



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

**Análisis espectral comparando los resultados obtenidos
del TerraSpec Halo y de los espectros procesados en el
programa The Spectral Geologist en la identificación de
minerales de alteración**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo

AUTOR

Iván Franklin REYNA LÓPEZ

ASESOR

Aldo Alfonso ALVAN DE LA CRUZ

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Reyna, I. (2025). *Análisis espectral comparando los resultados obtenidos del TerraSpec Halo y de los espectros procesados en el programa The Spectral Geologist en la identificación de minerales de alteración*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geológica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Iván Franklin Reyna López
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	47340439
URL de ORCID	No aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Aldo Alfonso Alva de la Cruz
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	41133899
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-1190-0042
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	José Andres Yparraguirre Calderón
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10293400
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Félix Abraham Cornelio Orbegoso
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	42652078
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	José Enrique Vereau Jave
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08786578

Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.1.7. Mineralogía y Petrología
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Ate Latitud: -12.08625 Longitud: -77.04126
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Marzo 2021 - Julio 2024 2021 - 2024
URL de disciplinas OCDE	Mineralogía https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.02 Geología https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, el miércoles 16 de julio del año 2025 siendo las 4:00 pm, en presencia de los señores docentes designados como miembros de Jurado Calificador:

Mg. José Andres Yparraguirre Calderón
Mg. Félix Abraham Cornelio Orbegoso
Mg. José Enrique Vereau Jave

(Presidente de Jurado)
(Miembro de Jurado)
(Miembro de Jurado)

Reunidos para el acto académico público de colación de la Tesis del Bach. **IVÁN FRANKLIN REYNA LÓPEZ**, quien sustentará la Tesis titulada: **"ANÁLISIS ESPECTRAL COMPARANDO LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL TERRASPEC HALO Y DE LOS ESPECTROS PROCESADOS EN EL PROGRAMA THE SPECTRAL GEOLOGIST EN LA IDENTIFICACIÓN DE MINERALES DE ALTERACIÓN"**; su asesor el docente **Dr. Aldo Alfonso Alvan De la Cruz**, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Geólogo.

Los miembros del Jurado, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas:

A Satisfacción del Jurado.

El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue:

15 QUINCE (APROBADO)

Habiendo sido aprobada la sustentación de Tesis por el Jurado Calificador, el presidente recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga se le otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO** al Bach. **IVÁN FRANKLIN REYNA LÓPEZ**

Siendo las 17:30 horas se dio por concluido el acto académico, expidiéndose dos (02) Actas originales de la Sustentación de la Tesis.

Lima, 16 de julio de 2025

MG. JOSÉ ANDRÉS YPARRAGUIRRE CALDERÓN
PRESIDENTE DE JURADO

MG. FÉLIX ABRAHAM CORNELIO ORBEGOSO
MIEMBRO DE JURADO

MG. JOSÉ ENRIQUE VEREAU JAVE
MIEMBRO DE JURADO

DR. ALDO ALFONSO ALVAN DE LA CRUZ
MIEMBRO ASESOR



Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Aldo Alfonso Alvan De la Cruz en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la UPG o de la EP N° 000391-2025-D-FIGMMG/UNMSM de la tesis cuyo título es **“Análisis espectral comparando los resultados obtenidos del TerraSpec Halo y de los espectros procesados en el programa The Spectral Geologist en la identificación de minerales de alteración”** por el bachiller **Iván Franklin Reyna López** para optar título en **INGENIERO GEÓLOGO**,

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 9% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado*/ **título***/ especialidad* En INGENIERO GEÓLOGO.

Lima, 05 de julio de 2025

Firma del Asesor

DNI: 41133899

Nombres y apellidos del asesor:

Aldo Alfonso Alvan De la Cruz

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

Dedicatoria

A Dios, por acompañarme y guiarme en mi camino

A mi ángel, mi madre Luz López que me cuida día a día

A mi padre, por apoyarme en todas mis decisiones

A mi hermana, por los consejos que me brinda

A mi Leona, por traer alegría a mi vida

Al club de mis amores, Universitario de Deportes

AGRADECIMIENTO

Agradezco, en primer lugar, a Dios por permitirme alcanzar este momento importante en mi vida. A mis padres, Luz y Adolfo, por su constante e incondicional apoyo, así como por sus valiosos consejos, que me han guiado y me seguirán guiando a lo largo de los años. En especial, a mi madre, que siempre confió en mí.

A mi hermana, Friorela, por su confianza inquebrantable en mí y por hacerme sentir su apoyo en los momentos más necesarios.

Agradezco de manera especial a la empresa Sample Solution por el apoyo desinteresado brindado durante el desarrollo de esta tesis, facilitándome el uso del TerraSpec Halo y la licencia del programa The Spectral Geologist. En particular, extendiendo mi más profundo agradecimiento al Ing. Oscar Mendoza, quién más que un jefe, ha sido un amigo. Su apoyo fue fundamental en la realización de este trabajo.

A la Ing. Merly Mendoza, por sus valiosos consejos y constantes motivaciones, que fueron clave para la realización de esta tesis.

A la Ing. Shirley Custodio, por sus enseñanzas y por compartir conmigo sus amplios conocimientos en el campo de la espectrometría.

A mi alma mater, la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, y en especial al Ing. Ciro Bedía, por su apoyo con la solicitud presentada a la empresa CSIRO, propietaria del programa The Spectral Geologist, para obtener un descuento educativo en la adquisición de una licencia del mencionado programa.

A mi asesor, el Dr. Aldo Alvan, por sus observaciones, revisiones y valiosos aportes a lo largo del desarrollo de esta investigación, que han sido cruciales para su mejora.

A la empresa GeoSpectral, y en particular a la Ing. Celia Plasencia, por el apoyo brindado durante el desarrollo de esta tesis.

Finalmente, a Patcy, por su incondicional apoyo emocional en cada etapa del proceso.

CONTENIDO**PÁG.****RESUMEN8****CAPITULO I.....10****1 INTRODUCCIÓN 10**

1.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA 11

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....12

1.2.1 PROBLEMA GENERAL 12

1.2.2 PROBLEMA ESPECÍFICO.....12

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA 12

1.3.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA 12

1.3.2 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA 13

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....13

1.4.1 OBJETIVO GENERAL 13

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....13

CAPITULO II.....14**2 MARCO TEÓRICO 14**

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....14

2.2 BASES TEÓRICAS.....15

2.2.1 FUNDAMENTOS DE LA ESPECTROSCOPÍA 15

2.2.2 ESPECTROSCOPÍA DE REFLECTANCIA.....19

2.2.2.1 Región del infrarrojo visible y cercano (VNIR). 20

2.2.2.2 Región de infrarrojo de onda corta (SWIR).....22

2.2.2.3 Componentes espectrales. 24

2.2.2.4 Información espectral.....29

2.2.2.5 Factores por considerar al evaluar los espectros.....36

2.2.3 ESPECTRÓMETROS PORTÁTILES DE CAMPO 40

2.2.3.1 TerraSpec Halo.....43

2.2.4 PROGRAMA THE SPECTRAL GEOLOGIST – TSG.....53

2.2.5 ALTERACIONES HIDROTERMALES.....59

2.2.5.1 Alteración potásica.....59

2.2.5.2 Alteración propilítica.....60

2.2.5.3 Alteración cuarzo – sericitica (filica) 60

2.2.5.4 Alteración argílica 61

2.2.5.5 Alteración argílica avanzada.....61

2.2.5.6 Alteración calcosilicatada (Skarn).....62

2.2.6 GRUPO DE MINERALES DE ALTERACIÓN.....63

2.2.6.1 Grupo de la sílice 64

2.2.6.2	Grupo de la alunita.....	64
2.2.6.3	Grupo de alunita – caolín.....	65
2.2.6.4	Grupo de la illita.....	65
2.2.6.5	Grupo de la clorita.....	66
2.2.6.6	Grupo de los calcosilicatos.....	67
2.2.7	ANÁLISIS DE REFLECTANCIA EN DIFERENTES DEPÓSITOS MINERALES.....	69
2.2.7.1	Epitermales de baja sulfuración.....	69
2.2.7.2	Epitermales de alta sulfuración.....	70
2.2.7.3	Depósitos de pórfido de cobre.....	73
2.2.7.4	Skarn.....	74
CAPITULO III		78
3	HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	78
3.1	HIPÓTESIS.....	78
3.1.1	HIPÓTESIS GENERAL.....	78
3.1.2	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.....	78
3.2	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES.....	78
3.2.1	VARIABLE INDEPENDIENTE.....	78
3.2.2	VARIABLE DEPENDIENTE.....	78
CAPITULO IV		79
4	METODOLOGÍA.....	79
4.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	79
4.2	INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.....	79
4.3	PROCESOS.....	80
4.3.1	RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN.....	80
4.3.2	APLICACIÓN DE LA ESPECTROMETRÍA DE REFLECTANCIA.....	80
4.3.3	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE RESULTADOS.....	80
4.3.4	REDACCIÓN DE TESIS.....	80
CAPITULO V		82
5	RESULTADOS.....	82
5.1	ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN.....	82
5.1.1	ETAPA 1: RECOPILACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	82
5.1.2	ETAPA 2: RESULTADOS OBTENIDOS DEL TERRASPEC HALO.....	87
5.1.3	ETAPA 3: RESULTADOS DE LOS ESPECTROS CARGADOS EN EL PROGRAMA THE SPECTRAL GEOLOGIST.....	90
5.1.3.1	Minerales identificados en el programa The Spectral Geologist.....	90
5.1.3.2	Observaciones de los resultados mineralógicos.....	91
5.1.3.3	Parámetros espectrales desarrollados en el programa The Spectral Geologist.....	93

5.1.4	ETAPA 4: ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL PROGRAMA THE SPECTRAL GEOLOGIST	100
5.1.5	ETAPA 5: DESARROLLO DEL ANÁLISIS COMPARATIVO.....	103
5.1.5.1	Ensamblajes mineralógicos	103
5.1.5.2	Escalares y parámetros espectrales	105
5.1.5.3	Alteraciones hidrotermales.....	114
CAPITULO VI		120
6	DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	120
6.1	DISCUSIÓN	120
6.2	CONCLUSIONES	121
6.3	RECOMENDACIONES	124
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

TABLAS

TABLA N°01. EJEMPLOS DE ZONAS DE ALTERACIÓN DEFINIDAS POR DIFERENTES ASOCIACIONES MINERALÓGICAS EN DISTINTOS AMBIENTES DE DEFORMACIÓN.....	29
TABLA N°02. TIPOS DE MICAS BLANCAS DE ACUERDO CON LA POSICIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA DE LA CARACTERÍSTICA DE ABSORCIÓN AL-OH.	32
TABLA N°03. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL TERRASPEC HALO.	43
TABLA N°04. BIBLIOTECA ESPECTRAL DE MINERALES EN EL TERRASPEC HALO.	48
TABLA N°05. ESCALARES ESPECTRALES INFORMADOS POR EL TERRASPEC HALO.....	50
TABLA N°06. PARÁMETROS COMUNES DESARROLLADOS EN THE SPECTRAL GEOLOGIST.....	56
TABLA N°07. TIPOS DE DEPÓSITOS MINERALES CON SUS RESPECTIVAS ASOCIACIONES MINERALÓGICAS.....	77
TABLA N°08. CODIFICACIÓN DEL NÚMERO DE LECTURAS TOMADAS CON EL TERRASPEC HALO CORRESPONDIENTES A CADA MUESTRA.	83
TABLA N°09. RESULTADOS OBTENIDOS DIRECTAMENTE CON EL TERRASPEC HALO.....	88
TABLA N°10. RESULTADOS MINERALÓGICOS GENERADOS EN EL PROGRAMA THE SPECTRAL GEOLOGIST.....	92
TABLA N°11. RANGOS DE POSICIONAMIENTO DE CADA ENLACE MOLECULAR.	93
TABLA N°12. CLASIFICACIÓN DE LA CRISTALINIDAD DE LAS MICAS BLANCAS.	96
TABLA N°13. CLASIFICACIÓN DE LA CRISTALINIDAD DE LAS CAOLINITAS.	97
TABLA N°14. CLASIFICACIÓN DE LA CRISTALINIDAD DE LAS CLORITAS	98
TABLA N°15. RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS ESPECTRALES DESARROLLADOS EN THE SPECTRAL GEOLOGIST (TSG).....	99
TABLA N°16. RESULTADOS MINERALÓGICOS OBTENIDOS DEL TERRASPEC HALO Y LOS GENERADOS EN EL PROGRAMA THE SPECTRAL GEOLOGIST (TSG).	103
TABLA N°17. RESULTADOS DEL ESCALAR ALOH (TERRASPEC HALO) Y EL PARÁMETRO WAV_ALOH (TSG).....	105
TABLA N°18. RESULTADOS DEL ESCALAR FEOH (TERRASPEC HALO) Y EL PARÁMETRO WAV_FEOH (TSG)	106
TABLA N°19. RESULTADOS DEL ESCALAR MGOH (TERRASPEC HALO) Y EL PARÁMETRO WAV_MGOH (TSG)....	107
TABLA N°20. RESULTADOS DEL ESCALAR ALFEMG (TERRASPEC HALO) Y EL PARÁMETRO WAV_PRINCIPAL (TSG).....	108
TABLA N°21. RESULTADOS DEL ESCALAR FE3T (TERRASPEC HALO) Y EL PARÁMETRO WAV_FEOXIDO (TSG) .	109
TABLA N°22. RESULTADOS DEL ESCALAR ISM (TERRASPEC HALO) Y EL PARÁMETRO XT_MICABL (TSG)	110
TABLA N°23. RESULTADOS DEL ESCALAR KX (TERRASPEC HALO) Y EL PARÁMETRO XT_CAOLINITA (TSG)	111
TABLA N°24. RESULTADOS DEL ESCALAR CSM (TERRASPEC HALO) Y EL PARÁMETRO XT_CLORITA (TSG)	112
TABLA N°25. ESCALARES ESPECTRALES (TERRASPEC HALO) Y LOS PARÁMETROS ESPECTRALES (TSG)	113
TABLA N°26. CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL	115
TABLA N°27. ALTERACIÓN HIDROTERMAL Y TOTAL DE MUESTRAS - TERRASPEC HALO.....	117
TABLA N°28. ALTERACIÓN HIDROTERMAL Y TOTAL DE MUESTRAS - TSG.....	117

FIGURAS

FIGURA N°01. PROCESOS ASOCIADOS CON LA INTERACCIÓN DE RADIACIÓN Y SÓLIDOS.	16
FIGURA N°02. REGIÓN DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO, VALORES DE LONGITUD DE ONDA DE VNIR Y SWIR.	19
FIGURA N°03. CATIONES – MINERALES MÁS COMUNES QUE SE PUEDE IDENTIFICAR EN EL RANGO VISIBLE E INFRARROJO CERCANO (VNIR).	21
FIGURA N°04. FIRMAS ESPECTRALES DE JAROSITA, HEMATITA Y GOETHITA.	22
FIGURA N°05. POSICIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA DE LOS ENLACES MOLECULARES DE LOS MINERALES DETECTADOS EN LA ZONA SWIR.	23
FIGURA N°06. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE ABSORCIÓN EN LA ZONA SWIR.	24
FIGURA N°07. RASGOS DE ABSORCIÓN INDICANDO LOS NOMBRES DE SUS COMPONENTES.	25
FIGURA N°08. A) FIRMA ESPECTRAL DE UNA BIOTITA. B) ESPECTRO TÍPICO DE UNA DICKITA.	26
FIGURA N°09. PRINCIPALES RASGOS DE ABSORCIÓN QUE PUEDEN OBSERVARSE EN UNA FIRMA ESPECTRAL.	27
FIGURA N°10. SERIE DE ESPECTROS QUE CORRESPONDEN A DIFERENTES MINERALES.	27
FIGURA N°11. A) ESPECTRO DE LA DICKITA. B) ESPECTRO DE LA ASOCIACIÓN ALUNITA – DICKITA. C) ESPECTRO DE LA ALUNITA.	28
FIGURA N°12. REFERENCIA ESPECTRAL DE LAS CLORITAS MG → FE.	31
FIGURA N°13. FIRMAS ESPECTRALES DEL GRUPO DE LAS MICAS BLANCAS.	32
FIGURA N°14. CAOLINITAS ORDENADAS EN FORMA DECRECIENTE RESPECTO AL ORDEN ESTRUCTURAL.	34
FIGURA N°15. VISTA EXTENDIDA DE LA FIGURA N°14.	34
FIGURA N°16. LA CRISTALINIDAD AFECTADA POR METEORIZACIÓN.	35
FIGURA N°17. FIRMAS ESPECTRALES EN FUNCIÓN DEL ORDEN EN LA RED CRISTALINA, DESDE ESMECTITAS DE BAJA TEMPERATURA HASTA MICAS Y PIROFILITA DE TEMPERATURAS MÁS ALTAS.	36
FIGURA N°18. FIRMAS ESPECTRALES DE ALGUNOS MINERALES DE HIERRO.	37
FIGURA N°19. LOS EFECTOS DE LA TRANSPARENCIA EN LA REFLECTANCIA.	38
FIGURA N°20. FIRMAS ESPECTRALES CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE AGUA.	39
FIGURA N°21. FIRMAS ESPECTRALES DE PIROXENO EN RELACIÓN CON EL TAMAÑO DE GRANO.	40
FIGURA N°22. ESPECTRÓMETRO TERRASPEC HALO. VISTA LATERAL Y POSTERIOR.	44
FIGURA N°23. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL TERRASPEC HALO.	47
FIGURA N°24. PANEL PRINCIPAL DEL PROGRAMA HALO MANAGER, V.2018.	52
FIGURA N°25. PROCESO DE SINCRONIZACIÓN.	53
FIGURA N°26. PANTALLA INICIAL DEL PROGRAMA THE SPECTRAL GEOLOGIST V8.0.7.4.	54
FIGURA N°27. FIRMAS ESPECTRALES VISUALIZADAS EN EL PROGRAMA THE SPECTRAL GEOLOGIST (TSG).	55
FIGURA N°28. FIRMAS ESPECTRALES SIN PROCESAR Y NORMALIZADAS (REMOCIÓN DE LA ENVOLVENTE).	58
FIGURA N°29. MINERALES DE ALTERACIÓN COMUNES EN SISTEMAS HIDROTERMALES.	63
FIGURA N°30. FASES DE LA SÍLICE EN SU FORMA CRISTALINA – (A) TRIDIMITA, (B) CUARZO Y (C) CRISTOBALITA.	64
FIGURA N°31. (A) ALUNITA DISEMINADA Y (B) MUESTRA MASIVA Y POROSA DE ALUNITA CON CUARZO.	64
FIGURA N°32. GRUPO DEL CAOLÍN.	65

FIGURA N°33. GRUPO DE LA ILLITA.....	66
FIGURA N°34. (A) MUESTRA MASIVA DE CLORITA (B) CLORITA CRISTALIZADA.....	66
FIGURA N°35. GRUPO DE LOS CALCOSILICATOS	67
FIGURA N°36. TEMPERATURA DE FORMACIÓN DE MINERALES DE ALTERACIÓN EN SISTEMAS HIDROTERMALES.	68
FIGURA N°37. SECCIÓN ESQUEMÁTICA QUE GENERALIZA LOS DISEÑOS DE ALTERACIÓN EN UN SISTEMA DE BAJA SULFURACIÓN, MOSTRANDO LA FORMA VARIABLE CON EL INCREMENTO DE PROFUNDIDAD Y LA ZONACIÓN TÍPICA DE ALTERACIÓN.	70
FIGURA N°38. SECCIÓN A TRAVÉS DE UN CUERPO TÍPICO DE ALTA SULFURACIÓN, MOSTRANDO UN ENSANCHAMIENTO ASCENDENTE DEL NÚCLEO SILÍCEO, CON UN RECUADRO ILUSTRANDO LA ZONACIÓN CARACTERÍSTICA HACIA FUERA DEL NÚCLEO SILÍCEO EL CUAL PUEDE CONTENER UNA TEXTURA DE CUARZO OQUEROSO ("VUGGY QUARTZ").	71
FIGURA N°39. DISTRIBUCIÓN ESQUEMÁTICA DE LA ALTERACIÓN HIDROTERMAL ASOCIADA CON LOS YACIMIENTOS EPITERMALES DE BAJA Y ALTA SULFURACIÓN.	72
FIGURA N°40. DIBUJO PARA ILUSTRAR ESQUEMÁTICAMENTE LOS PROCESOS DEDUCIDOS PARA SISTEMAS VOLCÁNICO-HIDROTERMAL Y GEOTÉRMICO Y LOS RESPECTIVOS AMBIENTES DE ESTILOS DE ALTA Y BAJA SULFURACIÓN DE DEPÓSITOS EPITERMALES EN RELACIÓN CON EL MOTOR INTRUSIVO.	72
FIGURA N°41. SECCIÓN IDEALIZADA QUE MUESTRA LA ZONACIÓN DE ALTERACIÓN DE LOS PÓRFIDOS DE CU. 74	
FIGURA N°42. ETAPAS EVOLUTIVAS DE LOS DEPÓSITOS DE SKARN ASOCIADOS A PLUTONES.	76
FIGURA N°43. ETAPAS DE LA METODOLOGÍA DE TRABAJO PARA EL DESARROLLO DE LA TESIS.	81
FIGURA N°44. MUESTRAS DE ROCAS SEÑALIZADAS DONDE OCURRE LA ALTERACIÓN MINERAL PARA LA TOMA DE DATOS CON EL TERRASPEC HALO.....	82
FIGURA N°45. CREACIÓN DEL PROYECTO "TESIS IVAN" EN EL PROGRAMA HALO MANAGER, V.2018.....	84
FIGURA N°46. REFERENCIA BLANCA (SPECTRALON) UTILIZADA PARA LA CALIBRACIÓN DEL TERRASPEC HALO.	84
FIGURA N°47. LECTURA DE LA MUESTRA CON EL TERRASPEC HALO.	85
FIGURA N°48. PANTALLA INCORPORADA AL ESPECTRÓMETRO TERRASPEC HALO, DONDE SE PUEDE VISUALIZAR LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE MANERA INMEDIATA.	86
FIGURA N°49. POSICIONAMIENTO DE CADA ENLACE MOLECULAR.....	94
FIGURA N°50. (A) FIRMA ESPECTRAL SIN PROCESAR; (B) FIRMA ESPECTRAL NORMALIZADA.	95
FIGURA N°51. (A) FIRMA ESPECTRAL REFERENCIAL DEL TSG; (B) FIRMA ESPECTRAL DE LA MUESTRA M_05-B.	101
FIGURA N°52. (A) FIRMAS ESPECTRALES DE LA MUESTRA M_05.....	102

ANEXOS

ANEXO A: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE MUESTRAS

ANEXO B: VALIDACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LAS FIRMAS ESPECTRALES

ANEXO C: FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS

RESUMEN

El análisis de espectrometría es una herramienta de gran ayuda en la exploración geológica y en la producción minera. En la presente tesis, este análisis es llevado a cabo con el espectrómetro TerraSpec Halo y con el programa The Spectral Geologist – TSG, los resultados mineralógicos y espectrales obtenidos por cada método fueron comparados entre sí. Para este fin, se recolectó 20 muestras de roca de superficie, la recolección de muestras fue realizada de manera aleatoria, tomando en cuenta la identificación de minerales de alteración.

Se realizaron 2 lecturas por cada muestra con el TerraSpec Halo, generando un total de 40 archivos de extensión ASD, también conocidos como espectros, y un archivo en formato TXT que muestran los resultados tanto de los ensambles mineralógicos como el de los escalares espectrales detectados. Posteriormente, se procesaron estos 40 espectros en el programa The Spectral Geologist, con la finalidad de validar e interpretar detalladamente las firmas espectrales de cada muestra evaluada.

Los resultados revelan que tanto los minerales como los ensambles mineralógicos identificados directamente con el TerraSpec Halo difieren en algunas muestras de los obtenidos a través del análisis e interpretación de los espectros en el programa The Spectral Geologist. Una diferencia notable es que el TerraSpec Halo solo proporciona un nivel de confiabilidad sobre la presencia del mineral o del ensamble mineralógico en la muestra, si la confiabilidad es baja, es probable que se trate de un contaminante generando ruido en la firma espectral. En cambio, una interpretación detallada permite determinar primero el mineral o el ensamble mineralógico, y luego la contribución espectral que cada mineral aporta a la firma espectral analizada.

Asimismo, se realizó la comparación entre los escalares espectrales indicados por el TerraSpec Halo con los parámetros espectrales desarrollados en el programa The Spectral Geologist. Finalmente, se determinó que la existencia tanto de los escalares como de los parámetros espectrales dependen de

la presencia de algunos minerales. Se procedió a comparar el valor de cada escalar con su equivalente en los parámetros espectrales.

Por último, en base a los minerales, los ensambles mineralógicos y los escalares o parámetros espectrales identificados y/o desarrollados, se determinó el tipo de alteración de manera puntual para cada muestra en ambos resultados. De esta manera, se concluyó el tipo de alteración predominante, según la evaluación espectral de las 20 muestras, es la alteración argílica, determinada en 14 muestras.

CAPITULO I

1 INTRODUCCIÓN

La espectrometría de reflectancia proporciona información valiosa sobre la presencia de minerales de alteración basándose en la medición y estudio del comportamiento de las ondas electromagnéticas de cada mineral o de ensambles mineralógicos. La región espectral visible e infrarrojo cercano (Visible and Near InfraRed - VNIR) abarca desde los 350 nm a 1300 nm, y el infrarrojo de onda corta (Short Wavelength InfraRed - SWIR) se extiende desde los 1300 nm hasta los 2500 nm, de acuerdo con el espectro electromagnético.

Para el desarrollo del análisis de espectrometría, se emplearon equipos llamados espectrómetros, los cuales, apoyados de los avances tecnológicos, se manejan de manera portátil, dando lugar al uso, el espectrómetro PIMA (Portable Infrared Mineral Analyzer), el cual fue reemplazado por el FieldSpec 4, el TerraSpec 4 Hi-Res. Actualmente, se cuenta con el TerraSpec Halo, una versión de última generación, y motivo de esta tesis.

Además de los espectrómetros, existen programas especializados en la validación e interpretación de los espectros obtenidos, como The Spectral Geologist, en su última versión 8.0.7.4. Este programa es utilizado para el análisis interactivo, la validación e interpretación mineralógica de los datos espectrales recopilados de las muestras geológicas mediante el TerraSpec Halo.

Actualmente, el TerraSpec Halo viene con un programa integrado que permite obtener resultados de forma automática y directa, tales como la identificación de minerales de alteración (arcillas, cloritas, micas, carbonatos, etc.) y los escalares espectrales. Asimismo, se logra exportar archivos ASD (espectros), los cuales se procesan en el programa The Spectral Geologist para interpretar las curvas de reflectancia espectral (firma espectral), generando nuevos resultados respecto a los minerales de alteración y los parámetros espectrales.

En la presente tesis, se busca desarrollar un análisis comparativo entre los resultados mineralógicos y espectrales que se obtienen al realizar el análisis de espectrometría únicamente con el espectrómetro TerraSpec Halo y su programa interno, y los resultados obtenidos mediante el programa The Spectral Geologist (TSG).

1.1 Situación problemática

En ocasiones, los trabajos se realizan utilizando los resultados obtenidos directamente del TerraSpec Halo, mientras que en otras ocasiones se emplean los resultados obtenidos producto de la validación e interpretación de los espectros en un programa especializado, como, por ejemplo, The Spectral Geologist. Es posible que los resultados obtenidos del TerraSpec Halo y los procesados en el programa The Spectral Geologist sean semejantes o diferentes.

Ante esto surge la pregunta sobre el grado de certeza o confiabilidad que se tiene al trabajar solo con los resultados obtenidos directamente del TerraSpec Halo en comparación con los resultados generados a partir del procesamiento de los espectros en el programa The Spectral Geologist. Es importante resaltar que el análisis de espectrometría de reflectancia permite la identificación de minerales de alteración. Si esta información se complementa con los escalares espectrales obtenidos del TerraSpec Halo o los parámetros espectrales desarrollados en el programa The Spectral Geologist, se puede lograr una buena vectorización de zonas de alteración hidrotermal.

Por los motivos expuestos, se afirma que es muy importante conocer y determinar con qué tipo de información se debe trabajar. Además, hasta la fecha, no se cuenta con registros en la bibliografía de un análisis de comparación entre ambos tipos de resultados.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Los resultados mineralógicos y espectrales obtenidos directamente del TerraSpec Halo son semejantes o diferentes a los generados a partir del procesamiento de los espectros en el programa The Spectral Geologist?

1.2.2 Problema específico

- ¿Son confiables las predicciones mineralógicas y espectrales obtenidas directamente del TerraSpec Halo para realizar un estudio de alteraciones hidrotermales?
- ¿Son suficientes los escalares espectrales proporcionados por el espectrómetro TerraSpec Halo para monitorear cambios de cristalinidad y composición dentro de un grupo mineral?
- ¿En qué medida es necesario procesar, a través de la validación e interpretación, los espectros en el programa The Spectral Geologist para obtener resultados precisos y detallados?

1.3 Justificación del problema

1.3.1 Justificación teórica

El espectrómetro TerraSpec Halo, al contar con un programa integrado y una amplia biblioteca espectral interna, permite obtener resultados mineralógicos y escalares espectrales de forma automática, sin necesidad de un procesamiento adicional. Por otro lado, el programa especializado The Spectral Geologist (TSG) permite realizar un procesamiento más detallado, a través de la validación e interpretación de los espectros, obteniendo resultados más robustos y confiables. Este análisis comparativo es esencial para evaluar la precisión y confiabilidad de los datos generados por el TerraSpec Halo en relación con los métodos de interpretación más detallados.

1.3.2 Justificación práctica

Cargar los espectros que se obtienen del TerraSpec Halo en el programa The Spectral Geologist permite visualizar y analizar las firmas espectrales, comparándolas con las firmas espectrales de la biblioteca espectral del programa. Identificar las posiciones de onda de las principales características de absorción en una firma espectral para la correcta identificación de un mineral o de un posible ensamble mineralógico.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo general

Analizar y comparar las similitudes y diferencias que se presentan entre los resultados mineralógicos y espectrales obtenidos directamente con el TerraSpec Halo y aquellos generados mediante el procesamiento de los espectros en el programa The Spectral Geologist.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar, examinar y comprender los escalares espectrales proporcionados por el TerraSpec Halo, destacando su utilidad y aplicaciones en el análisis mineralógico.
- Establecer los parámetros espectrales generales y calcular aquellos que puedan ser desarrollados matemáticamente utilizando el programa The Spectral Geologist.
- Cuantificar la contribución espectral de cada mineral en las firmas espectrales mediante el uso del programa The Spectral Geologist.
- Evaluar y clasificar los resultados obtenidos para definir los tipos de alteraciones hidrotermales en las muestras estudiadas.

CAPITULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

La espectroscopia de reflectancia aplicada alcanzó una gran popularidad gracias a la comunidad de investigadores en sensores remotos quienes, en cierto modo, se podrían considerar sus “desarrolladores”, debido a que con los sistemas satelitales no solo se logró recolectar información espacial, sino también, espectral.

Los primeros datos infrarrojos sobre minerales fueron publicados entre 1905 y 1910 por W.W. Coblentz de la U.S. Bureau of Standards. A mediados de la década de los años 1940, se dispone comercialmente de los espectrofotómetros de infrarrojo, lo cual conlleva a un aumento en el uso de esta técnica en mineralogía, logrando así, que en 1962 Lyon y Moenke publicaran las primeras compilaciones de espectros de algunos minerales.

Desde 1970 se inició un avance notable en el conocimiento y las aplicaciones prácticas de los métodos de espectrometría. Los espectros de los minerales detectados en la región del infrarrojo de onda corta (SWIR) fueron sistemáticamente compilados por Graham Hunt, John Salisbury y Charles Lenhoff entre 1969 y 1973. La base de datos de Hunt proporcionó una referencia básica para minerales activos infrarrojos en la región SWIR que todavía está en uso activo. Farmer (1974) publicó un libro completo sobre aspectos teóricos y prácticos. Marel y Beutelspacher (1976) recopilaron y publicaron información sobre los espectros de los minerales arcillosos. Kodama (1985) publicó espectros de minerales que se encuentran típicamente en suelos, incluidos numerosos hidroxilos, óxidos, filosilicatos, carbonatos y sulfatos. El trabajo de Graham Hunt fue ampliado por Clark et al. (1990), mientras que posteriormente Hauff (1993) publicó una biblioteca de referencia comercial.

En la actualidad, diferentes instituciones internacionales cuentan con su propia biblioteca espectral de minerales como: USGS (United States Geological Survey) y NASA Jet Propulsion Laboratory, así como los diferentes espectrómetros y programas especializados en espectrometría.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Fundamentos de la espectroscopía

La espectroscopía puede definirse como el estudio de la radiación electromagnética, en función de la longitud de onda que ha sido emitida, reflejada o dispersada desde un sólido.

Uno de los métodos para describir las características de la radiación electromagnética, se base en el comportamiento de las partículas, esto debido a que la radiación electromagnética está formada por partículas llamadas fotones. Estos fotones son pequeñas partes de una onda electromagnética continua, lo cual significa que los fotones exhiben un comportamiento ondulatorio.

La espectroscopia de absorción se basa en la absorción de fotones por un material sólido y siempre requiere algún tipo de radiación incidente para analizar la absorción de energía radiante. Cuando un material sólido se somete a radiación incidente se aplican varios procesos a esta radiación. (Dalm, 2011). Estos procesos se ilustran en la Figura N°01.

Debido a que la absorción de la radiación incidente por parte de los materiales solidos no puede detectarse directamente, esta absorción se caracteriza por la radiación reflejada o transmitida, la caracterización de materiales sólidos se logra a partir del análisis de la cantidad relativa y la longitud de onda de la radiación absorbida.

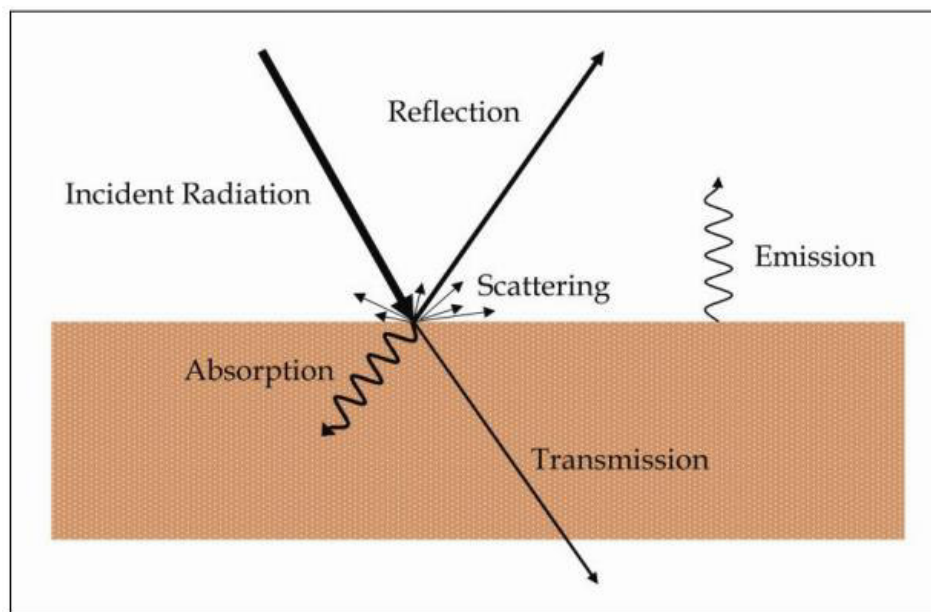


Figura N°01. Procesos asociados con la interacción de radiación y sólidos.

Fuente: (Dalm, 2011).

Dado que la espectroscopia de reflectancia es un tipo de espectroscopia de absorción, hay tres procesos generales que provocan la absorción de energía radiante por materiales sólidos (Hollas, 2004),

- Procesos rotacionales
- Procesos vibratorios
- Procesos electrónicos

En general las absorciones de energía radiante en las regiones VNIR y SWIR, son causadas por procesos vibratorios y electrónicos. Los procesos vibratorios son absorciones de vibraciones de los enlaces dentro de las moléculas, el proceso vibracional es un proceso molecular y por lo tanto requiere un momento dipolar para la transferencia de energía radiante (Clark, 1999).

En este proceso las vibraciones de los enlaces de una molécula son debido al estiramiento y/o flexión del enlace, provocando pequeños cambios en los momentos dipolares, de esto resulta que las absorciones más fuertes de energía radiante son causadas por vibraciones de los enlaces con una gran

diferencia en el número atómico (Hollas, 2004). Ejemplos de tales configuraciones son los enlaces OH o los enlaces Metal-OH, que son una de las principales causas de absorción en los espectros de reflectancia.

El proceso vibratorio es el que provoca la mayor cantidad de características de absorciones de distintos minerales en la región SWIR del espectro electromagnético. Siendo las firmas espectrales la respuesta a cambios de vibración en los diferentes grupos de átomos que forman las moléculas y los cristales (Robbrn, Knapp, & Wotruba, 2012).

Los procesos electrónicos se producen en las regiones de longitud de onda más corta, correspondiente a absorciones de energía relativamente alta. Las absorciones por procesos electrónicos se basan en las transiciones entre estados electrónicos de átomos o iones (Clark, 1999). El proceso electrónico es un proceso atómico y, por lo tanto, solo tiene grados de libertad electrónica (Hollas, 2004). Existen diferentes causas de absorción por procesos electrónicos de los cuales los dos siguientes son los más comunes en la espectroscopia de absorción de minerales (Clark, 1999):

- Efectos del campo cristalino.
- Absorción de transferencia de carga.

Las absorciones por los efectos del campo cristalino se basan en las capas de electrones vacíos de los elementos de transición. Los elementos de transición son, por ejemplo, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, etc. Un elemento de transición se define como un elemento cuyo átomo tiene una subcapa "d" incompleta, o que puede dar lugar a cationes con una subcapa "d" incompleta (IUPAC, 1997). Debido a la subcapa "d" incompleta, los niveles de energía orbital se dividen cuando el átomo se encuentra en un campo cristalino. Esta división de los niveles de energía permite que los electrones se muevan entre estados de energía orbital a partir de la absorción de fotones que coinciden con la diferencia de energía entre estos estados (Clark, 1999).

Las absorciones de transferencia de carga se basan en transiciones entre elementos donde las absorciones de fotones son causadas por electrones que se mueven entre iones. La energía involucrada en este movimiento corresponde nuevamente a la frecuencia de radiación absorbida. La transición entre elementos también es posible entre el mismo metal en diferentes estados, por ejemplo, entre Fe^{+2} y Fe^{+3} (Clark, 1999).

En resumen, cuando la luz interacciona con una roca o mineral, ciertas longitudes de onda son absorbidas preferentemente, otras son transmitida a las sustancias y una parte es reflejada. La reflectancia, definida como la relación entre la intensidad de luz reflejada por una muestra y la intensidad de luz incidente sobre ella, se mide mediante espectrómetros de reflexión, compuestos por una fuente de luz y un prisma que separa la fuente de luz en distintas longitudes de onda, obteniéndose un espectro continuo de reflectancia de la muestra. La energía absorbida se invierte en distintos procesos, algunos de los cuales pueden ser relacionados con la estructura atómica (saltos de electrones entre distintos niveles energéticos de la corteza atómica) o con la estructura cristalina (vibración de los enlaces) de modo que se puede obtener información sobre su composición química y mineralógica (Hauff P. L., 2005).

Los procesos físicos primarios que controlan la dispersión, absorción y/o reemisión de radiación electromagnética en las longitudes de onda correspondientes al visible e infrarrojo cercano, son los electrónicos y los vibracionales. Los procesos electrónicos implicados en iones metálicos de transición como Fe^{+3} y Fe^{+2} , y los procesos vibracionales relacionados con H_2O , OH^- , CO_3^{2-} , SiO_2 y SO_4^{2-} , dan como resultado características específicas denominadas rasgos o bandas de absorción en los espectros de reflectancia (Hauff P. L., 2005).

La posición, forma, profundidad, anchura y asimetría de estas características de absorción están controladas por la estructura cristalina en la cual las especies absorbentes están contenidas, por la

estructura química del mineral, de forma que los parámetros que caracterizan los rasgos de absorción pueden ser directamente relacionados con la mineralogía de la muestra (Hauff P. L., 2005).

2.2.2 Espectroscopía de reflectancia

Es una técnica basada en el estudio del comportamiento de las ondas del campo electromagnético, a través de la energía que es absorbida, reflectada o refractada por un cuerpo sólido. Todo cuerpo que es sometido a efectos de radiación experimenta un fenómeno de reflexión y absorción de energía en función de su estructura atómica. Esto se manifiesta en forma de un gráfico llamado espectro de reflectancia o firma espectral. El espectro electromagnético en la Figura N°02, muestra en forma gráfica las zonas de energía, separadas por tipo y longitud de onda. Algunas de estas zonas son: Rayos gama ($10^{-4}\text{m} - 10^{-10}\text{m}$), Rayos X ($10^{-12}\text{m} - 10^{-8}\text{m}$), Rayos UV ($10^{-8}\text{m} - 10^{-7}\text{m}$). La zona de luz visible (350 nm – 740 nm), Infra rojo (740 nm – 2500 nm), también, el umbral de las microondas, ondas de radio FM y AM, etc.

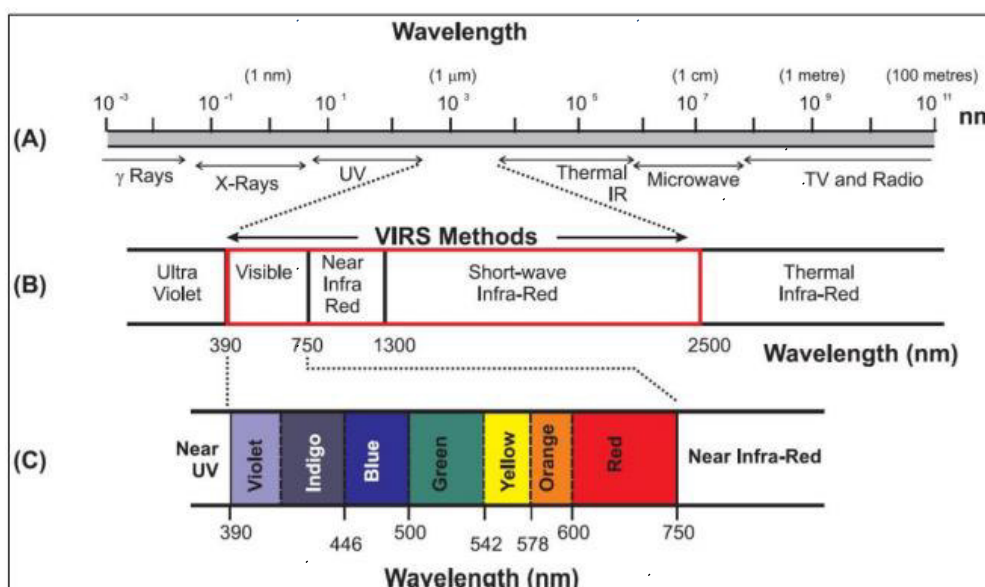


Figura N°02. Región del espectro electromagnético, valores de longitud de onda de VNIR y SWIR.

Fuente: (Hauff P. L., 2005)

La espectroscopía de reflectancia también se define como la técnica que utiliza la energía en las regiones del espectro electromagnético de la luz visible (0.4-0.7 μm), la infrarroja cercana (0.7-1.3 μm) y la infrarroja de ondas cortas (1.3-2.5 μm) para analizar los materiales (Hauff P. L., 2005).

Tanto la absorción y reflexión de energía de una molécula son controladas por características químicas y físicas de la misma, es decir, por su composición, propiedades y distribución de átomos en la estructura cristalina (composición electrónica) y propiedades físicas. Por lo tanto, cada molécula diferente, posee un espectro de absorción y emisión de energía específica (Ostrooumov, 2006).

2.2.2.1 Región del infrarrojo visible y cercano (VNIR).

Existe una gran cantidad de información que se puede obtener de la región VNIR (Visible and Near InfraRed). Las curvas de reflectancia en esta región son causadas por diversos procesos electrónicos como: Efectos de campo de cristal (transiciones de nivel de energía atómica), transferencia de carga (transiciones electrónicas entre elementos), transiciones de banda de conducción (transferencia de electrones sobre niveles de energía espacialmente cercanos) y los centros de color (defecto de celosía en los niveles de energía inducida) (Hauff P. L., 2005).

Gran parte de esto simplemente implica la liberación de energía cuando un electrón cambia de un estado de nivel a otro en un átomo. (Hauff P. , 2008). Estas características hacen que los espectrómetros de rango completo sean muy valiosos y apreciados.

La mayoría de los minerales identificados en esta parte del espectro son de Fe (férrica (Fe^{3+}) y ferrosa (Fe^{2+}), Cu, Mn y Cr:

- Óxidos de Hierro: Hematita, Goetita.
- Silicatos hidroxilados con Fe, como: Clorita, biotita y epidota.
- Sulfatos: Jarosita.

- Carbonatos de Fe y Mn.
- Piroxenos (opx y cpx), olivinos.
- Óxidos y carbonatos de Cu.
- Elementos de tierra raras (observadas en la zona visible).

La Figura N°03 muestra algunos de los cationes que son reconocibles por colores y sus minerales correspondientes, a pesar de que la región VNIR está restringido en el rango electromagnético de 400 a 1300 nm.

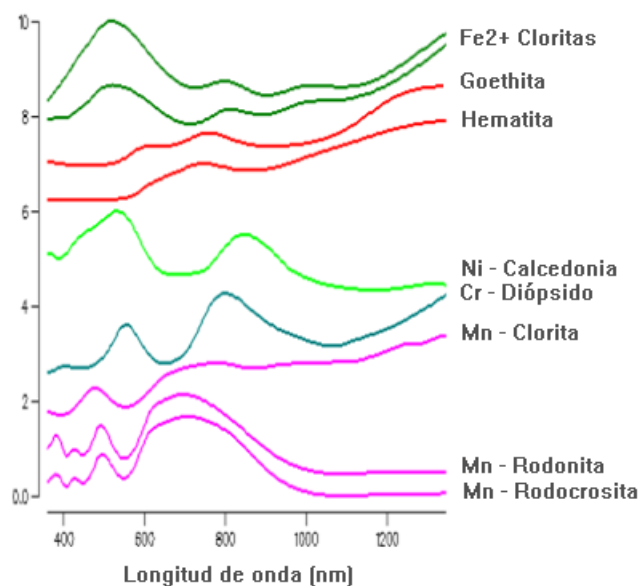


Figura N°03. Cationes – Minerales más comunes que se puede identificar en el rango visible e infrarrojo cercano (VNIR).

Fuente: (Hauff P. , 2008)

Por ejemplo, las cloritas son más detectables en el rango visible porque hay menos interferencia de otras especies en comparación con el rango SWIR, donde su señal suele ser baja, a menos que las cloritas representen la fase dominante.

La Figura N°04 muestran las firmas espectrales de los tres minerales de hierro clásicos más comunes que se encuentran en exploración: jarosita, hematita y goethita (Hauff P. L., 2005).

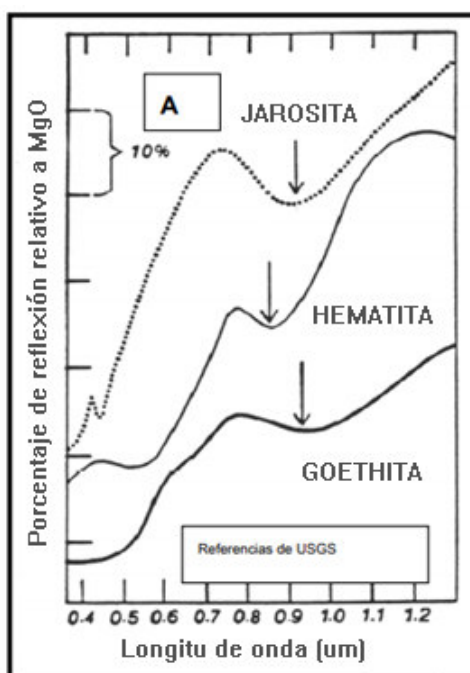


Figura N°04. Firmas espectrales de jarosita, hematita y goethita.

Fuente: (Hauff P. L., 2005)

2.2.2.2 Región de infrarrojo de onda corta (SWIR)

Cuando una muestra es iluminada por la fuente de luz en el espectrómetro, ciertas longitudes de onda de luz son absorbidas por los minerales de la muestra, como resultado de vibraciones submoleculares. Esta vibración es el resultado de la flexión y estiramiento de los enlaces moleculares en los minerales, son una manifestación de la absorción de energía dentro de la red cristalina que proviene de las transiciones entre diferentes estados de vibración. Las posiciones de longitud de onda son determinadas por el catión y la longitud del enlace respectivo, el radio iónico del catión determina la longitud del enlace químico y las moléculas (agua, hidroxilo o carbonato) a las cuales se enlazan (AusSpec International Ltd., 2008).

Los enlaces vibran de modo diferente en ciertas longitudes de onda discretas, dependiendo de sus longitudes. Por lo anterior, es posible usar estas longitudes de onda diferentes para la identificación de los enlaces moleculares. Por ejemplo, el enlace Al-OH se encuentra siempre en la zona de longitud

de onda de 2200 nm; los enlaces de Fe-OH se encuentran entre 2280-2295 nm para las arcillas; los enlaces de Mg-OH y CO₃ se encuentran alrededor de 2334 nm (Hauff P. L., 2005) (Ver Figura N°05).

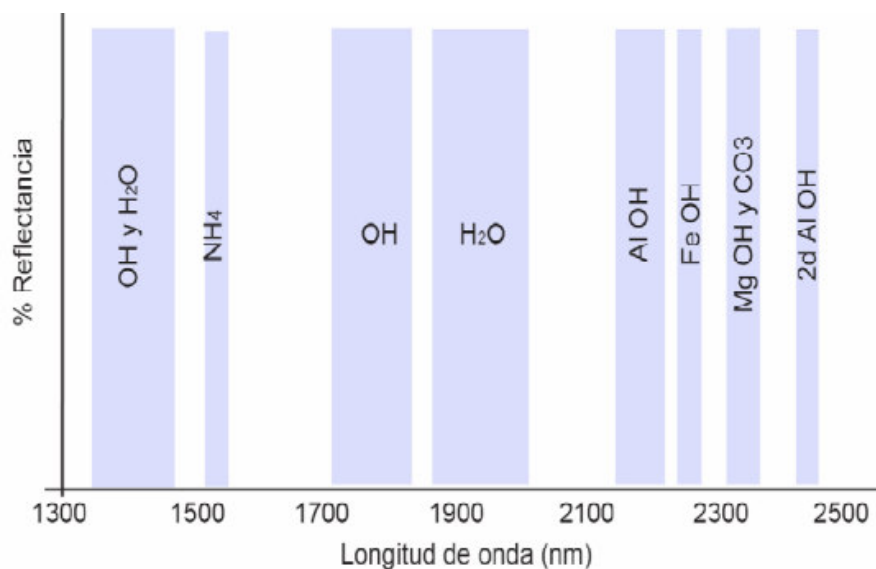


Figura N°05. Posición de la longitud de onda de los enlaces moleculares de los minerales detectados en la zona SWIR.

En la región SWIR, La espectroscopia de reflectancia registra la energía vibracional de algunos enlaces moleculares principales para la caracterización mineralógica (Pontual, Merry, & Gamson, 2008).

- Radicales -OH (Hidroxilos), - NH₄ (Amonio) y -CO₃ (Carbonatos).
- Moléculas de H₂O (Agua).
- Enlaces catión-OH como: Al-OH, Fe-OH y Mg-OH.

Los enlaces moleculares presentan ciertos rasgos de absorción dentro de la región SWIR, los cuales pueden ser usados como una guía general para identificar y determinar el mineral o los grupos de minerales que se encuentran en una muestra (Hauff P. L., 2005) (Figura N°06).

POSICIÓN	MECANISMO	GRUPO MINERAL
~1.4 μm	OH y AGUA	ARCILLAS, SULFATOS HIDROXIDOS, ZEOLITAS,
~1.56 μm	NH_4	SULFATOS DE
~1.8 μm	OH	ESPECIES NH_4
~1.9 μm	WATER	ESMECTITAS
2.02, 2.12 μm	NH_4	ARCILLAS DE
~2.2 μm	AL-OH	ESPECIES NH_4 , SULFATOS, MICAS
~2.29	Fe-OH	Fe-ARCILLAS
~2.31	Mg-OH	Mg-ARCILLAS, CLORITAS
~2.324	Mg-OH	ORGÁNICAS
~2.35 +/- μm	CO_3^{-2}	CARBONATOS
~2.35+	Fe-OH	Fe-CLORITAS

Figura N°06. Principales características de absorción en la zona SWIR.

Fuente: (AusSpec International Ltd., 2008)

2.2.2.3 Componentes espectrales.

La información espectral de reflectancia de los minerales no es más que un gráfico continuo con cambios de pendiente en dos dimensiones, donde los valores en el eje de abscisas corresponden a la longitud de onda, que puede ser expresada en micrómetros (μm) o nanómetros (nm), versus los valores en el eje de ordenadas que son los porcentajes de reflectancia, este gráfico es convencionalmente designado como una "Firma espectral".

La firma espectral consiste en general de una curva envolvente (continuum) y de los rasgos de absorción que tienen posiciones específicas de longitud de onda y de amplitud de bandas. Los rasgos de absorción son mostrados como profundidades mínimas respecto al envolvente general de las curvas, estas profundidades son controladas por la intensidad de las vibraciones de energía presentes en las longitudes de ondas específicas, las cuales son características de cada mineral (Hauff P. L., 2005).

En la Figura N°07 graficamente se muestran los componentes de un espectro como: la envolvente o continuum, las posiciones de las absorciones como valores de las longitudes de onda, los

medios máximos de la anchura completa (FWHM) de los rasgos de absorción y las profundidades de la absorción de dichos rasgos.

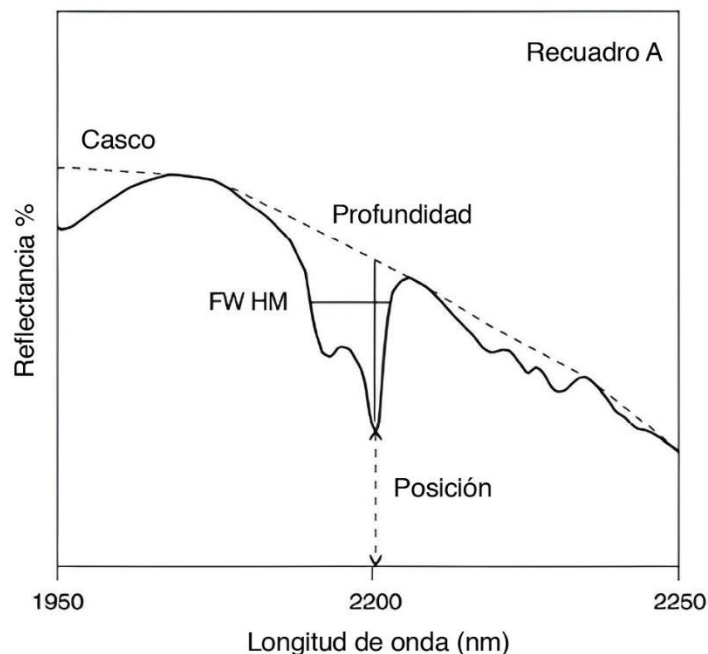


Figura N°07. Rasgos de absorción indicando los nombres de sus componentes.

Fuente: (Thompson, Hauff, & Robitaille, 1999)

Al envoltente, también se le conoce como perímetro exterior, continuum o Hull, es importante porque ayuda a identificar variaciones químicas de un mismo compuesto, debido a la presencia de ciertos elementos que no siempre son visibles o perceptibles dentro de las longitud de onda en la región SWIR, un ejemplo de ello se muestra en la Figura N°08 en el gráfico A, se muestra la presencia del Fe en algún tipo de muestra, ya que este elemento genera una pendiente fuerte y positiva en la envoltente, en el gráfico B, se observa un espectro que carece de Fe debido a que la envoltente se muestra con una pendiente neutra o negativa.

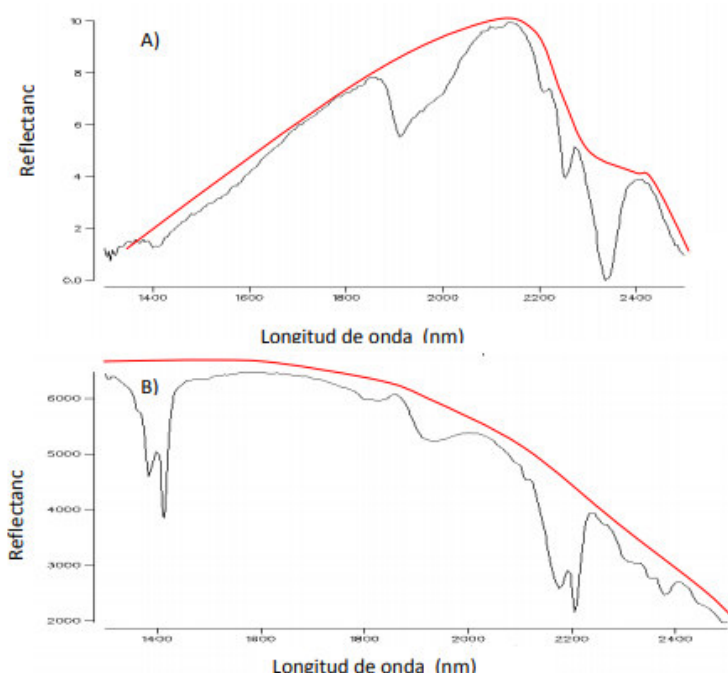


Figura N°08. A) Firma espectral de una biotita. B) Espectro típico de una dickita.

Fuente: (Páez Beltrán, 2008)

El análisis de los rasgos de absorción proporciona una mayor comprensión de la información contenida en el espectro. Los cambios en las posiciones de longitud de onda proporcionan información de sustituciones químicas, múltiples fases presentes y el contenido de agua.

La amplitud total en la mitad del máximo (Full Width at Half Maximum – FWHM) define la amplitud de banda y permite estimar que tan preciso se puede medir un desplazamiento de longitud de onda.

El aspecto de los rasgos de absorción muestra los cambios en la cristalinidad, ayuda en la identificación de los múltiples componentes del espectro y puede proporcionar información acerca de más de una fase presente. (Hauff P. L., 2005). Los rasgos de absorción según su forma y profundidad, pueden ser agudos, dobles y agudos, siempre abiertos, dobles, dobles y abiertos, en forma de hombro, múltiples, etc., como se muestra en la Figura N°09. La forma y profundidad de cada uno de ellos está en función de las características químicas de la molécula del mineral analizado (Páez Beltrán, 2008).

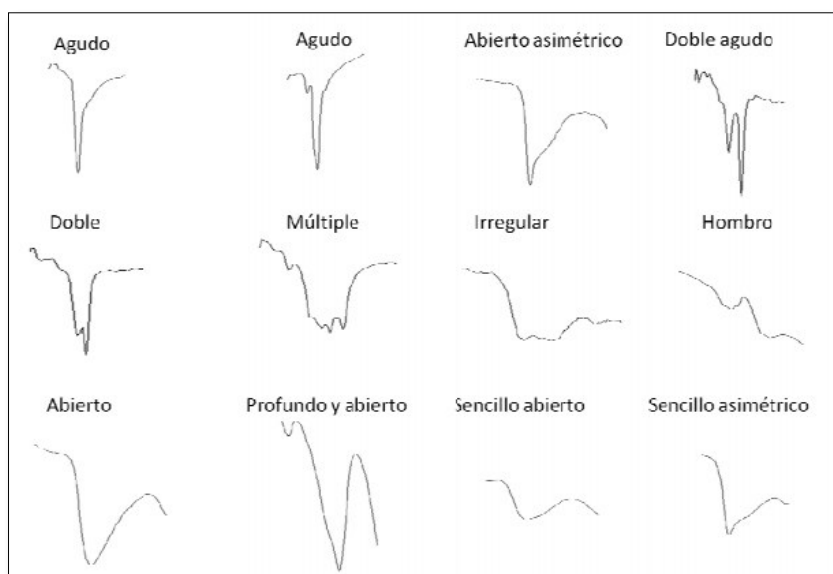


Figura N°09. Principales rasgos de absorción que pueden observarse en una firma espectral.

Fuente: (Páez Beltrán, 2008)

En la Figura N°10 se observa las principales características espectrales, la forma general de la envolvente, diferentes formas de los rasgos de absorción y su posición respecto al eje x, de algunos minerales de alteración individuales como: dickita, caolinita, illita-smectita, pirofilita, jarosita, alunita, sericita y turmalina.

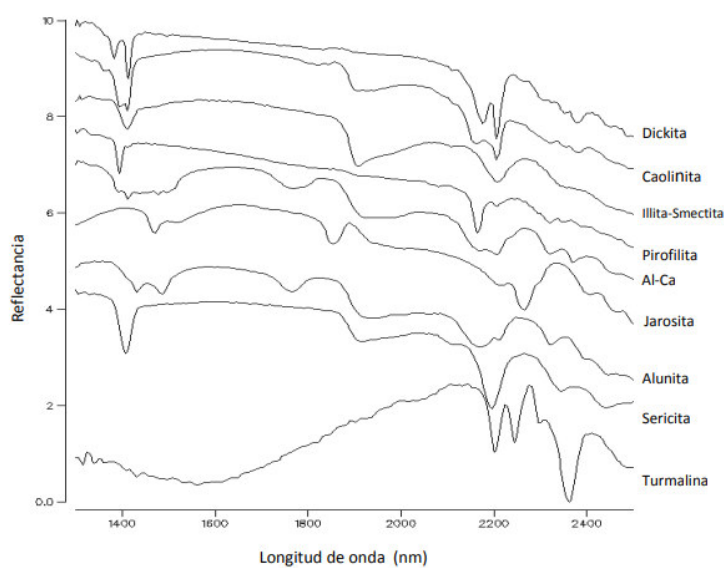


Figura N°10. Serie de espectros que corresponden a diferentes minerales.

Fuente: (Hauff P. , 2008)

La Figura N°11 es el ejemplo de una asociación mineralógica dickita – alunita, los espectros de color rojo hacen referencia a dickita (A) y alunita (C) en muestras puras, el espectro en color azul corresponde al ensamble mineralógica dickita – alunita (B), del cual se puede observar cómo tanto los rasgos de alunita y dickita se encuentran bien definidos y combinados en la muestra.

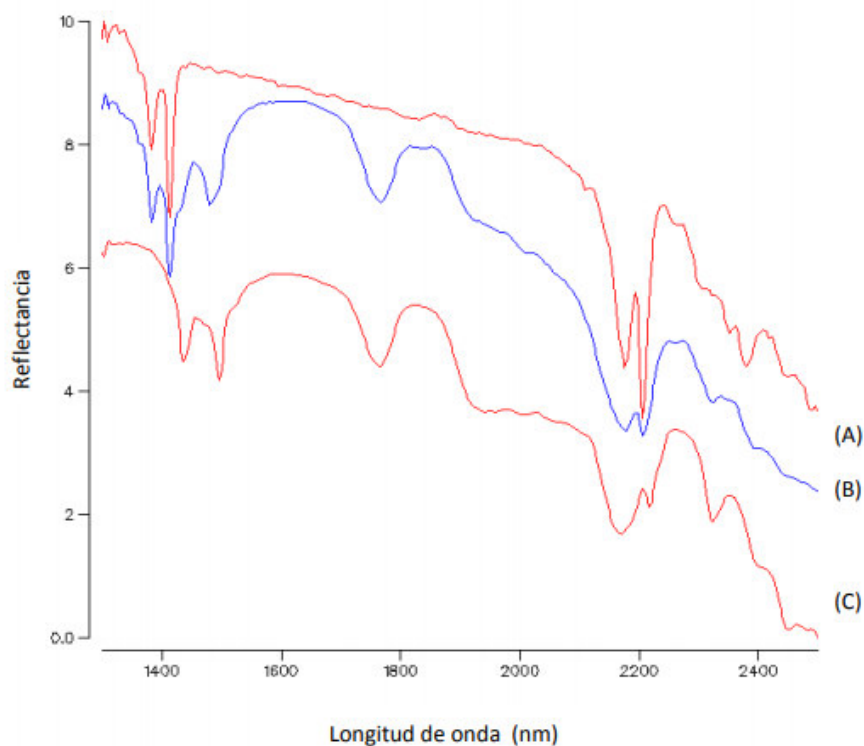


Figura N°11. A) Espectro de la dickita. B) Espectro de la asociación alunita – dickita. C) Espectro de la alunita.

Fuente: (Páez Beltrán, 2008)

Es de suma importancia indicar que las diferentes zonas de alteración en un yacimiento mineral se definen precisamente por los ensambles mineralógicos. Por lo tanto, se puede encontrar en un mismo espectro la combinación de diferentes rasgos de absorción de dos o más minerales. La Tabla N°01 contiene algunos de los minerales activos infrarrojos que se pueden detectar en diferentes tipos de alteración y ambientes de formación.

Tabla N°01. Ejemplos de zonas de alteración definidas por diferentes asociaciones mineralógicas en distintos ambientes de deformación.

Fuente: (Thompson & Thompson, 1996).

Ambiente de formación	Terminología estándar	Ensamble mineralógico activo SWIR (Minerales claves en negrita)
Intrusivo	Potásica (rica biotita), silicato K, biotítico	Biotita (flogopita) , actinolita , sericita , clorita , epidota , moscovita, anhidrita
	Sódico, sódico cálcico	Actinolita , clinopiroxeno (diópsido), clorita, epidota, escapolita
	Fílica, sericítico	Sericita (moscovita-illita), clorita, anhidrita
	Argílica intermedia, sericita-clorita-arcilla, argílico	Sericita (illita-esmectita), clorita , caolinita (dickita), montmorillonita , calcita , epidota
	Argílica Avanzada	Pirofilita , sericita , diáspora , alunita , topacio , turmalina , dumortierita, zunyita
	Greisen	Topacio , moscovita , turmalina
	Skarn	Clinopiroxeno , wollastonita , actinolita-tremolita, vesubiana, epidota, serpentinita-talco, calcita, clorita, illita-esmectita, nontronita
	Propilítica	Clorita , epidota , calcita , actinolita, sericita, arcilla
Epitermal de alta sulfuración	Argílica avanzada - sulfato ácido	Caolinita , dickita , alunita , diáspora, pirofilita, zunyita
	Argílica, argílica intermedia	Caolinita , dickita , montmorillonita , illita-esmectita
	Propilítica	Calcita , clorita , epidota , sericita, arcilla.
Epitermal de baja sulfuración	"Adularia" - sericita, sericítico, argílica	Sericita , illita-esmectita , caolinita, calcedonia, ópalo, montmorillonita, calcita, dolomita
	Argílica avanzada - sulfato ácido (Steam heated)	Caolinita , alunita , cristobalita (ópalo, calcedonia), jarosita
	Propilítica, zeolítico	Calcita , epidota , wairakita , clorita, illita-esmectita, montmorillonita
Mesotermal	Carbonato	Calcita , ankerita , dolomita, moscovita, clorita
	Clorítico	Clorita , moscovita, actinolita
	Biotítico	Biotita , clorita.
Oro alojado en sedimentos	Argílica	Caolinita, dickita , illita
Sulfuros masivos volcanogénicos	Sericítico	Sericita , clorita, cloritoide
	Clorítico	Clorita , sericita, biotita
	Carbonato	Dolomita , siderita , ankerita, calcita, sericita, clorita
Sulfuros masivos alojados en sedimentos	Turmalina	Turmalina , moscovita
	Carbonato	Ankerita , siderita , calcita , moscovita
	Sericítico	Sericita , clorita
	Albitica	Clorita , moscovita , biotita

2.2.2.4 Información espectral

Si bien el objetivo de la espectroscopia de reflectancia es la identificación de los minerales encontrados en diferentes sistemas de alteración, existe más información que se puede obtener a partir de los datos espectrales y que es de gran trascendencia en la interpretación de la información espectral,

como la composición química, la cristalinidad, los efectos del agua, la paragénesis y la temperatura de formación.

- ***Composición química***

La espectroscopía de reflectancia mide la energía de las vibraciones de los enlaces estructurales entre los átomos y las moléculas, dentro de las mismas moléculas, dicha energía cambia en función de las longitudes de los enlaces. Una influencia importante en la longitud de los enlaces son los radios iónicos de los elementos y moléculas, siendo el tamaño del radio iónico único para cada átomo. Por lo tanto, como los átomos de diferentes tamaños ocupan diferentes sitios en la red cristalina, estos tendrán también diferentes longitudes de enlaces con otros componentes de la red cristalina. (Clark, 1999)

En palabras más sencillas, los cationes como Al, Mg, Fe tienen diferentes longitudes de enlace que conectan con moléculas como OH, H₂O, CO₃ y NH₄, adquiriendo así, diferentes posiciones de longitud de onda predecibles y posibles de distinguir dentro de la región SWIR. Estas posiciones de longitud de onda se pueden usar para identificar los enlaces moleculares específicos y por consiguiente las especies minerales. Este fenómeno se observa como pequeños o grandes cambios en la forma de los rasgos de absorción y desplazamientos respecto al eje horizontal. Algunos ejemplos son los carbonatos, cloritas, illitas, alunitas, etc. Los cuales exhiben cambios de longitud de onda con sustituciones de cationes.

En la Figura N°12, se muestra una serie empezando con la clorita con predominancia de magnesio (firma espectral superior) y varias combinaciones de composiciones con Mg, Fe, Al hasta llegar al miembro extremo de Fe (firma espectral inferior). Se puede observar el cambio de posicionamiento de la característica de absorción principal de la clorita.

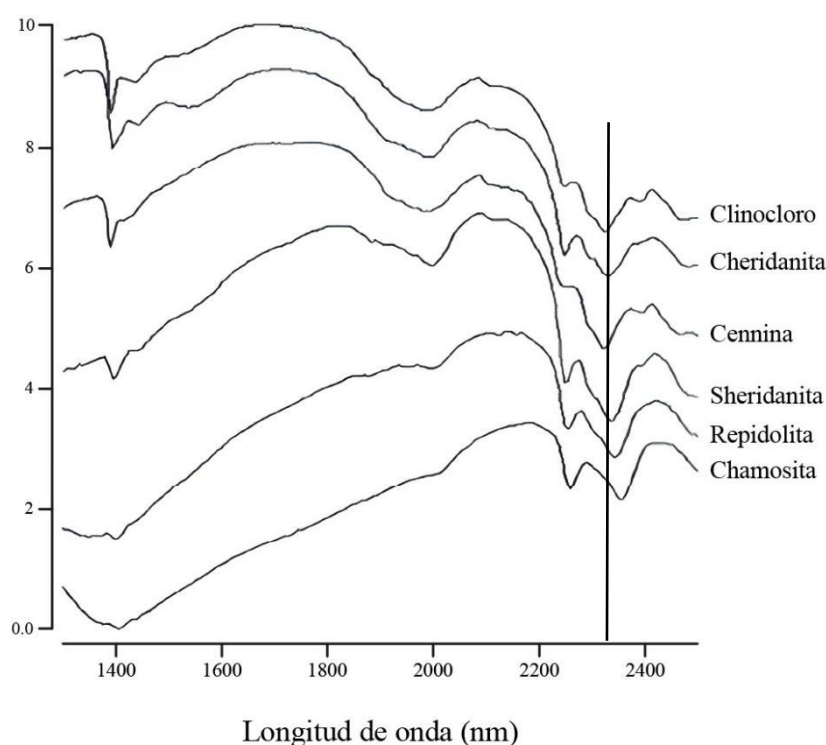


Figura N°12. Referencia espectral de las cloritas Mg → Fe.

Fuente: (Hauff P. L., 2005)

La composición química para las micas blancas está reflejada en la posición de la longitud de onda de la característica de absorción Al-OH, cercana a los 2200 nm (Clark, 1999).

La mica blanca sódica (Paragonita) y la correspondiente Illita paragonítica tienen las características de longitud de onda por debajo de los 2200 nm en el grupo de minerales de mica blanca. Las micas potásicas con alto contenido de sílice y bajo aluminio como las moscovitas e illita, tienen características de 2200 nm que son de longitud de onda intermedia. Mientras que las micas blancas potásicas con bajo contenido de Sílice y alto aluminio como la Fengita y la illita fengítica, tienen las características marcadas con valores mayores a los 2200 nm. Estos cambios en la posición de la característica Al – OH se puede observar en la Figura N°13 y en la Tabla N°02. Conocer las variabilidades químicas es de mucha importancia, ya que ayuda a poder diferenciar las zonas de mayor y menor temperatura.

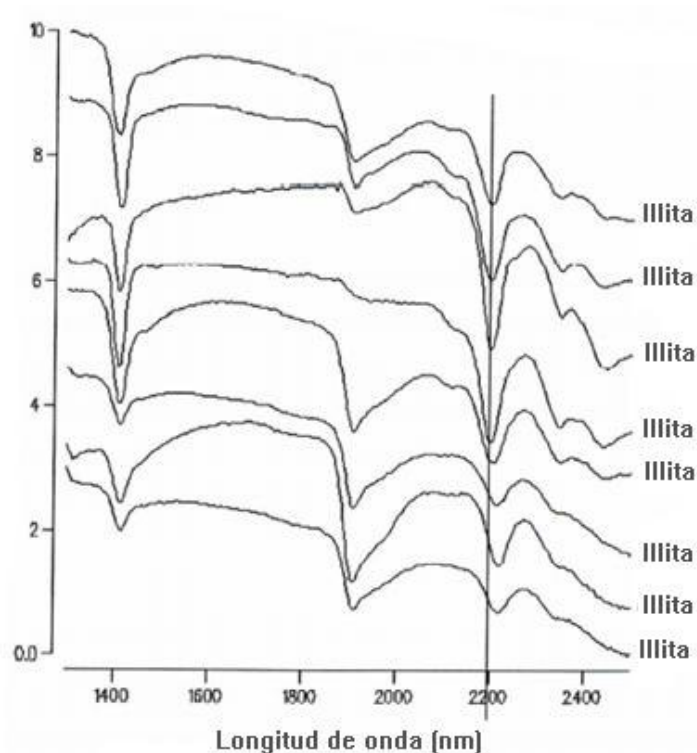


Figura N°13. Firmas espectrales del Grupo de las micas blancas.

Fuente: (AusSpec International Ltd., 2008)

Tabla N°02. Tipos de micas blancas de acuerdo con la posición de la longitud de onda de la característica de absorción Al-OH.

Fuente: (Curtiss, 2014)

PICO DE ABSORCIÓN Al - OH	TIPO DE MICA BLANCA
2180 – 2190 nm	Paragonita
2190 – 2199 nm	Tendencia paragonítica
2200 – 2208 nm	Moscovita
2209 – 2215 nm	Tendencia fengítica
2215 – 2225 nm	Fengita

- **Grado de cristalinidad**

El grado de cristalinidad se puede determinar a partir de los cambios mostrados en la firma espectral de un mineral. Debido a que la espectroscopia de reflectancia mide la energía de los enlaces, siendo bastante sensible a los cambios en el orden de la red cristalina y, por lo tanto, a la cristalinidad. El orden estructural que se observa en un mineral o en las asociaciones mineralógicas en un ambiente

específico puede dar conocimientos útiles sobre la paragénesis, la alteración y la meteorización natural que influye en tal ambiente.

Cuando los enlaces moleculares tienen una longitud regular y los átomos llenan los sitios de la red cristalina en secuencias fáciles de predecir y de repetir, se aumenta el orden en el cristal. Las firmas espectrales manifiestan esto con perfiles bien definidos en los rasgos de absorción y con valores de reflectancia altos. Si la estructura cristalina se vuelve desordenada, las firmas espectrales se muestran con rasgos de absorción anchos y poco profundos (Clark, 1999).

En la Figura N°14 se observa en las firmas espectrales superiores los dobletes de la caolinita en las regiones de 1400 y 2200 nm bien definidos, a diferencia de las firmas espectrales inferiores, que se van ablandando y ensanchando, esto debido a que disminuye el orden en la estructura cristalina. También se observa en la región de 1900 nm, como en la curva espectral se va generando un pico de absorción a medida que la cristalinidad va decreciendo.

Los cambios en el orden de la estructura cristalina se manifiestan al generarse un cambio gradual en la firma espectral. En la Figura N°15 se observa una versión de la Figura N°14 a una escala más grande en la región 2200 nm, se observa el doblete de la Caolinita que se vuelve más suave y ancho, cambiando de un mínimo agudo y bien definido a una inflexión amplia, esto debido a la cristalinidad decreciente.

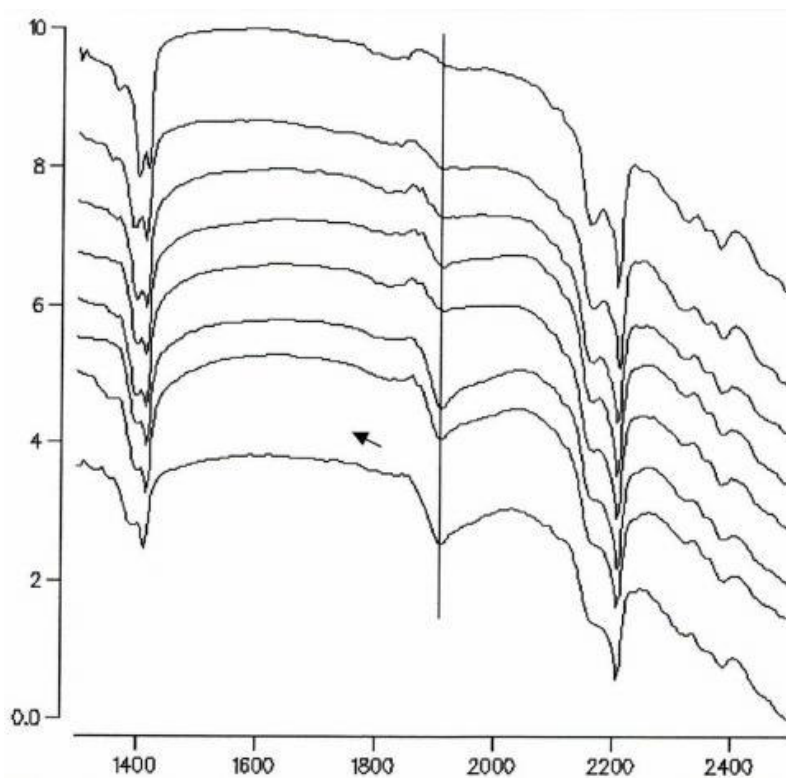


Figura N°14. Caolinitas ordenadas en forma decreciente respecto al orden estructural.

Fuente: (Hauff P. L., 2005)

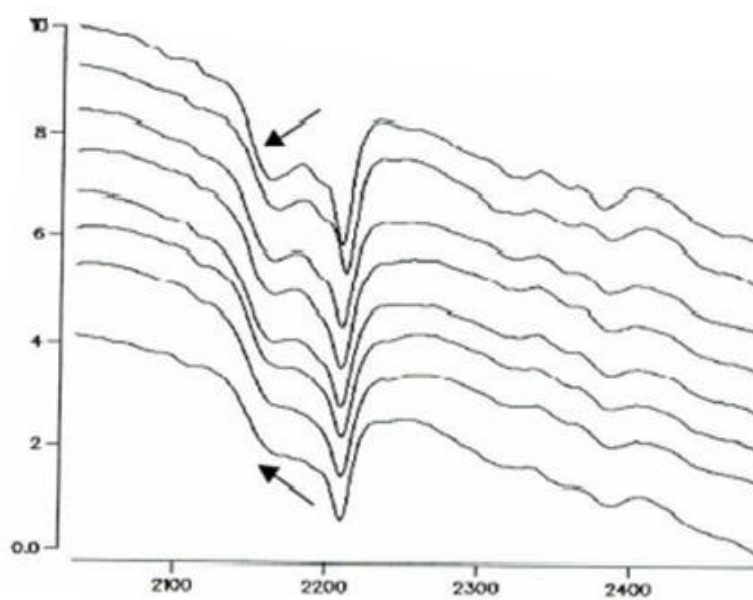


Figura N°15. Vista extendida de la Figura N°14.

Fuente: (Hauff P. L., 2005)

La cristalinidad también cambia cuando la acción del intemperismo se ve incluida en una estructura mineral, ya que la degrada o crea otra fase. En la Figura N°16 hay cuatro pares de espectros. El primer espectro en cada par corresponde al interior de la roca no afectada por meteorización, mientras que el otro espectro corresponde al lado exterior, afectado por la intemperización.

El primer par de espectros superiores muestran dos illitas. El rasgo de agua es más grande en los 1900 nm, dado que el intemperismo también deposita sílice en la superficie expuesta de la roca. Los rasgos de absorción agudos son más pequeños y menos evidentes y todos son más anchos. El segundo par de espectros muestran más degradación. Aumenta la sílice en la superficie de la roca y suprime los rasgos de la illita. Esto se nota por el desplazamiento del rasgo de absorción de 2200 nm. El tercer par de espectros muestran un cambio más radical. La illita ha sido degradada a esmectita. El último par de espectros muestra los cambios en la cristalinidad de la caolinita, debido a desgastes por meteorización. (Hauff P. L., 2005).

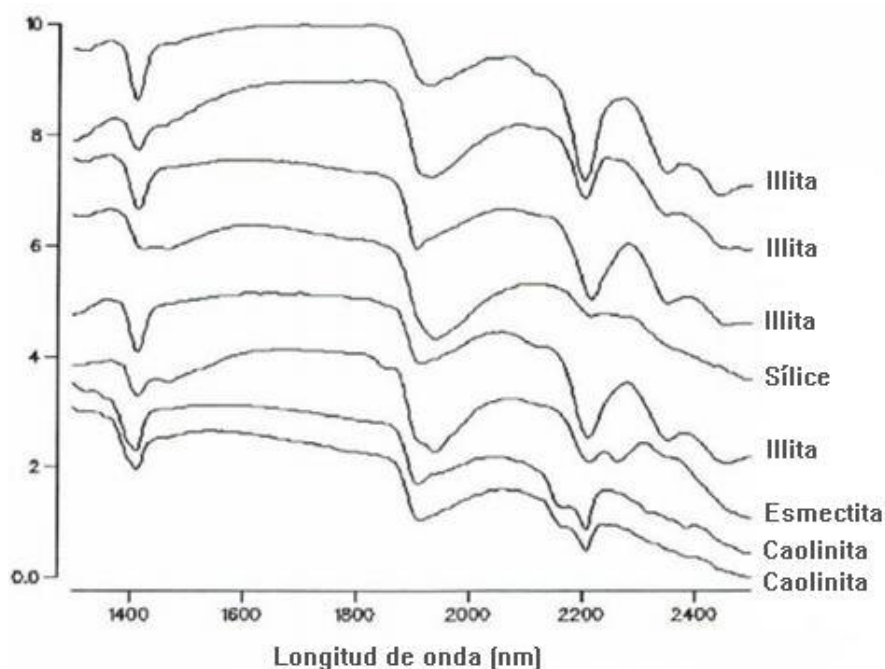


Figura N°16. La cristalinidad afectada por meteorización.

Fuente: (Hauff P. L., 2005)

- **Paragénesis y el agua**

Los perfiles espectrales también brindan información relacionada con la paragénesis e indirectamente, con la temperatura. En la Figura N°17, en los espectros superiores las características de absorción se muestran amplias y abiertas, como las que se encuentran en las esmectitas, zeolitas y minerales de sílice, indicando ambientes de temperaturas bajas. A medida que el perfil se agudiza y se vuelve bien definido, como en las moscovitas, pirofilita, epidota y dickita, la temperatura de formación aumenta y la red cristalina se ordena en un entorno de alta energía (Hauff P. , 2008).

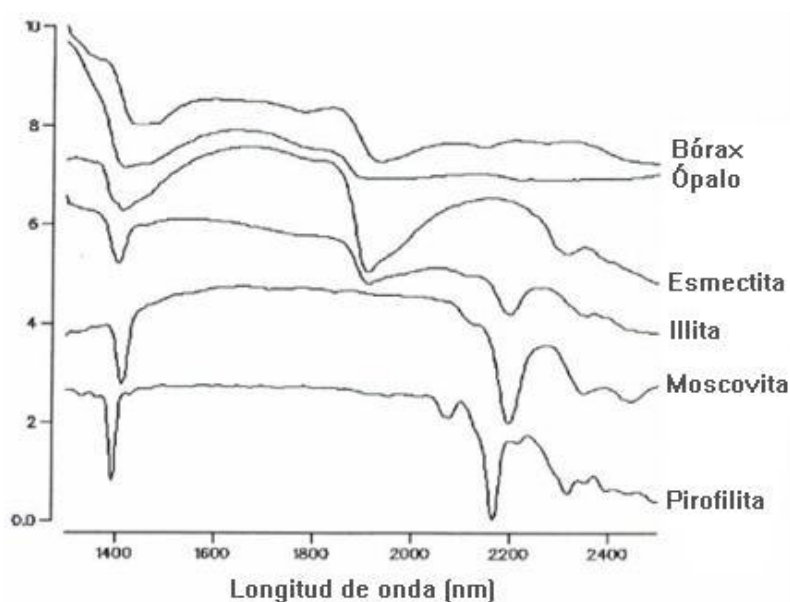


Figura N°17. Firmas espectrales en función del orden en la red cristalina, desde esmectitas de baja temperatura hasta micas y pirofilita de temperaturas más altas.

Fuente: (Hauff P. L., 2005)

2.2.2.5 Factores por considerar al evaluar los espectros

Al realizar el análisis de espectrometría en una muestra, es de suma importancia tomar en cuenta ciertos factores, ya que de ellos dependerá, que tan confiables resulten las firmas espectrales para su interpretación:

- ✓ La presencia de Hierro.
- ✓ Baja reflectancia.
- ✓ Efectos de la transparencia.
- ✓ Tamaño de partículas.
- ✓ Presencia de agua en superficie.

Todos estos factores tienen influencia sobre la forma de la firma espectral resultante. Todos estos parámetros deben ser considerados cuando se evalúe el espectro.

- ***Presencia de Fe en la red cristalina***

El Hierro - Fe contenido en la red cristalina causa ruido, baja reflectancia y afecta la firma espectral. Generalmente produce una pendiente positiva y un desorden en el espectro y, además, puede enmascarar rasgos espectrales de otros componentes no férricos. (Hauff P. L., 2005).

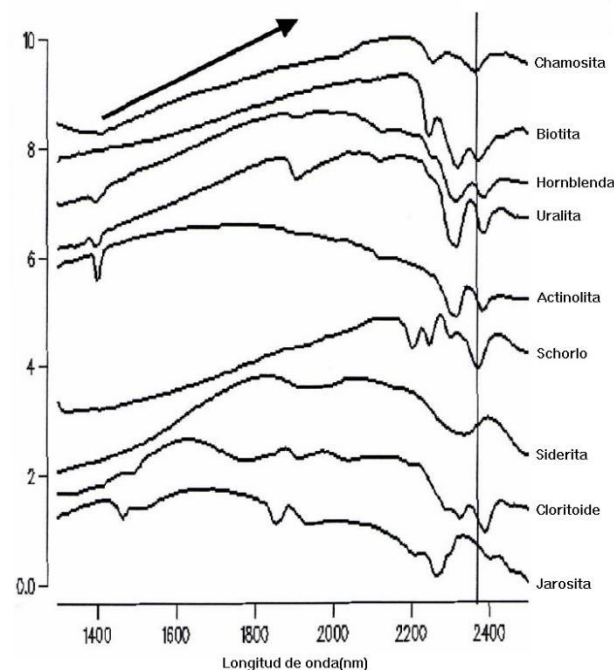


Figura N°18. Firmas espectrales de algunos minerales de hierro.

Fuente: (Hauff P. L., 2005)

- **Baja reflectancia**

La baja reflectancia puede ser causada por una muestra oscura o una muestra con un bajo contenido de material reflectante. Para minerales de baja reflectancia, el reconocimiento puede requerir un 20% o más del mineral en la muestra (Hauff P. L., 2005).

- **Efectos de la transparencia**

Los minerales que presentan cierta transparencia como el cuarzo y la calcita dejan pasar la luz que emite el espectrómetro, ante esto es necesario colocar un reflector metálico detrás de dichos minerales, el cual refleja la energía en dirección al detector del espectrómetro. En la Figura N°19, la firma espectral (A) representa el análisis de un cristal que deja pasar la luz, la (B) es el resultado de colocar la mano detrás del cristal, la (C) de colocar un trozo de tela negra detrás del cristal y la mejor firma espectral es la (D), cuando se puso un reflector metálico detrás del cristal, el cual refleja la energía en dirección al detector del espectrómetro (Páez Beltrán, 2008).

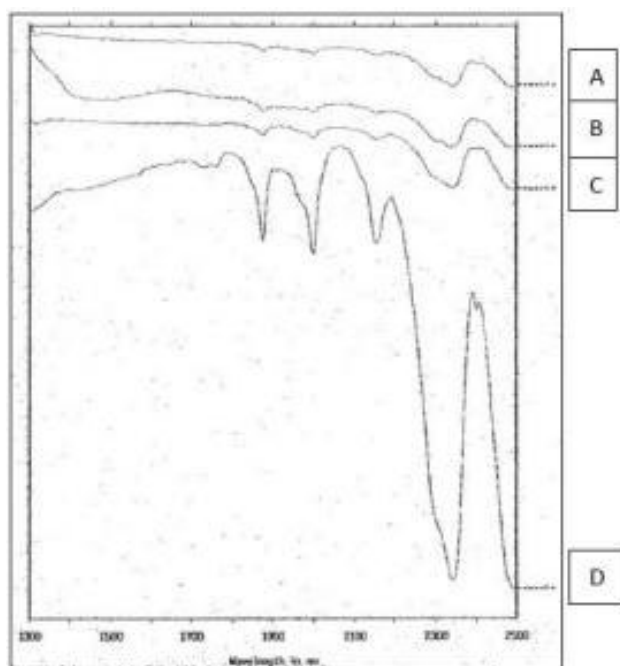


Figura N°19. Los efectos de la transparencia en la reflectancia.

Fuente: (Páez Beltrán, 2008)

- **Presencia de agua superficial**

El agua se considera un problema importante con relación a los cambios de aspecto de una firma espectral, ya que el agua superficial produce un aspecto redondeado en los rasgos de las zonas de absorción de 1400 nm y 1900 nm, Asimismo, el agua puede suprimir rasgos de absorción y afectar a toda la región SWIR, para una buena evaluación, la muestra se debe de encontrar seca. Se debe considerar que el agua cambia las firmas espectrales de un mineral en forma diferente, por esta razón, es muy importante entender como la presencia del agua repercute en cada componente. En la Figura N°20 se muestra 3 espectros en relación con el contenido del agua, pero en diferentes concentraciones. La firma espectral (A) representa una caolinita de un terreno mojado, la (B) representa el agua líquida y la (C) representa a la misma caolinita evaluada en (A), pero que ha sido secada. Se observa que la firma espectral del agua enmascara la firma espectral de la caolinita y degrada la aparente “cristalinidad” de esta y disminuye la intensidad de la firma espectral por completo. (Hauff P. L., 2005)

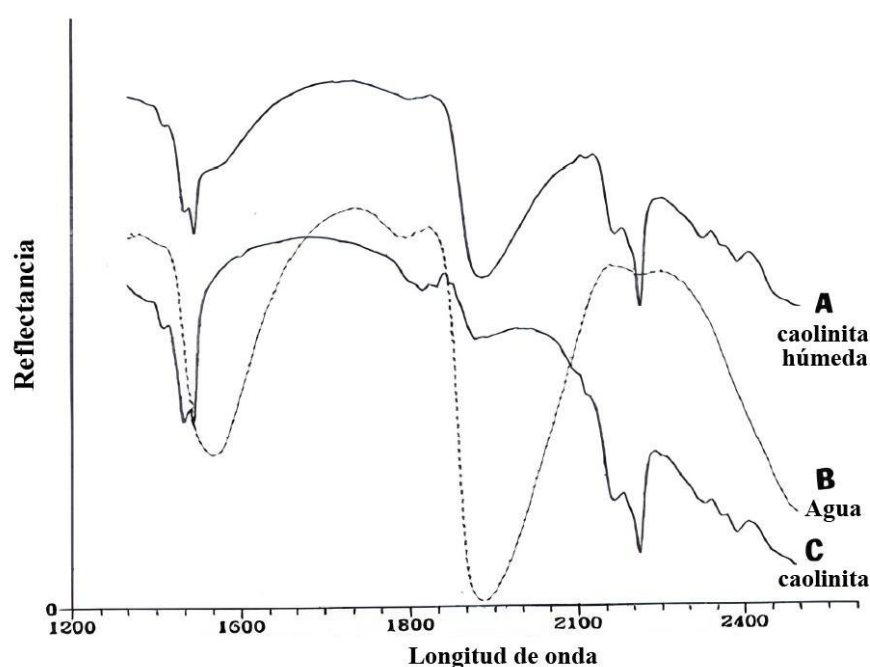


Figura N°20. Firmas espectrales con diferentes concentraciones de agua.

Fuente: (Hauff P. L., 2005)

- **Efectos del tamaño del grano**

La cantidad de luz dispersada y absorbida por un grano depende de su tamaño. Es el reflejo de las superficies y las imperfecciones internas lo que controla la dispersión. Por eso, en una muestra con granos más grandes, los caminos internos son mayores, los fotones pueden ser absorbidos, pero en una muestra con granos más pequeños, la superficie genera más reflejos, en otras palabras, la relación superficie-volumen está en función del tamaño de grano, donde la reflectancia disminuye a medida que aumenta el tamaño del grano (Clark, 1999).

En la Figura N°21 se muestra el espectro de reflectancia del piroxeno en función del tamaño del grano, a medida que aumenta el tamaño del grano, se absorbe más luz y la reflectancia decae.

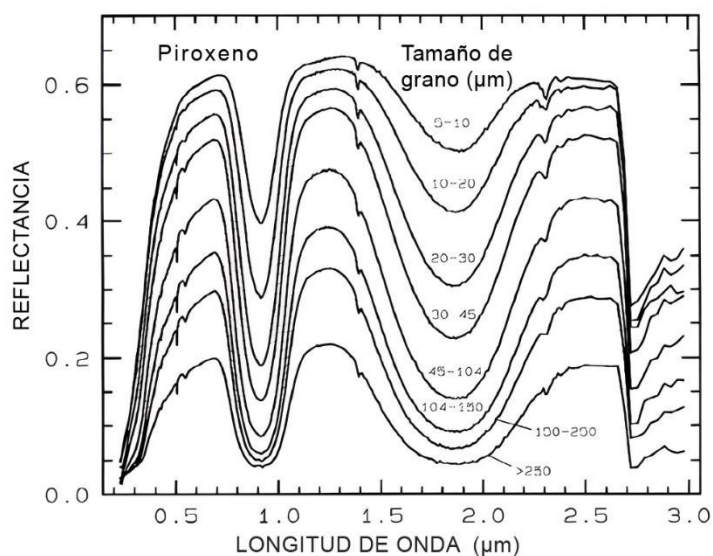


Figura N°21. Firmas espectrales de Piroxeno en relación con el tamaño de grano.

Fuente: (Clark, 1999)

2.2.3 Espectrómetros portátiles de campo

Los geólogos que usaban sensores remotos impulsaron el desarrollo inicial de espectrómetros portátiles de campo, los cuales fueron particularmente útiles para la exploración minera.

El desarrollo de los espectrómetros portátiles de campo comenzó en el año 1978, siendo las primeras versiones de campo las correspondientes a la serie GER (Geophysical Environmental Resources) de Millbrook, New York. Estas se desarrollaron utilizando iluminación solar; sin embargo, el problema siempre fue la iluminación solar, ya que las correspondientes bandas de interferencia enmascaraban los componentes vitales y las características de absorción en los espectros de los minerales.

A principios de la década de los 90, con la introducción de la fuente de luz interna, se logró mejoras con el desarrollo del espectrómetro de campo llamado PIMA (Portable Infrared Mineral Analyzer) por Integrated Spectronics Pty. Ltd. (ISPL), con el concepto de portabilidad, sin embargo, hoy en día, este espectrómetro se encuentra en desuso debido a que la empresa dejó de fabricarlo y actualizarlo.

En el año 2004, Malvern Panalytical (Anteriormente Analytical Spectral Devices, Inc.) presentó la línea TerraSpec con un diseño flexible e innovador específicamente para la minería, lo que llevó a la recolección de los datos de manera más rápida en el campo. En la actualidad es posible encontrar los espectrómetros portátiles de campo como: TerraSpec Hi-Res 4 y TerraSpec Halo.

Los espectrómetros son instrumentos ópticos que se utiliza para medir las propiedades de la luz sobre una porción específica del espectro electromagnético, en espectroscopía se utilizan los espectrómetros para producir líneas espectrales y medir sus longitudes de onda e intensidades. La calidad del espectro de reflectancia medido depende del tipo de espectrómetro utilizado (Dalm, 2011).

Para la aplicación de la espectroscopia, un espectrómetro se define generalmente por 4 parámetros (Clark, 1999), tales como:

- ✓ Rango espectral
- ✓ Ancho de banda espectral

- ✓ Muestreo espectral
- ✓ Relación señal / ruido

El rango espectral de un espectrómetro es el rango de longitud de onda sobre el que se mide las reflexiones.

El ancho de banda espectral se define como el ancho de un canal individual en el espectro y está relacionado a la resolución espectral, ya que está definida por el número de bandas espectrales de un espectrómetro. Por eso a mayor número de bandas y menor ancho de bandas se obtendrá una mejor resolución espectral. (Clark, 1999)

El muestreo espectral se define como la distancia entre los pasos de banda de dos canales individuales en función de la longitud de onda. (Clark, 1999)

Finalmente, la precisión del espectro se caracteriza por la relación señal/ruido. La relación señal/ruido es la relación entre la intensidad de las absorciones de la señal que son causadas por las vibraciones de los enlaces moleculares y las absorciones del ruido que son causadas por la absorción de fondo. La relación señal/ruido depende del ancho de banda espectral y del muestreo espectral del espectrómetro y de la intensidad de la absorción de fondo por el material medido (Clark, 1999)

En la Tabla N°3 se presenta un resumen de las especificaciones técnicas del espectrómetro TerraSpec Halo.

Tabla N°03. Especificaciones técnicas del TerraSpec Halo.

Fuente: (Analytical Spectral Devices Inc., 2017)

PARÁMETROS	CARACTERÍSTICAS
Rango de longitud de onda	350 – 2500 NM
Resolución espectral	3 nm a 700 nm 9.8 nm a 1400 nm 8.1 nm a 2100 nm
Número de bandas	2151 bandas (VNIR – SWIR)
Reproducibilidad de la longitud de onda	+/- 0.1 nm (líneas de calibración de la longitud de onda de desviación estándar promedio.)
Exactitud de longitud de onda	+/- 0.5 nm (ajuste de calibración de la longitud de onda de error promedio; +/- 1.0 nm para cualquier línea)
Relación señal-ruido	VNIR: 9000:1 a 700 nm SWIR 1: 9000:1 a 1400 nm SWIR 2: 4000:1 a 2100 nm
Detector VNIR (350 a 1000 nm)	Matriz de silicio de 512 elementos
Detector SWIR (1001 a 1785 nm)	Fotodiodo InGaAs, Te enfriado

2.2.3.1 TerraSpec Halo

El espectrómetro TerraSpec Halo fue elaborado a fines del año 2013, siendo el último instrumento de espectroscopia desarrollado por la empresa Malver Panalytical de Reino Unido. Es un espectrómetro de rango completo que mide las regiones infrarrojas visible e infrarrojo cercano (VNIR: 350 a 1300 nm) y de onda corta (SWIR: 1300 a 2500 nm), es utilizado para identificar rápidamente los minerales de alteración, utilizando una medición de contacto no destructiva. En un solo análisis, la tecnología del instrumento proporciona predicciones multiminerales de hasta siete minerales (Analytical Spectral Devices Inc., 2017).

Este instrumento trabaja con una fuente de luz interna, lo que permite la recopilación de datos en el campo con calidad de laboratorio, mediante la iluminación directa en diferentes tipos de muestra tales como muestras de mano, de sondaje, de aire reverso y de pulpa. Además, su calibración interna

automatizada da como resultado espectros fiables que no están sujetos a variabilidad debido a las condiciones en las que se midieron.

El área de contacto, en el TerraSpec Halo, mide aproximadamente 3 cm², esta contiene la fuente de luz interna utilizada para las mediciones de reflectancia y a la vez, para recoger la luz reflejada de un área determinada de la muestra.

En la Figura N°22, se muestra la vista lateral y posterior del TerraSpec Halo, también se logra apreciar la pantalla en la cual se observan los resultados después de la toma de datos.



Figura N°22. Espectrómetro TerraSpec Halo. Vista lateral y posterior.

Debido a la pantalla integrada que contiene el TerraSpec Halo es posible visualizar los resultados de los minerales identificados, los escalares y las gráficas espectrales. Así mismo, los resultados mostrados en la pantalla incluyen hasta 4 minerales detectados en la muestra, junto con un indicador del nivel de fiabilidad de la predicción, que se muestran de la siguiente manera en el TerraSpec Halo (Analytical Spectral Devices Inc., 2017):

- ✓  Tres estrellas: Nivel de fiabilidad alto, superior al 90% de fiabilidad de que el mineral se encuentre en la muestra.
- ✓  Dos estrellas: nivel de fiabilidad moderado, 60 al 90% de fiabilidad de que el mineral se encuentre en la muestra.
- ✓  Una estrella: nivel de fiabilidad bajo, menos del 60% de fiabilidad de que el mineral se encuentre en la muestra.

El TerraSpec Halo utiliza algoritmos actualizados para identificar minerales espectralmente activos que podrían estar presentes en las muestras. La puntuación de estrellas proporciona cierto grado de confianza en la toma de datos, si solo se tuviera resultados de dos o una estrella es probable que sea necesario procesar la data en un programa de validación para confirmar la presencia del mineral detectado por el TerraSpec Halo.

Cuando se realiza la toma de datos, cabe la posibilidad que en la pantalla del TerraSpec Halo se muestre el mensaje “Sin coincidencia”, esto significa una de las siguientes opciones:

- ✓ La muestra es espectralmente activa, pero el mineral no está en la biblioteca, ya que el TerraSpec Halo incluye su propia biblioteca espectral de minerales de alteración.
- ✓ La muestra no es espectralmente activa (muestra fresca sin alteración).

Cuando esto sucede se debe de utilizar un programa de validación e interpretación para analizar detalladamente la firma espectral y definir que mineral se trata o en peor de los casos, si se trata de un mineral.

Al momento de utilizar el TerraSpec Halo para la toma de datos, se requiere que las muestras estén, limpias, que no presente residuos orgánicos, oxidación en la superficie, revestimiento de minerales, ni humedad excesiva (secas). Los residuos orgánicos producen un espectro propio y pueden

ocultar los minerales que recubren. Del mismo modo, la presencia de recubrimiento de oxidación puede enmascarar los minerales que se encuentra en la parte interior evitando una interpretación adecuada de dichos minerales. También se debe tener mucho cuidado con las marcas realizadas en las muestras, ya que la tinta posee su propia firma espectral.

- ***Características del TerraSpec Halo***

- ✓ Tiene una pantalla integrada, en la cual se puede visualizar los resultados y las gráficas espectrales inmediatamente después de realizar la lectura en una muestra.
- ✓ Contiene un programa de identificación de minerales que permite obtener resultados multiminerales y los escalares espectrales que brindan información adicional.
- ✓ Cuenta una amplia biblioteca espectral de minerales, lo que permite visualizar los espectros directamente en el instrumento.
- ✓ Los resultados obtenidos son fáciles de exportar a cualquier computador con ayuda del programa de gestión Halo Manager.
- ✓ Un análisis suele tardar aproximadamente 40 segundos.
- ✓ El alcance obtenido con el TerraSpec Halo sobre la muestra es puntual.



Figura N°23. Características técnicas del TerraSpec Halo.

- ***Biblioteca espectral de minerales***

El espectrómetro TerraSpec Halo contiene su propia biblioteca espectral de minerales, la cual es utilizada para realizar la comparación de las firmas espectrales obtenidas al momento de realizar la toma de datos, de acuerdo con esta comparación brinda como resultados predicciones multiminerales, con su respectivo nivel de confianza.

En la Tabla N°04 se muestra la lista de los minerales incluidos en la biblioteca espectral del TerraSpec Halo. Mucho de los minerales mencionados tienen múltiples ejemplos que representan mejor la diversidad de ambientes geológicos y sustituciones elementales que pueden presentarse en estos ambientes variados. Algunos minerales incluyen más de diez muestras diferentes (Analytical Spectral Devices Inc., 2017).

Tabla N°04. Biblioteca espectral de minerales en el TerraSpec Halo.

Fuente: (Analytical Spectral Devices Inc., 2017)

Biblioteca de minerales – VNIR				
Alabandita	Bastnasita	Dioplasa	Enargita	Goethita
Grunerita	Hematita	Jarosita	Monacita	Estibina
Apatito de tierras raras				
Biblioteca de minerales – SWIR				
Actinolita	Alietita	Alevarrita	Ambligonita	Analcima
Ankerita	Annita	Antofilita	Antigorita	Apofilita
Aragonito	Arfvedsonita	Astrofillita	Axinita	Azurita
Bastnasita	Beidellita	Berilo	Biotita	Bórax
Brochantita	Brucita	Buddingtonita	Calcita	Cancrinita
Carlosturanita	Cerusita	Cabasita	Calcantita	Cloritoide
Crisocola	Clinocloro	Clinocrisotilo	Clinohumita	Clinoptilolita
Clinozoisita	Colemanita	Cookeíta	Coquimbita	Cordierita
Corrensita	Cummingtonita	Datolita	Diásporo	Dickita
Dioplasa	Dolomita	Eckermannita	Endelia	Epidota
Clorita-Fe	Clorita-FeMg	Clorita-Mg	Ferroactinolita	Gedrita
Gibbsita	Glaucónita	Glaucófana	Gmelita - Na	Grunerita
Yeso	Halloysita	Harmotoma	Hastingsita	Hectorita
Hemimorfita	Heulandita	Hornblenda	Howlita	Humita
Hidrobiotita	Hidromagnesita	Hidrocincita	Illita/esmectita	Ferrosaponita
Esmectita ferrosa	Jarosita	Kaersutita	Alunita potásica	Caolinita PX
Caolinita WX	Illita potásica	Kutnohorita	Laumontita	Lazulita
Lepidolita	Lizardita	Hastingsita	Riebeckita	Magnesita
Malaquita	Margarita	Mesolita	Illita-Mg	Monacita

Montebrasita	Montmorillonita	Moscovita	Nacrita	Illita sódica
Natrojarosita	Natrolita	Nefrita	Esmectita-HN3	Nontronita
Ortocrisotilo	Palygorskita	Paragonita	Pargasita	Penninita
Fengita	Phillipsita-Ca	Flogopita	Portlandita	Prehnita
Pirofilita	Rectorita	Rodocrosita	Riebeckita	Roscoelita
Saponita	Chorlo	Sepiolita	Siderita	Smithsonita
Estevensita	Estibita	Estilpnomelana	Estroncianita	Talco
Thomsonita-Ca	Topacio	Turmalina	Tremolita	Turquesa
Vermiculita	Vesubianita	Wavellita	Witherita	Zoisita

En casos particulares, se podría optar por bibliotecas personalizadas, ya que pueden ser de mayor utilidad para representar mejor un ambiente específico. Una de las ventajas principales del espectrómetro TerraSpec Halo es que tiene la capacidad de cargar bibliotecas personalizadas, además de esto, la lista de minerales puede ser actualizada.

- ***Escalares espectrales***

Los escalares espectrales son resultados computados a partir del espectro de reflectancia que describe algunas propiedades del mineral detectado, los escalares proporcionan información acerca de la cristalinidad y/o de la composición, sirven como vectores adicionales para la mineralización potencial (Analytical Spectral Devices Inc., 2017).

En la Tabla N°05 se presenta una descripción de los 9 escalares espectrales reportados por el TerraSpec Halo.

Tabla N°05. Escalares espectrales informados por el TerraSpec Halo.

Fuente: (Analytical Spectral Devices Inc., 2017)

Nombre	Descripción	Cómo se calcula	Cuando se informa
Al-OH	Muchos minerales que contienen Al-OH tienen variaciones sutiles de composición que son indicativas de la química de los fluidos presentes en el momento del evento de alteración. Puesto que estas variaciones de composición producen cambios de longitud de onda de la característica de absorción de Al-OH cerca de los 2200 nm, la posición de la longitud de onda de esta función es un indicador de las condiciones geoquímicas en el momento del evento de alteración.	El valor del escalador Al-OH es la longitud de onda de la reflectancia mínima del espectro normalizado en el rango de 2180 a 2230 nm.	Es escalador Al - OH se informa cada vez que Halo detecta un mineral que tiene un enlace de Al-OH en estructura.
Kx	La caolinita es producida por eventos climáticos y eventos de alteración. La cristalinidad de la caolinita está fuertemente influenciada por la temperatura de los fluidos al momento de su formación. $Kx > 1$ indican que la caolinita es producida a la intemperie, mientras que $K < 1$ están generalmente asociados con los eventos de alteración de temperatura más altas; cuanto menor es el valor de Kx, mayor es la temperatura de formación.	El valor del escalador Kx es la relación de los valores de reflectancia mínima del espectro normalizado en los 2160 nm con 2177 nm.	El escalador de Kx se informa cada vez que Halo detecta un mineral del grupo del Caolín.
Madurez espectral de la illita (ISM, por sus siglas en inglés)	Los filosilicatos del grupo de la illita-moscovita se producen en un amplio rango de condiciones geoquímicas. Con el grado de metamorfismo en aumento, el espectro de reflectancia de estos minerales indica una pérdida de agua molecular junto con un aumento en la cristalinidad. Los valores de $ISM > 1$ indican illita con bajo grado de metamorfismo, mientras que $ISM < 1$ están asociados con los producidos por eventos de alteración de temperaturas más altas; cuanto menor es el valor de ISM, mayor es la temperatura de alteración.	El valor del escalador ISM es la relación del valor de reflectancia del espectro normalizado en la característica de absorción de Al-OH dividida por el valor de reflectancia del espectro normalizado en la característica de absorción de agua	El escalador ISM se informa cada vez que Halo detecta un mineral del grupo de las illitas.
Madurez espectral de la clorita (CSM, por sus siglas en inglés)	Los minerales del grupo de la clorita se producen en un amplio rango de condiciones geoquímicas. Con el grado de metamorfismo en aumento, el espectro de reflectancia de estos minerales indica una pérdida de agua molecular junto con un aumento de la cristalinidad. Los valores escalares de $CSM > 1$ indican cloritas con bajo grado de metamorfismo, mientras que $CSM < 1$ están asociados con eventos de alteración de temperatura más altas; cuanto menor es el valor CSM, mayor es la temperatura de alteración.	El valor del escalador CSM es la relación de una suma de los valores del espectro normalizado en la característica de absorción de Mg-OH y de Fe-OH dividida por el valor de reflectancia del espectro normalizado en la característica de absorción de agua.	El escalador CSM se informa cada vez que Halo detecta un mineral del grupo de la clorita.

Mg-OH	Muchos minerales que contienen Mg-OH tienen variaciones sutiles de composición que son indicativas de la química de los fluidos presentes en el momento del evento de alteración. Puesto que estas variaciones de composición producen cambios de longitud de onda de la característica de absorción de Mg-OH cerca de los 2350 nm, la posición de la longitud de onda de esta función es un indicador de las condiciones geoquímicas en el momento del evento de alteración.	El valor del escalas Mg-OH es la longitud de onda de la reflectancia mínima del espectro normalizado en el rango de 2310 a 2390 nm.	El escalas Mg-OH se informa cada vez que Halo detecta un mineral que tiene un enlace de Mg-OH en la estructura.
Fe-OH	Muchos minerales que contienen Fe-OH tienen variaciones sutiles de composición que son indicativas de la química de los fluidos presentes en el momento del evento de alteración. Puesto que estas variaciones de composición producen cambios de longitud de onda de la característica de absorción de Fe-OH cerca de los 2260 nm, la posición de la longitud de onda de esta función es un indicador de las condiciones geoquímicas en el momento del evento de alteración.	El valor del escalas Fe-OH es la longitud de onda de la reflectancia mínima del espectro de normalizado en el rango de 2240 a 2310 nm.	El escalas Fe-OH se informa cada vez que Halo detecta un mineral que tienen un enlace de Fe-OH en la estructura.
Fe3t (tipo de mineral Fe+3)	Los óxidos y oxihidróxidos de hierro se producen bajo una amplia gama de condiciones geológicas. Todos los minerales Fe+3, de los cuales los más comunes son la hematita y la goethita, tienen una característica similar en la región de 750 a 1000 nm. El escalas Fe3t realiza un seguimiento de la posición de esta característica con los minerales Fe+3 de tipo hidróxido que típicamente tienen valores de Fe3t superiores a los 900 nm y los minerales Fe+3 de tipo óxido con valores inferiores a los 900 nm.	El valor del escalas Fe3t es la longitud de onda de la reflectancia mínima del espectro en el rango de 750 a 1000 nm.	El escalas Fe3t se informa cada vez que Halo detecta un mineral Fe+3.
Fe3i (intensidad del mineral Fe+3)	Los óxidos y oxihidróxidos de hierro se producen bajo una amplia gama de condiciones geológicas. Todos los minerales Fe+3, de los cuales los más comunes son la hematita y la goethita, tienen una absorción fuerte aproximadamente en los 550 nm. La intensidad de esta característica depende en gran medida de la abundancia de minerales Fe+3. El escalas Fe3i realiza un seguimiento de la intensidad de esta función; cuanto mayor sea el valor de Fe3i, más intensa será la absorción de Fe+3.	El valor del escalas Fe3i es la relación de los valores de reflectancia del espectro de reflectancia a 742 nm con 500 nm.	El escalas Fe3i se informa cada vez que Halo detecta un mineral Fe+3
Al-Fe-Mg	Las profundidades relativas de las características de AL-OH, Fe-OH y Mg-OH centradas en el rango de longitud de onda de 2160 a 2370 nm y vistas en el espectro de reflectancia de diferentes minerales producida por alteraciones pueden dar una idea de las condiciones geoquímicas. El escalas Al-Fe-Mg informa la longitud de onda de la característica de absorción más profunda de estos tres.	El valor del escalas Al-Fe-Mg es la longitud de onda de la reflectancia mínima del espectro de normalizado en el rango de 2160 a 2370 nm.	El escalas Al-Fe-Mg se informa cada vez que Halo detecta un mineral que tiene un enlace de Al-OH, Fe-OH o Mg-OH en la estructura.

- **Halo Manager**

El Halo Manager es el programa de gestión que complementa al espectrómetro TerraSpec Halo, con este programa se configura el instrumento. En el Halo Manager se crea y administra los proyectos, se visualiza y se almacena los espectros tomados por el TerraSpec Halo, los cuales necesariamente se descargan desde este programa. No hay forma de obtener los datos de manera directa del instrumento, sino es a través del Halo Manager.

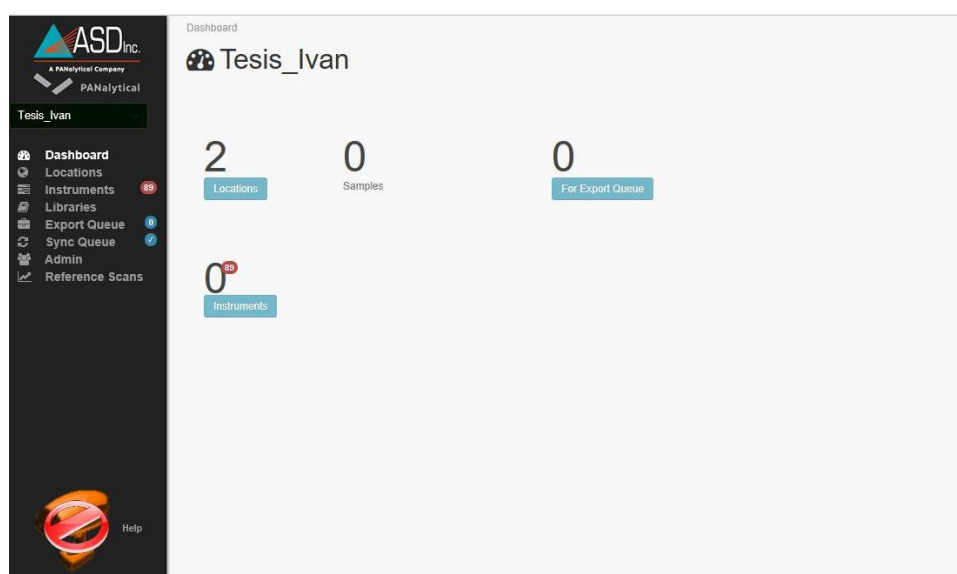


Figura N°24. Panel principal del programa Halo Manager, v.2018.

Es indispensable el programa Halo Manager para el uso del TerraSpec Halo, ya que a través de la sincronización (conexión) entre ambos se realiza lo siguiente (Analytical Spectral Devices Inc., 2017):

- ✓ TerraSpec Halo → Halo Manager, se descarga toda la información obtenida del TerraSpec Halo al computador, es decir, se borra toda la información del instrumento y se almacena en el Halo Manager.
- ✓ Halo Manager → TerraSpec Halo, el proyecto a trabajar se carga al TerraSpec Halo a través del Halo Manager, es decir se configura el instrumento en base a los datos generados en el Halo Manager.



Figura N°25. Proceso de sincronización.

Fuente: (Analytical Spectral Devices Inc., 2017)

2.2.4 Programa The Spectral Geologist – TSG

The Spectral Geologist – TSG es un programa diseñado y desarrollado por CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) en Australia, la interfaz del programa ha sido diseñada especialmente para aplicaciones geológicas. Es utilizado para un análisis interactivo, donde se logra la visualización y la interpretación mineralógica de los espectros recopilados de muestras geológicas por medio de un espectrómetro.

Este programa posee un asistente espectral automatizado (TSA) que ayuda a la interpretación espectral utilizando una biblioteca de espectros interna para crear una mezcla simulada de espectros multiminerales que coincidan con el espectro del proyecto. TSA utiliza una biblioteca amplia de espectros de muchos sitios de todo el mundo, en un intento de representar la diversidad de muestras del mismo

mineral. El método es de coincidencia de la forma del espectro de un proyecto con los espectros de la biblioteca del TSA. También, se puede calcular los parámetros espectrales, estos resultados son una forma valiosa de caracterizar la composición y la abundancia relativa de los minerales contenidos, para luego compararlos y contrastarlos con estándares conocidos. (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, 2022).

A la fecha, The Spectral Geologist se encuentra en su versión 8.0.7.4, siendo su última actualización en junio de 2020, admite archivos espectrales de los instrumentos ASD Inc. como el TerraSpec 4 Hi-Res y el TerraSpec Halo.

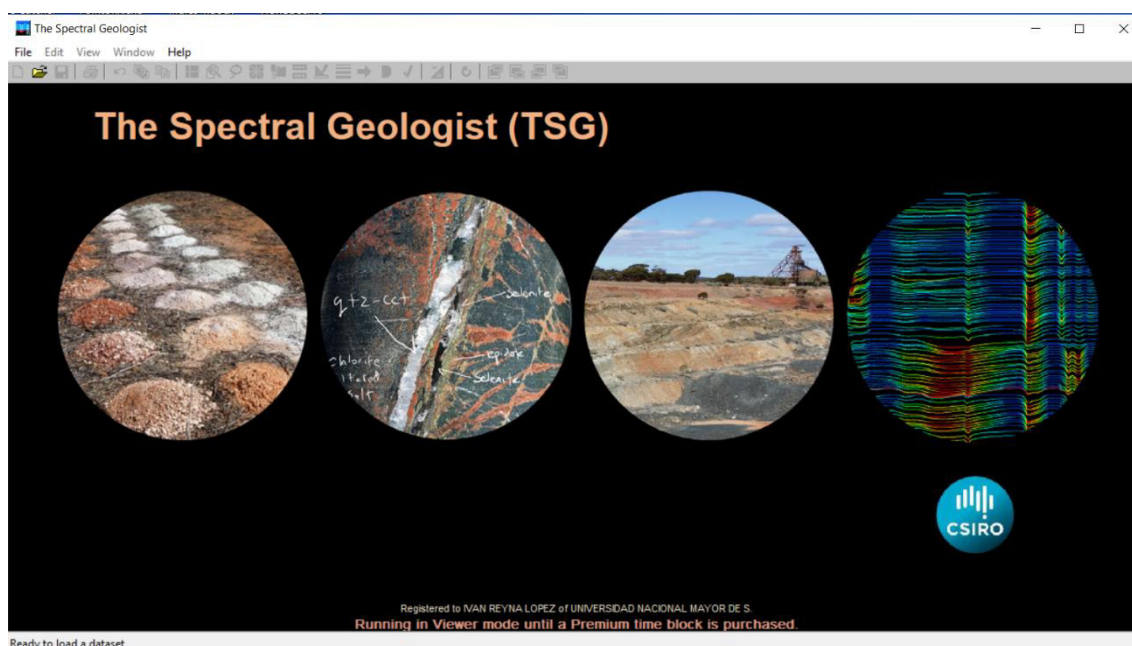


Figura N°26. Pantalla inicial del programa The Spectral Geologist v8.0.7.4.

- ***Características del Programa The Spectral Geologist (Organización de Investigación Científica e Industrial de la Mancomunidad, 2022):***

- ✓ Cada archivo TSG puede contener todos los espectros de un solo proyecto, esto significa que todos los datos del proyecto se pueden comparar y los datos espectrales se pueden analizar.

- ✓ Se puede analizar las asociaciones mineralógicas y a la vez, observar las variaciones específicas en las características mineralógicas de cada muestra.
- ✓ Con las matemáticas espectrales se puede calcular las características específicas de los espectros que pueden relacionarse con las características principales de absorción de una composición mineralógica.
- ✓ Todos los datos procesados se pueden exportar a archivos CSV, además todos los gráficos se pueden copiar y pegar en otros programas.
- ✓ Cuenta con una biblioteca de referencia espectral de minerales comunes y se puede cargar una biblioteca espectral personalizada.

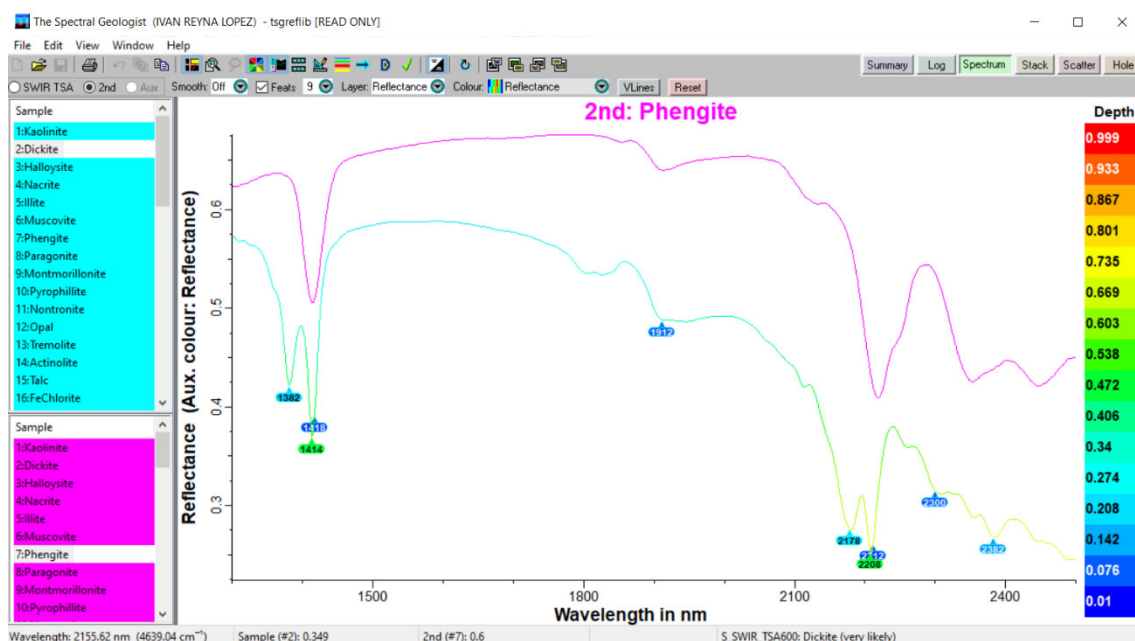


Figura N°27. Firmas espectrales visualizadas en el programa The Spectral Geologist (TSG).

- **Parámetros espectrales**

Son las mediciones de las características de absorción que cambian a medida que varían las características minerales específicas, como la composición o la cristalinidad. Son una forma precisa de

representar variaciones y tendencias importantes dentro de un conjunto de muestras. Asimismo, miden diferentes propiedades de los espectros y son útiles para la comparación con datos geoquímicos. También se podría decir que es la representación numérica de la firma espectral (AUSSPEC, 2019).

Se muestra en la Tabla N°06, la lista de algunos parámetros que se pueden desarrollar dentro del programa The Spectral Geologist y que serán utilizados en la presente investigación.

Tabla N°06. Parámetros comunes desarrollados en The Spectral Geologist.

Fuente (AUSSPEC, 2019)

PARÁMETRO	SIGNIFICADO	APLICACIÓN Y LÍMITES
Wav_Principal	Longitud de onda de la característica de absorción más profunda entre 2160 – 2400 nm, que abarca las regiones AlOH, FeOH y MgOH.	Resalta que tipo de mineral es dominante en la muestra, dependiendo de si las características de AlOH, FeOH o MgOH es más profunda en relación con todas las demás características.
Wav_MicaBl	Longitud de onda de la absorción de mica blanca AlOH.	El parámetro puede ser influenciado por otros minerales de AlOH como la caolinita si se enmascara con la mica blanca.
Tipo_MicaBl	Probable fase de mica blanca, basada en la data Wav_MicaBl.	Diferencia entre paragonita, paragonita-moscovítico, moscovítico, moscovita-fengítica y micas blancas fengíticas. Consulte el parámetro XT_MicaBl para obtener información sobre Illita.
XT_MicaBl	Mapeo de las diferencias de cristalinidad en la fase de mica blanca. Las micas blancas illíticas típicamente tienen una cristalinidad variable alta-baja.	Índice de cristalinidad para la mica blanca. El valor aumenta con el aumento de la cristalinidad (<0,8 poco cristalino, > 1,5 altamente cristalino). Illita es típicamente <3.0. Las micas blancas moscovíticas tendrán valores > 3.0 a valores muy altos.
Wav_Clorita	Longitud de onda de la absorción de clorita FeOH para aquellas muestras con clorita.	Permite evaluar cuántas fases distintas de clorita podría haber en un área de proyecto
Tipo_Clorita	Fase probable de clorita, basada en Wav_Clorita	Determina si se trata de una clorita de Mg, clorita de Mg-Fe o clorita de Fe, en un conjunto de datos del proyecto.
XT_Caolinita	Clasificación de la cristalinidad de caolinita, para muestras que contienen caolinita	Usando los parámetros de cristalinidad de caolinita para definir la cristalinidad de caolinita: HXT = altamente cristalino, MXT = moderadamente, PXT = pobremente, DIS = desordenado.
XT_Caol2160, XT_Caol2180	Evaluación de la cristalinidad de la caolinita con estos 2 parámetros numéricos, filtrados para mostrar valores solo para muestras que contienen caolinita.	Los 2 parámetros de caolinita utilizan la pendiente alrededor de las características de la caolinita 2160 y 2180 para evaluar la cristalinidad y el grado de orden. Generalmente los valores > 1.0 son cristalinidad alta, y los valores <0.98 son cristalinidad baja.
Wav_AlOH	Longitud de onda de la absorción de AlOH.	Se utiliza para el parámetro Wav_MicaBl y puede ayudar a diferenciar los diferentes minerales de AlOH. como la mica blanca, la caolinita, la dickita y la montmorillonita

D_AIOH	Profundidad de la absorción de AIOH.	Intensidad relativa de los minerales de AIOH en una muestra, como mica blanca, caolinita, dickita, montmorillonita.
Wd_AIOH	Ancho de la absorción de AIOH	Puede ser útil para evaluar mezclas de minerales AIOH.
Wav_FeOH	Longitud de onda de la absorción de FeOH.	Se utiliza para el parámetro Wav_Clorita y puede diferenciar entre minerales FeOH
D_FeOH	Profundidad de la absorción de FeOH.	Intensidad relativa de los minerales de FeOH en una muestra. Tales como clorita, jarosita, epidota, biotita.
Wd_FeOH	Ancho de la absorción de FeOH.	Puede ser útil para evaluar tipos de minerales de FeOH
Wav_MgOHCB	Longitud de onda de la absorción de MgOH y/o carbonato.	Se puede utilizar para diferenciar los diferentes minerales de Mg, como talco, anfíboles, biotita, clorita y también carbonato.
D_MgOHCB	Profundidad de la absorción de MgOH y/o carbonato.	Intensidad relativa de los minerales de MgOH o carbonato en una muestra. Tales como clorita, epidota, biotita, anfíbol, talco, carbonato.
Wd_MgOHCB	Ancho de la absorción de MgOH.	Puede ser útil para evaluar tipos de minerales de MgOH
Wav_OH1400	Longitud de onda de la absorción de OH más profunda.	Puede ser útil para separar diferentes minerales con características OH
D_OH1400	Profundidad de la absorción de OH más profunda.	Medida de intensidad de la característica OH
Wd_OH1400	Ancho de la absorción de OH más profunda.	Puede ser útil para minerales mixtos o ayudar a discriminar diferentes tipos de minerales OH
Wav_Agua	Longitud de onda de la absorción de agua.	Puede variar según el mineral, por ejemplo, yeso ~ 1940 nm, clorita ~ 2100 nm, mica blanca ~ 1910 nm.
D_Agua	Profundidad de absorción de agua cerca de 1900 nm.	Intensidad de absorción de agua. Puede ayudar a evaluar la presencia de minerales que contienen agua o humedad en una muestra.
PARÁMETROS ESPECTRALES VNIR		
Wav_FeOxido	Longitud de onda de la absorción diagnosticada de óxido de hierro en el VNIR.	Permite evaluar si la hematita o la goethita son dominantes en el espectro.
D_FeOxido	Profundidad de la absorción del campo de cristal de óxido de hierro de la hematita y/o goethita.	Permite la evaluación de la resistencia del óxido de hierro y el desarrollo en un perfil o en suelos.

- **Normalización - Remoción de la envolvente**

Al momento de calcular los parámetros escalares, las firmas espectrales se deben normalizar, este proceso también es conocido como la remoción de la envolvente. Este enfoque tiene como objetivo eliminar el ruido de fondo y aislar las características principales de absorción para su identificación y análisis. La envolvente generalmente se determina utilizando máximos locales para generar un casco

de puntos límites en la parte superior. El proceso de normalización consiste en que todos los puntos límites se ajustan mediante un segmento de línea recta y, luego, se reemplaza las intensidades de reflectancia originales por las nuevas intensidades correspondientes de la envolvente normalizada (Fang & otros, 2018).

Conceptualmente la envolvente puede ser descrito como una cuerda estirada sobre la firma espectral y atada a cada extremo de él, con la remoción de la envolvente se hace más fácil efectuar la extracción de rasgos y el análisis de los espectros (Hauff P. , 2008).

En la Figura N°28 se observan firmas espectrales si procesar y normalizada de cinco minerales, las firmas espectrales que se encuentran en la parte inferior son las que están sin procesar y las firmas espectrales que se encuentran en la parte superior son las normalizadas.

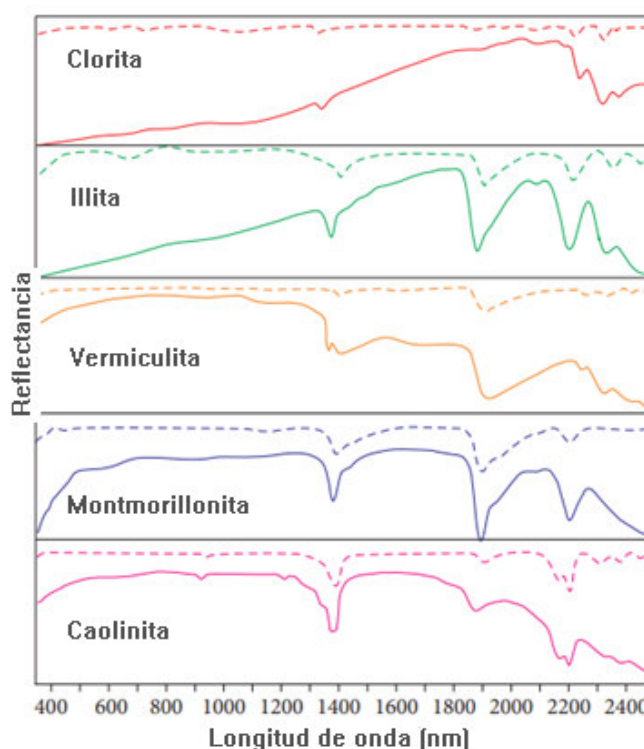


Figura N°28. Firmas espectrales sin procesar y normalizadas (remoción de la envolvente).

Fuente: (Fang, & otros, 2018)

2.2.5 Alteraciones hidrotermales

La alteración hidrotermal es un proceso de intercambio químico ocurrido durante una interacción fluido hidrotermal – roca. Esta interacción conlleva cambios químicos, mineralógicos y texturales en la roca afectada, producto del desequilibrio termodinámico entre ambas fases. La alteración hidrotermal ocurre a través de las transformaciones de fases minerales, crecimiento de nuevo minerales, disolución de minerales y/o precipitación, y reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de la roca y del fluido hidrotermal (Thompson & Thompson, 1996).

En la naturaleza se reconocen varios tipos de alteración hidrotermal caracterizados por asociaciones de minerales específicos. Los distintos tipos de alteración son dependientes de factores tales como composición del fluido hidrotermal, composición de la roca huésped, temperatura, pH, Eh, razón agua/roca y tiempo de interacción, entre otros.

2.2.5.1 Alteración potásica.

Caracterizada principalmente por la alteración de plagioclasas y minerales máficos a feldespatos potásicos y/o biotita, con minerales accesorios como cuarzo, magnetita, sericita, clorita. La alteración potásica es especialmente común e importante en sistemas mineralizados en zonas de núcleo de alta temperatura de depósitos tipo pórfido de cobre y epitermales (Pirajno, 1992).

La alteración potásica representa la temperatura más alta de todas las alteraciones (400-800 °C), y ocurre generalmente en pórfidos de cobre, se forma en el núcleo del sistema y se caracteriza por una alteración selectiva y penetrativa (Palacio & Godeas, 2008).

2.2.5.2 Alteración propilítica

Caracterizada principalmente por la asociación clorita – epidota y comúnmente también presentan albita, calcita y pirita. Esta alteración se forma a condiciones de pH neutro a alcalino a rangos de temperaturas intermedias a bajas (200-350 °C).

La alteración propilítica ocurre por lo general como halo gradacional y distal de una alteración potásica, gradando desde actinolita – biotita en el contacto de la zona potásica, de epidota – clorita – albita – carbonatos gradando a las zonas progresivamente más ricas en clorita y zeolitas hidratadas formadas a bajas condiciones de temperatura. Los campos bien definidos de presión y temperatura de las zeolitas la transforman en importantes monitores de presión y profundidad. Esta característica hace que se puedan ser usadas para monitorear la proximidad de las fuentes de calor (Pirajno, 1992).

2.2.5.3 Alteración cuarzo – sericítica (fílica)

Caracterizada principalmente por la alteración de los feldespatos (plagioclasas y feldespatos potásicos) transformados a sericita y cuarzo, con cantidades menores de caolinita. Se produce esencialmente por una desestabilización del feldespato en presencia de H^+ , OH^- , K y S para formar cuarzo, moscovita, pirita y algo de calcopirita; en el proceso se lixivian Na, Mg, Ti, Fe y K. Aunque la sericita no tiene diferencias composicionales con la moscovita, puede contener mayor proporción de SiO_2 , MgO, H_2O y menos K_2O (Palacio & Godeas, 2008).

La alteración cuarzo-sericita ocurre en un rango de pH 5 a 6 y se forma típicamente en un amplio rango de temperatura, por lo general se genera sobre los 250°C, pero a temperaturas más bajas se da illita (200-250 °C) o illita-esmectita (100-200 °C). A temperaturas sobre los 450 °C, corindón aparece en asociación con sericita y andalucita. En ambientes ricos en Na, Paragonita puede aparecer como la mica dominante.

Este tipo de alteración es muy común en muchos depósitos, se encuentra en pórfidos cupríferos, como así también en depósitos mesotermiales de metales preciosos y sulfuros masivos en rocas félsicas (Palacio & Godeas, 2008).

2.2.5.4 Alteración argílica

Caracterizada principalmente por la alteración de la plagioclasa y de los minerales máficos (hornblenda, biotita), formando arcillas del grupo del caolín (caolinita, halloysita y dickita) y de la esmectita (principalmente montmorillonita), así como también illitas y cloritas. Las arcillas amorfas suelen también estar presentes. Puede encontrarse una zonalidad mineralógica, ubicándose la caolinita más cerca de la zona sericitica (fílica) y la montmorillonita en las zonas más externas (Palacio & Godeas, 2008).

La alteración argílica se caracteriza por la formación de minerales de arcilla debido al intenso metasomatismo de H^+ (lixiviación acida – significativa lixiviación de Ca, Na y Mg de las rocas). Ocurre en rangos de pH entre 4 y 5, a temperaturas entre 100 y 300 °C, típicamente debajo de los 250 °C (Pirajno, 1992). La caolinita se forma a temperaturas bajo 300 °C y sobre los 300 °C su fase estable es la pirofilita.

La alteración argílica representa un grado más alto de hidrólisis relativo a la alteración propilítica. Este tipo de alteración se encuentra asociada a los depósitos tipo pórfido de cobre.

2.2.5.5 Alteración argílica avanzada

Representa la forma extrema de una lixiviación en la que las rocas han sido despojadas de sus elementos alcalinos por fluidos activos muy ácidos en ambientes con una relación fluido/roca, con destrucción completa de feldespatos y minerales máficos. Se caracteriza principalmente por la presencia

de Alunita, dickita, caolinita, baritina, diásporo y pirofilita (dependiendo de la temperatura), con menor cantidad de sílice, sericita, rutilo, corindón y turmalina (Palacio & Godeas, 2008).

Este tipo de alteración representa un ataque hidrolítico extremo de las rocas, incluso se rompen los fuertes enlaces del aluminio en los silicatos, originando sulfato de Al (Alunita) y óxidos de Al (diásporo). En casos extremos la roca puede ser transformada a una masa de sílice oquerosa residual (“vuggy silica” en inglés).

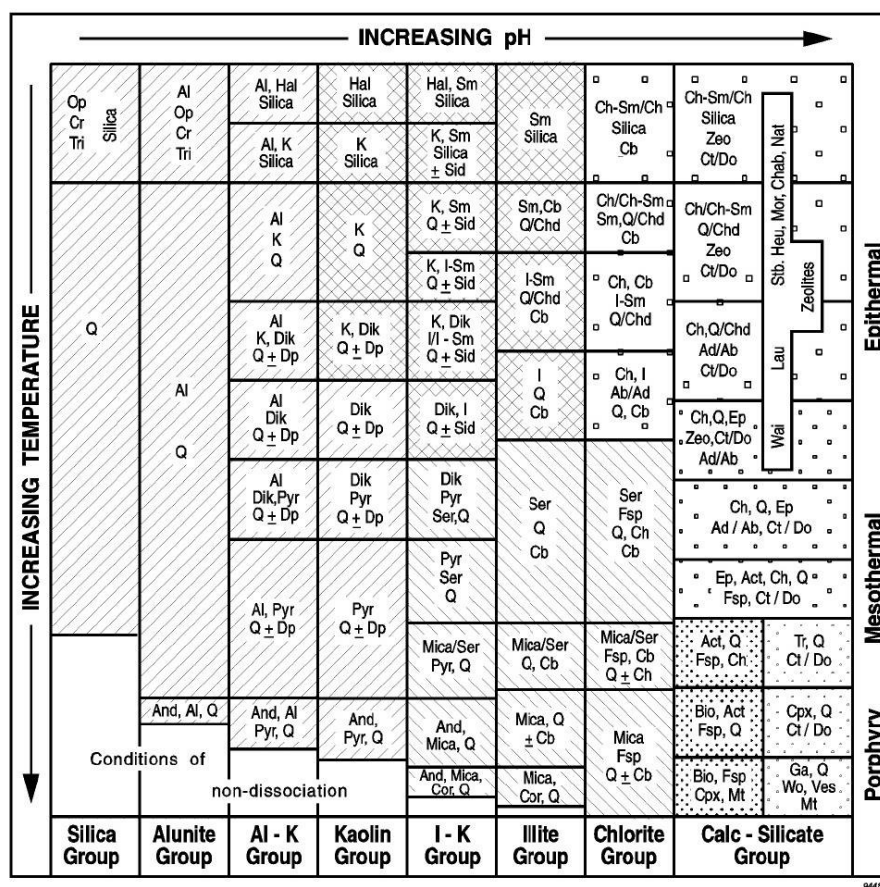
Esta alteración se encuentra en la parte superior de sistemas de pórfidos cupríferos, en las zonas internas de vetas hidrotermales de metales base y preciosos, y más típicamente en los sistemas epitermales de alta sulfuración. En depósitos epitermales de metales preciosos, se asocia a zonas cercanas a la superficie, donde se relaciona con fluidos en ebullición por la condensación de vapores ricos en volátiles para formar soluciones extremadamente ácidas (Palacio & Godeas, 2008).

2.2.5.6 Alteración calcosilicatada (Skarn)

Corresponde a la transformación de rocas carbonatadas (calizas y dolomitas), a minerales calcosilicatados en zonas adyacentes a intrusivos. Se caracteriza por la presencia de granates (andradita y grosularita), wollastonita, epidota, diópsido, idocrasa, clorita y actinolita. En los casos que los carbonatos son magnésicos (dolomitas) la asociación incluye: forsterita, serpentina, talco, tremolita y clorita. La alteración calcosilicatada ocurre bajo condiciones de pH neutro a alcalino a distintos rangos de temperatura. La asociación zeolita-clorita-carbonato es formada a bajas temperaturas y la epidota, seguida por actinolita ocurre a temperaturas progresivamente mayores (Palacio & Godeas, 2008).

2.2.6 Grupo de minerales de alteración

(Corbett & Leach, 1997) publicaron un diagrama clasificando los principales tipos de alteración hidrotermal, considerando la temperatura y el pH de los fluidos como los factores más importantes que influyen en la mineralogía de los sistemas hidrotermales. Estos autores separaron distintos grupos de minerales ordenados en función de la temperatura y de pH de fluido (Figura N°29).

**Mineral Abbreviations :**

Ab - albite; Act - actinolite; Ad - adularia; Al - alunite; And - andalusite; Bio - biotite; Cb - carbonate (Ca, Mg, Mn, Fe);
Ch - chlorite; Chab - chabazite; Chd - chalcedony; Ch-Sm - chlorite-smectite; Cor - corundum;
Cpx - clinopyroxene; Cr - cristobalite; Ct - calcite; Do - dolomite; Dik - dickite; Dp - diaspore; Ep - epidote;
Fsp - feldspar; Ga - garnet; Hal - halloysite; Heu - heulandite; I - illite; I-Sm - illite-smectite; K - kaolinite;
Lau - laumontite; Mt - magnetite; Mor - mordenite; Nat - natrolite; Op - opaline silica; Pyr - pyrophyllite;
Q - quartz; Ser - sericite; Sid - siderite; Sm - smectite; Stb - stilbite; Tr - tremolite; Tri - tridymite;
Ves - vesuvianite; Wai - wairakite; Wo - wollastonite; Zeo - zeolite

 Potassic
 Skarn
 Phyllic

Propylitic
Argillic

Outer / Sub Propylitic
Advanced Argillic

Figura N°29. Minerales de alteración comunes en sistemas hidrotermales.

Fuente: (Corbett & Leach, 1997)

2.2.6.1 Grupo de la sílice

Estos son los únicos minerales estables en forma significativa en fluidos de pH bajo ($< \text{pH } 2$)

- ✓ La sílice opalina, cristobalita y tridimita ocurren en ambiente superficial de un sistema hidrotermal, típicamente menores a los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura.
- ✓ El cuarzo es el mineral principal y ocurre a mayor temperatura (Mayor a los 100°C).
- ✓ Calcedonia generalmente se forma en el rango de $100\text{-}200\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figura N°30. Fases de la sílice en su forma cristalina – (A) tridimita, (B) cuarzo y (C) cristobalita.

Fuente: (Gomes, & otros, 2018)

2.2.6.2 Grupo de la alunita

Un fluido con un pH ligeramente superior a 2, forma alunita en un amplio rango de temperatura. Esta se presenta con andalucita a altas temperaturas ($350\text{-}400\text{ }^{\circ}\text{C}$) y con corindón a temperaturas aún mayores ($400\text{-}450\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Figura N°31. (A) Alunita diseminada y (B) Muestra masiva y porosa de alunita con cuarzo.

Fuente: (Thompson & Thompson, 1996)

2.2.6.3 Grupo de alunita – caolín

Estos minerales derivan de la acción de fluidos de pH moderadamente bajo (aproximadamente pH 4) y coexisten con Alunita en un rango de pH transicional (pH 3-4).

- ✓ La halloysita se presenta principalmente como producto de alteración supérgena, aunque hay evidencias que se forma en condiciones hidrotermales de muy baja temperatura.
- ✓ La caolinita se forma en profundidades someras en condiciones de baja temperatura (150-200 °C).
- ✓ La pirofilita se forma en profundidades mayores y a mayor temperatura. En un rango intermedio entre la caolinita y la pirofilita se forma la dickita.



Figura N°32. Grupo del caolín.

2.2.6.4 Grupo de la illita

En fluidos con un pH 4-6 domina los minerales del grupo de la illita y coexiste con el grupo del caolín en pH del fluido 4-5, dependiendo de la temperatura y salinidad del fluido.

- ✓ A baja temperatura se presenta esmectita (<100-150 °C).
- ✓ Illita – esmectita a alrededor de 100-200 °C.
- ✓ Illita a aproximadamente 200-250 °C

- ✓ Moscovita a temperaturas $>250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El contenido de esmectita dentro de las arcillas de illita-esmectita, decrece progresivamente al aumentar la temperatura sobre el rango $100\text{-}200\text{ }^{\circ}\text{C}$. La cristalinidad de la illita y sericita aumentan con el aumento de la temperatura. Al aumentar la temperatura hay un cambio progresivo desde una mica desordenada a una moscovita bien cristalizada. La sericita es una moscovita de grano fino y es transicional entre la illita y moscovita bien cristalizada. En algunos sistemas se presenta paragonita esto sucede cuando la plagioclasa es albita.



Figura N°33. Grupo de la Illita

2.2.6.5 Grupo de la clorita

En condiciones levemente ácidas a neutras de pH los minerales clorita-carbonatos son dominantes, coexistiendo con el grupo de la illita en ambiente cuyo pH es 5-6. La asociación clorita-illita ocurre a baja temperatura gradando solo a clorita a mayor temperatura.



Figura N°34. (A) Muestra masiva de clorita (B) Clorita cristalizada.

2.2.6.6 Grupo de los calcosilicatos

Los minerales de este grupo se forman en condiciones de pH neutro a levemente alcalino (pH <6-7) y se desarrollan progresivamente a mayores temperaturas como indica la siguiente secuencia: clorita-zeolita < adularia-albita < epidota-carbonato < actinolita < Biotita-Feldespato K.

Las zeolitas son particularmente sensitivas a la temperatura. Zeolitas hidratadas (natrolita, chabasita, mesolita, mordenita, estilbita, heulandita) predominan en condiciones de baja temperatura (150-200 °C), mientras que las menos hidratadas como la laumontita (150-200 °C) y wairakita (200-300 °C) se presentan progresivamente en niveles más profundos y calientes del sistema hidrotermal. En algunos sistemas se encuentra prehnita y/o pumpellita a temperatura de 250-300°C, asociado a veces con epidota.

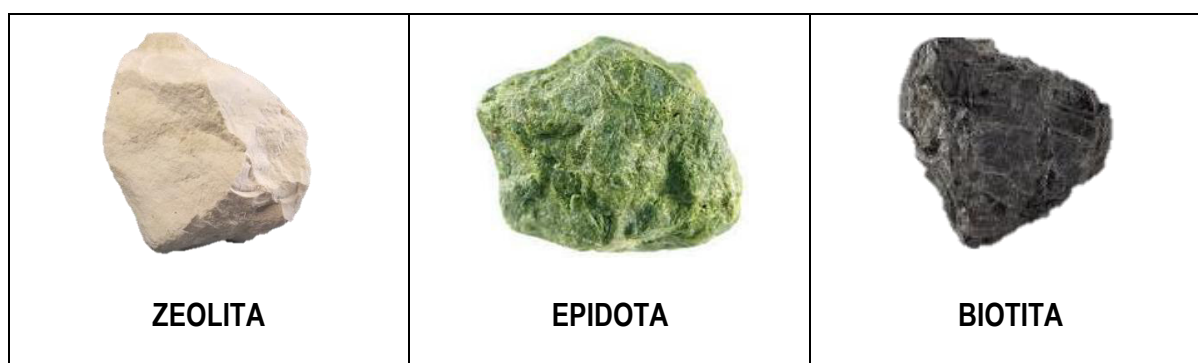


Figura N°35. Grupo de los calcosilicatos

Existen, además, varias fases minerales contenidas en diferentes grupos, tales como los carbonatos, los feldespatos y los sulfatos.

Los carbonatos se encuentran en un amplio rango de pH y de temperatura, y se asocian con el grupo de caolín, clorita y calcosilicatos. Una zonación de minerales carbonatados que se correlacionan con el aumento de pH se encuentra en muchos sistemas hidrotermales. Carbonatos de Fe-Mn coexiste en el grupo de caolín y con arcillas del grupo de la illita, mientras que carbonatos de Ca-Mn-Mg-Fe

mezclados, coexisten con arcillas del grupo de la illita y clorita, y los carbonatos de Ca-Mg coexisten con los minerales de los grupos de clorita y calcosilicatos. Los carbonatos se presentan típicamente en todos los niveles de sistemas hidrotermales, desde la superficie hasta ambientes de tipo pórfido o skarn.

Por su parte, los feldespatos están asociados tanto con los minerales del grupo de la clorita y calcosilicatos. Los feldespatos secundarios son generalmente estables en condiciones de pH neutro o alcalino. La albita se presenta cuando los fluidos tienen una alta razón de Na^+/K^+ y feldespato potásico a baja razones de Na^+/K^+ .

Los sulfatos se encuentran en amplio rango de temperatura y regímenes de pH en sistemas hidrotermales. La alunita (sulfato de aluminio) se forma en condiciones de bajo pH (3-4), la anhidrita (sulfato de calcio) se forma a pH más altos y temperatura de entre 100-150 °C, el yeso en ambientes más fríos y la jarosita es común como mineral supérgeno, pero también se presenta en ambientes ácidos someros en sistemas geotérmicos activos.

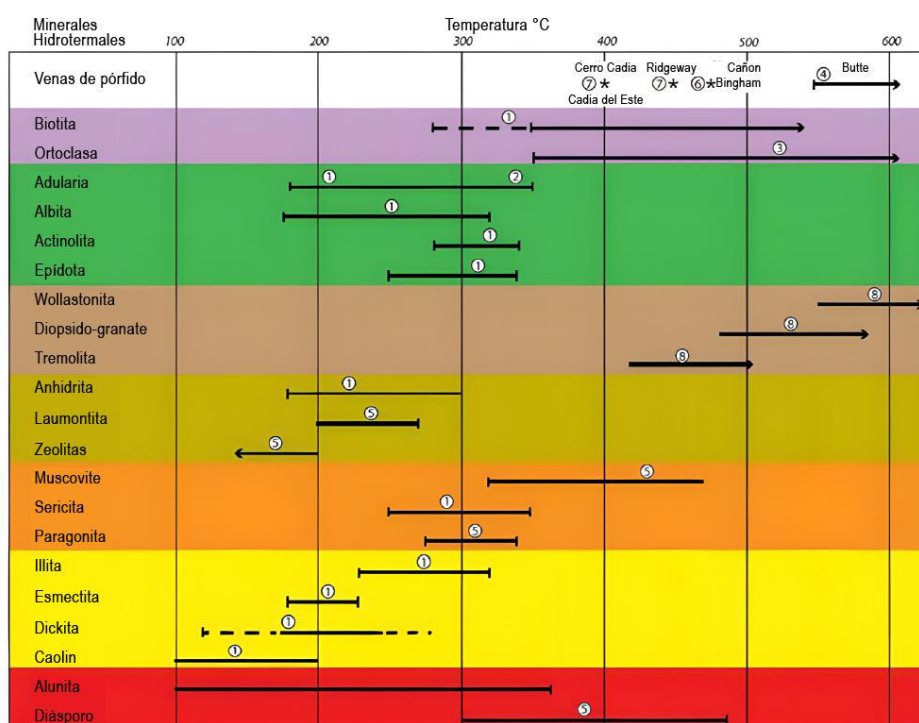


Figura N°36. Temperatura de formación de minerales de alteración en sistemas hidrotermales.

Fuente: (Corbett & Leach, 1997)

2.2.7 *Análisis de reflectancia en diferentes depósitos minerales*

Los depósitos minerales más comunes que pueden definirse mediante espectroscopia de reflectancia incluyen a los epitermales de baja y alta sulfuración, pórfidos, IOCG y Skarn. A pesar de que hay muchos otros tipos de depósitos y alteraciones que se pueden describir, en este punto, solo se realizará una breve descripción de los depósitos mencionados líneas arriba, en la cual se hará mención el tipo de alteración y los minerales presentes en cada uno de ellos.

2.2.7.1 Epitermales de baja sulfuración

Los minerales de alteración en los yacimientos de baja sulfuración se originan por aguas termales de pH prácticamente neutro; la temperatura decrece al disminuir la profundidad y al aumentar la distancia a los conductores de los fluidos. (Hedenquist, Izawa, Arribas, & White, 2001)

El líquido de baja salinidad es responsable de la formación de vetas y disseminaciones de minerales de baja sulfuración. Los minerales en estado de baja sulfuración que se forman a partir de estas aguas reducidas, de pH neutro, están en equilibrio con los minerales de alteración de la roca huésped. Las vetas de carbonato-cuarzo-adularia con halos sericitico o de arcilla, comúnmente albergan mineralización de baja sulfuración. (Hedenquist, Arribas, & Gonzales-Urien, Exploration For Epithermal Gold Deposits, 2000).

La silicificación es extensa en minerales con múltiples generaciones de cuarzo y calcedonia, y comúnmente esta acompaña de adularia y calcita. La silicificación generalizada, en las envolturas de las vetas, esta flanqueada por ensambles de sericita - illita – caolinita y como resultado se forma una alteración argílica intermedia adyacentes a algunas vetas. Se puede formar una alteración argílica avanzada (caolinita – alunita) a lo largo de la parte superior de las zonas mineralizadas. La alteración propilítica domina en profundidad y periféricamente alrededor del depósito. La mineralización principal

de los depósitos de baja sulfuración consiste en oro, pirita, enargita, calcopirita, covelina, tennantita, telururos, y su mineralogía económica principal es de Au, Ag, Cu y cantidades menores de Pb, Hg y Zn. (Camprubí, González-Partida, Levresse, Tritlla, & Carrillo-Chávez, 2003)

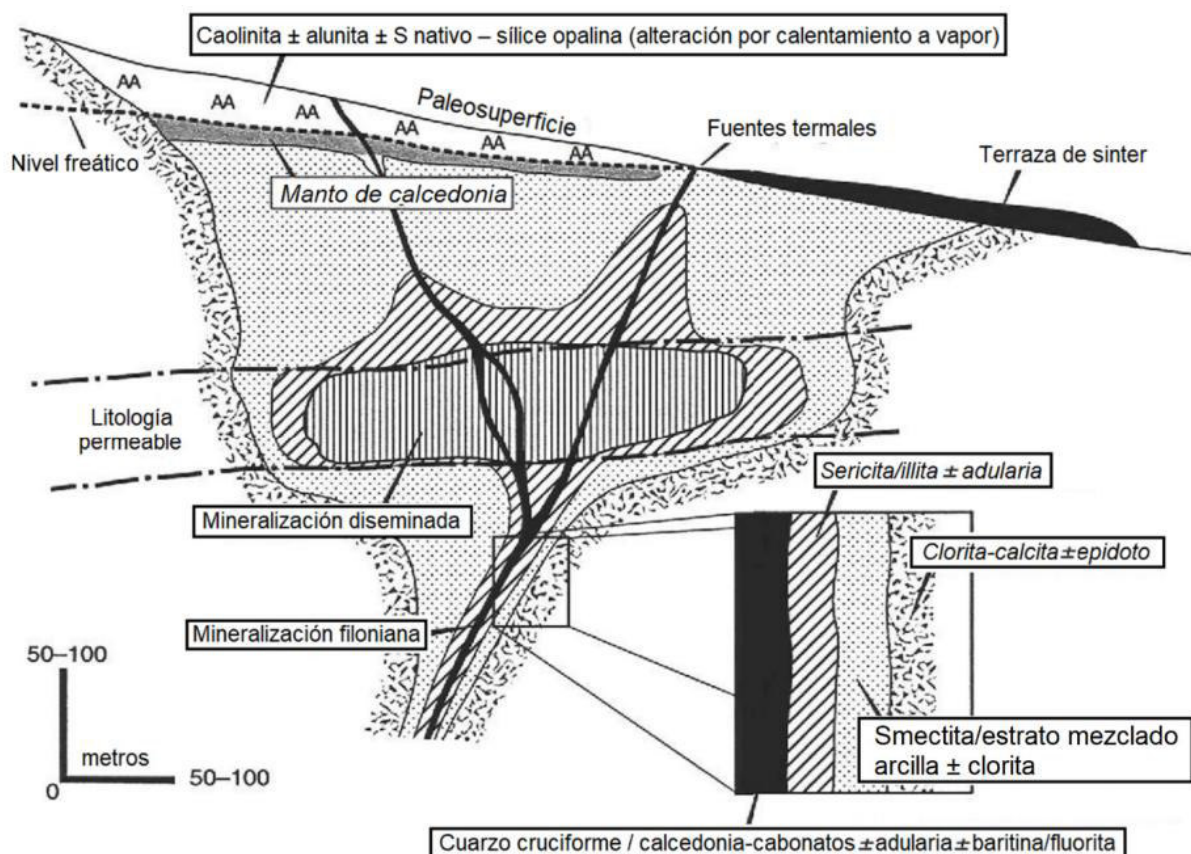


Figura N°37. Sección esquemática que generaliza los diseños de alteración en un sistema de baja sulfuración, mostrando la forma variable con el incremento de profundidad y la zonación típica de alteración.

Fuente: (Hedenquist, Izawa, Arribas, & White, 2001)

2.2.7.2 Epitermales de alta sulfuración

Los yacimientos de alta sulfuración contienen minerales estables en ambientes ácidos, tales como alunita, caolinita, dickita, pirofilita, diáspora y zunyita, los cuales son también sensible a los cambios de temperatura, estos minerales constituyen la paragénesis característica de la alteración argílica avanzada que tiene lugar en ambientes de alta sulfuración durante el proceso inicial de lixiviación. (Hedenquist, Izawa, Arribas, & White, 2001).

El fluido ácido hipogénico, el cual se genera en el ambiente volcánico-hidrotermal, lixivia la roca, creando un núcleo de sílice residual, comúnmente oquerosa (“vuggy quartz”) este resto de roca totalmente lixiviada es, por lo general, el encaje de la mineralización, y está rodeado por sucesivos halos de alteración, argílica avanzada (cuarzo-alunita-pirofilita-dickita) y argílica, constituida esta última por illita, illita/esmectita o esmectita. (Hedenquist, Arribas, & Gonzales-Urien, Exploration For Epithermal Gold Deposits, 2000)

La mineralización principal de los depósitos de alta sulfuración consiste en Oro, enargita, electrum, esfalerita, galena, arsenopirita, sulfosales de plata y su mineralogía económica principal es de Au, Ag, Zn, Pb y cantidades menores de Cu, Sb y Mo. (Camprubí, González-Partida, Levresse, Tritlla, & Carrillo-Chávez, 2003)

Por lo tanto, los minerales de alteración son también cruciales para definir si el yacimiento es de alta o baja sulfuración (Figura N°38). Siendo los estudios realizados con la espectrometría de reflectancia útiles para delinear la zonificación de alteración y la provisión de vectores hacia donde debería ocurrir la mineralización.

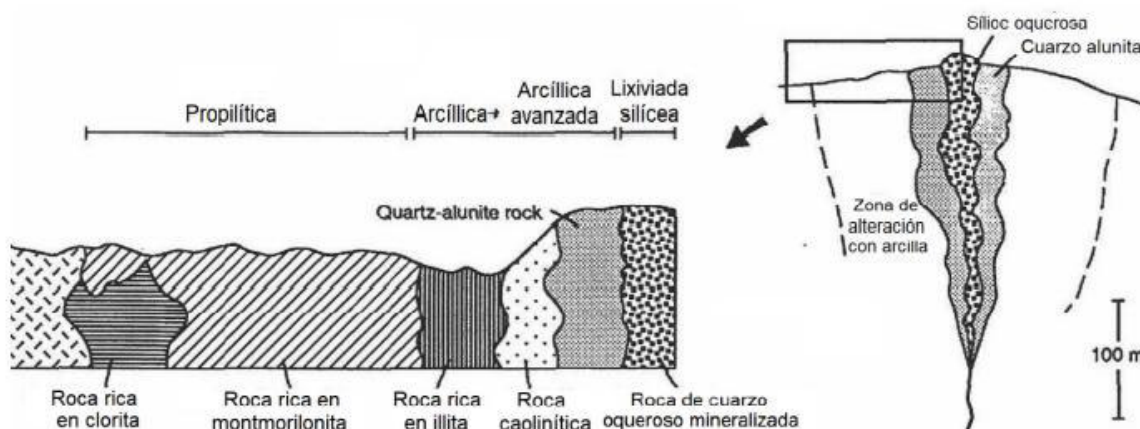


Figura N°38. Sección a través de un cuerpo típico de alta sulfuración, mostrando un ensanchamiento ascendente del núcleo silíceo, con un recuadro ilustrando la zonación característica hacia fuera del núcleo silíceo el cual puede contener una textura de cuarzo oqueroso (“vuggy quartz”).

Fuente: (Hedenquist, Izawa, Arribas, & White, 2001)

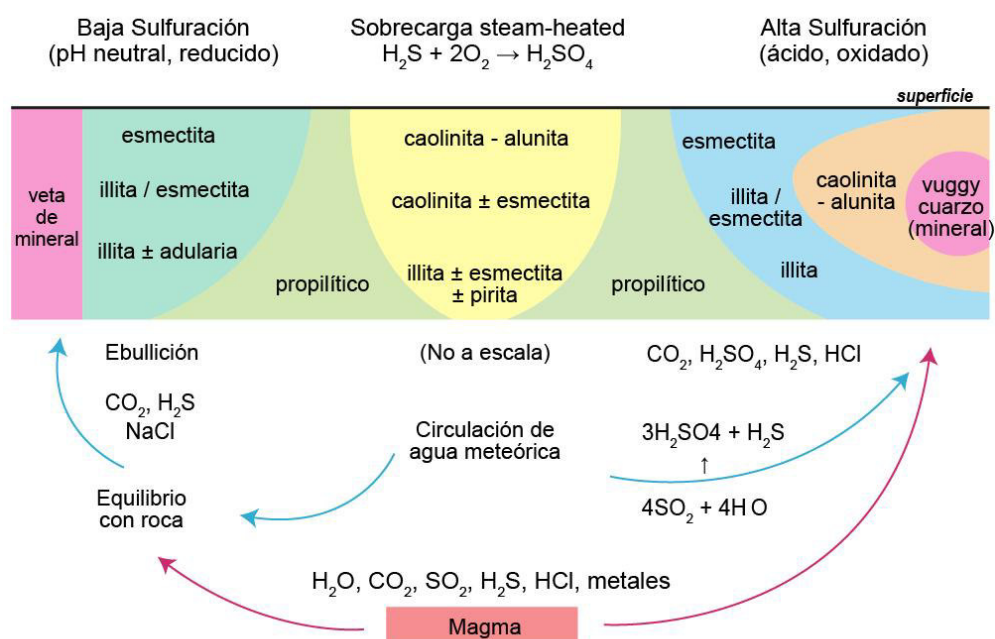


Figura N°39. Distribución esquemática de la alteración hidrotermal asociada con los yacimientos epitermales de baja y alta sulfuración.

Fuente: (Antoni, Gonzáles-Partida, Levresse, Tritlla, & Carrillo-Chávez, 2023)

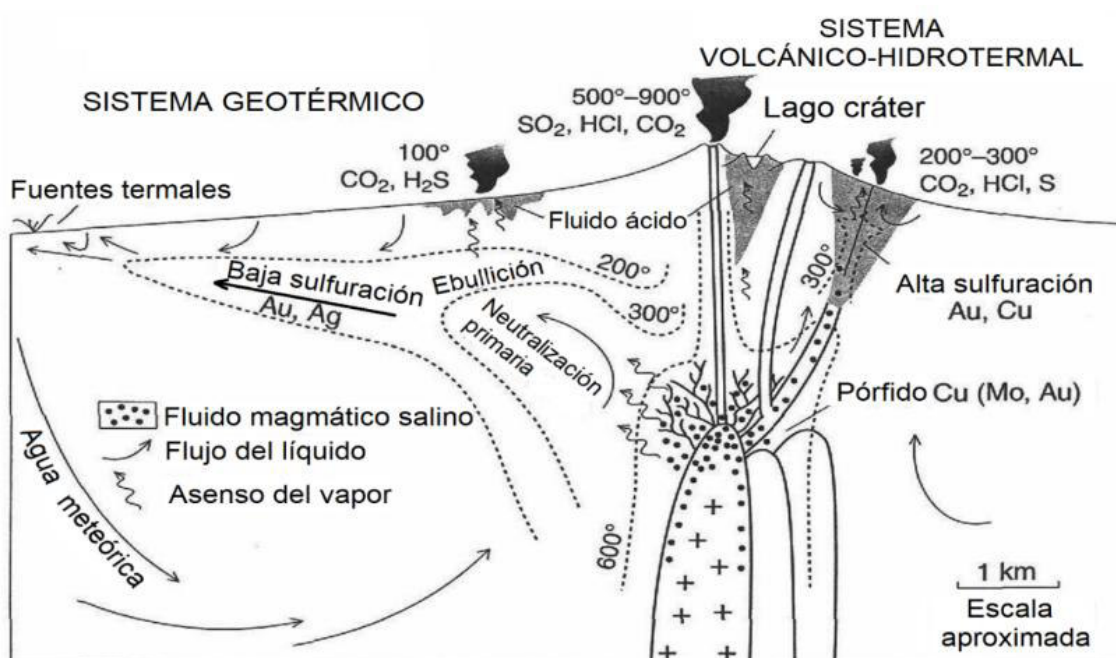


Figura N°40. Dibujo para ilustrar esquemáticamente los procesos deducidos para sistemas volcánico-hidrotermal y geotérmico y los respectivos ambientes de estilos de alta y baja sulfuración de depósitos epitermales en relación con el motor intrusivo.

Fuente: (Hedenquist, Arribas, & Gonzales-Urien, 2000)

2.2.7.3 Depósitos de pórfido de cobre

Este tipo de depósito comprenden yacimientos de gran volumen de mineralización primaria de sulfuros de Cu – Fe, en general hospedados y asociados a cuerpos intrusivos porfíricos. La roca huésped es típicamente granodiorita, cuarzo-monzonita y pórfido andesítico, la mineralización ocurre en forma disseminada, en vetillas y enjambres de vetillas (stockwork), en columnas de brecha y también como rellenos. Los cuerpos de pórfidos cupríferos tienden a ser grandes de forma concéntrica elongada, con contornos regulares e irregulares en planta. Normalmente se observa mayor disseminación horizontal que vertical. (Townley, 2001)

Los depósitos de pórfido de Cu muestran un patrón de zonificación de alteración-mineralización consistente a gran escala que comprende, centralmente de abajo hacia arriba halos de sodio-calcio, potásico, clorita-sericita y argílica avanzada. La alteración clorítica y propilítica se desarrollan distalmente a niveles someros y profundos, respectivamente. En la Figura N°41 se observa los diferentes tipos de alteración variando notablemente de un depósito a otro. La alteración sericítica se puede proyectar verticalmente hacia abajo como un anillo que separa las zonas potásica y propilítica y corta la zona potásica centralmente como se muestra. La alteración sericítica tiende a ser más abundante en depósitos de pórfido Cu-Mo, mientras que la alteración clorita-sericita se desarrolla preferentemente en depósitos de Cu-Au. (Sillitoe, 2010).

La alteración formada tempranamente puede ser sobreimpresa por ensambles más jóvenes. Las zonas potásicas centrales y de formación temprana (feldespato potásico y biotita) comúnmente coinciden con el mineral económico. Esta alteración puede estar flanqueada por rocas ricas en biotita que se gradúan hacia fuera en rocas propilíticas. Estos conjuntos de alteraciones más antiguos en zonas cupríferas pueden estar parcial o completamente sobreimpresos por biotitas y feldespatos K posteriores y luego por alteración filica (cuarzo-sericita-pirita) que domina el stockwork, la zona de alteración argílica

intermedia aparece de forma lateral a la zona de alteración filica y no siempre está presente. Rara vez, en la parte superior más alta de algunos depósitos minerales, se reconoce la alteración argílica avanzada (alunita - cuarzo). (Hauff P. , 2008)

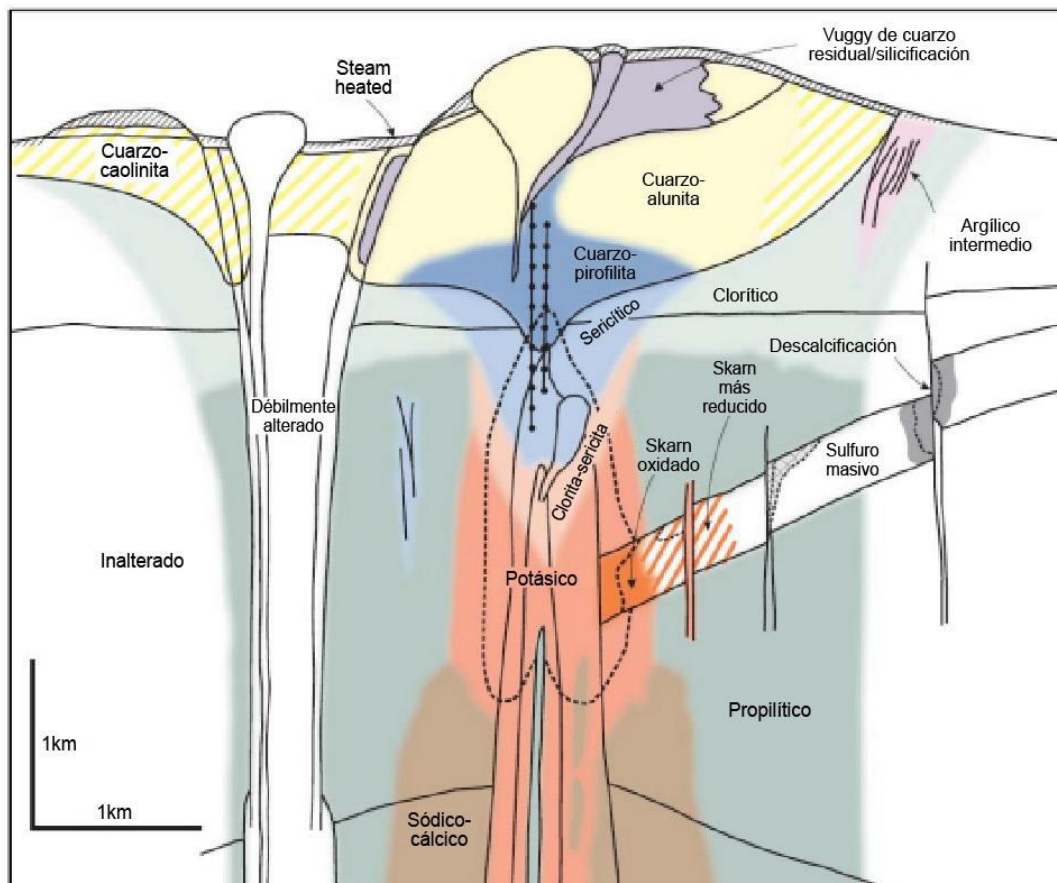


Figura N°41. Sección idealizada que muestra la zonación de alteración de los pórfidos de Cu.

Fuente: (Sillitoe, 2010)

2.2.7.4 Skarn

Los skarns pueden formarse durante el metasomatismo regional o de contacto y a partir de una variedad de procesos metasomáticos que involucran fluidos de origen magmáticos, metamórficos, meteórico y/o marino. Lo que define un depósito como skarn, es la mineralogía, debido a que esta incluye una amplia variedad de calcosilicatos y minerales asociados, pero generalmente se encuentra dominada por la presencia de granate y piroxeno (Meinert, Dipple, & Nicolescu, 2005).

La alteración metasomática del skarn evoluciona a una temperatura más baja (<400 °C), generalmente a ensambles hidratados y ricos en sulfuro, denominados alteración retrógrada. Es decir, la alteración retrógrada hace referencia a una etapa de alteración en la que los minerales de temperatura más alta, generalmente anhidros, son reemplazados por minerales de temperatura más baja, generalmente hidratados. Dicha alteración retrógrada generalmente se acompaña de brechas y es causada por la entrada de agua más fría y de menor salinidad de los fluidos que todavía son de origen magmático. La alteración retrógrada se caracteriza por la presencia de epidotas, anfíboles, cloritas y otras fases hidratadas. La alteración progradada del skarn se relaciona con la alteración potásica y esta zonada con respecto al núcleo potásico, se caracteriza por la presencia de tremolita-actinolita, esmectita, siderita, calcita, talco, epidota, clorita, óxidos y/o sulfuros de hierro.

En la Figura N°42 se observa las etapas evolutivas de los depósitos de skarn asociados a plutones. A. Causas de la intrusión inicial de metamorfismo en las rocas sedimentarias. B. Recristalización metamórfica, cambios de fase y la circulación de fluidos formando diversos minerales de silicato de calcio. C. La cristalización y la liberación de una fase acuosa separada dan como resultado skarn metasomático controlado por fluidos. D. El enfriamiento del plutón, la separación de fases de vapor y la circulación de aguas meteorológicas más frías pueden causar alteración retrógrada de ensamblajes metamórficos y metasomáticos de calcio-silicato, la alteración retrógrada es más extensa en las zonas profundas. (Meinert, Dipple, & Nicolescu, 2005)

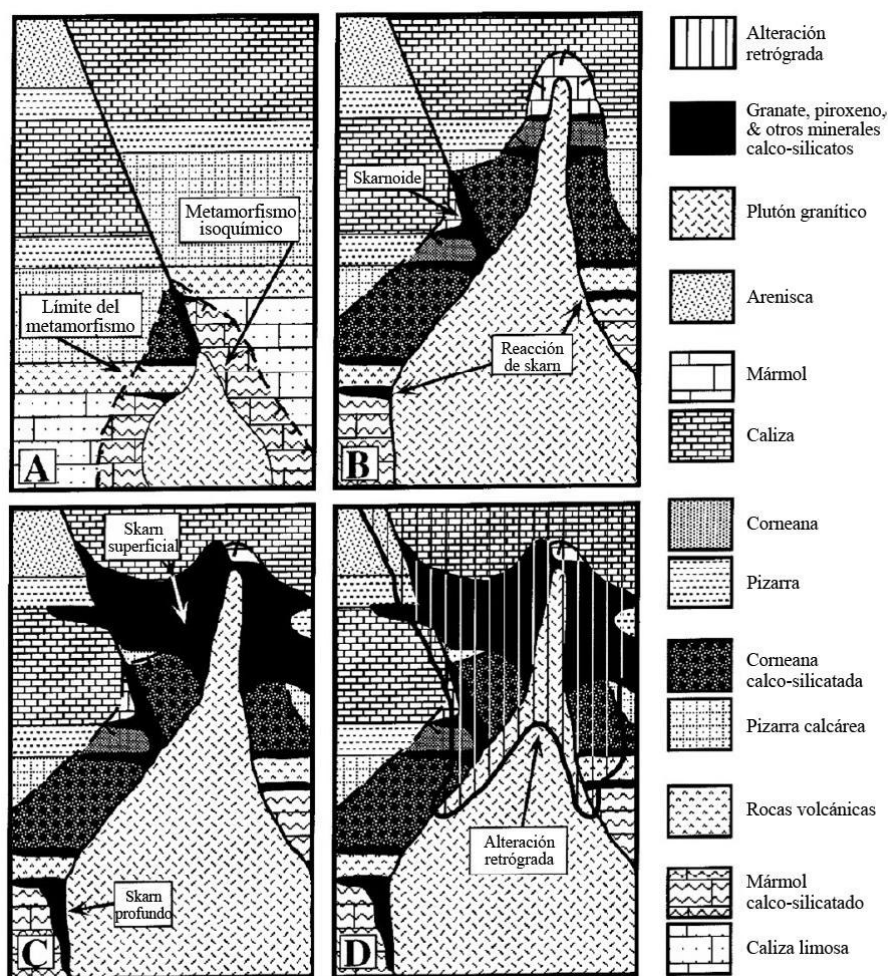


Figura N°42. Etapas evolutivas de los depósitos de Skarn asociados a plutones.

Fuente: (Meinert, Dipple, & Nicolescu, 2005)

En resumen, se presenta la Tabla N°07, donde se indican los diferentes tipos de depósitos y cada uno con sus respectivas alteraciones hidrotermales, señalando las que se encuentran más próximas y distales a la zona de mineralización económica, y a la vez, dentro de cada tipo de alteración hidrotermal se detallan los minerales más representativos de cada una de ellas, de los cuales los que están con letra de color rojo, son los minerales que se pueden detectar con el método de la espectroscopia de reflectancia.

Tabla N°07. Tipos de depósitos minerales con sus respectivas asociaciones mineralógicas.

Fuente: (Pontual, Merry, & Gamson, 2008)

TIPO DE DEPÓSITO	ALTERACIÓN					
	PROXIMAL					DISTAL
Pórfido	Potásica: Kfel, bt , mgt, qtz, anhidrita, cpy, bornite.	Calcosódica: albita, act-hbl , piroxeno, mgt/py.	Fílica: qtz, mica blanca , py, cpy, ±turmalina .	Argílica int: mica blanca-illita , chl, caolinita/esmect, py.	Argílica: caolinita , mica blanca , dikita , qtz, py.	Propilítica: chl-epidota-calcita , py, ±act/hbl , mgt.
Alta sulfidación	Arg. Avanzada: vuggy sil, alu , piro , diásporo , topacio , zunyita , py, enargita, sulfosales.	Arg. Avanzada: alunita , dikita , caolinita .		Argílica: caolinita , illita .		Propilítica: chl , esmectita .
Sulfidación intermedia	Adularia, qtz, mica blanca , py, esfalerita-galena.	Argílica: illita , caolinita , esmectita , qtz, py, Mn carb/silicato , NH4 .				Propilítica: chl , esmectita , calcita , py.
Baja sulfidación	Adularia, qtz, mica blanca , py, carbonato .	illita , caolinita , carbonato , qtz, py, NH4 .				Propilítica: chl , esmectita , calcita , py.
Skarn	Skarn progrado: granate, px, mgt, cpy, esfalerita.	Skarn retrogrado: anf , chl , ep , calcita , esfalerita, galena, cpy, mgt, py.	Mica blanca , caolinita , silice, py.			Propilítica: chl-epidota-calcita-esmectita -py.

CAPITULO III

3 HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 *Hipótesis general*

Existe una diferencia significativa entre los resultados mineralógicos y espectrales obtenidos directamente del TerraSpec Halo y aquellos generados mediante el procesamiento de los espectros en el programa The Spectral Geologist, lo que permite evaluar cuál de los dos métodos ofrece mayor precisión en la vectorización de alteraciones hidrotermales.

3.1.2 *Hipótesis específicas*

- Los resultados obtenidos directamente del TerraSpec Halo permiten realizar estudios preliminares de alteraciones hidrotermales, aunque presentan limitaciones.
- El procesamiento de los espectros en el programa The Spectral Geologist mejora el nivel de detalle y precisión en la identificación, gracias al análisis de los parámetros espectrales.

3.2 Identificación de variables

3.2.1 *Variable independiente*

El método de análisis espectral, incluyen los resultados obtenidos directamente del TerraSpec Halo y los resultados generados en el programa The Spectral Geologist.

3.2.2 *Variable dependiente*

La identificación de minerales de alteración, esto se refiere a la precisión y calidad de la identificación de los minerales de alteración basándose en los métodos de análisis espectral utilizados.

CAPITULO IV

4 METODOLOGÍA

4.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada y comparativa. Se considera aplicada porque busca evaluar el desempeño de dos herramientas espectrales (TerraSpec Halo y el programa TSG), en un contexto práctico en el ámbito geológico, específicamente en la identificación de minerales de alteración. Asimismo, es comparativa, ya que el objetivo central de la investigación consiste en analizar las similitudes y diferencias entre los resultados mineralógicos y espectrales obtenidos directamente del TerraSpec Halo y aquellos generados mediante el procesamiento de los espectros en el programa TSG.

4.2 Instrumentos de investigación

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación fue necesario utilizar las siguientes herramientas:

- ✓ El espectrómetro portátil de mano TerraSpec Halo, este dispositivo, se complementa con su programa de gestión Halo Manager, permite obtener los espectros de cada muestra. Al finalizar la recopilación de datos de todas las muestras, los resultados se descargan directamente del espectrómetro, a través del Halo Manager, generando un cuadro final de resultados.
- ✓ The Spectral Geologist (TSG), programa especializado en el procesamiento de los espectros obtenidos con el TerraSpec Halo, que ofrece herramientas avanzadas para la validación e interpretación de las firmas espectrales.

Todo esto con el fin de cumplir con los objetivos planteados.

4.3 Procesos

La presente tesis se enfoca en determinar si los resultados obtenidos del TerraSpec Halo y los generados en el programa The Spectral Geologist son similares o diferentes, mediante el análisis de espectrometría. El proceso desarrollado fue el siguiente (Figura N°36):

4.3.1 *Recopilación de información*

- Búsqueda, investigación y análisis de información bibliográfica relacionada con el tema de investigación.
- Recolección de muestras de rocas con sus respectivas fotografías. La recolección fue realizada de manera aleatoria, considerando las necesidades de los objetivos.

4.3.2 *Aplicación de la espectrometría de reflectancia*

- Uso de espectrómetro TerraSpec Halo para la toma de datos (espectros y cuadro de resultados).
- Uso del programa The Spectral Geologist para la validación e interpretación de las firmas espectrales.

4.3.3 *Análisis comparativo entre resultados*

- Integración de los resultados obtenidos directamente y de los generados para realizar un análisis comparativo de los minerales de alteración identificados en ambos resultados.
- Comparación y distinción entre los escalares y los parámetros espectrales obtenidos.
- Determinar el tipo de alteración hidrotermal a partir de los resultados mineralógicos.

4.3.4 *Redacción de tesis*

- Redacción de capítulos I, II, III, IV y V

METODOLOGÍA DE TRABAJO

RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN

Información bibliográfica



Recolección de muestras

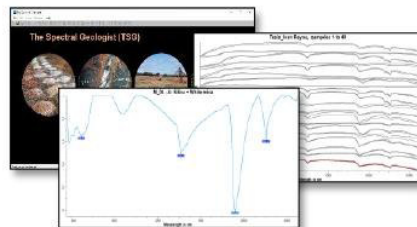


ESPECTROMETRÍA DE REFLECTANCIA

TerraSpec Halo



The Spectral Geologist (TSG8)



ANÁLISIS COMPARATIVO

Minerales identificados

Muestra	RESULTADOS TSG8	RESULTADOS TERRASPEC HALO
	Asociaciones Mineralógicas	Asociaciones Mineralógicas
M_01	kaolinite+sílica kaolinite+sílica	Halloysite Halloysite
M_02	silica+white mica+gophtite silica+white mica+gophtite	Ferrihydrite+Harmotome+Montmorillonite+Gypsum+Kaolinite/WX Ferrihydrite+Harmotome+Montmorillonite+Gypsum+Kaolinite/WX
M_03	kaolinite+hematite	Hematite/Kaolinite/WX+Pyrophyllite
M_04	kaolinite+hematite silica+white mica silica+white mica	Montmorillonite Montmorillonite

Escalares espectrales

VS

Parámetros espectrales

AlFeMg	AlOH	CSM
Fe3i	Fe3t	FeOH
ISM	Kx	MgOH

Wav WtMica	Type WtMica	XT WtMica
XTKaol 2180	XTKaol 2160	Wav AlOH
Wav Chlorite	Type Chlo	XT Kaol
D MgOHCB	Wd MgOHCB	Wav OH1400

REDACCIÓN DE TESIS



Figura N°43. Etapas de la metodología de trabajo para el desarrollo de la tesis.

CAPITULO V

5 RESULTADOS

5.1 Etapas de la investigación

5.1.1 Etapa 1: Recopilación de la información

Para iniciar la investigación, se comenzó por la recolección de las muestras de manera aleatoria teniendo en cuenta las necesidades de la investigación. Se recolectó un total de 20 muestras de rocas alteradas de superficie, a cada muestra se le marcó un área en referencia para llevar a cabo el análisis, esta área dibujada debe ser más grande que el área de sensor de lectura del TerraSpec Halo, para evitar disparar sobre la tinta del bolígrafo, la cual podría generar ruido en el espectro original.

Otro aspecto importante que considerar es que las muestras deben de estar secas, por ello, fueron colocadas sobre una mesa para que puedan secar a temperatura ambiente durante 2 días antes de realizar las lecturas. (Ver anexo A).



Figura N°44. Muestras de rocas señalizadas donde ocurre la alteración mineral para la toma de datos con el TerraSpec Halo.

Se colocó un código a cada muestra para llevar un control preciso durante la recolección de los espectros con el TerraSpec Halo, debido a que el instrumento ordena las lecturas de manera numérica en forma ascendente, empezando por el número 1, por lo que los espectros obtenidos seguirán esta numeración. A la muestra codificada como M_01 le corresponde los espectros 1 y 2, a la muestra M_02 los espectros 3 y 4, y así sucesivamente hasta la última muestra.

Tabla N°08. Codificación del número de lecturas tomadas con el TerraSpec Halo correspondientes a cada muestra.

ID	CÓDIGO	LECTURAS HALO		OBSERVACIONES
1	M_01	1	2	Muestra de Roca Superficial
2	M_02	3	4	Muestra de Roca Superficial
3	M_03	5	6	Muestra de Roca Superficial
4	M_04	7	8	Muestra de Roca Superficial
5	M_05	9	10	Muestra de Roca Superficial
6	M_06	11	12	Muestra de Roca Superficial
7	M_07	13	14	Muestra de Roca Superficial
8	M_08	15	16	Muestra de Roca Superficial
9	M_09	17	18	Muestra de Roca Superficial
10	M_10	19	20	Muestra de Roca Superficial
11	M_11	21	22	Muestra de Roca Superficial
12	M_12	23	24	Muestra de Roca Superficial
13	M_13	25	26	Muestra de Roca Superficial
14	M_14	27	28	Muestra de Roca Superficial
15	M_15	29	30	Muestra de Roca Superficial
16	M_16	31	32	Muestra de Roca Superficial
17	M_17	33	34	Muestra de Roca Superficial
18	M_18	35	36	Muestra de Roca Superficial
19	M_19	37	38	Muestra de Roca Superficial
20	M_20	39	40	Muestra de Roca Superficial

Para iniciar la recolección de los datos con el TerraSpec Halo, hay una serie de procedimiento a seguir. Primero, se conecta el TerraSpec Halo apagado a una computadora portátil con el programa gestión Halo Manager instalado. Segundo, en el Halo Manager se crea el proyecto "Tesis_Ivan", luego se procede a encender el TerraSpec Halo para realizar la sincronización con la computadora, una vez

completada la sincronización, nuevamente se apaga el TerraSpec Halo y se desconecta de la computadora.

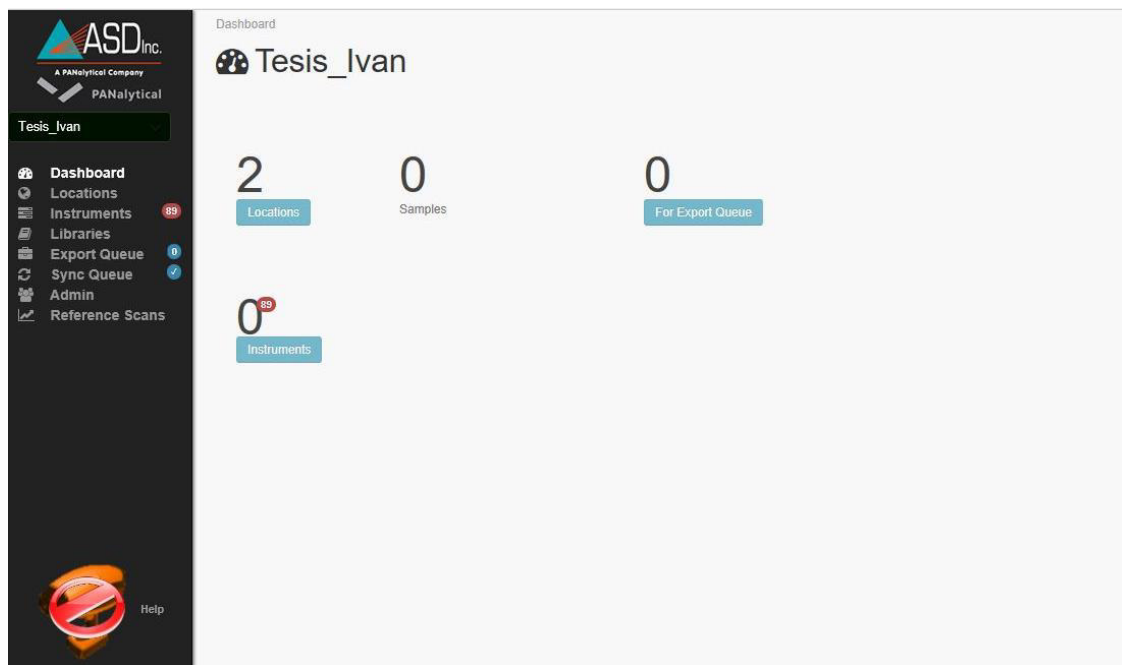


Figura N°45. Creación del proyecto “Tesis Ivan” en el programa Halo Manager, v.2018.

Tercero, se vuelve a encender nuevamente el TerraSpec Halo y se coloca el disco de referencia blanca (Spectralon) en la ventana de lectura para que el espectrómetro realice una calibración inicial apoyado de esta referencia blanca, luego el instrumento se calibrará automáticamente. Una vez completada la calibración de manera exitosa, el TerraSpec Halo quedó listo para ser utilizado.

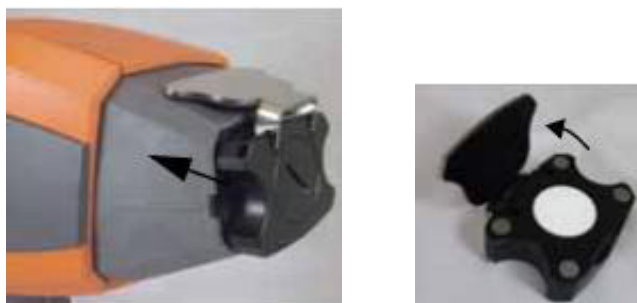


Figura N°46. Referencia blanca (Spectralon) utilizada para la calibración del TerraSpec Halo.

A través de la pantalla del TerraSpec Halo, se verifica la ubicación del proyecto creado en un inicio en el programa Halo Manager. Para poder trabajar dentro de este proyecto, se debe activar la ubicación en el instrumento.

Se realizan 2 lecturas por cada muestra, es decir, se obtiene 2 espectros o archivos ASD por muestra. Para realizar la recolección de los datos se mantiene firme el TerraSpec Halo frente a la muestra. Se enfoca la ventana de lectura hacia el área marcada en la muestra, y luego se presiona el gatillo del espectrómetro, se mantiene quieto tanto al instrumento como la muestra durante el proceso de lectura, esperando a que el TerraSpec Halo emita un sonido de timbre, lo que indica que la lectura de la muestra se ha realizado con éxito.



Figura N°47. Lectura de la muestra con el TerraSpec Halo.

Al finalizar la lectura de una muestra, el TerraSpec Halo automáticamente muestra en su pantalla los minerales identificados junto con el indicador del nivel de fiabilidad de esta predicción y los escalares espectrales detectados (Figura N°48). Además, en la pantalla del TerraSpec Halo se puede visualizar la firma espectral resultante de la muestra.



Figura N°48. Pantalla incorporada al espectrómetro TerraSpec Halo, donde se puede visualizar los resultados obtenidos de manera inmediata.

Todas las lecturas realizadas se almacenan automáticamente en el proyecto activado en el TerraSpec Halo, para exportar estas lecturas, es necesario volver a conectar el TerraSpec Halo a la computadora portátil donde se creó el proyecto, y realizar nuevamente la sincronización para transferir toda la información al programa Halo Manager.

Desde Halo Manager, se procede a descargar los archivos en formato ASD (también llamados espectros) al computador. En total, se generaron 40 archivos, uno por cada lectura. Son estos archivos los que luego se cargan en el programa The Spectral Geologist para visualizar las firmas espectrales de cada uno de ellos y poder realizar sus validaciones e interpretaciones.

También se descargó un archivo en formato TXT, el cual se abrió en una hoja de cálculo de Excel. Este archivo es de suma importancia, ya que contiene los resultados mineralógicos y espectrales emitidos directamente del TerraSpec Halo. Los resultados mostrados en este archivo son utilizados para realizar, posteriormente, el análisis comparativo con los resultados generados en el programa The Spectral Geologist.

5.1.2 Etapa 2: Resultados obtenidos del TerraSpec Halo

Se descarga el archivo en formato TXT que se obtiene al momento de exportar los datos del TerraSpec Halo al computador. Este archivo muestra los resultados mineralógicos y los escalares espectrales que se obtienen de manera directa del TerraSpec Halo, los cuales se presentan en la Tabla N°09. Esta tabla muestra un total de 40 resultados, ya que la evaluación consistía en realizar 2 lecturas por muestra, abarcando un total de 20 muestras.

Se tomó en cuenta las siguientes especificaciones con respecto a las micas blancas:

- ✓ La illita están etiquetadas como K-illita en la biblioteca de minerales del Halo.
- ✓ La illita paragonítica están etiquetadas como Na-illita en la biblioteca de minerales del Halo.
- ✓ La illita fengítica están etiquetadas como Mg-illita en la biblioteca de minerales del Halo.

Además, de acuerdo con el nivel de confiabilidad en la predicción de cada mineral, estos vienen acompañados por un número, los cuales indican los números de estrellas que se logra obtener de cada mineral:

- ✓ 3 estrellas: fiabilidad mayor al 90% de la presencia del mineral en la muestra.
- ✓ 2 estrellas: fiabilidad de 90 a 60% de la presencia del mineral en la muestra.
- ✓ 1 estrella: fiabilidad menor al 60% de la presencia del mineral en la muestra.

Tabla N°09. Resultados obtenidos directamente con el TerraSpec Halo.

En esta tabla se presenta tanto los resultados mineralógicos como los escalares espectrales obtenidos con el TerraSpec Halo. Las primeras siete columnas corresponden a los minerales identificados, ordenados según su nivel de fiabilidad: la columna "Mineral 1" representa el mayor nivel de fiabilidad, y cada columna en lo sucesivo indica un nivel de fiabilidad menor. Las últimas 9 columnas muestran los escalares espectrales.

ID	Muestra	Mineral 1	Mineral 2	Mineral 3	Mineral 4	Mineral 5	AlFeMg	AlOH	CSM	Fe3i	Fe3t	FeOH	ISM	Kx	MgOH
1	M_01	Halloysita:3						2207.82						0.978	
		Halloysita:3						2207.8						0.979	
2	M_02	Ferrihydrite:3	Harmotome:3	Montmorillonita:2	Yeso:1	Caolinita_WX:1		2207.27						1.019	
		Ferrihydrite:3	Harmotome:3	Montmorillonita:2	Yeso:1	Caolinita_WX:1		2207.25						1.019	
3	M_03	Hematita:3	CaolinitaWX:3	Palygorskite:3			2207.62	2207.62		2.412	873.166			0.965	2382.01
		Hematita:3	CaolinitaWX:3	Palygorskite_3			2207.57	2207.57		2.428	874.154			0.965	2381.95
4	M_04	Montmorillonita:3						2207.48							
		Montmorillonita:3						2207.68							
5	M_05	Ferrihydrite:3	Halloysita:3					2207.84						0.97	
		Ferrihydrite:3	Halloysita:3					2207.79						0.971	
6	M_06	Hematita:3	Chabazite:3	Montmorillonita:3				2207.39		1.768	875.903				
		Hematita:3	Gmelinite-Na:3							1.748	876.901				
7	M_07	Yeso:3	Caolinita_PX:3					2208.1						1.016	
		Yeso:3	Caolinita_PX:3					2208.05						1.017	
8	M_08	Harmotome:3	Mg-illita:2				2208.24	2208.24					0.298		2313.01
		Clinoptilolite:3	Yeso:2	Mg-illita:1	Smithsonite:1	Gibbsite:1	2208.07	2208.07					0.289		2348.28
9	M_09	Caolinita_PX:3	Caolinita_WX:3					2207.74						0.988	
		Caolinita_PX:3	Caolinita_WX:3					2207.69						0.988	

10	M_10	Ferrihydrite:3	Caolinita_WX:3	Muscovite:3			2207.76	2207.76					1.645	0.948	2382.06
		Ferrihydrite:3	Caolinita_WX:3	Muscovite:3			2207.72	2207.72					1.664	0.948	2382.19
11	M_11	Montmorillonita:3	Caolinita_PX:3					2207.93						1.019	
		Montmorillonita:3	Caolinita_PX:3					2207.84						1.017	
12	M_12	Halloysita:3	Montmorillonita:3					2207.5						1.006	
		Halloysita:3	Montmorillonita:3					2207.61						1.008	
13	M_13	Montmorillonita:3	Rectorite:3					2208.03							
		Montmorillonita:3	Rectorite:3					2207.93							
14	M_14	CaolinitaPX:3	Sepiolite:2					2207.46						0.995	2383.81
		CaolinitaPX:3	Sepiolite:2					2207.46						0.996	2382.89
15	M_15	Chabazite:3	Yeso:2	CaolinitaWX:1				2208.05						1.013	
		Illita/Esmectita:3	Yeso:3	CaolinitaWX:1				2208.03						1.025	
16	M_16	Halloysita:3						2207.53						0.977	
		Halloysita:3						2207.5						0.977	
17	M_17	Montmorillonita:3						2227.07							
		Montmorillonita:3	FeClorita:3					2227.1							
18	M_18	Montmorillonita:3	CaolinitaPX:3					2207.77						1	
		Montmorillonita:3	CaolinitaPX:3					2207.72						1.001	
19	M_19	CaolinitaPX:3	Mg-illita:2				2207.58	2207.58					0.946	1.017	INV
		CaolinitaPX:3	Mg-illita:2				2207.56	2207.56					0.956	1.018	2310.57
20	M_20	Goethita:3	Halloysita:3	Illita/Esmectita:3	Fengita:2			2207.79		1.498	923.168		0.835	1.007	
		Goethita:3	Halloysita:3	Illita/Esmectita:3	Fengita:2			2207.81		1.505	924.905		0.858	1.007	

5.1.3 Etapa 3: Resultados de los espectros cargados en el programa The Spectral Geologist

Al exportar los archivos del espectrómetro TerraSpec Halo hacia el computador, se obtuvieron un total de 40 espectros, debido a que se realizaron 2 lecturas por muestra. Estos espectros fueron cargados al programa The Spectral Geologist para llevar a cabo lo siguiente:

1. Validar los 40 espectros obtenidos de TerraSpec Halo, los cuales fueron importados al programa para verificar la visualización de la firma espectral de cada espectro.
2. Realizar la interpretación de cada firma espectral, observando las características principales de absorción, utilizando como referencia las firmas espectrales de la biblioteca espectral proporcionada por el programa The Spectral Geologist.
3. Obtener algunos parámetros espectrales, mediante una programación sencilla. Se realizaron cálculos matemáticos para obtener dichos parámetros espectrales.

5.1.3.1 Minerales identificados en el programa The Spectral Geologist

El programa The Spectral Geologist proporciona datos sobre la contribución espectral estimada de un mineral en un espectro, en relación con otro mineral, se debe tener en cuenta que la contribución espectral es una estimación solo de la contribución mineral al espectro y no necesariamente se relaciona con la proporción de volumen de mineral en la muestra (AUSSPEC, 2019).

Los minerales se enumeraron en orden de dominancia espectral y cada mineral va seguido de una estimación numérica (ejemplo, Caolinita:60) que representa la contribución espectral de ese mineral al espectro. Esto no es el porcentaje del mineral en la muestra, solo la contribución al espectro. Los resultados mineralógicos se presentan de la siguiente manera:

- ✓ Una columna de las asociaciones mineralógicas detectadas en la zona SWIR con sus respectivas contribuciones espectrales. Ejemplo: Moscovita:60 + Caolinita:30 + Carbonato:10.

- ✓ Tomando como referencia la columna anterior, en las siguientes 3 columnas se distribuyen los minerales de manera individual, en orden descendente, esto quiere decir que primero estará ubicado el mineral de mayor valor en la contribución espectral, así sucesivamente hasta finalizar con el mineral de baja contribución espectral.
- ✓ Hay 1 columna para los minerales detectados en la zona VNIR de la firma espectral (350-1300 nm), estos minerales no son tomados en cuenta en la contribución espectral.

5.1.3.2 Observaciones de los resultados mineralógicos

Las asociaciones mineralógicas y el valor de la contribución espectral en algunos minerales son informados en grupo y no de manera individual. Los grupos identificados en este trabajo de investigación son los siguientes:

- ✓ Mica blanca
- ✓ Clorita

Mica blanca: Este término es utilizado como un término general para referirse a los siguientes minerales: moscovita, paragonita, fengita, illita-moscovítica, illita-paragonítica e illita-fengítica. En la columna "Tipo_MicaBI" se especifica el mineral.

Cloritas: Para saber el tipo de clorita que se identificó, se tiene la columna "Tipo_Clorita", esta columna informa la fase en la que se encuentra la clorita, como las cloritas ricas en magnesio (Mg), intermedias (MgFe) o las ricas en hierro (Fe).

En la Tabla N°10 se presentan los resultados mineralógicos obtenidos luego del procesamiento de los espectros, a través de la validación e interpretación de las firmas espectrales, en el programa The Spectral Geologist. Los resultados de los parámetros mencionados líneas arriba, como "Tipo_MicaBI" y "Tipo_Clorita", serán mostrados más adelante en otra tabla.

Tabla N°10. Resultados mineralógicos generados en el programa The Spectral Geologist.

En esta tabla se presenta el ensamble mineralógico en la columna "SWIR Minerales". Las siguientes columnas muestran cada mineral de manera individual según su contribución espectral, siendo la columna "Mineral1" el mineral de mayor contribución, y cada columna en lo sucesivo indica una contribución menor. En la última columna se presentan los minerales detectados en la zona VNIR.

Muestra	SWIR Minerales	Mineral1	Mineral2	Mineral3	VNIR Minerales
M_01	caolinita:71+sílice:29	caolinita	Sílice		novnir
	caolinita:69+sílice:31	caolinita	Sílice		novnir
M_02	sílice:79+mica blanca:21	sílice	mica blanca		goethita
	sílice:80+mica blanca:20	sílice	mica blanca		goethita
M_03	caolinita:100	caolinita			hematita
	caolinita:100	caolinita			hematita
M_04	sílice:79+mica blanca:21	sílice	mica blanca		novnir
	sílice:79+mica blanca:21	sílice	mica blanca		novnir
M_05	caolinita:81+sílice:19	caolinita	Sílice		goethita
	caolinita:80+sílice:20	caolinita	Sílice		goethita
M_06	sílice:80+mica blanca:20	sílice	mica blanca		novnir
	sílice:81+mica blanca:19	sílice	mica blanca		novnir
M_07	yeso:54+caolinita:46	yeso	Caolinita		novnir
	yeso:56+caolinita:44	yeso	Caolinita		novnir
M_08	sílice:73+clorita:27	sílice	Clorita		clorita
	sílice:73+clorita:27	sílice	Clorita		clorita
M_09	caolinita:81+sílice:19	caolinita	Sílice		goethita
	caolinita:80+sílice:20	caolinita	Sílice		goethita
M_10	caolinita:100	caolinita			goethita
	caolinita:100	caolinita			goethita
M_11	sílice:60+caolinita:25+clorita:15	sílice	Caolinita	clorita	clorita
	sílice:60+caolinita:25+clorita:15	sílice	Caolinita	clorita	clorita
M_12	caolinita:66+montmorillonita:34	caolinita	montmorillonita		novnir
	caolinita:65+montmorillonita:35	caolinita	montmorillonita		novnir
M_13	montmorillonita:74+sílice:26	montmorillonita	Sílice		novnir
	montmorillonita:72+sílice:28	montmorillonita	Sílice		novnir
M_14	caolinita:100	caolinita			goethita
	caolinita:100	caolinita			goethita
M_15	sílice:39+yeso:32+caolinita:29	sílice	Yeso	caolinita	goethita
	sílice:52+caolinita:25+yeso:23	sílice	Caolinita	yeso	goethita
M_16	caolinita:100	caolinita			novnir
	caolinita:100	caolinita			novnir
M_17	montmorillonita:40+sílice:36+mica blanca:24	montmorillonita	Sílice	mica blanca	novnir
	montmorillonita:42+sílice:34+mica blanca:24	montmorillonita	Sílice	mica blanca	novnir
M_18	sílice:51+caolinita:27+montmorillonita:22	sílice	Caolinita	montmorillonita	novnir
	sílice:51+caolinita:27+montmorillonita:22	sílice	Caolinita	montmorillonita	novnir
M_19	sílice:59+caolinita:41	sílice	Caolinita		novnir
	sílice:57+caolinita:43	sílice	Caolinita		novnir
M_20	caolinita:51+mica blanca:32+sílice:17	caolinita	mica blanca	sílice	goethita
	caolinita:52+mica blanca:31+sílice:17	caolinita	mica blanca	sílice	goethita

5.1.3.3 Parámetros espectrales desarrollados en el programa The Spectral Geologist

Los resultados obtenidos en el programa The Spectral Geologist no muestran todos los parámetros que se pueden desarrollar en el programa. Para esta investigación, se consideraron únicamente aquellos que se pueden comparar con los escalares espectrales obtenidos directamente del TerraSpec Halo.

Los parámetros espectrales se desarrollaron de 2 formas, los que se obtuvieron de forma directa, son los que describen a la firma espectral de manera numérica, como los Wavelength, Width y Deph, y los que fueron generados en base a cálculos matemáticos, no complejos, que se realizan en el programa, como la obtención de los valores de la cristalinidad.

Para poder entender los parámetros se debió de tener en cuenta las principales características de absorción espectral que se distingue en la zona SWIR. Los relacionales con hidroxilos y el agua, producen características de absorción cerca a los 1400 nm (OH y agua) y 1900 nm (Agua). Otras características principales de absorción espectral ocurren cerca de los 2200 nm (AlOH), 2250 (FeOH) y 2330 nm (MgOH). A continuación, en la Tabla N°11 se indican los rangos de posicionamiento aproximados de cada enlace molecular.

Tabla N°11. Rangos de posicionamiento de cada enlace molecular.

ENLACE MOLECULAR	POSICIÓN (nm)
O - H	~ 1400 nm (también ~1550 nm y ~1750-1850 nm en algunos minerales)
Agua (H ₂ O)	~ 1400 nm and ~1900 nm
Al - OH	~ 2160 – 2228 nm
Fe - OH	~ 2230 – 2295 nm
Mg - OH	~ 2300 – 2370 nm

En la Figura N°49 se muestra un gráfico indicando las zonas de posicionamiento que abarca cada enlace molecular y 4 firmas espectrales haciendo referencia a como sus características de

absorción se posicionan en determinadas zonas, esto de acuerdo con la composición del material analizado.

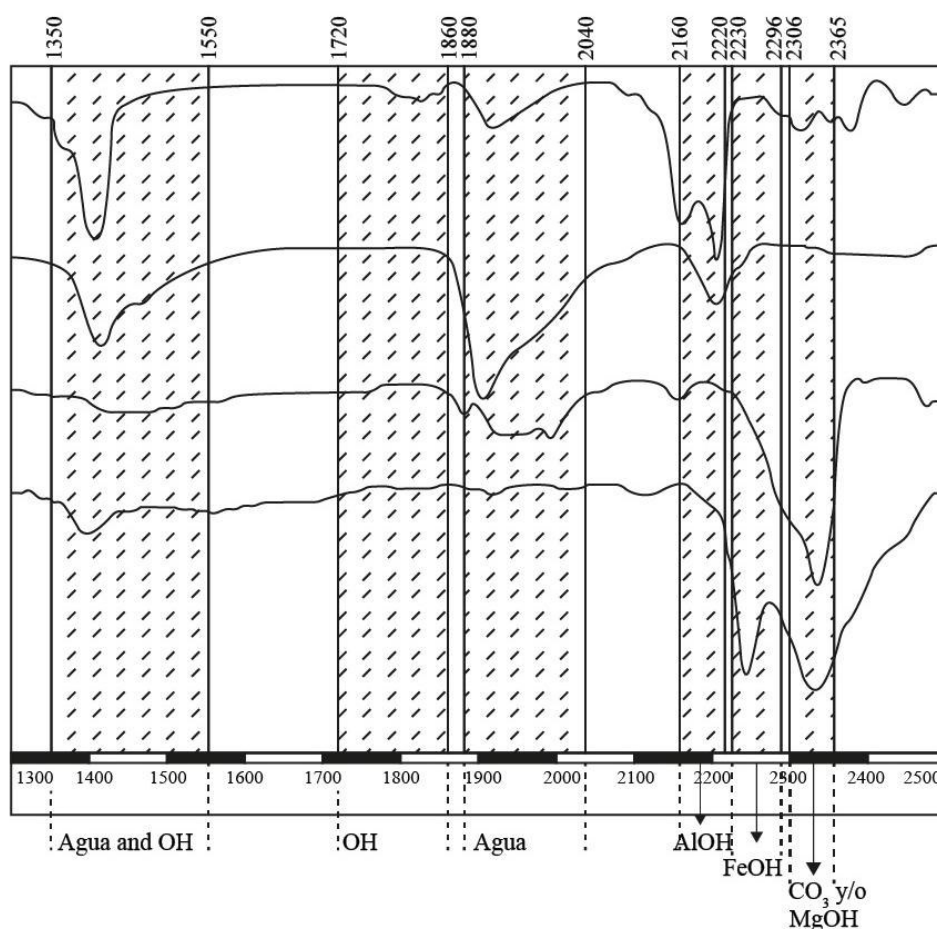


Figura N°49. Posicionamiento de cada enlace molecular.

Fuente: (Pontual, Merry, & Gamson, 2008)

En general, los parámetros espectrales obtenidos del procesamiento de los espectros en el programa The Spectral Geologist es la expresión numérica de la firma espectral, sus nombres hacen referencia a los componentes espectrales que se representan en cada firma espectral, los que comienzan con la palabra "Wav" (Abreviatura de Wavelength) hace referencia a la posición de la característica principal de absorción del enlace molecular indicado, este valor está representado como un valor de la longitud de onda. Ejemplo: Wav_AlOH, Wav_FeOH, Wav_MgOH.

Los nombres de los parámetros espectrales que comienzan con la letra “D” (Abreviatura de Depth) hacen referencia a las profundidades de la característica principal de absorción del enlace molecular indicado. Ejemplo D_AIOH, D_FeOH, D_MgOH.

Los nombres de los parámetros espectrales que comienzan con la palabra “Wd” (Abreviatura de Width) hace referencia a los medios máximos de la anchura completa de los rasgos de absorción del enlace molecular indicado. Ejemplo: Wd_AIOH, Wd_FeOH, Wd_MgOH.

Se tomó en cuenta la normalización o remoción de la envolvente antes de determinar y calcular los parámetros espectrales. En la Figura N°50, se visualizar gráficamente una firma espectral sin procesar y otra normalizada (remoción de la envolvente) junto con algunos parámetros espectrales como es la profundidad (D), el ancho (W) y el ancho completo a la mitad del máximo (F).

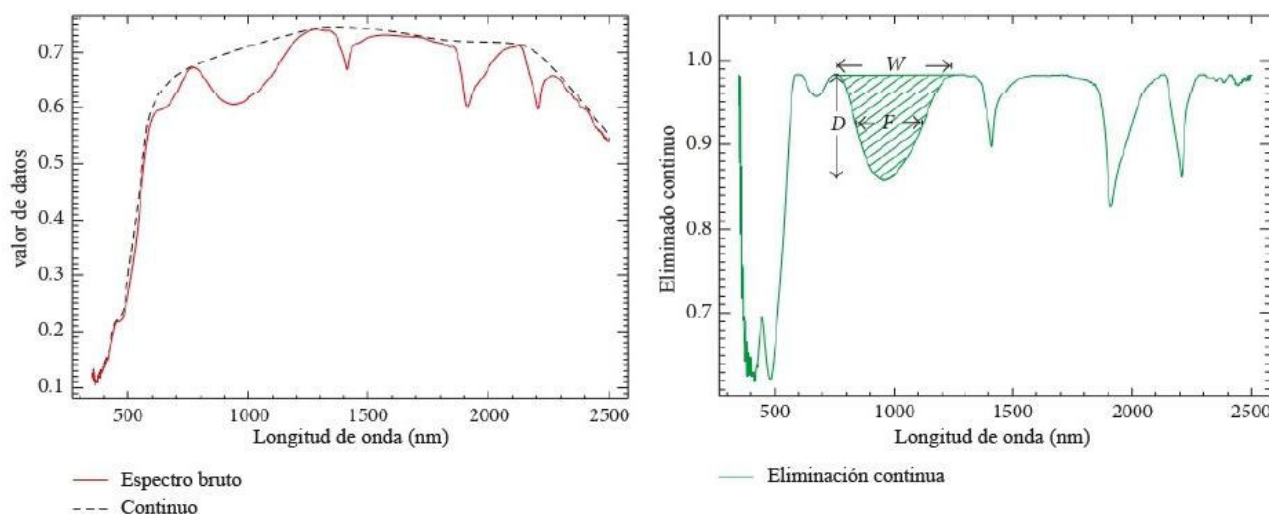


Figura N°50. (a) Firma espectral sin procesar; (b) Firma espectral normalizada.

Fuente: (Fang, & otros, 2018)

Los parámetros generados en base a cálculos matemáticos, no complejos, que se desarrollaron dentro del programa The Spectral Geologist, para esta investigación fueron los parámetros de cristalinidad. En esta investigación se desarrolló la cristalinidad de tres minerales en específico: la

cristalinidad de las micas blancas (XT_MicaBl), de las caolinitas (XT_Caol) y de las cloritas, los nombres de estos parámetros espectrales están anteceditos con las letras “XT”.

La cristalinidad nos permite delimitar la temperatura y la zonificación química en un sistema de alteración o distinguir la meteorización de ciertos minerales relacionados con algún tipo de alteración. A continuación, se explica el procedimiento para obtener estos parámetros de cristalinidad:

- ***Cristalinidad de las micas blancas (XT_MicaBl).***

Para poder hallar la cristalinidad de las micas blancas se necesitó los valores de otros 2 parámetros espectrales, el valor de la profundidad de absorción de AlOH (~2200 nm) y el valor de la profundidad de absorción del H₂O (~1900) (Lau, y otros, CSIRO Shortwave infrared spectral library - Evaluation and status report 2016, 2016)

$$\text{Cristalinidad Micas Blancas (XT_WtMicaBl)} = \frac{\text{Profundidad de Absorción AlOH (D_AlOH)}}{\text{Profundidad de Absorción H}_2\text{O (D_H}_2\text{O)}}$$

En base a esta fórmula, se observó que la cristalinidad de las micas blancas está relacionada con el H₂O, por eso la importancia de que las muestras se encuentren secas al momento de realizar la toma de datos con el TerraSpec Halo.

Tabla N°12. Clasificación de la cristalinidad de las micas blancas.

Fuente: (AusSpec International Ltd., 2008)

Valor	Cristalinidad
< 0.8	Poco cristalino
[0.8 - 1.15]	Cristalino
> 1.15	Altamente cristalino

- **Cristalinidad de las caolinitas (XT_Caol).**

Las variaciones de cristalinidad en las caolinitas se reflejan de la mejor manera mediante las longitudes de ondas e intensidades de las absorciones entre ~1400 y 2160-2180 nm, las cuales son expresadas como parámetros espectrales (AusSpec International Ltd., 2008).

Dado que las variaciones más distintivas relacionadas con la cristalinidad de la caolinita se producen en la región espectral de 2160-2180 nm, la determinación de la cristalinidad de la caolinita se realizó de forma más eficaz observando estos 2 puntos de absorción en las firmas espectrales.

La importancia de utilizar parámetros espectrales para expresar las variaciones de la cristalinidad de la caolinita es que dichos datos proporcionan información más cuantitativa. Las caolinitas de diferente cristalinidad se pueden clasificar, de acuerdo con la intensidad de absorción en los 2160 nm y en los 2180 nm. La clasificación de las caolinitas de acuerdo con su cristalinidad es las siguientes:

Tabla N°13. Clasificación de la cristalinidad de las caolinitas.

Fuente: (AusSpec International Ltd., 2008)

Clasificación de las caolinitas (XT_Caol)	Intensidad de absorción en 2160 (XTCaol_2160)	Intensidad de absorción en 2180 (XTCaol_2180)	Cristalinidad
K1	> 1.02	< 1.00	Muy baja
K2	> 1.02	[1 - 1.01]	Baja
K3	[1.00 - 1.03]	[0.99 - 1.02]	Moderada
K4	< 1	> 1.01	Alta

- **Cristalinidad de las cloritas (XT_Clorita).**

Para poder hallar la cristalinidad de las cloritas se necesitó los valores de 3 parámetros espectrales, el valor de la profundidad de absorción de FeOH (~2250 nm), el valor de profundidad de

$$\frac{\text{Profundidad de Absorción FeOH (D_FeOH)} + \text{Profundidad de Absorción MGOH (D_MgOH)}}{\text{Profundidad de Absorción H2O (D_H2O)}}$$

absorción de MgOH (~2340 nm), y el valor de la profundidad de absorción del H₂O (~1900) (Analytical Spectral Devices Inc., 2017).

Tabla N°14. Clasificación de la cristalinidad de las cloritas

Fuente: (Analytical Spectral Devices Inc., 2017)

Valor	Cristalinidad
< 1	Altamente cristalino
> 1	Poco cristalino

En la Tabla N°15 se observan los resultados obtenidos del TSG, en esta tabla solo se presentan los parámetros espectrales desarrollados. Los casilleros que se encuentran vacíos se deben a uno de los siguientes motivos:

- ✓ Los minerales que se detectaron probablemente no tienen una característica principal de absorción del enlace molecular que indica cada parámetro.
- ✓ Se pudo detectar la característica principal de absorción de algún enlace molecular, pero sin embargo la curvatura de absorción es tan mínima que no se pudo definir los parámetros, como el Depth (D) o el Width (Wd).
- ✓ Por la presencia de minerales sin características espectrales, los cuales enmascaran y no dejan apreciar los datos de otros minerales.

Tabla N°15. Resultados de los parámetros espectrales desarrollados en The Spectral Geologist (TSG).

Los parámetros espectrales presentados en esta tabla fueron generados para compararlos con los escalares espectrales obtenidos del TerraSpec lab. *Parámetros espectrales desarrollados mediante cálculos matemáticos básicos con los valores de otros parámetros.

Muestra	Wav MicaBI	Tipo MicaBI	XT MicaBI*	Wav Clorita	Tipo Clorita	XT Clorita*	XT Caol*	XTCaol 2180	XTCaol 2160	Wav Princip	Wav AlOH	D AlOH	Wd AlOH	Wav FeOH	D FeOH	Wd FeOH	Wav MgOH	D MgOH	Wd MgOH	Wav OH1400	D OH1400	Wd OH1400	Wav Agua	D Agua	Wav FeOxid	D FeOxid
M_01							K4	1.016	0.98	2207.82	2207.82	0.179	9.336	2242.73	0.00148	6.24	2315.39	0.0165	42.614	1412.92	0.151	27.238	1907.06	0.181		
							K4	1.016	0.981	2207.82	2207.82	0.179	9.391	2240.86	0.00155	6.28	2315.19	0.0156	42.693	1412.98	0.151	27.131	1906.9	0.184		
M_02	2207.34	moscovita	0.389							2207.34	2207.34	0.0745	15.079	2251.58	0.00099	15.54	2300.03	0.0125	21.325	1418.12		22.557	1918.29	0.191	927.9	0.0631
	2207.35	moscovita	0.386							2207.35	2207.35	0.0733	15.146	2256.03	0.00154	12.251	2300.82	0.0131	21.451	1418.14	0.0684	22.543	1917.56	0.19	929.84	0.0647
M_03							K4	1.026	0.965	2207.64	2207.64	0.312	11.138	2240.14	0.00319	3.916	2316.56	0.0403	39.455	1412.96	0.26	28.803	1914.73	0.238	874.8	0.102
							K4	1.027	0.965	2207.61	2207.61	0.312	11.203	2255.88	0.00286	4.358	2316.01	0.0397	39.244	1412.92	0.258	28.749	1914.69	0.236	873.92	0.104
M_04	2207.5	moscovita	0.375							2207.5	2207.5	0.0701	13.871	2243.08	0.000947	18.153				1416.68	0.0935	22.701	1915.75	0.187		
	2207.68	moscovita	0.374							2207.68	2207.68	0.0682	13.826	2244.05	0.00136	16.951				1416.75		22.591	1915.12	0.182		
M_05							K4	1.025	0.973	2207.82	2207.82	0.289	10.41	2251.92	0.000832	6.545	2355.18	0.0365	46.896	1412.98	0.254	28.199	1911.59	0.272	909.26	0.0487
							K4	1.024	0.974	2207.8	2207.8	0.287	10.464	2254.11	0.000965	7.348	2355.08	0.0363	46.811	1412.98	0.252	28.157	1911.31	0.268	911.11	0.0685
M_06	2207.42	moscovita	0.286							2207.42	2207.42	0.097		2244.97	0.00278	17.337							1922.96	0.339		
	2207.12	moscovita	0.28							2207.12	2207.12	0.0957		2246.45	0.0032	17.408							1922.74	0.342		
M_07							K3	1.013	1.014	2208.08	2208.08	0.127	13.042	2269.86	0.00123	11.309	2310.09	0.00987	25.117	1416.17	0.0838	22.687	1940.95	0.332		
							K3	1.013	1.014	2208.06	2208.06	0.126	13.035	2251.26	0.00133	12.474	2311.85	0.00805	24.104	1416.4	0.0805	22.43	1941.12	0.343		
M_08				2266.95	Fe	0.103				2207.99	2207.99	0.0365		2266.95	0.0057	14.115	2361.1	0.00657	39.915	1418.92		20.122	1913.73	0.119		
				2265.55	Fe	0.101				2207.79	2207.79	0.0336		2265.55	0.00531	13.34	2350.03	0.00611	37.436	1418.73		20.224	1914.02	0.113		
M_09							K4	1.02	0.986	2207.73	2207.73	0.193	10.15	2251.68	0.000459	7.705	2314.77	0.0266	36.636	1413.52	0.169	27.223	1917.67	0.185	954.36	0.0334
							K4	1.02	0.986	2207.71	2207.71	0.193	10.205	2250.03	0.000426	7.138	2314.8	0.0263	36.989	1413.49	0.169	27.244	1917.32	0.185	954.82	0.0337
M_10							K4	1.033	0.949	2207.73	2207.73	0.348	10.607	2243.56	0.00211	6.588	2317.06	0.0577	35.189	1412.48	0.301	29.778	1915.21	0.205	963.31	0.0424
							K4	1.033	0.949	2207.71	2207.71	0.35	10.65	2243.74	0.00228	6.351	2317.94	0.0578	35.292	1412.4	0.302	29.91	1915.02	0.204	963.32	0.0425
M_11				2258.72	Fe	0.087	K3	1.016	1.012	2207.94	2207.94	0.121	12.685	2258.72	0.00147	12.578	2312.09	0.0303	22.169	1415.39	0.129	24.539	1914.47	0.365		
				2254.12	Fe	0.078	K3	1.016	1.011	2207.85	2207.85	0.127	12.111	2254.12	0.00147	9.5	2312.09	0.0267	22.572	1415.07	0.13	24.728	1914.29	0.361		
M_12							K3	1.02	1.008	2207.61	2207.61	0.272	10.654	2240.48	0.000642	5.977	2314.61	0.0227	43.434	1412.98	0.269	25.981	1908.23	0.43		
							K3	1.02	1.01	2207.63	2207.63	0.269	10.635	2255.66	0.000658	5.825	2314.83	0.023	43.003	1412.98	0.266	25.847	1908.15	0.423		
M_13										2208.02	2208.02	0.109	18.797	2259.46	0.00503	11.218	2346.98	0.0189	40.113	1415.5	0.249	24.697	1909.11	0.466		
										2207.94	2207.94	0.106	21.114	2258.38	0.00551	10.598	2346.83	0.0186	39.574	1415.42	0.245	24.671	1908.96	0.459		
M_14							K4	1.01	0.997	2207.51	2207.51	0.185	9.476	2256.51	0.0012	11.175	2315.66	0.0172	42.283	1413.45	0.102	24.044	1914.16	0.101	891.28	0.0463
							K4	1.01	0.998	2207.51	2207.51	0.183	9.557	2256.94	0.00128	4.348	2316.28	0.0166	43.165	1413.35	0.1	24.125	1913.43	0.0971	891.81	0.0458
M_15							K3	1.021	1.009	2208.03	2208.03	0.205	12.708	2251.6	0.00293	8.824	2311.14	0.0113	26.181	1415.37	0.23	24.489	1939.49	0.48	916.56	0.0263
							K3	1.022	1.019	2208.05	2208.05	0.197	13.482	2269.9	0.00162	9.363	2312.08	0.0115	26.191	1415.95	0.223	24.223	1937.78	0.443	915.74	0.0315
M_16							K4	1.023	0.977	2207.6	2207.6	0.27	10.699	2245.85	0.000391	5.467	2316.18	0.0262	40.834	1412.8	0.185	26.852	1913.36	0.166		
							K4	1.024	0.976	2207.57	2207.57	0.273	10.748	2249.19	0.000403	5.689	2315.28	0.026	40.655	1412.83	0.188	26.992	1913.16	0.17		
M_17	2227.06	ferrogita	0.246							2227.06	2227.06	0.105	10.972	2256.12	0.0131	12.242	2344.74	0.0342	37.493	1418.09		23.095	1909.46	0.426		
	2227.03	ferrogita	0.249							2227.03	2227.03	0.105	10.631	2256.11	0.0132	12.595	2344.47	0.0339	37.599	1417.84		23.109	1909.27	0.424		
M_18							K4	1.021	0.996	2207.81	2207.81	0.179	10.614	2241.58	0.000938	7.702	2355.89	0.0055	26.649	1414.11	0.235	25.106	1909.04	0.442		
							K4	1.021	0.997	2207.78	2207.78	0.181	10.735	2244.48	0.000884	9.258	2355.94	0.00563	25.617	1414.03	0.233	25.134	1908.79	0.437		
M_19							K3	1.014	1.013	2207.65	2207.65	0.142	12.464	2240.05	0.000922	8.272	2311.35	0.0163	31.404	1414.3	0.106	24.039	1916.09	0.145		
							K3	1.014	1.014	2207.64	2207.64	0.143	12.409	2258.01	0.000699	9.689	2302.33	0.016	32.019	1414.26	0.106	24.07	1915.74	0.145		
M_20	2207.81	moscovita	0.832				K3	1.019	1.005	2207.81	2207.81	0.172	11.004	2251.55	0.000047	15.325	2353.62	0.0193	47.696	1413.13	0.151	25.948	1912.57	0.206	923.03	0.148
	2207.8	moscovita	0.855				K3	1.019	1.004	2207.8	2207.8	0.171	10.894	2250.83	0.000114	7.053	2352.75	0.019	47.009	1413.16	0.147	25.914	1912.26	0.2	924.81	0.152

5.1.4 Etapa 4: Análisis y validación de los resultados obtenidos del programa *The Spectral Geologist*

En esta etapa, se analizó e interpretó cada firma espectral mediante el uso del programa *The Spectral Geologist*.

Este programa posee su propia biblioteca espectral, siendo esta muy robusta en relación con los minerales, lo que facilita realizar las comparaciones con las firmas espectrales cargadas. Además, *The Spectral Geologist* tiene la opción de poder cargar una biblioteca espectral externa y/o personalizada, pudiendo incrementar la flexibilidad y precisión del análisis.

The Spectral Geologist, en un primer paso muestra los minerales que detecta en cada firma espectral, esto lo hace a través de una identificación automatizada desarrollada por TSA (*The Spectral Assistant*). El programa muestra un porcentaje de error, si la firma espectral coincide en su totalidad con una o varias firmas espectrales que contiene en su biblioteca espectral, muestra un valor del 100%, caso contrario, el porcentaje va disminuyendo respecto a la coincidencia que exista entre cada firma espectral cargada y la de su biblioteca espectral, ante esto se evalúa cada firma espectral de manera manual, identificando las características principales de absorción en los diferentes tramos.

En cada firma espectral se analiza las características principales de absorción, ya que estas nos indican el mineral o minerales que podrían tratarse. En la Figura N°51 se visualiza 2 firmas espectrales, la de color magenta, que corresponde a la referencia proporcionada por TSG, y otra de color negro, que representa la firma espectral cargada. Esta comparación visual facilita la identificación de similitudes y diferencias claves entre las firmas espectrales.

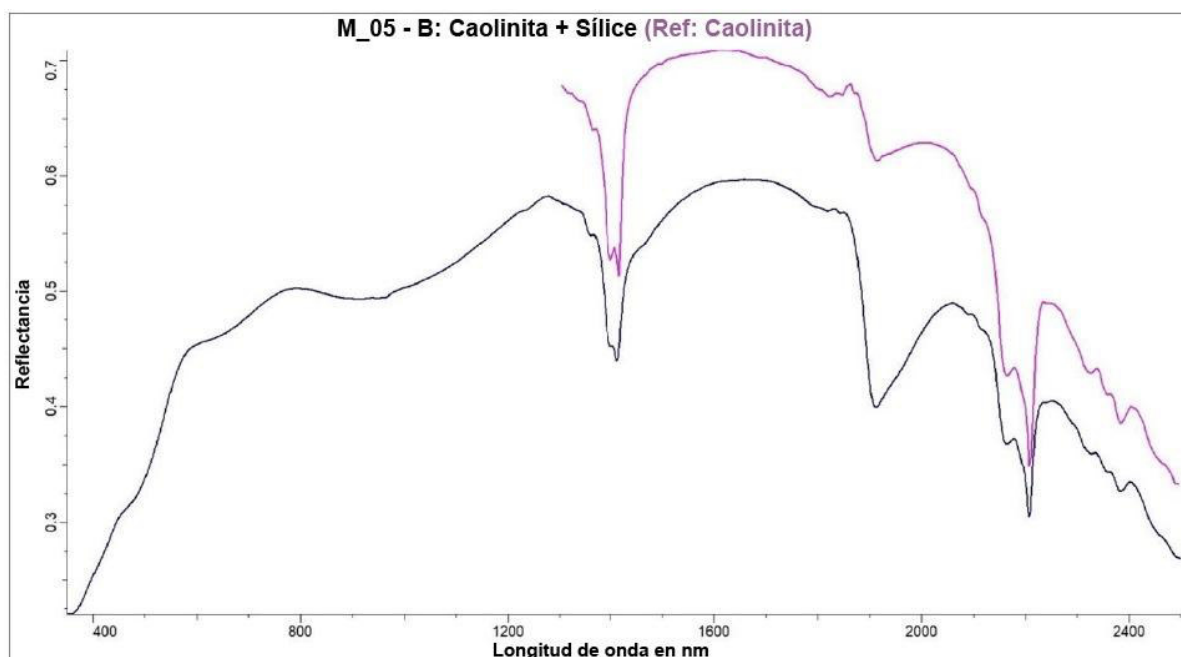


Figura N°51. (a) Firma espectral referencial del TSG; (b) Firma espectral de la muestra M_05-B.

Un punto para tomar en cuenta es que la primera lectura corresponde a las firmas espectrales clasificadas como principales (A), mientras que la segunda lectura genera las firmas espectrales secundarias (B), esto se menciona, ya que, en el análisis detallado solo se consideraron las firmas espectrales principales (Ver Anexo B), debido a que la segunda lectura realizada fue en la misma zona de la primera, siendo esta un respaldo para garantizar la consistencia y validez de los resultados. Esto refuerza la confiabilidad del análisis, asegurando que las características de absorción observadas en las firmas espectrales sean representativas.

Los resultados obtenidos muestran una alta similitud entre las firmas espectrales primarias (A) y secundarias (B) en términos de asociaciones mineralógicas y parámetros espectrales. En la Figura N°52 se observa en el programa The Spectral Geologist las firmas espectrales de la muestra N°5, donde la firma espectral principal (A) se muestra de color magenta y la secundaria (B) en color negro, ambas firmas presentan rasgos espectrales muy similares, con algunas distinciones mínimas que no generan diferencias significativas entre ambos espectros, esto también ocurre en las otras muestras, como se observa en el cuadro final de resultados.

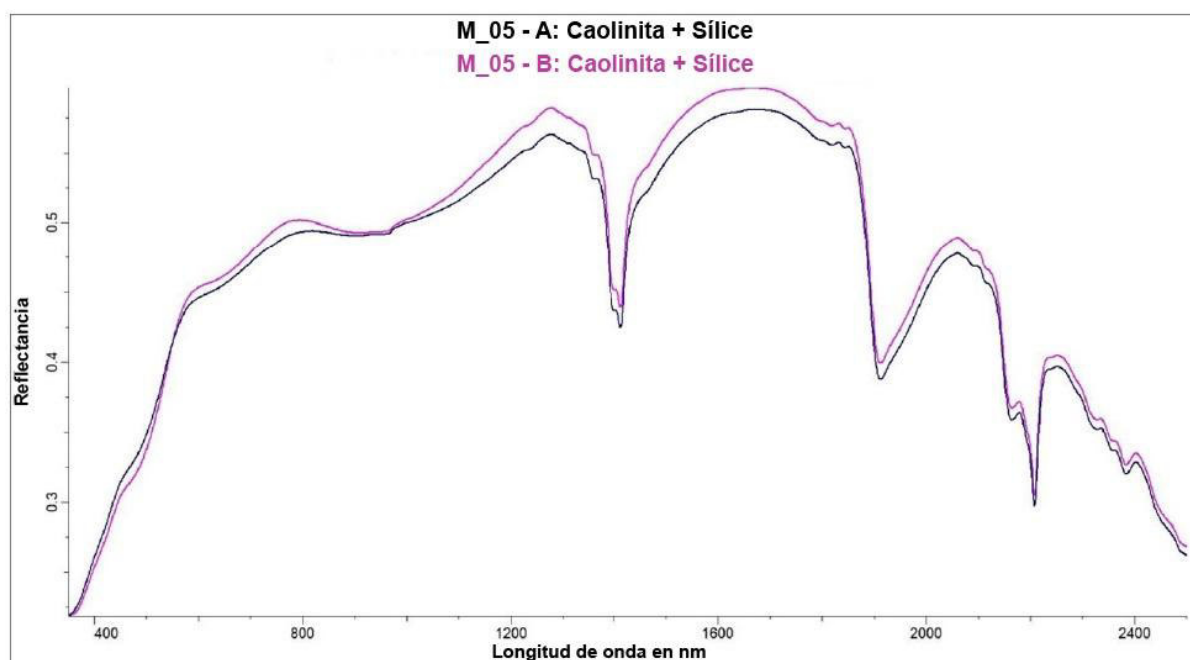


Figura N°52. (a) Firmas espectrales de la muestra M_05.

Es importante mencionar que en esta parte de la evaluación de cada firma espectral no fue necesario normalizarlas (remoción de la envolvente), ya que las características principales de absorción se mostraron de forma clara, permitiendo la identificación de cada mineral (Ver Anexo B). Sin embargo, para la obtención de los parámetros espectrales, se utilizaron en el cálculo los valores de absorción de las firmas espectrales normalizadas. (Ver Anexo C).

5.1.5 Etapa 5: Desarrollo del análisis comparativo

5.1.5.1 Ensamblajes mineralógicos

En esta etapa se presentan los resultados mineralógicos obtenidos tanto directamente del TerraSpec Halo como los generados del procesamiento en el programa The Spectral Geologist (TSG). Para desarrollar la comparación entre ambos conjuntos de resultados, se consideraron únicamente los minerales identificados.

Tabla N°16. Resultados mineralógicos obtenidos del TerraSpec Halo y los generados en el programa The Spectral Geologist (TSG).

En esta tabla se presenta los ensambles mineralógicos de ambos resultados. Esto permite comparar y analizar las diferencias o similitudes de los resultados para cada muestra.

Muestra	RESULTADOS TERRASPEC HALO		RESULTADOS THE SPECTRAL GEOLOGIST	
	Ensamblajes Mineralógicos		Ensamblajes Mineralógicos	
	SWIR	VNIR	SWIR	VNIR
M_01	Halloysita:3		Caolinita:71 + sílice:29	
	Halloysita:3		Caolinita:69 + sílice:31	
M_02	Harmotoma:3 + Montmorillonita:2	Ferrihidrita:3	Sílice:79 + mica blanca:21	Goethita
	Harmotoma:3 + Montmorillonita:2	Ferrihidrita:3	Sílice:80 + mica blanca:20	Goethita
M_03	Caolinita:3 + palygorskita:3	Hematita:3	Caolinita:100	Hematita
	Caolinita:3 + palygorskita:3	Hematita:3	Caolinita:100	Hematita
M_04	Montmorillonita:3		Sílice:79 + mica blanca:21	
	Montmorillonita:3		Sílice:79 + mica blanca:21	
M_05	Halloysita:3	Ferrihidrita:3	Caolinita:81 + sílice:19	Goethita
	Halloysita:3	Ferrihidrita:3	Caolinita:80 + sílice:20	Goethita
M_06	Chabasita + montmorillonita:3	Hematita:3	Sílice:80 + mica blanca:20	
	Gmelinita-Na:3	Hematita:3	Sílice:81 + mica blanca:19	
M_07	Yeso:3 + caolinita:3		Yeso:54 + caolinita:46	
	Yeso:3 + caolinita:3		Yeso:56 + caolinita:44	
M_08	Harmotoma:3 + Mg-illita:2		Sílice:73 + clorita:27	
	Clinoptilolite:3 + yeso:2		Sílice:73 + clorita:27	
M_09	Caolinita:3		Caolinita:81 + sílice:19	Goethita
	Caolinita:3		Caolinita:80 + sílice:20	Goethita
M_10	Caolinita:3 + moscovita:3	Ferrihidrita:3	Caolinita:100	Goethita
	Caolinita:3 + moscovita:3	Ferrihidrita:3	Caolinita:100	Goethita
M_11	Montmorillonita:3 + caolinita:3		Sílice:60 + caolinita:25 + clorita:15	
	Montmorillonita:3 + caolinita:3		Sílice:60 + caolinita:25 + clorita:15	
M_12	Halloysita:3 + montmorillonita:3		Caolinita:66 + montmorillonita:34	
	Halloysita:3 + montmorillonita:3		Caolinita:65 + montmorillonita:35	

M_13	Montmorillonita:3 + rectorita:3		Montmorillonita:74 + sílice:26	
	Montmorillonita:3 + rectorita:3		Montmorillonita:72 + sílice:28	
M_14	Caolinita:3 + sepiolita:2		Caolinita:100	Goethita
	Caolinita:3 + sepiolita:2		Caolinita:100	Goethita
M_15	Chabasita:3 + yeso:2		Sílice:39 + yeso:32 + caolinita:29	Goethita
	Illita/esmectita:3 + yeso:2		Sílice:52 + caolinita:25 + yeso:23	Goethita
M_16	Halloysita:3		Caolinita:100	
	Halloysita:3		Caolinita:100	
M_17	Montmorillonita:3		Montmorillonita:40 + sílice:36 + mica blanca:24	
	Montmorillonita:3 + Fe-clorita:3		Montmorillonita:42 + sílice:34 + mica blanca:24	
M_18	Montmorillonita:3 + caolinita:3		Sílice:51 + caolinita:27 + montmorillonita:22	
	Montmorillonita:3 + caolinita:3		Sílice:51 + caolinita:27 + montmorillonita:22	
M_19	Caolinita:3 + Mg-illite:2		Sílice:59 + caolinita:41	
	Caolinita:3 + Mg-illite:2		Sílice:57 + caolinita:43	
M_20	Halloysita:3 + illita/esmectita:3 + Fengita:2	Goethita:3	Caolinita:51 + mica blanca:32 + sílice:17	Goethita
	Halloysita:3 + illita/esmectita:3 + Fengita:2	Goethita:3	Caolinita:52 + mica blanca:31 + sílice:17	Goethita

Al comparar los resultados obtenidos directamente del TerraSpec Halo con los generados en el programa The Spectral Geologist, se observan diferencias en los ensambles mineralógicos. Estas discrepancias pueden deberse a los siguientes motivos:

- ✓ La biblioteca espectral que contiene tanto el TerraSpec Halo y el programa The Spectral Geologist son distintas, y es en base a sus bibliotecas espectrales que se generan las comparaciones de las firmas espectrales para finalmente obtener los resultados.
- ✓ El TerraSpec Halo presenta sus resultados basándose en el nivel de fiabilidad. Si la fiabilidad es menor, es probable que el mineral identificado en el ensamble mineralógico no forme parte de la muestra y posiblemente se trate de un contaminante. Por esta razón, se consideraron solo los minerales detectados una fiabilidad de 2 y 3 estrellas en el TerraSpec Halo.
- ✓ En el programa The Spectral Geologist se realiza un análisis e interpretación detallada de cada firma espectral. Aunque la biblioteca espectral es fundamental, validar la presencia de cada mineral también requiere desarrollar algunos parámetros espectrales específicos. Además, el conocimiento del tema es crucial para poder realizar un análisis e interpretación de las firmas espectrales.

5.1.5.2 Escalares y parámetros espectrales

Los escalares espectrales obtenidos directamente del TerraSpec Halo son en total 9. En cambio, el programa The Spectral Geologist (TSG) permite desarrollar una gran variedad de parámetros espectrales. Sin embargo, en esta investigación solo se desarrollaron algunos parámetros espectrales específicos con la finalidad de compararlos con los escalares espectrales del TerraSpec Halo.

Para realizar las comparaciones, se toma como base los 9 escalares espectrales brindados directamente por el TerraSpec Halo y sus equivalentes desarrollados en el programa The Spectral Geologist. Esto permite evaluar la coherencia y precisión de los resultados obtenidos por ambos métodos, asegurando una validación cruzada efectiva entre los 2 enfoques,

1. AIOH – Wav_AIOH: Respecto a este escalar y parámetro espectral, el valor mostrado, en ambos casos, indican el posicionamiento de la característica principal de absorción del enlace Al-OH, la presencia de este valor corrobora la identificación de minerales como la caolinita, las micas blancas y la montmorillonita. Como se observa en la Tabla N°17, los resultados obtenidos en ambos casos son similares, con mínimos cambios en los decimales.

Tabla N°17. Resultados del escalar AIOH (TerraSpec Halo) y el parámetro Wav_AIOH (TSG)

	M_01		M_02		M_03		M_04		M_05		M_06		M_07		M_08		M_09		M_10	
AIOH (TerraSpec Halo)	2207.8	2207.8	2207.3	2207.3	2207.6	2207.6	2207.5	2207.7	2207.8	2207.8	2207.4		2208.1	2208.1	2208.2	2208.1	2207.7	2207.7	2207.8	2207.7
Wav AIOH (TSG)	2207.8	2207.8	2207.3	2207.4	2207.6	2207.6	2207.5	2207.7	2207.8	2207.8	2207.4	2207.1	2208.1	2208.1	2208	2207.8	2207.7	2207.7	2207.7	2207.7
	M_11		M_12		M_13		M_14		M_15		M_16		M_17		M_18		M_19		M_20	
AIOH (TerraSpec Halo)	2207.9	2207.8	2207.5	2207.6	2208	2207.9	2207.5	2207.5	2208.1	2208	2207.5	2207.5	2227.1	2227.1	2207.8	2207.7	2207.6	2207.6	2207.8	2207.8
Wav AIOH (TSG)	2207.9	2207.9	2207.6	2207.6	2208	2207.9	2207.5	2207.5	2208	2208.1	2207.6	2207.6	2227.1	2227	2207.8	2207.8	2207.7	2207.6	2207.8	2207.8

2. FeOH – Wav_FeOH. Respecto a este escalar y parámetro espectral, indican la posición de la característica principal del enlace Fe-OH. En los resultados se observa que en la columna del escalar

FeOH no se registró ningún valor, ya que el TerraSpec Halo no detectó ningún mineral con este enlace en su estructura.

En la Tabla N°18, los resultados obtenidos en el programa The Spectral Geologist muestran valores para el parámetro Wav_FeOH en todas las muestras. Esto ocurre porque, independientemente de la presencia de un mineral con el enlace FeOH, el programa identifica la característica principal de absorción en la firma espectral dentro del rango de 2240 – 2310 nm. Es importante tener en cuenta que este es un parámetro espectral de posicionamiento, por lo que se obtendrán valores incluso si no hay minerales con el enlace FeOH en su estructura.

Tabla N°18. Resultados del escalar FeOH (TerraSpec Halo) y el parámetro Wav_FeOH (TSG)

	M_01		M_02		M_03		M_04		M_05		M_06		M_07		M_08		M_09		M_10	
FeOH (TerraSpec Halo)																				
Wav FeOH (TSG)	2242.7	2240.9	2251.6	2256	2240.1	2255.9	2243.1	2244.1	2251.9	2254.1	2245	2246.5	2269.9	2251.3	2267	2265.6	2251.7	2250	2243.6	2243.7
	M_11		M_12		M_13		M_14		M_15		M_16		M_17		M_18		M_19		M_20	
FeOH (TerraSpec Halo)																				
Wav FeOH (TSG)	2258.7	2254.1	2240.5	2255.7	2259.5	2258.4	2256.5	2256.9	2251.6	2269.9	2245.9	2249.2	2256.1	2256.1	2241.6	2244.5	2240.1	2258	2251.6	2250.8

3. MgOH – Wav_MgOH: Al igual que en el caso anterior, el TerraSpec Halo muestra solamente el valor de este escalar si detecta algún mineral con el enlace Mg-OH en su estructura, En los resultados del TerraSpec Halo, se detectaron los siguientes minerales: palygorskita, Mg-illita y sepiolita.

En la Tabla N°19, se observa los resultados obtenidos por el programa The Spectral Geologist, respecto al parámetro Wav_MgOH. Se lograron obtener valores para la mayoría de las muestras, ya que el programa independientemente de si hay o no un mineral con el enlace MgOH en su estructura, identifica la característica principal de absorción en la firma espectral en el rango de 2300 – 2370 nm.

Como en el caso anterior, este es un parámetro de posicionamiento y, por lo general, mostrará resultados.

Respecto a los resultados que coinciden tanto para el escalar MgOH y el parámetro espectral Wav_MgOH, se observa que los valores que muestran pueden ser diferentes. Esto se debe a que cada método utiliza un enfoque diferente para determinar estos valores.

Para el parámetro Wav_MgOH, se establece el valor en función de la característica principal de absorción en el rango de 2315 – 2330 nm. Por otro lado, el método utilizado por el TerraSpec Halo para determinar los valores del escalar MgOH se desconoce. Es posible que se base en algoritmo internos o en un conjunto de criterios para identificar y cuantificar la presencia del enlace Mg-OH en la muestra.

Tabla N°19. Resultados del escalar MgOH (TerraSpec Halo) y el parámetro Wav_MgOH (TSG)

	M_01		M_02		M_03		M_04		M_05		M_06		M_07		M_08		M_09		M_10	
MgOH (TerraSpec Halo)					2382	2382									2313	2348.3			2382.1	2382.2
Wav MgOH (TSG)	2315.4	2315.2	2300		2316.6	2316			2356.2	2356.1			2310.1	2311.9	2361.1	2350	2314.8	2314.8	2317.1	2317.9
	M_11		M_12		M_13		M_14		M_15		M_16		M_17		M_18		M_19		M_20	
MgOH (TerraSpec Halo)							2383.8	2382.9									INV	2310.6		
Wav MgOH (TSG)	2312.1	2312.1	2314.6	2314.8	2347	2346.8	2315.7	2316.3	2311.1		2316.2	2315.3	2344.7	2344.5	2355.9	2355.9	2311.4	2302.3	2353.6	2352.8

4. AlFeMg – Wav_Principal: Este escalar y parámetro espectral indican el valor de la característica principal de absorción dominante entre los enlaces AlOH, FeOH y MgOH. En el caso de los resultados obtenidos del TerraSpec Halo se observa que el escalar AlFeMg muestra valor solo si se logra una comparación entre estas 3 características principales de absorción. Si una de las 3 no muestra valor, el escalar AlFeMg queda vacío.

Por el contrario, en los resultados obtenidos en el programa The Spectral Geologist, el parámetro Wav_Principal compara en todo momento cuál es la característica de absorción dominante entre estos

3 enlaces. Como se observa en la Tabla N°20, la característica principal de absorción dominante pertenece al enlace AIOH en todas las firmas espectrales, esto indica que los minerales que contienen AIOH, como las caolinitas, las micas blancas y la montmorillonita, son los predominantes entre las muestras analizadas.

Respecto a los resultados que coinciden tanto para el escalador AlFeMg y el parámetro espectral Wav_Principal, se observa que los valores que muestran son similares.

Tabla N°20. Resultados del escalador AlFeMg (TerraSpec Halo) y el parámetro Wav_Principal (TSG)

	M_01		M_02		M_03		M_04		M_05		M_06		M_07		M_08		M_09		M_10	
AlFeMg (TerraSpec Halo)					2207.6	2207.6									2208.2	2208.1			2207.8	2207.7
Wav Main (TSG)	2207.8	2207.8	2207.3	2207.4	2207.6	2207.6	2207.5	2207.7	2207.8	2207.8	2207.4	2207.1	2208.1	2208.1	2208	2207.8	2207.7	2207.7	2207.7	2207.7
	M_11		M_12		M_13		M_14		M_15		M_16		M_17		M_18		M_19		M_20	
AlFeMg (TerraSpec Halo)																	2207.6	2207.6		
Wav Main (TSG)	2207.9	2207.9	2207.6	2207.6	2208	2207.9	2207.5	2207.5	2208	2208.1	2207.6	2207.6	2227.1	2227	2207.8	2207.8	2207.7	2207.6	2207.8	2207.8

5. Fe3t – Wav_FeOxido: Este escalador y parámetro espectral se presentan cuando se detectan óxidos e hidróxidos, como la hematita, goethita y la ferrihidrita. En este caso, tanto para los resultados obtenidos del TerraSpec Halo como del programa The Spectral Geologist, se presentaron coincidentemente valores en la muestra M_03 por la hematita y en la muestra M_20 por la goethita. Al comparar ambos valores, se observa que son similares.

Sin embargo, en la Tabla N°21 se observa que hay muestras que presentan valor en el escalador Fe3t y no en el parámetro Wav_FeOxido, y viceversa, esto se debe a la identificación de minerales de óxidos e hidróxidos en los resultados. Es importante tener en cuenta que la presencia de estos minerales puede variar entre las muestras, lo que explica las diferencias en la detección entre el escalador Fe3t y el parámetro Wav_FeOxido.

Tabla N°21. Resultados del escalar Fe3t (TerraSpec Halo) y el parámetro Wav_FeOxido (TSG)

	M_01		M_02		M_03		M_04		M_05		M_06		M_07		M_08		M_09		M_10	
Fe3t (TerraSpec Halo)					873.17	874.15					875.9	876.9								
Wav FeOxide (TSG)				929.84	874.8	873.92				911.11									963.31	963.32
	M_11		M_12		M_13		M_14		M_15		M_16		M_17		M_18		M_19		M_20	
Fe3t (TerraSpec Halo)																			923.17	924.91
Wav FeOxide (TSG)							891.28	891.81											923.03	924.81

6. ISM (Madurez espectral de la illita) – XT_MicaBI: Este escalar y parámetro espectral indican la cristalinidad de la illita y se presentan en los resultados del TerraSpec Halo únicamente si se detecta la presencia de esta arcilla. Por otro lado, en los resultados generados por el programa The Spectral Geologist se calculan únicamente si se detecta la presencia de una mica blanca.

Si el valor de escalar ISM es inferior a 1, indica una alta cristalinidad de la illita (micas blancas), mientras que valores superiores a 1, indican baja cristalinidad. Sin embargo, los intervalos para clasificar la cristalinidad usando el parámetro XT_MicaBI son diferentes (Véase Tabla N°12).

En la Tabla N°22, se observa que los resultados coinciden únicamente en la muestra M_20, siendo estos muy similares. En ambos resultados, el valor indicado sugiere una alta cristalinidad para la illita presente en esa muestra. Sin embargo, en otras muestras, los resultados no coinciden debido a que en los resultados obtenidos del TerraSpec halo no se detectaron presencia de illita, lo cual, si ocurrió en los resultados desarrollados en el programa The Spectral Geologist, y viceversa.

Tabla N°22. Resultados del escalador ISM (TerraSpec Halo) y el parámetro XT_MicaBI (TSG)

	M_01		M_02		M_03		M_04		M_05		M_06		M_07		M_08		M_09		M_10	
ISM (TerraSpec Halo)															0.298	0.289			1.645	1.664
XT WtMica (TSG)			0.389	0.386			0.375	0.374			0.286	0.28								
	M_11		M_12		M_13		M_14		M_15		M_16		M_17		M_18		M_19		M_20	
ISM (TerraSpec Halo)																	0.946	0.956	0.835	0.858
XT WtMica (TSG)													0.246	0.249					0.832	0.855

7. Kx – XT_Caolinita (XT_Kaol2180 y XT_Kaol2160): Este escalador y parámetro espectral indican la cristalinidad de la caolinita. En los resultados obtenidos del TerraSpec Halo, el valor del escalador Kx se presentan cuando se detecta caolinita. Si el valor es inferior a 1, indica alta cristalinidad de la caolinita y si es superior a 1, una baja cristalinidad.

Por otro lado, en el programa The Spectral Geologist, los valores también se presentan únicamente si se detecta caolinita. En este caso, el parámetro espectral XT_Caolinita se muestra de forma categórica: K4 denota alta cristalinidad y K3, cristalinidad moderada. Para determinar estos resultados, el parámetro espectral XT_Caolinita se basa en dos parámetros adicionales: XT_Kaol2180 y XT_Kaol2160. Los valores presentes en estos dos parámetros espectrales se utilizan para determinar el tipo de cristalinidad de la caolinita (Véase Tabla N°13).

En la Tabla N°23 se observa que ambos resultados muestran valores en las siguientes muestras: M_01, M_03, M_05, M_07, M_09, M_10, M_11, M_12, M_14, M_15, M_16, M_18, M_19, M_20, excepto en la muestra M_02, donde solo se muestra valor en el resultado obtenido por el TerraSpec Halo.

Los valores presentes en el escalador Kx inferiores a 1 coinciden con el valor categórico K4 del parámetro XT_Caolinita, indicando alta cristalinidad de la caolinita en ambos resultados. De Igual

manera, los valores superiores a 1 en el escalador Kx, coinciden con el valor categórico K3 del parámetro XT_Caolinita, indicando una menor cristalinidad de la caolinita en ambos resultados.

Tabla N°23. Resultados del escalador Kx (TerraSpec Halo) y el parámetro XT_Caolinita (TSG)

	M_01		M_02		M_03		M_04		M_05		M_06		M_07		M_08		M_09		M_10	
Kx (TerraSpec Halo)	0.978	0.979	1.019	1.019	0.965	0.965			0.97	0.971			1.016	1.017			0.988	0.988	0.948	0.948
XT Kaol (TSG)	K4	K4			K4	K4			K4	K4			K3	K3			K4	K4	K4	K4
XTKaol 2180 (TSG)	1.016	1.016			1.026	1.027			1.025	1.024			1.013	1.013			1.02	1.02	1.033	1.033
XTKaol 2160 (TSG)	0.98	0.981			0.965	0.965			0.973	0.974			1.014	1.014			0.986	0.986	0.949	0.949
	M_11		M_12		M_13		M_14		M_15		M_16		M_17		M_18		M_19		M_20	
Kx (TerraSpec Halo)	1.019	1.017	1.006	1.008			0.995	0.996	1.013	1.025	0.977	0.977			1	1.001	1.017	1.018	1.007	1.007
XT Kaol (TSG)	K3	K3	K3	K3			K4	K4	K3	K3	K4	K4			K4	K4	K3	K3	K3	K3
XTKaol 2180 (TSG)	1.016	1.016	1.02	1.02			1.01	1.01	1.021	1.022	1.023	1.024			1.021	1.021	1.014	1.014	1.019	1.019
XTKaol 2160 (TSG)	1.012	1.011	1.008	1.01			0.997	0.998	1.009	1.019	0.977	0.976			0.996	0.997	1.013	1.014	1.005	1.004

8. CSM (Madurez espectral de la clorita) – XT_Clorita: Este escalador y parámetro espectral nos proporcionan el grado de cristalinidad de la clorita. Sin embargo, es necesario detectar la presencia de este mineral en la muestra, si esto no ocurre, no se mostrará resultado alguno; esto es lo que sucede en los resultados obtenidos del TerraSpec Halo, al no detectar ningún tipo de clorita no se muestra resultados para este escalador.

Por el contrario, en los resultados obtenidos del programa The Spectral Geologist, se logró detectar la presencia de la clorita en las muestras M_08 y M_11, con valores menores a 1 en el parámetro XT_Clorita, lo que indica una alta cristalinidad de dichas cloritas. Es importante tener en cuenta la contribución espectral de la clorita al momento de determinar el tipo de alteración.

Tabla N°24. Resultados del escalar CSM (TerraSpec Halo) y el parámetro XT_Clorita (TSG)

	M_01		M_02		M_03		M_04		M_05		M_06		M_07		M_08		M_09		M_10	
CSM (TerraSpec Halo)																				
XT Clorita (TSG)															0.103	0.101				
	M_11		M_12		M_13		M_14		M_15		M_16		M_17		M_18		M_19		M_20	
CSM (TerraSpec Halo)																				
XT Clorita (TSG)	0.087	0.078																		

9. Fe₃i: Este escalar espectral proporciona información sobre la intensidad de la absorción causada por la presencia de un óxido e hidróxidos de hierro. Cuanto mayor sea el valor mostrado, más intensa es esta absorción.

En la Tabla N°25 se presentan los escalares espectrales obtenidos con el TerraSpec Halo y los parámetros espectrales generados con el programa The Spectral Geologist. En esta tabla se muestran los escalares y parámetros espectrales equivalentes e intercalados de ambos resultados. Con la excepción del escalar Fe₃i, ya que no se encontró la manera de generar un parámetro espectral equivalente en el programa The Spectral Geologist.

Tabla N°25. Escalares Espectrales (TerraSpec Halo) y los parámetros espectrales (TSG)

En esta tabla se presentan los escalares espectrales agrupados junto con sus parámetros espectrales equivalentes de manera intercalada. En la primera columna de cada agrupación se muestran los escalares espectrales, y en la segunda columna, los parámetros espectrales. Excepto en el caso de las caolinitas, donde se utilizaron tres parámetros para obtener el equivalente del escalár, y en el caso del escalár Fe3i, no se ha desarrollado un parámetro equivalente.

Muestra	TerraSpec	TSG	TerraSpec	TSG	TerraSpec	TSG	TerraSpec	TSG	TerraSpec	TSG	TerraSpec	TSG	TerraSpec	TSG	TSG	TSG	TerraSpec	TSG	TerraSpec
	AlOH	Wav AlOH	FeOH	Wav FeOH	MgOH	Wav MgOH	AlFeMg	Wav Principal	Fe3t	Wav FeOxido	ISM	XT MicaBI	Kx	XT Caolinita	XT Cao2180	XT Cao2160	CSM	XT Clorita	Fe3i
M_01	2207.82	2207.82		2242.73		2315.39		2207.82					0.978	K4	1.016	0.98			
	2207.8	2207.82		2240.86		2315.19		2207.82					0.979	K4	1.016	0.981			
M_02	2207.27	2207.34		2251.58		2300.03		2207.34		927.9		0.389	1.019						
	2207.25	2207.35		2256.03		2300.82		2207.35		929.84		0.386	1.019						
M_03	2207.62	2207.64		2240.14	2382.01	2316.56	2207.62	2207.64	873.166	874.8			0.965	K4	1.026	0.965			2412
	2207.57	2207.61		2256.88	2381.96	2316.01	2207.57	2207.61	874.154	873.92			0.965	K4	1.027	0.965			2428
M_04	2207.48	2207.5		2243.08				2207.5				0.375							
	2207.68	2207.68		2244.05				2207.68				0.374							
M_05	2207.84	2207.82		2251.92		2366.18		2207.82		909.26			0.97	K4	1.025	0.973			
	2207.79	2207.8		2254.11		2366.08		2207.8		911.11			0.971	K4	1.024	0.974			
M_06	2207.39	2207.42		2244.97				2207.42	875.903			0.286							1.768
	2207.16	2207.12		2246.45				2207.12	876.901			0.28							1.748
M_07	2208.1	2208.08		2269.86		2310.09		2208.08					1.016	K3	1.013	1.014			
	2208.05	2208.06		2251.26		2311.85		2208.06					1.017	K3	1.013	1.014			
M_08	2208.24	2207.99		2266.96	2313.01	2361.1	2208.24	2207.99			0.298							0.103	
	2208.07	2207.79		2266.55	2348.28	2360.03	2208.07	2207.79			0.289							0.101	
M_09	2207.74	2207.73		2251.68		2314.77		2207.73		954.36			0.988	K4	1.02	0.986			
	2207.69	2207.71		2250.03		2314.8		2207.71		956.82			0.988	K4	1.02	0.986			
M_10	2207.76	2207.73		2243.56	2382.06	2317.06	2207.76	2207.73		963.31	1.645		0.948	K4	1.033	0.949			
	2207.72	2207.71		2243.74	2382.19	2317.94	2207.72	2207.71		963.32	1.664		0.948	K4	1.033	0.949			
M_11	2207.93	2207.94		2258.72		2312.09		2207.94					1.019	K3	1.016	1.012		0.087	
	2207.84	2207.85		2254.12		2312.09		2207.85					1.017	K3	1.016	1.011		0.078	
M_12	2207.5	2207.61		2240.48		2314.61		2207.61					1.006	K3	1.02	1.008			
	2207.61	2207.63		2256.66		2314.83		2207.63					1.008	K3	1.02	1.01			
M_13	2208.03	2208.02		2259.46		2346.98		2208.02											
	2207.93	2207.94		2258.38		2346.83		2207.94											
M_14	2207.46	2207.51		2256.51	2383.81	2315.66		2207.51		891.28			0.995	K4	1.01	0.997			
	2207.46	2207.51		2256.94	2382.89	2316.28		2207.51		891.81			0.996	K4	1.01	0.998			
M_15	2208.05	2208.03		2251.6		2311.14		2208.03		916.56			1.013	K3	1.021	1.009			
	2208.03	2208.05		2269.9		2312.08		2208.05		915.74			1.025	K3	1.022	1.019			
M_16	2207.53	2207.6		2245.85		2316.18		2207.6					0.977	K4	1.023	0.977			
	2207.5	2207.57		2249.19		2315.28		2207.57					0.977	K4	1.024	0.976			
M_17	2227.07	2227.06		2256.12		2344.74		2227.06				0.246							
	2227.1	2227.03		2256.11		2344.47		2227.03				0.249							
M_18	2207.77	2207.81		2241.58		2366.89		2207.81					1	K4	1.021	0.996			
	2207.72	2207.78		2244.48		2366.94		2207.78					1.001	K4	1.021	0.997			
M_19	2207.58	2207.65		2240.05	2309.86	2311.35	2207.58	2207.65			0.946		1.017	K3	1.014	1.013			
	2207.56	2207.64		2258.01	2310.57	2302.33	2207.56	2207.64			0.956		1.018	K3	1.014	1.014			
M_20	2207.79	2207.81		2251.56		2363.62		2207.81	923.168	923.03	0.835	0.832	1.007	K3	1.019	1.005			1498
	2207.81	2207.8		2250.83		2362.75		2207.8	924.905	924.81	0.858	0.855	1.007	K3	1.019	1.004			1505

5.1.5.3 Alteraciones hidrotermales

Para establecer el tipo de alteración hidrotermal de los resultados obtenidos tanto del TerraSpec Halo como del programa The Spectral Geologist, existen diversas metodologías. Uno de los métodos consiste en clasificar según el mineral predominante en el ensamble mineralógico, mientras que otro se basa en observar el ensamble mineralógico en conjunto para establecer la alteración hidrotermal que mejor se asemeje. Este último método es el que se va a aplicar para definir el tipo de alteración hidrotermal en cada muestra.

Gracias a la identificación de diversos minerales, ensambles mineralógicos y escalares o parámetros espectrales obtenidos en cada uno de los resultados, se logró establecer el tipo de alteración en cada muestra según los resultados obtenidos directamente del TerraSpec Halo y los obtenidos tras el análisis con el programa The Spectral Geologist. Para establecer el tipo de alteración hidrotermal presente en cada muestra, se utilizó como referencia “la tabla de minerales de alteración comunes en sistemas hidrotermales” de (Corbett & Leach, 1997).

En el caso de los resultados obtenidos directamente del TerraSpec Halo, solo se consideraron los minerales con 3 y 2 estrellas, descartando aquellos con solo 1 estrella, debido a que presentan un nivel de fiabilidad menor al 60%. Tras este filtro, simplemente fue necesario observar el ensamble mineralógico resultante para establecer el tipo de alteración hidrotermal correspondiente. De manera similar, para los resultados obtenidos con el programa The Spectral Geologist, se aplicó un proceso de validación e interpretación previa de cada espectro antes de establecer el tipo de alteración.

En la Tabla N°26 se presentan los ensambles mineralógicos de cada muestra, obtenidos tanto del TerraSpec Halo como del programa The Spectral Geologist, junto con su respectiva alteración hidrotermales establecida.

Tabla N°26. Clasificación del tipo de alteración hidrotermal

En esta tabla se presentan los ensambles mineralógicos de cada muestra según ambos resultados con el objetivo de establecer el tipo de alteración hidrotermal.

*Para los resultados obtenidos del TerraSpec Halo, solo se consideraron los minerales con un nivel de fiabilidad de 2 y 3 estrellas.

Muestra	RESULTADOS TERRASPEC HALO		RESULTADOS TSG	
	Ensambls Mineralógicas*	Tipo de Alteración	Ensambls Mineralógicas	Tipo de Alteración
M_01	halloysita:3	Alteración argílica	caolinita:71+sílice:29	Alteración argílica
	halloysita:3	Alteración argílica	caolinita:69+sílice:31	Alteración argílica
M_02	ferrihydrite:3+harmotome:3+montmorillonita:2	Alteración sub propilítica	sílice:79+mica blanca:21	Alteración filica
	ferrihydrite:3+harmotome:3+montmorillonita:2	Alteración sub propilítica	sílice:80+mica blanca:20	Alteración filica
M_03	hematita:3+caolinita-WX:3+palygorskite:3	Alteración argílica	caolinita:100	Alteración argílica
	hematita:3+caolinita-WX:3+palygorskite:3	Alteración argílica	caolinita:100	Alteración argílica
M_04	montmorillonita:3	Alteración argílica	sílice:79+mica blanca:21	Alteración filica
	montmorillonita:3	Alteración argílica	sílice:79+mica blanca:21	Alteración filica
M_05	ferrihydrite:3+halloysita:3	Alteración argílica	caolinita:81+sílice:19	Alteración argílica
	ferrihydrite:3+halloysita:3	Alteración argílica	caolinita:80+sílice:20	Alteración argílica
M_06	hematita:3+chabazite:3+montmorillonita:3	Alteración sub propilítica	sílice:80+mica blanca:20	Alteración filica
	hematita:3+gmelinite-Na:3	Alteración sub propilítica	sílice:81+mica blanca:19	Alteración filica
M_07	yeso:3+caolinita-PX:3	Alteración argílica	yeso:54+caolinita:46	Alteración argílica
	yeso:3+caolinita-PX:3	Alteración argílica	yeso:56+caolinita:44	Alteración argílica
M_08	harmotoma:3+Mg-illita:2	Alteración sub propilítica	sílice:73+clorita:27	Alteración sub propilítica
	clinoptilolita:3+yeso:2	Alteración sub propilítica	sílice:73+clorita:27	Alteración sub propilítica
M_09	caolinita-PX:3+caolinita-WX:3	Alteración argílica	caolinita:81+sílice:19	Alteración argílica
	caolinita-PX:3+caolinita-WX:3	Alteración argílica	caolinita:80+sílice:20	Alteración argílica
M_10	ferrihydrite:3+caolinita-WX:3+moscovita:3	Alteración argílica - filica	caolinita:100	Alteración argílica
	ferrihydrite:3+caolinita-WX:3+moscovita:3	Alteración argílica - filica	caolinita:100	Alteración argílica
M_11	montmorillonita:3+caolinita-PX:3	Alteración argílica	sílice:60+caolinita:25+clorita:15	Alteración argílica
	montmorillonita:3+caolinita-PX:3	Alteración argílica	sílice:60+caolinita:25+clorita:15	Alteración argílica

M_12	halloysita:3+montmorillonita:3	Alteración argílica	caolinita:66+montmorillonita:34	Alteración argílica
	halloysita:3+montmorillonita:3	Alteración argílica	caolinita:65+montmorillonita:35	Alteración argílica
M_13	montmorillonita:3+rectorite:3	Alteración argílica	montmorillonita:74+sílice:26	Alteración argílica
	montmorillonita:3+rectorite:3	Alteración argílica	montmorillonita:72+sílice:28	Alteración argílica
M_14	Caolinita-PX:3+sepiolita:2	Alteración argílica	caolinita:100	Alteración argílica
	Caolinita-PX:3+sepiolita:2	Alteración argílica	caolinita:100	Alteración argílica
M_15	chabazite:3+yeso:2	Alteración sub propilítica	sílice:39+yeso:32+caolinita:29	Alteración argílica
	illita/esmectita:3+yeso:2	Alteración sub propilítica	sílice:52+caolinita:25+yeso:23	Alteración argílica
M_16	halloysita:3	Alteración argílica	caolinita:100	Alteración argílica
	halloysita:3	Alteración argílica	caolinita:100	Alteración argílica
M_17	montmorillonita:3	Alteración argílica	montmorillonita:40+sílice:36+mica blanca:24	Alteración argílica - filica
	montmorillonita:3+Fe-clorita:3	Alteración argílica	montmorillonita:42+sílice:34+mica blanca:24	Alteración argílica - filica
M_18	montmorillonita:3+caolinita-PX:3	Alteración argílica	sílice:51+caolinita:27+montmorillonita:22	Alteración argílica
	montmorillonita:3+caolinita-PX:3	Alteración argílica	sílice:51+caolinita:27+montmorillonita:22	Alteración argílica
M_19	caolinitaPX:3+Mg-illita:2	Alteración argílica	sílice:59+caolinita:41	Alteración argílica
	caolinitaPX:3+Mg-illita:3	Alteración argílica	sílice:57+caolinita:43	Alteración argílica
M_20	goethita:3+halloysita:3+illita/esmectita:3+fengita:2	Alteración argílica - filica	caolinita:51+mica blanca:32+sílice:17	Alteración argílica - filica
	goethita:3+halloysita:3+illita/esmectita:3+fengita:2	Alteración argílica - filica	caolinita:52+mica blanca:31+sílice:17	Alteración argílica - filica

En la Tabla N°27 se presenta un resumen del total de muestras clasificadas según el tipo alteración hidrotermales, basándose en los resultados obtenidos con el TerraSpec Halo.

Tabla N°27. Alteración hidrotermal y total de muestras - TerraSpec Halo.

Alteración hidrotermal	Muestras	Total de Muestras
Alteración argílica	M_01, M_03, M_04, M_05, M_07, M_09, M_11, M_12, M_13, M_14, M_16, M_17, M_18, M_19	14 muestras
Alteración argílica - filica	M_10 y M_20	2 muestras.
Alteración sub propilítica	M_02, M_06, M_08, M_15	4 muestras

En la Tabla N°28 se presenta un resumen del total de muestras clasificadas según el tipo alteración hidrotermales, basándose en los resultados mineralógico y espectrales desarrollados en el programa The Spectral Geologist.

Tabla N°28. Alteración hidrotermal y total de muestras - TSG.

Alteración hidrotermal	Muestras	Total de muestras
Alteración argílica	M_01, M_03, M_05, M_07, M_09, M_10, M_11, M_12, M_13, M_14, M_15, M_16, M_18, M_19	14 muestras.
Alteración argílica - filica	M_17, M_20	2 muestras.
Alteración filica	M_02, M_04, M_06	3 muestras.
Alteración sub propilítica	M_08	1 muestra.

Después de identificar el tipo de alteración hidrotermal para cada muestra y en ambos resultados, se procede a comparar el tipo de alteración establecido para cada muestra en cada resultado y determinar el porcentaje de coincidencia entre ambos. Para calcular este porcentaje, según el tipo de alteración hidrotermal a analizar, se aplicará la siguiente formula:

$$\% \text{ de Coincidencia} = \left(\frac{\text{Número de muestras en común}}{N^{\circ} \text{ de muestras en común} + N^{\circ} \text{ de muestras no en común}} \right) \times 100$$

Alteración Argílica, esta alteración hidrotermal predomina en los resultados obtenidos tanto del TerraSpec Halo como del programa The Spectral Geologist, coincidiendo en un total de 13 muestras. Sin embargo, es importante señalar que, de estas 13 muestras, solo 12 fueron las mismas muestras establecidas con esta alteración hidrotermal. Hubo una muestra no coincidente en cada conjunto de resultados: M_04 para los resultados del TerraSpec Halo y M_10 para los del programa The Spectral Geologist. A continuación, se procede a calcular el porcentaje de coincidencia para las muestras clasificadas con la alteración argílica para ambos resultados:

$$\frac{\% \text{ de Coincidencia}}{\text{Alteración Argílica}} = \left(\frac{12}{12 + 4} \right) \times 100 = 75.0\%$$

El porcentaje de coincidencia para la alteración argílica en ambos resultados es del 85%.

Alteración Argílica – Fílica, esta alteración hidrotermal se presenta para los resultados del TerraSpec Halo en 2 muestras y en la misma cantidad para los resultados obtenidos del programa The Spectral Geologist. Sin embargo, de esas 2 muestras, solo para la muestra M_20 se estableció este tipo de alteración hidrotermal para ambos resultados. A continuación, se procede a calcular el porcentaje de coincidencia para las muestras clasificadas con la alteración argílica – fílica para ambos resultados

$$\frac{\% \text{ de Coincidencia}}{\text{Alteración Argílica - fílica}} = \left(\frac{1}{1 + 2} \right) \times 100 = 33.3\%$$

El porcentaje de coincidencia para la alteración argílica – fílica en ambos resultados es del 33.3%.

Alteración Sub propilítica, para este tipo de alteración hidrotermal se obtuvo una única muestra en los resultados del TSG, a diferencia de los de TerraSpec Halo que fueron 4 muestras establecidas con esta alteración hidrotermal. De las muestras, solo una muestra coincide entre ambos resultados: la muestra M_08. A continuación, se procede a calcular el porcentaje de coincidencia para las muestras clasificadas con la alteración sub propilítica para ambos resultados:

$$\frac{\% \text{ de Coincidencia}}{\text{Alteración Sub propilítica}} = \left(\frac{1}{1 + 3} \right) \times 100 = 25\%$$

El porcentaje de coincidencia para la alteración sub propilítica en ambos resultados es del 25%.

Alteración filica, este tipo de alteración solo se estableció en los resultados obtenidos del programa The Spectral Geologist. Por lo tanto, no es necesario calcular el porcentaje de coincidencia, ya que para los resultados del TerraSpec Halo no se determinó esta alteración hidrotermal.

En general, se obtuvieron 14 muestras establecidas con las mismas alteraciones hidrotermales en ambos resultados. A continuación, se calcula el porcentaje de coincidencia del total de las 20 muestras:

$$\frac{\% \text{ de Coincidencia}}{\text{Alteración Total}} = \left(\frac{14}{14 + 6} \right) \times 100 = 70\%$$

El porcentaje de coincidencia para las 20 muestras, en cuanto al tipo de alteración hidrotermal establecido en ambos resultados, es del 70%. Este valor indica una clara diferencia entre ambos resultados al momento de establecer el tipo de alteración hidrotermal en cada muestra.

CAPITULO VI

6 DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Discusión

Los resultados obtenidos en esta investigación evidencian diferencias relevantes entre los resultados proporcionados por el TerraSpec Halo y el programa TSG. A pesar de que ambos métodos utilizan los mismos espectros como base, los resultados discrepan tanto en la identificación de minerales como en el tipo de alteración hidrotermal determinada.

El análisis mineralógico demuestra qué, aunque algunos minerales como la caolinita, montmorillonita y mica blanca fueron identificados por ambos métodos, el orden de ocurrencia y los ensambles mineralógicos varían significativamente. Por ejemplo, mientras que el TerraSpec Halo reportó alta ocurrencia de montmorillonita y halloysita, en TSG se validó asociaciones más complejas como caolinita + sílice o mica blanca + sílice, lo que refleja mayor capacidad para definir asociaciones mineralógicas a partir de una interpretación más detallada.

En cuanto a los tipos de alteración hidrotermal, se encontró coincidencia en solo el 70% de las muestras. Con los resultados del TerraSpec Halo no se logró identificar la alteración fílica, por la ausencia de los minerales que integran este tipo de alteración y probablemente sea por las limitaciones de la biblioteca espectral interna del TerraSpec Halo. En cambio, el TSG, al permitir una validación visual y cálculo de parámetros espectrales, aporta mayor detalle y precisión en sus resultados y logrando una mejor clasificación de las alteraciones en las muestras.

Este contraste resalta la importancia de la interpretación humana y del conocimiento de la geología espectral. TSG permite al investigador ajustar parámetros espectrales, normalizar las firmas espectrales y compararlas con otras bibliotecas espectrales más completas, generando resultados más

sólidos. Esto demuestra que el uso exclusivo del TerraSpec Halo, aunque eficiente en campo, debe ser complementado con un análisis posterior más profundo.

Por otro lado, los escalares espectrales del TerraSpec Halo y los parámetros hallados y calculados en TSG mostraron valores similares en algunos casos (como Al-OH), pero también discrepancias en otros (como ISM). Esto implica que, para estudios donde se requiera una vectorización precisa o una evaluación de cristalinidad, el uso de TSG es recomendable.

En términos prácticos, el TerraSpec Halo cumple una función valiosa como herramienta rápida y portátil de campo; sin embargo, su información debe ser validada y refinada mediante un análisis más riguroso como el que permite realizarse en TSG, generando resultados más confiables y útiles para la toma de decisiones en etapas de exploración.

Finalmente, los resultados obtenidos permiten sostener la hipótesis general de esta investigación: existe una diferencia significativa entre los resultados espectrales y mineralógicos obtenidos directamente del TerraSpec Halo y los generados mediante procesamiento en TSG. Esta diferencia no solo se traduce en una mejora en la precisión, también en la capacidad de integrar estos resultados a modelos geológicos y exploratorios más complejos.

6.2 Conclusiones

- ✓ La espectrometría de reflectancia VNIR - SWIR es una técnica eficiente, rápida y no destructiva que permite eficazmente la identificación de minerales y/o grupos de minerales importantes con calidad y confiabilidad para determinar diferentes zonas de alteración y en consecuencia generar guías de exploración.
- ✓ El análisis comparativo evidenció diferencias significativas entre los resultados obtenidos directamente con el espectrómetro TerraSpec Halo y los procesados con el programa The

Spectral Geologist, tanto en la parte mineralógica como en los escalares y parámetros espectrales.

- ✓ La evaluación de los parámetros espectrales desarrollados en esta investigación permite no solo determinar los valores de los principales rasgos de absorción a lo largo de la longitud de onda (VNIR – SWIR), sino que también ayudan a identificar y confirmar tanto el mineral como el ensamble mineralógico presente en la muestra.
- ✓ En los resultados obtenidos del TerraSpec Halo se lograron identificar los siguientes minerales, siendo los de mayor ocurrencia: la montmorillonita, la caolinita y la halloysita; y en los procesados con el programa The Spectral Geologist, se lograron identificar los siguientes minerales, siendo los de mayor ocurrencia: la caolinita, la montmorillonita y las micas blancas.
- ✓ En ese contexto, los principales ensambles mineralógicos identificados, respecto a los resultados obtenidos con el TerraSpec Halo, colocados en orden de mayor a menor ocurrencia son los siguientes:
 - Montmorillonita + caolinita
 - Montmorillonita + halloysita
 - Caolinita + moscovita
- ✓ Los principales ensambles mineralógicos identificados, respecto a los resultados obtenidos del procesamiento en el programa The Spectral Geologist, colocados en orden de mayor a menor ocurrencia son los siguientes
 - Caolinita + sílice,
 - Mica blanca + sílice

- Montmorillonita + sílice + mica blanca
- ✓ La aplicación de la técnica espectral en la presente investigación permitió realizar una estimación cualitativa de varios tipos de alteración hidrotermal, definidas principalmente en base a los ensambles mineralógicos propuestos por (Corbett & Leach, 1997). Para los resultados obtenidos de manera directa con el TerraSpec Halo, se determinaron las siguientes alteraciones hidrotermales:
- Alteración argílica – 14 muestras.
 - Alteración argílica/fílica – 2 muestras.
 - Alteración sub propilítica - 4 muestras.
- ✓ Para los resultados obtenidos después de la validación de las firmas espectrales en el programa The Spectral Geologist, se determinaron las siguientes alteraciones hidrotermales:
- Alteración argílica – 14 muestras.
 - Alteración argílica/fílica – 2 muestras.
 - Alteración fílica – 3 muestras.
 - Alteración sub propilítica - 1 muestra.
- ✓ De las 20 muestras analizadas, solo en el 70% se obtuvo coincidencia en la alteración determinada por ambos métodos. Solo 14 muestras coinciden en el tipo de alteración hidrotermal en ambos resultados. Esta disparidad evidencia una clara diferencia entre los 2 métodos al establecer el tipo de alteración hidrotermal en cada muestra.
- ✓ Finalmente, se concluye que el uso del TerraSpec Halo es recomendable para trabajos preliminares y una rápida identificación de campo con una evaluación de fiabilidad. Sin embargo,

sus resultados deben ser validados mediante herramientas de interpretación de espectros más completas como el programa The Spectral Geologist que ofrecen mayor análisis y confiabilidad, especialmente en el contexto de exploración avanzada y vectorización de zonas de alteración.

6.3 Recomendaciones

- ✓ Tras analizar las comparaciones entre los ensambles mineralógicos, los escalares y los parámetros espectrales, y el tipo de alteración hidrotermal proporcionado por cada resultado, se determinó que los valores mostrados no coinciden para todas las muestras. Por lo tanto, es necesario analizar y validar los espectros obtenidos del TerraSpec Halo. Es importante reconocer que este espectrómetro es una herramienta complementaria en el ámbito geológico y no debe confiarse plenamente en los resultados que ofrece. Independientemente del programa a utilizar, se deben validar los espectros obtenidos del TerraSpec Halo. Además, las comparaciones también podrían realizarse utilizando otras bibliotecas espectrales, como la de la United States Geological Survey (USGS), una de las bibliotecas espectrales más grande del mundo. Otra opción es crear una biblioteca espectral personalizada en base a muestras matrices obtenidas específicamente del proyecto.

- ✓ Además de la necesidad de validar los espectros obtenidos del TerraSpec Halo y obtener resultados tanto del TerraSpec Halo y el desarrollado en el programa The Spectral Geologist, es crucial complementar estos resultados con otras técnicas. Entre ellas resaltan el análisis químico, la difracción de rayos X (XRD), la fluorescencia de rayos X (XRF), la microscopía óptica, entre otras. Esta integración de técnicas adicionales contribuirá a mejorar la precisión y exactitud de los resultados obtenidos a través de la técnica de espectrometría respecto a la identificación de minerales o ensambles mineralógicos.

- ✓ Se recomienda realizar una comparación entre los resultados mineralógicos y espectrales obtenidos mediante el procesamiento local (TerraSpec Halo y TSG) y aquellos generados por una plataforma automatizada basadas en inteligencia artificial, como el sistema aiSIRIS. Este sistema permite interpretar espectros en la nube de manera automática y estandarizada, lo cual puede ser útil para validar tendencias, detectar posibles errores humanos y mejorar la consistencia del análisis mineralógico en grandes volúmenes de datos. La comparación entre ambas metodologías permitirá evaluar el grado de concordancia, identificar posibles limitaciones del análisis humano y determinar el potencial de integración de herramientas basadas en IA en flujos de trabajo espectrales geológicos.

- ✓ En base a los resultados mineralógicos y los escalares o parámetros espectrales obtenidos es factible desarrollar modelos 3D. Estos modelos pueden ser categóricos si son generados con información de los ensambles mineralógicos, delimitando los halos de alteración, o bien, pueden centrarse en la vectorización de ciertos minerales. Se recomienda la creación de modelos numéricos utilizando la información de los escalares o parámetros espectrales, para vectorizar el grado de cristalinidad de minerales como la caolinita o las micas blancas. Esto permite generar sólidos que representen diferentes ambientes de formación.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Analytical Spectral Devices Inc. (2017). *TerraSpec Halo - Guía de campo*. Malvern: Analytical Spectral Devices Inc.

Antoni, C., Gonzáles-Partida, E., Levresse, G., Tritlla, J., & Carrillo-Chávez, A. (26 de Enero de 2023). *Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: Una tabla comparativa*. Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/28066159_Depositos_epitermales_de_alta_y_baja_sulfuracion_Una_tabla_comparativa

AUSSPEC. (2019). *aiSIRIS v3 results - Information sheet*. Queenstown: AusSpec International Ltd.

AusSpec International Ltd. (2008). *GMEX Spectral Analysis Guides for Mineral Exploration - Practical Applications Handbook*.

AusSpec International Ltd. (2008). *GMEX Spectral Analysis Guides for Mineral Exploration - Regolith Logging*.

AusSpec International Ltd. (2008). *GMEX Spectral Analysis Guides form Mineral Exploration - Spectral Interpretation Field Manual*.

Camprubí, A., González-Partida, E., Levresse, G., Tritlla, J., & Carrillo-Chávez, A. (2003). Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 10-18.

Clark, R. N. (1999). *Spectroscopy of rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy*. New York: John Wiley and Sons.

Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. (22 de Abril de 2022). *The Spectral Geologist*. Obtenido de What is The Spectral Geologist?:
<https://research.csiro.au/thespectralgeologist/tsg/spectral-geologist-tsg/>

Corbett, G., & Leach, T. (1997). *Short course manual: Southwest Pacific rim gold-copper systems: Structure, alteration and mineralization*.

Curtiss, B. (2014). *Field Characterization of white micas using the TerraSpec Halo*. Panalytical company.

Dalm, M. (2011). Applicability of near-infrared spectroscopy for sensor based sorting of mill pebbles from the Los Bronces copper mine, Chile. *Tesis*. Delft University of Technology, Ámsterdam.

Fang, Q., Zhao, L., Hanlie, H., Kukolich, S., Yin, K., & Wang, C. (2018). Visible and near-infrared reflectance spectroscopy for investigating soil mineralogy. *Journal of Spectroscopy*.

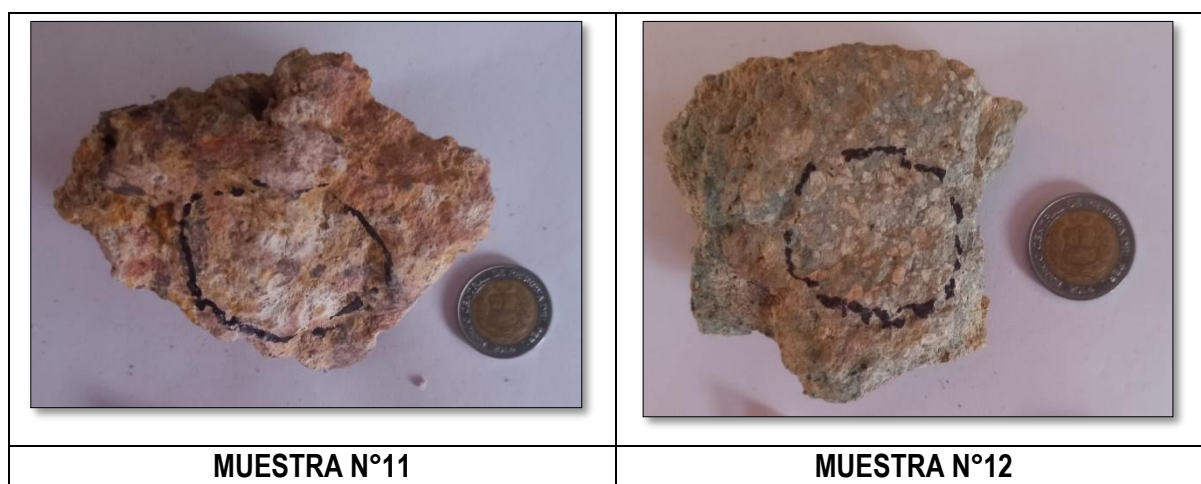
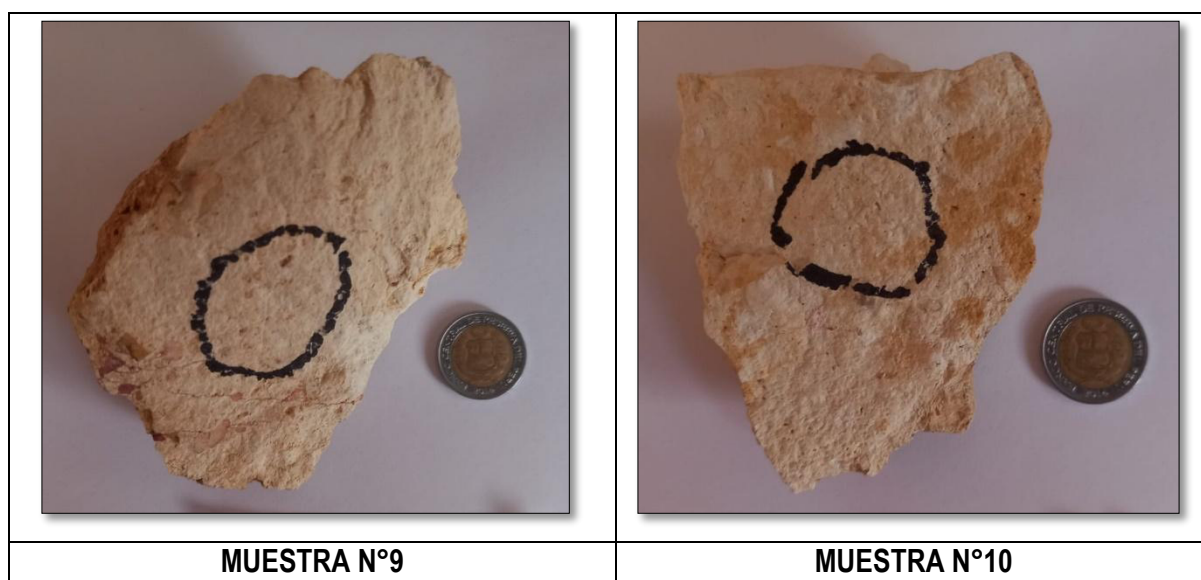
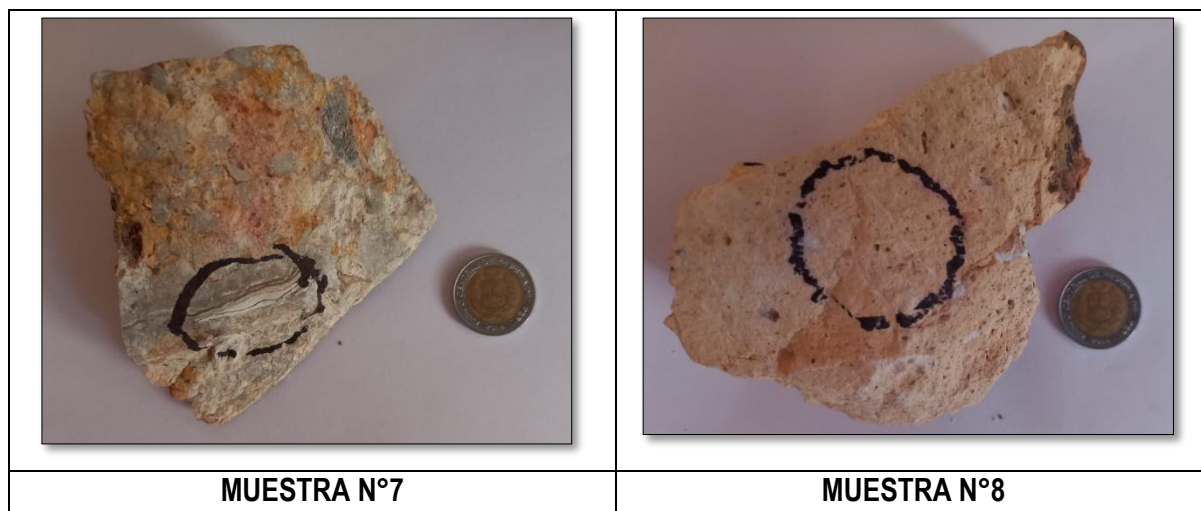
- Hauff, P. (2008). An overview of VIS-NIR-SWIR field spectroscopy as applied to precious metals exploration. *Spectral Internations INC.*, 71.
- Hauff, P. L. (2005). *Applied reflectance spectroscopy with emphasis on data collection and data interpretation using field spectrometers*. Arvada: Spectral International, Inc.
- Hedenquist, J. W., Arribas, A., & Gonzales-Urien, E. (2000). *Exploration For Epithermal Gold Deposits*. Society of Economic Geologists.
- Hedenquist, J. W., Izawa, E., Arribas, A., & White, N. C. (2001). Yacimientos epitermales de oro: tipos de mineralización, características y exploración. *Mundo Minero*, 75-85.
- Hollas, J. M. (2004). *Modern Spectroscopy*. England (West Sussex): John Wiley and Sons Ltd.
- IUPAC. (1997). *Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. Compiled by: A. D. McNaught & A. Wilkinson (Online)*. Oxford: Blackwell Scientific Publications. Obtenido de <https://goldbook.iupac.org/>
- Kokaly, R., Clark, R., Swayze, G., Livo, E., Hoefen, T., Pearson, N., . . . Klein, A. (2017). USGS Spectral Library Versión 7. *U.S. Geological Survey Data Series*, 1-21. Obtenido de U.S. Geological Survey Data Series.
- Lau, I., Laukamp, C., Mason, P., Warren, P., Huntington, J., & Whitbourn, L. (2016). CSIRO Shortwave Infrared Spectral Library. *CSIRO Minerals Resources*, 10-148.
- Lau, I., Laukamp, C., Mason, P., Warren, P., Huntington, J., & Whitbourn, L. (2016). *CSIRO Shortwave infrared spectral library - Evaluation and status report 2016*. Canberra: Natinal virtual core library.
- Meinert, L. D., Dipple, G. M., & Nicolescu, S. (2005). World Skarn Deposits. *Society of Economic Geologists*, 299-336.
- Ostrooumov, M. (2006). *Avances recientes de espectrometría infrarroja en la mineralogía avanzada*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia: Departamento de Geología y Mineralogía.
- Páez Beltrán, C. E. (2008). *Espectrometría (SWIR) aplicada para mapeo de alteración en la zona de Viruela - La Cruz, proyecto La India. Distrito minero Mulatos, Sahuaripa Sonora México (Tesis de Pregrado)*. Universidad de Sonora, Sonora.
- Palacio, M., & Godeas, M. (2008). *Guía de minerales de alteración de la República Argentina*. Buenos Aires: Instituto de Geología y Recursos Minerales.
- Pirajno, F. (1992). *Hydrothermal Mineral Deposits. Principles and Fundamental concepts for the exploration geologist*. Perth: Springer-Verlag.

- Pontual, S., Merry, N., & Gamson, P. (2008). *Spectral Interpretation Field Manual* (3 ed.). Melbourne, Australia: AusSpec International Ltd.
- Robbrn, M., Knapp, H., & Wotruba, H. (2012). Applicability of near infrared sorting in the minerals industry. *Scientific article*. RWTH Aachen University, Aachen.
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry Copper Systems. *Society of Economic Geologists*, 3-41.
- Thompson, A., & Thompson, J. (1996). *Atlas of Alteration: A field and petrographic guide to hydrothermal alteration minerals*. St. John's: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division.
- Thompson, A., Hauff, P., & Robitaille, A. (1999). Anteraction Mapping in Exploration: Application of Short-Wave Infrared (SWIR) Spectroscopy. *Society of Economic Geologist*, 16-27.
- Townley, B. K. (2001). *Metalogénesis: Hidrotermalismo y Modelos de Yacimientos*. Universidad de Chile. Santiago: Departamento de Geología.
- Vargas, P. (2019). Introducción a la Espectroscopía de Reflectancia (VNIR - SWIR). *Introducción a la Espectroscopía de Reflectancia (VNIR - SWIR)*. Reflex, Arequipa.

Anexo A

Registro Fotográfico de las Muestras

**MUESTRA N°1****MUESTRA N°2****MUESTRA N°3****MUESTRA N°4****MUESTRA N°5****MUESTRA N°6**



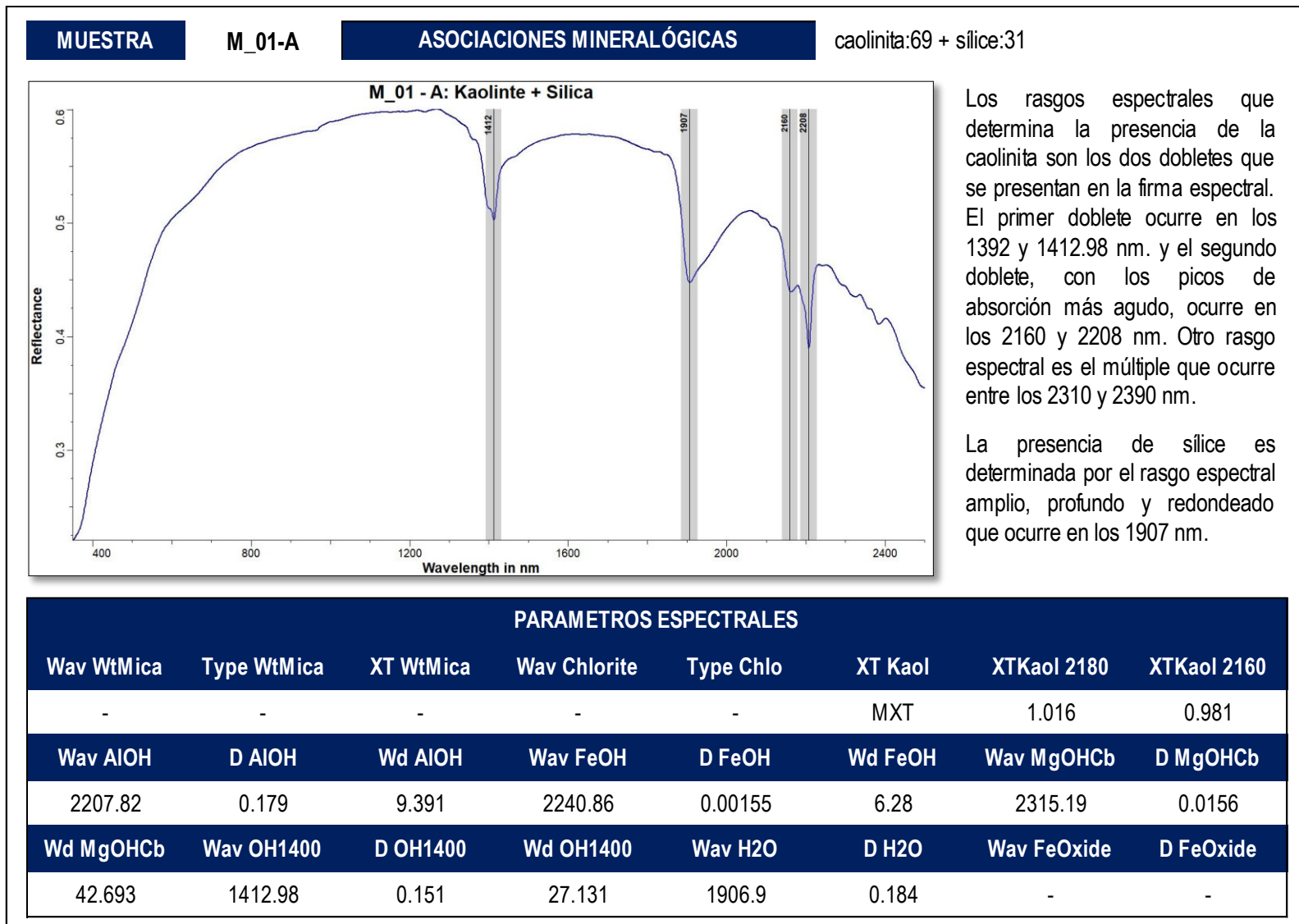
**MUESTRA N°13****MUESTRA N°14****MUESTRA N°15****MUESTRA N°16****MUESTRA N°17****MUESTRA N°18**

**MUESTRA N°19****MUESTRA N°20**

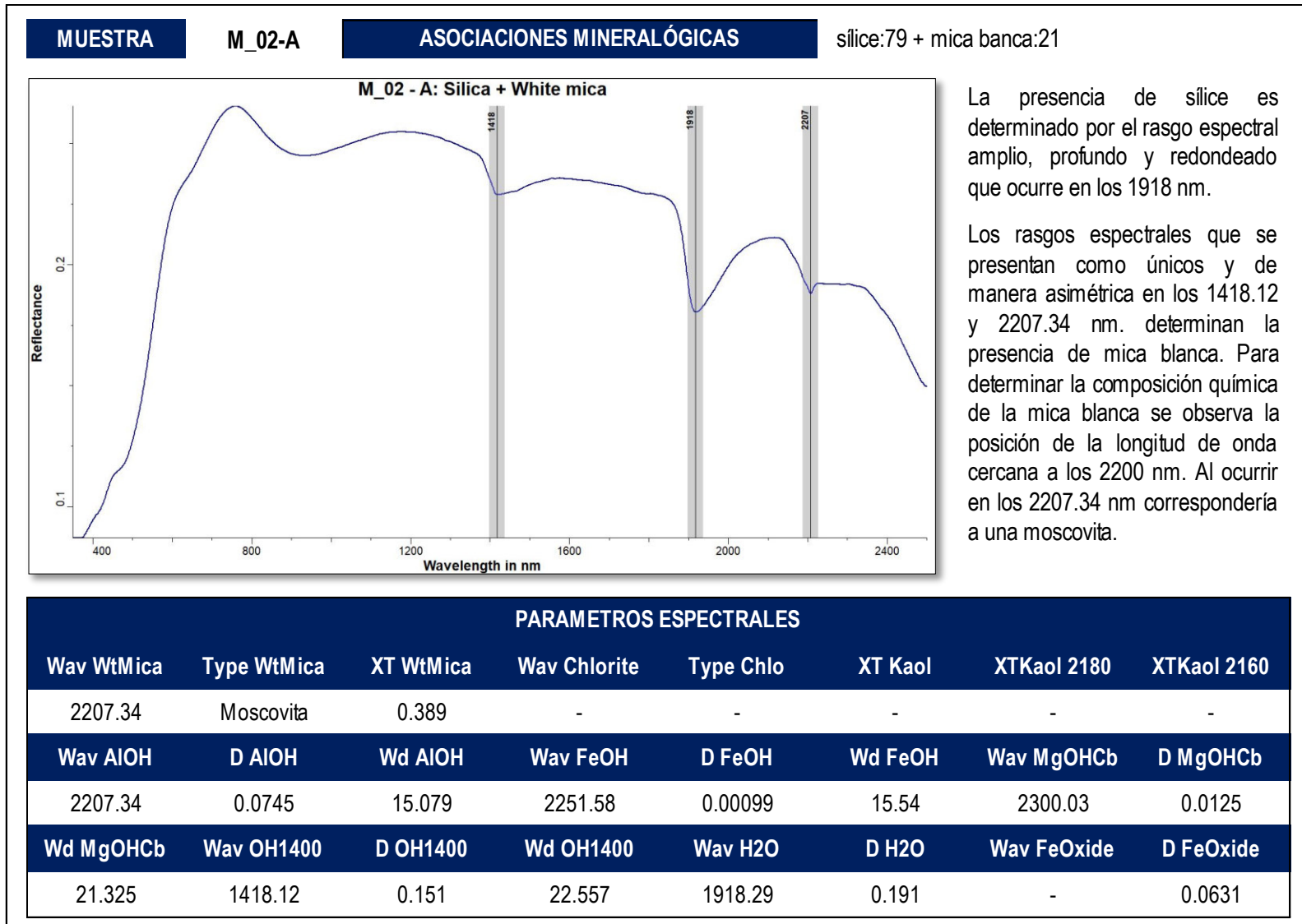
Anexo B

Validación e interpretación de las firmas espectrales

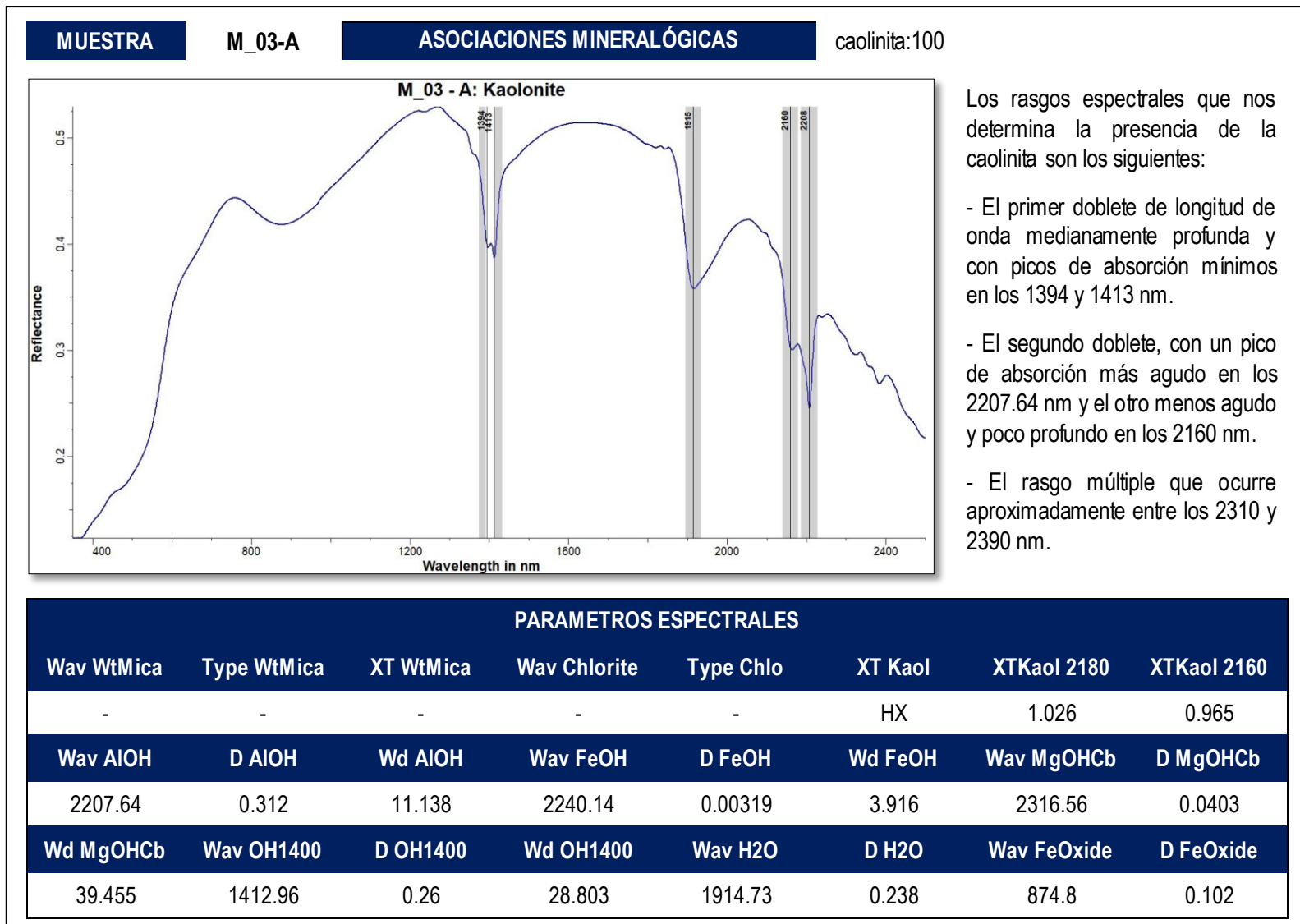
Muestra M_01 – A



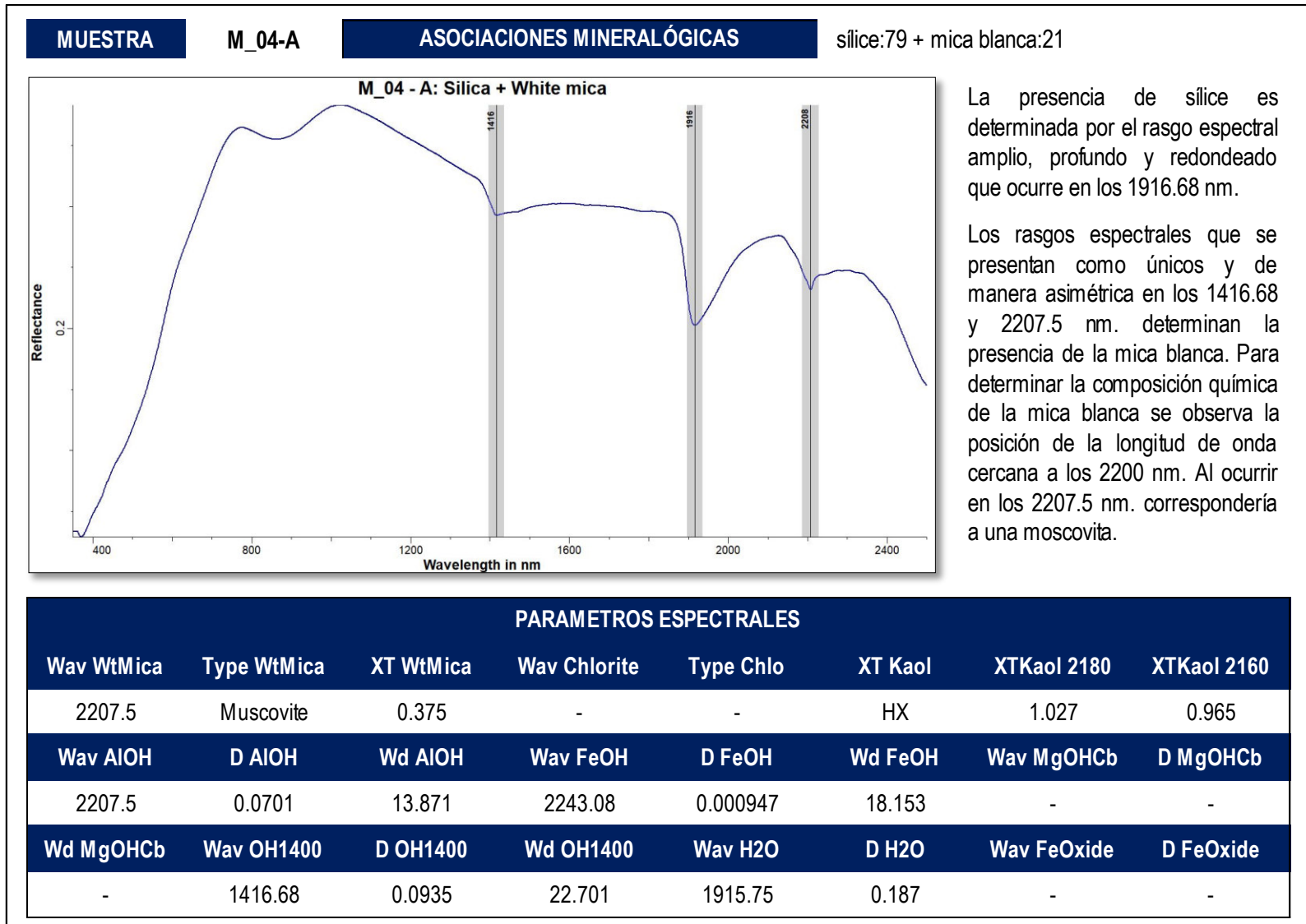
Muestra M_02 – A



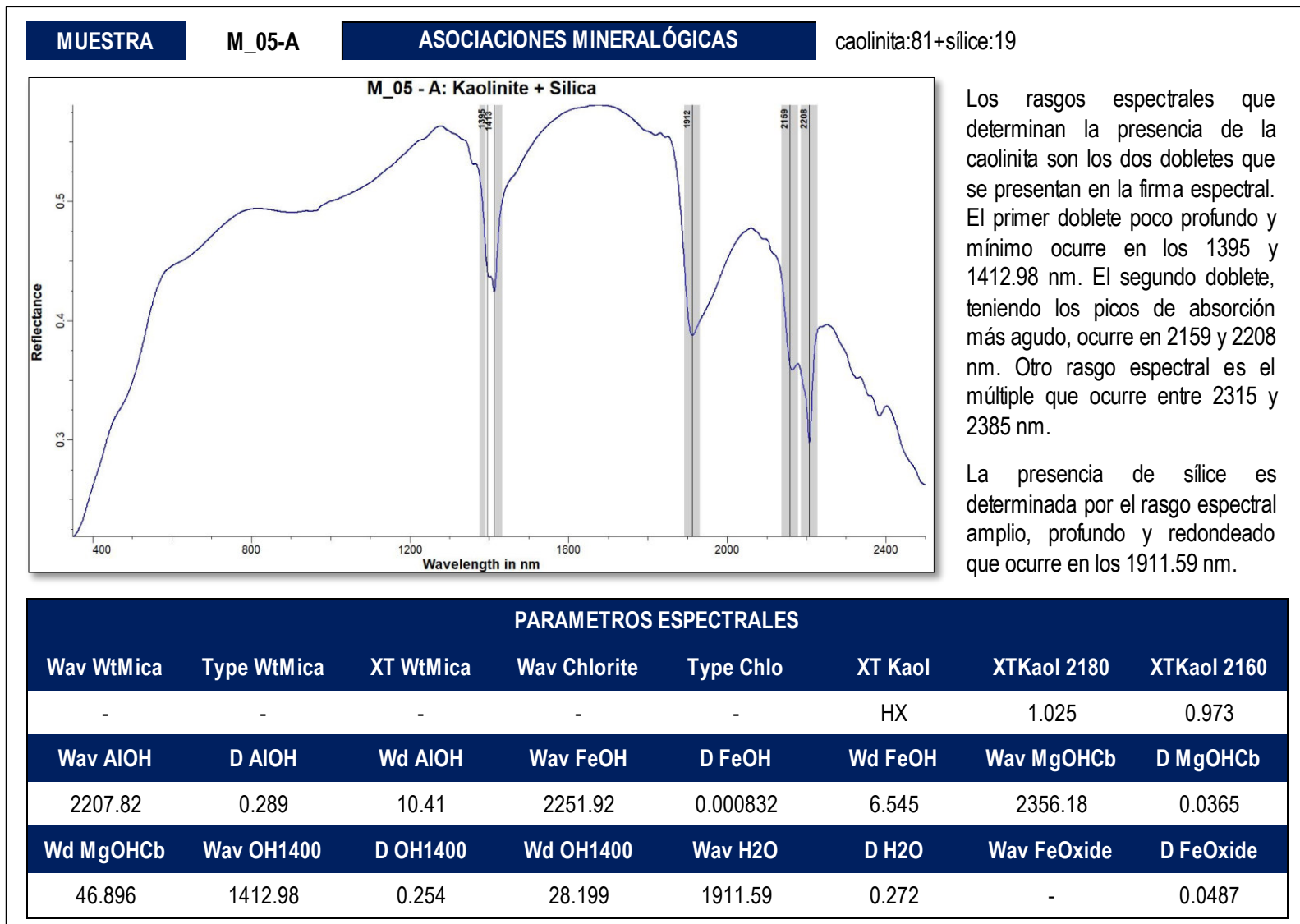
Muestra M_03 – A



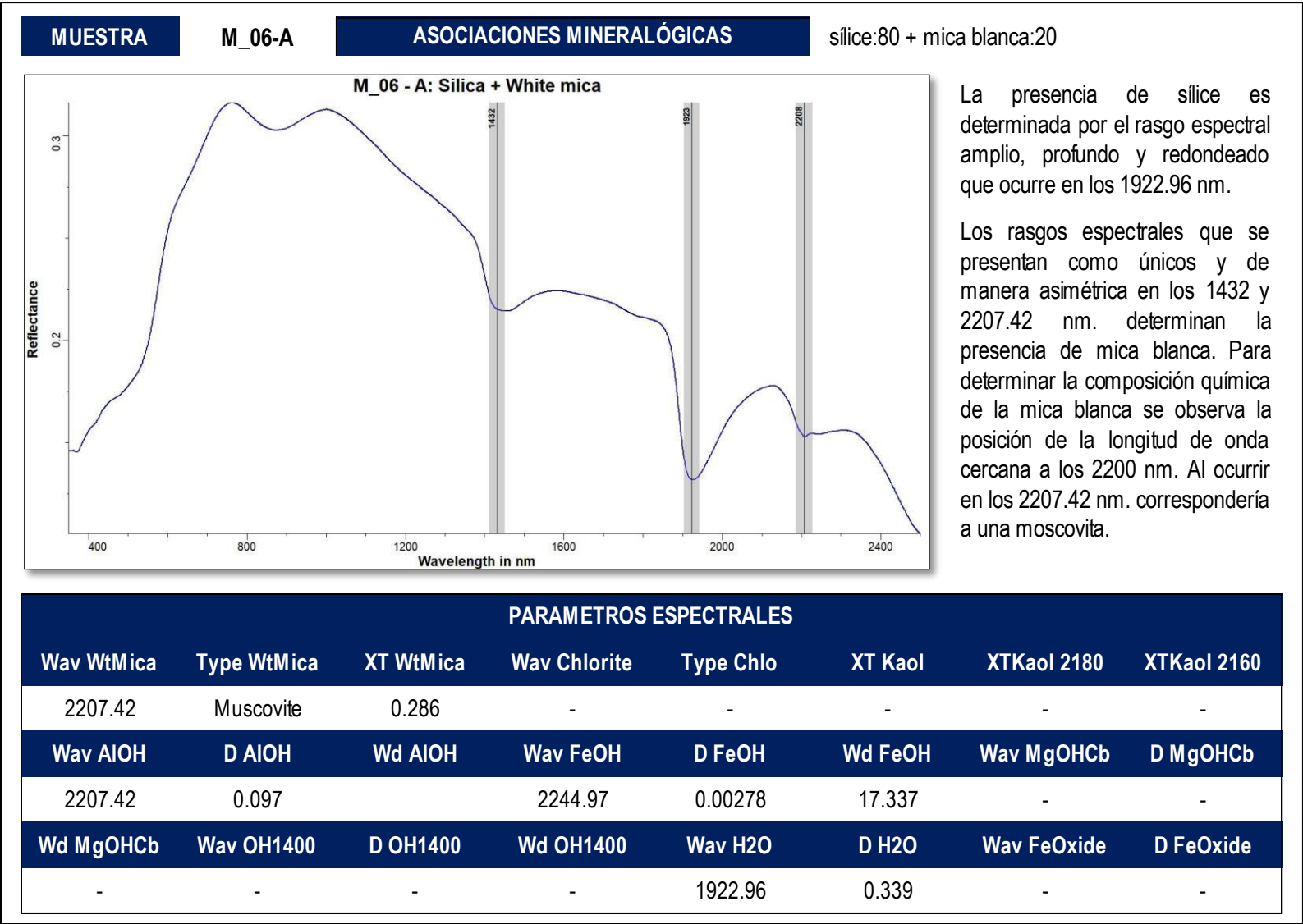
Muestra M_04 – A



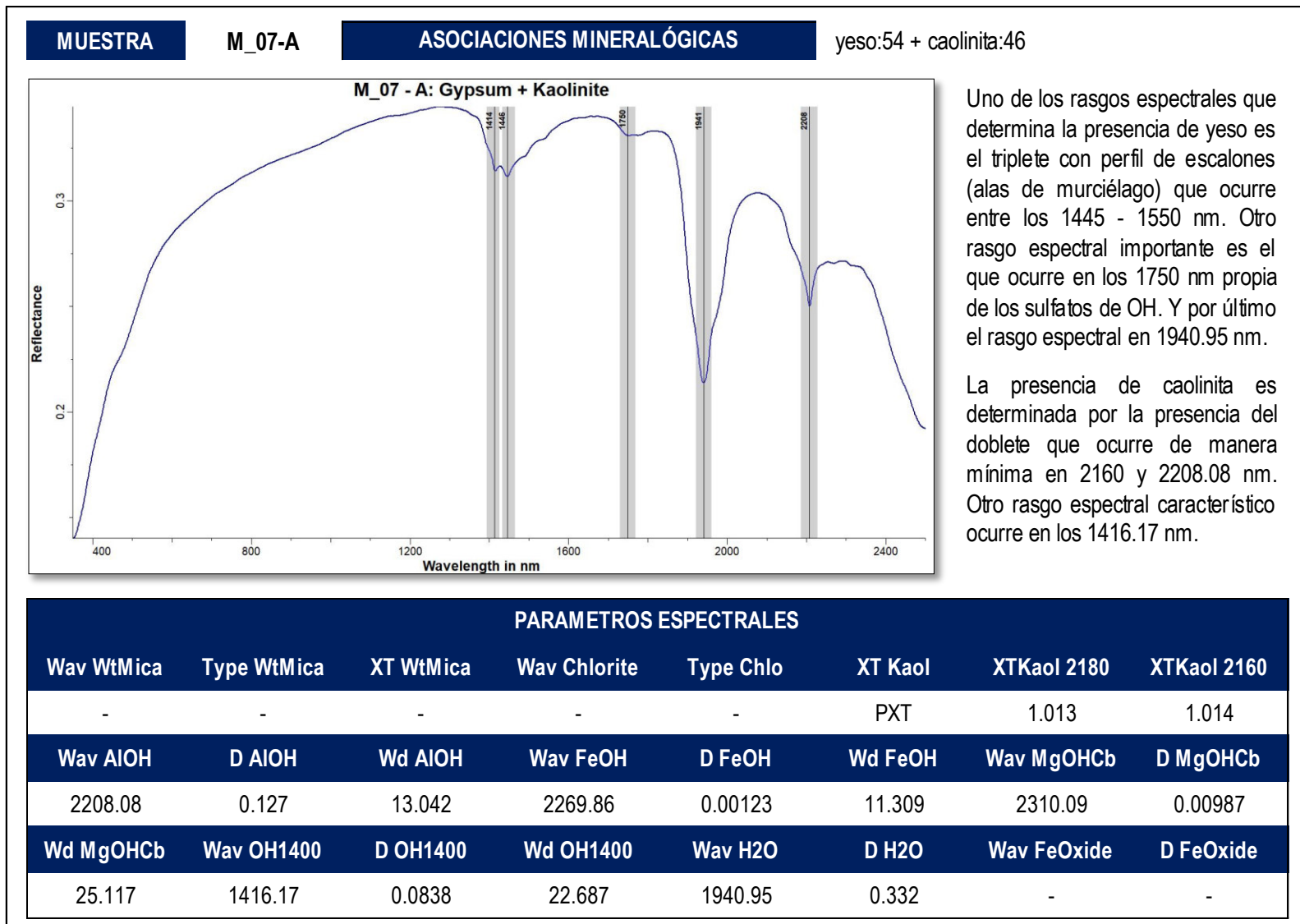
Muestra M_05 – A



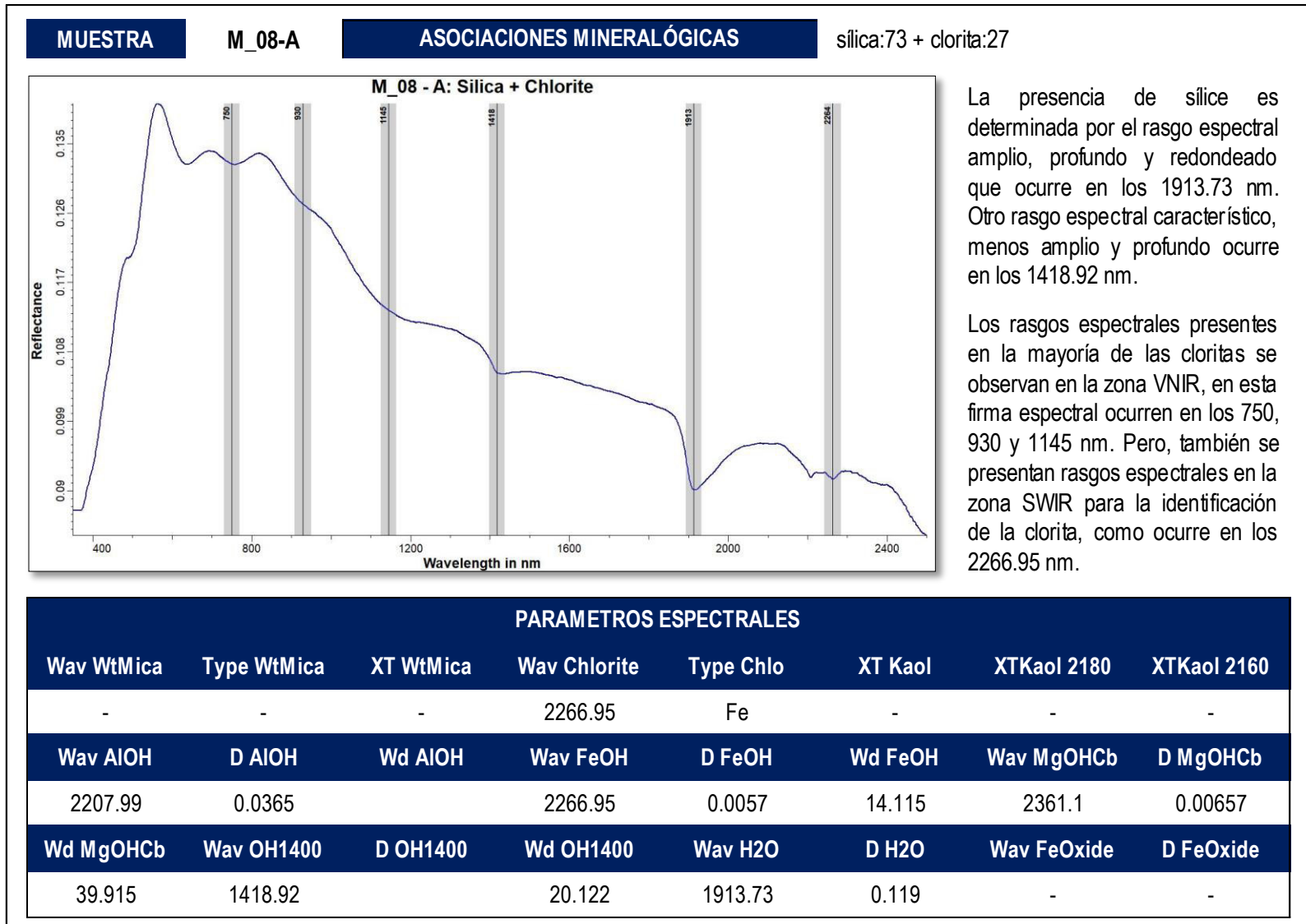
Muestra M_06 – A



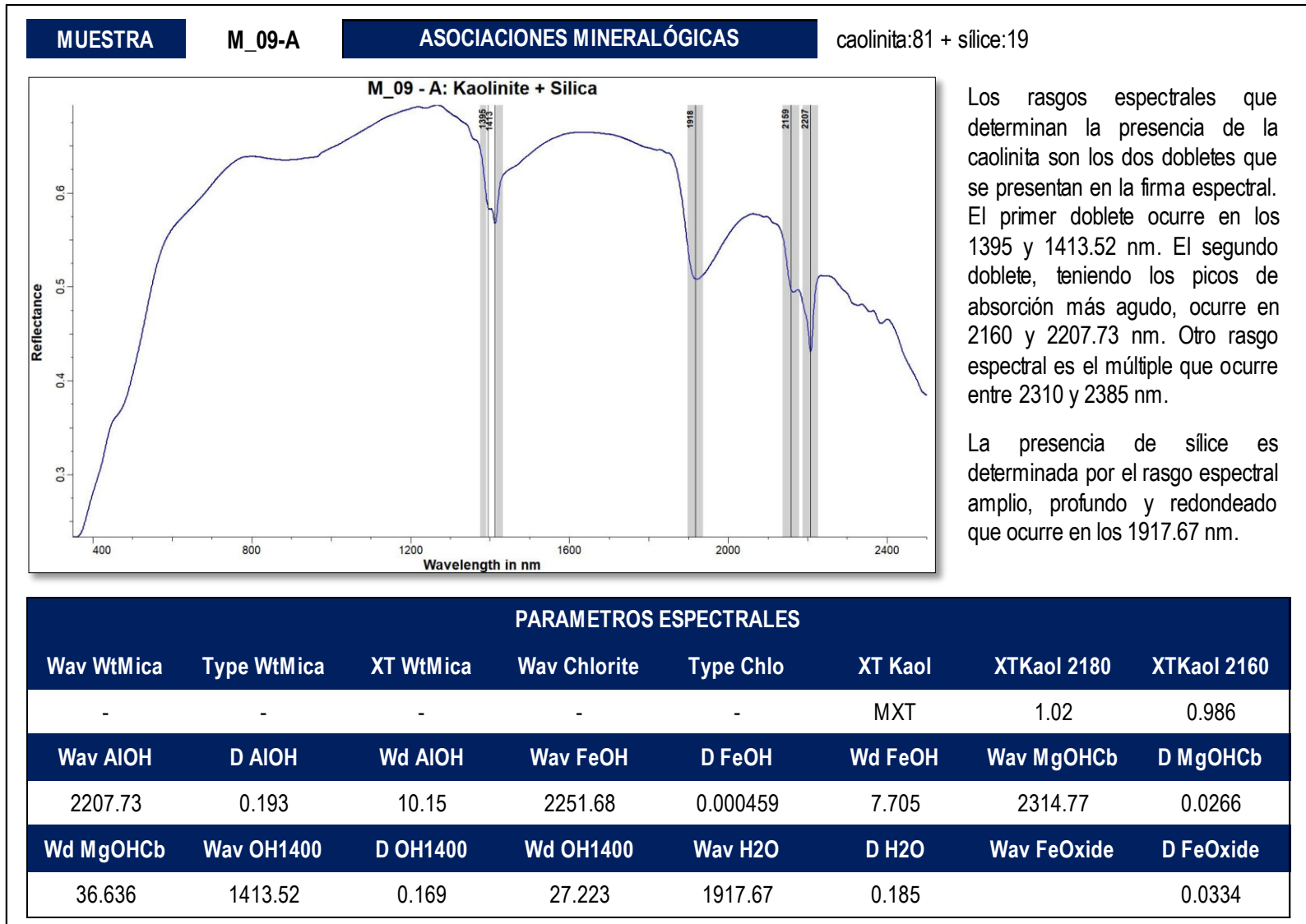
Muestra M_07 – A



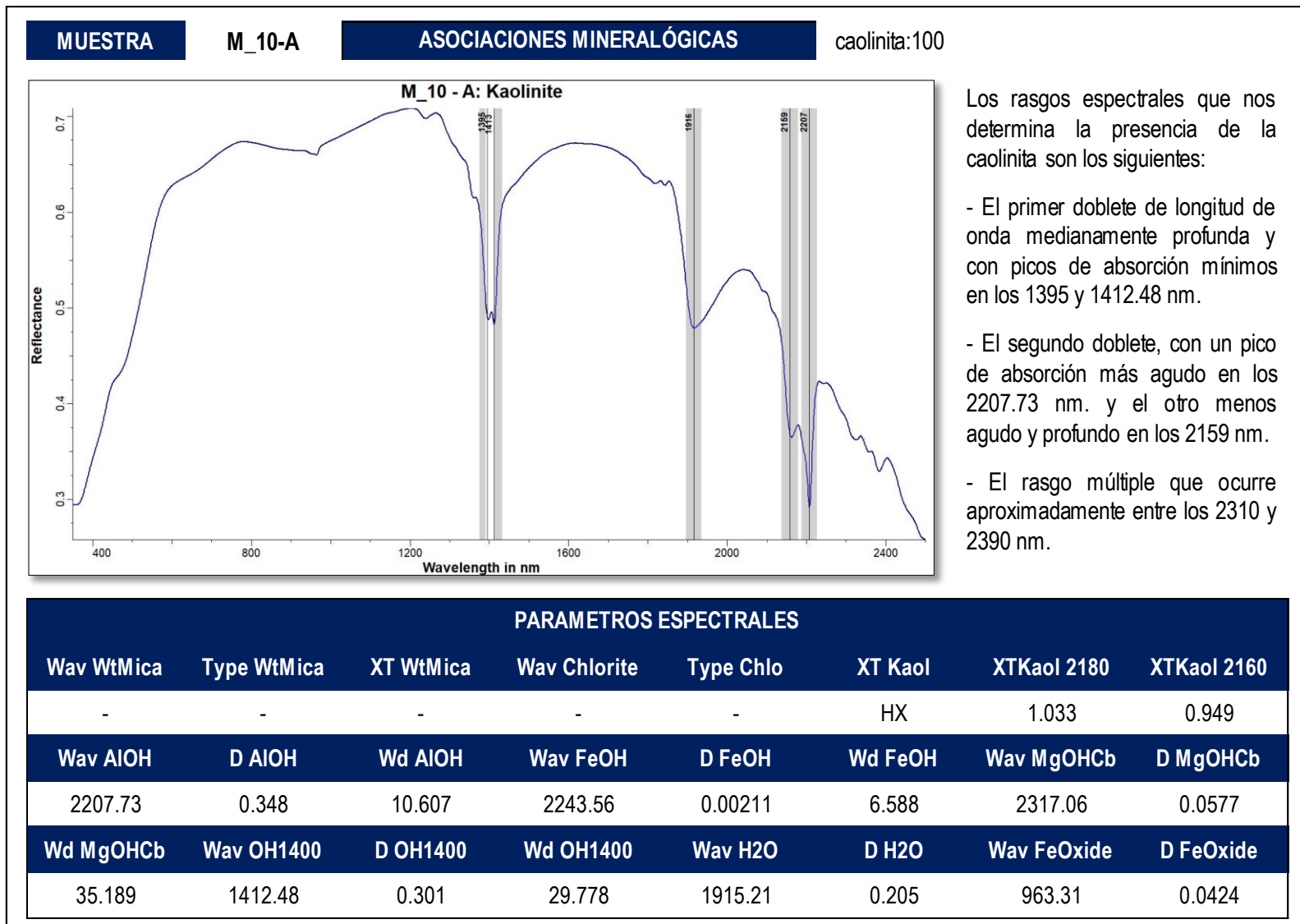
Muestra M_08 – A



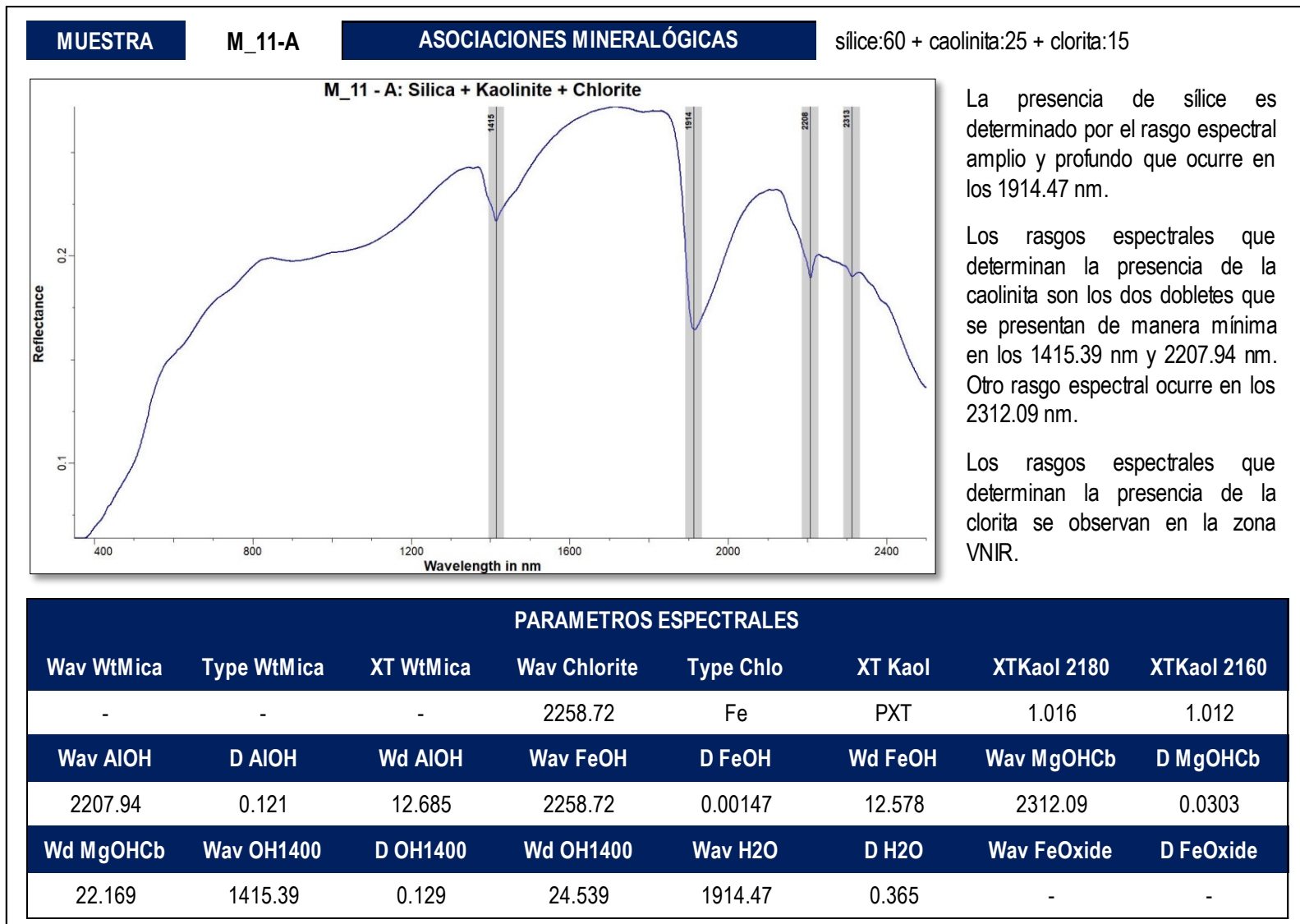
Muestra M_09 – A



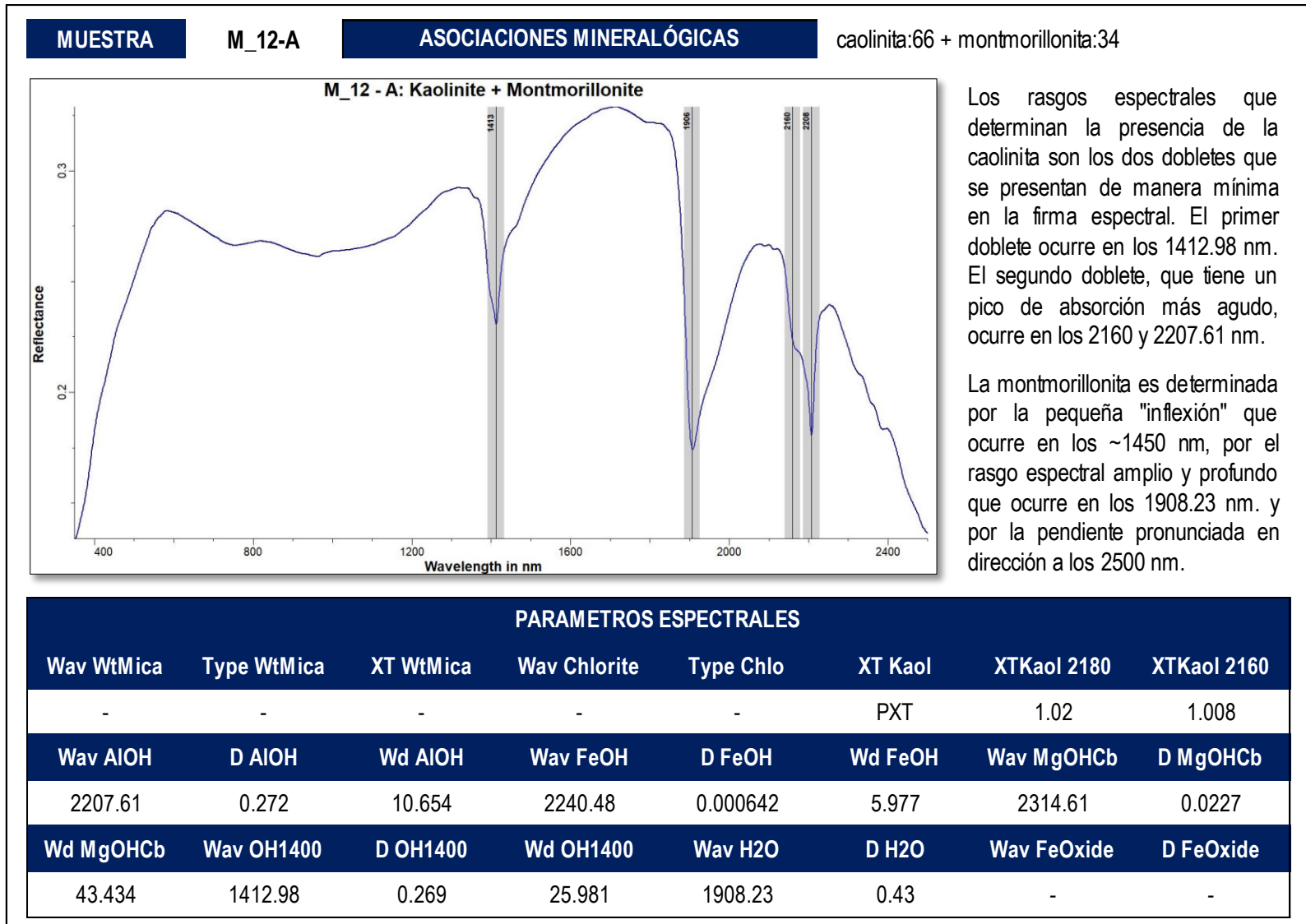
Muestra M_10 – A



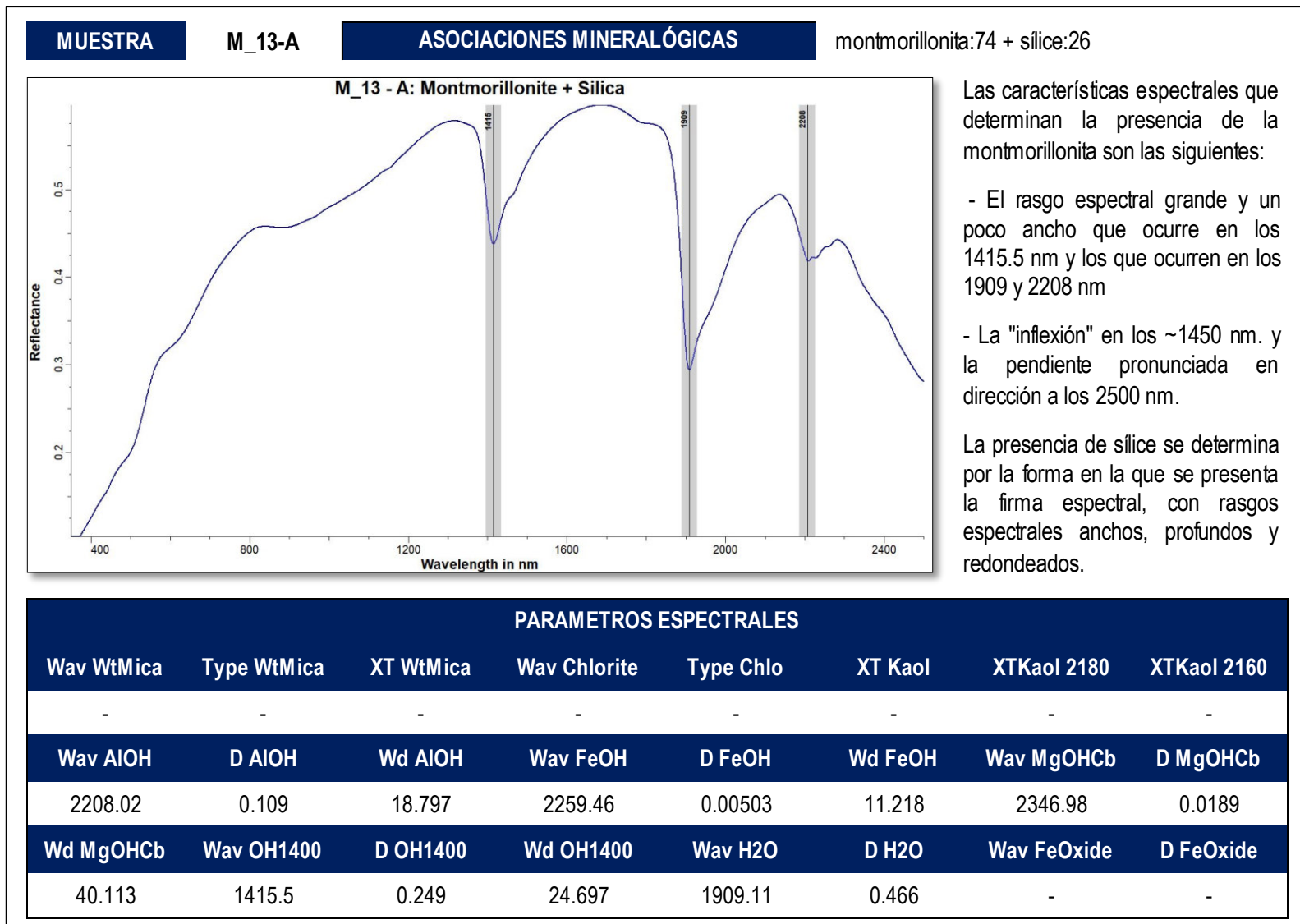
Muestra M_11 – A



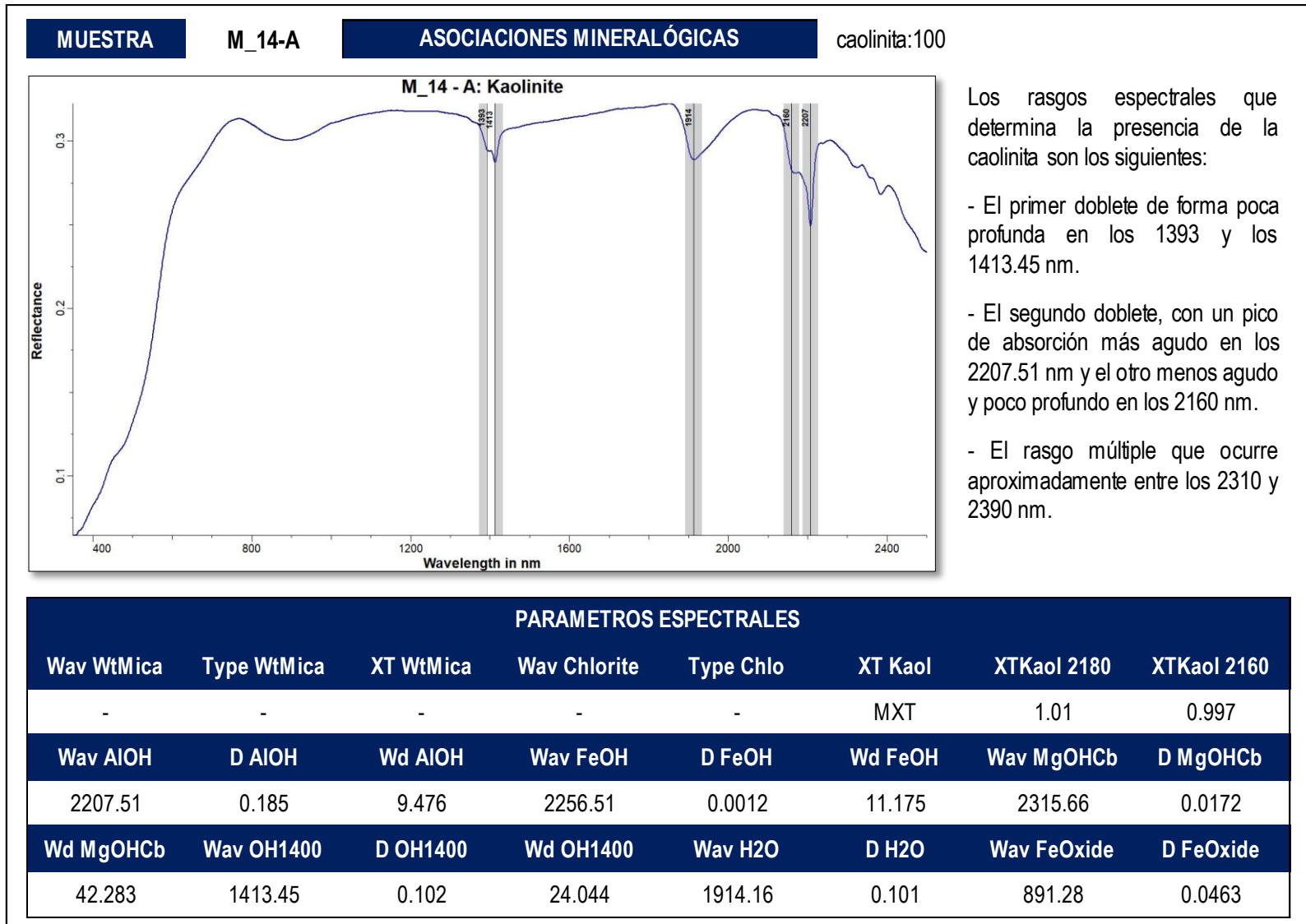
Muestra M_12 – A



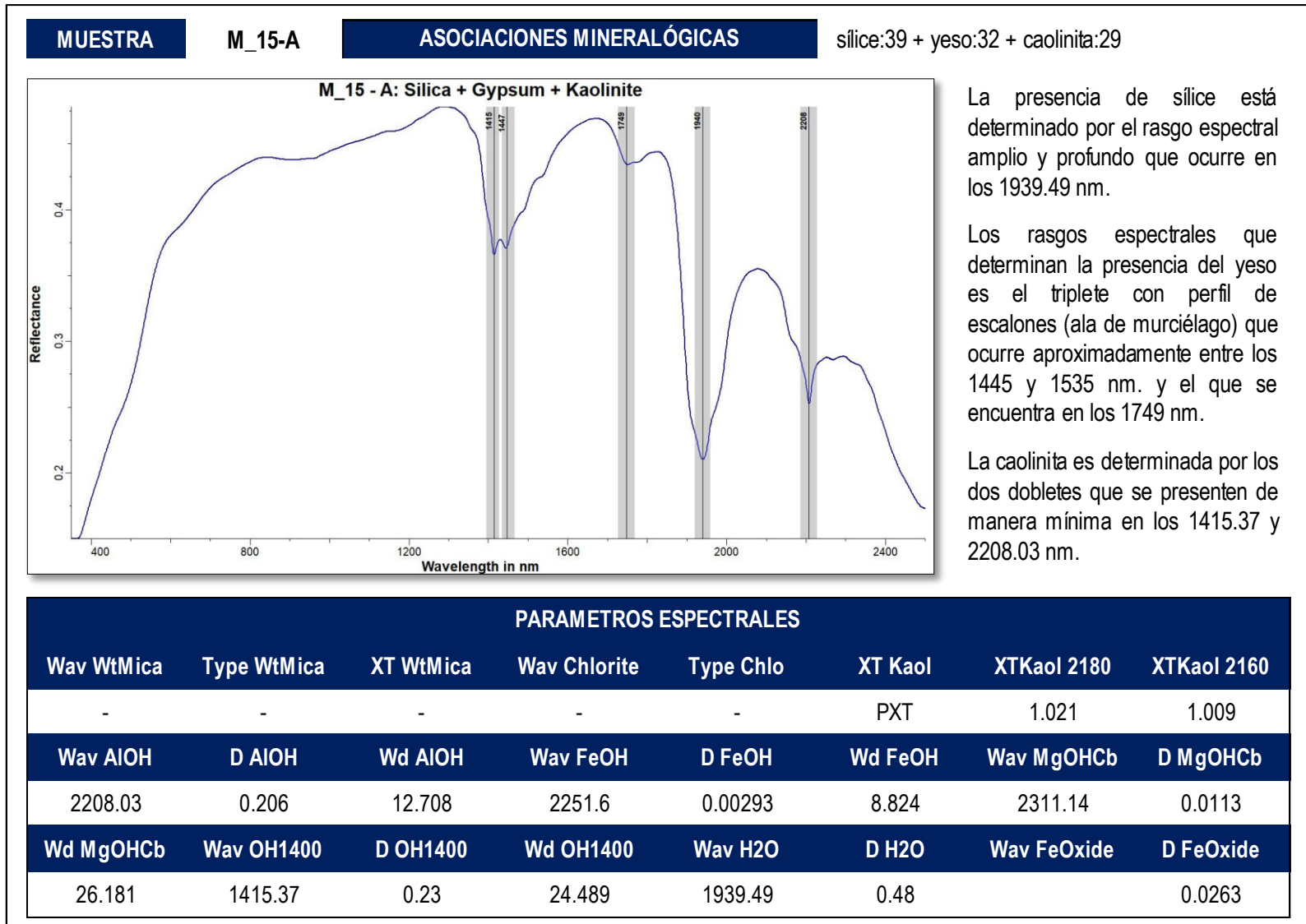
Muestra M_13 – A



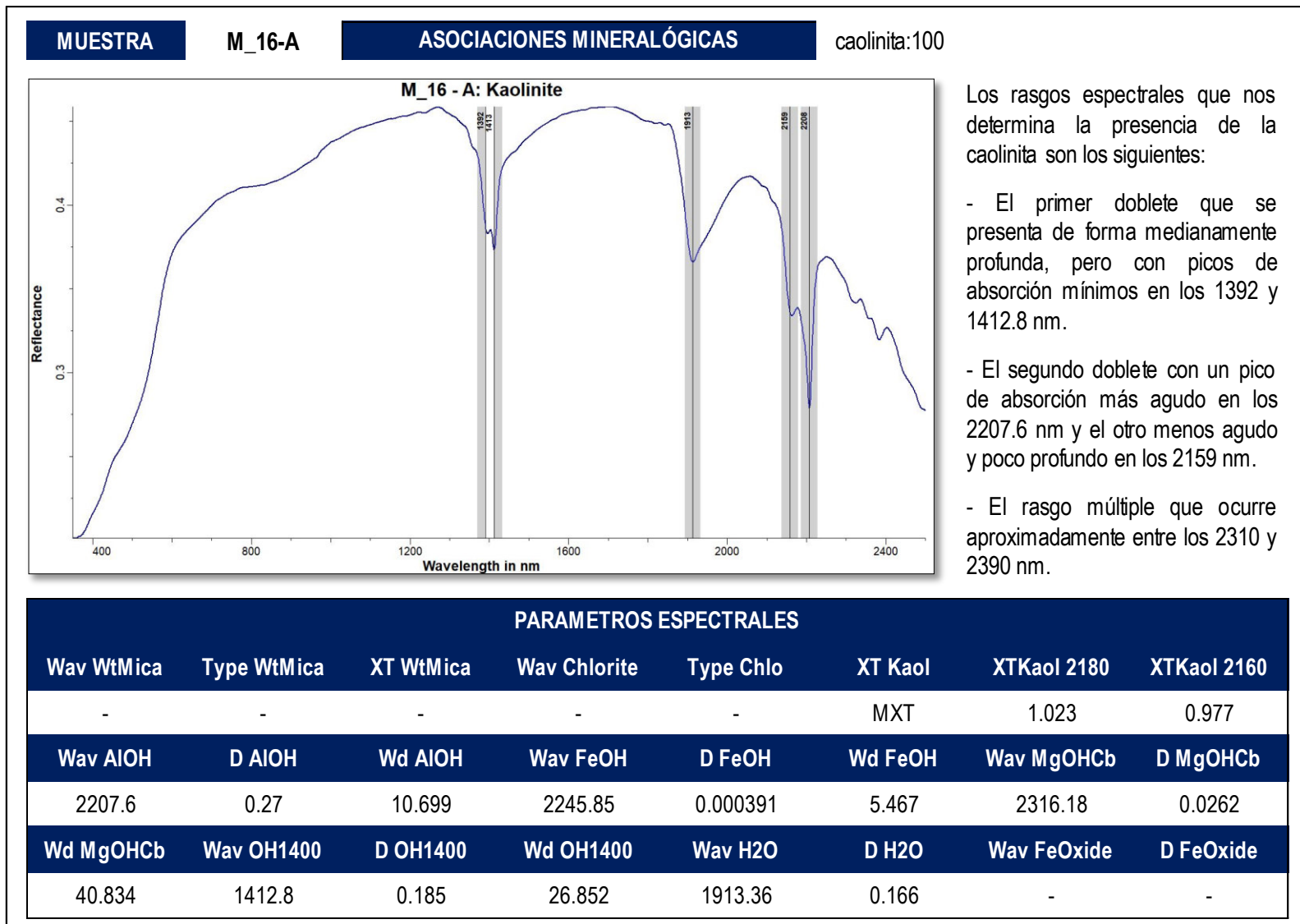
Muestra M_14 – A



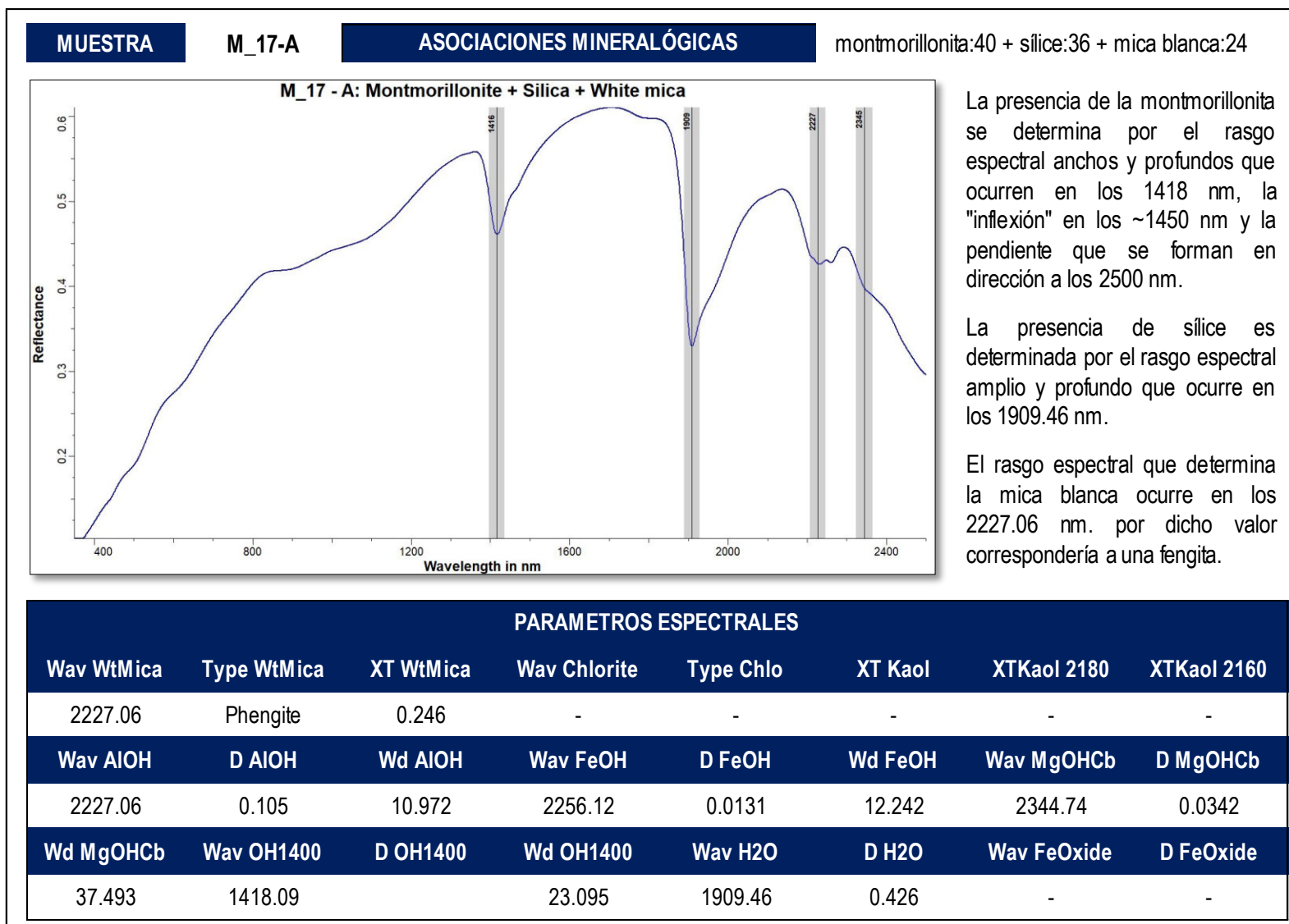
Muestra M_15 – A



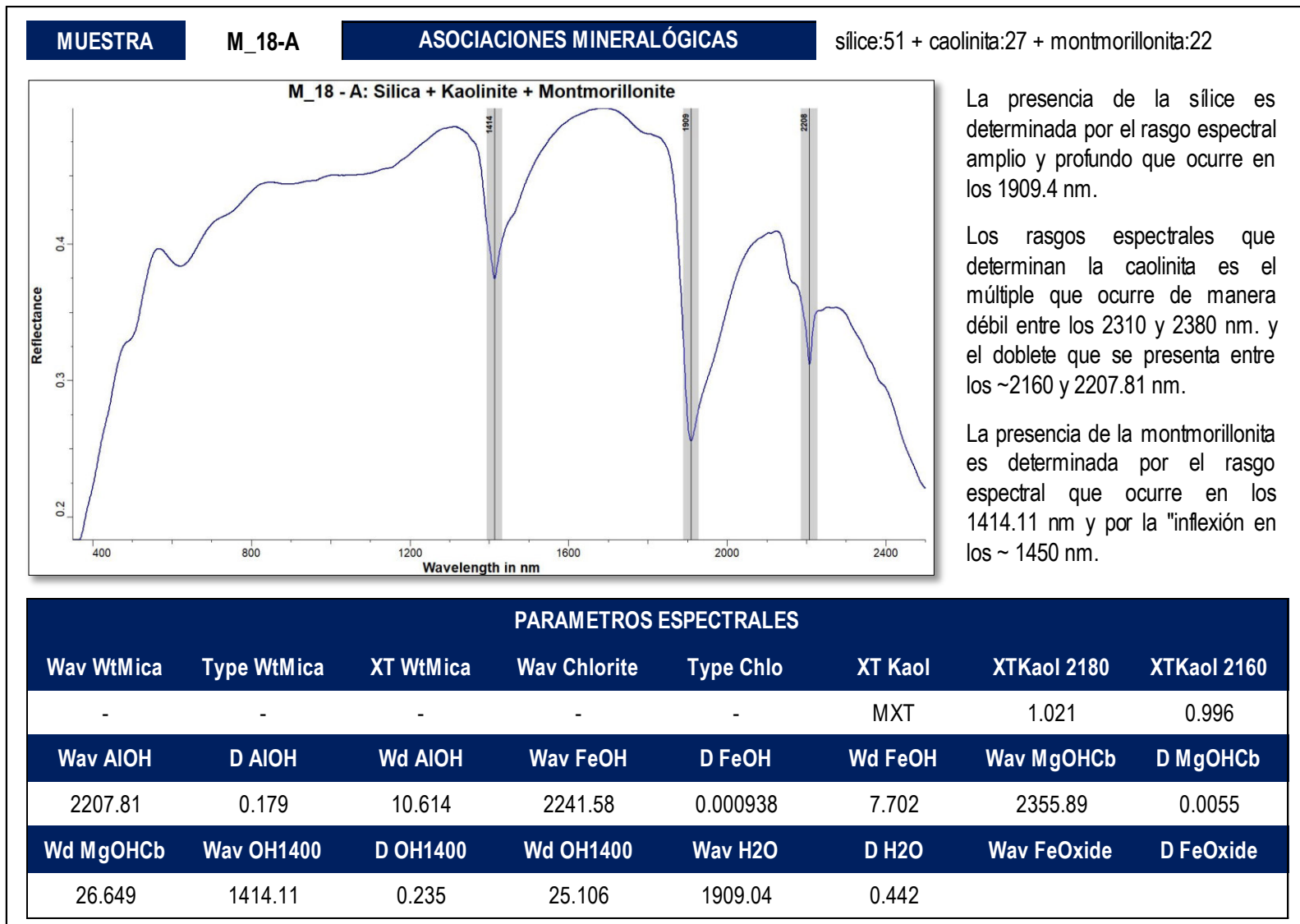
Muestra M_16 – A



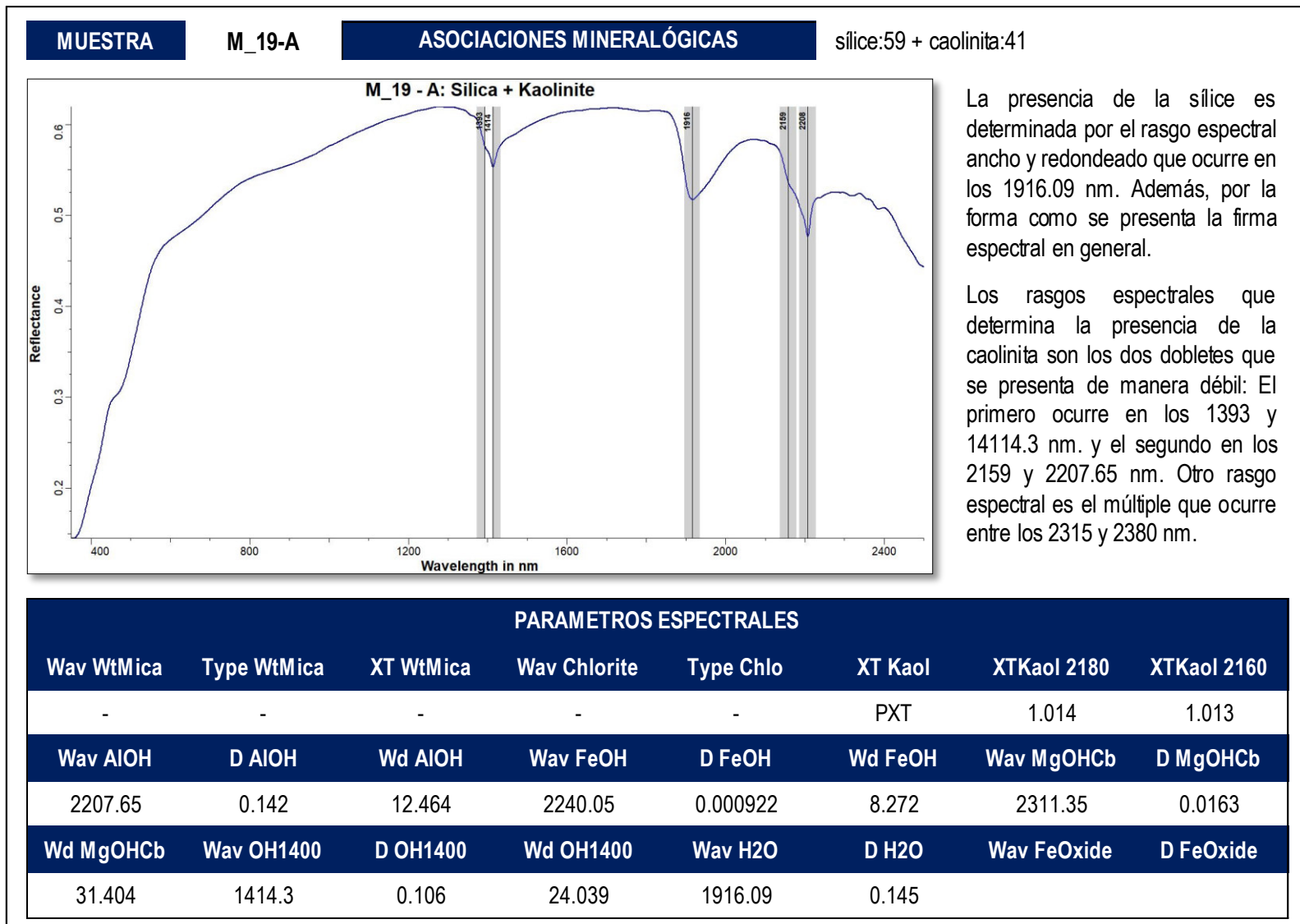
Muestra M_17 – A



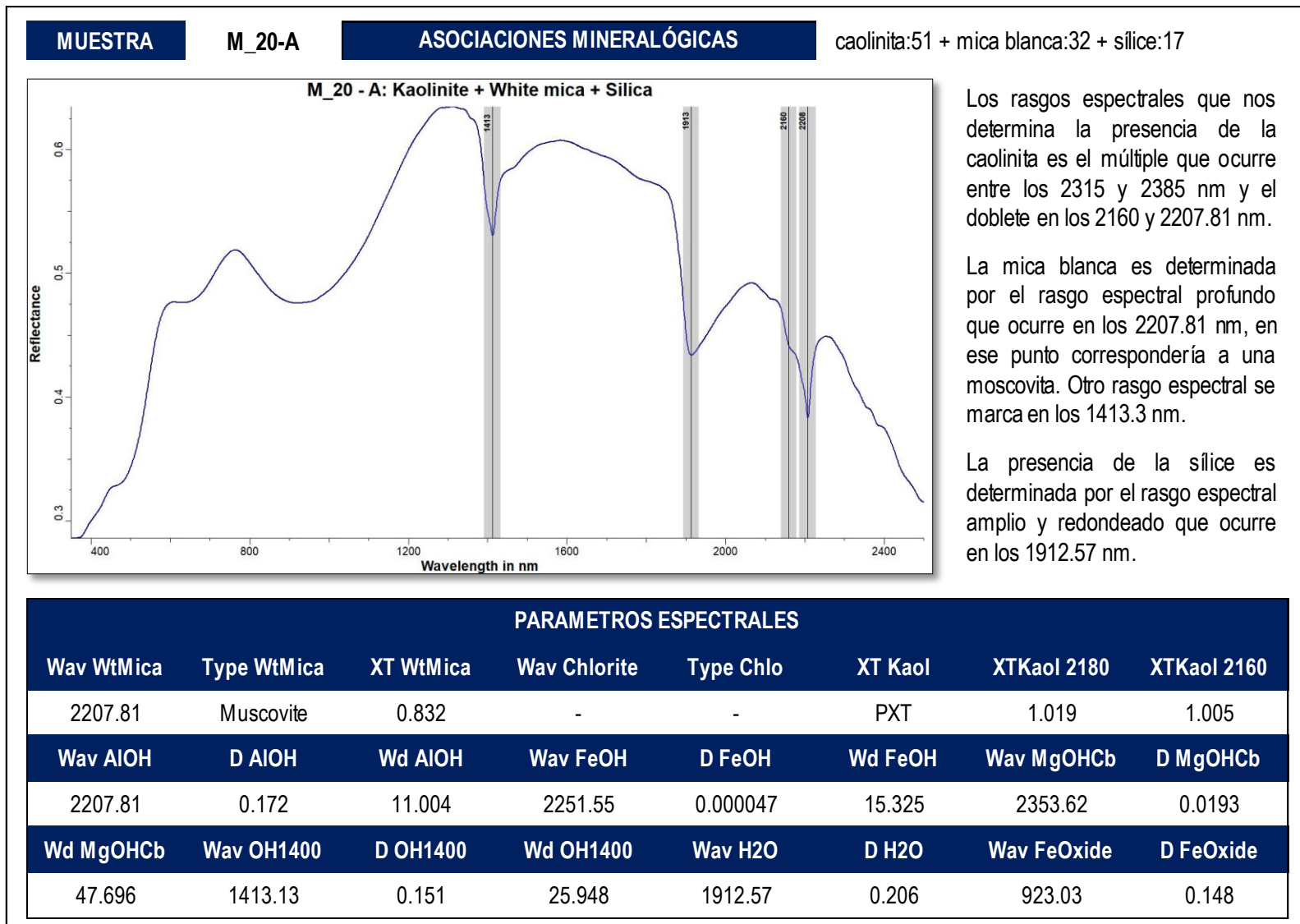
Muestra M_18 – A



Muestra M_19 – A

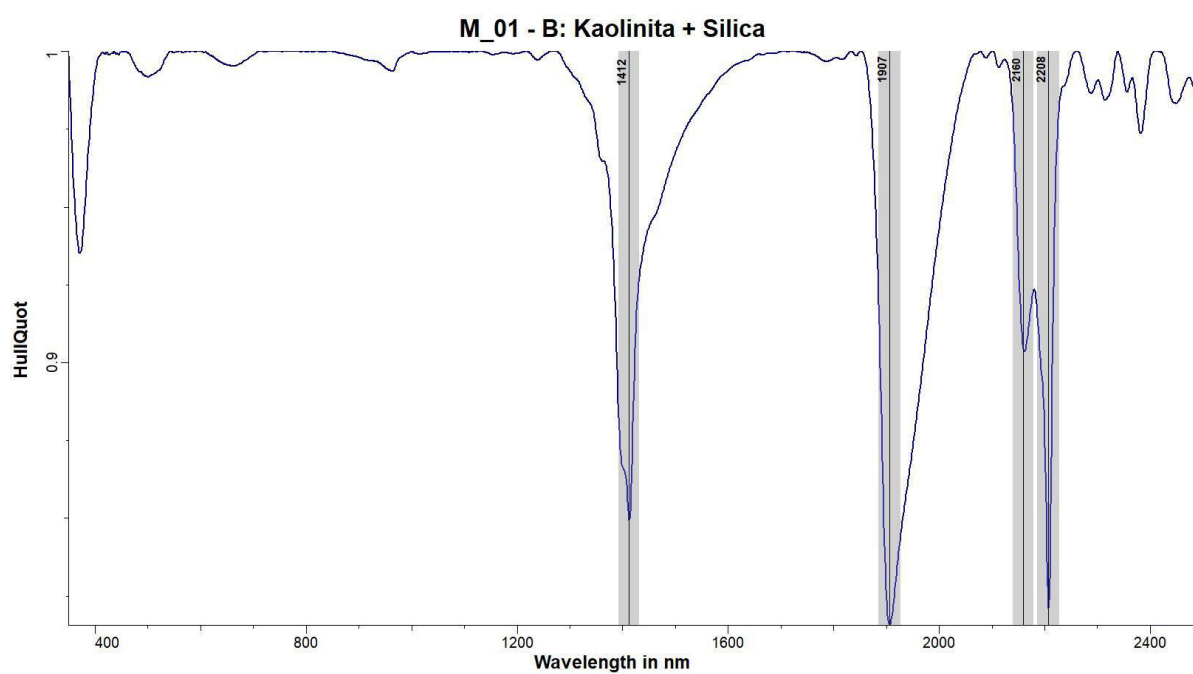
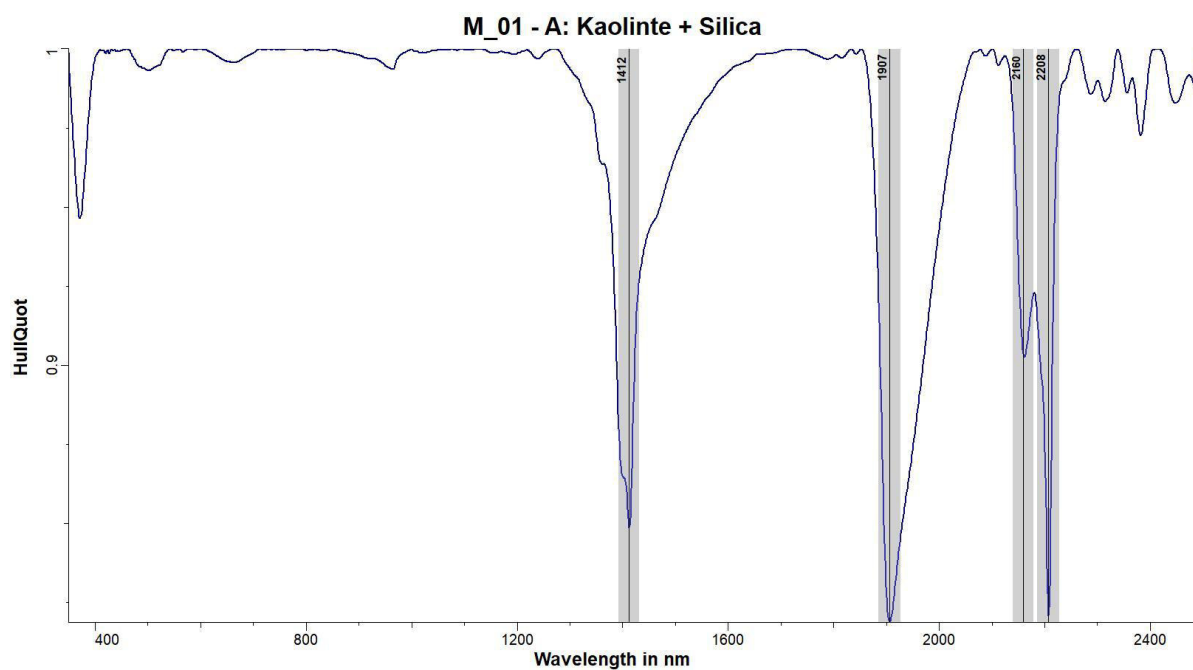


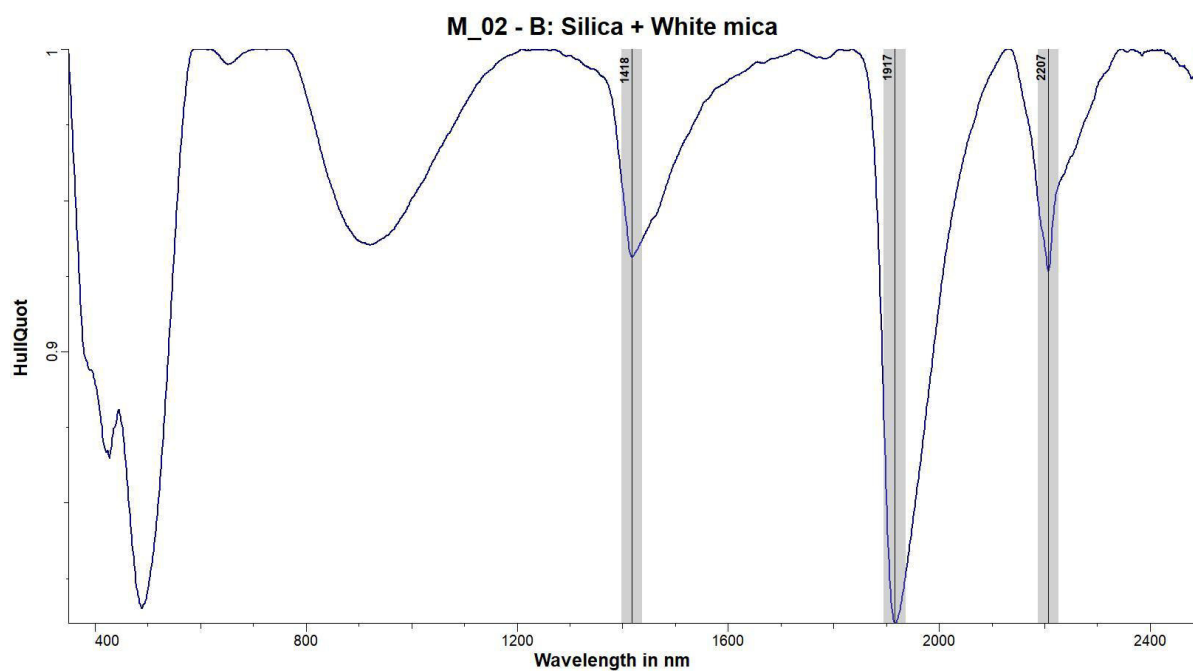
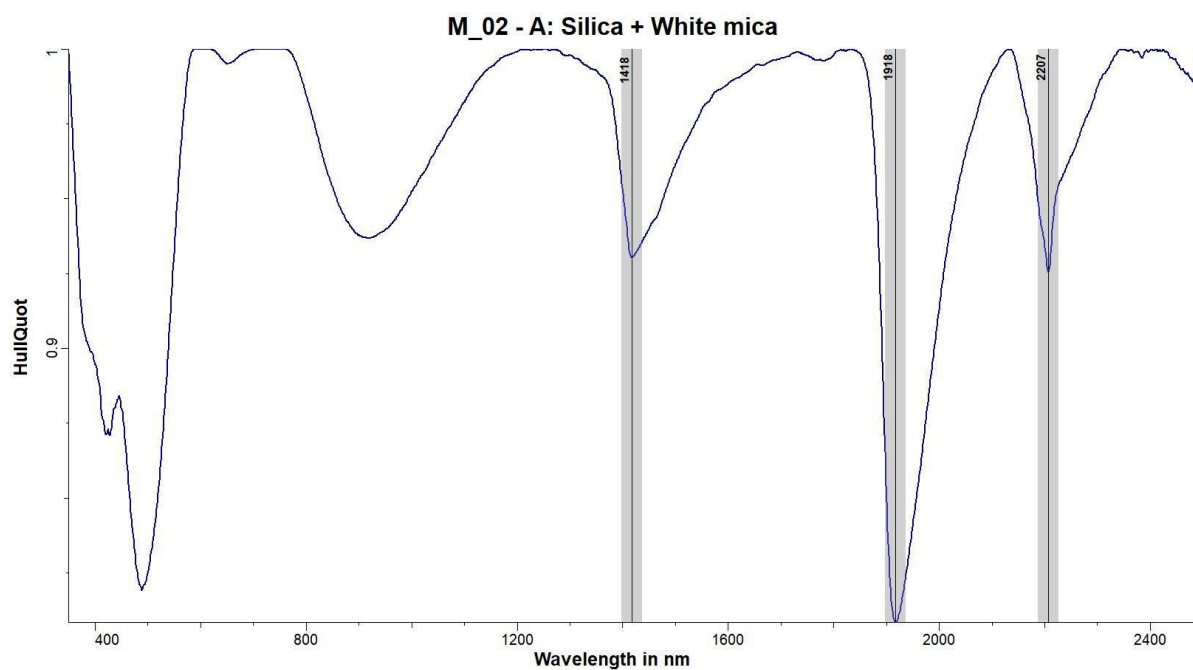
Muestra M_20 – A



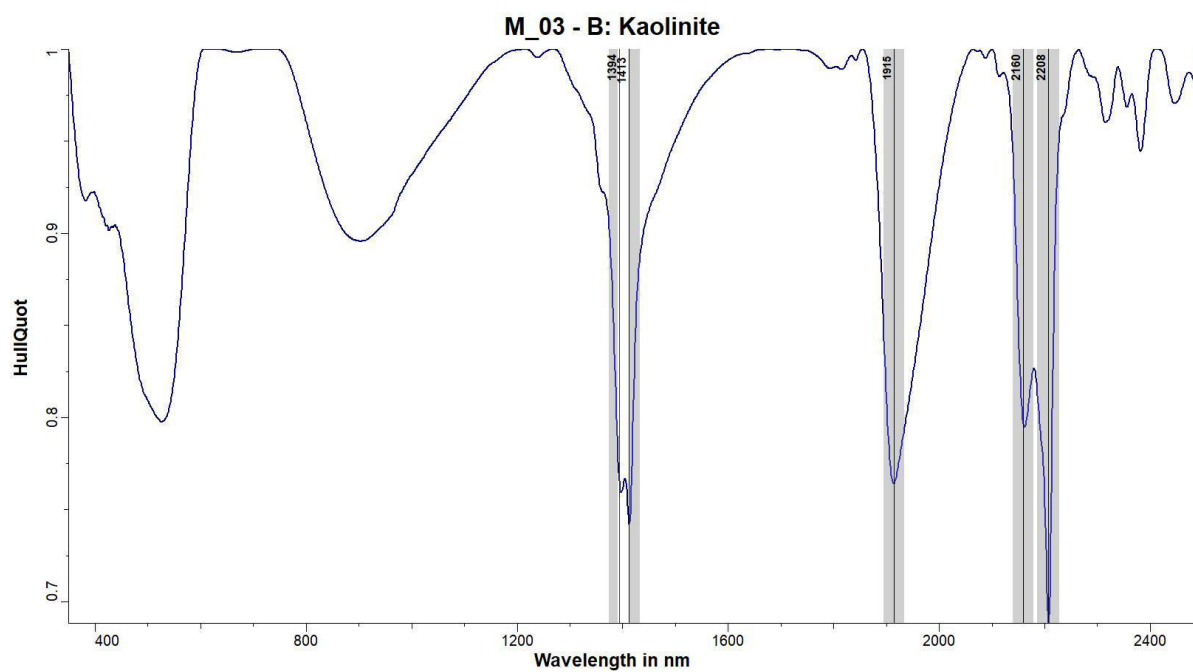
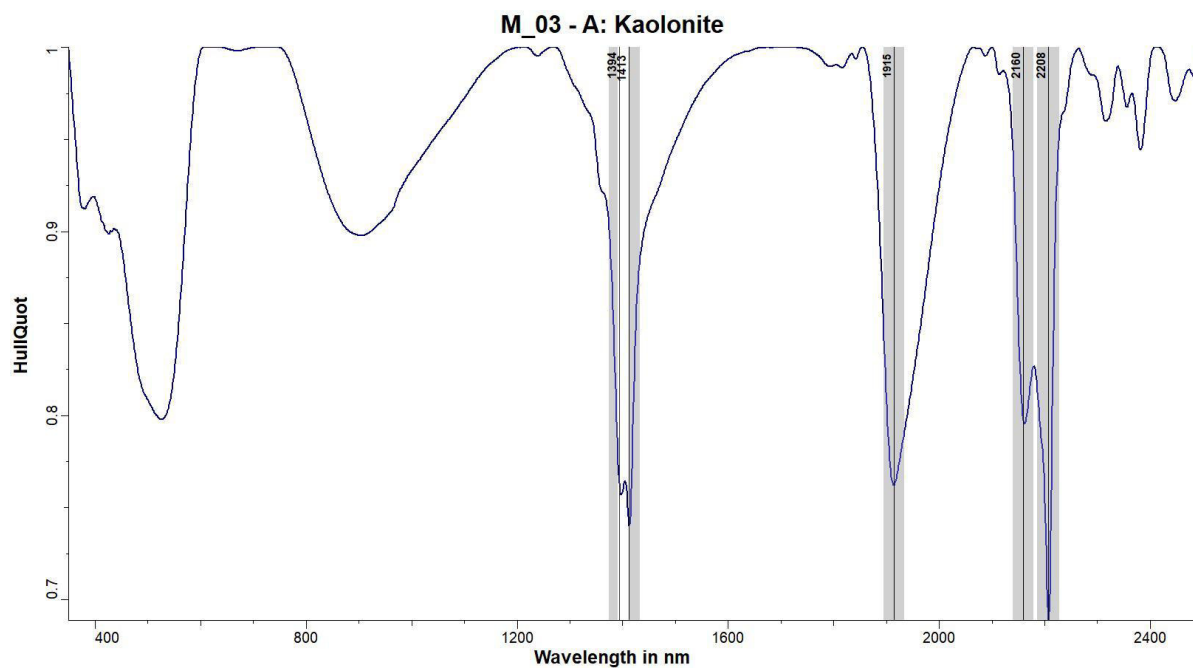
Anexo C

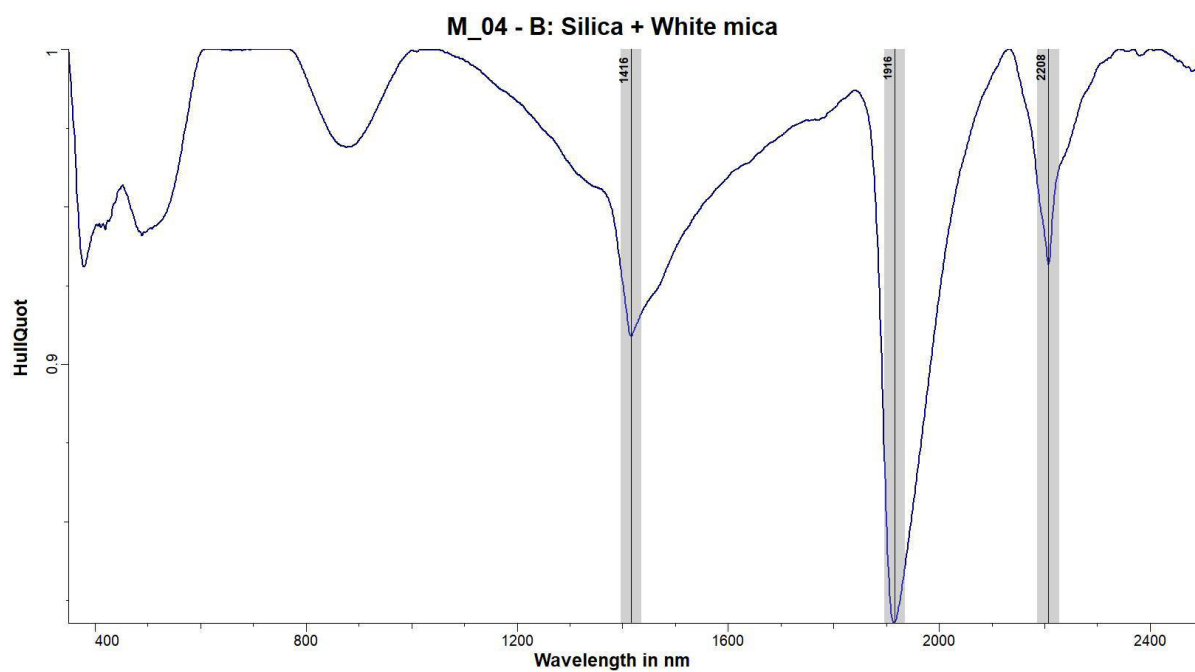
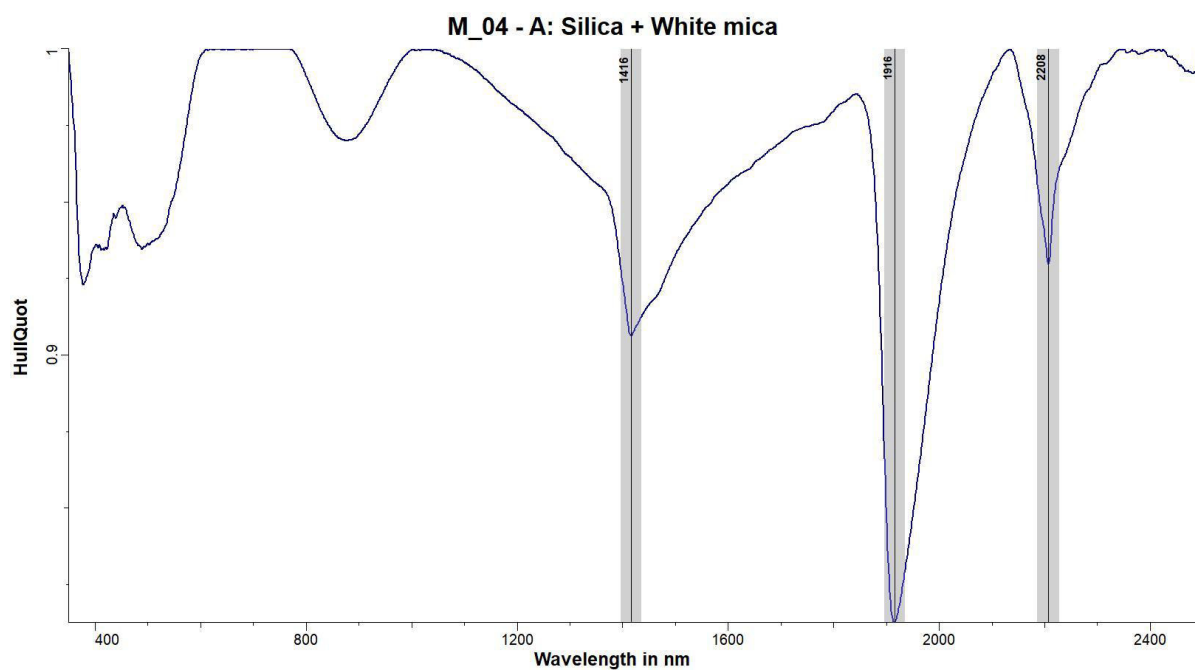
Firmas Espectrales Normalizadas

FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°1

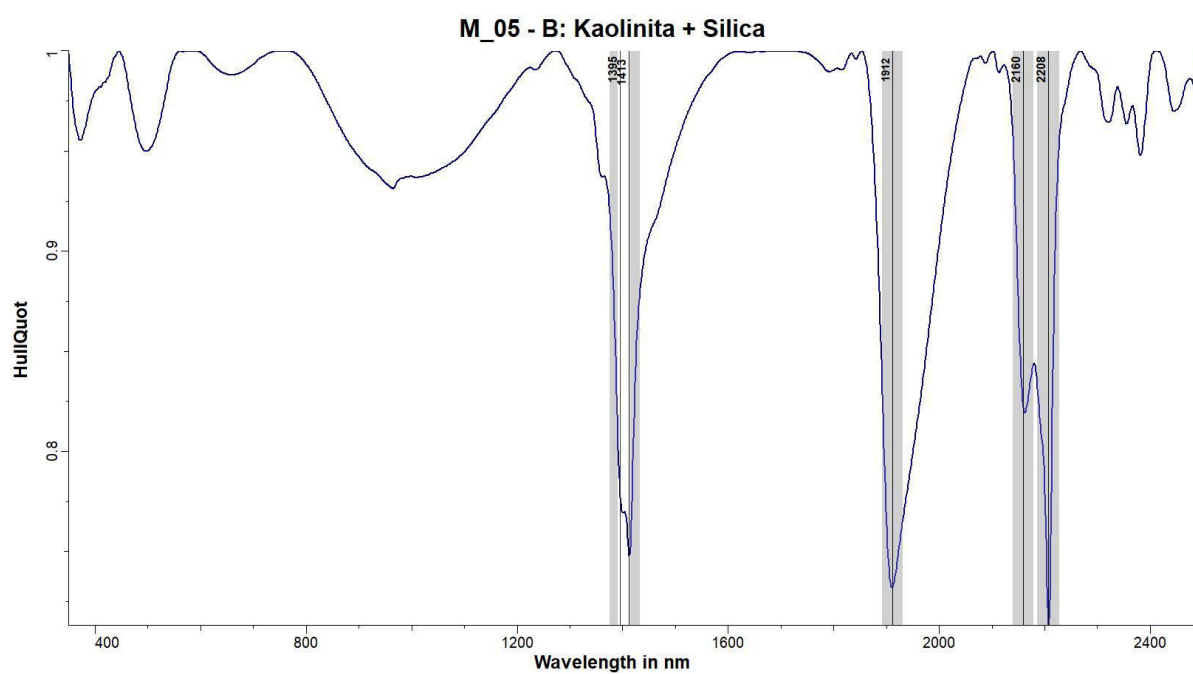
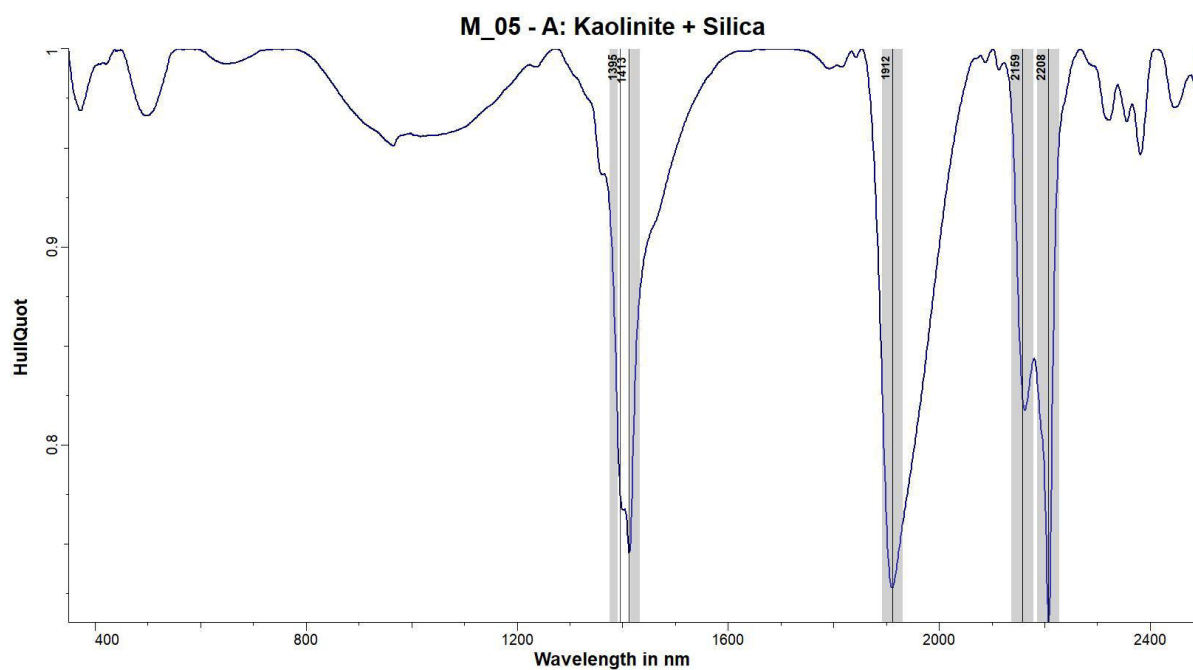
FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°2

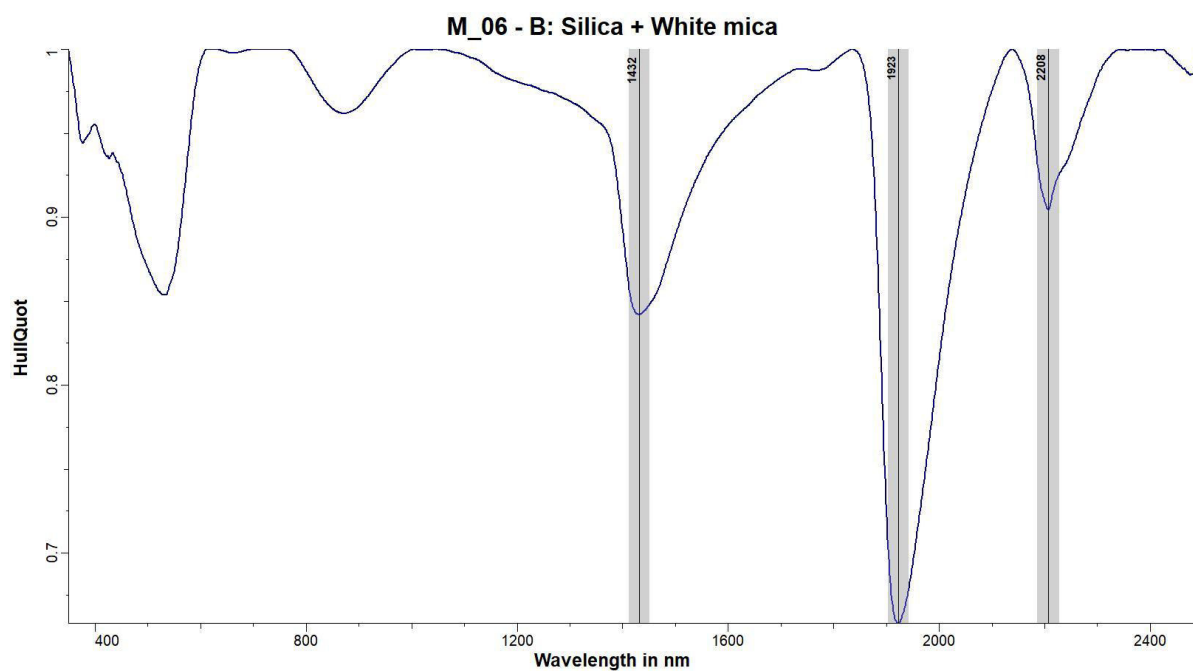
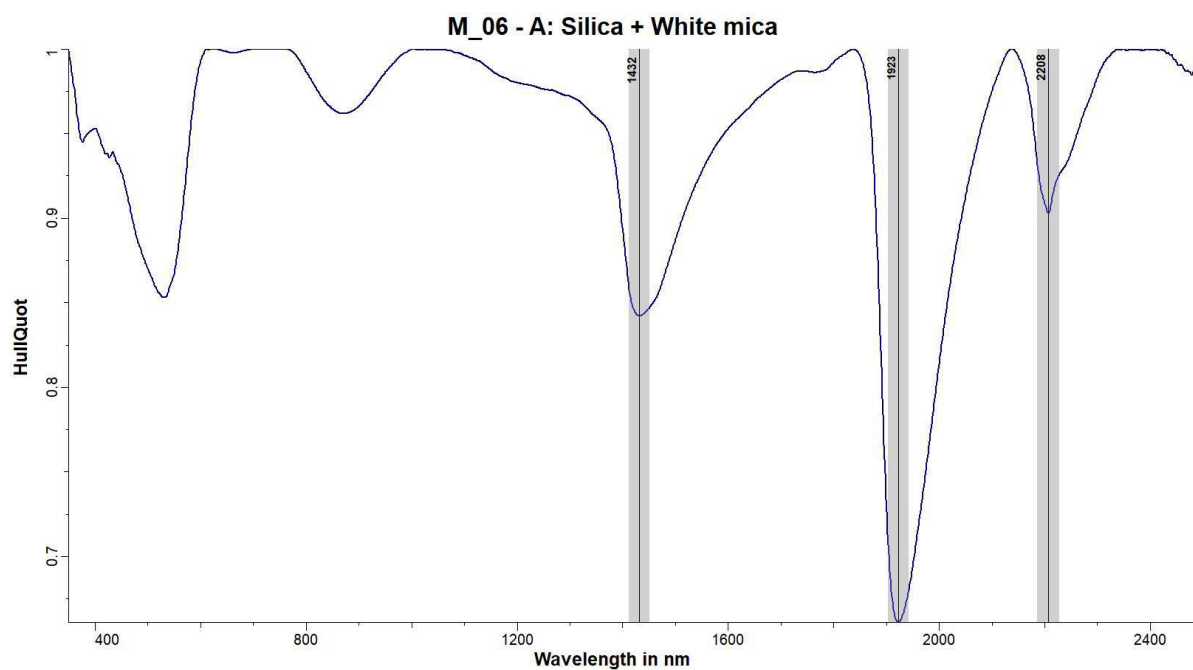
FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°3

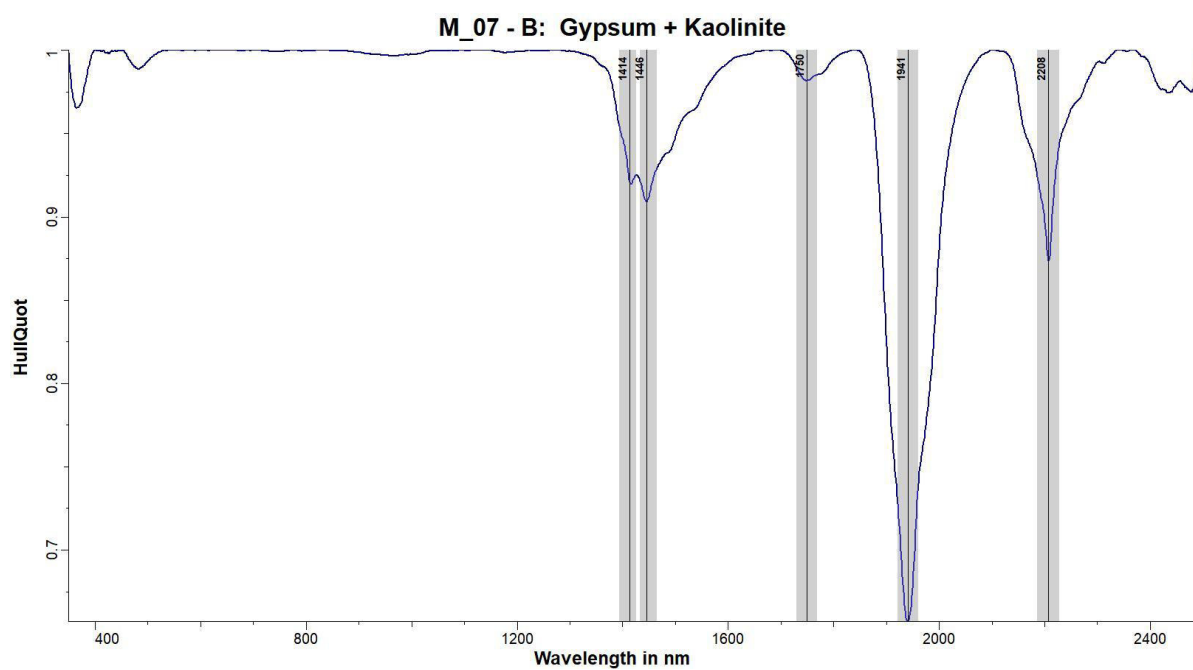
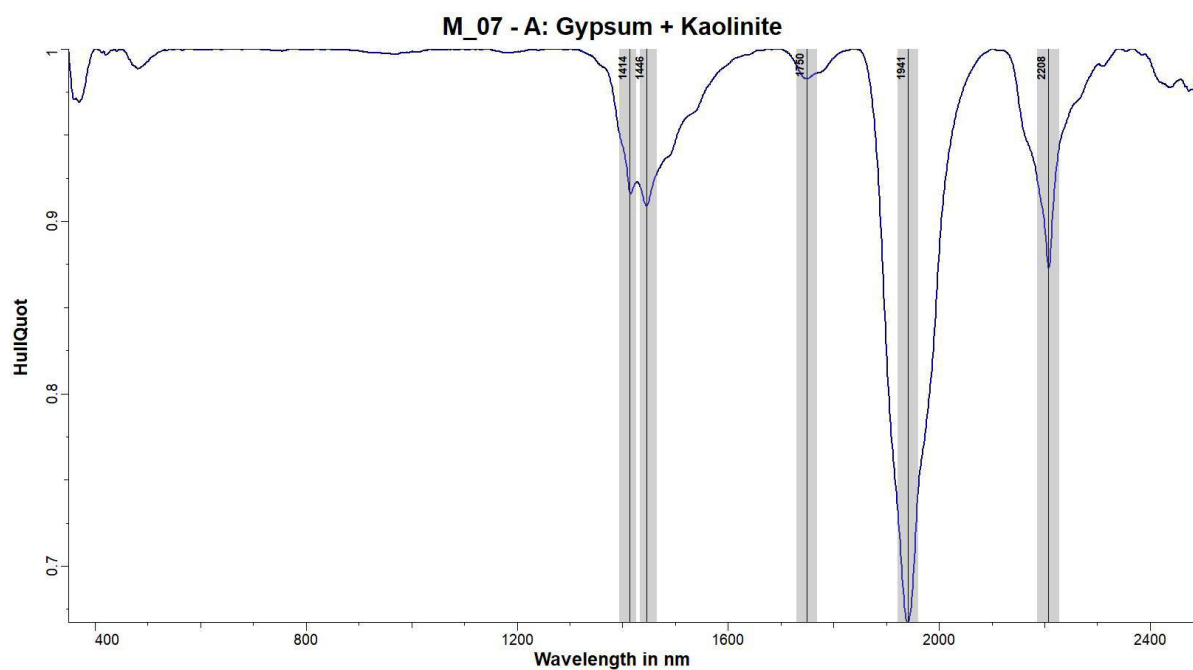


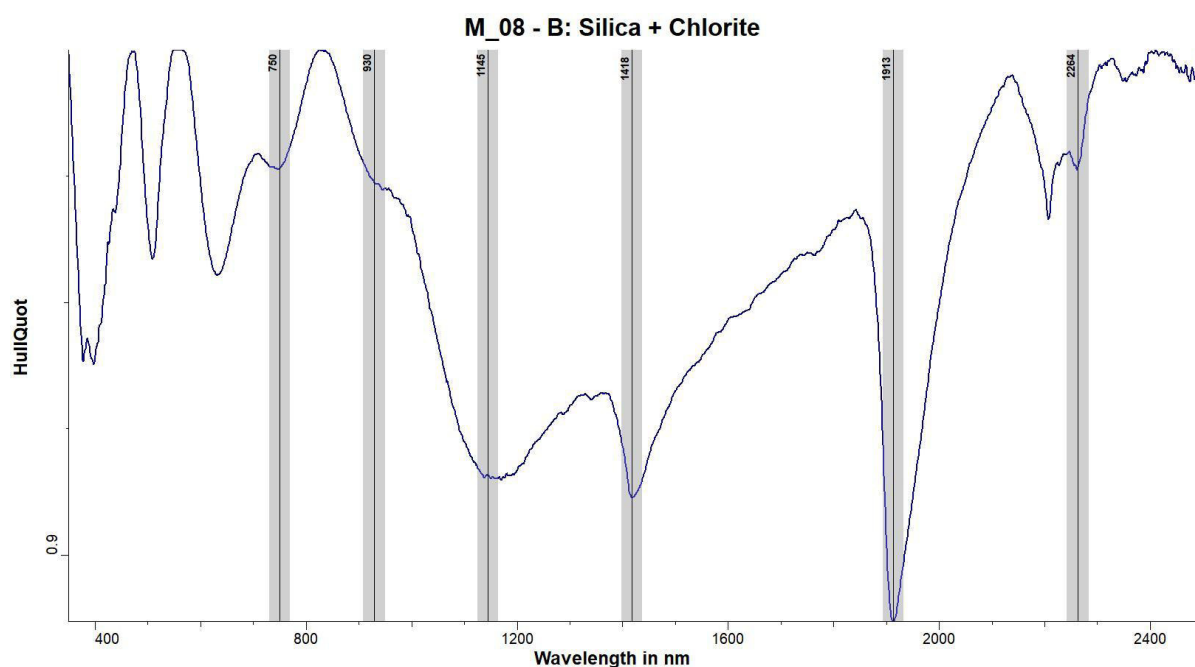
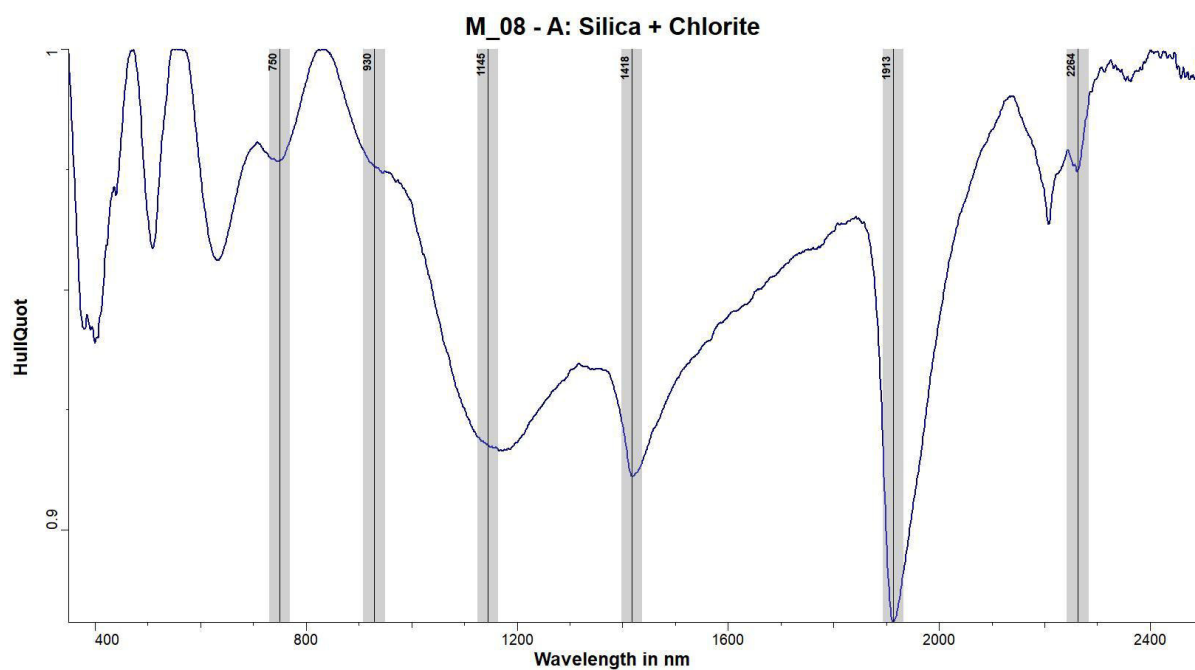
FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°4

FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°5

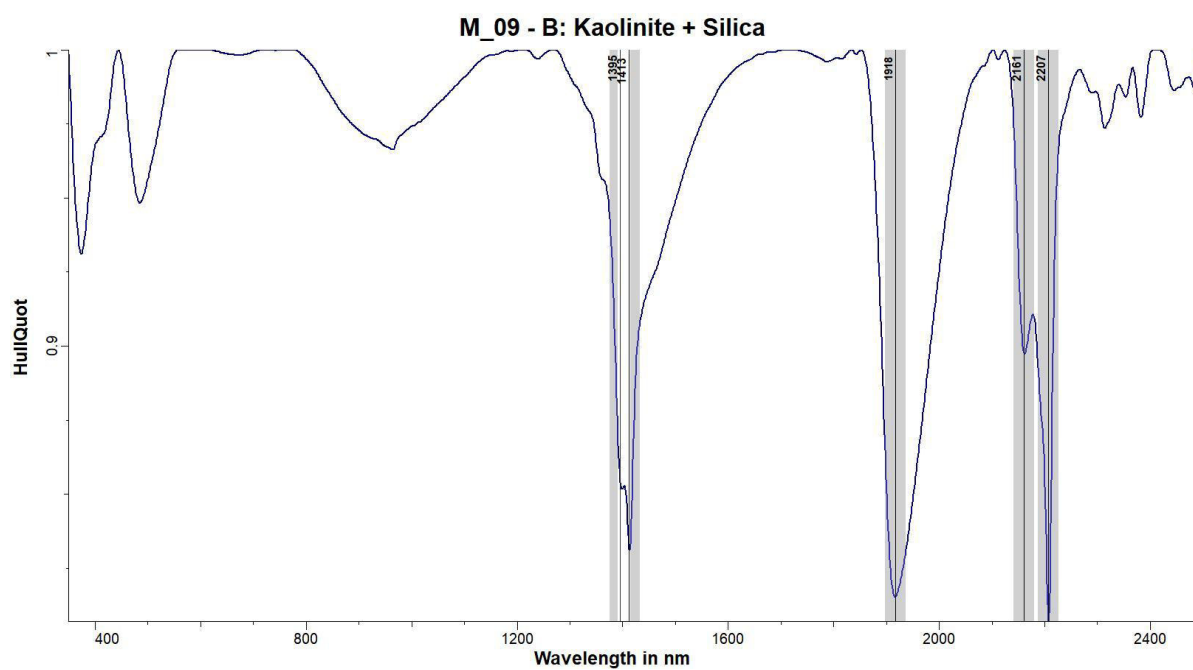
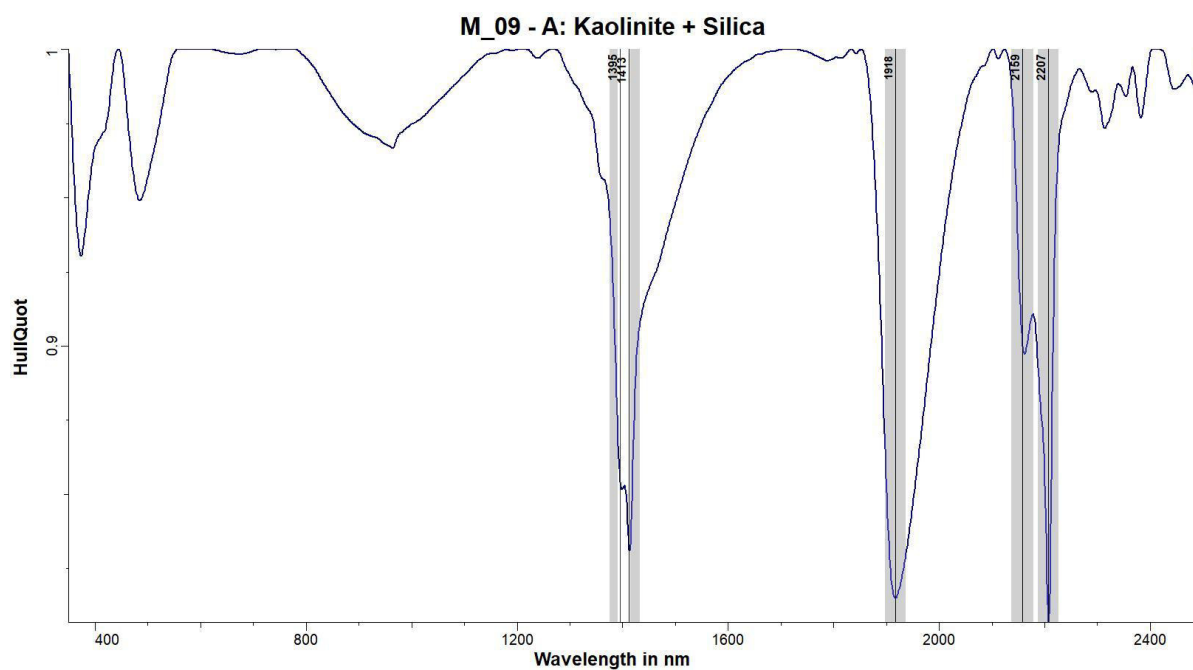


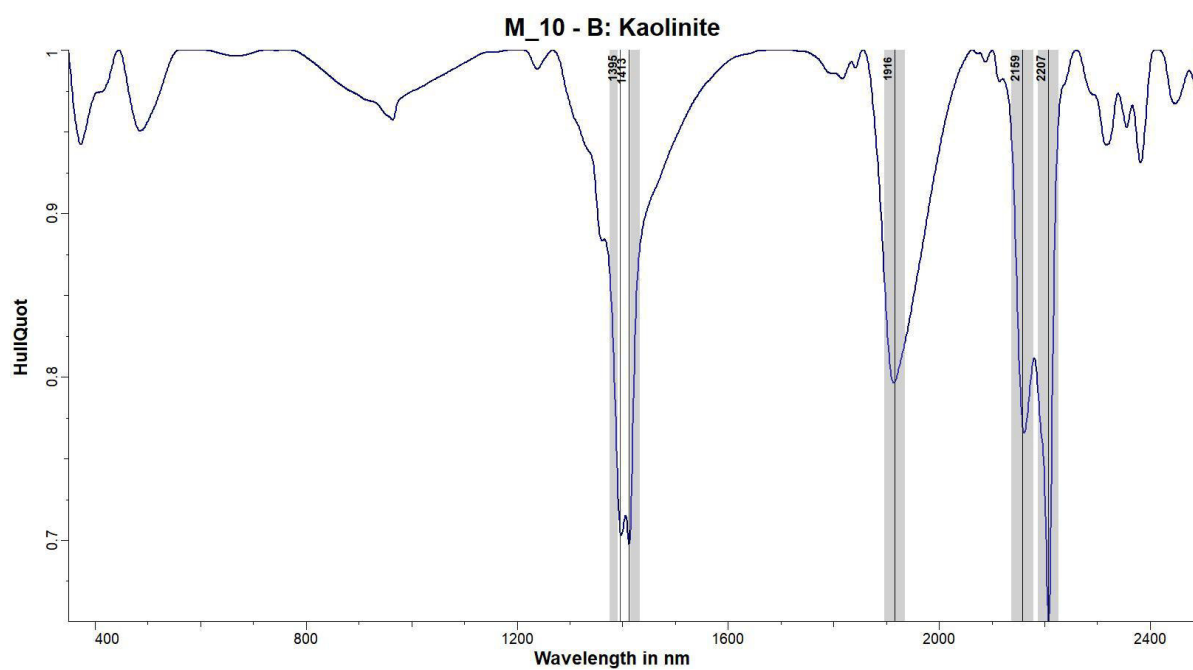
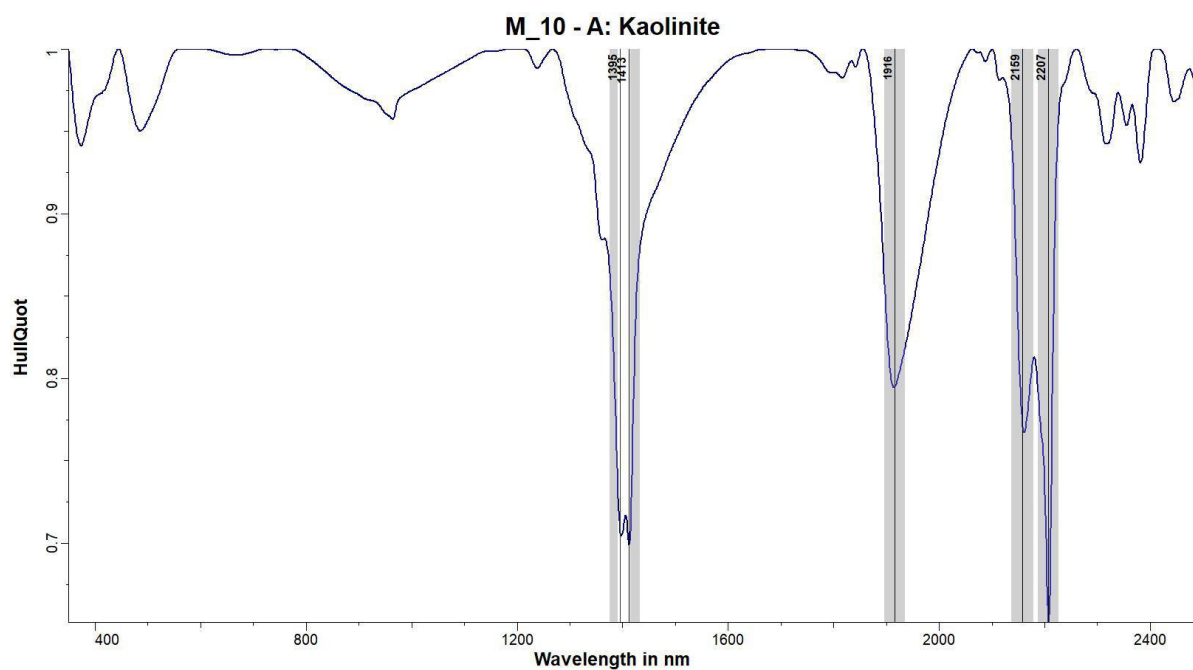
FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°6

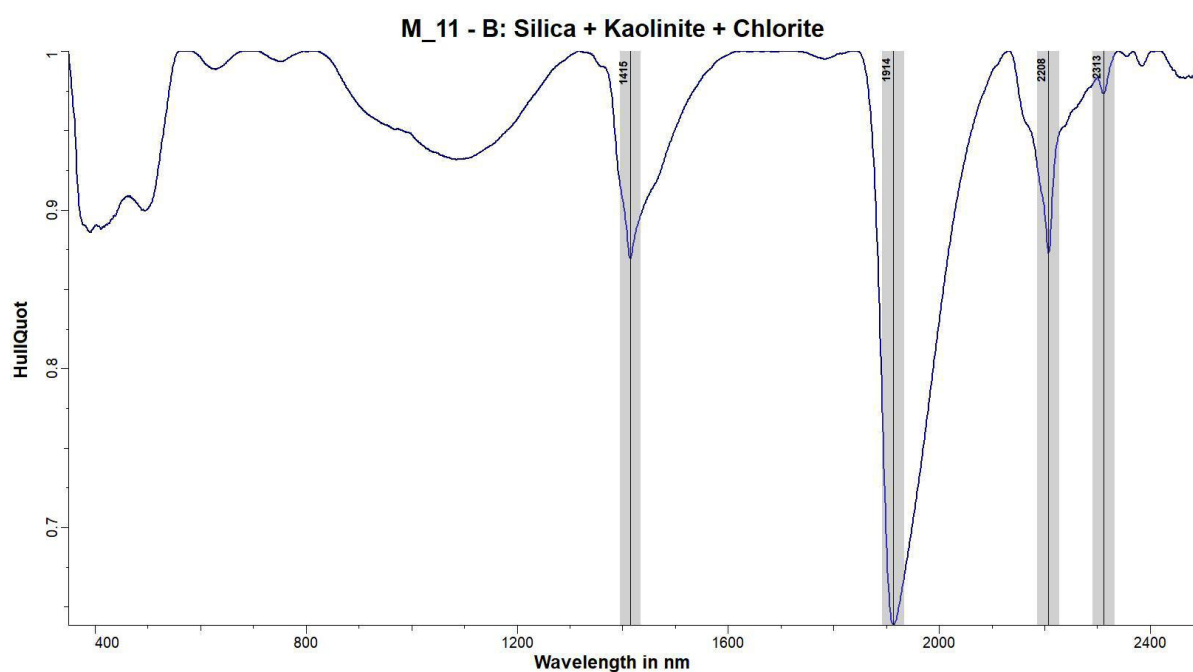
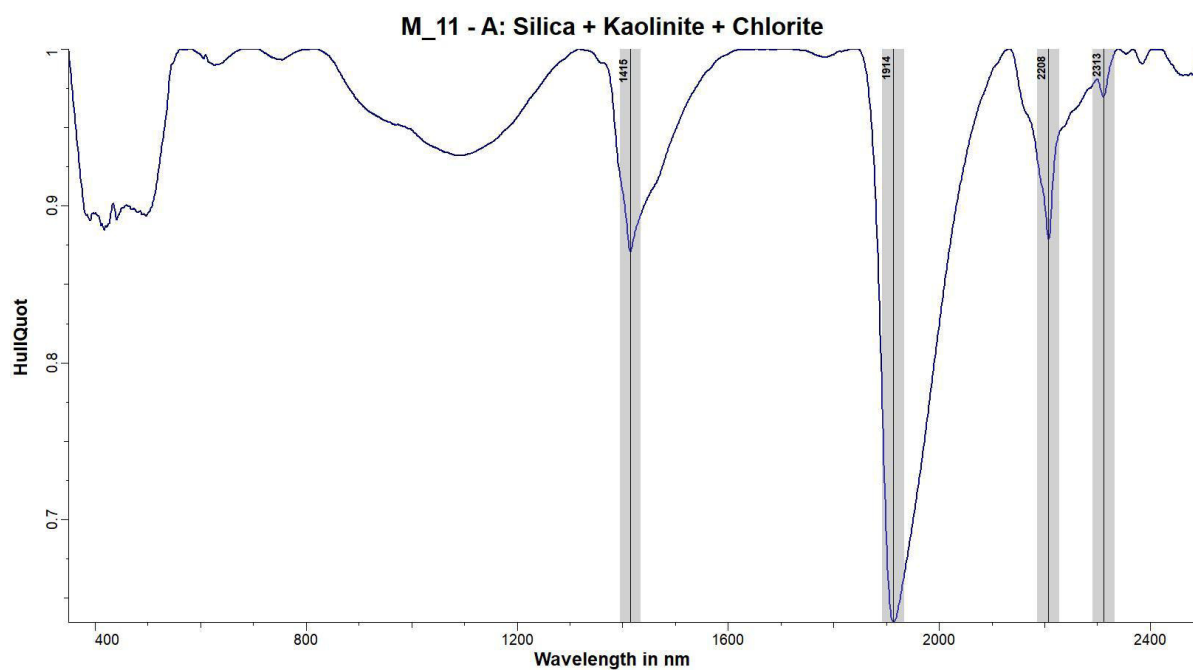
FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°7

FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°8

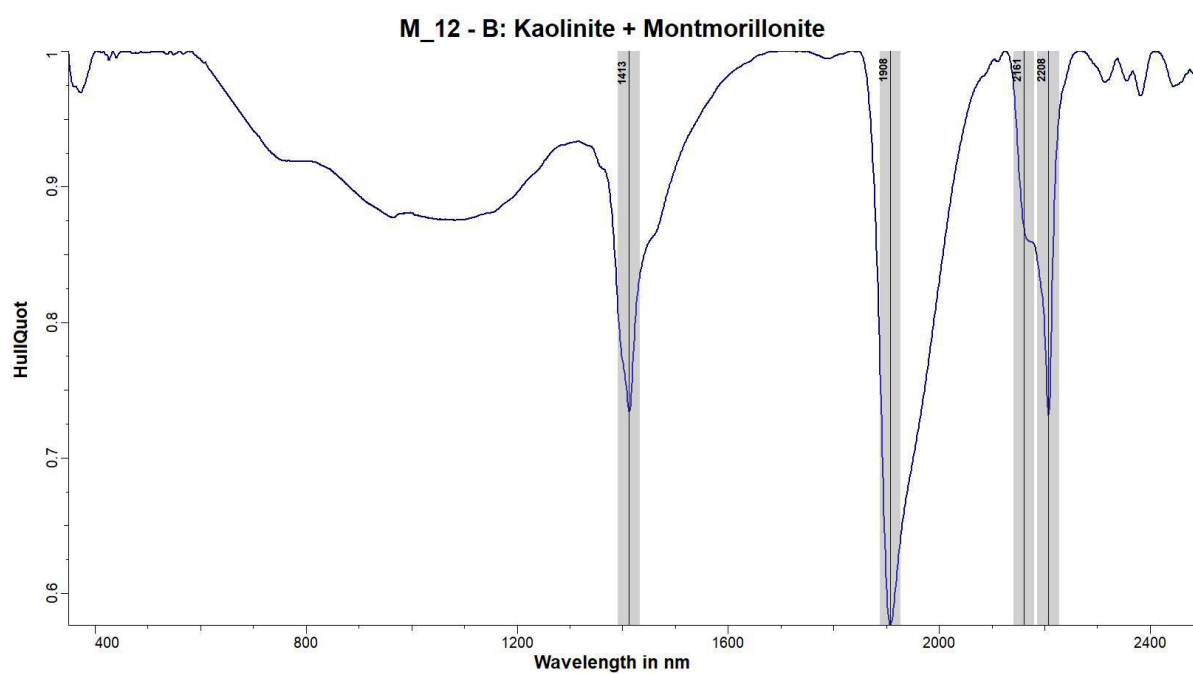
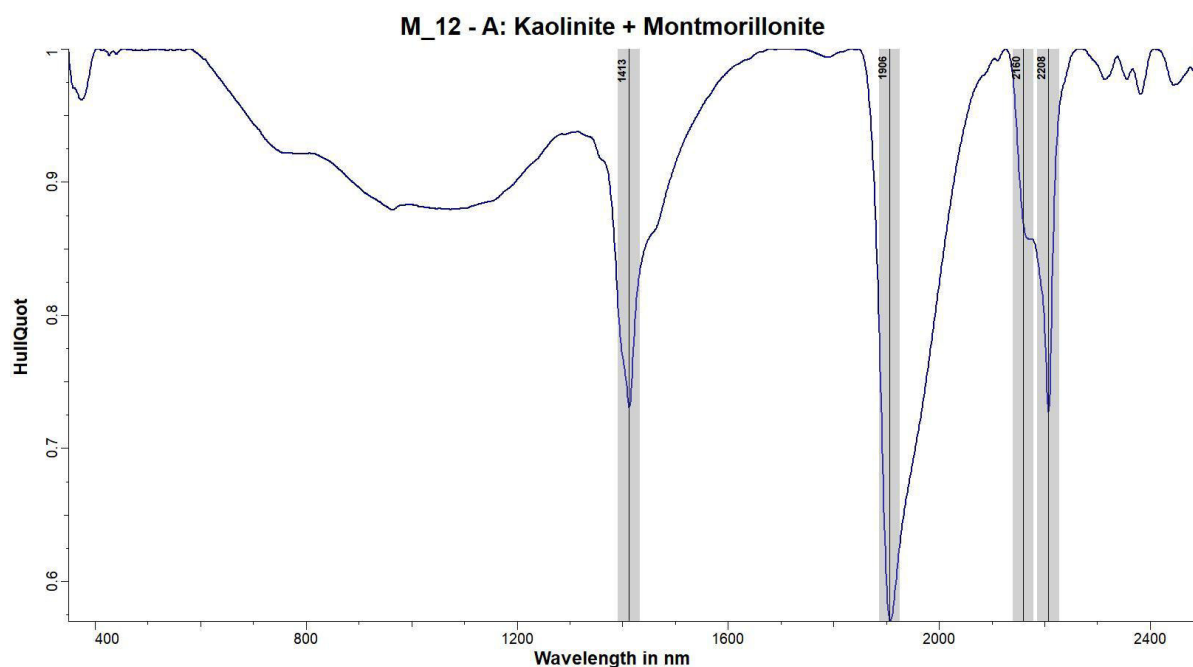
FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°9

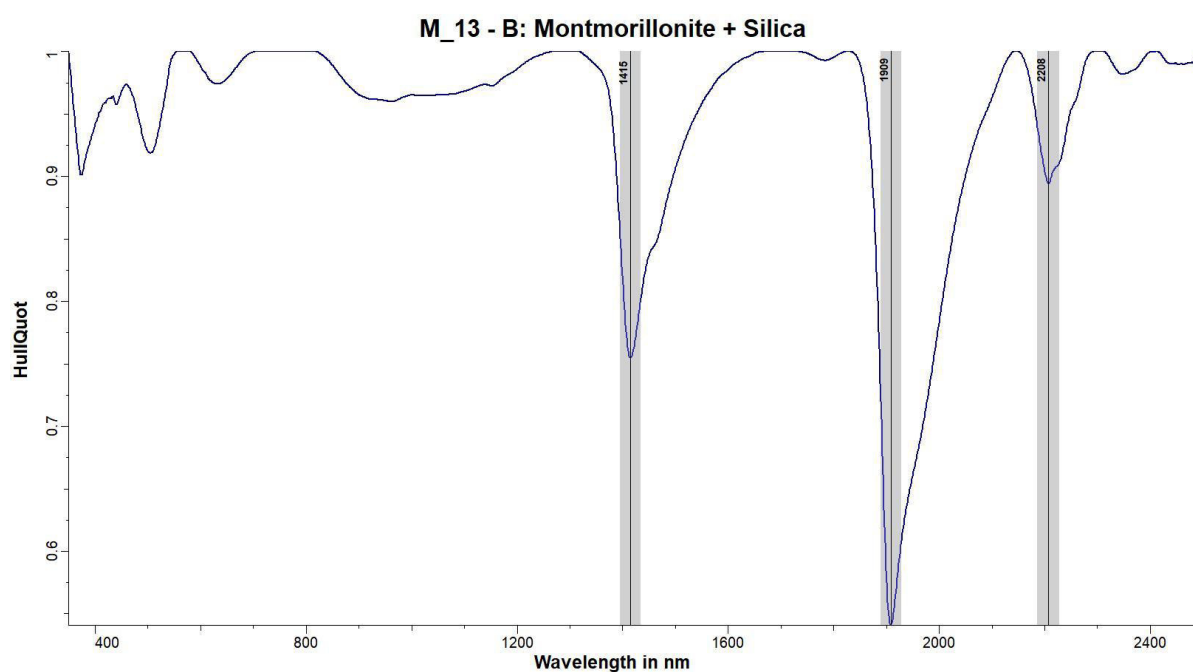
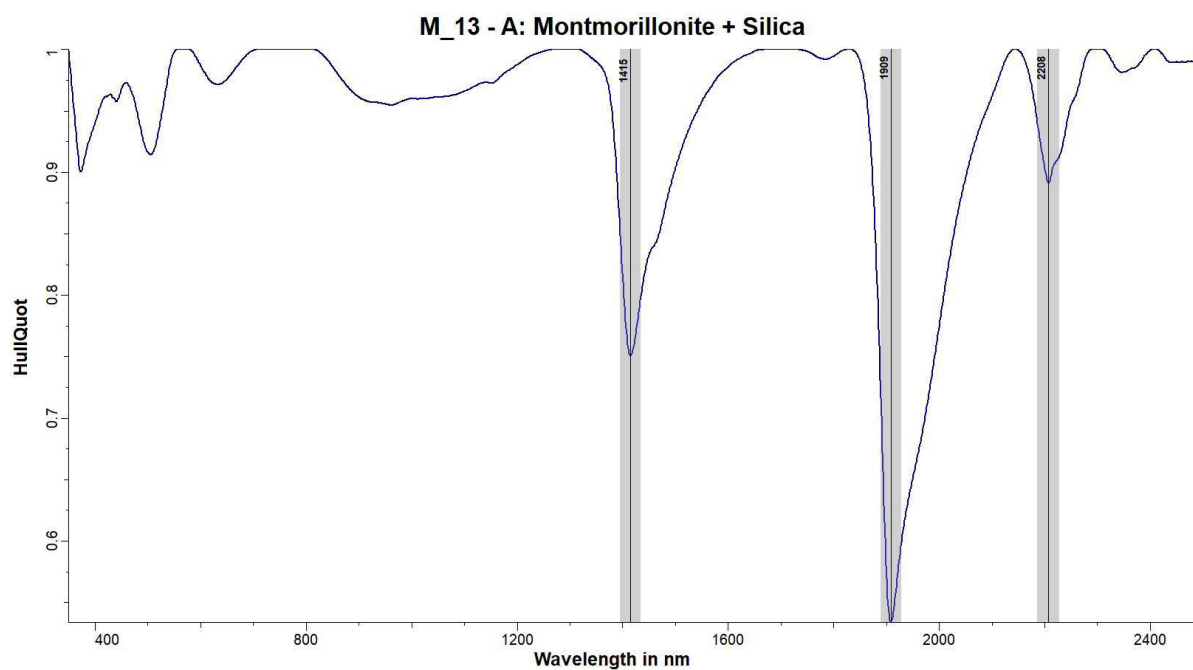


FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°10

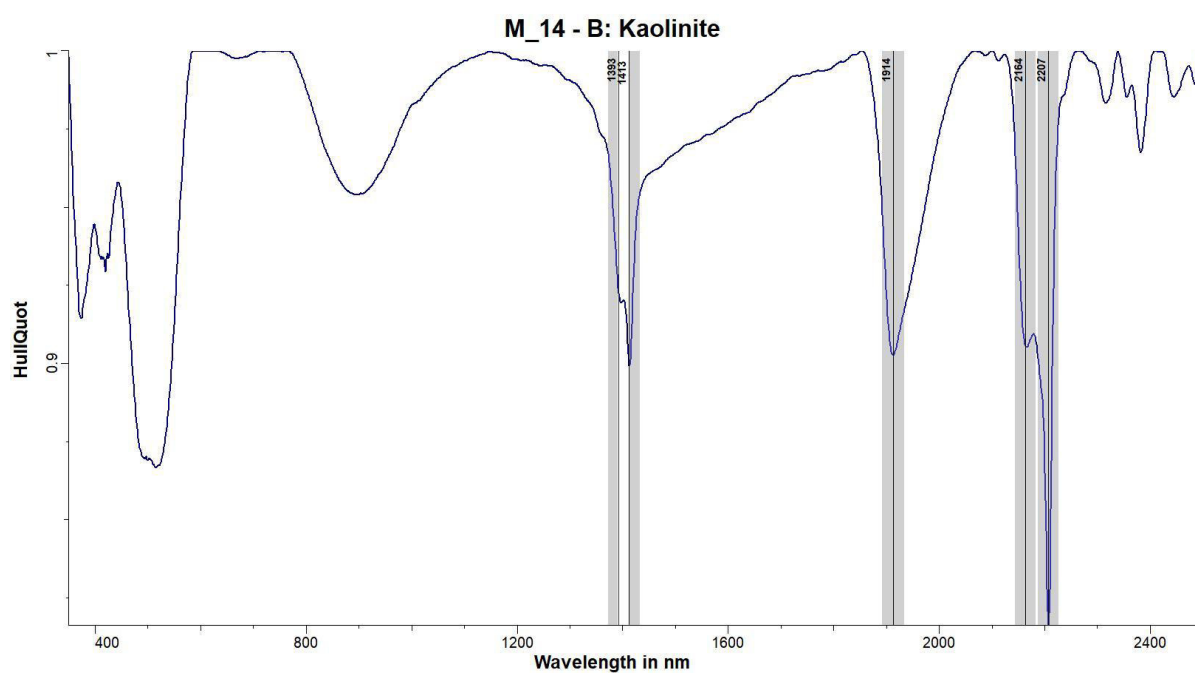
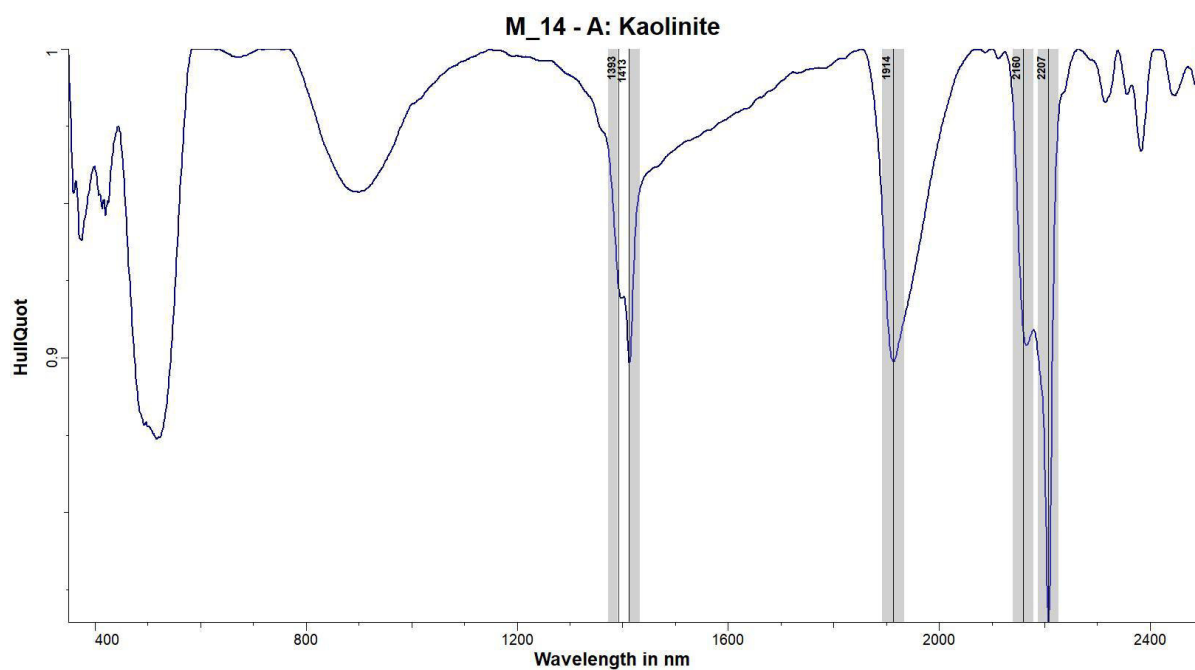
FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°11

FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°12

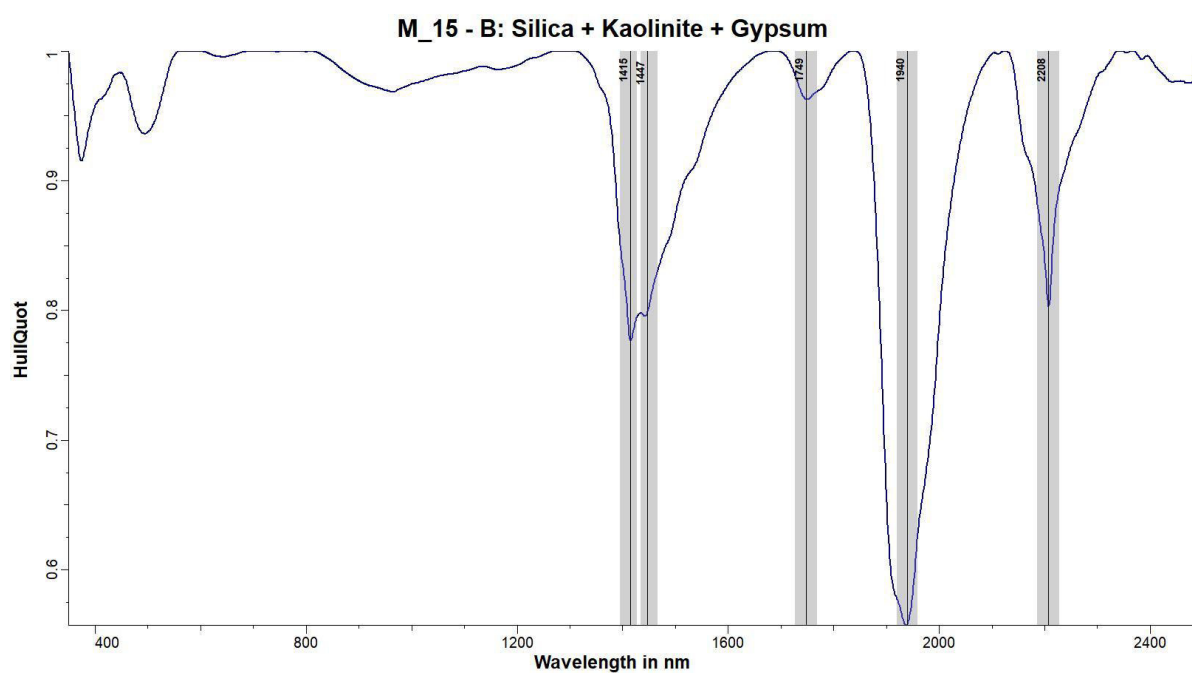
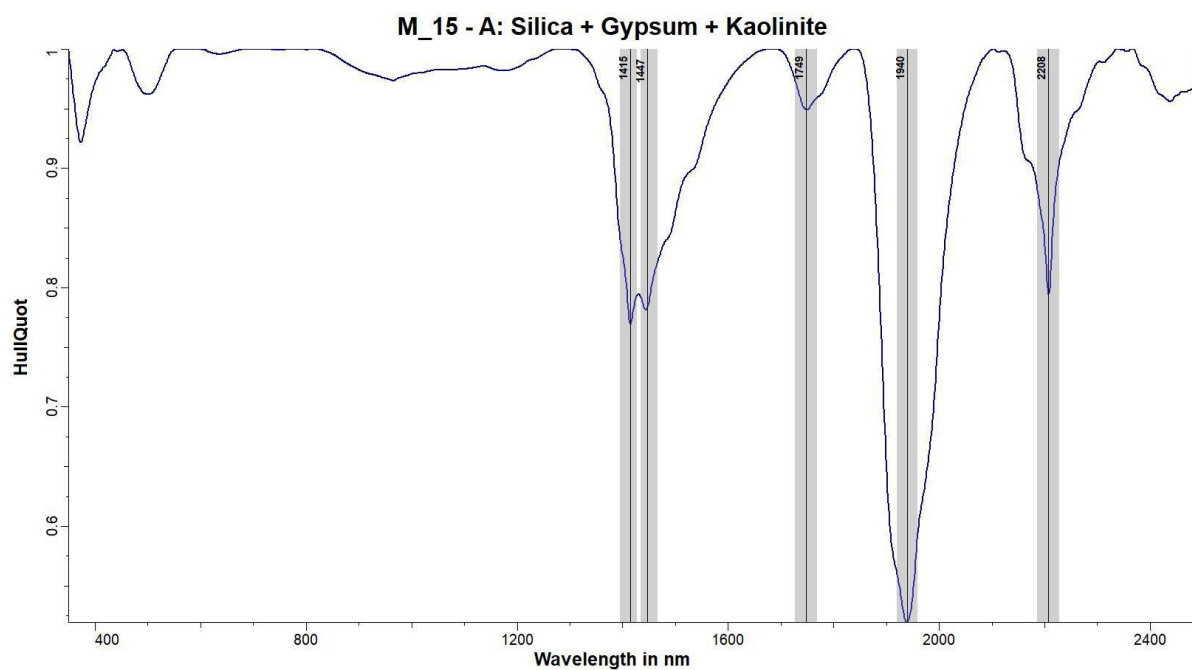


FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°13

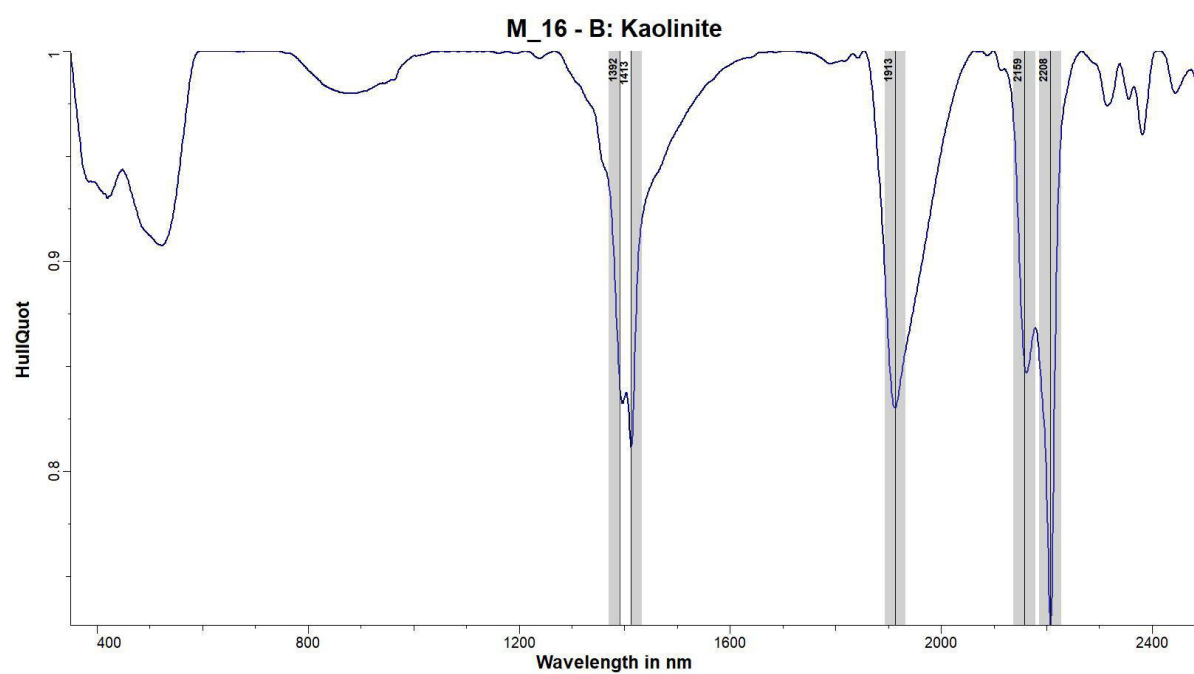
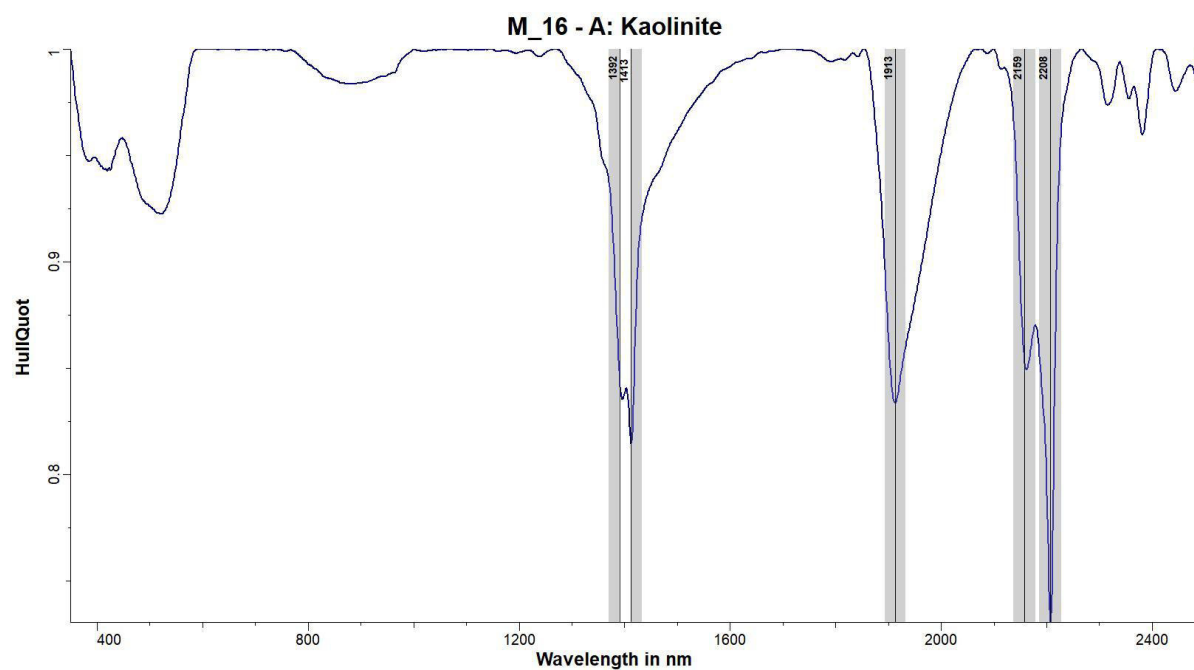
FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°14



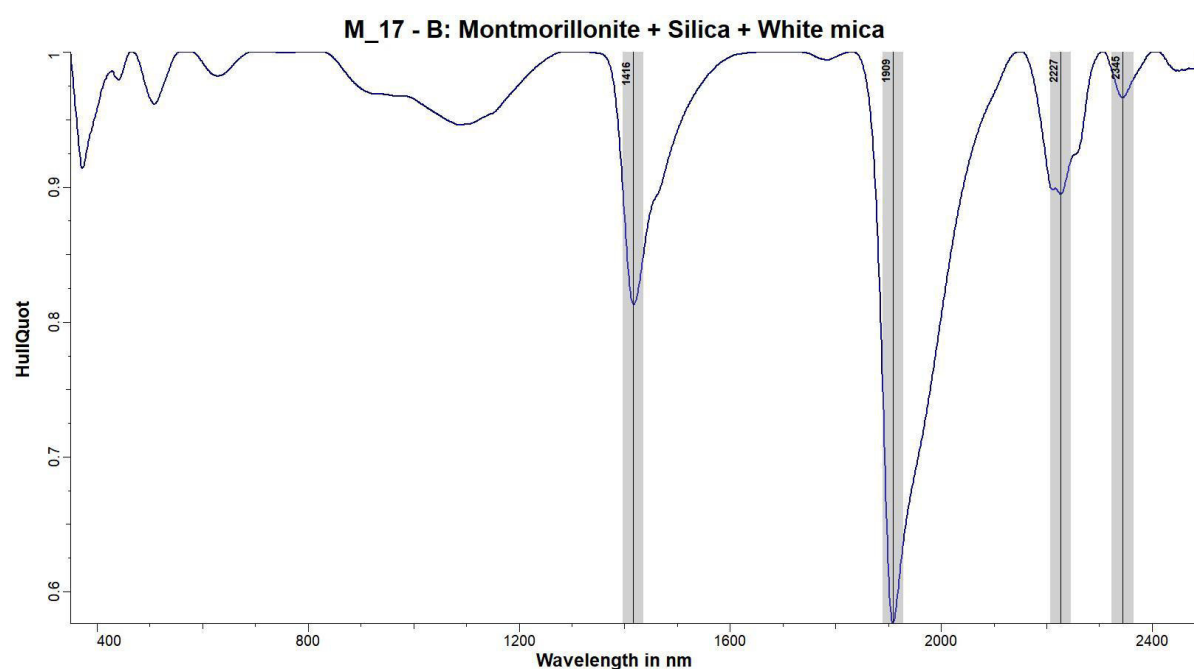
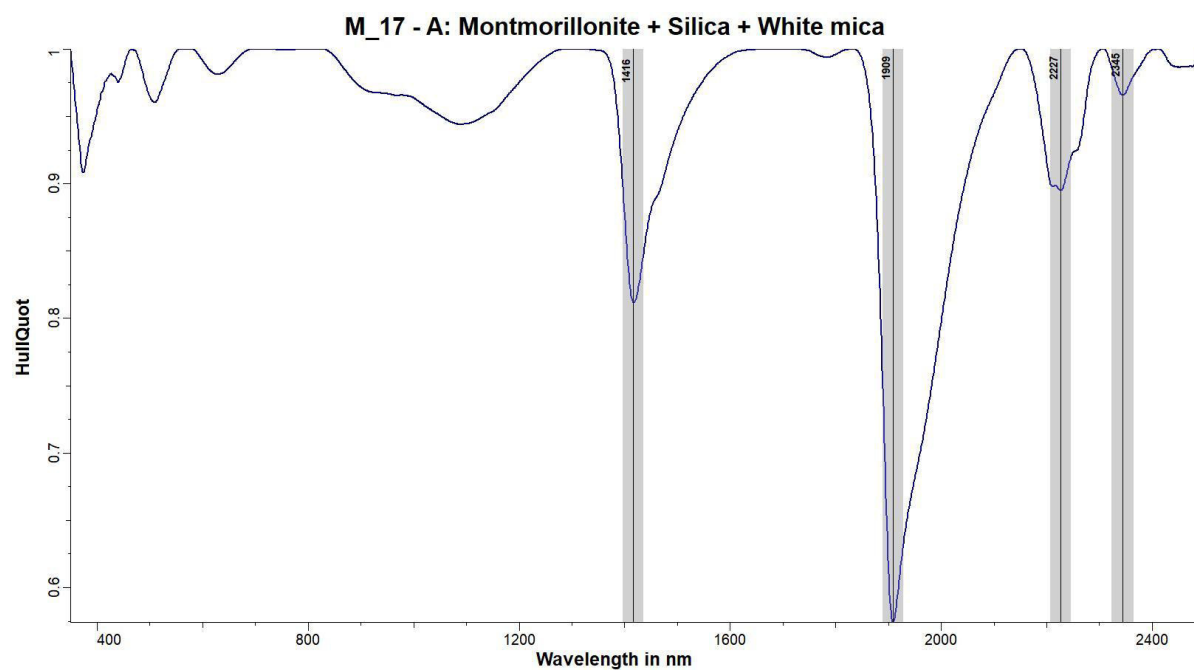
FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°15

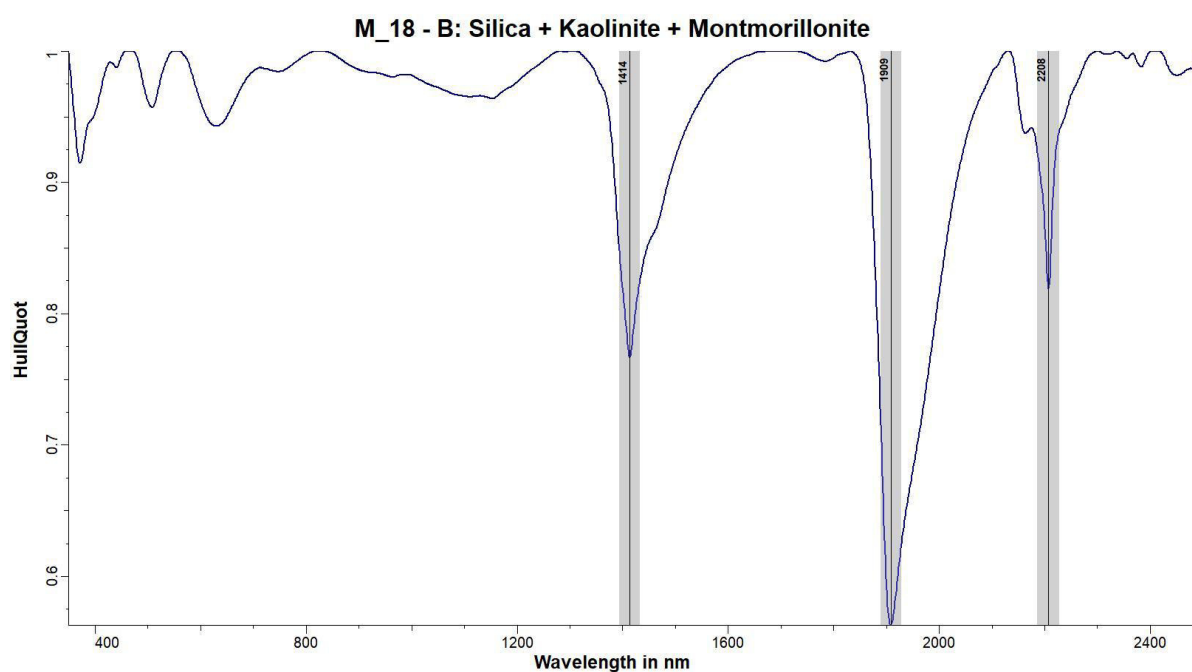
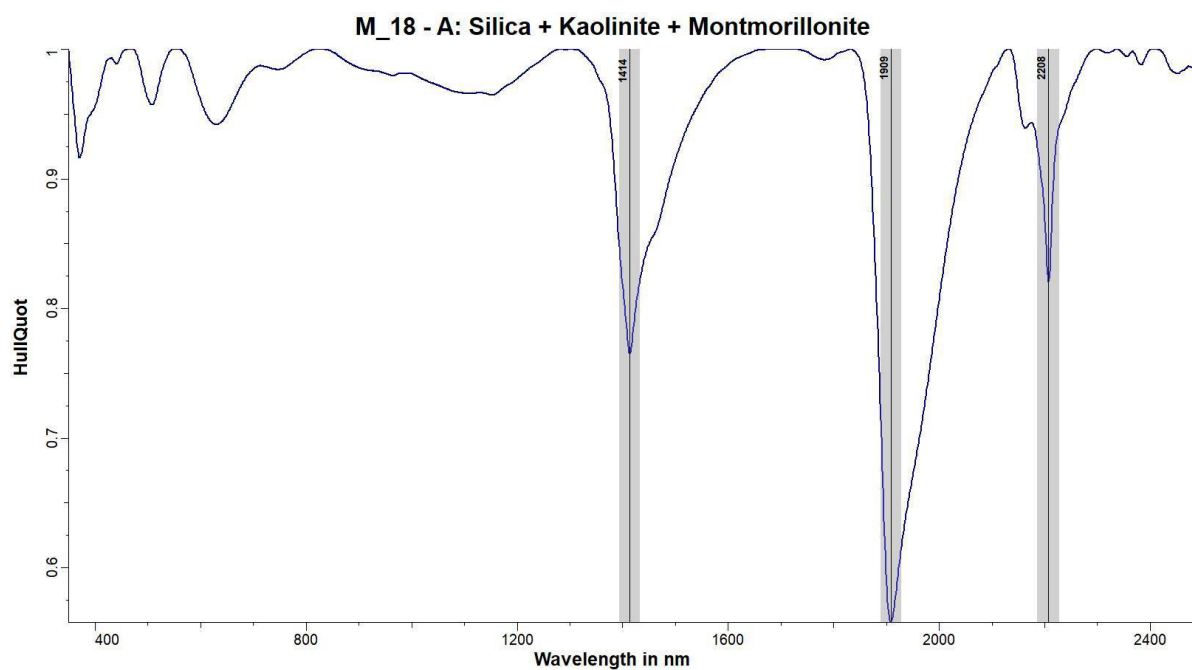


FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°16

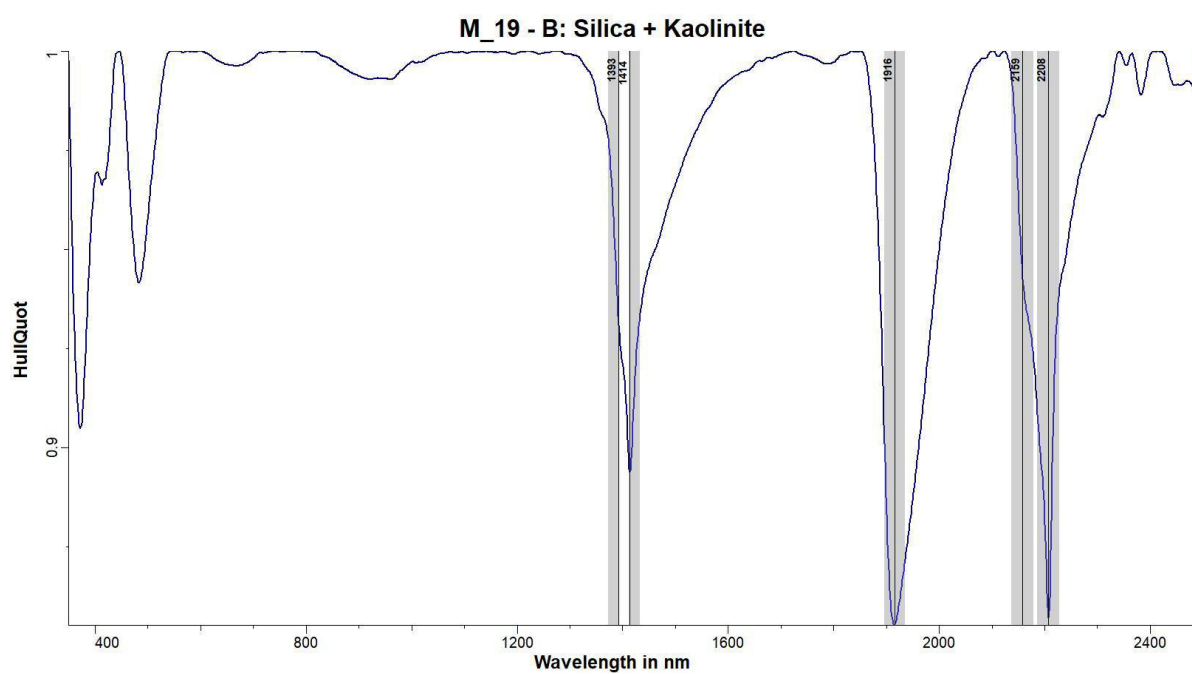
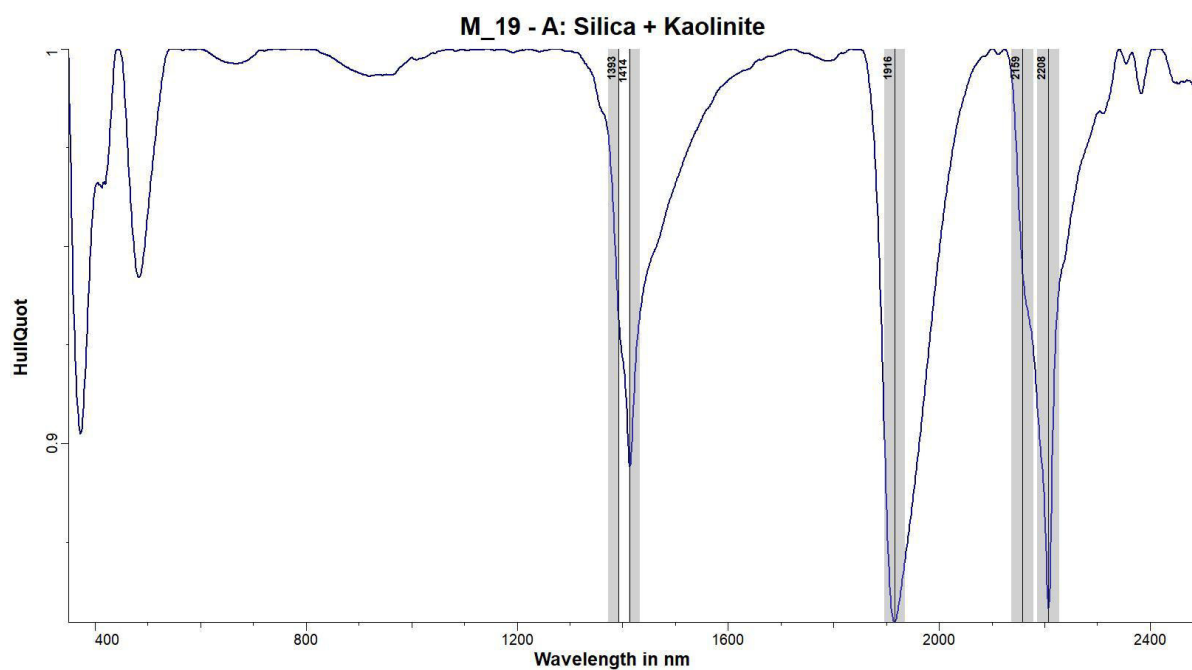


FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°17



FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°18

FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°19



FIRMAS ESPECTRALES NORMALIZADAS DE LA MUESTRA N°20

