

Prospección de depósitos minerales por medio de imágenes multiespectrales en zonas aledañas a los distritos mineros de Bingham, American Fork y Big and Little Cottonwood, Utah, US.

Ancy Sarai Rodríguez Esparza y Jepson Oswaldo Barón Consuegra

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director

Dilan Arturo Martínez Sánchez

Geólogo Msc

Codirectora:

Jenny Paola Garcia Lobo

Geóloga

Tutora:

Diana Carolina Aristizabal Gomez

Geóloga

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Geología
Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Dios el autor de todo lo que existe, por ser el dueño de mi vida, por darme la fortaleza para alcanzar mis metas y por guiarme en este proceso.

A mis padres que son la luz de mis días y mi orgullo más grande, Anny Janeth Esparza Gómez y Germán Giovanni Rodríguez Vega, por enseñarme todo lo que soy y por siempre apoyarme a lo largo de cada etapa de mi vida.

A mi familia que es mi motor diario, por escucharme, aconsejarme y siempre estar presentes incluso a pesar de la distancia.

A Jepson Baron, por estar presente en todo este camino y ser mi ayuda constante, por permitirme disfrutar de tu compañía en cada experiencia que nos deja esta maravillosa etapa.

A mis amigos por cada sonrisa y aprendizaje juntos que me llevaron a culminar una de las etapas más importantes de mi vida.

A ella, que me acompaña desde el cielo siempre.

Anny Sarai Rodríguez Esparza

Dedicatoria

A Dios por ayudarme a cumplir mis proyectos de vida, y darme la oportunidad de estudiar y comprender las maravillas de su creación.

A mis padres María Belén Consuegra Tavera y Lucas Baron Toscano por todo el apoyo que me brindaron durante todos los años de vida, sin ellos nunca estaría donde estoy.

A mis hermanos por estar siempre para mí, por ser mi motor de vida y acompañarme durante toda mi vida, dándome consejos y alentándome a dar lo mejor de mí para ser un gran profesional.

A Anny Rodríguez por ser mi pilar, le agradezco a Dios el haberme dado la oportunidad de conocerte y juntarnos en esta etapa de nuestras vidas llenándola así de momentos que jamás se olvidarán.

A mis amigos más cercanos por todos los momentos vividos, por cada risa y alegría en la universidad, todos estos momentos nos acercaron mucho más y nos permitieron acompañarlos en todas las dificultades y salir de estas.

Jepson Oswaldo Baron Consuegra

Agradecimientos

A nuestra alma mater, la Universidad Industrial de Santander por brindarnos el conocimiento y las herramientas necesarias para nuestra formación profesional y crecimiento integral.

A la Escuela de Geología, personal administrativo, docente y compañeros de estudio por cada etapa vivida llena de aprendizajes que van más allá de lo académico.

Al Magister Dilan Martínez por su disposición y ayuda durante la ejecución de este proyecto.

A las Geólogas Jenny Garcia y Diana Aristizabal, por su paciencia y dedicación en todo este proceso y por guiarnos en cada paso durante el proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	12
1.Marco Geológico.....	14
1.1.Localización.....	14
1.2.Geología.....	15
1.2.1.Distrito Bingham.....	16
1.2.2.Distrito Big and Little Cottonwood y Distrito American Fork.....	20
2.Justificación.....	23
3.Objetivos.....	24
3.1.Objetivo General.....	24
3.2.Objetivos Específicos.....	24
4.Antecedentes.....	25
5.Marco Teórico.....	27
5.1.Principio Físico.....	28
5.1.1.Espectro Electromagnético.....	30
5.2.Sensor Aster.....	33
5.2.1.Rasgos de absorción.....	35
5.3.Técnicas espectrales.....	37
5.3.1Combinaciones RGB.....	37
5.3.2.Cocientes de bandas.....	37
5.3.3.Índices Espectrales.....	38
5.3.4.Spectral Angle Mapper (SAM).....	39
6.Metodología.....	40
6.1.Descarga de información y datos.....	41

6.2.Pre-procesamiento	42
6.3.Procesamiento.....	43
6.3.1.Procesamiento óptico.....	43
6.3.2.Procesamiento termal	46
6.4.Análisis de resultados	46
6.5.Discusión	46
6.6.Conclusiones.....	46
7.Análisis de resultados	47
7.1.Combinaciones de Bandas.....	47
7.2.Cocientes de Bandas.....	49
7.3.Índices Espectrales	51
7.4.Spectral Angle Mapper	53
7.5.Prospectos Mineralógicos.....	54
8.Discusión	57
9.Conclusiones.....	58
10.Recomendaciones	59
Referencias Bibliograficas.....	61

Lista De Tablas

	Pág.
Tabla 1. Compilación de las investigaciones más importantes	25
Tabla 2. Tipos de resolución. Recopilado de Bravo (2017) y Chuvieco (2008).....	35
Tabla 3. Metadato de la imagen ASTER utilizada para la investigación.	41
Tabla 4. Cocientes de bandas para la identificación de tipos de alteración.....	44
Tabla 5. Índices de Ninomiya aplicados en la zona de estudio	44
Tabla 6. Minerales para mapear con la técnica SAM.....	45
Tabla 7 Índices de Ninomiya y Fu (2002) y Guha y Kumar (2015).....	46

Tabla de Figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio	15
Figura 2. Mapa geológico de la zona de estudio. Capas tomadas del Servicio Geológico de Utah. Escala 1:500.000.....	15
Figura 3. Concepto de alteración hidrotermal en un pórfido de cobre mostrando las diferentes zonaciones presentes. Adaptado de Roonwal, 2017.....	18
Figura 4. Formas de teledetección, Adaptado de Chuvieco (2008).....	28
Figura 5. Teoría de las ondas electromagnéticas. Adaptado de Gupta (2018).....	29
Figura 6. Mecanismos de interacción energética en la tierra. Adaptado de Gupta (2018)...	29
Figura 7. Rangos del espectro electromagnético. Modificado de Gupta (2018).....	30
Figura 8. Firmas espectrales en la región SWIR de los minerales arcillosos más comunes. Adaptado de Gupta (2018).	32
Figura 9. Información espectral de grupos mineralógicos aniónicos en la región del TIR. Adaptado de Gupta (2018).	33
Figura 10. Distribución de bandas en el rango espectral de diferentes satélites (ASTER resaltado en rojo). En donde los cuadros y números identificada las bandas en las diferentes subregiones del espectro electromagnético para los sensores mencionados. Tomada de Testa (2018).	34
Figura 11. Relación entre los rasgos de absorción de los minerales característicos de las alteraciones hidrotermales y las bandas del sensor ASTER. Adaptado de Caiza (2018).	36
Figura 12. Flujo de trabajo del desarrollo del proyecto.....	40
Figura 13. Combinaciones de bandas usadas en el procesamiento	43

Figura 14. Combinaciones de bandas RGB. A) 468, B) 943, muestra las zonas de interés resaltadas en recuadros amarillos	47
Figura 15. Combinaciones de bandas RGB. C) 641, D)531, muestra las zonas de interés en recuadros amarillos.....	48
Figura 16. Aplicación de cocientes de bandas $2/1$, $5/8$, $5/6$, $5/4$ en la zona de estudio, ocho áreas de interés se encuentran en recuadros amarillos.	50
Figura 17. Aplicación de índices de Ninomiya OHIa, OHIb, KLI y CLI en la zona de estudio, áreas de interés se encuentran en recuadros amarillos.	51
Figura 18. Mapas de los índices de la región del TIR para la zona de estudio. A) mapa de QRI en donde los mayores valores representan los altos contenidos de sílice. B) mapa del MRI en donde los mayores valores identifican altos contenido de máficos.....	53
Figura 19. Mapa de minerales mapeados mediante la técnica espectral SAM.....	54
Figura 20. Ubicación de targets o áreas de exploración en la zona de estudio	55

Resumen

Título: Prospección de depósitos minerales por medio de imágenes multiespectrales en zonas aledañas a los distritos mineros de Bingham, American Fork y Big and Little Cottonwood, Utah, US^{1*}.

Autor: Baron Consuegra Jepson Oswaldo, Rodríguez Esparza Anny Sarai^{2*}.

Palabras Clave: Imágenes Satelitales, Teledetección, ASTER, Alteraciones Hidrotermales, Pórfidos de Cobre, Prospección Mineral.

Descripción:

Esta investigación se llevó a cabo en el valle de Salt Lake, ubicado al norte de Utah, limitando al este por la Cordillera de Wasatch y oeste por las Montañas Oquirrh. Específicamente, se enfocó en los distritos mineros de Bingham, American Fork y Big and Little Cottonwood y sus zonas aledañas, caracterizados por un amplio historial minero. Esta región se caracteriza por valles semiáridos, con áreas elevadas que tienden a ser subalpinas a alpinas, y sus montañas están cubiertas parcialmente por bosques de coníferas. En el estudio se aplicaron cuatro técnicas espectrales utilizadas por diferentes autores para la identificación de alteraciones hidrotermales, grupos mineralógicos, óxidos e hidróxidos, así como minerales específicos. Se encontró que las combinaciones de bandas y los cocientes de banda son eficientes para la cartografía de alteraciones hidrotermales, minerales arcillosos y óxidos. Por otro lado, los índices espectrales aplicados en el subsistema del SWIR y TIR y la clasificación supervisada SAM dieron respuestas dispersas. Los resultados obtenidos por las diferentes técnicas, junto con la geología de la zona y los tipos de depósitos minerales registrados, fueron correlacionados. Como resultado, se obtuvieron cinco áreas de interés prospectivo que presentan Gossan, alteración argílica, argílica avanzada y alteración propilítica. Estas áreas se encuentran al este y sureste de la zona de estudio, concordando dos áreas con los antiguos distritos mineros de American Fork y Big and Little Cottonwood y otra al oeste coincidiendo con el distrito de Bingham.

^{1*}Trabajo de Grado

^{2*}Facultad de Ingenierías Físicoquímicas – Escuela de Geología. Director: Dilan Arturo Martínez Sánchez. Geólogo Msc. Codirectora: Jenny Paola García Lobo. Geóloga

Abstract

Title: Prospecting for mineral deposits by multispectral imaging in areas surrounding the Bingham, American Fork and Big and Little Cottonwood mining districts, Utah, US^{1*}.

Author(s): Baron Consuegra Jepson Oswaldo, Rodríguez Esparza Anny Sarai^{2*}

Key Words: Remote sensing, ASTER, Hydrothermal alteration, Ore deposits, Mineral mapping.

Description:

This research was carried out in the Salt Lake Valley, located north of Utah, bordered to the east by the Wasatch Range and to the west by the Oquirrh Mountains. Specifically, it focused on the mining districts of Bingham, American Fork, and Big and Little Cottonwood, and their surrounding areas, characterized by a rich mining history. This region is characterized by semi-arid valleys, with elevated areas that tend to be subalpine to alpine, and its mountains are partially covered by coniferous forests. Four spectral techniques used by different authors were applied in the study for the identification of hydrothermal alterations, mineralogical groups, oxides and hydroxides, as well as specific minerals. It was found that combinations of bands and band ratios are efficient for mapping hydrothermal alterations, clay minerals, and oxides. On the other hand, spectral indices applied in the SWIR and TIR subsystems and the supervised classification SAM gave scattered responses. The results obtained by the different techniques, together with the geology of the area and the types of mineral deposits recorded, were correlated. As a result, five areas of prospective interest were obtained, presenting Gossan, argillic alteration, advanced argillic alteration, and propylitic alteration. These areas are located east and southeast of the study area, with two areas coinciding with the former mining districts of American Fork and Big and Little Cottonwood, and another area to the west coinciding with the Bingham district.

^{1*}Bachelor Thesis

^{2*}Faculty of Physicochemical- School of Geology. Director: Dilan Arturo Martínez Sánchez. Geologist Msc. Codirector: Jenny Paola García Lobo. Geologist

Introducción

Los sensores remotos en las últimas décadas han contribuido a la exploración geológica y de depósitos minerales (Chen, et al., 2023) debido a que permiten el reconocimiento de litología, alteraciones asociadas a depósitos minerales, minerales específicos y estructuras. Actualmente, existen diversas técnicas que permiten distinguir los elementos presentes en la superficie terrestre y mapear su distribución en el suelo, teniendo en cuenta las características espectrales que reflejan. La energía es recibida por los sensores en forma de radiación, los cuales captan señales desde el espectro visible hasta el infrarrojo termal ($0.4 \mu\text{m} - 1 \text{mm}$) lo que resulta útil para diferenciar los rasgos litológicos. Además, proveen información de manera rápida, no intrusiva y económica, favoreciendo la exploración, especialmente en zonas remotas (Cardoso Fernandes, Teodoro, Lima, Perrotta, & Roda Robles, 2020).

Uno de los sensores más utilizados en la prospección de depósitos minerales es el sensor Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) lanzado por la NASA en sus series EOS nombrado TERRA (Ninomiya, 2003). Se encuentra compuesto por tres subsistemas: visible e infrarrojo cercano (VNIR; Visible and Near-Infrared) con pixeles de 15 metros, infrarrojo de onda corta (SWIR: Short-Wave Infrared) con pixeles de 30m y el infrarrojo termal (TIR: Thermal Infrared) con pixeles de 90m, resaltando que estos dos últimos son los más utilizados por su alta resolución espectral permitiendo la identificación de minerales de alteración asociados a depósitos minerales (Cardoso Fernandes, Teodoro, Lima, Perrotta, & Roda Robles, 2020).

El estado de Utah se ha caracterizado por ser un estado minero, el primer registro de depósitos minerales en la zona fue en 1865 (Calkins, Butler, & Heikes, 1943) estableciendo esta actividad como una de las fuentes principales de economía en la región. El distrito de Bingham, en particular, se caracteriza por ser uno de los distritos a cielo abierto más productivos de Estados Unidos, siendo líder en la producción de cobre (Krahulec, Production history of the Bingham mining district. Salt Lake County, Utah-an update, 2018). Este se encuentra asociado a un pórfido de Cu-Mo-Au de tipo Skarn con vetas de Pb-Zn-Ag y algunos depósitos de sustitución sedimentarios diseminados siendo estos objetos de gran atención para su exploración mediante técnicas de teledetección en todo el mundo (Porter, Schroeder, & Austin, 2012) (Krahulec, Pennell, & Garside, 2015) (Roonwal, 2018). Por otra parte, los distritos de American Fork y Big and Little Cottonwood son distritos inactivos caracterizados por sus depósitos de minerales asociados a yacimientos de contacto y fisuras, formándose a lo largo de los planos de estratificación y las zonas de brechamiento. Las menas estuvieron estrechamente relacionadas a las rocas intrusivas y se cree que tuvieron un origen en común (Calkins, Butler, & Heikes, 1943).

El principal objetivo de este estudio es aplicar técnicas espectrales a datos ASTER para la determinación de grupos mineralógicos asociados a alteraciones con el fin de identificar áreas de interés minero en las cercanías de los distritos mineros de Bingham, American Fork y Big and Little Cottonwood, en el estado de Utah.

1. Marco Geológico

1.1. Localización

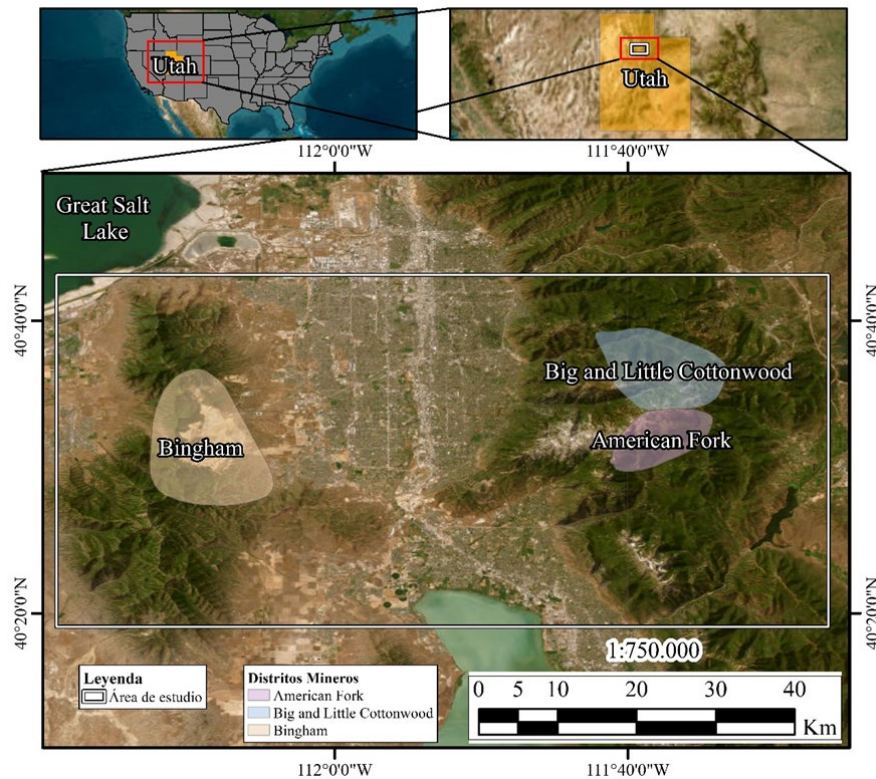
El valle de Salt Lake se encuentra localizado al norte del estado de Utah, sobre una cuenca profunda limitada al Este por la Cordillera de Wasatch que puede alcanzar una altura de 1850m y al Oeste por Las Montañas Oquirrh. Corresponde a una depresión topográfica de aproximadamente 1300 km² (Lund *et al.*, 1990). Las cordilleras se caracterizan por tener un clima árido, con veranos calurosos e inviernos fríos. Específicamente, presentan un clima continental, en los valles es semiárido y en las zonas más elevadas subalpino y alpino. Las montañas están constituidas por bosques de coníferas, con diferentes especies arbóreas asociados a diferentes elevaciones.

El distrito de Bingham se encuentra ubicado sobre las Montañas Oquirrh, aproximadamente a 35 km al oeste de la ciudad de Salt Lake City (Babcock *et al.*, 1995), mientras que sobre la Cordillera de Wasatch se sitúan los distritos inactivos Big and Little Cottonwood al norte y American Fork al sur, que concuerdan con las cuencas de los drenajes (Ege, 2005). Estos se encuentran localizados aproximadamente a 30 km al este de Salt Lake City. El distrito de American Fork es considerado para estudios geológicos como una continuación del distrito Big and Little Cottonwood (Perry & McCarthy, 1977).

Las zonas de interés para este estudio corresponden a las áreas aledañas a los distritos mencionados anteriormente (**Figura 1**).

Figura 1.

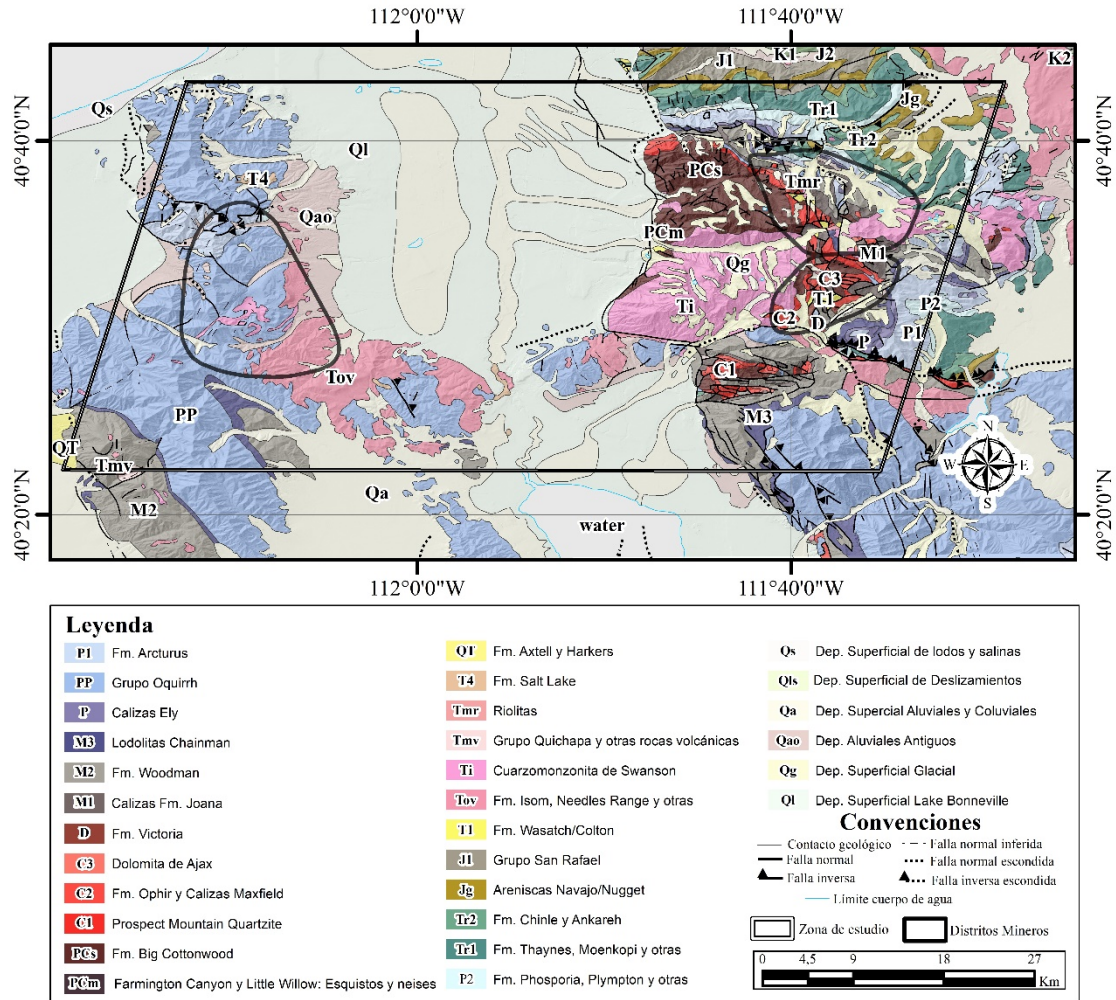
Mapa de localización de la zona de estudio

**1.2. Geología**

La geología de la zona está conformada por rocas metamórficas, sedimentarias, ígneas y depósitos superficiales como se muestra en la **Figura 2**.

Figura 2.

Mapa geológico de la zona de estudio. Capas tomadas del Servicio Geológico de Utah. Escala 1:500.000



1.2.1. Distrito Bingham

El distrito de Bingham se caracteriza por ser uno de los distritos más productivo de Estados Unidos, el más alto en cobre, el segundo más grande en oro y el tercero más grande en plata, molibdeno, y el quinto en plomo. Se encuentra constituido por: pórfido de cobre, depósitos distales de skarn de Cu-Au, vetas de Pb-Zn-Ag y depósitos de sustitución (Porter, Schroeder, & Austin, 2012).

Su geología se constituye por rocas sedimentarias marinas del Pérmico pennsylvaniense que fueron plegadas y falladas en el Paleozoico por la orogenia Sevier, más

tarde en el Terciario fueron intruidas por cuerpos magmáticos formando el stock de Bingham (Ege, 2005).

El distrito se encuentra en el plutón Eoceno conocido como el Stock de Bingham, el cual se emplazó en una gruesa secuencia de cuarcitas, cuarcitas calcáreas y calizas del Grupo Oquirrh. (Butler, Loughlin, & Heikes, 1920).

Según (Porter, Schroeder, & Austin, 2012):

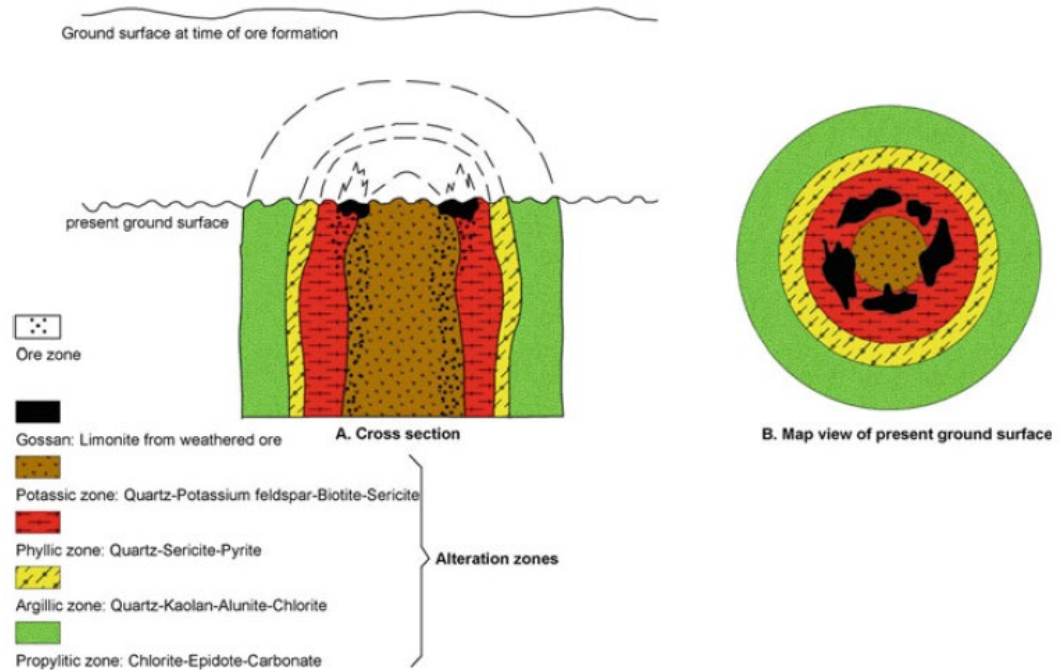
Las intrusiones del Eoceno del Stock de Bingham se pueden dividir en seis tipos de roca: El primero es una monzonita equigranular, considerada la intrusión más antigua del lugar, dividida en dos cuerpos, el stock de Bingham y el stock de Last Chance. La segunda consiste en cuarzomonzonita porfírica conocido como el dique de Ohio Copper, el cual intruye a la monzonita equigranular al este de la mina a cielo abierto. El tercero es un pórfido híbrido ubicado al suroeste de la mina a cielo abierto al final de la cuarzomonzonita porfírica. El cuarto es el pórfido de cuarzomonzonita, caracterizado por albergar la mineralización más grande y mejor del distrito. El quinto es el pórfido de latita, el cual se presenta como un conjunto de diques y sills subparalelos con tendencia NE que cortan la monzonita equigranular y el pórfido de cuarzo monzonita y se extienden hacia las rocas sedimentarias. El sexto es el pórfido de cuarzo y latita, es el más joven de las intrusiones, ocurriendo como diques estrechos. También, hay presencia de diques máficos y brechas, estas son poco comunes en el yacimiento y no albergan mineralización apreciable. El cuerpo de brecha más grande es Kilkinny, el cual se encuentra a 500m del cuerpo mineralizado.

Por otra parte, se encuentran las mineralizaciones asociadas a las rocas sedimentarias del Paleozoico, pertenecientes a calizas de la Formación Jordan, y Commercial, las cuales también presenta Hornfels y Siltstone. La mineralización se encuentra hospedada a las rocas sedimentarias de la Formación Butterfield Peaks, la cual es una secuencia de capas de caliza limosa denominada serie Alphabet (Welsh & James, 1961) (Tooker & Roberts, 1970). Según (Porter, Schroeder, & Austin, 2012) en la serie Alphabet se localiza la mineralización más importante de Pb-Zn-Ag, estructuralmente controlada, mientras que la Formación Jordan y Commercial albergan la mineralización de cobre-oro más grande genéticamente asociada a un depósito de skarn.

Según (Roonwal, 2018) los yacimientos de pórfidos de cobre se caracterizan por desarrollar un patrón zonal de mineralización y alteración de la roca caja, que puede definirse por conjuntos de minerales de alteración hidrotermal. La alteración más intensa se produce en el núcleo del cuerpo de pórfido y disminuye radialmente hacia el exterior en una serie de zonas concéntricas de alteraciones potásicas, fílicas, argílicas y propilíticas, junto con sus minerales característicos, como se observa en la **Figura 3**.

Figura 3.

Concepto de alteración hidrotermal en un pórfido de cobre mostrando las diferentes zonaciones presentes. Adaptado de Roonwal, 2017.



Así mismo, diversos autores coinciden en que los sistemas de pórfidos cupríferos exhiben un patrón de mineralización de alteración hidrotermal zonado, que es notable a gran escala. En las áreas más profundas de estos depósitos, se observa alteración sódicocálcica que incluye minerales como albita/oligoclasa, actinolita y magnetita (Carten, 1986) (Dilles & Einaudi, 1992). En la zona central del sistema, la alteración potásica (biotita + feldespato potásico + magnetita) (Ridley, 2013) es predominante, con pirita + calcopirita ± bornita ± molibdenita ± digenita ± calcosina y sulfuros económicos que constituyen la principal mena (Lowell & Guilbert, 1970) (Seedorff, et al., 2005) (Ridley, 2013) (Culqui Puerta, 2022).

1.2.1.1. Geología Estructural de Bingham. Las fallas del distrito se caracterizan por ser de buzamiento pronunciado con rumbo norte-noreste, de edades mesozoicas, las cuales fueron reactivadas como fallas normales durante la extensión de la cuenca y la cordillera; estas sirvieron como conductos para el paso de los fluidos mineralizantes periféricos al Stock de Bingham, incluyendo las venas mineralizadas y de reemplazamiento de Pb-Zn-Ag (Redmond & Einaudi, 2010). Adicionalmente, se encuentran un set de fallas con rumbo noroeste y buzamiento 50°-85° SO, conformando un control secundario sobre el emplazamiento de los diques.

Varios autores sugieren que la zona de intersección de las fallas norte-noreste y noroeste presentaron el control fundamental para la localización del Stock de Bingham en la escala del distrito (James , Smith, & Bray, 1961).

1.2.2. Distrito Big and Little Cottonwood y Distrito American Fork

La geología del área Cottonwood – American Fork se caracteriza por estar conformada de rocas sedimentarias (areniscas, calizas y lodolitas) del Precámbrico al Jurásico las cuales fueron falladas y plegadas por la Orogenia Servier, cortadas por diques e intrusiones de edades del Cretácico tardío al Terciario, cubiertas por depósitos cuaternarios de origen glaciar y fluvial (Ege, 2005).

La formación más antigua del Precámbrico es un cuerpo de tillita y argilita bandeada que no es persistente en toda el área, mientras las rocas cámbricas que la suprayacen están confirmados por tres formaciones: la inferior está compuesta principalmente de cuarcitas, la del medio de lodolitas, y la superior de calizas y dolomitas (Calkins, Butler, & Heikes, 1943). Del Devónico al Missisipiano se encuentran cuerpos de dolomitas y calizas asignados a las calizas de Jefferson y Madison, sucesivamente. Mientras, en el Pérmico se localiza la Fm.

Park City un ensamble heterogéneo de calizas, chert, lodolitas y areniscas, el cual contiene de bajo grado rocas fosfatadas. En el triásico se encuentran las Fm. Woodside shale, Thayness y Ankareh Shale, las cuales se conforman por calizas y areniscas calcáreas (Calkins, Butler, & Heikes, 1943).

Gran parte del área se encuentra ocupada por rocas ígneas intrusivas, perteneciendo a tres tipos de intrusiones, las cuales se ubican a lo largo del eje axial del sinclinal de Uinta y son nombradas en orden de su posición de oeste a este, el stock de cuarzomonzonita de Little Cottonwood, el stock de granodiorita de Alta y de Clayton Peak. El stock de Alta es más joven que el stock de Clayton Peak y Little Cottonwood es el más joven de los tres. Pero los tres fueron intruidas en un periodo de tiempo relativamente breve. La intrusión de estos cuerpos produjo un extensivo metamorfismo, el cual se vio reflejado en las calizas y otras rocas calcáreas (Ege, 2005).

Los yacimientos se agrupan en torno a los depósitos intrusivos que forman el cinturón que se extiende desde el frente de la cordillera hacia el noreste hasta el distrito de Park City, el cual produjo abundante producción, por otra parte, los yacimientos asociados con el stock de Little Cottonwood, al oeste, dieron poco en metales y los asociados con los stocks cerca de Alta fueron moderadamente productivos (Calkins, Butler, & Heikes, 1943).

Los depósitos se dividen en dos clases generales: depósitos de contacto y depósitos asociados con fisuras, y se pueden subdividir en depósitos de fisura y depósitos de remplazamiento a lo largo de los planos de estratificación, siendo esto más productivos. La mineralización está relacionada con la geografía y la geología de las rocas intrusivas, se cree que tuvieron un origen en común (Calkins, Butler, & Heikes, 1943).

1.2.2.1. Geología Estructural American Fork y Big and Little Cottonwood.

Las rocas ígneas se intruyeron más tarde que las grandes fallas de cabalgamientos y plegamientos, pero se encuentran desplazadas por algunas fallas posteriores. Las numerosas fallas distintas de los cabalgamientos se encuentran en su mayoría en las fisuras de buzamiento pronunciado, la mayor de las fallas es Silver Fork, una falla normal de escaso buzamiento hacia el oeste, que probablemente se extiende por toda la zona cartografiada de norte a sur (Calkins, Butler, & Heikes, 1943).

La brechificación que acompañó a las fallas de cabalgamiento preparó el terreno para la deposición de algunos de los grandes yacimientos, de modo que la mineralización se extendió a lo largo de ellas, donde la zona intrusiva y mineralizada cruzaba la zona de cabalgamiento; el intenso fallamiento influenció la formación y preservación de los depósitos minerales (Calkins, Butler, & Heikes, 1943).

2. Justificación

La minería es una actividad económica de gran importancia en todo el mundo que contribuye significativamente tanto al crecimiento económico como a la fuerza laboral y al desarrollo de infraestructuras en muchos países. En Estados Unidos, la industria minera genera alrededor de 2,7 millones de empleos y aporta más de 500.000 millones de dólares al PIB del país cada año (National Mining, 2021).

En Utah, la minería ha sido una industria importante durante décadas, lo que se observa en el largo historial de producción de metales y minerales como el cobre, la plata, el oro y el uranio. Según un informe del Departamento de Recursos Naturales de Utah, la minería es la segunda mayor industria de exportación del estado (Utah Department of Natural Resources, 2022).

Por lo tanto, se propone realizar un análisis multiespectral utilizando imágenes satelitales ASTER en los distritos de Bingham, American Fork y Big and Little Cottonwood y en las zonas circundantes de estos, en el Estado de Utah. El objetivo es determinar áreas de interés mineral para la exploración de depósitos minerales presentes en la región, mediante el mapeo de minerales característicos de estos depósitos, así como su asociación mineralógica.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Determinar áreas de depósitos minerales utilizando técnicas de clasificación multiespectral en zonas aledañas a los distritos mineros Bingham, American Fork y Big and Little Cottonwood, US.

3.2. Objetivos Específicos

Identificar grupos mineralógicos y minerales específicos mediante la aplicación de los métodos espectrales de combinaciones de bandas (RGB), cocientes de banda, índices espectrales y la clasificación supervisada de la técnica Spectral Angle Mapper (SAM) en imágenes multiespectrales (ASTER).

Correlacionar los resultados de las diferentes técnicas espectrales aplicadas con la información geológica y de los depósitos minerales de la zona.

Establecer zonas de interés minero basadas en el análisis de los resultados obtenidos por los diferentes métodos aplicados.

4. Antecedentes

El satélite ASTER se envió al espacio en diciembre de 1999, como un instrumento para el mapeo geológico, diseñado para mejorar la capacidad de los instrumentos existentes, implementando mejor resolución espacial, alta resolución espectral en los canales infrarrojo de onda corta (SWIR) y termal (TIR) y mayor capacidad estereoscopia en el trayecto (Abrams & Yamaguchi, 2019). Durante más de 20 años, ASTER ha recopilado datos ópticos fundamentales en diversas disciplinas científicas, destacando su relevancia en el mapeo litológico y la exploración mineral.

Los principales estudios usando esta plataforma y la base para desarrollar este proyecto se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1.

Compilación de las investigaciones más importantes

Titulo	Autor	Objetivo
Remote sensing for mineral exploration	Sabins F, 1999	Metodología para la aplicación de imágenes satelitales: (i) mapeo geológico, fallas y fracturas para la localización de depósitos minerales; (ii) reconocimiento de rocas alteradas hidrotermalmente por sus firmas espectrales.
A stabilized vegetation index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR data	Ninomiya, 2003	A partir de imágenes ASTER calcular los cocientes matemáticos para calcular los índices de minerales con contenido de enlace OH, calcita, caolinita y alunita. Comparando con datos de laboratorio e información multiespectral obtenida de la zona cuprífera en Nevada, USA.
Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system	Rowan <i>et al.</i> , 2003	Descripción de la capacidad del sensor ASTER para el mapeo de rocas alteradas hidrotermalmente y rocas caja en el distrito minero de Cuprite, Nevada.

<p>Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data</p>	<p>Gabr <i>et al.</i>, 2009</p>	<p>Uso de imágenes ASTER para el mapeo de zonas de alteración hidrotermal usando cociente de bandas de los índices de Ninomiya, combinaciones de falso color, análisis de componentes principales (PCA), <i>Constrained energy minimization</i> (CEM) y <i>Minimum Noise Fraction</i> (MNF) en las zonas aledañas de la mina de oro Abu-Marawat al noreste del desierto de Egipto.</p>
<p>Mapping mineralogical alteration using principal-component analysis and matched filter processing in the Takab area, north-west Iran, from ASTER data</p>	<p>Moore <i>et al.</i>, 2008</p>	<p>Procesamiento de imágenes ASTER usando diferentes métodos espectrales (Análisis de Componentes Principales y <i>Matched Filter Processing</i> (MF)) para el mapeo de mineralizaciones de oro y metales base en el área de Takab localizada al noroeste de Irán.</p>
<p>Remote sensing of Carhuarazo volcanic complex using ASTER imagery in Southern Peru to detect alteration zones and volcanic structures—a combined approach of image processing in ENVI and ArcGIS/ArcScene</p>	<p>Brandmeier, 2010</p>	<p>Detección y cuantificación de alteraciones minerales a partir del análisis espectral obtenido usando los datos de reflectancia de imágenes ASTER en el área alrededor de complejo volcánico de Carhuarazo al sur de Perú.</p>
<p>Characterization of ASTER Data for Mineral Exploration</p>	<p>Pour <i>et al.</i>, 2010</p>	<p>Examinación del tratamiento de imágenes satelitales ASTER para la exploración minera en zonas áridas y semiáridas, teniendo en cuenta las oportunidades y deficiencias de las técnicas espectrales actuales.</p>
<p>Identifying areas of high economic-potential copper mineralization using ASTER data in the Urumieh–Dokhtar Volcanic Belt, Iran</p>	<p>Pour & Hashim, 2012.</p>	<p>Aplicación de métodos espectrales de transformación (matemática de banda, componentes principales y <i>Minimum Noise Fraction</i>) y métodos espectrales de mapeo (<i>Spectral Angle Mapper</i>, <i>Linear Spectral Unmixing</i>, <i>Matched Filtering</i> y <i>Mixture Tuned Matched Filtering</i>) con datos ASTER para el mapeo de zonas de alteración hidrotermal asociadas a un pórfido cuprífero y rocas cajas en el cinturón volcánico Urumieh-Dokhtar de Irán.</p>
<p>Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review</p>	<p>Van der Meer <i>et al.</i>, 2012</p>	<p>Revisión de los datos y productos obtenidos de sensores remotos multiespectrales y hiperespectrales aplicados a geología</p>
<p>Spectral Angle Mapper Algorithm for Remote Sensing Image Classification</p>	<p>Rashmi <i>et al.</i>, 2014</p>	<p>Explicación del uso del algoritmo Spectral Angle Mapper para la clasificación de imágenes satelitales.</p>

Lithological and Hydrothermal Alteration Mapping of Epithermal, Porphyry and Tourmaline Breccia Districts in the Argentine Andes Using ASTER Imagery	Testa <i>et al.</i> , 2018	Análisis de combinaciones de banda de falso color, matemática de bandas, operaciones lógicas, índices minerales y análisis de componentes principales para la identificación de tipos de roca y zonas de alteración hidrotermal mediante imágenes ASTER en la provincia San Juan, Argentina.
Estimación de zonas de alteración hidrotermal mediante interpretación de imágenes satelitales tipo ASTER y uso del equipo Terraspec en la zona oriental de Cerro de Pasco, Perú.	Caiza, 2018	Reconocimiento de alteraciones hidrotermales mediante combinaciones de RGB 461, 469, 531, 641 y 943; cocientes de banda 4/6, 4/5, 5/8 y 2/1, asimismo, índices de Ninomiya y Spectral Angle Mapper y comparación de los resultados con las firmas obtenidas por el muestreo de roca con el TERRASPEC en la provincia de Pasco, Perú.
Twenty Years of ASTER Contributions to Lithologic Mapping and Mineral Exploration	Abrams & Yamaguchi, 2020	Revisión de la contribución del sensor ASTER para el mapeo litológico y exploración mineral.
Análisis de imágenes multiespectrales para la prospección de depósitos de minerales metálicos en los proyectos de Boca del Rio-Tacna, Inchupalla-Puno, Perú y Berens-Sturgeon, Ontario, Canadá	Aristizabal & García, 2021	Identificación de zonas prospectivas mediante las técnicas espectrales composiciones de falso color (RGB), matemática de banda, índices de Ninomiya y Spectral Angle Mapper a partir de imágenes ASTER en los proyectos de Boca del Rio-Tacna, Inchupalla-Puno, Perú y Berens-Sturgeon, Ontario, Canadá

5. Marco Teórico

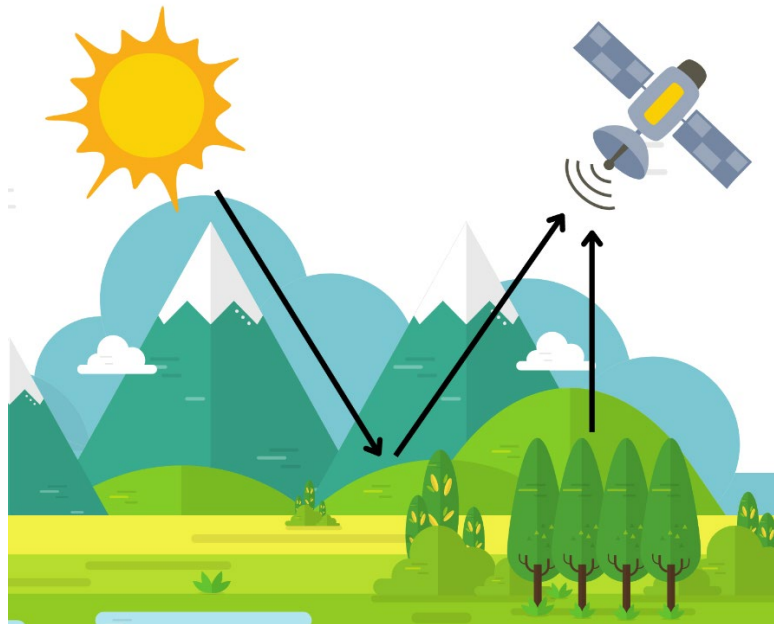
La teledetección se refiere a la adquisición de datos de áreas de la Tierra, ya sea en forma de imágenes o de señales, midiendo y registrando la radiación electromagnética de esa área sin necesidad de contacto físico (Demirel & Düzgün, 2011). Es uno de los medios más efectivos para obtener información actualizada sobre los materiales, cambios y procesos que ocurren en la Tierra a escalas regionales. Esto es útil para la recopilación de datos en áreas extensas y es uno de los métodos más cómodos para adquirir datos en zonas de difíciles accesos. Además, han demostrado ser herramientas útiles para identificar y caracterizar áreas favorables para la minería, entre otros usos.

5.1. Principio Físico

La reflectancia espectral, la absorción y emisión de la radiación electromagnética y la interacción de la luz con la materia son los principios físicos utilizados en las técnicas espectrales de mapeo (Chuvienco S. E., 2008). Es necesario que exista algún tipo de interacción entre el sensor y los objetos para que sea posible esta observación remota (**Figura 4**). Solo cuando nuestros sentidos son capaces de descifrar la información que transmite un objeto, pueden percibirlo.

Figura 4.

Formas de teledetección, Adaptado de Chuvienco (2008).

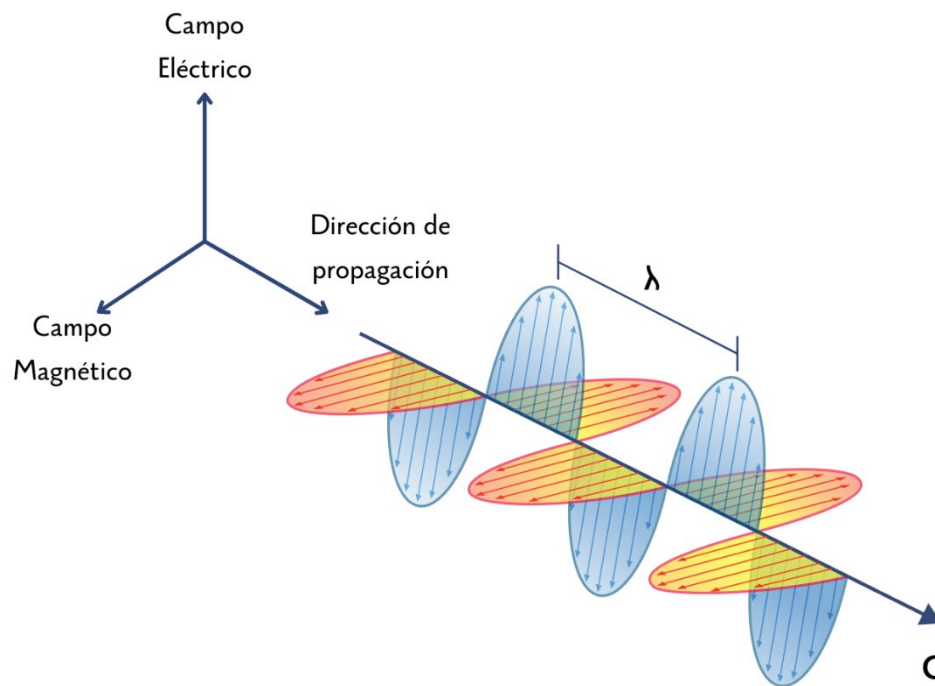


La teoría de las ondas electromagnéticas está conformada por un set de cuatro ecuaciones diferenciales propuestas por Huygens Maxwell, en las cuales consideró que la energía electromagnética se propaga en un movimiento ondulatorio sinusoidal armónico

(Figura 5), en donde en el espacio vacío, los campos eléctricos y magnéticos se propagan en ondas transversales oscilantes (Gupta, 2018).

Figura 5.

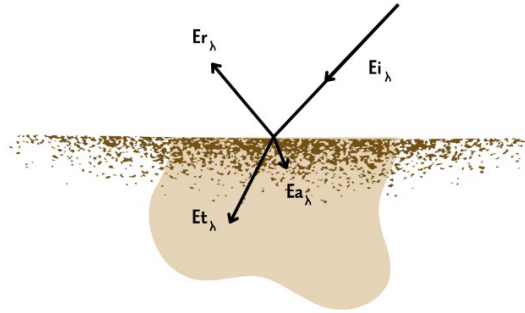
Teoría de las ondas electromagnéticas. Adaptado de Gupta(2018).



Según (Chuvieco S. E., 2008) la proporción de la energía incidente en el terreno puede ser, reflejada, absorbida o transmitida (**Figura 6**), permitiendo la identificación de los elementos sobre la superficie de la tierra por medio de su comportamiento reflectivo en diversas longitudes de onda, facilitando así su discriminación frente a elementos espectralmente similares. No obstante, la intensidad de estos dependerá de las características físicas y composicionales de la superficie, (Gupta, 2018).

Figura 6.

Mecanismos de interacción energética en la tierra. Adaptado de Gupta (2018).

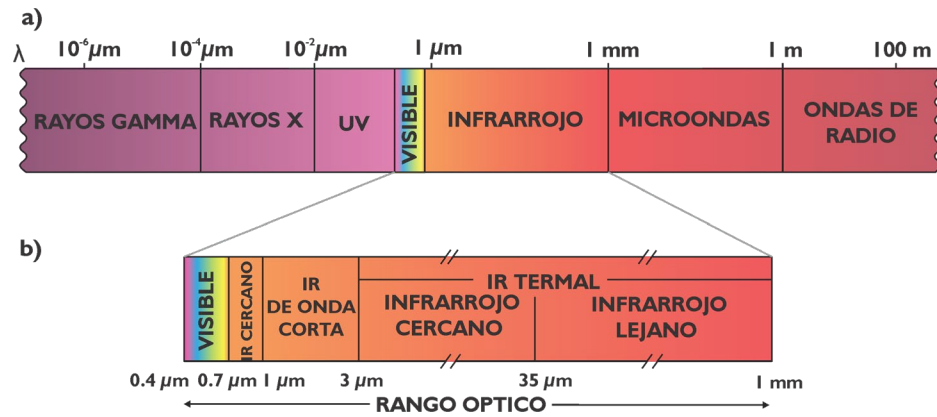


5.1.1. Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético (**Figura 7**), es la organización de la radiación electromagnética en función de la longitud de onda, la frecuencia o la energía. Los rayos gamma, los rayos X, el ultravioleta, el visible, el infrarrojo y las microondas son los componentes intermedios del espectro electromagnético, que se presenta más comúnmente entre las ondas radioeléctricas y los rayos cósmicos (**Figura 7a**). El rango óptico y el rango de microondas son los dos componentes principales del espectro electromagnético de $0,4 \mu\text{m}$ a 1mm (**Figura 7b**). El rango óptico es la sección del espectro electromagnético donde los fenómenos de reflexión y refracción ópticos pueden enfocar la radiación.

Figura 7.

Rangos del espectro electromagnético. Modificado de Gupta (2018).



Las regiones espectrales más importantes para la teledetección terrestre son 0,4-14 μm (rango óptico) y 2 mm-0,8 m (rango de microondas). Las longitudes de onda del infrarrojo cercano van desde 0,7 μm a 1,0 μm , el infrarrojo de onda corta va desde 1,0 μm a 3 μm , y el infrarrojo térmico o lejano de 3 μm a 1 mm (Fraser & Curran, 1976) (Hunt, 1980).

5.1.1.1. **Espectros de minerales y rocas.** Los materiales reflejan y absorben ondas de radiación electromagnética de diferentes longitudes de onda, la diferencia en estas longitudes de onda detectadas por un sensor permite reconocer el material por el cual fueron reflejadas, esto se conoce como: firma espectral, esta es definida por (Gupta, 2018) como la relación entre la intensidad de la radiación electromagnética y la longitud de onda.

Debido a su estructura química, los minerales se pueden identificar en algunas regiones del espectro electromagnético. Estas regiones son VNIR, SWIR y TIR.

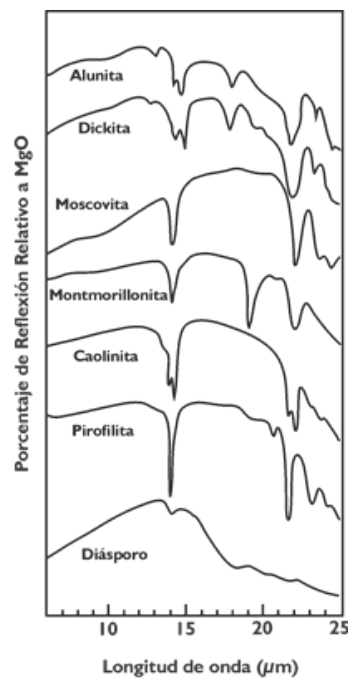
Los procesos electrónicos en metales de transición como Fe, Mn, Cu, Ni, Cr, etc., dominan las características espectrales en la región VNIR (0.4-1.0 μm). El efecto de transferencia de carga hace que el hierro sea el constituyente más importante en esta región. Presenta un aumento general del infrarrojo y una disminución significativa de la reflectancia hacia el azul (Gupta, 2018).

La región SWIR (1.0 -3.0 μm) es crucial para identificar las características espectrales de hidroxilos y carbonatos. El comportamiento de estos puede variar según su grado de cristalinidad y granulometría, entre otros factores. El ion hidroxilo se encuentra en minerales como la clorita, las micas y las arcillas. El pico de absorción de las arcillas está a 1,44 μm . Además, sus características de absorción se pueden observar en 2,1 a 2,4 μm al combinarse con aluminio y magnesio (Al-OH y Mg-OH) como se evidencia en la **Figura 8** (Gupta, 2018).

Figura 8.

Firmas espectrales en la región SWIR de los minerales arcillosos más comunes.

Adaptado de Gupta (2018).



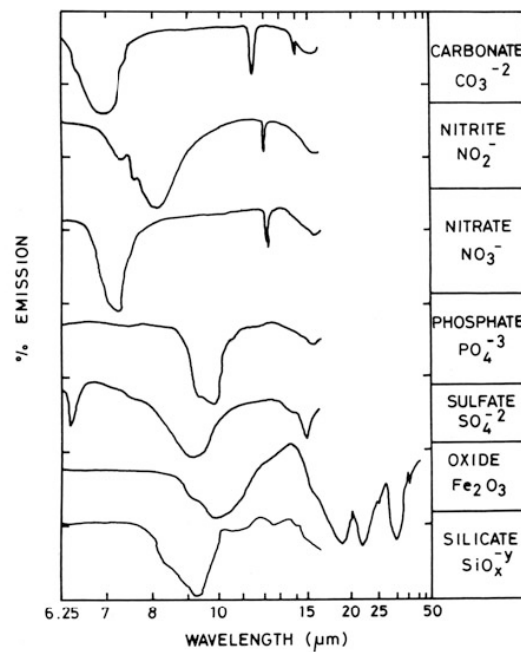
La zona termal (alrededor de 3 a 25 μm) muestra características espectrales de diversos grupos minerales formadores de roca como: hidroxilos, silicatos, carbonatos, óxidos, fosfatos, sulfatos, nitratos, nitritos e hidroxilos (**Figura 9**). Las propiedades vibracionales de estos grupos aniónicos están determinadas por factores físicos, como el

tamaño de la partícula y el empaquetamiento, estas pueden producir cambios en los espectros de emisión de los minerales en cuanto a la profundidad relativa de absorción, sin afectar la posición de la banda espectral (Gupta, 2018).

Figura 9.

Información espectral de grupos mineralógicos aniónicos en la región del TIR.

Adaptado de Gupta (2018).



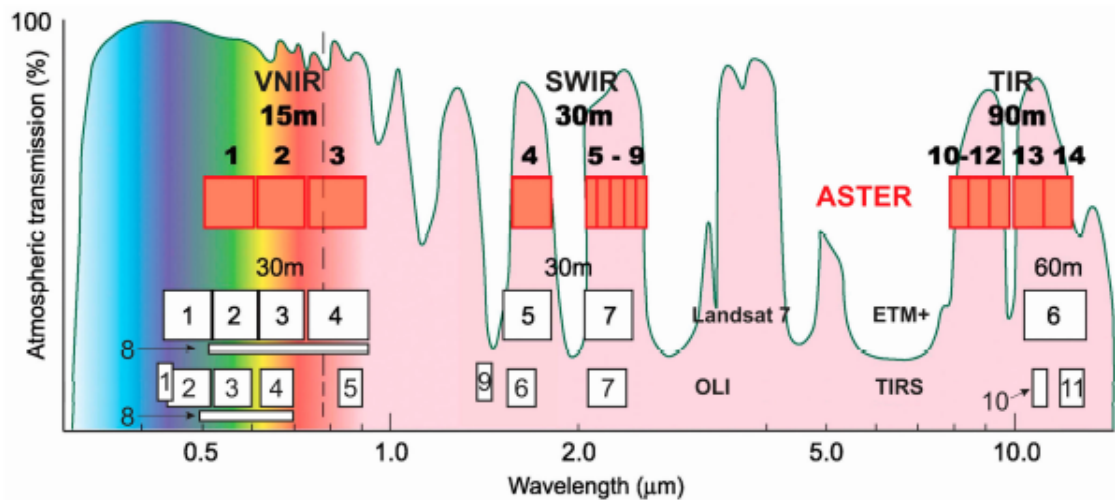
5.2. Sensor Aster

Las imágenes multiespectrales del sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) son las más utilizadas para la identificación de mapeo espectral mineral. Esto se debe a su alta resolución espectral especialmente en la región del infrarrojo de onda corta, que permite una mayor discriminación de características minerales en comparación a otros sensores multiespectrales (Cardoso Fernandes, Teodoro, Lima, Perrotta, & Roda Robles, 2020). Este sensor es parte de la plataforma Terra, lanzada en 1999,

diseñado específicamente para capturar datos en la Tierra en 14 diferentes bandas del espectro electromagnético, cubriendo regiones del visible y del infrarrojo cercano (VNIR), del infrarrojo de onda corta (SWIR) y del infrarrojo térmico (TIR) (**Figura 10**) (Bravo, 2017). La resolución espacial de estas bandas varía desde los 15 a los 90 metros, permitiendo generar mapas detallados de la superficie terrestre, incluyendo de la temperatura, emisividad, reflectancia y elevación (Caiza, 2018).

Figura 10.

Distribución de bandas en el rango espectral de diferentes satélites (ASTER resaltado en rojo). En donde los cuadros y números identificada las bandas en las diferentes subregiones del espectro electromagnético para los sensores mencionados. Tomada de Testa (2018).



La resolución en teledetección se refiere a la capacidad de distinguir objetos o características individuales que han sido capturados en una imagen (Khorram, Van der Wiele, Koch, Nelson, & Potts, 2016). Las imágenes digitales representan los datos obtenidos por el sensor, estas tienen diferentes características que pueden ser descritos en cuatro tipos de

resoluciones: resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal (Chuvienco E. , 1996)

esto se puede evidenciar en la **Tabla 2**.

Tabla 2.

Tipos de resolución. Recopilado de Bravo (2017) y Chuvienco (2008).

Tipo de resolución	de	Descripción
Espacial		<p>Se refiere a la capacidad de un sensor para distinguir detalles de la superficie terrestre.</p> <ul style="list-style-type: none"> • VNIR: esta región espectral tiene tres bandas, cada una con una resolución espacial de 15 metros. Esto significa que cada píxel de la imagen representa una porción de la superficie terrestre de 15 metros. • SWIR: tiene seis bandas con una resolución espacial de 30 metros en esta región. • TIR: Cinco bandas infrarrojas térmicas que tienen una resolución espacial de 90 metros.
Espectral		<p>Consiste en el número de bandas espectrales y/o la anchura del intervalo de longitudes de onda capaz de discriminar el sensor. Define el almacenamiento de la energía electromagnética registrada y la capacidad del sensor para detectar diferencias de longitud de onda entre objetos. Específicamente el sensor ASTER cuenta con catorce bandas definidas a continuación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • VNIR (0,52 a 0,86 μm): Tres bandas espectrales • SWIR (1,6 a 2,43 μm): Seis bandas espectrales • TIR (8,125 a 11,65 μm): Cinco bandas espectrales
Radiométrica		<p>La capacidad del sensor para distinguir diferentes niveles de intensidad de radiación electromagnética. ASTER utiliza una profundidad de bits de 8 bits por banda, lo que permite representar 256 niveles de gris en cada píxel.</p> <p>Esto brinda una buena precisión para detectar cambios sutiles en la reflectancia o la temperatura de la superficie de la Tierra.</p>
Temporal		<p>Se refiere a la frecuencia con la que el sensor pasa por el mismo punto de la superficie terrestre. La resolución temporal del sensor ASTER es de 16 días.</p>

5.2.1. Rasgos de absorción

Cada mineral presenta rasgos de absorción característicos que dependerán de la intensidad de las vibraciones de energía que se presente en las longitudes de ondas específicas (Mamani & Malpartida, 2014).

Las bandas Aster en la región del SWIR permiten identificar características de absorción de los minerales Al-OH, Fe, Mg-OH, H-OH y CO₃ (Pour, Hashim, & Marghany, 2010). La **Figura 11**, relaciona los principales rasgos de absorción de los minerales en las diferentes bandas del sensor ASTER.

Figura 11.

Relación entre los rasgos de absorción de los minerales característicos de las alteraciones hidrotermales y las bandas del sensor ASTER. Adaptado de Caiza (2018).

Enlace Iónico	Minerales Captados	Rasgos de Absorción	Bandas ASTER
OH	Sulfatos + caolinita	1.725 -1.85 μm	Banda 4
H₂O	Entre las láminas de las micas (enlace iónico + débil)	1.9 -2.025 μm	
AlOH	Alunita moscovita, illita, montmorillonita	2.150-2.225 μm	Banda 5 Banda 6
FeOH	Óxidos de hierro (hematita) e hidróxidos de hierro (goethita)	2.225-2.30 μm	Banda 7
CO₃ y/o MgOH	Carbonatos (calcita), clorita, epidota	2.3-2.4 μm	Banda 8 y 9

Según (Rowan, Hook, Abrams, & Mars, 2003) el mapeo espectral en ASTER ha mostrado ser efectivo en mapear la presencia de AlOH y los cambios en su estructura química causados por el metamorfismo teniendo en cuenta los rasgos y rangos espectrales. Además, diversos estudios han demostrado que, en zonas con procesos de metamorfismo, se encuentran minerales de alteración como moscovita, sericita y clorita en la fase retrograda (Corbet & Phillips, 1981).

5.3. Técnicas espectrales

Los datos espectrales de imágenes de satélites o sensores remotos se analizan y procesan mediante técnicas de mapeo espectral. Estas técnicas brindan datos importantes sobre la composición y características de la superficie terrestre (Caiza, 2018).

5.3.1. Combinaciones RGB

La combinación de bandas RGB es uno de los métodos más utilizados para el análisis espectral. El juego cromático de las bandas permite crear mapas de realces de color que son de bastante utilidad para identificar diferentes materiales.

El rojo (rojo; R), verde (verde; G) y azul (azul; B) son los colores primarios aditivos que, cuando se combinan en una proporción igual, producen luz blanca. Según (Gupta, 2018) esta combinación también permite producir una amplia gama de colores. El paso de cada banda por un canal u otro refleja diferentes colores de los elementos que ofrecen mayor o menor reflexión de las longitudes de onda. Esto da como resultado una imagen de falso color en la que se destacan elementos muy específicos para su posterior estudio y análisis.

Debido al comportamiento espectral de los objetos, esta técnica también permite analizar elementos específicos de la superficie terrestre en función de su espectro de emisión y absorción, permitiendo identificar aspectos como la vegetación, los usos del suelo o las masas de agua, entre otros.

5.3.2. Cocientes de bandas

Debido a que los números digitales (ND) tienen firmas espectrales similares de materiales específicos, es posible destacarlos utilizando la matemática de banda.

Esta técnica implica como su nombre lo dice una división de pixel a pixel, entre los ND almacenados en dos o más bandas de la misma imagen, en otras palabras, se busca una banda donde el mineral tiene picos de reflectancia (valores DN altos) y otra donde el mismo mineral tiene picos de absorción (valores DN bajos) (Pérez, Benites P, & Godeas, 2010), el resultado será una imagen donde los valores se reescalan para llenar el rango dinámico. En una imagen de cociente, las áreas de color más oscuro son aquellas en las cuales el denominador es mayor que el numerador, y así inversamente con las áreas más claras.

5.3.3. Índices Espectrales

Los enlaces de hidróxidos (OH) se presentan en la estructura química de los minerales de alteración hidrotermal, que se pueden distinguir mediante espectroscopia en la región SWIR. Por lo tanto, basándose en la reflectancia de algunos minerales alterados (Ninomiya, 2003), propuso algunos índices para el mapeo de algunos minerales característicos de alteraciones hidrotermales

Varios autores han utilizado estos índices, principalmente debido a la presencia de óxidos de hierro e hidroxilos, los cuales presentan alta reflectancia en la banda 4 pero baja reflectancia en la banda 7 y 6, respectivamente. Además, (Ninomiya & Fu, 2002) definieron los índices de máficos, cuarzo y carbonato. Sin embargo, en 2015, Guha y Kumar propusieron nuevos índices para medir la variación de minerales máficos, feldespatos y cuarzo en varios granitoides.

En la región de las bandas 10 y 12 de ASTER, la emisividad espectral del cuarzo es más baja que en las bandas 13 y 14. Los minerales máficos, por otro lado, tienen una emisividad espectral mayor que el cuarzo y el feldespato en las bandas 10, 11 y 12.

5.3.4. *Spectral Angle Mapper (SAM)*

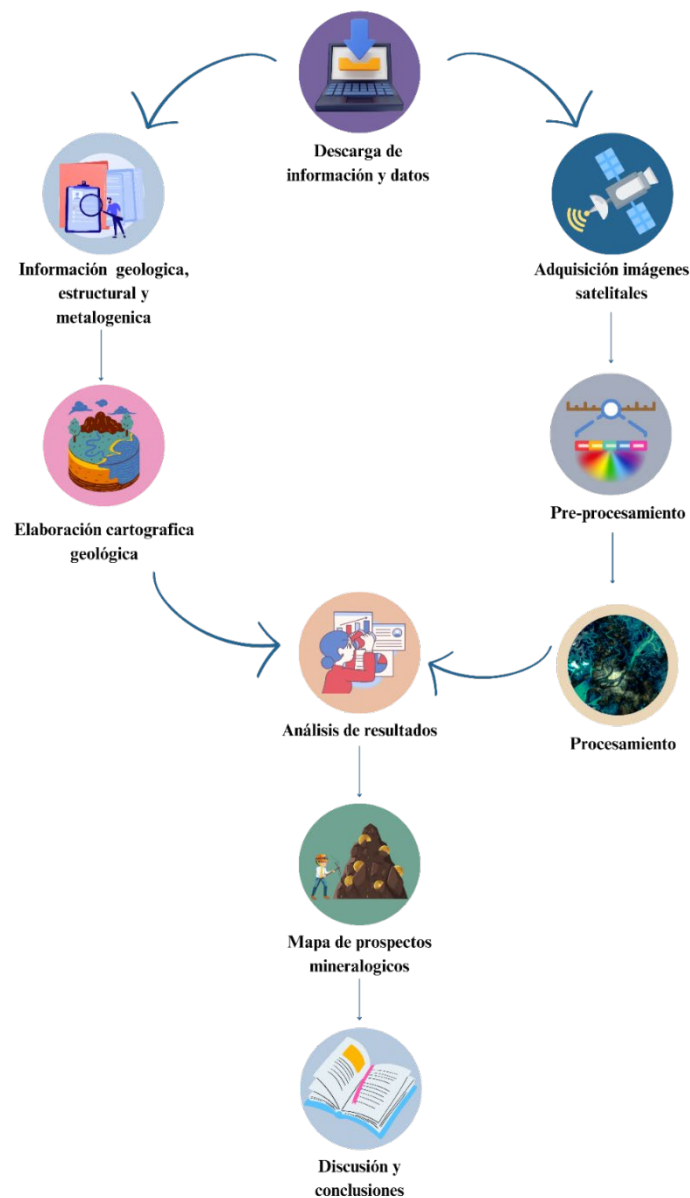
Las técnicas espectrales de clasificación supervisada como el Mapeo Espectral por el método SAM (Spectral Angle Mapper) y los cocientes de bandas son fundamentales en el procesamiento de las imágenes multispectrales. Este método compara las firmas espectrales de los píxeles de la imagen ASTER con los de las muestras de referencia, calculando la diferencia angular entre estos vectores espectrales. Esto permite una identificación más precisa de los minerales basándose en sus características espectrales únicas (Pérez, Benites P, & Godeas, 2010).

6. Metodología

Para determinar áreas de depósitos minerales en las zonas aledañas a los distritos mineros de Bingham, American Fork y Big and Little Cottonwood en Utah utilizando imágenes satelitales ASTER, se empleó el siguiente flujo de trabajo (**Figura 12**).

Figura 12.

Flujo de trabajo del desarrollo del proyecto.



6.1. Descarga de información y datos

Esta etapa se divide en dos fases: la primera es la información específica de los distritos mineros de Bingham, American Fork y Big and Little Cottonwood y sus zonas aledañas, considerando su geología, ambiente estructural y tipo de depósitos y su ambiente de formación con la cual se generó la cartografía geológica del área de estudio, la segunda es la información sobre los sensores remotos, imágenes multiespectrales aplicadas a la exploración de depósitos minerales y la adquisición de la imagen satelital utilizada.

Para la obtención de datos bibliográficos se utilizó la base de datos de la Universidad Industrial de Santander, de la Sociedad de Geólogos Económicos (SEG), el Servicio Geológico de Utah (SGU) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

La imagen adquirida corresponde a *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER nivel 1T) obtenidas del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Para su adquisición, se consideraron las estaciones del año y las condiciones atmosféricas. Se seleccionó una imagen de otoño, cuando la vegetación suele ser menor, lo que proporciona una mayor visibilidad de las características geológicas. Además, se eligió un día sin presencia de nubes para reducir la interferencia atmosférica. Los metadatos de la imagen se observan en la Tabla 3.

Tabla 3.

Metadato de la imagen ASTER utilizada para la investigación.

Parámetro	Valor
ID de la imagen	AST_L1T_00310012005182438_20150511094552_116435
Tipo de sensor	Aster
Altitud de sensor (Km)	705.000
Elevación del terreno (Km)	4,750

Tamaño de píxel (m)	15000
Fecha de vuelo	01-octubre-2005
Hora de vuelo GMT	18:24:38
Día/Noche	Noche
% Nubosidad	0
Proporción de mezcla de CO2 (ppm)	390,000
Ángulo cenital	18000
Ángulo azimutal	000

6.2. Pre-procesamiento

En esta etapa se calibró la imagen satelital para proceder al procesamiento, se tuvo en cuenta que la imagen se encuentra en nivel de procesamiento L1, por lo que ya cuenta con la corrección Crosstalk, y esta ortorectificada y georreferenciada.

Primero se aplicó la corrección radiométrica a los tres subsistemas (VNIR, SWIR y TIR) que componen la imagen. Se utilizó la herramienta *Radiometric Calibration*, esta considera las variaciones que pueden ser ocasionadas por fallos en el sensor, alteraciones en el movimiento de este o interferencias con la atmosfera, por lo consiguiente, su objetivo es homogenizar los datos y pasarlo a valores de radiancia.

A partir de este punto se trabajaron por separadas los canales ópticos de los canales del termal para su correcto pre-procesamiento. Los canales ópticos (VNIR+SWIR) se unieron en por medio de un *layer stacking*, y así mismo se unificaron a tamaño de píxel de 15 m. Posteriormente, se aplicó la corrección atmosférica con la herramienta *IAR Reflectance Correction* para recuperar los valores de reflectancia de la superficie de los datos obtenidos de la imagen satelital, desechando la influencia de la atmosfera en la imagen (Gupta, 2018). Luego, se ejecutaron los índices de agua, nieve y vegetación con el objetivo de verificar que pixeles generaban algún ruido en la imagen para finalmente enmascararlos. En este caso, al

no haber presencia de nubes sobre el area de trabajo, no se llevó a cabo el cálculo del índice de nubosidad.

Por otro lado, el subsistema de bandas termal (TIR) se le aplicó las correcciones, atmosférica termal en el módulo *Thermal Atmospheric Correction* y, por último, se hizo la normalización a emisividad con la función *Emissivity Normalization*.

Todos los procesos mencionados del pre-procesamiento y procesamiento fueron realizados en el software ENVI 5.3.

6.3. Procesamiento

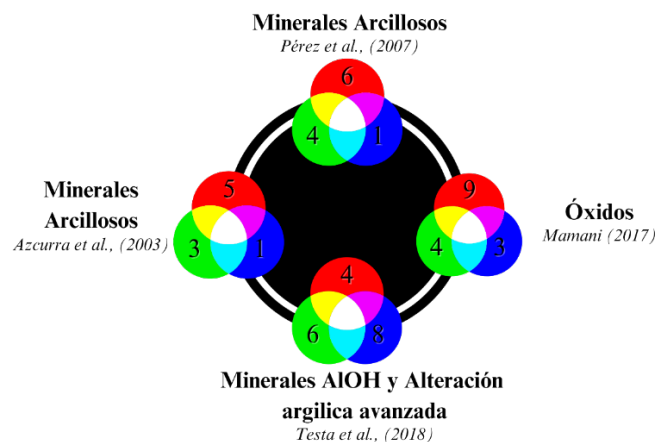
Esta fase se subdivide en dos, el primero se refiere a las técnicas espectrales utilizadas para el mapeo de minerales de alteración en los canales ópticos. La segunda en el procesamiento del canal termal. Se resalta que para esto se utilizó las imágenes previamente pre-procesadas.

6.3.1. *Procesamiento óptico*

6.3.1.1. Combinaciones de Bandas (RGB). En esta técnica se aplicaron cuatro combinaciones de bandas (**Figura 13**) que han sido aplicadas por varios autores para el mapeo de minerales arcillosos, zonas de alteración hidrotermal y óxidos asociados a pórfidos de cobre y depósitos de reemplazamiento.

Figura 13.

Combinaciones de bandas usadas en el procesamiento.



6.3.1.2. Cociente de bandas. En la zona de estudio se aplicaron cuatro cocientes de bandas, para la identificación de minerales de alteración y óxidos (Tabla 4). Estos fueron generados en el software ENVI y luego, fueron discriminados en el software Qgis para el correcto análisis de resultados.

Tabla 4.

Cocientes de bandas para la identificación de tipos de alteración

Alteración Hidrotermal	Cociente de Bandas
Propilítica	5/8
Óxidos e Hidróxidos de hierro	2/1
Silicatos Férricos	5/4
Fengita	5/6

6.3.1.3. Índices de Ninomiya. Esta técnica consta de cuatro índices mineralógicos definidos por (Ninomiya, 2003) los cuales fueron aplicados en la zona de estudio. Estos índices reconocen la presencia de minerales de alteración como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5.

Índices de Ninomiya aplicados en la zona de estudio

Índices de Ninomiya	Minerales de reconocimiento
OHIa	Moscovita, Illita, Montmorillonita
OHIb	Pirofilita
KLI	Caolinita, Dickita
CLI	Calcita

6.3.1.4. Técnica clasificación supervisada Spectral Angle Mapper (SAM).

Para la aplicación de esta técnica se debe entrenar primero al algoritmo, teniendo en cuenta las características geológicas y metalogénicas de la zona, se escogieron los minerales a mapear, como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6.*Minerales para mapear con la técnica SAM*

Grupo Mineralógico	Minerales	Fórmula Química
Óxidos	Magnetita	Fe ₃ O ₄
Arcillas	Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Anfiboles	Actinolita	Ca ₂ (Mg, Fe ²⁺) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂
Biotitas	Biotita	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH, F) ₂
Sulfuros	Calcopirita	Cu Fe S ₂
	Galena	PbS
	Pirita	FeS ₂
Feldespato Potásico	Albita	(NaAlSi ₃ O ₈
Silicatos	Epidota	Ca ₂ Al ₂ (Fe, Al) (SiO ₄)(Si ₂ O ₇)O(OH)
Carbonatos	Calcita	CaCO ₃
	Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂

6.3.2. *Procesamiento termal*

Para las bandas del subsistema TIR se aplicaron los cocientes de bandas definidos por (Guha & Kumar, 2016), los cuales permiten el reconocimiento de rocas con alto contenido de cuarzo y rocas de composición máfica.

Tabla 7

Índices de Ninomiya y Fu (2002) y Guha y Kumar (2015).

Ninomiya		Guha y Kumar		Minerales
Índice	Formula	Índice	Formula	
QI	$11*11/10*12$	QRI	$10/12*13/12$	Cuarzos
MI	$12/13$	MRI	$12/13*14/13$	Máficos

6.4. Análisis de resultados

Esta fase consistió en el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en la aplicación de las diferentes técnicas. Asimismo, se realizó la verificación de los resultados obtenidos en el software Qgis, eliminando los pixeles que no estuvieran calibrados.

6.5. Discusión

Después, se procedió a la revisar la correlación de la respuesta de todas las técnicas utilizadas y su concordancia con la información geológica y de los depósitos que hay en la zona de estudio, y se generó un mapa de prospectos o áreas de interés prospectivo.

6.6. Conclusiones

Esta fase del proyecto comprende las conclusiones obtenidas a través del análisis de los resultados, recomendaciones del proyecto y la redacción del informe final.

7. Análisis de resultados

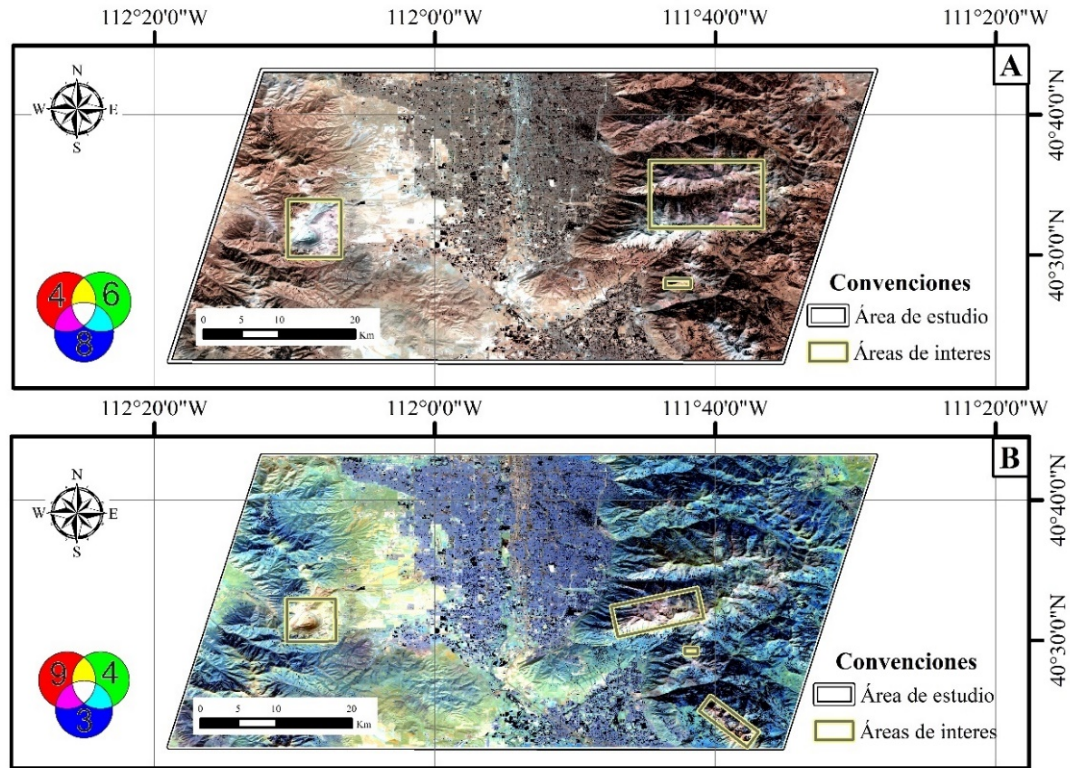
7.1. Combinaciones de Bandas

La técnica se realizó con el propósito de hacer un mapeo general de zonas que presentaran minerales arcillosos y óxidos. Por lo que se escogieron cuatro combinaciones mencionadas anteriormente.

La **Figura 14A** muestra la combinación 468 en donde se resaltan zonas que presentan minerales que contienen OH en su estructura química como las alteraciones argilica-fílica, se observa en coloraciones rosadas y las que tiene mayor contenido en sílice en color blanco (Testa, Villanueva, Cooke, & Zhang, 2018). La **Figura 14B** muestra la combinación 943, en donde las áreas con presencia de óxidos se resaltan en tonalidades amarillas (Mamani & Malpartida, 2014).

Figura 14.

Combinaciones de bandas RGB. A) 468, B) 943, muestra las zonas de interés resaltadas en recuadros amarillos

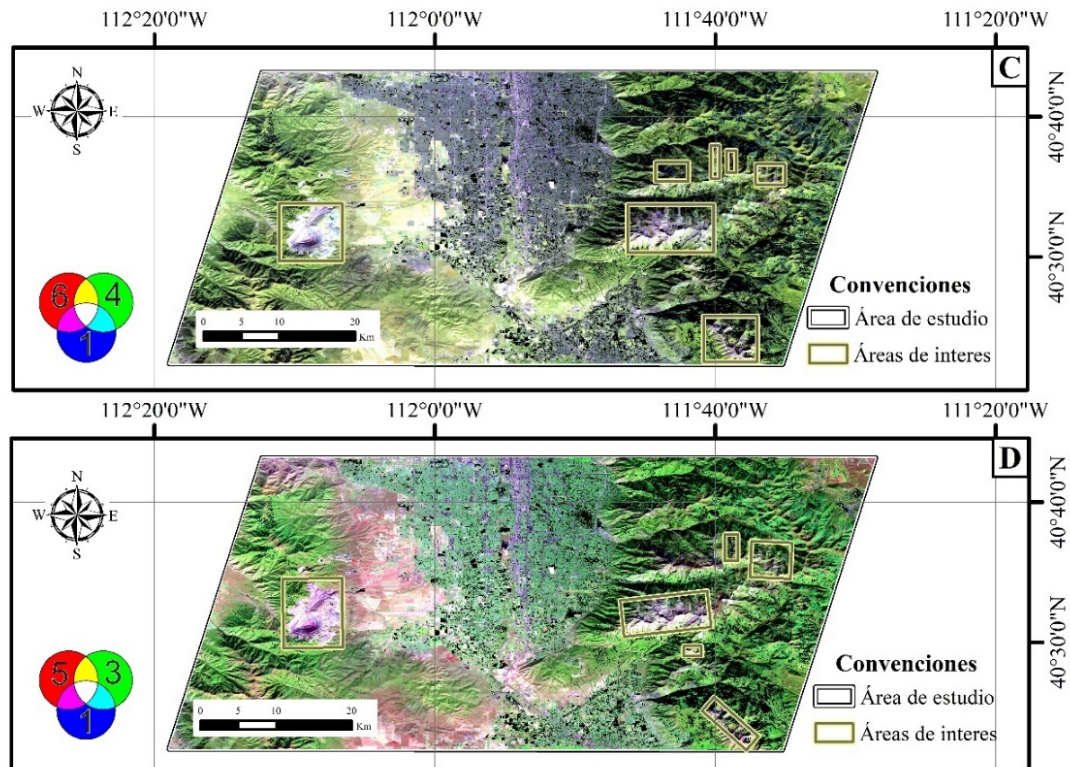


En la **Figura 15C** se observa la combinación 641 que permite identificar minerales arcillosos al igual que la combinación 531 en la **Figura 15D**, se presenta una alta respuesta en la banda 5 y 6 con relación a la banda 1. En las dos combinaciones se demarca la mina a cielo abierto del distrito de Bingham en coloraciones moradas, presentando más intensidad en la combinación 531.

En las cuatro combinaciones aplicadas se resalta bastante bien la mina a cielo abierto del distrito Bingham, y hacia el este y sureste de la zona de estudio (**Figura 14** y **Figura 15**) también se observa presencia de minerales arcillosos y óxidos

Figura 15.

Combinaciones de bandas RGB. C) 641, D)531, muestra las zonas de interés en recuadros amarillos.



7.2. Cocientes de Bandas

Los cocientes de bandas son otra de las herramientas que sirven para identificar zonas con presencia de minerales arcillosos, grupos mineralógicos y óxidos, esta técnica considera los valores bajos de reflectancia, conocidos como picos de absorción.

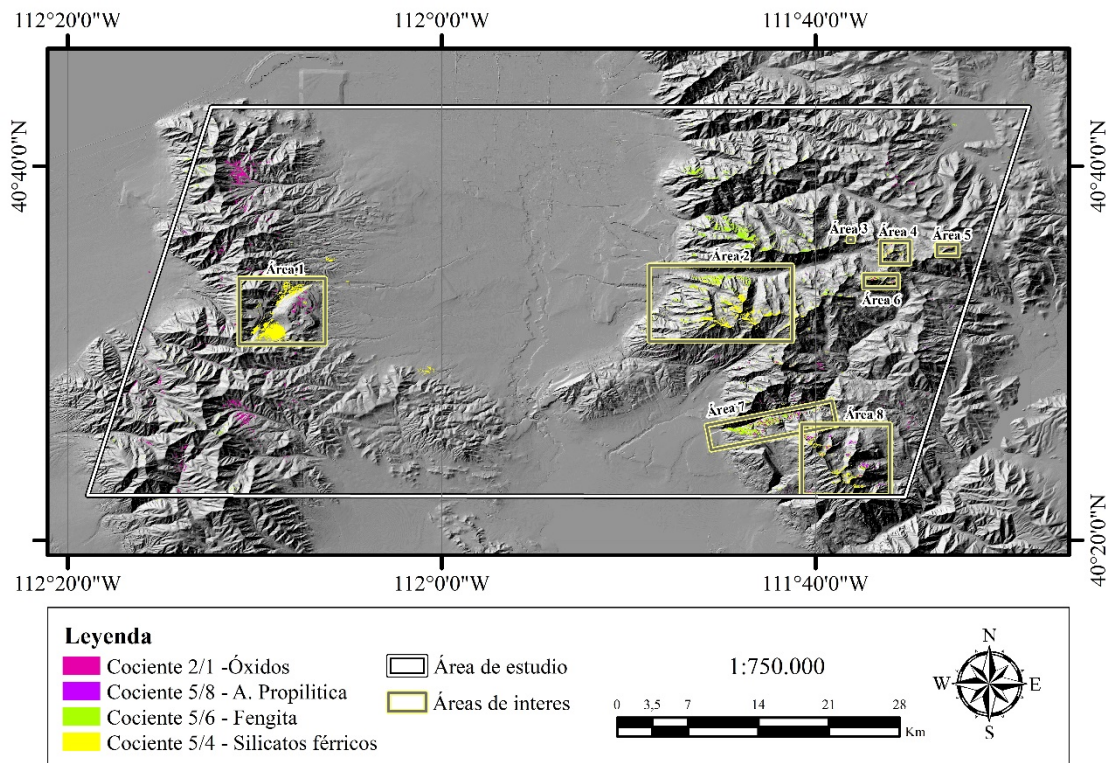
Se aplicaron los cuatro cocientes mencionados anteriormente, en el cociente 2/1 se identifican zonas con presencia de óxidos como los minerales hematita y goetitha; el cociente 5/8 determina alteración propilítica, 5/6 al mineral fengita, y el cociente 5/4 resalta zonas con presencia de silicatos férricos.

La **Figura 16.** muestra zonas con presencia de silicatos férricos (cociente 5/4) en la mina de Bingham y hacia el este y sureste de la zona de estudio. Las áreas con óxidos (cociente 2/1) se destacan hacia el oeste de la zona. La fengita (cociente 5/6) se observa hacia

el este y sureste de la zona. Por último, se pueden notar áreas de alteración propilítica (cociente 5/8) se denotan hacia el este y sureste de la zona.

Figura 16.

Aplicación de cocientes de bandas 2/1, 5/8, 5/6, 5/4 en la zona de estudio, ocho áreas de interés se encuentran en recuadros amarillos.



Las áreas demarcadas en la **Figura 16.** indican la coexistencia de más de 2 índices. Siguiendo este parámetro, se definieron 8 áreas de interés que se distribuyen al oeste, este y suroeste de la zona. El área 1 se caracteriza por la presencia de silicatos férricos y óxidos, en menor proporción fengita y se ubica en la mina a cielo abierto de Bingham. El área 2 se localiza al este, donde predominan los silicatos férricos y la fengita en mayor cantidad, con una menor presencia de alteración propilítica. Las áreas del 3 al 6 se encuentran al noreste

del área 2 y se caracterizan por ser áreas reducidas donde convergen la alteración propilítica, la fengita y los silicatos férricos. Por último, el área 7 y 8 se localizan al sureste de la zona de estudio y presentan de igual forma la unión de la alteración propilítica, fengita y silicatos férricos y con una proporción menor de óxidos.

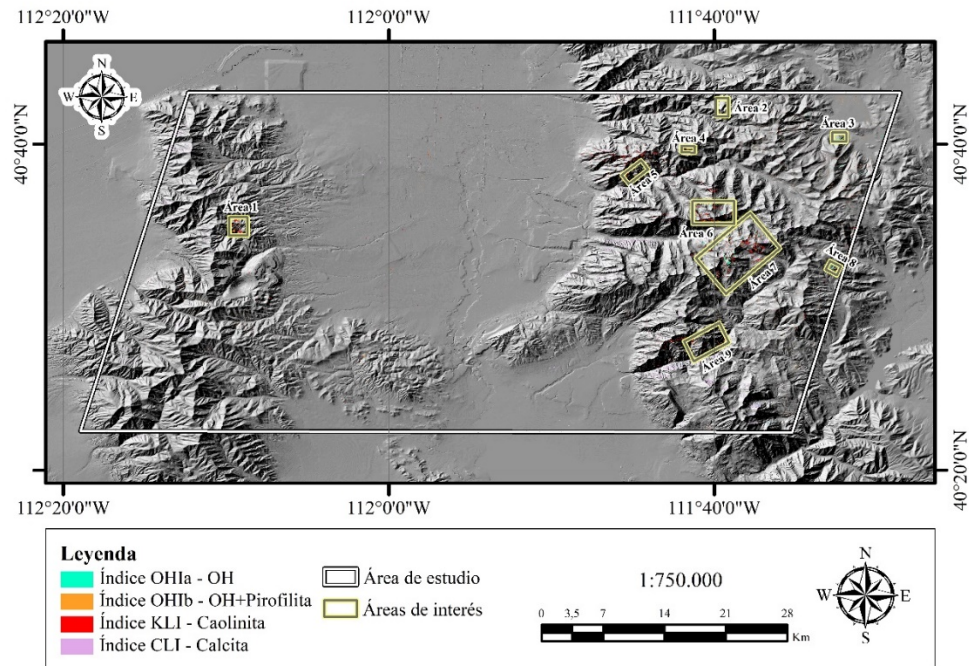
7.3. Índices Espectrales

Los índices definidos por (Ninomiya, 2003) permitieron identificar la respuesta de aquellas zonas con presencia de minerales de alteración.

En la **Figura 17**, se observa que el índice de calcita es predominante hacia el oeste, este y sureste de la zona de estudio. Por otro lado, el índice de OH se encuentra principalmente hacia el este y noreste de la zona. Se identifica en menor proporción el índice de calcita y pirofilita, localizándose en el oeste, este y sureste de la zona. Además, en la **Figura 17** se destacaron las áreas de interés donde convergen más de 2 índices, lo que resultó en 9 áreas de interés.

Figura 17.

Aplicación de índices de Ninomiya OH_{1a}, OH_{1b}, KLI y CLI en la zona de estudio, áreas de interés se encuentran en recuadros amarillos.



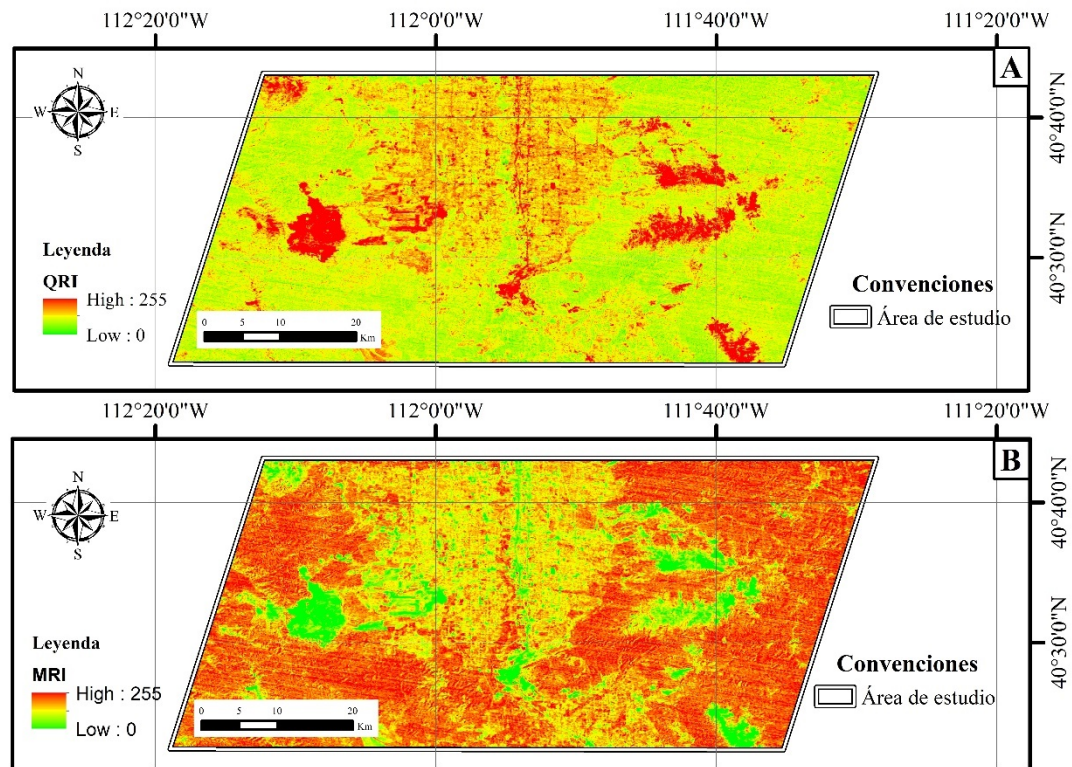
El área 1 se sitúa al norte de la mina a cielo abierto de Bingham, donde predominan en mayor proporción la caolinita y la pirofilita, con una menor presencia de minerales que contienen en su estructura OH. Las áreas del 2 al 5 son zonas pequeñas ubicadas al noreste, donde se observa en menor proporción la coincidencia de los minerales que contienen en su estructura OH, caolinita y pirofilita. Las áreas 6 y 7, localizadas al este, se caracterizan por la convergencia de todos los índices. El área 8 se encuentra más al este y muestra en menor proporción la coincidencia de todos los índices. Finalmente, el área 9 está situada al sureste de la zona y presenta la convergencia de pirofilita y caolinita, con una presencia muy baja de calcita.

Por otro lado, se presenta la respuesta de los índices de las bandas termales propuestos por (Guha & Kumar, 2016), como se observa en la **Figura 18**. En la **Figura 18A** se muestra el índice de cuarzo (QRI), el cual permite identificar el contenido de sílice en la superficie terrestre, los valores altos se presentan en coloraciones rojas, resaltando claramente la mina

a cielo abierto de Bingham. Además, en la **Figura 18B** se encuentra el índice de máficos (MRI), donde los valores con alto contenido de máficos se destacan en tonos rojos. Se puede apreciar una relación inversa entre ambos índices.

Figura 18.

Mapas de los índices de la región del TIR para la zona de estudio. A) mapa de QRI en donde los mayores valores representan los altos contenidos de sílice. B) mapa del MRI en donde los mayores valores identifican altos contenido de máficos.



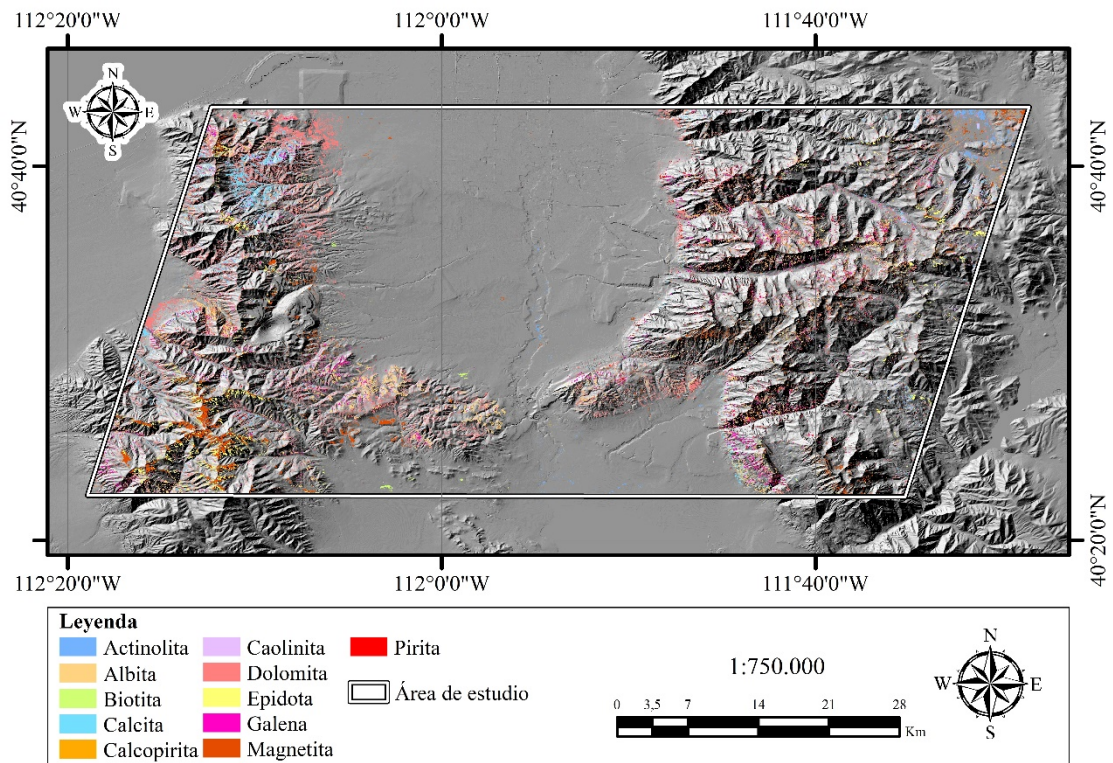
7.4. Spectral Angle Mapper

Con esta técnica, se logró cartografiar once minerales característicos de acuerdo con las características geológicas de la zona y la literatura de los depósitos minerales identificados en le región. Sin embargo, como se observa en la **Figura 19** existe dispersión en los datos

que no permite identificar claramente áreas de interés mineralógico. Esto puede deberse a la utilización de las firmas teóricas espectrales de la biblioteca espectral del USGS, en lugar de muestreo espectral obtenido directamente en el área de estudio.

Figura 19.

Mapa de minerales mapeados mediante la técnica espectral SAM



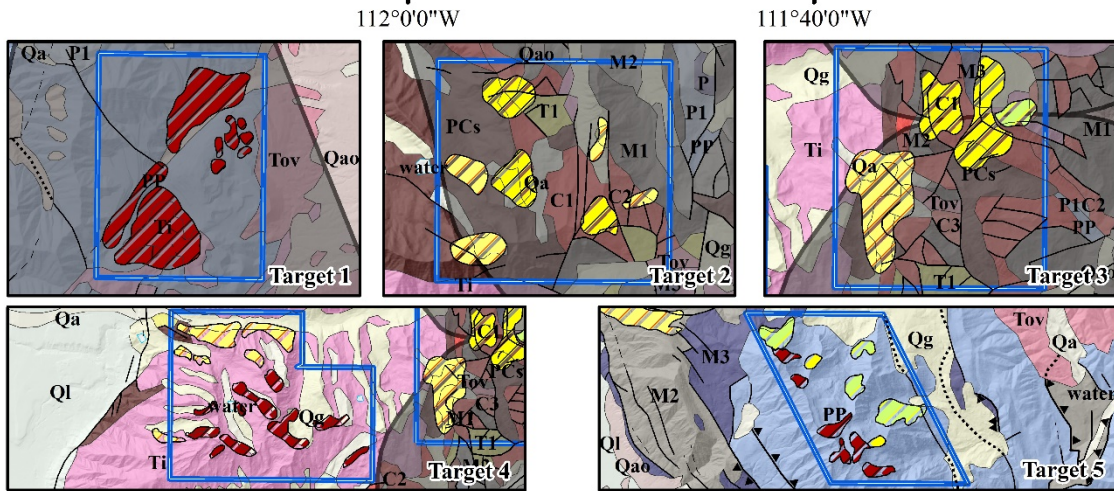
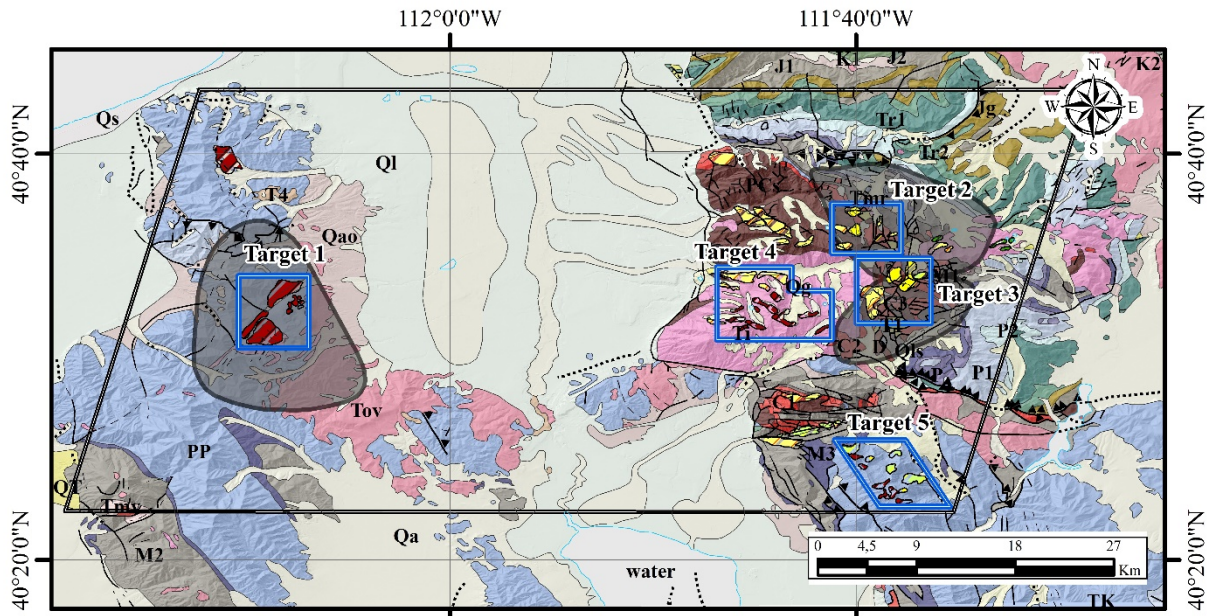
7.5. Prospectos Mineralógicos

Finalmente, las zonas resultantes de las tres técnicas anteriores (combinaciones de bandas, cocientes de bandas y índices de Ninomiya) se trasladaron con el objetivo de identificar posibles áreas prospectivas para exploración mineral. Asimismo, se tuvo en cuenta la geología estructural y las litologías de la zona.

Se determinaron cinco áreas potenciales que incluyen las alteraciones Gossan, Argílica, Argílica avanzada y Propilítica, como se muestra en la **Figura 20**. Se destaca que la mina de Bingham se identifica debido a su buena respuesta al presentar suelo descubierto, pero no se considera un descubrimiento debido a su histórica producción.

Figura 20.

Ubicación de targets o áreas de exploración en la zona de estudio



Leyenda		
P1 Fm. Arcturus	Q1 Fm. Axtell y Harkers	Qs Dep. Superficial de lodos y salinas
PP Grupo Oquirrh	T4 Fm. Salt Lake	Qls Dep. Superficial de Deslizamientos
P Calizas Ely	Tmr Riolitas	Qa Dep. Superficial Aluviales y Coluviales
M3 Lodolitas Chainman	Tmv Grupo Quichapa y otras rocas volcánicas	Qao Dep. Aluviales Antiguos
M2 Fm. Woodman	Ti Cuarzomonzonita de Swanson	Qg Dep. Superficial Glacial
M1 Calizas Fm. Joana	Tov Fm. Isom, Needles Range y otras	Ql Dep. Superficial Lake Bonneville
D Fm. Victoria	T1 Fm. Wasatch/Colton	
C3 Dolomita de Ajax	J1 Grupo San Rafael	Alteraciones
C2 Fm. Ophir y Calizas Maxfield	Jg Areniscas Navajo/Nugget	Gossan Argilica Avanzada Propilitica
Q1 Prospect Mountain Quartzite	Tr2 Fm. Chinle y Ankareh	Argilica Propilitica-Argilica
PCs Fm. Big Cottonwood	Tr1 Fm. Thaynes, Moenkopi y otras	
PCm Farmington Canyon y Little Willow: Esquistos y neises	P2 Fm. Phosporia, Plympton y otras	Convenciones
		— Contacto geológico - - - Falla normal inferida
		— Falla normal ····· Falla normal escondida
		▲ Falla inversa ▲···· Falla inversa escondida
		— Limite cuerpo de agua
		□ Área de estudio □ Targets □ Distritos Mineros

8. Discusión

La zona se caracteriza por su complejidad estructural debido al fallamiento y plegamiento provocado por la Orogenia Servier: El intenso fallamiento presentado en la zona ha influido en la formación y preservación de los depósitos minerales (Calkins, Butler, & Heikes, 1943). Sin embargo, las montañas de la zona están cubiertas por bosque de coníferas, con diferentes especies arbóreas en distintas elevaciones, lo que dificulta la identificación directa de las rocas en la cobertura superficial. Para resolver este problema, se aplicó una máscara de vegetación que permitió eliminar la cobertura vegetal y evitar resultados erróneos.

La aplicación de técnicas espectrales ha permitido identificar cinco áreas de posible interés mineralógico, las cuales muestran asociaciones minerales indicativas de depósitos. Tres de estas áreas pertenecen a los distritos mineros de la región, lo que valida la metodología empleada. Las dos áreas restantes se encuentran en zonas cercanas a los distritos mineros de American Fork y Big and Little Cottonwood. Se observaron buenos resultados con las combinaciones de bandas, especialmente en la mina a cielo abierto de Bingham, destacando la buena respuesta del método en áreas con suelo descubierto. Además, se encontró que el cociente de bandas (5/4) mostró la mejor respuesta para la identificación de silicatos férricos en las zonas al oeste, este y sureste de la zona de estudio. Sin embargo, los índices espectrales propuestos por Ninomiya en la región del SWIR mostraron una baja respuesta en la zona.

Los minerales utilizados en la técnica del SAM fueron escogidos considerando los tipos de depósitos reportados en la bibliografía de la zona. Aunque mostraron alguna respuesta, el resultado fue muy disperso, lo que no permitió identificar claramente áreas de

interés mineralógico. En cuanto a la región del termal, se observó una relación directamente proporcional entre presencia de contenido de sílice y los minerales máficos en la zona.

9. Conclusiones

Se determinaron cinco posibles áreas de interés mineral mediante las técnicas espectrales de combinaciones de banda, cocientes de banda e índices de Ninomiya, lográndose identificar cuatro alteraciones gossan, alteración argílica, argílica avanzada y propilítica.

Los targets determinados se encuentran hacia el este y sureste de la zona de estudio presentando una fuerte relación con las fallas cartografiadas por el Servicio Geológico de Utah, demostrando que estas facilitan el desplazamiento de los fluidos responsables de la formación de los depósitos minerales.

La aplicación de técnicas espectrales en imágenes ASTER permitió la identificación de alteraciones hidrotermales y óxidos, mostrando sus mejores resultados en la combinación de bandas 531 y 641 para la detección de minerales arcillosos. Además, se encontró que los mejores cocientes de bandas en la zona son $5/4$ y $5/6$ para el reconocimiento de silicatos férricos y fengita, respectivamente. Sin embargo, se observó que los índices de Ninomiya utilizados en la zona mostraron una baja respuesta, al igual que la clasificación supervisada del SAM. Aunque esta última permitió el reconocimiento de once minerales, su respuesta fue muy dispersa y no resultó determinante para la cartografía de áreas de interés.

La clasificación supervisada SAM permitió el reconocimiento de minerales mediante la comparación de la firma espectral de la imagen con la de la biblioteca espectral de la USGS. Sin embargo, al no utilizar firmas espectrales tomadas in situ con un espectrómetro

de roca, el ángulo espectral presenta un mayor margen de error. Esto se debe a que las firmas espectrales de la USGS son ideales y no representan las condiciones reales de las rocas presentes en la zona de estudio.

Los índices en la región termal muestran una respuesta efectiva para la identificación de litologías, especialmente para rocas con alto contenido de sílice o máficos. Esto se debe a la correlación entre la alta emisividad captada en las bandas 13 y 14 de ASTER y la baja emisividad de las bandas 10 y 12.

Además, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se utilizó como un método de discriminación para la cartografía de objetivos, con el objetivo de eliminar los píxeles de vegetación y evitar un resultado erróneo.

10. Recomendaciones

Para validar la técnica espectral SAM (Spectral Angle Mapper) se recomienda utilizar firmas espectrales de muestra de rocas tomadas in situ con TERRASPEC para la recopilación y creación de la biblioteca espectral.

La utilización de imágenes satelitales ASTER para el mapeo de minerales de alteración es un método cualitativo que no invalida ni reemplaza el trabajo de campo. Por lo tanto, se recomienda verificar las áreas determinadas mediante la cartografía geológica y, asimismo, validarlas con otras aplicaciones como análisis geoquímico y estudios geofísicos.

Al utilizar imágenes multiespectrales para el mapeo espectral, es crucial considerar las temporadas con las mejores condiciones climáticas y evitar el uso de imágenes con presencia de nubosidad. Aunque es posible enmascarar las nubes, estas pueden obstaculizar

el análisis de la información en esas áreas, lo que puede afectar la calidad y la interpretación de los resultados.

Referencias Bibliográficas

- Abrams, M., & Yamaguchi, Y. (2019). Twenty years of ASTER contributions to lithologic mapping and mineral exploration. *Remote Sensing*, *11*(11), 1394.
- Aristizabal, D., & Garcia, J. (2021). *Análisis de imágenes multiespectrales para la prospección de depósitos de minerales metálicos en los proyectos de Boca del Rio-Tacna, Inchupalla-Puno, Perú y BerensSturgeon, Ontario, Canada*.
- Brandmeier, M. (2010). Remote sensing of Carhuarazo volcanic complex using ASTER imagery in Southern Peru to detect alteration zones and volcanic structures—a combined approach of image processing in ENVI and ArcGIS/ArcScene. *Geocarto International*, *25*(8), 629-648.
- Bravo, N. (2017). *Teledetección Espacial Lansat, Sentinel2, Aster LIT y Modis*. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Butler, B. S., Loughlin, G. F., & Heikes, V. C. (1920). The ore deposits of Utah: U.S. *Geological Survey Professional Paper*, *111*, 672.
- Caiza, E. (2018). *Estimación de zonas de alteración hidrotermal mediante interpretación de imágenes satelitales tipo ASTER y uso del equipo Terrraspec en la zona oriental de cerro de pasco, Perú*. Universidad central del Ecuador.
- Calkins, F. C., Butler, B. S., & Heikes, V. C. (1943). *Geology and ore deposits of the Cottonwood-American Fork area, Utah* (Vol. 201). Utah: US Government Printing Office.
- Cardoso Fernandes, J., Teodoro, A. C., Lima, A., Perrotta, M., & Roda Robles, E. (2020). Detecting Lithium (Li) mineralizations from space: Current research and future perspectives. *Applied Sciences*, *10*(5), 1785.
- Carten, R. B. (1986). Sodium-calcium metasomatism; chemical, temporal, and spatial relationships at the Yerington, Nevada, porphyry copper deposit. *Economic Geology*, *81*(6), 1495 - 1519.
- Chen, Y., Wang, Y., Zhang, F., Dong, Y., Zhihong, S., & Liu, G. (2023). Remote Sensing for Lithology Mapping in Vegetation-Covered Regions: Methods, Challenges, and Opportunities. *Minerals*, *13*(9), 1153. doi:<https://doi.org/10.3390/min13091153>
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*. Ediciones Rialp.
- Chuvieco, S. E. (2008). Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio.
- Corbet, G. J., & Phillips, G. N. (1981). Regional retrograde metamorphism of a high-grade terrain: The Willyama Complex, Broken Hill, Australia. *Lithos*, *14*, 59 - 73.

- Culqui Puerta, J. P. (2022). *Texturas y geoquímica de elementos traza en minerales de mena en mineralizaciones polimetálicas alojadas en cuerpos de Skarn del distrito de Morococha, Perú.*
- Demirel, N., & Düzgün, H. (2011). *Remote Sensing of the Mine Environment.* CRC Press.
- Dilles, J., & Einaudi, M. (1992). Wall-rock alteration and hydrothermal flow paths about the Ann-Mason porphyry copper deposit, Nevada – a 6-km vertical reconstruction. *Economic Geology*, 87, 1963 -2001.
- Ege, C. L. (2005). Selected mining districts of Utah. *Utah Geological Survey*, 5(5).
- Fraser, R. S., & Curran, R. J. (1976). Effects of the atmosphere on remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 34 - 84.
- Gabr, S., Ghulam, A., & Kusky, T. (2010). Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data. *Ore Geology Reviews*, 38(1 - 2), 59 - 69.
- Guha, A., & Kumar, V. (2016). New ASTER derived thermal indices to delineate mineralogy of different granitoids of an Archaean Craton and analysis of their potentials with reference to Ninomiya's indices for delineating quartz and mafic minerals of granitoids—An analysis in Dharwar. *Ore Geology Reviews*, 74, 76 - 87.
- Gupta, R. P. (2018). *Remote sensing geology.* Springer.
- Hunt, G. R. (1980). Near-infrared (1.3–2.4) μm spectra of alteration minerals—Potential for use in remote sensing. *Geophysics*, 44(12), 1974 - 1986.
- James, A. H., Smith, W. H., & Bray, R. E. (1961). Bingham district; a zoned porphyry ore deposit. *Utah Geological Society Guidebook*, 16, 81 - 100.
- Khorram, S., Van der Wiele, C. F., Koch, F. H., Nelson, S. A., & Potts, M. D. (2016). *Principles of applied remote sensing.* Springer.
- Krahulec, K. (2018). Production history of the Bingham mining district. Salt Lake County, Utah—an update.
- Krahulec, K., Pennell, W. M., & Garside, L. J. (2015). Tertiary intrusion-related copper, molybdenum, and tungsten mining districts of the eastern Great Basin. *In New Concepts and Discoveries: Geological Society of Nevada 2015 Symposium CD*, 219 - 250.
- Lowell, J., & Guilbert, J. (1970). Lateral and Vertical Alteration-Mineralization Zoning in Porphyry Ore Deposits. *Economic Geology*, 65, 373 - 408.
- Mamani, D. H., & Malpartida, J. C. (2014). Reconocimiento De Zonas De Alteración Hidrotermal En Depósitos Epitermales Con Imágenes Aster-Sur Del Peru.
- 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.
- National Mining, A. (2021). Economic Contributions of U.S Mining. Obtenido de <https://nma.org/wp-content/uploads/2021/02/Economic-Contributions-of-Mining-in-2021.pdf>
- Ninomiya, Y. (2003). A stabilized vegetation index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 3, 1552 - 1554.
- Ninomiya, Y., & Fu, B. (2002). Quartz index, carbonate index and SiO₂ content index defined for ASTER TIR data. *Journal of The Remote Sensing Society of Japan*, 22(1), 50 - 61.
- Pérez, D. J., Benites P, E. O., & Godeas, M. C. (2010). Reconocimiento de alteración hidrotermal con el sensor ASTER, en el curso medio del Río Santa Cruz (31° 40's), provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 66(4), 623 - 633.
- Perry, L. I., & McCarthy, B. M. (1977). Lead and zinc in Utah, 1976. *Utah Geological and Mineral Survey Open-File Report*, 22, 525.
- Porter, J. P., Schroeder, K., & Austin, G. (2012). Geology of the Bingham Canyon porphyry Cu-Mo-Au deposit, Utah. In J. W. Hedenquist, M. Harris, & F. Camus, *Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world: a tribute to Richard H. Sillitoe* (Vol. 16, pp. 127-146). Society of Economic Geologists.
- Pour, A. B., & Hashim, M. (2012). Identifying areas of high economic-potential copper mineralization using ASTER data in the Urumieh–Dokhtar Volcanic Belt, Iran. *Advances in Space Research*, 49(4), 753 - 769.
- Pour, A. B., Hashim, M., & Marghany, M. (April de 2010). Characterization of ASTER Data for Mineral Exploration. *MRSS 6th international remote sensing & GIS conference and exhibition*, 6.
- Redmond, P. B., & Einaudi, M. T. (2010). The Bingham Canyon porphyry Cu-Mo-Au deposit. I. Sequence of intrusions, vein formation, and sulfide deposition.
- Ridley, J. (2013). *Ore Deposit Geology*. Cambridge University Press. doi:<https://doi.org/10.1017/CBO9781139135528>
- Roonwal, G. S. (2018). Remote Sensing in Mineral Exploration. *Mineral Exploration: Practical Application*, 119 - 153.
- Rowan, L. C., Hook, S. J., Abrams, M. J., & Mars, J. C. (2003). Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system. *Economic Geology*, 98(5), 1019 - 1027.

- Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore geology reviews*, 14(3 - 4), 157 - 183.
- Seedorff, E., Dilles, J., Proffett, J., Einaudi, M., Zurcher, L., Stavast, W., . . . Barton, M. (2005). Porphyry Deposits: Characteristics and Origin of Hypogene Features. *Economic Geology 100th Anniversary*, 251 - 298.
- 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*, 10(2), 203.
- Tooker, E. W., & Roberts, R. J. (1970). Upper Paleozoic rocks in the Oquirrh Mountains and Bingham mining district, Utah. *U.S. Geological Survey Professional*, 629(A), 76.
- Van der Meer, F. D., Van der Meer, H. M., Van Ruitenbeek, F. J., Hecker, C. A., Bakker, W. H., Noomen, M. F., & Woldani, T. (2012). Multi-and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International journal of applied Earth observation and geoinformation*, 14(1), 112 - 128.
- Welsh, J. E., & James, A. H. (1961). Pennsylvanian and Permian stratigraphy of the Central Oquirrh Mountains, Utah: Geology of the Bingham Mining District and Northern Oquirrh Mountains. *Utah Geological Society Guidebook*, 16, 1 - 16.