Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Física

Identificación de zonas de alteración hidrotermal mediante imágenes satelitales ASTER en Ticaco-Susapaya

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Juan Ramón CASAS MALPARTIDA

ASESOR

Dr. David PAREJA QUISPE

Lima, Perú

2026



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

Casas, J. (2026). *Identificación de zonas de alteración hidrotermal mediante imágenes satelitales ASTER en Ticaco-Susapaya*. [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Física]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Juan Ramón Casas Malpartida
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	42076503
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-8656-8881
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	David Pareja Quispe
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	41273620
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-6904-3736
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Octavio Fashé Raymundo
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10351868
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	José Carlos Eche Llenque
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10710458
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Arnulfo Alipio Guillen Guevara
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08413331

Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.3.1. Procesamiento de Imágenes Satelitales y Modelado
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Tacna Provincia: Tarata Distrito: Ticaco-Susapaya Latitud: -17.270 Longitud: -69.960
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2026
URL de disciplinas OCDE	Geociencias, Multidisciplinar https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.01 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 CIENCIAS FÍSICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA

Siendo las 08:00horas del Sábado 27 de junio de 2026, en el Salón de Grados de la Facultad de Ciencias Físicas (Auditorio 109), bajo la Presidencia del Mg. Octavio Fashé Raymundo (Presidente), Lic. José Carlos Eche Llenque (Miembro Titular), Dr. David Pareja Quispe (Asesor) y Mg. Arnulfo Alipio Guillen Guevara (Miembro Suplente), se dio inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Trabajo de Suficiencia Profesional para optar el Título Profesional de Licenciado en Física (según Art. 45.2 de la Ley N° 30220), del bachiller:

JUAN RAMÓN, CASAS MALPARTIDA

Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado, invitó al bachiller Juan Ramón, Casas Malpartida a realizar su exposición del Trabajo de Suficiencia Profesional titulado: "Identificación de zonas de alteración hidrotermal mediante imágenes satelitales ASTER en Ticaco-Susapaya".

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente, invitó al bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, el Mg. Octavio Fashé Raymundo invitó al candidato y al público a pasar a la Sala de Sesión, para dar lectura al resultado de la deliberación. Ha obtenido la calificación de:

18	Dieciocho	Con Honores
(NÚMERO)	(LETRAS)	(MENCIÓN)

Finalmente, el presidente del Jurado, propone al consejo de la Facultad que se le declare Licenciado en Física al bachiller Juan Ramón, Casas Malpartida Siendo las ...8:31..... horas, se levanta la sesión.

Mg. Octavio Fashé Raymundo
Presidente

Lic. José Carlos Eche Llenque
Miembro Titular

Dr. David Pareja Quispe
Asesor

Mg. Arnulfo Alipio Guillen Guevara
Miembro Suplente

Scanned with CamScanner

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, David Pareja Quispe en mi condición de asesor acreditado mediante el Acuerdo del Comité de Gestión N° 019-EPF-FCF-26 del Trabajo de Suficiencia Profesional (TSP), cuyo título es **"Identificación de zonas de alteración hidrotermal mediante imágenes satelitales ASTER en Ticaco-Susapaya"**, presentado por el bachiller Juan Ramón Casas Malpartida para optar el título de Licenciado en Física, **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 6% 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 título de Licenciado en Física.

Lima, 31 de agosto de 2026



Firma del Asesor
Dr. David Pareja Quispe
DNI: 41273620

Dedicatoria

A mis padres, por su ejemplo de esfuerzo y perseverancia, y por su apoyo incondicional a lo largo de mi formación. A mi esposa, por su amor, paciencia y comprensión, por acompañarme en los momentos de mayor exigencia y por motivarme a seguir adelante cuando el camino se hacía difícil. Este logro también es de ustedes.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por la fortaleza y constancia para culminar este trabajo; a mis padres, por su apoyo incondicional, esfuerzo y consejos a lo largo de mi formación; y a mi esposa, por su amor, paciencia y comprensión durante todo el proceso. Asimismo, expreso mi agradecimiento a mi asesor David Pareja Quispe por su orientación y valiosas recomendaciones, y a los docentes y miembros del jurado por los conocimientos, observaciones y sugerencias que contribuyeron a mejorar la calidad de esta investigación; finalmente, agradezco al Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico que facilitó información para la validación del trabajo.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 12

1.1 Situación Problemática 13

1.2 Motivación 14

1.3 Justificación 14

1.4 Objetivos 14

1.4.1 Objetivo general 14

1.4.2 Objetivos específicos 15

2. MARCO TEÓRICO 16

2.1. Antecedentes de investigación 16

2.2. Bases Teóricas 18

2.2.1. Definición de la teledetección 16

2.2.2. Radiación electromagnética e interacción con la materia 19

2.2.3. Espectro electromagnético 20

2.2.4. Interacción con la materia y firmas espectrales 21

2.2.5. Procesos electrónicos y moleculares: principios de absorción espectral 22

2.2.6. Fundamentos de las alteraciones hidrotermales 23

3. ÁREA DE ESTUDIO, DATOS Y METODOLOGÍA 26

3.1. Área de estudio 26

3.1.1. Ubicación y acceso 26

3.1.2. Parámetros geodésicos y proyección cartográfica 27

3.1.3. Condiciones fisiográficas y climáticas 27

3.1.4. Contexto geológico y metalogénico 27

3.2. Datos 28

3.2.1. Imágenes satelitales ASTER 28

3.2.2. Firmas espectrales de reflectacia 29

3.3 Metodología 30

3.3.1. Corrección radiométrica 31

3.3.2. Corrección atmosférica 32

3.3.3. Generación de máscaras 33

3.3.4. Análisis de componentes principales selectivos 37

3.3.4.1. El Análisis de Componentes Principales (ACP) 38

3.3.4.2. Aplicación del Análisis de Componentes Principales Selectivos (ACPS) 39

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES 43

4.1. Aplicación del ACPS 43

4.2. Validación de resultados 50

4.2.1. Protocolo de medición de datos 51

4.2.2. Zonas de validación espectral 52

4.3. Discusión de resultados 56

5. CONCLUSIONES 58

6. RECOMENDACIONES 59

Referencias 60

Apéndice A. Validación de los resultados del Análisis de Componentes Principales 66

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Especificaciones geográficas del área de estudio……..27

Tabla 3.2. Especificaciones técnicas del sensor ASTER, organizadas por subsistemas (VNIR, SWIR y TIR)…….28

Tabla 3.3. Metadatos de la imagen ASTER empleada en el estudio……...29

Tabla 3.4. Especificaciones del FieldSpec 4 Hi-Res…….30

Tabla 3.5. Subgrupos de bandas para la determinación de tipos de alteración ASTER……42

Tabla 4.1. Autovalores y autovectores resultantes del ACPS……...43

Tabla 4.2. Resumen de los componentes principales (CP) seleccionados según el ensamble mineralógico……..46

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Elementos y el flujo de energía en el proceso de adquisición de datos por teledetección……..17

Figura 2.2. Propagación de la energía electromagnética……19

Figura 2.3. Espectro electromagnético de la radiación en función de la longitud de onda……..20

Figura 2.4. Esquema simplificado de la interacción de la energía electromagnética con la materia…….. 22

Figura 2.5. Esquema de zonificación de las alteraciones hidrotermales…….25

Figura 3.1. Mapa geográfico del área de estudio, donde el rectángulo rojo indica la delimitación espacial del área analizada…….26

Figura 3.2. Espectrorradiómetro FieldSpec 4 Hi-Res……29

Figura 3.3. Diagrama de flujo de la metodología utilizada para el procesamiento de datos ASTER…….....31

Figura 3.4. Imagen del NDVI (izquierda); imagen clasificada del NDVI (derecha)……..…....34

Figura 3.5. Imagen del NDSI (izquierda); imagen clasificada del NDSI (derecha)……....35

Figura 3.6. Imagen del NDWI (izquierda); imagen clasificada del NDWI (derecha)…….36

Figura 3.7. Máscaras de NDVI (izquierda), NDSI (centrado) y NDWI (derecha) y su respectiva integración (inferior)…….37

Figura 3.8. Rasgo espectral característico al ensamble de minerales Alunita/Caolinita/Dickita ……...40

Figura 3.9. Rasgo espectral característico al ensamble de minerales Illita/Muscovita/Esmectita ……...41

Figura 3.10. Rasgo espectral característico al ensamble de minerales Clorita/Epidota/Calcita ……...42

Figura 4.1. Distribución de eigenvalores del Análisis de Componentes Principales (izquierda) y diferencia entre eigenvalores (derecha)……..44

Figura 4.2. Imágenes resultantes del Análisis de Componentes Principales Selectivos……....47

Figura 4.3. Distribución espacial de ensambles de minerales asociados a alteraciones hidrotermales…….48

Figura 4.4. Mapa integrado de ensambles de minerales asociados a alteraciones hidrotermales ……...49

Figura 4.5. Distribución de los puntos de toma de firmas espectrales y medidas GNSS……..51

Figura 4.6. Secuencia metodológica del trabajo de validación in situ……52

Figura 4.7. Esquema metodológico de escalamiento espacial……53

Figura 4.8. Comparación de firmas espectrales de campo con imagen ASTER……54

Figura 4.9. Correlación de datos de reflectancia ASTER-FieldSpec 4……..55

Figura A.1. Distribución espacial de las mediciones espectrales in situ para la Zona 1……...66

Figura A.2. Imagen panorámica correspondiente a la Zona 1 del área de estudio…….67

Figura A.3. Comparación de firmas espectrales de campo con imagen ASTER para la Zona 1 ……...67

Figura A.4. Distribución espacial de las mediciones espectrales in situ para la Zona 2……68

Figura A.5. Imagen panorámica correspondiente a la Zona 2 del área de estudio…….69

Figura A.6. Comparación de firmas espectrales de campo con imagen ASTER para la Zona 2 ……..69

Figura A.7. Distribución espacial de las mediciones espectrales in situ para la Zona 3……...70

Figura A.8. Imagen panorámica correspondiente a la Zona 3 del área de estudio…….71

Figura A.9. Comparación de firmas espectrales de campo con imagen ASTER para la Zona 3 ……...……71

Figura A.10. Distribución espacial de las mediciones espectrales in situ para la Zona 4……...72

Figura A.11. Imagen panorámica correspondiente a la Zona 4 del área de estudio……73

Figura A.12. Comparación de firmas espectrales de campo con imagen ASTER para la Zona 4 ……...……73

RESUMEN

El desarrollo de la teledetección satelital ha impulsado avances significativos en la prospección minera en el Perú, al permitir la identificación de áreas con alta probabilidad de presencia de minerales mediante el procesamiento digital de imágenes. En ese sentido, el presente trabajo tiene como objetivo identificar zonas de alteración hidrotermal en un sector de los distritos de Ticaco y Susapaya, Tacna, seleccionado por su contexto geológico favorable y su potencial para la exploración. La metodología utilizada comprende el uso de datos ASTER, iniciando con un preprocesamiento que incluye correcciones radiométricas y atmosféricas. Posteriormente, se aplicó el Análisis de Componentes Principales Selectivos, orientado a resaltar los rasgos espectrales de los ensambles minerales asociados a los principales tipos de alteración. Los resultados, presentados como mapas temáticos de cartografía espectral, permitieron identificar la distribución espacial de zonas con mayor probabilidad de presencia de minerales, facilitando la delimitación de áreas prioritarias para futuros proyectos de exploración. Asimismo, la validación mediante verificaciones de campo evaluó la coherencia espacial y espectral a través de la toma de firmas con un espectrómetro de campo. Los hallazgos indican que el procesamiento de imágenes ASTER constituye una herramienta de alta confiabilidad, permitiendo delimitar eficazmente zonas de alteración argílica, fílica y propilítica vinculadas a depósitos de cobre y oro. Se concluye que el uso de esta base de datos optimiza los recursos económicos y operativos frente a metodologías tradicionales, lo cual facilita focalizar la exploración en áreas de mayor potencial geológico.

Palabras clave: Teledetección, ASTER, alteraciones hidrotermales, prospección minera, Análisis de Componentes Principales Selectivo.

ABSTRACT

The development of satellite remote sensing has driven significant advances in mineral prospecting in Peru, enabling the identification of areas with a high probability of mineral occurrence through digital image processing. In this context, the present study aims to identify hydrothermal alteration zones in a sector of the Ticaco and Susapaya districts, Tacna, selected for its favorable geological setting and exploration potential. The methodology involves the use of ASTER data, beginning with pre-processing that includes radiometric and atmospheric corrections. Subsequently, Selective Principal Component Analysis (SPCA) was applied to highlight the spectral features of the mineral assemblages associated with the main alteration types. The results, presented as thematic spectral maps, allowed for the identification of the spatial distribution of zones with a higher probability of mineral presence, facilitating the delineation of priority areas for future exploration projects. Furthermore, validation through field verification assesses spatial and spectral coherence by acquiring signatures with a field spectrometer. The findings indicate that ASTER image processing constitutes a highly reliable tool, effectively allowing the delineation of argillic, phyllic, and propylitic alteration zones linked to copper and gold deposits. It is concluded that the use of this dataset optimizes economic and operational resources compared to traditional methodologies, thereby facilitating the focus of exploration on areas with greater geological potential.

Keywords: Remote sensing, ASTER, hydrothermal alterations, mineral exploration, Selective Principal Component Analysis.

1. INTRODUCCIÓN

Las alteraciones hidrotermales se definen como la interacción mineralógica y química de una roca con fluidos a altas temperaturas; dicho proceso origina la formación de minerales secundarios como arcillas, sulfatos, micas, silicatos y carbonatos (Pirajno, 2009). Estos minerales secundarios suelen precipitar junto a elementos de interés económico, como el oro, la plata y el cobre. Dichos minerales presentan firmas espectrales únicas, derivadas de su interacción con la radiación electromagnética (Hecker et al., 2019).

Estas firmas espectrales pueden ser identificadas por el sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), debido a sus nueve bandas espectrales en las regiones VNIR (*Visible and Near-Infrared*) y SWIR (*Short-Wave Infrared*) del espectro electromagnético (Yamaguchi et al., 1998). Estas características permiten reconocer rasgos espectrales de los minerales asociados a las alteraciones hidrotermales y facilita la discriminación mineralógica en estudios de prospección minera *(Di Tommaso & Rubinstein, 2007; Rowan et al., 2006)*. Esta capacidad espectral representa una ventaja de ASTER frente a sensores como Landsat o Sentinel-2, cuya resolución espectral limita la identificación de minerales de alteración.

Uno de los métodos que permite resaltar estos rasgos espectrales es el Análisis de Componentes Principales (ACP) (Jr. & Kwarteng, 1989). Este método aplicado a las imágenes ASTER, permite reducir la dimensionalidad de las bandas espectrales para eliminar la información redundante, generando un grupo menor de variables independientes. Así, los resultados revelan detalles espectrales de minerales que normalmente permanecen ocultos.

Una variante ampliamente utilizada es el Análisis de Componentes Principales Selectivos (ACPS), conocido como la técnica Crosta (A. P. and M. J. M. Crosta, 1989). Esta técnica utiliza subconjuntos selectivos de bandas (típicamente cuatro), con el fin de concentrar la información

espectral de grupo mineralógico específico en un único componente principal, facilitando su identificación.

Mediante el ACPS es posible destacar patrones espectrales asociados a distintos tipos de alteración hidrotermal en la región SWIR, como la alteración argílica (alunita, caolinita y dickita), fílica (illita, muscovita y esmectita) y propilítica (clorita, epidota y calcita) *(Crosta et al., 2003; Mohamed El-Desoky et al., 2021; Moore et al., 2008; Pour & Hashim, 2011a)*.

Finalmente, la prospección minera se optimiza al vincular las firmas espectrales únicas de los minerales de alteración hidrotermal con datos del sensor ASTER en la región SWIR. Para maximizar esta capacidad de discriminación, el ACPS procesa subconjuntos específicos de bandas para aislar y cartografiar los ensambles minerales asociados a las alteraciones argílica, fílica y propilítica.

1.1 Situación Problemática

La actividad minera en el Perú constituye uno de los principales motores del desarrollo económico nacional; sin embargo, la identificación de zonas con alteraciones hidrotermales asociadas a mineralización sigue siendo un desafío técnico debido a la complejidad geológica de los Andes y a los elevados costos de los métodos tradicionales de exploración, tales como la geología de campo, la geoquímica y la geofísica (Pirajno, 2009; Sillitoe, 2010).

En este contexto, diversas investigaciones han demostrado que la teledetección, particularmente mediante sensores como ASTER, permite identificar firmas espectrales de minerales de alteración hidrotermal de manera eficiente, reduciendo costos y optimizando la exploración (Rowan et al., 2003; Crosta et al., 2003; Pour & Hashim, 2011).

En los distritos de Ticaco y Susapaya (Tacna), el potencial metalogenético y la complejidad geomorfológica dificultan la delimitación preliminar de zonas de alteración, lo que evidencia la necesidad de aplicar metodologías basadas en procesamiento digital de imágenes que permitan orientar de manera eficiente las campañas de exploración.

1.2 Motivación

La principal motivación para el desarrollo del presente trabajo surge del interés en mejorar la identificación de alteraciones hidrotermales mediante técnicas de teledetección aplicadas a la prospección minera, a través del uso del ACPS sobre imágenes ASTER en la zona de Ticaco-Susapaya (Tacna). Asimismo, este trabajo busca consolidar y sistematizar la experiencia práctica adquirida en el procesamiento, análisis e interpretación de datos satelitales orientados a la exploración geológico-minera. A lo largo de esta trayectoria, se evidenció la necesidad constante de optimizar las técnicas prospectivas de teledetección. Por consiguiente, en este trabajo se propone plasmar ese conocimiento técnico y operativo en un flujo de trabajo validado académicamente.

1.3 Justificación

El presente trabajo se justifica por la necesidad de optimizar la etapa inicial de la prospección minera, mediante la identificación y delimitación de zonas de alteración hidrotermal en zonas de difícil acceso, como la zona de Ticaco-Susapaya (Tacna). La aplicación conjunta de imágenes ASTER y el método ACPS representa una alternativa técnica eficiente frente a los métodos tradicionales, ya que reduce tiempos y costos operativos al generar mapas temáticos iniciales. Esta focalización tecnológica no solo facilita la integración de datos para la toma de decisiones, sino que también disminuye la incertidumbre de inversión y promueve una exploración minera más sostenible.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Aplicar el análisis de componentes principales selectivos a imágenes satelitales ASTER para identificar zonas de alteración hidrotermal en el sector de Ticaco-Susapaya, Tacna.

1.4.2 Objetivos específicos

- Evaluar la capacidad del ACPS para discriminar firmas espectrales asociadas a alteraciones hidrotermales.
- Identificar los patrones espaciales de las zonas de alteración hidrotermal a partir del procesamiento de imágenes ASTER.
- Validar las anomalías espectrales identificadas mediante observaciones de campo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

En el ámbito internacional, las investigaciones se han centrado en validar la precisión de los sensores y desarrollar algoritmos para aislar firmas minerales en diversos entornos geológicos. En este contexto, Rowan & Mars (2003) evaluaron la capacidad del sensor ASTER para identificar rocas con alteración hidrotermal mediante la técnica de Filtrado Emparejado (MF, siglas en ingles). Sus resultados demostraron que las bandas del SWIR permiten discriminar zonas de silicificación, opalización y argilización, validando los resultados mediante comparaciones con datos hiperespectrales AVIRIS.

Por su parte, Tangestani & Moore (2002) aplicaron el ACPS sobre imágenes Landsat TM en el área de Meiduk (Irán) para mapear halos de alteración en depósitos de pórfido de cobre. Su investigación determinó que los componentes principales de orden superior, específicamente el PC4, son los más efectivos para resaltar áreas con minerales hidroxilados alrededor de intrusivos, logrando identificar nuevos blancos de exploración.

Frente al desafío de la interferencia biótica, Liu et al. (2011) abordaron el problema de la vegetación en Xinjiang (China) mediante una metodología de enmascaramiento basada en el índice NDVI combinada con el ACPS. Este enfoque permitió identificar exitosamente afloramientos alterados en zonas con cobertura vegetal moderada, validando los resultados con datos geoquímicos y comprobación de campo.

Finalmente, Mohamed El-Desoky et al. (2021) investigaron el área de Abu Ghalaga (Egipto) integrando datos de los sensores ASTER y Landsat 8. Emplearon cocientes de bandas (como 4/6 para la alteración argílica y 5/6 para la fílica) y ACP para delimitar zonas de alteración asociadas a unidades metavolcánicas. Concluyeron que la integración de la teledetección con estudios petrográficos y geoquímicos optimiza significativamente la precisión en la definición de zonas mineralizadas.

En el contexto latinoamericano, la Cordillera de los Andes ha constituido un escenario clave para la aplicación de técnicas de teledetección, debido a su amplia exposición rocosa y elevado potencial metalogénico. En este marco, A. P. Crosta et al. (2003) desarrollaron un estudio pionero al aplicar el ACPS a imágenes ASTER en el prospecto de oro epitermal de Los Menucos, ubicado en la Patagonia, Argentina. Para ello, seleccionaron subconjuntos de cuatro bandas en función de rasgos diagnósticos de absorción espectral, lo que permitió generar mapas de abundancia de minerales como alunita, illita y caolinita, los cuales fueron validados exitosamente mediante espectrometría de reflectancia de campo.

Posteriormente, Di Tommaso & Rubinstein (2007) caracterizaron el depósito tipo pórfido Infiernillo (Argentina) utilizando datos VNIR, SWIR y TIR de ASTER. Su investigación demostró que el análisis de emisividad térmica (TIR) es fundamental para detectar la silicificación y alteración potásica, rasgos que no siempre son visibles en el espectro reflejado, logrando una alta correlación con datos obtenidos mediante espectrómetros portátiles PIMA.

Finalmente, Testa et al. (2018), realizaron un mapeo detallado de zonas asociados a depósitos tipo pórfidos y brechas de turmalina en la Cordillera Frontal (Argentina). Compararon múltiples técnicas (índices de Ninomiya, PCA y RGB 468) y concluyeron que el sensor ASTER supera significativamente a Landsat 8 en la discriminación de ensamblajes de alteración específicos, permitiendo identificar objetivos de exploración en áreas previamente desconocidas.

En el contexto peruano, el uso de técnicas de teledetección se ha integrado progresivamente en la prospección regional y en estudios académicos de mayor detalle. En este sentido, Rodriguez Aycho (2008) investigó las zonas de alteración hidrotermal al oeste de Cajamarca utilizando imágenes ASTER. Para ello, empleó técnicas como el análisis de componentes principales (PCA) y el Afinamiento por Filtración Emparejada (MTMF, siglas en ingles), cuyos resultados fueron validados mediante una librería espectral propia obtenida con un espectrómetro PIMA.

Por su parte, Brandmeier et al. (2013) utilizaron datos ASTER y espectrometría de campo para caracterizar la evolución volcánica terciaria cerca de Puquio (Ayacucho). Su trabajo se centró en correlacionar áreas de alteración intensa con unidades de ignimbritas, demostrando la eficacia de la teledetección para realizar cartografía geológica y mineralógica en terrenos accidentados de los Andes del Sur.

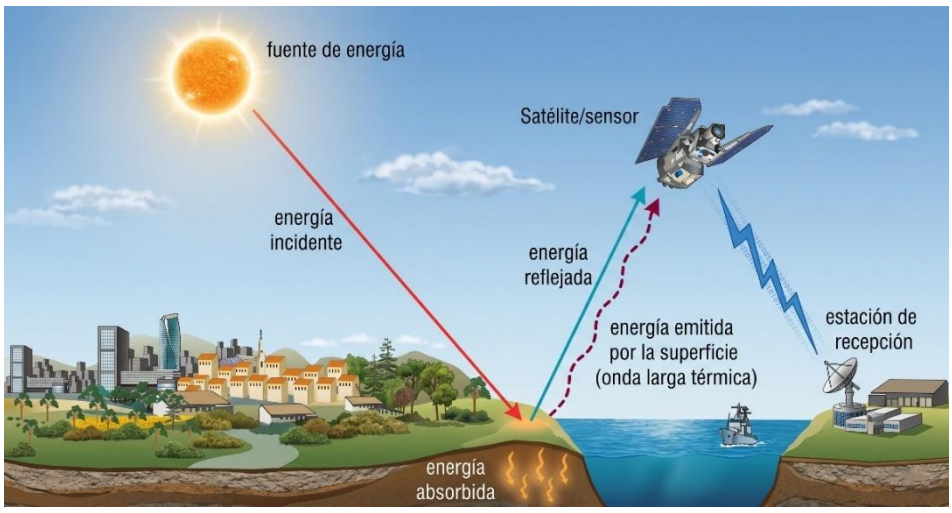
2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Definición de la teledetección

La teledetección se define como la ciencia y técnica que permite adquirir información sobre las propiedades de la superficie terrestre sin mantener contacto físico directo con ella (Lillesand et al., 2015). Su principio se fundamenta en la captación, medición y posterior procesamiento de la radiación electromagnética reflejada o emitida por los distintos materiales presentes en el terreno como se muestra en la Figura 2.1 (Chuvieco, 2008). El principio físico subyacente es la interacción entre la energía electromagnética incidente, proveniente mayoritariamente del sol, y la materia.

Figura 2.1.

Elementos y el flujo de energía en el proceso de adquisición de datos por teledetección.



Nota. Imagen adaptada de Florenzano (2011).

2.2.2. Radiación electromagnética e interacción con la materia

La energía electromagnética presenta una dualidad onda-partícula, por lo tanto, puede ser definido por la frecuencia o longitud de onda. El modelo de partícula describe la radiación electromagnética en forma de paquetes discretos de energía llamados fotones (Q), con unidad de medida Jules (J). La Ecuación (1) representa la ley de Planck, la cual se utiliza para definir la energía electromagnética como un fotón:

$$\mathrm{Q} = \mathrm{hf} \tag{1}$$

En esta expresión, h es la constante de Planck, $6.625\text{x}10^{-34}\text{J Sec}(= 4.14\text{x}10^{-15}\text{eVsec})$, y f la frecuencia de la radiación. La Ecuación (1), puede definirse en términos de frecuencia o longitud de onda como se muestra en la Ecuación (2):

$$\mathrm{Q} = \frac{\mathrm{ch}}{\lambda} \tag{2}$$

Aquí, c es la velocidad de la luz, por lo tanto, cuanto mayor es la energía del fotón, la longitud de onda es más corta y la frecuencia mayor. La velocidad de la luz se expresa mediante la Ecuación (3):

$$c^2 = \frac{1}{e\mu} \tag{3}$$

En la Ecuación (3), *e* representa la permeabilidad dieléctrica y μ la permeabilidad magnética, en el vacío estos parámetros se reducen a e_0 (permeabilidad eléctrica del vacío $= 8.85\text{x}10^{-12}\text{Fm}^{-1}$) y μ_0 (permeabilidad magnética del vacío $= 12.5\text{x}10^{-7}\text{Hm}^{-1}$), lo cual se expresa mediante la Ecuación (4):

$$c^2 = \frac{1}{e_0\mu_0} = (3.0x10^8 ms^{-1})^2 \tag{4}$$

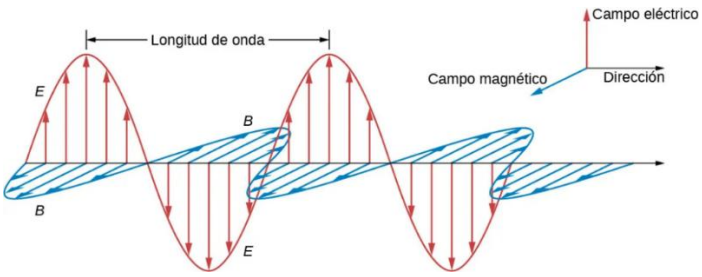
La teoría ondulatoria de Maxwell describe la radiación electromagnética como a propagación de ondas transversales, constituidas por campos eléctricos y magnéticos oscilantes y mutuamente perpendiculares (Figura 2.2). La relación fundamental entre la longitud de onda (λ) y la frecuencia (f) de esta radiación se expresa mediante la Ecuación 5:

$$c = f\lambda \tag{5}$$

Los términos de las ecuaciones (3), (4) y (5) pueden utilizarse para definir la distancia entre las crestas de la onda (longitud de onda) y el número de oscilaciones o vibraciones que pasan por un punto en un segundo (frecuencia) (Figura 2.2). Las unidades utilizadas en espectroscopia para medir la longitud de onda de la radiación electromagnética son generalmente dadas en metros (m), centímetros (cm), micrómetros ($\mu m = 10^{-6}m$) o nanómetros ($nm = 10^{-9}m$), mientras que la frecuencia es expresada en Hertz (Hz).

Figura 2.2.

Propagación de la energía electromagnética.



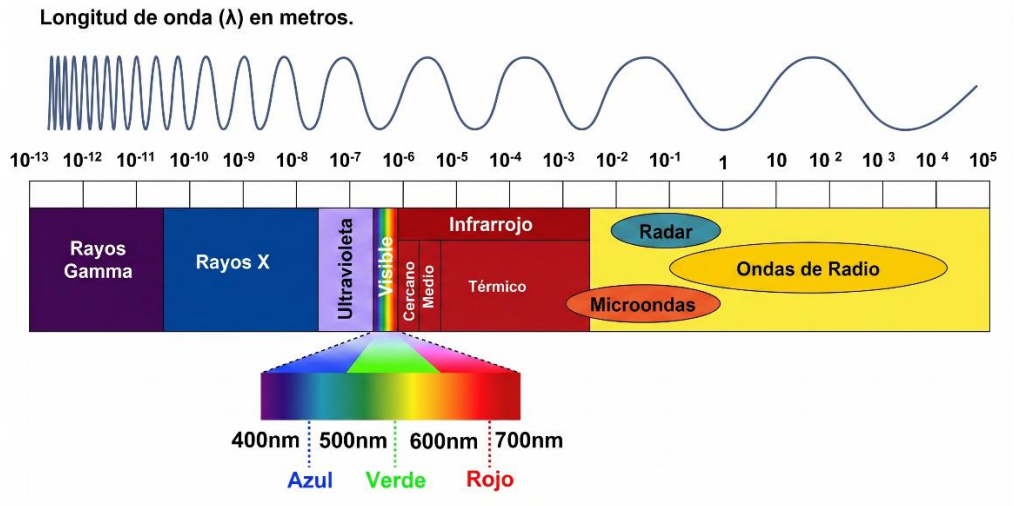
Nota. Imagen extraída de Ling et al. (2021).

2.2.3. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético (ver Figura 2.3) comprende el conjunto de todas las frecuencias de radiación electromagnética, las cuales se asocian a distintos niveles de energía (Lillesand et al., 2015). La radiación de longitud de onda corta, representada por los rayos gamma y los rayos cósmicos, se caracteriza por poseer altas frecuencias y elevados niveles de energía (Feynman et al., 2005). Por el contrario, la radiación de longitud de onda larga, como las ondas de radio, presenta frecuencias bajas y, por consiguiente, menores niveles de energía cuántica (Chuvieco, 2008). Esta relación inversa entre la longitud de onda y la energía es fundamental para comprender la interacción de la radiación con los materiales terrestres.

Figura 2.3.

Espectro electromagnético de la radiación en función de la longitud de onda.



Nota. Imagen adaptada de Acevedo (2013).

En el ámbito de la teledetección, las plataformas satelitales registran la energía principalmente en el espectro visible e infrarrojo cercano (VNIR), el infrarrojo de onda corta (SWIR) y el infrarrojo térmico (TIR). La selección de estas regiones espectrales específicas responde a la existencia de las denominadas "ventanas atmosféricas". Estas son franjas del espectro donde la atmósfera terrestre es prácticamente transparente, permitiendo el paso de la radiación hacia el sensor con una mínima atenuación por fenómenos de absorción o dispersión (Jensen, 2007; Sabins, 1999).

2.2.4. Interacción con la materia y firmas espectrales

Cuando la radiación electromagnética incide sobre un cuerpo, la energía interactúa con la materia mediante tres procesos físicos fundamentales: absorción, transmisión y reflexión. Matemáticamente, este balance de energía para una longitud de onda determinada (λ) se expresa según la Ley de Conservación de la Energía, representada por la Ecuación (6):

$$1 = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda \tag{6}$$

En dicha expresión, ρ_λ representa la reflectancia, α_λ la absortividad y τ_λ la transmisividad del material. En el ámbito de la teledetección, la proporción de energía reflejada hacia el sensor

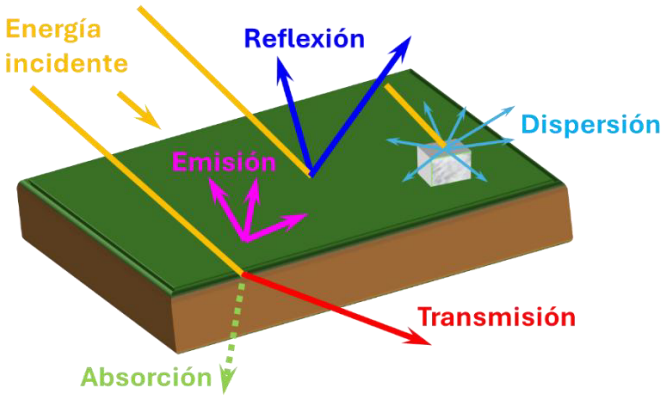
depende estrictamente de la longitud de onda y de las propiedades fisicoquímicas de la superficie, lo cual define su nivel de reflectancia (Clark, 1999). Esta variación espectral define la firma espectral del material, la cual constituye un parámetro fundamental para su identificación. La firma espectral permite discriminar distintos materiales, tales como minerales, cuerpos de agua o coberturas vegetales, facilitando su análisis mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes (Chuvieco, 2008).

2.2.5. Procesos electrónicos y moleculares: principios de absorción espectral

La energía electromagnética incidente interactúa con los materiales de la superficie terrestre (ver Figura 2.4), donde la fracción de radiación reflejada contiene información crítica sobre la composición física y química del material (Clark, 1999). El análisis de estas propiedades permite estimar la reflectancia a lo largo de un rango de longitudes de onda, lo que resulta en la construcción de una curva de reflectancia o espectro. A partir de este perfil, es posible inferir la composición mineralógica de la superficie analizada (Van der Meer et al., 2012).

Figura 2.4.

Esquema simplificado de la interacción de la energía electromagnética con la materia.



La respuesta espectral está condicionada por factores físicos y químicos:

- **Factores físicos:** Destacan el tamaño de grano y la rugosidad de la superficie, los cuales influyen en la dispersión y el albedo general de la muestra.

- **Factores químicos:** Determinan los procesos electrónicos y vibracionales a escala atómica y molecular. La comprensión de estos mecanismos es esencial para interpretar las características de absorción diagnósticas en un espectro medido.

La interacción de la radiación con los átomos y grupos moleculares genera rasgos distintivos en regiones específicas del espectro:

- **Procesos electrónicos:** Implican la transición de electrones entre niveles orbitales o bandas de energía. Estas transiciones generan características espectrales principalmente en las regiones del ultravioleta (UV) y del visible e infrarrojo cercano (VNIR, 0.3μ – 1.3 μ).
- **Procesos vibracionales:** Se originan por los modos de vibración (estiramiento y flexión) de moléculas o átomos enlazados, generando rasgos espectrales diagnósticos en la región del infrarrojo (IR, 1.4 μm - 40.0 μm), especialmente en el infrarrojo de onda corta (SWIR) y el infrarrojo térmico (TIR) (Hunt, 1970).

La identificación precisa de los átomos o moléculas responsables de estos procesos permite determinar con rigor científico los minerales constituyentes del material analizado, facilitando la discriminación de unidades geológicas mediante sensores remotos.

2.2.6. Fundamentos de las alteraciones hidrotermales

- **Definición y mecanismos de formación**

Las alteraciones hidrotermales comprenden un conjunto de complejos procesos físicos y químicos mediante los cuales la mineralogía, textura y composición química de una roca preexistente (roca caja) se modifican debido a la interacción con fluidos acuosos calientes (Pirajno, 2009). Este intercambio iónico entre la roca y el fluido hidrotermal —que varía fuertemente en temperatura, pH y composición— provoca un desequilibrio termodinámico que resulta en la disolución de los minerales primarios y la consecuente precipitación de minerales secundarios, tales como arcillas, sulfatos, silicatos y carbonatos.

- Importancia económica y zonación metalogenética

El estudio de estos procesos es de vital importancia en la prospección geológica, ya que los minerales secundarios formados suelen precipitar de manera conjunta con elementos de alto interés económico para el país, tales como el oro, la plata y el cobre. En yacimientos de tipo pórfido y epitermales, típicos de la cordillera andina, estas alteraciones no ocurren de manera aleatoria, sino que presentan una disposición espacial de zonación concéntrica estructurada en función del gradiente térmico y químico del fluido (ver Figura 2.5), constituyendo excelentes vectores hacia el núcleo de mineralización (Lowell & Guilbert, 1970; Sillitoe, 2010).

- Principales ensambles mineralógicos

Dependiendo de las condiciones fisicoquímicas, se desarrollan distintos ensambles de alteración. En la prospección multiespectral, destacan tres zonas principales por su detectabilidad espacial:

- **Alteración Argílica:** Formada bajo condiciones de pH ácido y temperaturas moderadas a bajas. Se caracteriza por la intensa lixiviación de álcalis y la formación de minerales del grupo de las arcillas, principalmente caolinita, alunita y dickita.
- **Alteración Fílica**: Desarrollada a temperaturas moderadas a altas y pH moderadamente ácido. Se distingue por la destrucción de feldespatos y la formación abundante de illita, sericita (muscovita de grano fino) y cuarzo.
- **Alteración Propilítica**: Constituye el halo más externo y de menor temperatura en sistemas porfiríticos. Ocurre bajo condiciones de pH casi neutro y se caracteriza por la presencia de clorita, epidota y calcita.

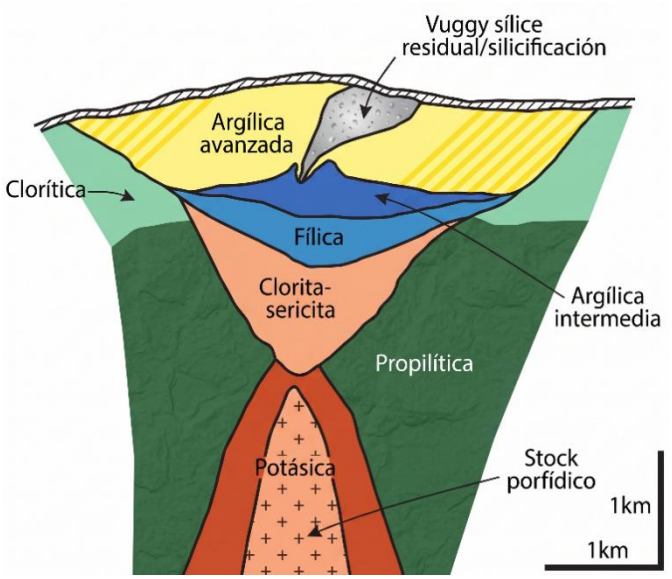
- Firmas espectrales y detección remota

Desde la perspectiva de la física aplicada, la identificación remota de estos sistemas es posible debido a que los minerales secundarios producto de las alteraciones hidrotermales presentan firmas espectrales únicas e irrepetibles (Hecker et al., 2019). Estas firmas son el resultado

directo de la interacción de la radiación electromagnética con los enlaces moleculares de los minerales (como los enlaces Al-OH, Mg-OH y CO3). Los procesos de absorción y reflectancia de fotones generan patrones característicos que pueden ser capturados con alta precisión por sensores multiespectrales en las regiones del Infrarrojo Cercano (VNIR) y el Infrarrojo de Onda Corta (SWIR), permitiendo su cartografía sin necesidad de contacto físico inicial.

Figura 2.5.

Esquema de zonificación de las alteraciones hidrotermales.



Nota: Imagen adaptada de Sillitoe (2010).

3. ÁREA DE ESTUDIO, DATOS Y METODOLOGÍA

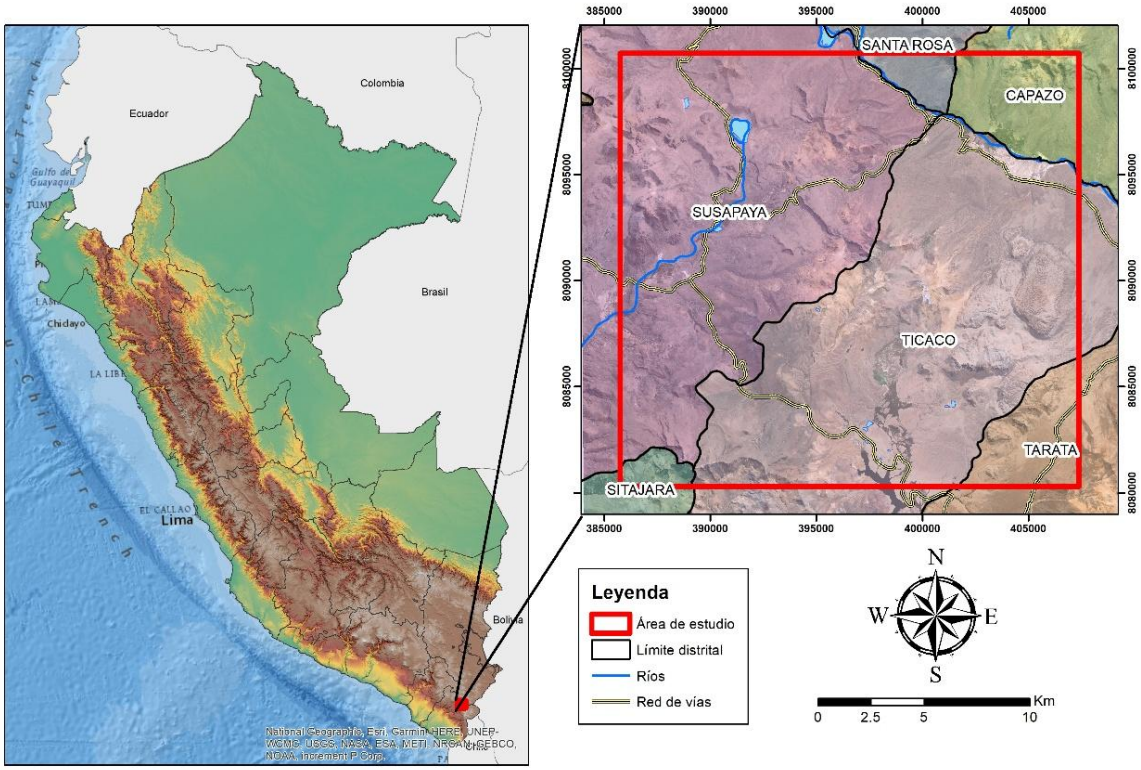
3.1. Área de estudio

3.1.1. Ubicación y acceso

El área de estudio se localiza en la región sur del Perú, específicamente en los distritos de Ticaco y Susapaya, provincia de Tarata, departamento de Tacna (ver Figura 3.1). Geográficamente, la zona se encuentra emplazada en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes, abarcando un rango altitudinal que oscila entre los 3000 y 5000 m s. n. m. El acceso principal desde la ciudad de Tacna se realiza a través de la carretera hacia Tarata, lo cual facilita la logística durante las fases de validación y adquisición de firmas espectrales de campo.

Figura 3.1.

Mapa geográfico del área de estudio, donde el rectángulo rojo indica la delimitación espacial del área analizada.



3.1.2. Parámetros geodésicos y proyección cartográfica

Para el tratamiento de datos geoespaciales y la integración de las firmas espectrales, se utiliza un sistema de coordenadas proyectadas que minimiza las distorsiones de forma y área en la región de estudio. Los parámetros geodésicos correspondientes se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1.

Especificaciones geográficas del área de estudio.

Parámetro	Especificación
Proyección	UTM (Universal Transverse Mercator)
Datum	WGS 84
Zona	19
Hemisferio	Sur

3.1.3. Condiciones fisiográficas y climáticas

La fisiografía del sector se caracteriza por un relieve accidentado con presencia de vertientes montañosas, quebradas profundas y mesetas altoandinas. Estas condiciones imponen desafíos específicos para la teledetección, como la generación de sombras topográficas que deben ser consideradas durante el tratamiento de imágenes.

Desde el punto de vista climático, la zona presenta una marcada estacionalidad. La escasa cobertura vegetal y la baja humedad atmosférica predominante en gran parte del año favorecen la exposición de los afloramientos rocosos, lo cual resulta ideal para la identificación de alteraciones mediante sensores ópticos.

3.1.4. Contexto geológico y metalogénico

El área de interés se inserta en un entorno geológico altamente favorable para la presencia de depósitos minerales. Regionalmente, la zona está influenciada por el Arco Volcánico Cenozoico y se encuentra asociada a franjas metalogenéticas de importancia económica, tales como la franja de pórfidos de cobre-molibdeno y depósitos epitermales de oro y plata.

Geológicamente, predominan unidades de rocas volcánicas y volcanosedimentarias (tales como las del Grupo Toquepala o el Grupo Huaylillas), las cuales han sido afectadas por eventos intrusivos y procesos de alteración hidrotermal. Esta interacción fluido-roca ha generado ensambles de minerales (argílicos, fílicos y propilíticos) que presentan rasgos diagnósticos en el infrarrojo de onda corta (SWIR), permitiendo su cartografiado sistemático mediante el procesamiento de bandas del sensor ASTER.

3.2. Datos

3.2.1. Imágenes satelitales ASTER

El sensor ASTER, a bordo de la plataforma Terra (NASA), representa una de las herramientas más robustas para la exploración geológica y el mapeo mineralógico desde el espacio. Su diseño permite una transición crítica desde la radiancia medida en el detector hasta la reflectancia y emisividad de superficie, permitiendo una consistencia analítica necesaria para la identificación de materiales geológicos bajo variadas condiciones de iluminación y geometría solar.

ASTER opera mediante tres subsistemas ópticos independientes que cubren desde el espectro visible hasta el infrarrojo térmico, de acuerdo con el detalle que se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2.

Especificaciones técnicas del sensor ASTER, organizadas por subsistemas (VNIR, SWIR y TIR).

Característica	VNIR	SWIR	TIR
Bandas	1-3	4-9	10-14
Resolución espacial	15m	30m	90m
Ancho de barrido	60km	60km	60km
Rango Espectral	0.52 – 0.86 µm	1.60 – 2.43 µm	8.125 – 11.65 µm
Resolución radiométrica (bits)	8	8	12

Para la prospección minera, el subsistema SWIR es vital, a diferencia de otros sensores, ASTER divide esta región en seis bandas (Bands 4-9), permitiendo detectar rasgos de absorción

molecular específicos de grupos hidroxilo (Al-OH, Mg-OH) y carbonatos. Para el presente trabajo se utilizó una imagen ASTER, cuya información se detalla en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3.

Metadatos de la imagen ASTER empleada en el estudio.

Ítem	Característica
ID de la imagen	AST_L1T_00309212000151340_20150411213540_118810
Fecha de toma	21/09/2000
Hora de toma (UTM)	15:13:40.567
Cobertura de nubes	1 %
Ángulo azimutal solar	49.754240°
Ángulo de elevación solar	63.976299°
Proyección	UTM Zona 19S

3.2.2. Firmas espectrales de reflectancia

Para la toma de las firmas espectrales se utilizó el espectrorradiómetro FieldSpec 4 Hi-Res de *Analytical Spectral Devices* (ASD), con la capacidad de registrar espectros tanto en campo como en laboratorio entre 0,35 a 2,5 µm, con separaciones de 1nm. El instrumento utiliza un cable de fibra óptica, que se puede montar sobre accesorios ópticos con diferentes ángulos de campo de visión (ver Figura 3.2).

Figura 3.2.

Espectrorradiómetro FieldSpec 4 Hi-Res.



La alta resolución en la región SWIR es el factor determinante para separar picos de absorción estrechos en filosilicatos y carbonatos, evitando el solapamiento de firmas diagnósticas, otras características del equipo se detallan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4.

Especificaciones del FieldSpec 4 Hi-Res.

Ítem	Características
Rango espectral	350 – 2500 nm
Muestreo espectral	1.4 nm en el rango de 330-1050 nm
	2 nm en el rango 1000-2500 nm
Resolución espectral	3 nm en la región VNIR
	10 nm en la región SWIR
Tipo de entrada	Fibra óptica de 1.5 m
Campo de visión	25°, 8°, 18°
Tiempo de escaneo	Menor a 1 segundo
Dimensiones	0.325 m x 0.1125 m x 0.4 m
Peso	7.2 kg

3.3 Metodología

El desarrollo metodológico del presente trabajo comprende un flujo de trabajo estructurado (ver Figura 3.3) que inicia con el preprocesamiento de una imagen satelital ASTER de los distritos de Ticaco y Susapaya. El procesamiento digital de imágenes se realizó mediante el software ENVI (Environment for Visualizing Images), ampliamente utilizado en teledetección para análisis multiespectral (Canty, 2014). Esta primera etapa incluye la calibración radiométrica y la corrección atmosférica mediante el módulo FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes), basado en el modelo MODTRAN (Cooley et al., 2002). A continuación, se generan máscaras para discriminar la vegetación, los cuerpos de agua y la nieve, aislando así exclusivamente los afloramientos rocosos de interés.

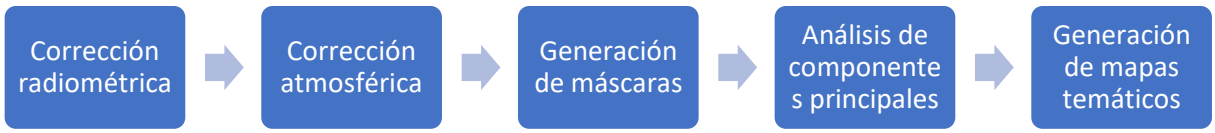
Posteriormente, se ejecuta el procedimiento digital aplicando el ACP sobre subconjuntos específicos de las bandas del espectro visible e infrarrojo cercano (VNIR) y del infrarrojo de

onda corta (SWIR). Esta técnica estadística permite reducir la redundancia multiespectral y realzar las firmas asociadas a los minerales de alteración hidrotermal (argílica, fílica y propilítica).

Finalmente, los componentes que concentran dichas anomalías son reclasificados y sometidos a un filtrado espacial para su integración en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Este procedimiento facilita la elaboración de mapas temáticos regionales y la validación de los resultados con la información geológica preexistente, delimitando las áreas con mayor potencial prospectivo.

Figura 3.3.

Diagrama de flujo de la metodología utilizada para el procesamiento de datos ASTER.



Nota. Se muestra las etapas a seguir, desde la corrección radiométrica hasta la generación de mapas temáticos.

3.3.1. Corrección radiométrica

La corrección radiométrica es un proceso de conversión de valores de niveles digitales (ND) a valores de radiancia. Este paso fundamental en los datos de imágenes, para ello se requiere los coeficientes de calibración (Yamaguchi et al., 1998). La Ecuación (7) es utilizada para realizar la conversión de ND a valores de radiancia es (Abrams, 2002):

$$L_\lambda = "Gain" * ND + "Offset" \quad (7)$$

En la Ecuación (7), cada término tiene el siguiente significado:

L_λ: Radiancia espectral en la abertura del sensor en $\mu W\ (cm^2.sr.nm)^{-1}$

"Gain": Coeficiente de calibración ganancia en unidades de $\mu W(cm^2.sr.nm)^{-1}$/ND

"Offset": Representa el sesgo adicional

En esta fórmula, L_λ es la radiancia del píxel en una banda espectral específica y se calcula multiplicando la ganancia de dicha banda ("Gain") por el valor del nivel digital (DN, en inglés) y luego adicionando el sesgo ("offset" o "bias") a dicho resultado.

3.3.2. Corrección atmosférica

La corrección atmosférica mitiga la influencia de la atmósfera para estimar la reflectancia de superficie. En el espectro óptico (VIS-NIR-SWIR), la radiación experimenta dispersión y absorción por aerosoles y gases como el CO_2, generando una "radiancia de trayectoria" (path radiance) que distorsiona la señal del terreno (Berk et al., 1999). El objetivo es desacoplar la energía aportada por la atmósfera de la reflejada por la superficie para obtener datos comparables entre escenas. Este procedimiento es crítico para el ACPS y la identificación precisa de firmas minerales sutiles (Chavez, 1996).

La corrección atmosférica se efectuó mediante el módulo FLAASH, basado en el modelo MODTRAN, el cual permite estimar la reflectancia de superficie a partir de datos de radiancia (Cooley et al., 2002), ofreciendo mayor consistencia que los métodos empíricos en estudios geológicos. En esta investigación, se aplicó a imágenes ASTER L1T para mitigar la absorción y dispersión atmosférica en el espectro solar (VNIR-SWIR), omitiendo la región térmica. El producto final es una imagen de reflectancia escalada (16 bits) que constituye el insumo base para el Análisis de Componentes Principales (ACP) y el mapeo de alteraciones, fundamentándose en la Ecuación (8) que representa la relación de transferencia radiativa (Sobrino, 2000):

$$\mathrm{L}_S = \frac{A*\rho}{1-\rho_e*S} + \frac{B*\rho_e}{1-\rho_e*S} + L_a \qquad (8)$$

En la Ecuación (8), cada término tiene el siguiente significado::

L_S: Radiancia total registrada por el sensor.

ρ: Reflectancia del píxel en la superficie.

ρ_e: Reflectancia promedio de la superficie para el píxel y su entorno.

S: Albedo esférico de la atmósfera.

L_a: Radiancia de trayectoria generada por la atmósfera.

A y B: Coeficientes que dependen de las condiciones geométricas y atmosféricas.

3.3.3. Generación de máscaras

Con el objetivo de aislar la respuesta espectral de las alteraciones hidrotermales frente a factores de interferencia externos —como la vegetación, cuerpos de agua, nubes y sombras—, los cuales pueden enmascarar los rasgos diagnósticos de los minerales de interés, se emplearon índices diferenciales normalizados. Estos índices permiten generar mapas binarios (máscaras de exclusión) para identificar y omitir dichos píxeles antes de la ejecución del ACPS. Este procedimiento garantiza que la varianza estadística analizada corresponde exclusivamente al material geológico aflorante, incrementando así la confiabilidad y precisión cartográfica de los modelos de alteración resultantes. A continuación, se detalla la generación de las máscaras utilizadas:

- **Máscara de vegetación**

Se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) que representa un parámetro para evaluar la presencia y la vitalidad de la vegetación. Este índice se obtiene al evaluar el comportamiento espectral de las plantas, contrastando su absorción significativa en la banda del rojo (R) con su alta reflectancia en el espectro del infrarrojo cercano (NIR). Por consiguiente, las coberturas vegetales en estado óptimo exhiben valores elevados (ver Figura 3.4). El NDVI, cuyo rango de variación se establece teóricamente entre -1 y 1, se define a través de la Ecuación (9) (Rouse et al., 1974):

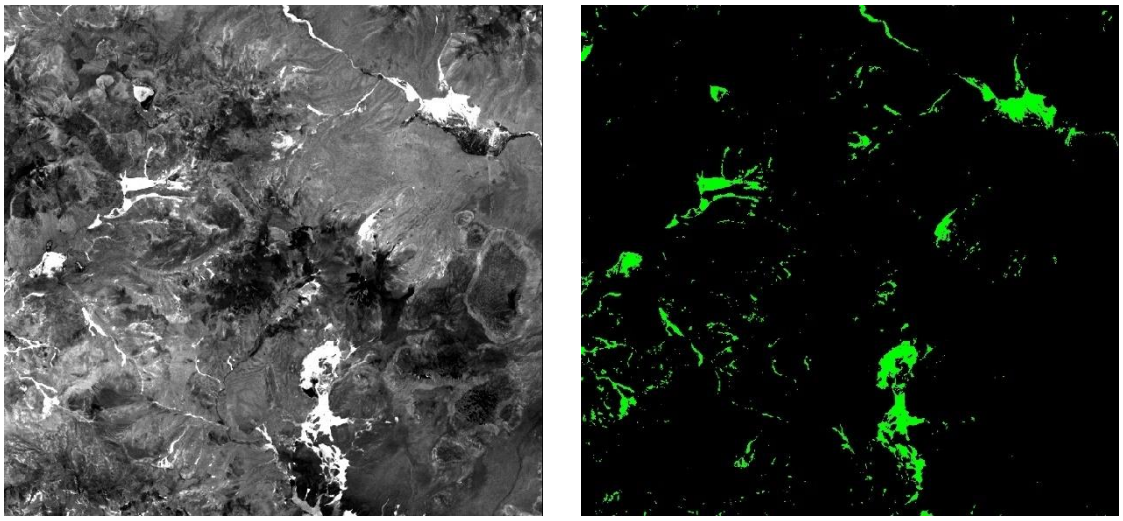
$$NDVI = \frac{Banda\ NIR - Banda\ roja}{Banda\ NIR + Banda\ roja} = \frac{Banda\ 3 - Banda\ 2}{Banda\ 3 + Banda\ 2} \quad (9)$$

Dado que los valores cercanos a 0 representan afloramientos rocosos y los próximos a 1 indican vegetación, se aplica un umbral empírico (> 0.25, ajustable según el área y la escena) para

ocultar las áreas vegetadas (ver Figura 9). Este procedimiento garantiza que el análisis espectral posterior evalúe exclusivamente la respuesta del material geológico expuesto.

Figura 3.4.

Imagen del NDVI (izquierda); imagen clasificada del NDVI (derecha).



Nota. La imagen del NDVI se muestra en escala de grises, donde los valores mínimos corresponden a las tonalidades más oscuras y los máximos a las más claras. Se seleccionaron los píxeles más representativos, los cuales se visualizan en color verde en la imagen clasificada.

- **Máscara de nieve**

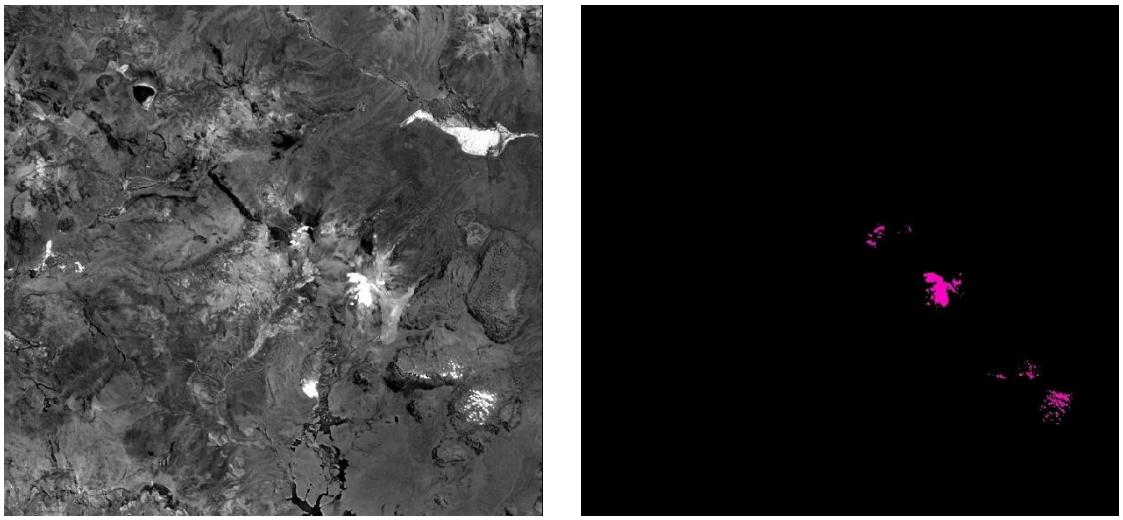
La presencia de nieve en zonas de alta montaña constituye un factor que interfiere en la interpretación de imágenes satelitales, por lo cual es importante su identificación. Espectralmente, la nieve presenta una alta reflectancia en las longitudes de onda del espectro visible (particularmente en la banda verde) y una fuerte absorción en la región del infrarrojo de onda corta (SWIR) . Por el contrario, la nubosidad mantiene una reflectancia elevada en ambas regiones, contraste que permite su discriminación. Con este propósito, se emplea el Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI), el cual evalúa la respuesta espectral entre la banda verde y el SWIR mediante la Ecuación (10) (Salomonson & Appel, 2004):

$$NDSI = \frac{Banda\ verde - Banda\ NIR}{Banda\ verde + Banda\ NIR} = \frac{Banda\ 1 - Banda\ 2}{Banda\ 1 + Banda\ 2} \quad (10)$$

El NDSI toma valores entre -1 y 1 y, en general, valores altos indican presencia probable de nieve. En la práctica, se define un umbral (> 0.4, ajustable según el área y la escena) para generar una máscara de nieve (ver Figura 3.5).

Figura 3.5.

Imagen del NDSI (izquierda); imagen clasificada del NDSI (derecha).



Nota. La imagen del NDSI se muestra en escala de grises, donde los valores mínimos corresponden a las tonalidades más oscuras y los máximos a las más claras. Se seleccionaron los píxeles más representativos, los cuales se visualizan en color magenta en la imagen clasificada.

- **Máscara de cuerpo de agua**

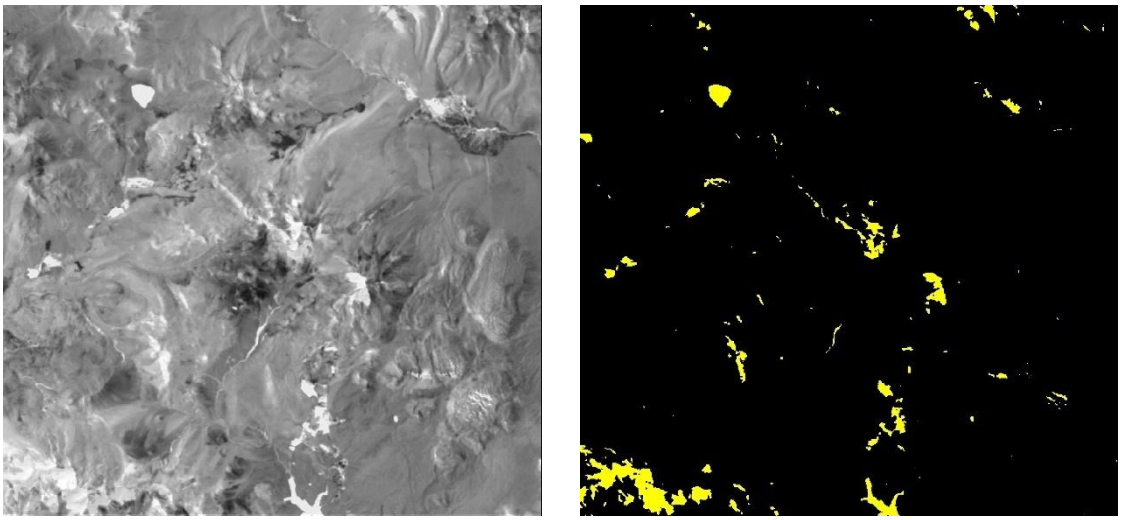
El Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) se utiliza para resaltar cuerpos de agua en imágenes satelitales, haciendo que el agua se distinga mejor frente a suelo y vegetación. El NDWI aprovecha que el agua tiende a reflejar relativamente más en la banda verde y absorbe más en el infrarrojo cercano (NIR), por lo que el contraste entre ambas bandas permite identificar agua con mayor facilidad. El NDWI fue propuesto por McFeeters (1996) y se calcula mediante la Ecuación (11) (McFeeters, 1996):

$$NDWI = \frac{Banda\ verde - Banda\ SWIR(1.55-175um)}{Banda\ verde + Banda\ SWIR(1.55-175um)} = \frac{Banda\ 1 - Banda\ 2}{Banda\ 1 + Banda\ 2} \quad (11)$$

Este índice toma valores entre -1 y 1; en general, valores positivos suelen indicar presencia probable de agua, mientras que valores cercanos a 0 o negativos corresponden a suelo, roca o vegetación (ver Figura 3.6), el umbral exacto depende de la escena.

Figura 3.6.

Imagen del NDWI (izquierda); imagen clasificada del NDWI (derecha).



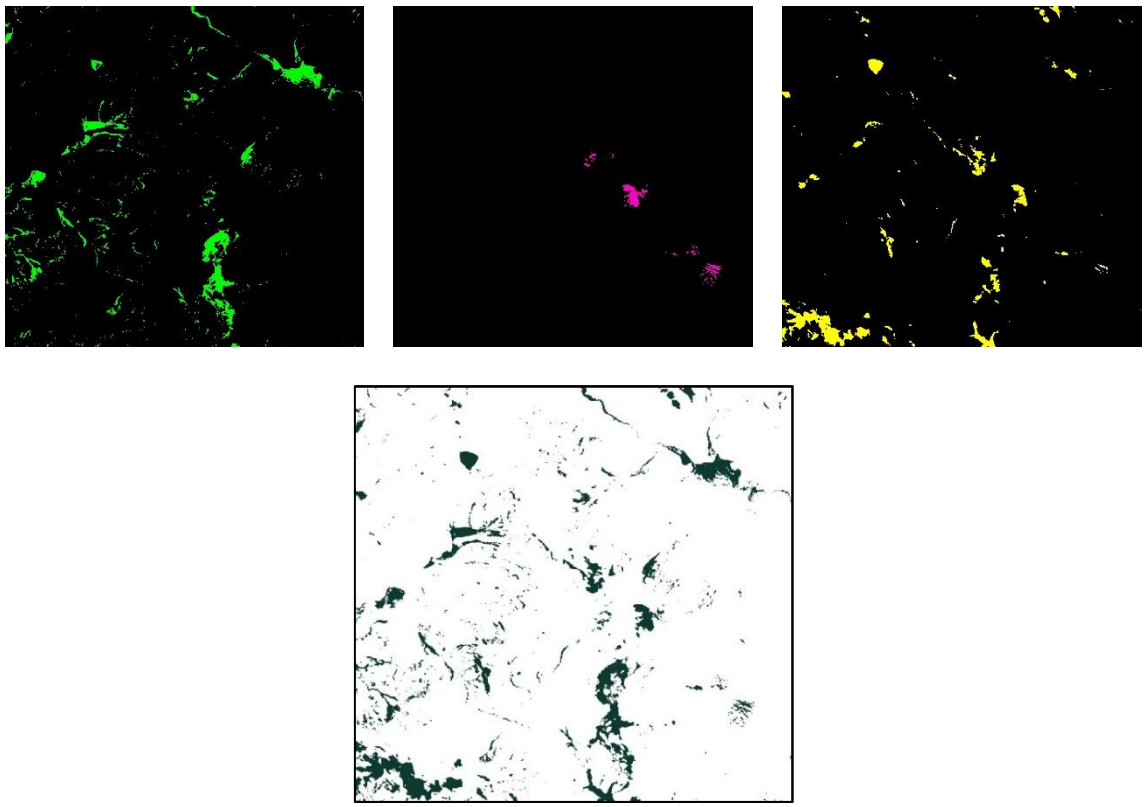
Nota. La imagen del NDWI se muestra en escala de grises, donde los valores mínimos corresponden a las tonalidades más oscuras y los máximos a las más claras. Se seleccionaron los píxeles más representativos, los cuales se visualizan en color amarillo en la imagen clasificada.

- **Integración de máscaras**

Una vez generadas las máscaras individuales para excluir las coberturas que no deben intervenir en el análisis estadístico de la imagen ASTER, el siguiente paso consistió en unificar estos filtros en una única máscara global. Para ello, se integraron espacialmente las tres (03) máscaras previamente definidas (vegetación, cuerpos hídricos y nubes/sombras) mediante operaciones de álgebra de mapas y lógica booleana. De este modo, se obtuvo una máscara binaria final (ver Figura 3.7) que aísla de manera conjunta todas las zonas de interferencia, delimitando exclusivamente los afloramientos rocosos y suelos expuestos para el posterior análisis mediante ACPS.

Figura 3.7.

Máscaras de NDVI (izquierda), NDSI (centrado) y NDWI (derecha) y su respectiva integración (inferior).



Nota. La máscara integrada asigna un valor nulo de cero (píxeles negros) a aquellas áreas que serán excluidas del procesamiento mediante el Análisis de Componentes Principales Selectivo.

3.3.4. Análisis de componentes principales selectivos

El Análisis de Componentes Principales Selectivos (ACPS) es una variante del ACP que utiliza un subconjunto reducido de bandas (típicamente cuatro) para aislar la respuesta espectral de un grupo mineralógico específico (Loughlin, 1991; Crosta et al., 2003).

En el procesamiento de imágenes ASTER, el uso de todas las bandas en un solo ACP suele generar componentes donde la varianza está dominada por el albedo general, la topografía o la vegetación. Al seleccionar solo las bandas críticas donde un mineral refleja y absorbe energía, el ACPS garantiza que uno de los componentes principales resultantes representa casi la totalidad de la abundancia de dicho mineral, facilitando su cartografiado (Crosta et al., 2003).

3.3.4.1. El Análisis de Componentes Principales (ACP)

El ACP es una técnica de transformación lineal multivariante, diseñada para reducir los grados de libertad de datos en imágenes con múltiples bandas altamente correlacionadas (Chuvieco, 2008). En el contexto de la teledetección geológica, el objetivo primordial es transformar las bandas originales del sensor (como las de ASTER) en un nuevo sistema de coordenadas ortogonales denominadas Componentes Principales (CP).

Esta técnica permite que la mayor parte de la varianza de la imagen se concentre en los primeros componentes, mientras que los rasgos espectrales sutiles y específicos, frecuentemente asociados a las alteraciones hidrotermales, se aíslen en los componentes de orden superior (Jensen, 2005).

Para explicar el modelo matemático del ACP para una imagen satelital con "n" bandas, los datos se representan como un vector aleatorio X. El primer paso para la transformación consiste en calcular la matriz de covarianza (Σ), mediante la Ecuación (12), la cual describe la relación estadística entre todos los pares de bandas (Richards, 2013):

$$\Sigma = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x})^T \quad (12)$$

En la Ecuación (12), N es el número total de píxeles y $\bar{x}$ es el vector de medias de las bandas. Los elementos de la diagonal de $\sum$ representan las varianzas de cada banda, mientras que los elementos fuera de la diagonal indican la covarianza entre ellas.

El núcleo matemático del ACP reside en la resolución de la Ecuación (13) para determinar los autovalores (λ):

$$\det(\Sigma - \lambda I) = 0 \quad (13)$$

De esta solución se obtienen n autovalores $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$, los cuales representan la cantidad de varianza total explicada por cada componente principal. Posteriormente, para cada λ_k se calcula su autovector correspondiente (e_k) mediante la Ecuación (14) (Richards, 2013):

$$(\Sigma - \lambda_k)e_k = 0 \quad (14)$$

Los autovectores son ortogonales entre sí y definen la dirección de los nuevos ejes en el espacio n-dimensional. La matriz formada por estos autovectores (matriz de coeficientes o *loadings*) es la que determina la contribución de cada banda original al nuevo componente principal.

Finalmente, los datos originales se proyectan sobre los nuevos ejes mediante la transformación representada en la Ecuación (15):

$$Y = E^T(X - \bar{x}) \tag{15}$$

Donde Y representa los nuevos valores de los componentes principales y E es la matriz de autovectores.

3.3.4.2.Aplicación del Análisis de Componentes Principales Selectivos (ACPS)

A diferencia del ACP estándar que procesa todas las bandas simultáneamente, el ACPS reduce la dimensionalidad utilizando subconjuntos de cuatro bandas específicas. Esta selección busca maximizar el contraste entre la banda donde el mineral objetivo presenta su máxima reflectancia y la banda donde ocurre su absorción diagnóstica. La matemática del ACPS sigue la lógica del ACP tradicional (descomposición en autovalores y autovectores), pero aplicada a una matriz de datos reducida.

Si definimos un conjunto de bandas seleccionadas como $X_S = \{b_i, b_j, b_k, b_{jl}\}$, la matriz de covarianza Σ_S será de dimensiones 4 x 4. La reducción del número de variables permite que la transformación ortogonal sea mucho más sensible a las variaciones sutiles de reflectancia entre esas cuatro bandas específicas.

El paso crítico en el ACPS es la interpretación de la matriz de autovectores. Para identificar cuál de los cuatro componentes principales (CP1, CP2, CP3 o CP4) contiene la información del mineral, se aplica el siguiente criterio físico matemático:

1. Se identifican las bandas donde el mineral tiene su máxima reflexión y absorción.
2. Se busca el componente principal que presente los coeficientes (loadings) con signos opuestos y magnitudes elevadas para esas dos bandas.

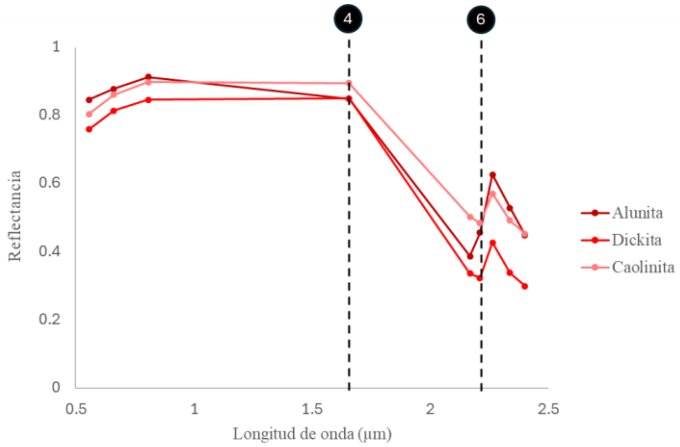
3. Regla de Brillantez: Si el autovector de la banda de reflexión tiene signo positivo y el de absorción negativo, el mineral aparecerá en tonos brillantes (blanco).
    - Si los signos están invertidos, el mineral aparecerá en tonos oscuros (negro), por lo que se debe aplicar un proceso de inversión digital (multiplicar por -1).

En la zona de estudio se identificaron tres ensambles mineralógicos principales:

1) **Ensamble de Alunita/Caolinita/Dickita (Alteración Argílica):** Este grupo mineralógico presenta rasgos de absorción significativos en las longitudes de onda de 2.16 µm y 2.20 µm, vinculados a las vibraciones de los enlaces Al-OH en los filosilicatos. Para el análisis de las imágenes ASTER, se seleccionaron las bandas 1, 4, 6 y 7. Esto se debe a que el comportamiento espectral de este ensamble se identifica mediante el fuerte contraste radiométrico entre la Banda 4 (1.65 µm), que actúa como zona de alta reflectancia relativa, y la Banda 6 (2.20 µm), que captura el rasgo de absorción profundo (ver Figura 3.8). Por su parte, las bandas 1 y 7 se integran para absorber la varianza asociada al albedo general del terreno.

Figura 3.8.

Rasgo espectral característico al ensamble de minerales Alunita/Caolinita/Dickita.



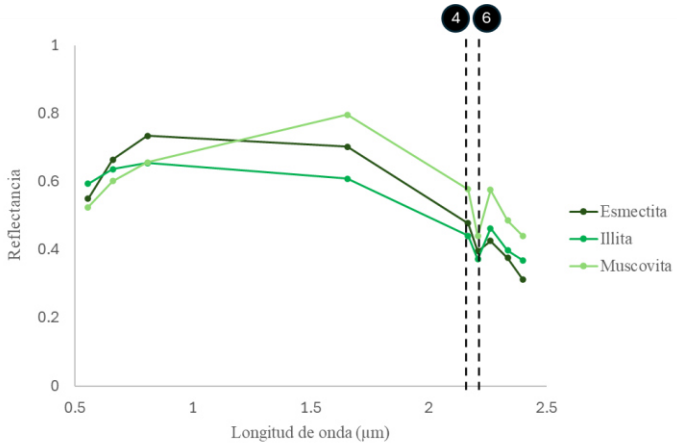
Nota. Datos de reflectancia tomados del U.S. Geological Survey.

2) **Ensamble de Illita/Muscovita/Esmectita (Alteración Fílica):** Este grupo mineralógico se caracteriza por presentar rasgos de absorción significativos en la longitud de onda de 2.20

µm, asociados a las vibraciones de los enlaces Al-OH presentes en micas blancas y arcillas. Para el análisis de las imágenes ASTER, se seleccionaron las bandas 1, 3, 5 y 6, dado que la firma espectral de este ensamble destaca por el fuerte contraste radiométrico entre la Banda 5 (2.16 µm) y la caída abrupta de absorción capturada por la Banda 6 (2.20 µm). Por su parte, las bandas 1 y 3 se integran en el análisis para absorber la varianza asociada al albedo general del terreno (ver Figura 3.9).

Figura 3.9.

Rasgo espectral característico al ensamble de minerales Illita/Muscovita/Esmectita.

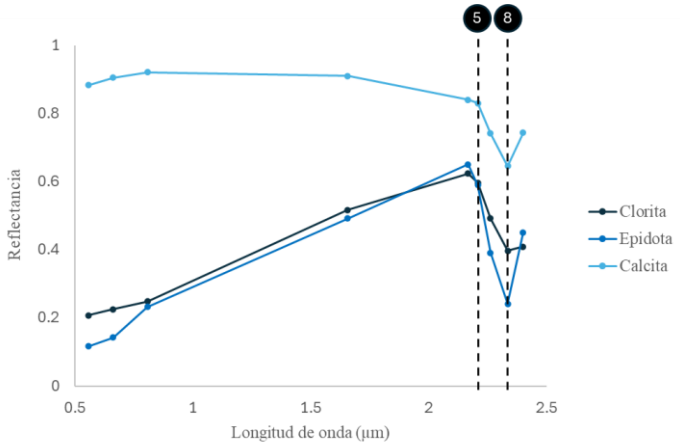


Nota. Datos de reflectancia tomados del U.S. Geological Survey.

3) **Ensamble de Clorita/Epidota/Calcita (Alteración Propilítica):** Este grupo mineralógico presenta rasgos de absorción significativos en el rango de longitudes de onda de 2.33 a 2.40 µm, vinculados a las vibraciones de los enlaces Mg-OH y a los grupos carbonatos (CO_3). Para el análisis de las imágenes ASTER, se seleccionaron las bandas 1, 3, 5 y 8. Esto se debe a que la firma espectral de este ensamble se identifica mediante el fuerte contraste radiométrico entre la Banda 5 (2.16 µm), que representa la zona de máxima reflectancia relativa, y la Banda 8 (2.33 µm), que coincide de manera exacta con el rasgo de absorción profundo del magnesio y los carbonatos (ver Figura 3.10). Por su parte, las bandas 1 y 3 se integran en el análisis multivariante para absorber la varianza asociada al albedo general del terreno.

Figura 3.10.

Rasgo espectral característico al ensamble de minerales Clorita/Epidota/Calcita.



Nota. Datos de reflectancia tomados del U.S. Geological Survey.

La Tabla 3.5 sintetiza los subconjuntos de cuatro bandas del sensor ASTER asignados a cada ensamble mineralógico. Esta selección espectral, basada estrictamente en sus rasgos diagnósticos de reflectancia y absorción, constituye el insumo base para ejecutar el ACPS.

Tabla 3.5.

Subgrupos de bandas para la determinación de tipos de alteración ASTER.

Tipo de alteración	Subgrupo
Argílica (Alunita/Caolinita/ Dickita)	Bandas 1, 4, 6 y 7
Fílica (Illita/Muscovita/Esmectita)	Bandas 1, 3, 5 y 6
Propilítica (Clorita/Epidota/Calcita)	Bandas 1, 3, 5 y 8

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Aplicación del ACPS

Una vez definidos los subconjuntos de bandas espectrales para el ACPS, se procedió a calcular la matriz de covarianza (∑) mediante el software ENVI, resolviendo la ecuación característica para extraer los autovalores y autovectores correspondientes. El paso determinante consistió en analizar las matrices de autovectores derivadas del procesamiento de los tres subconjuntos espectrales (ver Tabla 4.1). Estas matrices detallan el peso o carga matemática que cada banda original aporta a la formación de los nuevos CP.

Tabla 4.1.

Autovalores y autovectores resultantes del ACPS.

ACPS 1467	**Banda 1**	**Banda 4**	**Banda 6**	**Banda 7**
Banda 1'	-0.423347	-0.582557	-0.460575	-0.518918
Banda 4'	-0.902011	0.218522	0.29093	0.232344
Banda 6'	0.063347	-0.782863	0.425214	0.449784
Banda 7'	-0.056037	-0.001382	-0.722789	0.688792
ACPS 1356	**Banda 1**	**Banda 3**	**Banda 5**	**Banda 6**
Banda 1'	-0.520597	-0.599366	-0.427806	-0.432112
Banda 3'	-0.420414	-0.43976	0.544748	0.577159
Banda 5'	-0.741251	0.668094	-0.059607	0.025365
Banda 6'	0.052697	-0.031955	-0.718803	0.692476
ACPS 1358	**Banda 1**	**Banda 3**	**Banda 5**	**Banda 8**
Banda 1'	-0.508556	-0.583253	-0.420069	-0.474057
Banda 3'	-0.428676	-0.465806	0.542198	0.552525
Banda 5'	-0.745472	0.665443	0.017094	-0.034147
Banda 8'	-0.043356	0.005254	-0.727511	0.684705

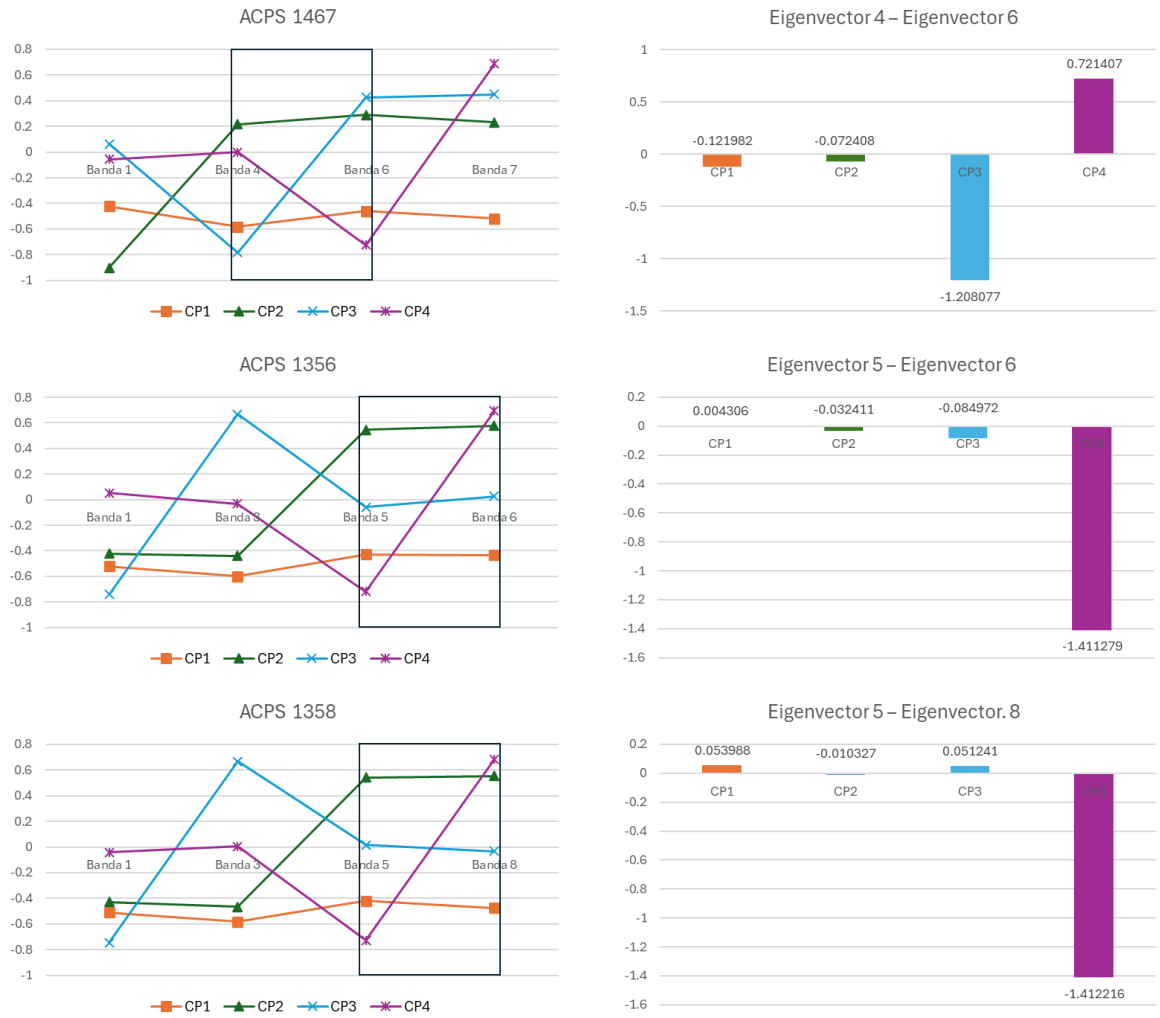
Para ilustrar de manera visual y cuantitativa el análisis de la matriz de autovectores, la Figura 4.1 presenta el comportamiento gráfico de los Componentes Principales (CP) para cada subconjunto ACPS procesado (1467, 1356 y 1358). En la columna izquierda, los gráficos de

líneas muestran la magnitud y dirección de los coeficientes a través de las bandas seleccionadas, destacando el contraste crítico entre las zonas de máxima reflectancia y absorción.

De manera específica, para determinar el componente óptimo en cada modelo, se analiza la diferencia algebraica entre los autovectores correspondientes a las bandas 4 y 6 para el subconjunto ACPS 1467; a las bandas 5 y 6 para el ACPS 1356; y a las bandas 5 y 8 para el caso del ACPS 1358. Complementariamente, los gráficos de barras ubicados en la columna derecha expresan de manera explícita la magnitud exacta de esta diferencia matemática para dichas bandas clave.

Figura 4.1.

Distribución de eigenvalores del Análisis de Componentes Principales (izquierda) y diferencia entre eigenvalores (derecha).



Un paso importante en el análisis de los resultados del ACPS es la selección de los CP adecuados para el cartografiado mineral. La técnica de Crosta fundamenta esta elección mediante el análisis cuantitativo de la matriz de autovectores. El criterio consiste en identificar el CP que posea la carga de autovector con la mayor diferencia de magnitud algebraica entre las bandas clave de reflectancia y absorción de cada mineral objetivo. Esto indica que dicho componente maximiza el contraste espectral y, por ende, aislará con mayor precisión la información mineralógica asociada a la alteración hidrotermal correspondiente.

Este proceso de decisión se visualiza en los gráficos de barras de la columna derecha de la Figura 4.1, donde se calculan las diferencias algebraicas de los autovectores entre las bandas críticas para cada modelo ACPS. En el caso del subconjunto ACPS 1467, enfocado en identificar la alteración argílica cuyo rasgo espectral principal se ubica entre las bandas 4 y 6 de las imágenes ASTER (ver Figura 3.8), la diferencia 'Eigenvector 4 - Eigenvector 6' revela que el CP3 (-1.21) presenta la mayor magnitud absoluta, lo que confirma matemáticamente como el CP que mapea la mayor varianza de alteración argílica en la escena. El signo negativo de dicha diferencia, visible también en el cruce opuesto de cargas en el gráfico de líneas de la izquierda, indica que el mineral se representará en tonos oscuros en la imagen original.

El componente principal CP3 presenta la mayor diferencia algebraica entre las bandas clave, lo cual indica una alta sensibilidad para detectar alteración argílica. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Crosta et al. (2003), quienes señalan que los componentes de orden superior concentran la varianza asociada a minerales hidroxilados en imágenes ASTER.

De manera análoga, para el modelo ACPS 1356 (enfocado en la alteración fílica, cuyo rasgo espectral principal se ubica entre las bandas 5 y 6; ver Figura 3.9) y el modelo ACPS 1358 (enfocado en la alteración propilítica, con su rasgo principal entre las bandas 5 y 8; ver Figura 3.10), el análisis de las diferencias 'Eigenvector 5 - Eigenvector 6' y 'Eigenvector 5 -

Eigenvector 8' señala al CP4 (-1.41) como el componente decisivo en ambos casos, al poseer picos de magnitud absoluta notablemente superiores al resto de los CP.

El componente principal CP4, aunque presenta una menor contribución a la varianza total, resalta patrones espectrales asociados a la alteración propilítica. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Crosta et al. (2003), quienes indican que los componentes de orden superior pueden concentrar información espectral menos dominante pero relevante para la identificación de minerales de alteración.

Este análisis demuestra cómo el método de Crosta elimina la subjetividad en la elección de componentes, asegurando que los mapas de alteración finales se correspondan matemáticamente con la firma espectral de los ensambles minerales de interés.

En la Tabla 4.2 se consolida el CP seleccionado y el signo de corrección correspondiente a cada tipo de alteración

Tabla 4.2.

Resumen de los componentes principales (CP) seleccionados según el ensamble mineralógico.

Tipo de alteración	CP seleccionada	Signo
Argílica (Alunita/Caolinita/ Dickita)	3	Negativo (-)
Fílica (Illita/Muscovita/Esmectita)	4	Negativo (-)
Propilítica (Clorita/Epidota/Calcita)	4	Negativo (-)

Una vez identificado el CP asociado a cada tipo de alteración, se procedió a evaluar su proyección espacial aplicando la «regla de brillantez» (Loughlin, 1991), la cual establece los siguientes criterios de interpretación cartográfica:

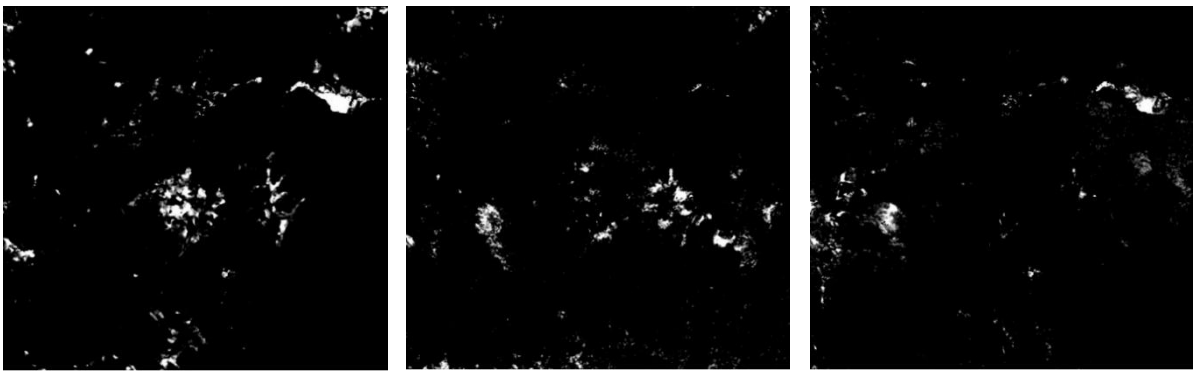
- Si la diferencia de los autovectores asociada al rasgo espectral característico resulta en un valor positivo (+), indica que los píxeles con alta concentración del mineral objetivo se representarán directamente en tonos claros (valores digitales altos).
- Si la diferencia de los autovectores asociada al rasgo espectral característico resulta en un valor negativo (-), indica que los píxeles con alta concentración del mineral objetivo

se representarán inicialmente en tonos oscuros (valores digitales bajos). En este escenario, la imagen del componente principal debe multiplicarse por un factor escalar de -1 para invertir espacialmente los valores, garantizando así que las anomalías destaquen visualmente en tonos blancos o grises claros.

En la presente investigación, el análisis de los autovectores para la identificación de la alteración argílica (CP3), así como de las alteraciones fílica y propilítica (CP4), determinó que los minerales de interés estaban representados por valores negativos en sus respectivos componentes. En consecuencia, se procedió a multiplicar dichos componentes por un factor de -1 (inversión) para resaltar las anomalías como píxeles brillantes en las imágenes que constituyen los resultados finales del ACPS (ver Figura 4.2).

Figura 4.2.

Imágenes resultantes del Análisis de Componentes Principales Selectivos.



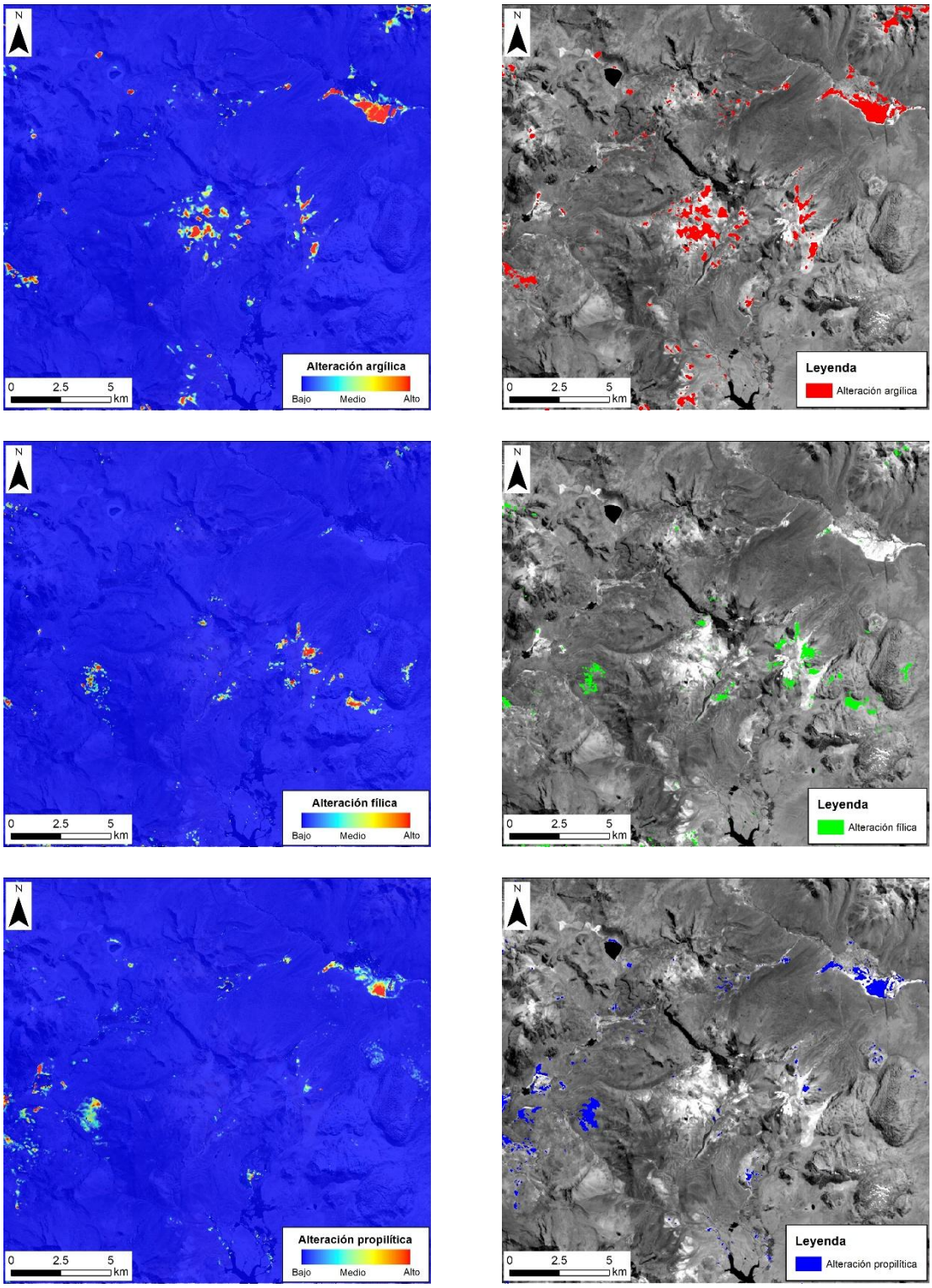
Los componentes principales generados constituyen imágenes continuas en escala de grises. Con el objetivo de discriminar las zonas anómalas, correspondientes a la alteración hidrotermal, del ruido de fondo o background geológico, se aplicó un método de umbralización estadística basado en la distribución normal de los datos. Para ello, se calculó la media aritmética (μ) y la desviación estándar (σ) de los valores de los píxeles en cada imagen de fracción mineral.

Posteriormente, se establecieron umbrales de corte para clasificar la intensidad de la alteración (Carranza & Hale, 2002), definiendo como anomalías fuertes a aquellos píxeles con valores $\geq \mu + 2\sigma$. Este tratamiento estadístico permite transformar las imágenes continuas en mapas

temáticos discretos, delimitando con precisión espacial las áreas de mayor interés prospectivo en el sector de Ticaco-Susapaya (ver Figura 4.3).

Figura 4.3.

Distribución espacial de ensambles de minerales asociados a alteraciones hidrotermales.

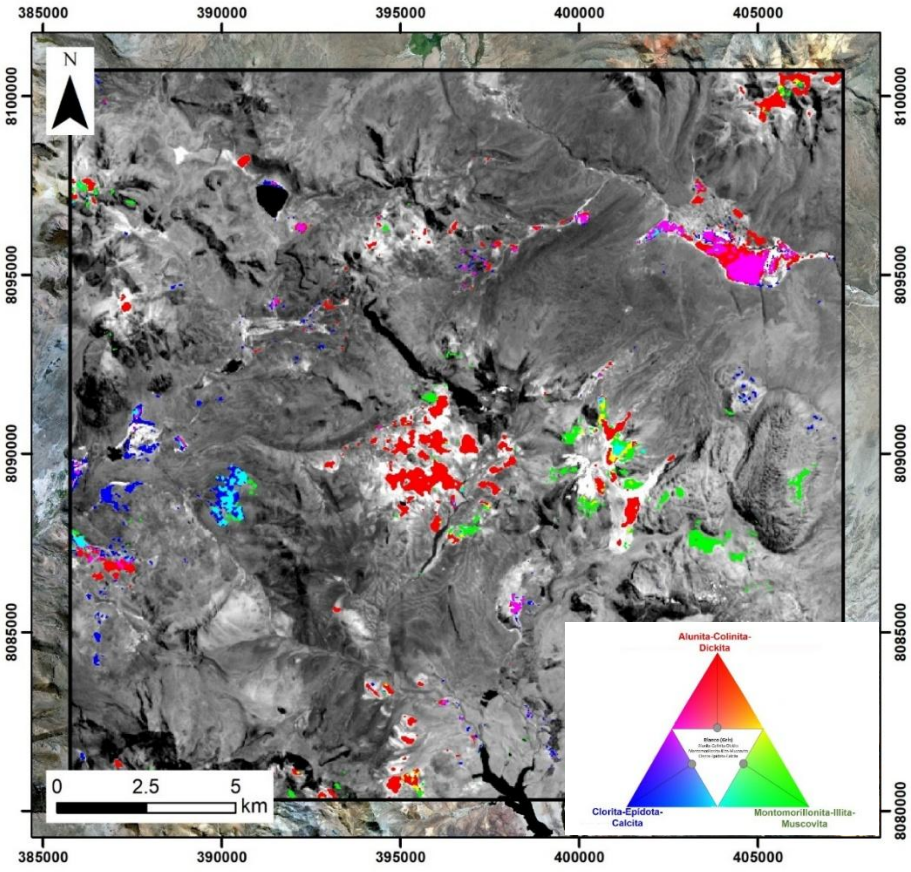


Nota. La columna izquierda exhibe el mapa continuo del componente principal, mientras que la derecha aísla las anomalías fuertes correspondientes a los ensambles argílico (rojo), fílico (verde) y propilítico (azul).

Finalmente, las imágenes de contenido mineral previamente umbralizadas fueron exportados a un formato vectorial (shape file, compatible con la mayoría de los sistemas de información geográfica) y se integraron mediante una composición en falso color (RGB). Siguiendo los estándares cartográficos de prospección geológica, se asignó el canal Rojo (R) a la alteración argílica, el canal Verde (G) a la alteración fílica y el canal Azul (B) a la alteración propilítica (ver Figura 4.4). Esta superposición espacial permite visualizar e interpretar de manera directa la zonación del sistema hidrotermal en el área de Ticaco-Susapaya.

Figura 4.4.

Mapa integrado de ensambles de minerales asociados a alteraciones hidrotermales.



Nota. La columna izquierda exhibe el mapa continuo del componente principal, mientras que la derecha aísla las anomalías fuertes correspondientes a los ensambles argílico (rojo), fílico (verde) y propilítico (azul).

Desde una perspectiva metalogenética, el modelo facilita la delimitación de los núcleos anómalos de mayor temperatura, representados por los ensambles argílico y fílico, los cuales están rodeados por sus respectivos halos de alteración periférica de menor temperatura (ensamble propilítico). En consecuencia, el mapa temático constituye una herramienta predictiva importante para optimizar la toma de decisiones en las fases tempranas de exploración minera.

4.2. Validación de resultados

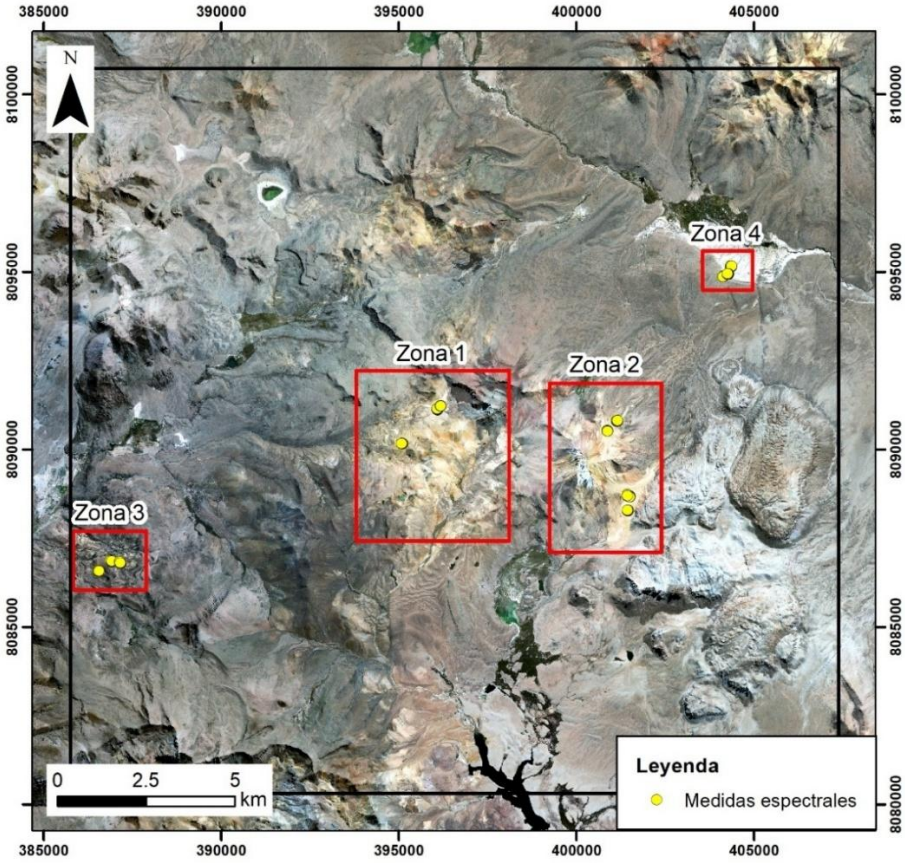
Los resultados derivados de la aplicación del ACPS a las imágenes satelitales ASTER constituyen modelos predictivos de la distribución mineralógica. Para que estos modelos adquieran validez científica y aplicabilidad operativa en la prospección minera, resulta imprescindible contrastarlos con la denominada «verdad de terreno» (ground truth). Este procedimiento de validación permite corroborar la fiabilidad del cartografiado espectral, mitigando la incertidumbre asociada a posibles falsos positivos inducidos por similitudes radiométricas, efectos de iluminación topográfica o ruido residual del sensor (Congalton & Green, 2019).

En el caso específico del sector de Ticaco-Susapaya, la validación empírica se fundamentó en la medición directa de la respuesta electromagnética de los afloramientos rocosos alterados. Para tal fin, se ejecutaron dos (02) campañas de campo con el Programa de Geotermia de la Dirección de Recursos Minerales y Energéticos del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), realizadas en los años 2019 y 2022, enfocadas en las áreas que presentaban las anomalías espectrales satelitales más significativas. Durante estas intervenciones, se

delimitaron cuatro (4) zonas de interés (ver Figura 4.5) y se levantaron 14 puntos de control, en los cuales se registró un total de 126 mediciones espectrales in situ.

Figura 4.5.

Distribución de los puntos de toma de firmas espectrales y medidas GNSS.



4.2.1. Protocolo de medición de datos

El procedimiento metodológico para la recolección de los datos (ver Figura 4.6) se ejecutó siguiendo una estricta planificación espacial de los puntos de interés. Para asegurar mediciones consistentes con las leyes de la física óptica y evitar la interferencia de la dispersión atmosférica a nivel del suelo. El protocolo de medición in situ contempló las siguientes etapas:

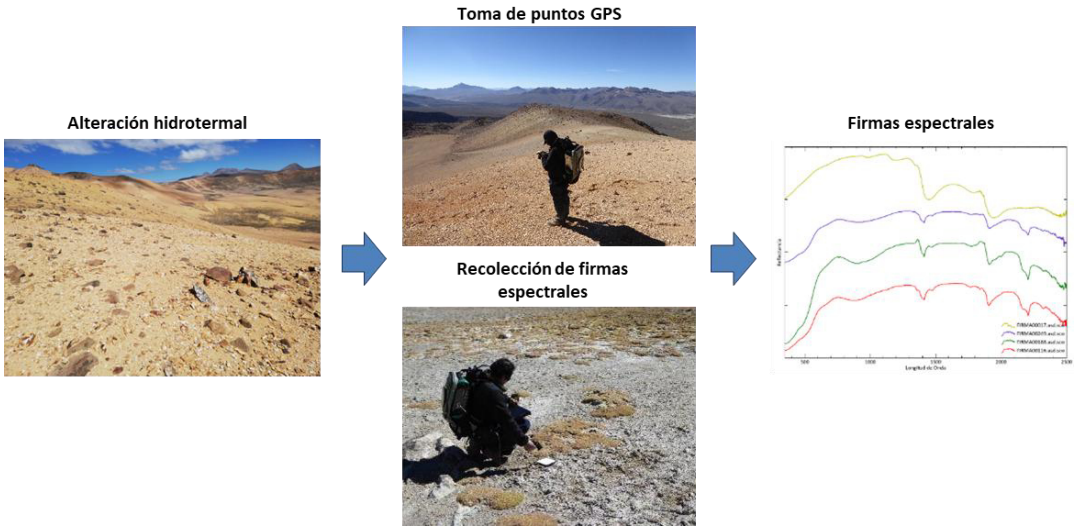
- **Calibración radiométrica:** Previo a la toma de datos, se calibró el equipo utilizando un panel de referencia blanco de Spectralon®, el cual posee una reflectancia cercana al 100 % en todo el rango operativo.

- **Toma de firmas espectrales:** En cada estación de muestreo, se registraron múltiples espectros sobre superficies frescas y alteradas de la roca. Estas lecturas fueron promediadas para minimizar la relación señal/ruido (SNR) y garantizar la representatividad de la muestra (Kokaly et al., 2017).
- **Geoposicionamiento:** De manera simultánea a la medición óptica, se registró la ubicación geográfica exacta de cada punto utilizando un receptor GPS GeoExplorer XH-6000.

Para la recolección de firmas espectrales en terreno y validación de los resultados, se tomó en consideración dos factores críticos: la representatividad espacial y la heterogeneidad mineralógica a nivel de sub-píxel. Dado que las bandas SWIR del sensor ASTER poseen una resolución espacial de 30 x 30 metros, se diseñó un esquema de muestreo sistemático basado en matrices de 3x3 con un espaciamiento de 10 metros entre cada punto de lectura, lo que garantiza la cobertura íntegra del área equivalente a un píxel satelital.

Figura 4.6.

Secuencia metodológica del trabajo de validación in situ.

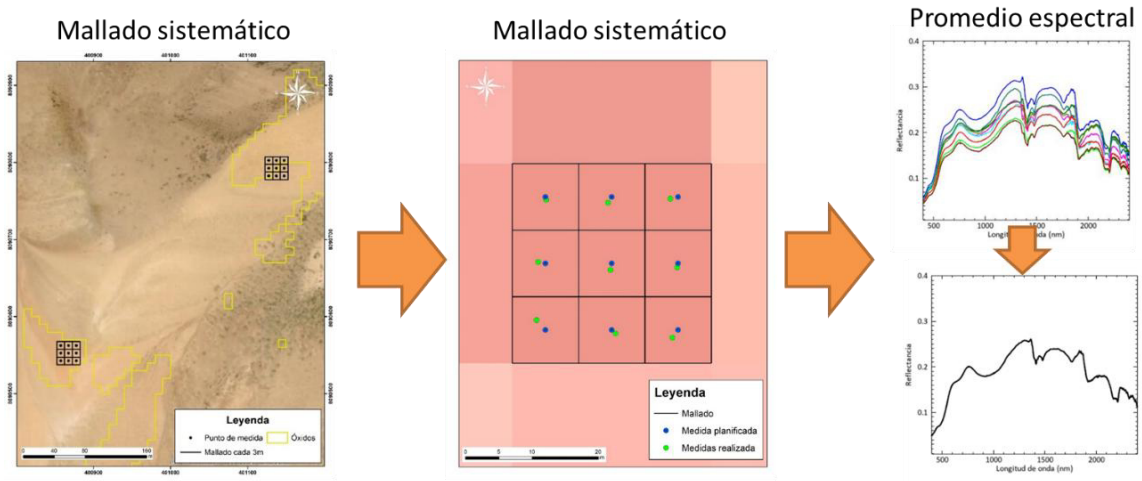


Nota. Ilustra el registro de geoposicionamiento (GPS) simultáneo a la recolección de espectros de reflectancia sobre los afloramientos, culminando con la obtención de las firmas espectrales analíticas.

Como resultado de este diseño, se obtuvieron nueve firmas espectrales in situ por cada cuadrícula, las cuales fueron matemáticamente promediadas para generar una única firma espectral compuesta (ver Figura 4.7). La obtención de este espectro integrado mitiga el sesgo de las mediciones puntuales y resulta verdaderamente representativo de la reflectancia del terreno a escala macroscópica, permitiendo una correlación directa, robusta y fiable con el valor radiométrico capturado por la imagen ASTER.

Figura 4.7.

Esquema metodológico de escalamiento espacial.



Nota. Se utilizó muestreos sistemáticos mediante matrices de 3x3 (equivalente a un píxel ASTER). Ilustra la recolección de múltiples firmas espectrales en terreno y su posterior premediación matemática para obtener un único espectro compuesto, representativo para la validación satelital.

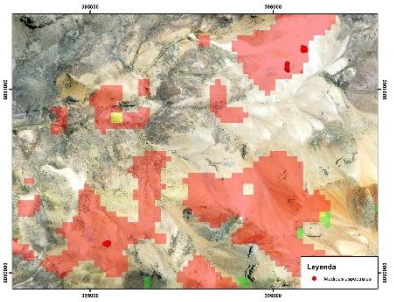
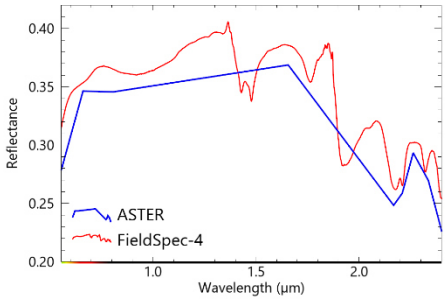
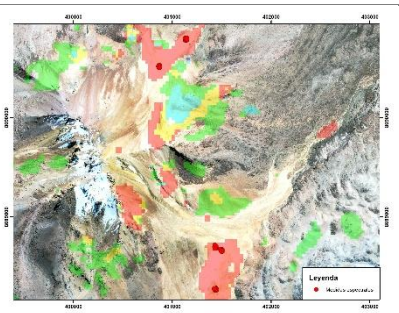
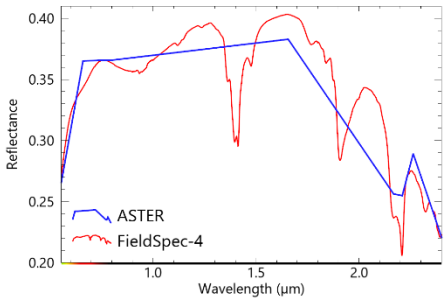
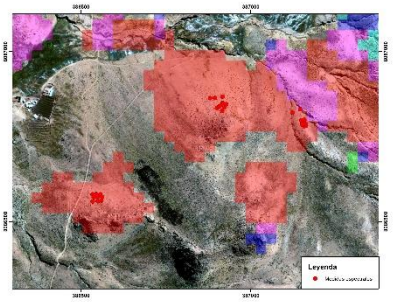
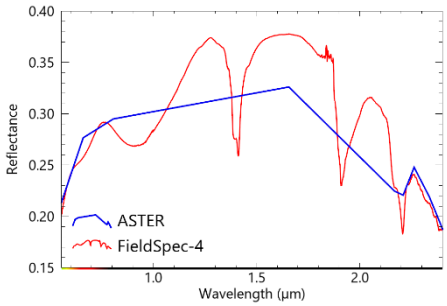
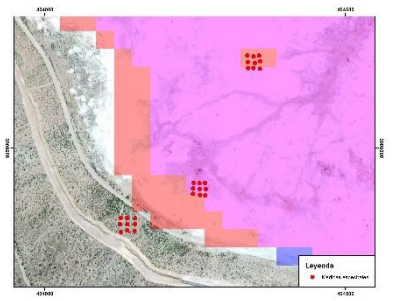
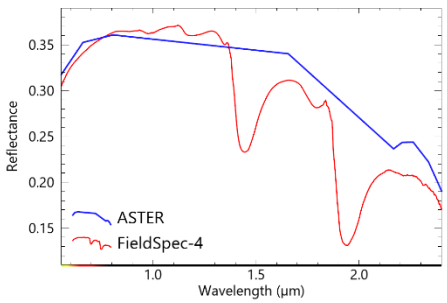
4.2.2. Zonas de validación espectral

Como evidencia gráfica del proceso de emparejamiento espectral, la Figura 4.8 presenta una comparativa para las distintas zonas de interés evaluadas, con la distribución espacial y el diseño de la malla de muestreo *in situ* sobre imágenes de alta resolución. Por su parte, la columna derecha exhibe la superposición de los perfiles radiométricos; en ella, se contrastan las curvas continuas y de alta resolución capturadas por el espectrómetro FieldSpec 4 (líneas de

colores) frente a la firma espectral discreta extraída del píxel ASTER correspondiente (línea negra gruesa).

Figura 4.8.

Comparación de firmas espectrales de campo con imagen ASTER.

Zona	Distribución de toma de firmas espectrales	Firmas espectrales ASTER y FieldSpec
1		
2		
3		
4		

Nota. La columna izquierda muestra la distribución del muestreo in situ sobre a la cartografía de alteraciones; la derecha contrasta las firmas continuas de campo (línea roja, FieldSpec-4) frente a la respuesta discreta satelital (línea azul, ASTER).

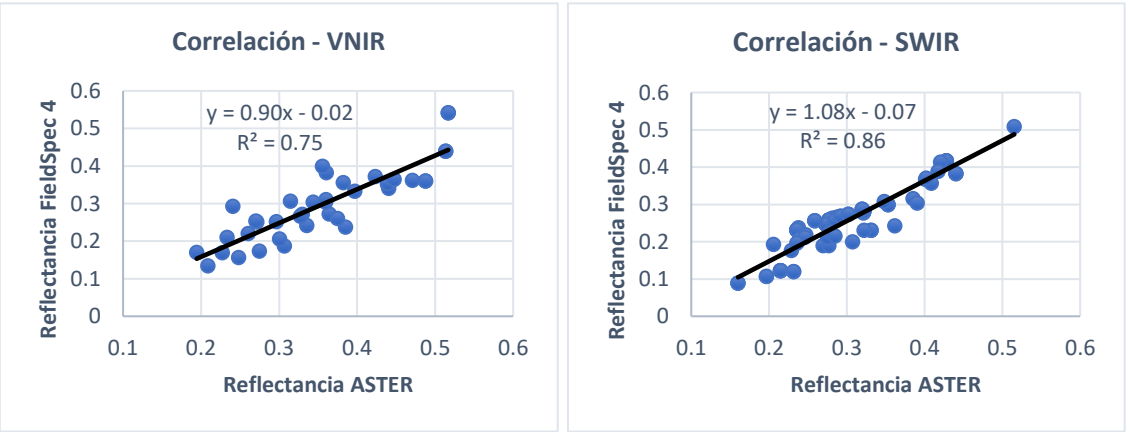
Esta representación visual permite apreciar de manera directa la coincidencia morfológica y la alineación precisa de los principales rasgos de absorción en la región SWIR, sustentando gráficamente los altos coeficientes de correlación estadística descritos con anterioridad. Mayor detalle sobre la zona de validación se presenta en el Apéndice A.

Las firmas espectrales recolectadas durante las campañas de campo fueron procesadas mediante el software ViewSpec Pro, para calibrar las mediciones y obtener los valores absolutos del parámetro físico de reflectancia. Posteriormente, se realizó un análisis comparativo entre estos espectros *in situ* y las firmas espectrales extraídas directamente de los píxeles de las imágenes ASTER. La evaluación evidenció una alta correspondencia en la morfología de las curvas y en la posición de los rasgos de absorción principales, corroborando de manera cualitativa la correcta identificación de los minerales.

Para otorgar rigor cuantitativo a esta validación, se calculó el grado de ajuste estadístico entre los datos empíricos del espectrómetro FieldSpec 4 y los valores de reflectancia satelital. El análisis arrojó coeficientes de correlación altamente significativos: 0.75 para las longitudes de onda del VNIR, y 0.86 para el SWIR (ver Figura 4.9). Estos resultados corroboran estadísticamente la precisión radiométrica de los productos satelitales procesados.

Figura 4.9.

Correlación de datos de reflectancia ASTER-FieldSpec 4.



4.3. Discusión de resultados

El éxito en la aplicación del ACPS en el sector de Ticaco-Susapaya concuerda con los resultados obtenidos en las investigaciones de Pour & Hashim (2011b) y Bodruddoza Mia & Fujimitsu (2012). Estos autores demostraron que la reducción de dimensionalidad al uso de cuatro bandas en el sensor ASTER minimiza significativamente la varianza no deseada (albedo y topografía). Al igual que en los estudios de estos autores sobre cinturones porfiríticos y epitermales en regiones áridas, los resultados en Ticaco-Susapaya evidencian que el ACPS aislar minerales específicos, confirmando que es un método robusto para la cartografía espectral en etapas *greenfield*.

La delimitación de anomalías fuertes mediante el umbral de $\geq \mu + 2\sigma$ aplicada en este estudio ha demostrado ser altamente efectiva. Este hallazgo respalda las conclusiones metodológicas de Carranza & Hale (2002) y Hosseinjani Zadeh et al. (2014). Estos autores establecieron que los valores anómalos superiores a dos desviaciones estándar en imágenes de fracción mineral tienen la mayor correlación espacial con ocurrencias minerales conocidas. Al contrastar los mapas con la realidad litológica de Ticaco-Susapaya, se verifica empíricamente que este corte estadístico no es arbitrario, sino que define con alta precisión geométrica el núcleo de la alteración.

La disposición espacial de los ensambles hidrotermales identificados mediante la composición RGB (argílico, fílico y propilítico) refleja un patrón de zonación concéntrica que guarda estricta coherencia con los modelos metalogenéticos clásicos descritos por Lowell & Guilbert (1970) y actualizados por Sillitoe (2010). Al igual que en yacimientos tipo pórfido de la cordillera andina, el modelo predictivo de Ticaco-Susapaya presenta un núcleo de alta temperatura y acidez (ensambles con fuerte absorción en ~2.20 μm y ~2.16 μm) rodeado por un halo de temperatura gradualmente menor (ensamble propilítico).

Uno de los aportes más significativos de este trabajo es la validación de los modelos predictivos satelitales mediante instrumentación analítica en terreno. La prospección mediante imágenes ASTER presenta limitaciones inherentes a su resolución espacial (30 m en el subsistema SWIR), lo que puede generar mezclas espectrales a nivel de píxel. Sin embargo, las campañas de campo y el uso del espectrómetro portátil ASD FieldSpec 4 Hi-Res permitieron resolver esta incertidumbre.

Finalmente, es pertinente señalar que la resolución del sensor en el espectro SWIR dificulta discriminar transiciones sutiles (como la superposición argílico-fílica) debido a la cercanía de sus rasgos de absorción (2.16 μm y 2.20 μm). Por ello, estos mapas deben interpretarse como vectores prospectivos iniciales, los cuales requieren integrarse con estudios de Difracción de Rayos X (DRX), geoquímica (ICP-MS) y/o geofísica para confirmar la existencia de mineralización económica.

5. CONCLUSIONES

El desarrollo metodológico y la aplicación de técnicas de teledetección espacial en la provincia de Ticaco-Susapaya permiten establecer las siguientes conclusiones fundamentales:

- El análisis matemático de las matrices de autovectores confirmó la excelente capacidad del ACPS para discriminar las firmas espectrales de los distintos ensambles minerales. Asimismo, e determinó que la reducción de dimensionalidad a subconjuntos específicos de cuatro bandas (en la región SWIR) fue un paso crítico y exitoso. Esta selección estratégica maximizó el contraste entre las bandas de máxima reflectancia y profunda absorción, permitiendo aislar con precisión estadística la alteración argílica (en el CP3) y las alteraciones fílica y propilítica (en el CP4).
- Se demostró que la aplicación del ACPS sobre imágenes satelitales ASTER constituye una herramienta metodológica robusta y eficaz para la identificación y cartografiado prospectivo de zonas de alteración hidrotermal en el sector de Ticaco-Susapaya, Tacna. Asimismo, permite optimizar la delimitación de blancos de exploración (targets) en etapas tempranas de la exploración minera.
- Se validó de manera concluyente la fiabilidad de las anomalías espectrales satelitales mediante observaciones y toma de firmas espectrales en campo. El análisis comparativo realizado con los datos tomados con el espectrorradiómetro portátil ASD FieldSpec 4 Hi-Res demostraron una alta correspondencia física con los modelos predictivos del ASTER.

6. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos y la experiencia operativa desarrollada durante la investigación, se proponen las siguientes recomendaciones metodológicas y prospectivas:

- Se recomienda superponer los mapas de alteración hidrotermal generados en este estudio con información estructural (lineamientos, fallas), datos geoquímicos de superficie y levantamientos geofísicos. Esta integración en un Sistema de Información Geográfica (SIG) permitirá definir con mayor exactitud los *targets* de perforación para futuros proyectos mineros en el sector de Ticaco-Susapaya, Tacna.
- Para estudios de detalle a escala local (1:10,000 o superior), se sugiere el uso de imágenes WorldView-3, que ofrecen mayor resolución espacial (3.5 m en el SWIR) y espectral, o el uso de datos hiperespectrales como el sensor PRISMA. Estos permitirían mapear variaciones cristalinas sutiles, tales como la cristalinidad de la illita o los cambios composicionales en las cloritas.
- Aunque el espectrómetro de campo validó la mineralogía de alteración, se recomienda realizar muestreos sistemáticos de roca para análisis de difracción de rayos X (DRX) y espectrometría de masas (ICP-MS) en zonas de máxima anomalía argílica y fílica. Ello permitirá confirmar tanto la alteración como la posible presencia de mineralización económica (Cu, Au, Ag) asociada a estos sistemas.

Referencias

Abrams, M. (2002). *ASTER User Handbook, v2: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Relection Radiometer*.

Acevedo, M. (2013, March). *Apuntes de astronomía. Blogspot.* https://mauricio1949.blogspot.com/2013/03/

Berk, A., Anderson, G. P., Bernstein, L. S., Acharya, P. K., Dothe, H., Matthew, M. W., Adler-Golden, S. M., Chetwynd, Jr., J. H., Richtsmeier, S. C., Pukall, B., Allred, C. L., Jeong, L. S., & Hoke, M. L. (1999). MODTRAN4 radiative transfer modeling for atmospheric correction. *Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III*, *3756*, 348. https://doi.org/10.1117/12.366388

Bodruddoza Mia, M., & Fujimitsu, Y. (2012). Mapping hydrothermal altered mineral deposits using Landsat 7 ETM+ image in and around Kuju volcano, Kyushu, Japan. *Journal of Earth System Science 2012 121:4*, *121*(4), 1049–1057. https://doi.org/10.1007/S12040-012-0211-9

Brandmeier, M., Erasmi, S., Hansen, C., Höweling, A., Nitzsche, K., Ohlendorf, T., Mamani, M., & Wörner, G. (2013). Mapping patterns of mineral alteration in volcanic terrains using ASTER data and field spectrometry in Southern Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, *48*, 296–314. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.09.011

Canty, M. J. . (2014). *Image Analysis, Classification and Change Detection in Remote Sensing, 3rd Edition*.

Carranza, E. J. M., & Hale, M. (2002). Mineral imaging with Landsat Thermatic Mapper data for hydrothermal alteration mapping in heavily vegetated terrane. *International Journal of Remote Sensing*, *23*(22), 4827–4852. https://doi.org/10.1080/01431160110115014

Chavez, J. P. (1996, January 1). *Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.

https://www.researchgate.net/publication/236769129_Image-Based_Atmospheric_Corrections_-_Revisited_and_Improved

Chuvieco, E. (2008). Teledetección ambiental, (3rd ed., p. 594). *Ariel Ciencia, Ariel Ciencia*, 594. https://books.google.com/books/about/Teledeteccion_ambiental.html?hl=es&id=aKsNXCVCtcQC

Clark, R. N. (1999). Spectroscopy of rocks and minerals and principles of spectroscopy. In *Manual of remote sensing, Volume 3, Remote sensing for the earth sciences* (pp. 3–58). Wiley.

Cooley, T., Anderson, G. P., Felde, G. W., Hoke, M. L., Ratkowski, A. J., Chetwynd, J. H., Gardner, J. A., Adler-Golden, S. M., Matthew, M. W., Berk, A., Bernstein, L. S., Acharya, P. K., Miller, D., & Lewis, P. (2002). FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its applications and validation. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, *3*, 1414–1418. https://doi.org/10.1109/igarss.2002.1026134

Crosta, A. P. and M. J. M. (1989, October). *Enhancement of Landsat Thematic Mapper Imagery for Residual Soil Mapping in SW Minas Gerais State, Brazil A Prospecting Case History in Greenstone Belt Terrain*. Proceedings of the 7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1351424

Crosta, A. P., De Souza Filho, C. R., Azevedo, F., & Brodie, C. (2003). Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, *24*(21), 4233–4240. https://doi.org/10.1080/0143116031000152291

Di Tommaso, I., & Rubinstein, N. (2007). Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*, *32*(1–2), 275–290. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.05.004

Feynman, R. P. ., Leighton, R. B. ., & Sands, M. L. . (2005). *The Feynman lectures on physics: Vol. 1: Mainly Mech…*. Pearson/Addison-Wesley.

Hecker, C., Van Ruitenbeek, F. J. A., Van Der Werff, H. M. A., Bakker, W. H., Hewson, R. D., & Van Der Meer, F. D. (2019). Spectral absorption feature analysis for finding ore: A tutorial on using the method in geological remote sensing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, *7*(2), 51–71. https://doi.org/10.1109/MGRS.2019.2899193

Hosseinjani Zadeh, M., Tangestani, M. H., Velasco Roldan, F., & Yusta, I. (2014). Spectral characteristics of minerals in alteration zones associated with porphyry copper deposits in the middle part of Kerman copper belt, SE Iran. *Ore Geology Reviews*, *62*, 191–198. https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2014.03.013

Hunt, G. (1970). *Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks : I silicate minerals*.

Jensen, J. R. (2005). Mosaicking. *Introductory Digital Image Processing - A Remote Sensing Perspective*, (May), 250. https://www.scribd.com/document/667034923/JENSEN-J-R-Introductory-Digital-Image-Processing-a-Remote-Sensing-Perspective

Jensen, J. R. (2007). Remote Sensing of the Environment, An Earth Resource Perspective 2nd Edition by John R. Jensen. In Pearson Prentice Hall (Ed.), *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Prentice Hall Series in Geographic Information Science. https://books.google.com/books/about/Remote_Sensing_of_the_Environment.html?hl=es&id=A6YsAQAAMAAJ

Jr., P. S. C., & Kwarteng, A. Y. (1989). Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, *55*(3), 339–348.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). Remote Sensing and Image Intepretation, 7th Edition. *Remote Sensing and Image Interpretation*, 360–363. https://www.wiley.com/en-nz/Remote+Sensing+and+Image+Interpretation%2C+7th+Edition-p-9781118343289

Ling, S., Sanny, J., & Moebs, W. (2021). *Física universitaria, Volumen 3*. 606–612.

Liu, L., Zhuang, D. F., Zhou, J., & Qiu, D. S. (2011). Alteration mineral mapping using masking and Crosta technique for mineral exploration in mid-vegetated areas: A case study in Areletuobie, Xinjiang (China). *International Journal of Remote Sensing*, *32*(7), 1931–1944. https://doi.org/10.1080/01431161003639678

Lowell, J. D., & Guilbert, J. M. (1970). Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, *65*(4), 373–408. https://doi.org/10.2113/GSECONGEO.65.4.373

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, *17*(7), 1425–1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714

Mohamed El-Desoky, H., Soliman, N., Ahmed Heikal, M., & Moustafa Abdel-Rahman, A. (2021). Mapping hydrothermal alteration zones using ASTER images in the Arabian–Nubian Shield: A case study of the northwestern Allaqi District, South Eastern Desert, Egypt. *Journal of Asian Earth Sciences: X*, *5*(7), 100060. https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2021.100060

Moore, F., Rastmanesh, F., Asadi, H., & Modabberi, S. (2008). Mapping mineralogical alteration using principal-component analysis and matched filter processing in the Takab area, north-west Iran, from ASTER data. *International Journal of Remote Sensing*, *29*(10), 2851–2867. https://doi.org/10.1080/01431160701418989

Pirajno, F. (2009). Hydrothermal processes and mineral systems. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*, 1–1250. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8613-7

Pour, A. B., & Hashim, M. (2011a). Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, *42*(6), 1309–1323. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.07.017

Pour, A. B., & Hashim, M. (2011b). Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, *42*(6), 1309–1323. https://doi.org/10.1016/J.JSEAES.2011.07.017

Richards, J. A. (2013). Remote sensing digital image analysis: An introduction. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*, *9783642300622*, 1–494. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30062-2

Rodriguez Aycho, F. G. (2008). Determinación de zonas de alteración hidrotermal mediante imágenes ASTER, oeste de Cajamarca. *Universidad Nacional de San Antonio Abad Del Cusco*.

Rouse, J. W. , Jr., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp., Vol. 1, Sect. A*.

Rowan, L. C., & Mars, J. C. (2003). Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, *84*(3), 350–366. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00127-X

Rowan, L. C., Schmidt, R. G., & Mars, J. C. (2006). Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Remote Sensing of Environment*, *104*(1), 74–87. https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.05.014

Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, *14*(3–4), 157–183. https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4

Salomonson, V. V., & Appel, I. (2004). Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index. *Remote Sensing of Environment*, *89*(3), 351–360. https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.016

Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, *105*(1), 3–41. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3

Sobrino, J. (2000). *Teledetección* (Universidad de Valencia, Ed.). https://www.researchgate.net/publication/267024245_Teledeteccion

Tangestani, M. H., & Moore, F. (2002). Porphyry copper alteration mapping at the Meiduk area, Iran. *International Journal of Remote Sensing*, *23*(22), 4815–4825. https://doi.org/10.1080/01431160110115564

Testa, F. J., Villanueva, C., Cooke, D. R., & Zhang, L. (2018). Lithological and Hydrothermal Alteration Mapping of Epithermal, Porphyry and Tourmaline Breccia Districts in the Argentine Andes Using ASTER Imagery. *Remote Sensing 2018, Vol. 10, Page 203*, *10*(2), 203. https://doi.org/10.3390/rs10020203

Van der Meer, F. D., Van der Werff, H. M. A., Van Ruitenbeek, F. J. A., Hecker, C. A., Bakker, W. H., Noomen, M. F., van der Meijde, M., Carranza, E. J. M., de Smeth, J. B., & Woldai, T. (2012). Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *14*(1), 112–128. https://doi.org/10.1016/J.JAG.2011.08.002

Yamaguchi, Y., Kahle, A. B., Tsu, H., Kawakami, T., Pniel, M., Kahle, A. B., & Pniel, M. (1998). Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *36*(4).

APÉNDICE

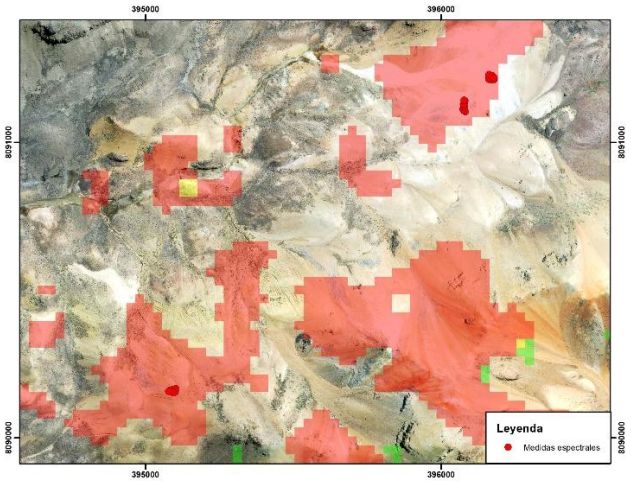
Apéndice A. Validación de los resultados del Análisis de Componentes Principales

Zona 1:

Esta área se ubica en la parte central de la zona de estudio. En este sector se llevó a cabo la validación en campo de las anomalías espectrales correspondientes a la alteración argílica, las cuales fueron previamente identificadas mediante el procesamiento multiespectral de imágenes ASTER (ver Figura A.1).

Figura A.1.

Distribución espacial de las mediciones espectrales in situ para la Zona 1



Nota. Las zonas de alteración argílica, identificadas a partir de las imágenes ASTER, se delimitan mediante polígonos de color rojo. Por su parte, las ubicaciones donde se levantaron las firmas espectrales en campo se indican con puntos del mismo color.

La comprobación se realizó mediante 27 mediciones espectrales distribuidas en tres puntos de control, empleando el espectrorradiómetro ASD FieldSpec 4 conforme a la metodología establecida. El análisis de estas mediciones permitió confirmar la presencia de minerales diagnósticos, tales como la alunita y la caolinita (ver Figura A.2), corroborando así el mapeo satelital de dicha alteración.

Figura A.2.

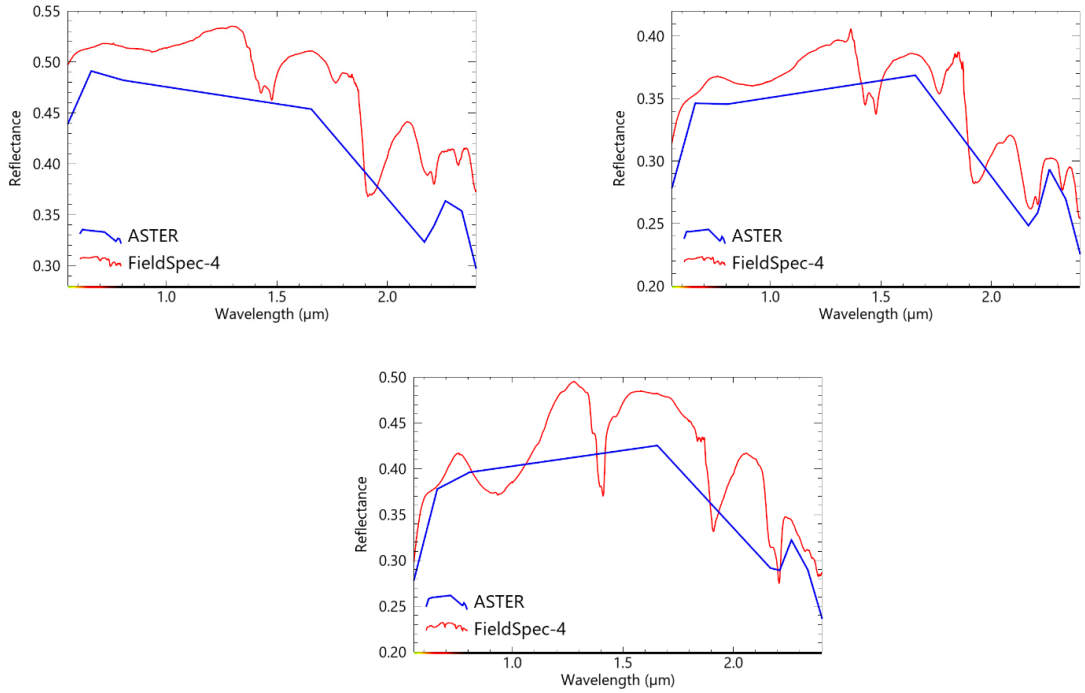
Imagen panorámica correspondiente a la Zona 1 del área de estudio



En este sector, los resultados del procesamiento satelital fueron validados de manera satisfactoria. Esto se logró al correlacionar espacialmente las anomalías extraídas de las imágenes ASTER con las firmas espectrales de la alteración argílica obtenidas *in situ* (ver Figura A.3).

Figura A.3.

Comparación de firmas espectrales de campo con imagen ASTER para la Zona 1



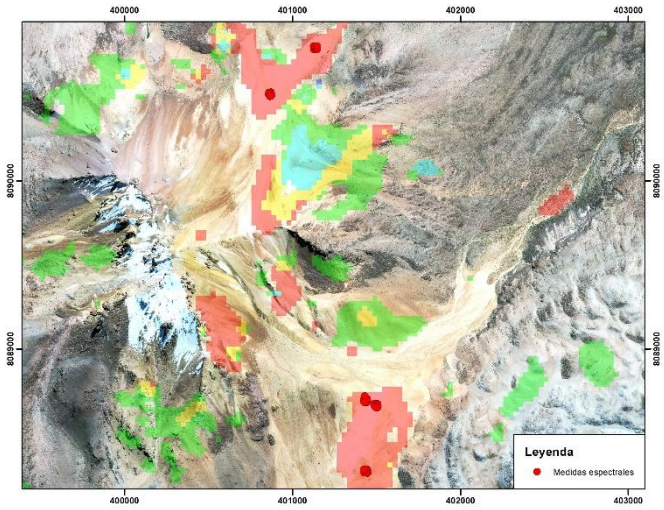
Nota. Las firmas espectrales en color azul representan los datos de reflectancia de las imágenes ASTER, en tanto que las de color rojo corresponden a las mediciones registradas *in situ* con el espectrorradiómetro ASD FieldSpec 4.

Zona 2:

Esta área se ubica en la parte oriental de la zona de estudio. En este sector también se llevó a cabo la validación en campo de las anomalías espectrales asociadas a alteración argílica y fílica, las cuales fueron previamente identificadas mediante el procesamiento multiespectral de imágenes ASTER (ver Figura A.4).

Figura A.4.

Distribución espacial de las mediciones espectrales in situ para la Zona 2.



Nota. Las zonas de alteraciones argílica y fílica, identificadas a partir de las imágenes ASTER, se delimitan mediante polígonos de color rojo y verde, respectivamente. Por su parte, las ubicaciones donde se levantaron las firmas espectrales en campo se indican con puntos de color rojo.

Para la validación de los resultados, se ejecutaron 45 mediciones espectrales *in situ* distribuidas en cinco puntos de control, empleando el espectrorradiómetro ASD FieldSpec 4 bajo los lineamientos metodológicos establecidos. La evaluación de estos espectros ratificó la presencia de minerales índice, tales como la illita y la caolinita (ver Figura A.5), validando así la cartografía satelital de dichas alteraciones hidrotermales.

Figura A.5.

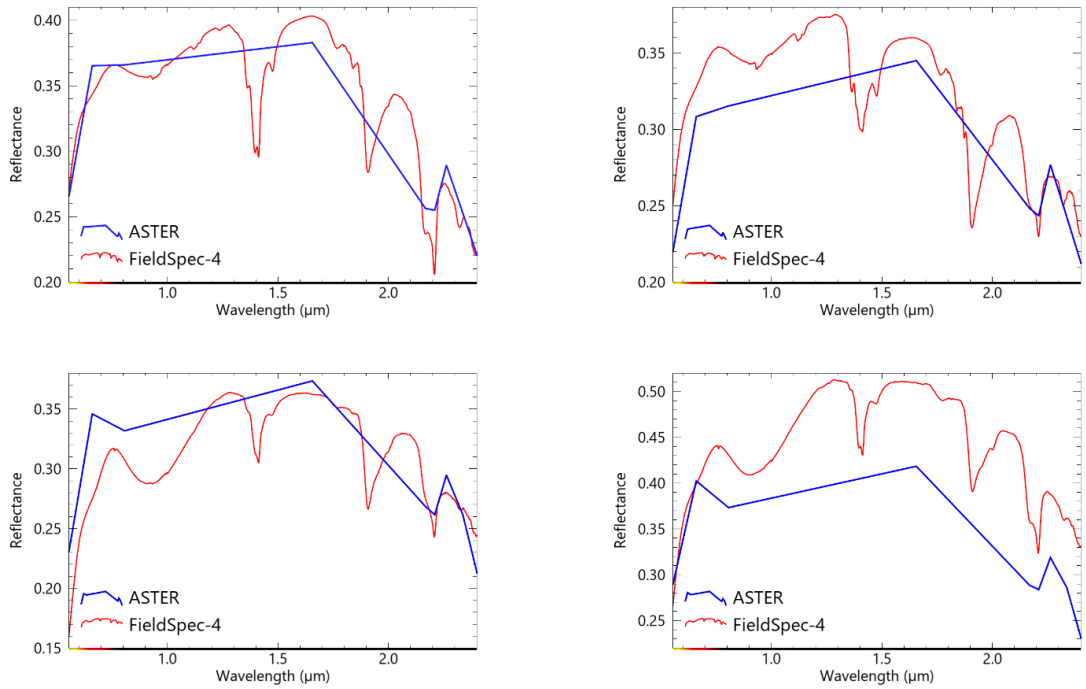
Imagen panorámica correspondiente a la Zona 2 del área de estudio.



En este sector, al igual que la Zona 1, los resultados del procesamiento satelital fueron validados de manera satisfactoria (ver Figura A.6).

Figura A.6.

Comparación de firmas espectrales de campo con imagen ASTER para la Zona 2.



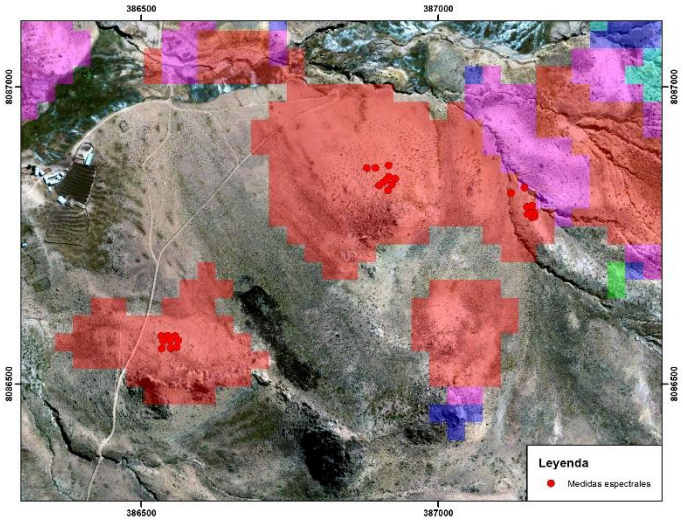
Nota. Las firmas espectrales en color azul representan los datos de reflectancia de las imágenes ASTER, en tanto que las de color rojo corresponden a las mediciones registradas *in situ* con el espectrorradiómetro ASD FieldSpec 4.

Zona 3:

Esta área se localiza en el cuadrante suroccidental de la zona de estudio. Siguiendo el mismo procedimiento de las zonas anteriores, en este sector se ejecutó la validación *in situ* de las anomalías correspondientes a las alteraciones argílica y propilítica, delimitadas previamente a través del procesamiento multiespectral de las imágenes ASTER (ver Figura A.7).

Figura A.7.

Distribución espacial de las mediciones espectrales in situ para la Zona 3.



Nota. Las zonas de alteraciones argílica y propilítica, identificadas a partir de las imágenes ASTER, se delimitan mediante polígonos de color rojo y azul, respectivamente. Por su parte, las ubicaciones donde se levantaron las firmas espectrales en campo se indican con puntos de color rojo.

Para la validación de esta zona, se ejecutaron 27 mediciones espectrales *in situ* distribuidas en tres puntos de control, empleando el espectrorradiómetro ASD FieldSpec 4 bajo los lineamientos metodológicos establecidos. La evaluación de estos espectros ratificó la presencia de minerales índice, tales como la caolinita y la epidota (ver Figura A.8), validando de esta manera la cartografía satelital de las alteraciones correspondientes.

Figura A.8.

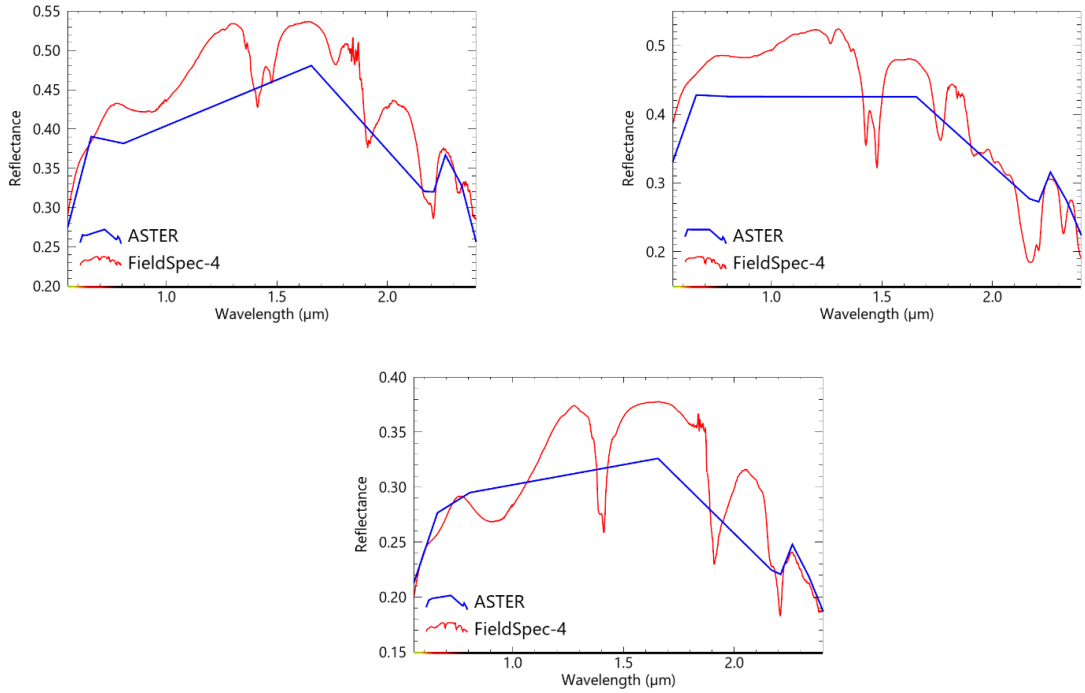
Imagen panorámica correspondiente a la Zona 3 del área de estudio.



En este sector, manteniendo la consistencia con las zonas previamente analizadas, la cartografía generada mediante el procesamiento multiespectral fue validada de forma concluyente (ver Figura A.9).

Figura A.9.

Comparación de firmas espectrales de campo con imagen ASTER para la Zona 3.



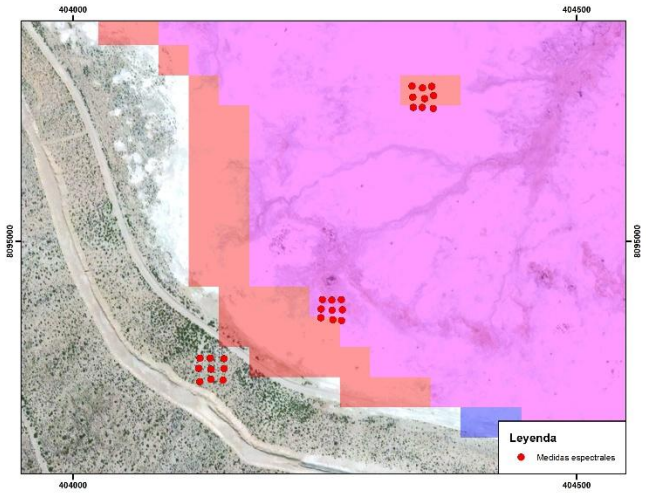
Nota. Las firmas espectrales en color azul representan los datos de reflectancia de las imágenes ASTER, en tanto que las de color rojo corresponden a las mediciones registradas *in situ* con el espectrorradiómetro ASD FieldSpec 4.

Zona 4:

Esta área se sitúa en el cuadrante nororiental de la zona de estudio. En este sector se ejecutó la validación *in situ* de las anomalías asociadas a las alteraciones argílica y propilítica, las cuales fueron delimitadas previamente a través del procesamiento multiespectral de las imágenes ASTER (ver Figura A.10).

Figura A.10.

Distribución espacial de las mediciones espectrales in situ para la Zona 4.



Nota. Las zonas de alteraciones argílica y propilítica, identificadas a partir de las imágenes ASTER, se delimitan mediante polígonos de color rojo y azul, respectivamente. Por su parte, las ubicaciones donde se levantaron las firmas espectrales en campo se indican con puntos de color rojo.

El proceso de validación comprendió el registro de 27 firmas espectrales *in situ* a lo largo de tres puntos de control, operando el espectrorradiómetro ASD FieldSpec 4 bajo los criterios metodológicos definidos. La interpretación de dichos espectros certificó la presencia de minerales diagnósticos, específicamente caolinita y epidota (ver Figura A.8), lo cual confirma la precisión del mapeo multiespectral de estos ensambles de alteración.

Figura A.11.

Imagen panorámica correspondiente a la Zona 4 del área de estudio.



En este sector, la cartografía derivada del procesamiento satelital fue validada de forma concluyente. Dicha comprobación se fundamentó en la correlación entre las firmas espectrales registradas *in situ* (correspondientes a los ensambles argílico y propilítico) y las anomalías extraídas de las imágenes ASTER (ver Figura A.12).

Figura A.12.

Comparación de firmas espectrales de campo con imagen ASTER para la Zona 4

