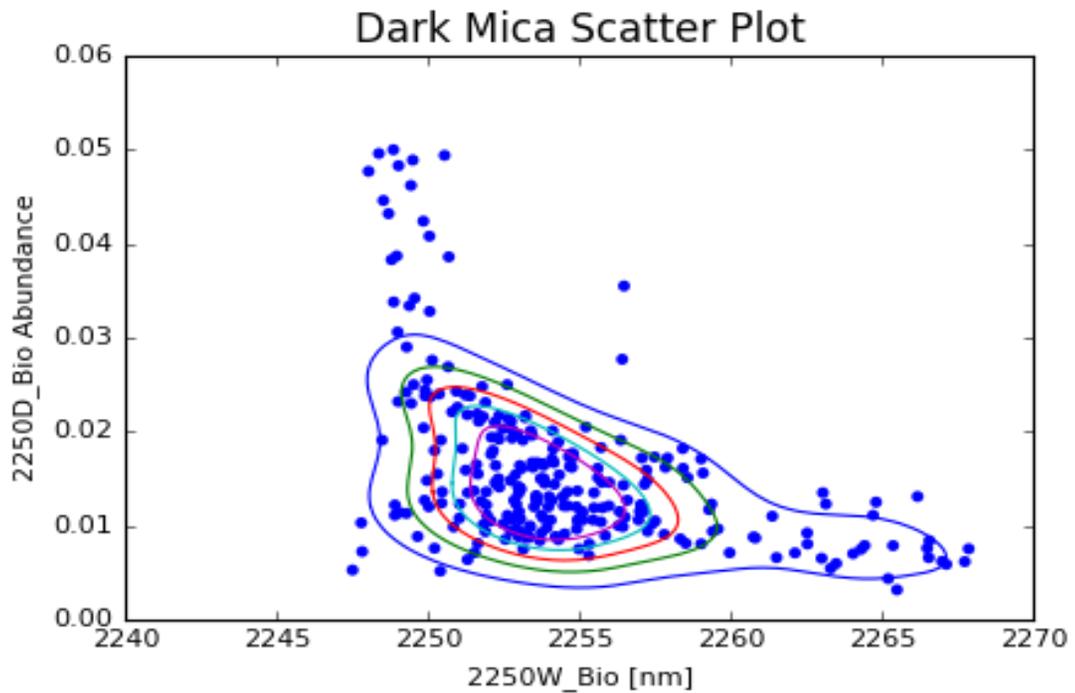


Figura 7.151 Curvas de densidad de escalares de micas negras para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno

- Montmorillonita

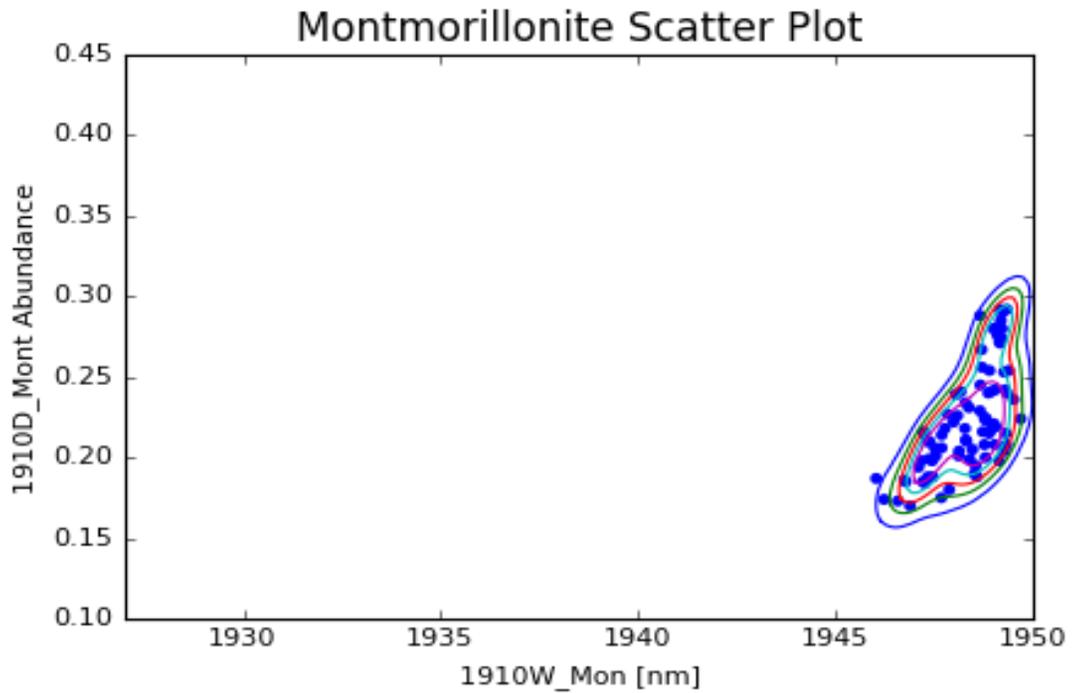


Figura 7.152 Curvas de densidad de escalares de montmorillonita para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno

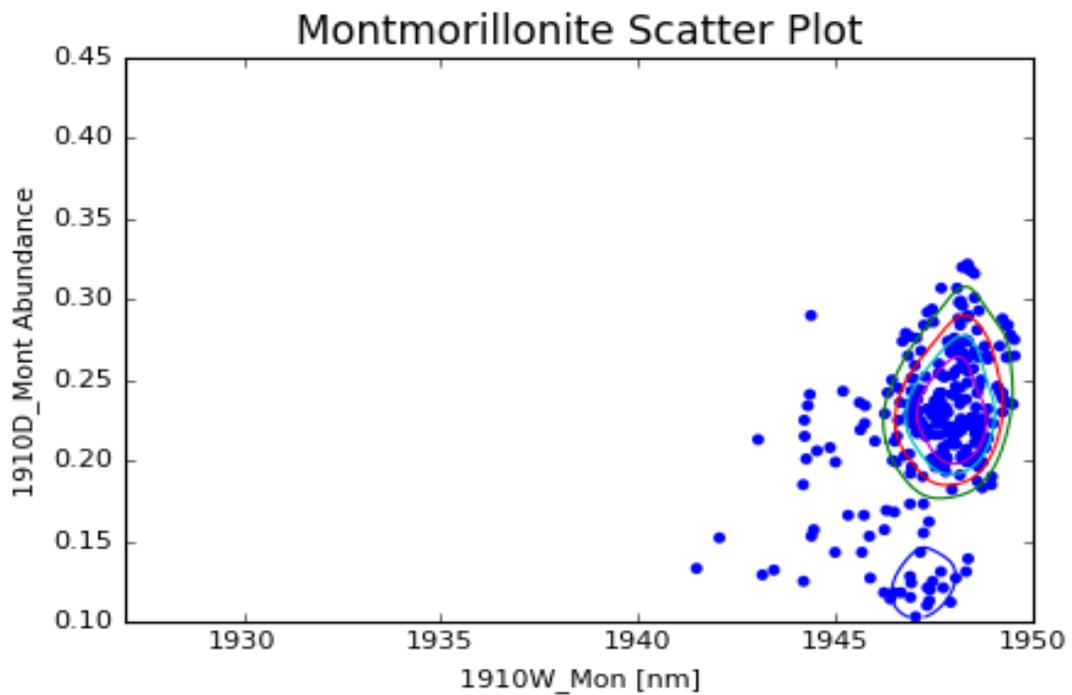


Figura 7.153 Curvas de densidad de escalares de montmorillonita para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno

- Oligoclase

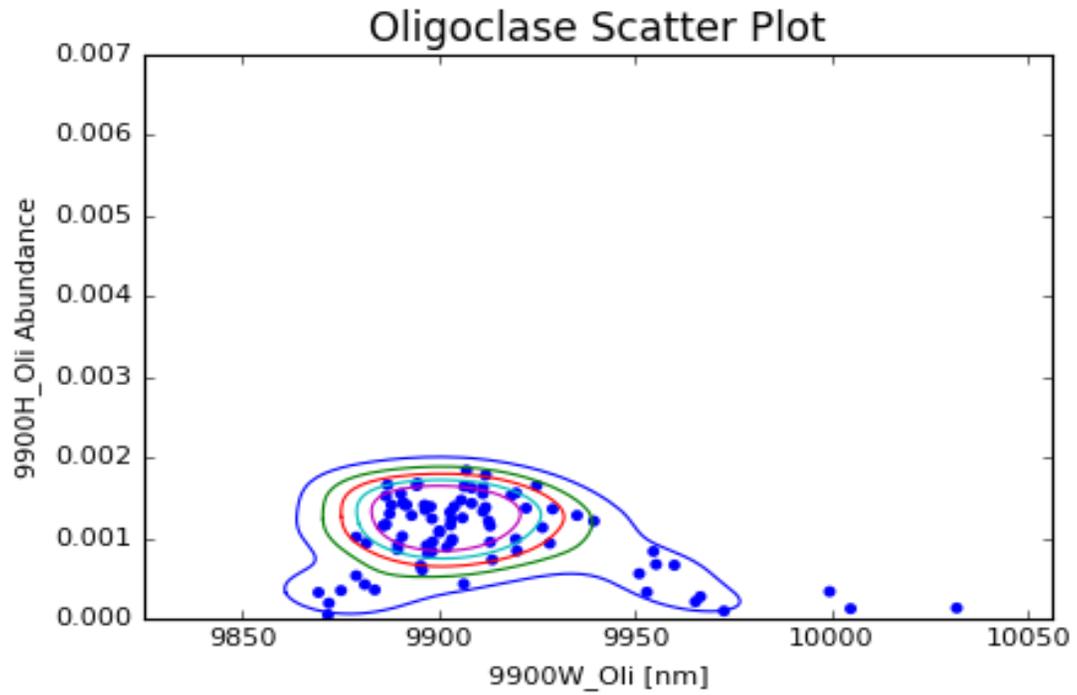


Figura 7.154 Curvas de densidad de escalares de oligoclase para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno

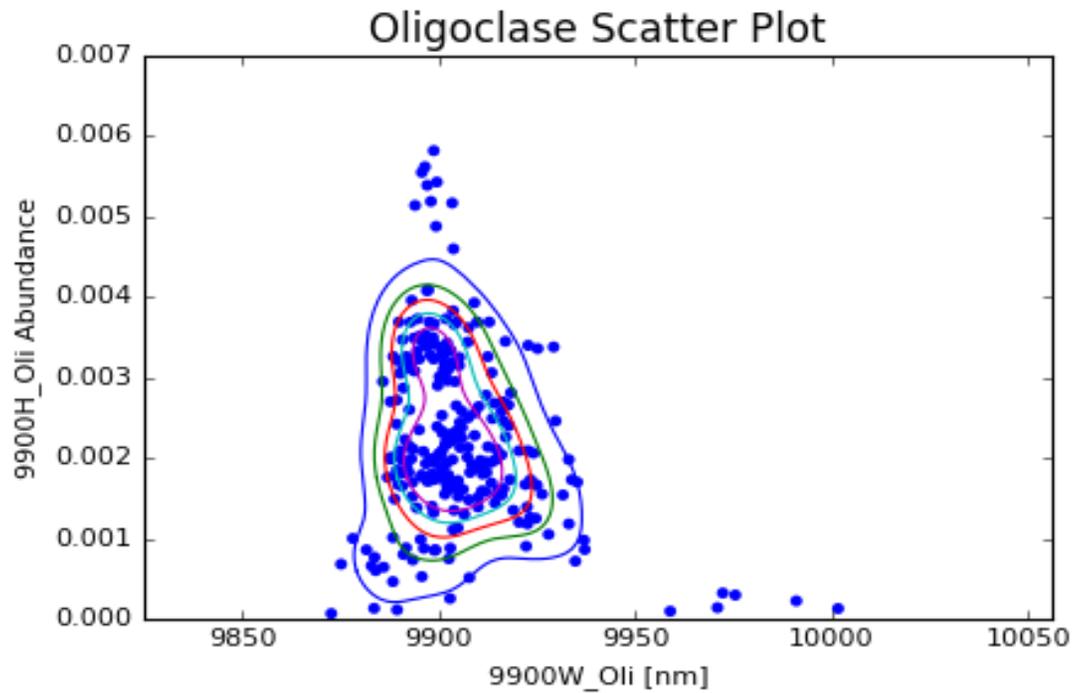


Figura 7.155 Curvas de densidad de escalares de oligoclase para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno

- Yeso

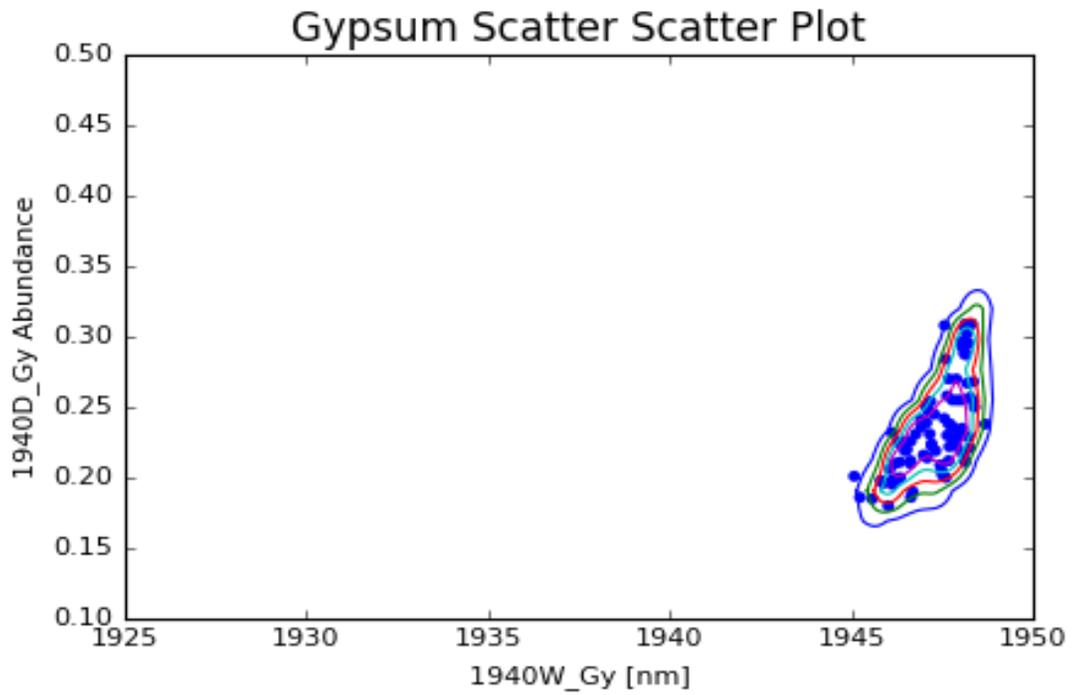


Figura 7.156 Curvas de densidad de escalares de yeso para alteración SC sobre la ley de corte de Molibdeno

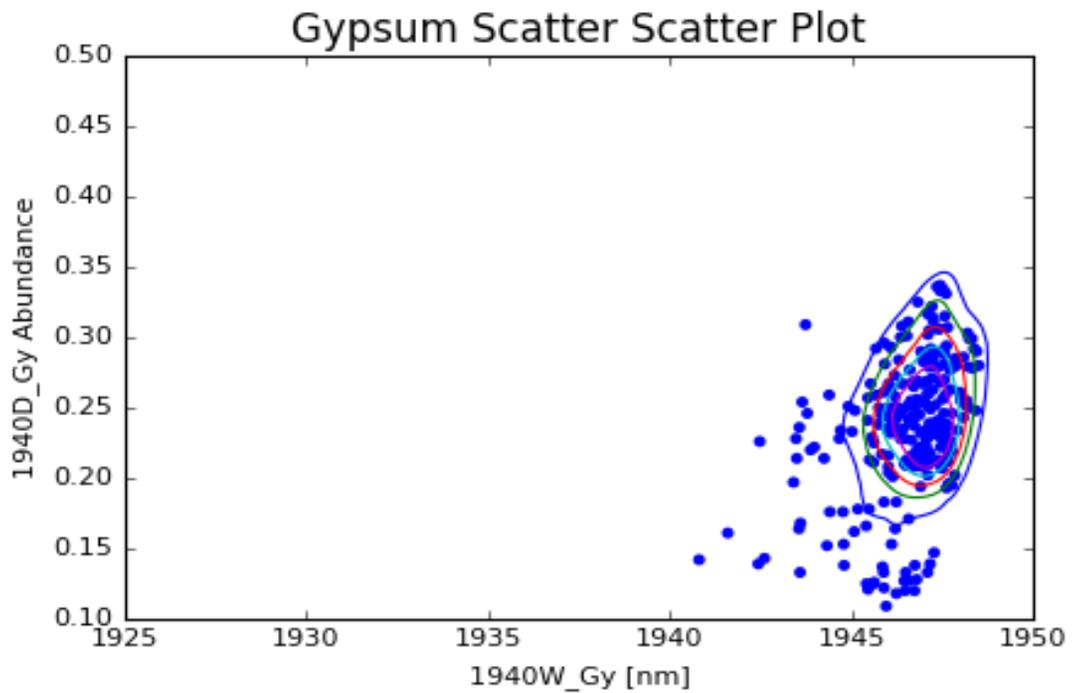


Figura 7.157 Curvas de densidad de escalares de yeso para alteración KBT sobre la ley de corte de Molibdeno

# ANEXO G: PROGRAMA

Las partes que contempla el programa ocupado se dividen en:

## 1. Interfaz gráfica:

- Se genera una interfaz, la que se aprecia en la Figura 7.158, con el fin de poder tener una forma simple para definir los parámetros del estudio, considerando una generalización de las variables, correspondientes a minerales y grupos que se muestran en este trabajo de modo de poder considerar eventualmente otros.

Category	Mineral	Number of Categories
Category 1	Kaolini	2
Category 2	Gypsur	2
Category 3	White_	2
Category 4	Dark_Iv	2
Category 5	Montr	2
Category 6	Albite	2
Category 7	Anhort	2
Category 8	Quartz	2
Category 9	Oligocl	2
Category 10	Labrad	2
Cut off value	Mo ppm	150.0

Figura 7.158 Interfaz de ingreso de datos

- A su vez, la interfaz de la Figura 7.158 se compone de tres partes:

### 1.1. Parte superior:

- Se muestran tres botones a utilizar, al centro la selección de archivos de entrada, a la derecha la selección del directorio para los archivos de salida y al centro un botón de color celeste que indica el formato que debe tener el archivo de entrada.

### 1.2. Parte central:

- En la columna izquierda los minerales a estudiar, los que en este caso corresponden a diez, en la columna de la derecha aparece el número dos, debido a los dos grupos que presenta cada categoría, relativas a la pertenencia de la zona de alta ley o no.

- En la parte inferior, se muestra la ley de corte seleccionada para el molibdeno en partes por millón, la que en este caso corresponde a 150 [ppm].
- Finalmente, se coloca un botón celeste en la parte superior al igual que en el caso anterior.

### 1.3. Parte inferior:

- En esta parte se colocan diversos botones para realizar el procesamiento de la información, comenzando por el conteo de los datos, continuando con el cálculo de las probabilidades, siguiendo con la asignación de las probabilidades y finalmente un botón para terminar el programa.