

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

# FACULTAD DE INGENIERÍA

# Análisis de imágenes hiperespectrales como técnica geofísica para la exploración minera

## **INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de

Ingeniera Geofísica

# PRESENTA

Erika Alejandra Vázquez Hurtado

# ASESORA DE INFORME

Dra. Iza Canales García



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL (Titulación con trabajo escrito)



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado <u>ANALISIS DE IMAGENES</u> <u>HIPERESPECTRALES COMO TECNICA GEOFISICA PARA LA EXPLORACION MINERA</u> que presenté para obtener el titulo de <u>INGENIERO GEOFÍSICO</u> es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

ERIKA ALEJANDRA VAZQUEZ HURTADO Número de cuenta: 316025548

# Contenido

1.	Resumen
2.	Introducción5
3.	Objetivo
4.	Antecedentes
4	.1 Imágenes Hiperespectrales
Ц	.2 Sensores Hiperespectrales1
	4.2.1 Sensor Hiperespectral Aisa DUAL15
Ц	.3 Librerías espectrales
4	.4 Ambientes Hidrotermales19
5.	Contexto de la participación profesional23
6.	Metodología utilizada24
7.	Resultados
8.	Conclusiones
9.	Reflexiones y aprendizajes44
10.	Bibliografía45

### Índice de Figuras

Figura 1. Principio físico de las Imágenes Hiperespectrales	8
Figura 2. Interacción de la energía incidente, reflejada y transmitida	9
Figura 3. Carácter básico de una imagen digital	10
Figura 4. Carácter básico de los datos de imagen digital. (a) Cada imagen está representada p	oor
una cuadrícula de pixeles en donde cualquier pixel tiene un conjunto de DN que representa s	su
valor en cada banda (b)	10
Figura 5. Absorciones atmosféricas	12
Figura 6. Resolución espacial	13
Figura 7. Resolución radiométrica	13
Figura 8. Resolución espectral	14
Figura 9. Cubo Hiperespectral	14
Figura 10. Rango de energía que registra el equipo hiperespectral del SGM	15
Figura 11. Espectroscopia de imágenes	15
Figura 12. Sensor Aisa DUAL	16
Figura 13. Espectros de reflectancia de minerales comunes	17
Figura 14. Diagrama comparativo en los depósitos epitermales de baja y alta sulfuración	20
Figura 15. Minerales de alteración común en sistemas hidrotermales	22
Figura 16. Representación gráfica de pixeles malos	24
Figura 17. Generación del archivo *.QL (a) y mapa de avance (b)	26
Figura 18. Huecos entre franjas de observación	26
Figura 19. Presencia de nubes altas (a) y bajas (b)	27
Figura 20. Desplazamiento entre franjas de observación	28
Figura 21. Corregistro entre los sensores VNIR y SWIR (a). Ajuste del pico del CO <sub>2</sub> (b)	29
Figura 22. Ángulos solares	30
Figura 23. Mosaico de 52 bandas (izquierda) y de 121 bandas (derecha)	31
Figura 24. Mosaico de 52 bandas con máscara total	32
Figura 25. Concepto Spectral Angle Mapper	33
Figura 26. Mapa de clasificación de minerales de alteración en la zona de interés, Sonora	38
Figura 27. Modelo de alteraciones mineralógicas comunes en sistemas hidrotermales. En el	
recuadro rojo se resalta una zona de la alteración argílica avanzada en donde se interpretó	
alunita y caolinita	39

### Índice de Tablas

Tabla 1. Firmas Espectrales obtenidas de la librería de la USGS, el eje Y correspo	onde a la
Reflectancia [%] y el eje X a la Longitud de onda [nm]	
Tabla 2. Algunas alteraciones hidrotermales	21
Tabla 3. Firmas espectrales de los minerales identificados a partir del vuelo de l	Imágenes
Hiperespectrales de un tamaño de pixel de 3 metros	41

### 1. Resumen

El territorio mexicano ha experimentado una intensa actividad tectono-magmática, particularmente desde el Mesozoico-Cenozoico, lo que ha dado lugar a la formación de numerosas zonas mineralizadas. En este contexto, el estado de Sonora destaca como uno de los estados más importantes para la exploración minera en el país.

El presente trabajo, tiene como finalidad identificar minerales de alteración hidrotermal que indiquen posibles depósitos minerales de interés económico. Para ello, se aplicó el método de imágenes hiperespectrales, utilizando datos adquiridos por el Servicio Geológico Mexicano (SGM), en un área en el estado de Sonora, mediante el sensor hiperespectral Aisa DUAL.

Los datos adquiridos fueron validados, procesados, analizados e interpretados mediante el uso de software especializado. Y con el apoyo de bibliotecas espectrales se identificaron firmas espectrales asociadas a minerales de alteración hidrotermal.

Con base en el análisis de las firmas espectrales, se interpretaron los siguientes minerales de alteración: alunita, caolinita, caolinita +<sup>1</sup> alunita, caolinita + montmorillonita, illita, illita + nontronita y montmorillonita; geológicamente, sobre unidades litológicas de pórfido andesítico (TePA), andesita - toba andesítica (TpaA-TA) y basalto (TmB) del Terciario Paleógeno. Los envolventes de minerales de alteración interpretados se encuentran sobre un sistema de fracturas y fallas normales con rumbo NW-SE y SW-NE el cual pudo servir para el emplazamiento de la mineralización.

La identificación del mineral alunita indica que la zona de interés se vio afectada por soluciones hidrotermales de alta temperatura y acidez asociada a la alteración argílica avanzada. Destacando que la alunita es un mineral clave en la búsqueda de depósitos minerales de interés económico.

Los hallazgos generados reflejan la eficacia de la tecnología hiperespectral como herramienta en la exploración minera, ya que proporciona una cobertura geográfica amplia y rápida aportando información valiosa en la toma de decisiones en la exploración geológica, ya que enriquece el conocimiento sobre los recursos minerales presentes en una región y de los procesos asociados en el subsuelo, facilitando así la prospección minera.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> El signo + se refiere que es una mezcla de dos minerales

## 2. Introducción

En el presente trabajo se expone el método de imágenes hiperespectrales utilizado en el Servicio Geológico Mexicano (SGM), proyecto implementado en el SGM desde el año 2011 y en el cual participo actualmente. Esta metodología de exploración es utilizada en el SGM para identificar y mapear diversos minerales, producto de alteraciones hidrotermales, en superficie en la búsqueda de evidencia de depósitos minerales económicos en el subsuelo mediante el uso del sensor hiperespectral Aisa DUAL; el cual, tiene la capacidad de capturar información en un rango de energía electromagnética de 400 a 2500 nanómetros (nm), con una resolución espectral de 359 bandas, lo que permite construir un espectro de reflectancia que se considera continuo y así diferenciar minerales de alteración.

Mi participación dentro del proyecto abarcó diversas etapas, desde la validación y procesamiento de los datos adquiridos, el análisis e interpretación de las firmas espectrales, hasta la elaboración del mapa de clasificación de minerales de alteración de la zona de estudio.

En este informe de actividades profesionales, se presentarán los resultados obtenidos del análisis y procesamiento de los datos hiperespectrales adquiridos por el Servicio Geológico Mexicano en una zona ubicada en el estado de Sonora, México, con el objetivo de buscar áreas prospectivas que puedan indicar la presencia de depósitos minerales de interés económico en el subsuelo, mediante la interpretación de alteraciones hidrotermales en la zona.

La importancia en estos estudios radica en el aporte que tiene el método para detectar minerales de alteración hidrotermal desde una aeronave, cubriendo grandes extensiones de terreno en poco tiempo. Esto facilita la exploración de recursos naturales y contribuye a una comprensión de los procesos geológicos asociados. La capacidad para obtener datos sobre los minerales producto de soluciones hidrotermales (hipogénicos), o en su caso, procesos supergénicos, ofrece una ventaja significativa en el conocimiento de los recursos minerales presentes en el subsuelo y apoya en la toma de decisiones en el campo geológico.

El informe se encuentra estructurado en diversas secciones. Primeramente, se presentan los antecedentes del método, en donde se resaltan las características de los sensores hiperespectrales y las librerías espectrales utilizadas para el análisis e interpretación. Posteriormente, se describe el proyecto en el que participé y su importancia. En la sección de metodología, se detallan las técnicas y herramientas utilizadas durante el procesamiento de los datos. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos, incluyendo el mapa de clasificación de minerales de alteración y las firmas espectrales identificadas.

# 3. Objetivo

Exponer los resultados obtenidos del análisis y procesamiento de los datos hiperespectrales adquiridos por el Servicio Geológico Mexicano en una zona ubicada en el estado de Sonora, México, con el fin de identificar alteraciones hidrotermales que puedan indicar la posible presencia de depósitos minerales de interés económico en el subsuelo.

Para cumplir dicho objetivo realicé el procesado de datos, análisis e interpretación de las firmas espectrales obtenidas en el levantamiento aerogeofísico de imágenes hiperespectrales en el norte del país, correlacionándolas con las características geológicas presentes en la región de estudio.

### 4. Antecedentes

#### 4.1 Imágenes Hiperespectrales

El Servicio Geológico Mexicano, menciona que la geofísica es una ciencia que estudia la Tierra con base en sus propiedades y fenómenos físicos, (Servicio Geológico Mexicano, 2017). Así mismo que la geofísica aplicada consiste en el estudio de prospectos con interés económico, a través de la detección de anomalías en los campos físicos de la Tierra, utilizando tecnologías que faciliten obtener beneficios para la humanidad.

Una de estas tecnologías es la utilizada en el método de imágenes hiperespectrales, la cual se originó en el ámbito de la teledetección o percepción remota, encontrando su camino en la geofísica debido a su capacidad de medir la energía que se refleja en la superficie del terreno, lo que permite identificar minerales de alteración hidrotermal facilitando la prospección minera (modificado de SPECIM, Hyperespectral Imaging Applications, 2024).

El principio físico del método se basa en la captura de información sobre la interacción de la luz, es decir, registra la energía electromagnética proveniente del sol reflejada en la superficie terrestre, posteriormente se procesa y analiza según sea el objetivo (Figura 1) (González & Vargas Cuentas, 2013).



Figura 1. Principio físico de las Imágenes Hiperespectrales.

La generación de energía electromagnética proviene de diversos mecanismos, como el decaimiento radioactivo de sustancias, el movimiento térmico de átomos y moléculas, los cambios en los niveles de energía de los electrones y las reacciones nucleares que ocurren dentro del sol, las cuales producen un amplio espectro de radiación (Campbell & Wynne, 1994). Este espectro electromagnético se representa esquemáticamente, clasificando las ondas electromagnéticas según su frecuencia, longitud de onda y cantidad de energía.

La energía electromagnética, según (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015), se compone de un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares entre sí, propagándose en una trayectoria perpendicular a ambos campos. Las características de la propagación de la energía en forma de radiación electromagnética, desde la fuente hasta los sensores, la convierte en una fuente valiosa de datos para la interpretación de las propiedades del medio con la cual interactúa. Por lo que, es necesario entender cómo se genera, se propaga y se modifica en contacto con la materia.

Cuando la luz incide sobre un objeto, una parte de ella es absorbida, otra es reflejada y una parte puede ser transmitida a través del objeto. Cada tipo de material tiene un espectro de reflectancia o firma espectral única, es decir, un patrón específico de absorción y reflexión a diferentes longitudes de onda, lo cual depende de su composición química y textura superficial. Mediante estas firmas espectrales se puede identificar y caracterizar los diferentes tipos de materiales.

La energía absorbida es la porción de energía que un material incorpora a su estructura, generalmente disipándose en forma de calor u otras formas. La transmisión ocurre cuando la radiación atraviesa una sustancia o cuerpo sin sufrir una atenuación significativa. La reflexión se produce cuando un haz de luz (radiación) incide sobre una superficie y es reflejado; la trayectoria resultante depende del ángulo de incidencia de la radiación (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015), lo cual se ilustra en la Figura 2.

Aplicando el principio de conservación de la energía, se observa la relación entre estos tres tipos de energía, el cual está dado por la ecuación 1.

$$E_{I}(\lambda) = E_{R}(\lambda) + E_{A}(\lambda) + E_{T}(\lambda) \cdots (1) \qquad ec. (1)$$

donde:

 $E_I = energía incidente$  $E_R = energía reflejada$  $E_A = energía absorbida$  $E_T = energía trasmitida$ 

Todos los componentes se encuentran en función de longitud de onda.



Figura 2. Interacción de la energía incidente, reflejada y transmitida.

Ahora bien, una imagen hiperespectral es una imagen que contiene numerosas bandas espectrales de información a través de todo el espectro electromagnético (Campbell & Wynne, 1994).

En la Figura 3 se observa el carácter básico de las imágenes digitales, las cuales están compuesta por un conjunto bidimensional de elementos de imagen discretos (pixeles). La intensidad de cada pixel corresponde a la radiancia<sup>2</sup>, medida sobre el área del suelo correspondiente a cada pixel. En la Figura 3 (inciso a) se observa una imagen en donde no es posible observar los pixeles como en (b) y (c). En la parte (d) se muestra el número digital individual (DN).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Radiancia: Se relaciona con la reflectancia del objeto terrestre y la radiación entrante (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015)



Figura 3. Carácter básico de una imagen digital.

En el caso de una imagen digital hiperespectral, cada pixel incluye múltiples DN, uno para cada banda espectral. Por ejemplo, en la Figura 4 se muestra un pixel de una imagen digital, donde podría tener un valor de 88 en la primera banda espectral, que representaría longitudes de onda azules, 54 en la segunda banda (verde), 27 en la tercera (roja) y así sucesivamente.



Figura 4. Carácter básico de los datos de imagen digital. (a) Cada imagen está representada por una cuadrícula de pixeles en donde cualquier pixel tiene un conjunto de DN que representa su valor en cada banda (b), (Modificado de Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015).

Por lo que, esta metodología se fundamenta en la misma tecnología de las imágenes satelitales, pero en este caso los sensores que detectan la radiación solar se instalan en una aeronave lo que permite estar mucho más cerca de la superficie que los satélites (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015).

#### 4.2 Sensores Hiperespectrales

Los sensores hiperespectrales son instrumentos que capturan la radiación en diversas longitudes de onda, abarcando todo el espectro visible (VIS), porciones de espectro en infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo térmico y de onda corta (SWIR), infrarrojo de onda media (MWIR), convirtiendo la señal eléctrica obtenida en un valor numérico (DN), lo que permite realizar un análisis de las características espectrales de los materiales que se encuentran en la superficie terrestre (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015).

Una vez que los números digitales son transformados en radiancia y posteriormente en reflectancia, es posible obtener el espectro de reflectancia<sup>3</sup> o firma espectral. Este espectro es fundamental para identificar el material con el que se interaccionó. Sin embargo, existen factores que deben tomarse en cuenta en la adquisición de imágenes hiperespectrales tales como la dispersión, la absorción atmosférica y la resolución, ya que estos alteran las firmas espectrales registradas, lo que hace necesario realizar correcciones en los datos. Estos conceptos se definen a continuación, (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015):

La dispersión atmosférica se define como la difusión imprevisible de radiación por partículas en la atmósfera, es decir, ocurre cuando las partículas que se encuentran en la atmósfera interactúan con la radiación electromagnética dando como resultado que la dirección original sea redirigida.

Existen distintos tipos de dispersión, estos son:

- Rayleigh: Es común cuando la radiación interactúa con moléculas atmosféricas y otras partículas que son más pequeñas en diámetro que la longitud de onda de la radiación que interactúa.
- Mie: Ocurre cuando los diámetros de las partículas atmosféricas son iguales a las longitudes de onda de la energía que se detecta, como, por ejemplo, dispersores de vapor de agua, polvo y aerosoles.
- Dispersión no selectiva: Se da cuando los diámetros de las partículas son más largos a las longitudes de onda de la energía que se detecta, por ejemplo, las gotas de agua.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Reflectancia: Proporción de la radiación que llega a una superficie con respecto a la radiación que se refleja en ella. Contiene la corrección atmosférica (Campbell & Wynne, 1994).

En contraste con la dispersión atmosférica, la absorción se debe considerar de igual manera, ya que cada uno de los gases que se encuentran en la atmósfera tiene la capacidad de absorber radiación en diferentes longitudes de onda (Figura 5), estos gases son:

- Ozono (O<sub>3</sub>): Absorbe radiación ultravioleta,
- Dióxido de Carbono (CO2): Absorbe radiación en 1300-1750 nm,
- Vapor de agua (H<sub>2</sub>O): Absorbe radiación en 500-2000 nm aproximadamente.



Figura 5. Absorciones atmosféricas.

Finalmente, se tienen los siguientes tipos de resolución:

 Resolución espacial: Designa al objeto más pequeño que se pueda distinguir en una imagen. Está determinado por el tamaño del pixel, medido en metros sobre el terreno, esto depende de la altura del sensor con respecto a la Tierra, el ángulo de visión instantáneo (FOV), la velocidad del escaneado y las características ópticas del sensor, Figura 6.



Figura 6. Resolución espacial, (SGM, 2014).

 Resolución radiométrica: Se refiere a la cantidad de niveles de energía en que se divide la radiación recibida para ser almacenada y procesada posteriormente. Suele expresarse mediante el número de bits necesarios que se precisan para almacenar cada píxel, Figura 7.



Figura 7. Resolución radiométrica (SGM, 2014).

 Resolución espectral: Consiste en el número y ancho de bandas o canales espectrales que es capaz de detectar con calidad un sensor. Este concepto se asocia al FWHM (Full Width at Half Maximum) que es la capacidad que tiene el instrumento de distinguir un pulso electromagnético de otro contiguo a este, Figura 8.



Figura 8. Resolución espectral.

Como se mencionó, su importancia radica en la calidad de información que se obtendrá de los objetos observados para posteriormente ser identificados.

El volumen de datos registrados por un dispositivo hiperespectral consiste en un arreglo tridimensional con dos dimensiones espaciales y la tercera de tipo espectral (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2015). Así estos datos forman un cubo de imágenes como se muestra en la Figura 9. De esta manera, cada una de las imágenes del cubo hiperespectral corresponde a una determinada longitud de onda en el intervalo del espectro electromagnético.



Figura 9. Cubo Hiperespectral.

#### 4.2.1 Sensor Hiperespectral Aisa DUAL

El Servicio Geológico Mexicano, cuenta con el equipo hiperespectral llamado Aisa DUAL el cual registra un rango de energía que va de los 400 nm a 2500 nm (Figura 10), dividido en 359 bandas de datos con un ancho promedio de 4.77 nm en VNIR y 6.29 nm en SWIR. Ofrece una resolución espacial, en la plataforma que emplea el SGM (avión KingAir), de 1 a 10 metros por píxel y una resolución radiométrica de 12 bits para VNIR y 14 bits para SWIR.



Figura 10. Rango de energía que registra el equipo hiperespectral del SGM.

El sensor está montado en una aeronave presurizada, y se utiliza con un sistema GPS diferencial y un sistema inercial para la georreferenciación y ortorectificación de las imágenes mediante un modelo digital de elevación. Esto permite la construcción de un espectro de reflectancia continuo para cada pixel, como se observa en la Figura 11.



Figura 11. Espectroscopia de imágenes, (Adaptada por Vane, 1985, citada por Lillesand, Kiefer, &Chipman,2015).

El equipo hiperespectral Aisa DUAL es un sistema de doble sensor de alto rendimiento que integra los sensores AisaEALGE y AisaHAWK para la adquisición simultánea de datos en los rangos VNIR y SWIR respectivamente, Figura 12.



Figura 12. Sensor Aisa DUAL, (SpecIm).

El sensor AisaHAWK registra en el rango onda corta del infrarrojo cercano (SWIR), lo cual permite la identificación de firmas espectrales características de compuestos químicos presentes en materiales naturales y artificiales. Por otra parte, el sensor AisaEAGLE registra el rango visible e infrarrojo cercano (VNIR), el cual es útil para aplicaciones como la gestión forestal, monitoreo de cultivos, investigaciones medioambientales, planificación en el uso de suelo, evaluación de recursos hídricos, (SPECIM, AisaDual Hyperespectral Sensor, s.f.).

En resumen, el equipo especializado que utiliza el SGM consiste en lo siguiente:

- Avión: Hawker Beechcraft modelo King Air C90GTi (2010)
- Sensor: AISA®Dual.
  - Sensor Eagle (VNIR): Rango de 400 a 970 nm con una resolución espectral de 2.9 nm.
  - Sensor Hawk (SWIR): Rango de 970 a 2500 nm con una resolución espectral de 8.5 nm.
- GPS/INS: Sistema de posicionamiento global y sistema inercial para precisión en ubicación y actitud.
- Computadora de adquisición de datos: equipada con dos unidades de estado sólido de 500 GB cada una (almacenamiento), monitor y teclado.
- Mirilla: Cristales de silicio de alta transmisibilidad para mantener presurizada la aeronave.
- Sistema de navegación: Guía de líneas programadas durante el vuelo.

Al final del procesamiento, la imagen hiperespectral obtenida tendrá, para cada pixel, un muestreo del espectro que abarca desde el espectro visible al infrarrojo cercano.

Un ejemplo de este espectro es ilustrado en la Figura 13, donde se muestran espectros de reflectancia para una serie de minerales en un rango de longitud de onda de los 2100 a 2400 nanómetros (nm). Cada firma espectral corresponde a un mineral específico, ya que estos tienen una firma espectral única asociada que se puede identificar por sus rangos de absorción y reflexión.



Figura 13. Espectros de reflectancia de minerales comunes.

#### 4.3 Librerías espectrales

El SGM utiliza el método de imágenes hiperespectrales para identificar minerales en zonas de alteración hidrotermal que indiquen la presencia de depósitos minerales de interés económico, mediante el análisis de firmas espectrales. Este análisis es realizado con el apoyo de librerías espectrales, que son creadas bajo condiciones y parámetros específicos. Una de las librerías utilizadas es la librería espectral del USGS (United States Geological Survey), la cual facilita la identificación de minerales al proporcionar un punto de referencia confiable.

El Laboratorio de Espectroscopía del USCS ha medido la reflectancia espectral de miles de materiales, tanto en laboratorio como con espectrómetros de campo y aerotransportados, compilándolas en la Biblioteca Espectral del USGS. Estas librerías contienen una amplia gama de materiales, incluyendo minerales, suelos, vegetación, materiales artificiales, y mezclas de minerales (Spectroscopy Lab, USGS, 2024). Para muchas de las muestras, la cobertura de longitud de onda abarca regiones ultravioleta, visible, infrarroja cercana, infrarrojo de onda media e infrarrojo de onda larga (200 a 20000 nanómetros).

Para los fines de este proyecto, utilizamos un rango espectral de 2100 a 2400 nm, correspondiente al rango de las arcillas, ya que es este rango en donde se hace un realce espectral para identificar mejor las zonas de absorción. Además, al limitar el rango, se facilita el procesamiento de los datos en los softwares utilizados.

A continuación, en la Tabla 1, se presenta una serie de firmas espectrales obtenidas por la USGS:



Tabla 1. Firmas Espectrales obtenidas de la librería de la USGS, el eje Y corresponde a la Reflectancia [%] y el eje X a la Longitud de onda [nm].

Es importante señalar que, las firmas espectrales obtenidas a partir de imágenes hiperespectrales no coinciden exactamente con las firmas de las librerías. Esto se debe a que, como se mencionó anteriormente, existen factores que alteran los espectros, como la dispersión, la absorción, la presencia de otros minerales, vegetación o agua, provocando que las firmas espectrales se mezclen. Adicionalmente, la resolución espectral de los equipos de la USGS ha cambiado a través del tiempo, provocando así que el ancho de banda cambie y que difiera con el equipo utilizado en el SGM.

Una vez identificada la firma espectral del mineral, el siguiente paso es analizar las condiciones geológicas en que este mineral se formó. Este análisis nos permitirá conocer la historia geológica de la región donde se ubica el mineral, caracterizar el ambiente hidrotermal asociado y determinar si el mineral puede ser un indicador clave de la presencia de depósitos minerales de interés económico en la zona.

#### 4.4 Alteraciones Hidrotermales

A lo largo de este informe, se ha destacado que el análisis de las firmas espectrales registradas con las imágenes hiperespectrales, consiste en correlacionar los minerales identificados con las alteraciones hidrotermales, lo que nos permite determinar las características de la alteración de las rocas y así ampliar el conocimiento del contexto geológico.

Las alteraciones hidrotermales, resultan del intercambio químico ocurrido durante una interacción fluido hidrotermal-roca, lo que conlleva cambios químicos y mineralógicos en la roca afectada, producto del desequilibrio termodinámico entre ambas fases. Estas alteraciones ocurren tanto en la roca encajonante como en las rocas fuente y son clave para comprender el ambiente hidrotermal en el que se forman (Townley, 2006).

La morfología, distribución y mineralización de las alteraciones hidrotermales dependen de una serie de factores, como los controles estructurales, la litología, la evolución magmática, así como las condiciones de temperatura, presión, pH, permeabilidad, y la disponibilidad y distribución espacial de los fluidos hidrotermales (Gómez Gutiérrez & Molano Mendoza, 2009). Estos factores determinan las características y grado de alteración que sufren las rocas en un entorno hidrotermal.

La alteración hidrotermal es un tipo de metamorfismo caracterizado por la recristalización de las rocas en nuevos minerales más estables bajo las condiciones del sistema hidrotermal. Los fluidos hidrotermales juegan un papel importante, ya que no solo transportan constituyentes químicos, sino también calor, lo que facilita la transformación mineralógica. Este proceso es posible gracias a la circulación de grandes volúmenes de fluidos calientes a través de las rocas, aprovechando la presencia de fisuras interconectados que aumentan la permeabilidad del sistema (Corbett & Leach, 1997).

Para comprender lo anterior, Camprubi et al., presentaron un esquema comparativo modificado de la estructura, procesos, tipos de alteración, volátiles liberados, temperaturas, pH, tipos de fluidos y reacciones involucradas en la formación de los depósitos epitermales de baja y alta sulfuración. Igualmente se muestra su relación con las rocas magmáticas como fuente de calor, fluidos y componentes químicos para estos depósitos, comprendiendo desde una cámara magmática en proceso de enfriamiento, la formación de depósitos metálicos relacionados a pórfidos (cupríferos, auríferos, o molibdeníferos), hasta el ambiente epitermal, Figura 14.



Figura 14. Diagrama comparativo en los depósitos epitermales de baja y alta sulfuración, (Camprubi, et al., 2003

La figura muestra una representación visual de manera general de como los factores antes mencionados se relacionan en morfología, mineralización y distribución de las alteraciones hidrotermales. En la Tabla 2 se presenta la definición para cada tipo de alteración, así como sus minerales asociados.

Otro aspecto relevante de las alteraciones hidrotermales es su zonificación, que representa la transición química y mineralógica de la roca desde las áreas más externas hacia el interior del cuerpo mineralizado, influenciada por las condiciones geotérmicas.

Cada zona de alteración presenta minerales diagnósticos que reflejan las condiciones de equilibrio químico en las que se formaron (Corbett & Leach, 1997). Para interpretar

correctamente el entorno geológico, es importante la compresión de la zonificación, para identificar depósitos minerales de interés económico.

Los principales tipos de alteración hidrotermal son:

- Profunda: Se caracteriza por el emplazamiento total o parcial de los minerales originales de la roca, lo que lleva a la destrucción o modificación de las texturas originales.
- Profunda selectiva: El reemplazamiento afecta a minerales específicos de la roca originales, dejando a otros intactos.
- No profunda: En este caso, ciertas partes de la roca fueron afectadas por los fluidos hidrotermales, lo que indica que el sistema es menos permeable o que la intensidad del proceso hidrotermal es menor.

Alteración	Definición	Minerales de alteración
Propilítica	Caracterizada principalmente por la asociación clorita-epidota con o sin albita. A temperaturas relativamente bajas (<200-250°C) cuando los ensamblajes de alteración están denominados por zeolitas en lugar de epidota, puede aplicarse el término subpropilítico.	Clorita, carbonatos, albita, calcita, cuarzo.
Fílica	Se caracteriza por la presencia de sericita (o moscovita). Gradúa al tipo potásico por el incremento de feldespato K o biotita al tipo argílico por el aumento de minerales arcillosos. Su temperatura es >200-250°C y un PH de 4.5 a 7. Se asocia a grupos como el del caolín y minerales del grupo de cloritas.	Sílice, sericita, moscovita, feldespato K, dickita, carbonatos, biotita, cuarzo.
Argílica	Se caracteriza por la formación de minerales arcillosos (caolín) debido al intenso metasomatismo de H+ (lixiviación ácida). Ocurre en rangos de pH entre 4 y 5 y de temperatura >200°- 250°C. Se asocia a los grupos del caolín, Illita, y clorita.	Caolinita, esmectitas, calcedonia, illita.
Argílica Avanzada	Se da por el intenso ataque ácido (pH <4), y en cierto grado a la lixiviación completa de los cationes alcalinos con la destrucción total de los feldespatos y silicatos máficos. Comprende el grupo de la sílice, alunitas, y el grupo del caolín.	Dickita, caolinita, pirofilita, barita, alunita, andalusita y diáspora.
Potásica	Se asocia a minerales como feldespato potásico y/o biotita. La alteración temprana suele presentar una textura tipo hornfel con biotita principalmente por efectos de reemplazo metasomático de hornblenda primaria. La alteración potásica de alta temperatura se caracteriza por una alteración selectiva y penetrativa. PH neutro a alcalino.	Actinolita, cuarzo, feldespato, clorita, biotita.

Tabla 2. Algunas alteraciones hidrotermales, (Corbett & Leach, 1997).

A continuación, se presenta un diagrama de clasificaciones en función de temperatura y pH propuesto por (Corbett & Leach, Short Course Manual: Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration and Mineralization., 1997).

				— INCF	REASING	рН ——			>	
	Op Cr Tii	Al Op Cr Tri	Al, Hal Silica Al, K Silica	Hal Silica K Silica	Hal, Sm Silica K, Sm Silica ± Sid	Sm Silica	□ □ Ch-Sm/Ch ¶ Silica Cb □	Ch-Sm/Ch Silica Zeo Ct/Do	lab, Nat	,
			AI	<b>*</b>	K, Sm X Q ± Sid K, I-Sm X	Sm,Cb Q/Chd	Ch/Ch-Smc Sm,Q/Chd Cb	Ch/Ch-Sm Q/Chd Zeo Ct/Do	itb. Heu, Mor, Ch	mal
ATURE -	q	a	Al K, Dik Q ± Dp	K, Dik Q ± Dp	K, Dik VI - Sm Q ± Sid		- Ch, Cb I-Sm a Q/Chd	Ch,Q/Chd Ad/Ab Ct/Do	Lau S Zeolit	Epither
TEMPER		Al	Al Dik Q ± Dp	Dik Q±Dp	Dik, I Q±Sid		Ab/Ad Q, Cb	Ch,Q,Ep Zeo,Ct/Do Ad/Ab	Wai	
EASING			Al Dik,Pyr Q ± Dp	Dik Pyr Q±Dp	Dik Pyr Ser,Q	Ser Q Cb	Ser Fsp Q, Ch Cb	Ch, ( Ad / Ab	Q, Ep , Ct / Do	mal
- INCR			Al, Pyr Q ± Dp	Pyr Q ± Dp	Ser		Mica/Ser	Ep, Act Fsp, (	, Ch, Q	Mesothei
		And, Al, Q	And, Al	And,	Mica/Ser Pyr, Q	Q, Cb Mica, Q	Fsp, Cb Q ± Ch	Fsp, Ch Bio, Act	Ct / Do	
¥	Condi	tions of no	pyr, Q on-dissocia	Pyr, Q tion	And, Mica, Q And, Mica, Cor, Q	± Cb Mica, Cor O	Mica Fsp Q±Cb	Bio, Fsp Cpx, Mt	Ga, Q Wo, Ves	Porphyr
·						1 001 01 /	111111			
	Silica Group	Alunite Group	Al - K Group	Kaolin Group	I - K Group	Illite Group	Chlorite Group	Calc - S Gro	Silicate	
inera o - alt h - ch ox - co sp - fe au - la - qua	Silica Group al Abbrevi bite; Act - a nlorite; Cha clinopyroxe eldspar; Ga aumontite; artz; Ser - s esuvianite:	Alunite Group iations : ctinolite; Ad ab - chabaz ene; Cr - cri a - garnet; Mt - magne sericite; Sic ; Wai - wair	AI - K Group I - adularia; ite; Chd - c istobalite; C Hal - halloy etite; Mor - I - siderite; rakite: Wo	Al - alunite; chalcedony t - calcite; /site; Heu - mordenite; Sm - smec	I - K Group ; And - anda ; Ch-Sm - c Do - dolom heulandite ; Nat - natro ; tite; Stb - s ite; Zeo - 26	Illite Group	Chlorite Group biotite; Cb ectite; Cor - ckite; Dp - Sm - illite-sr paline silica tremolite; Tr	Calc - S Gro - carbonate corundum diaspore; E mectite; K a; Pyr - pyr ri - tridymit	Gilicate bup (Ca, Mg, M ; Ep - epidote - kaolinite; ophyllite; e;	Mn, F
linera p - alt h - ch px - c sp - fa au - la ss - v	Silica Group al Abbrevi bite; Act - a hlorite; Cha hlorite; Cha hlorite; hlorite; Cha hlorite; hlorite; Cha hlorite;	Alunite Group	Al - K Group	Al - alunite; chalcedony 2t - calcite; /site; Heu - mordenite; Sm - smective • wollastoni	I - K Group ; And - anda ; Ch-Sm - c Do - dolorr heulandite ; Nat - natro ctite; Stb - s ite; Zeo - ze Propylit	Illite Group alusite; Bio - chlorite-sme aite; Dik - di ; I - illite; I-3 olite; Op - o stillbite; Tr - f colite	Chlorite Group biotite; Cb ectite; Cor - ckite; Dp - d Sm - illite-sr paline silica tremolite; Tr	Calc - S Gro - carbonate corundum diaspore; E mectite; K a; Pyr - pyr ri - tridymit	Silicate Dup (Ca, Mg, M ; =p - epidote - kaolinite; ophyllite; e; Y Sub Prop	Mn, F e; ylitic

Figura 15. Minerales de alteración común en sistemas hidrotermales, (Corbett & Leach, 1997).

### 5. Contexto de la participación profesional

Parte de la misión del Servicio Geológico Mexicano es generar y difundir el conocimiento geológico de la nación para impulsar el aprovechamiento sostenible de los recursos minerales mediante estudios geológicos, geofísicos, geohidrológicos, entre otros.

Para cumplir con este objetivo, en la Gerencia de Geofísica a través de la Subgerencia de Geofísica Aérea se implementan distintas metodologías aerogeofísicas y proyectos de exploración, siendo una de ellas el Proyecto Aerogeofísica para Imágenes Hiperespectrales cuyo objetivo es contribuir a la generación de conocimiento en Ciencias de la Tierra en sus diferentes aplicaciones en México, mediante la identificación de minerales de alteración generados por soluciones hidrotermales, que indiquen la presencia de zonas con minerales de interés económico y que contribuyan a ampliar el conocimiento geológico del país.

Como parte de mis funciones dentro del Servicio Geológico Mexicano es procesar, analizar e interpretar los datos adquiridos en los levantamientos de imágenes hiperespectrales, para este documento en particular se me asignó el área Santa Cecilia Sur ubicada en el estado de Sonora, México; en donde, el resultado final de estos levantamientos es la generación del mapa de clasificación y distribución de minerales de alteración, con la finalidad de identificar y determinar áreas prospectivas con minerales de interés.

El estado de Sonora, es uno de los más importantes en México debido a su potencial minero, ya que su litología y la presencia de diversas estructuras geológicas favorecen la existencia de depósitos de minerales metálicos. Según el Informe Anual de la Cámara Minera de México (2023), Sonora tuvo un 28.70% en la producción de Oro, 6.54% en Plata y 76.47% en Cobre. Los yacimientos de Oro se encuentran en la Sierra Madre Occidental, encajonados en rocas riolíticas y andesíticas del Terciario temprano, los cuales fueron intrusionados por pórfidos cuarzomonzoníticos. Los depósitos minerales se componen de vetas de cuarzo, stockworks, brechas y diseminados que han sido identificados de origen epitermal y mesotermal. Por otro lado, los sistemas de pórfido de cobre en México, incluyendo algunos depósitos de tipo skarn y brechas hidrotermales, aparecen en un cinturón orientado NW-SE a lo largo del oeste del país, (Secretaría de Economía, 2023).

Por lo que, el método de las imágenes hiperespectrales ofrece ventajas significativas como método de exploración en esta zona, como, por ejemplo:

1.- Cubrir grandes extensiones de terreno en un tiempo relativamente corto, ayudando así a identificar zonas con minerales de interés sin la necesidad de recorrer grandes distancias a pie

2.- Ayudar a la identificación de estructuras geológicas (fallas, fracturas, zonas de alteración hidrotermal), facilitando la prospección minera.

3.- Es un método no invasivo, ya que no se requiere estar en contacto directo con el terreno, ayudando a preservar las áreas que se estudian.

Las etapas del trabajo realizado consistieron en la validación de la información con base en los estándares de calidad establecidos por la Subgerencia de Geofísica Aérea del SGM; posteriormente se procesan los datos para realizar un análisis y clasificación de minerales de alteración en cada zona y finalmente realizar la interpretación e informe del área en estudio.

# 6. Metodología utilizada para procesar e interpretar las Imágenes Hiperespectrales

En el Diagrama I se muestra un flujograma simplificado de los pasos y actividades que realicé para alcanzar el objetivo, los cuales, se mencionan a continuación:

- 1. ETAPA DE VALIDACIÓN:
  - a. Generación de los archivos de pixeles malos
    - Mediante el uso de software especializado elaborado por el Servicio Geológico Mexicano y la compañía SpecTIR, generé los archivos para identificar y remover los pixeles que están defectuosos y que, al no contener información, causan errores durante la clasificación e interpretación de minerales de alteración. En la Figura 16, se observa una representación gráfica de los pixeles malos.



Figura 16. Representación gráfica de pixeles malos.

El software realiza la búsqueda espacio - espectral de pixeles malos (unidad más pequeña sin información o con error que compone una imagen), seleccionándolos e integrándolos en dos archivos en formato \*.txt, en donde, la corrección espectral la realiza en bandas y la corrección espacial en columnas.

Estos archivos \*.txt junto con el archivo de calibración del equipo, se leen en el software que convierte los números digitales a valores de radiancia obteniendo los archivos de salida \*.BIL (Band Interleaved by Line); archivos que se encuentran libres de pixeles malos.

Al eliminar estos pixeles sin información, se tiene la certeza de que los datos utilizados en las siguientes etapas del proceso no presenten errores.

b. Generación de los archivos GLT

Por otra parte, generaré los archivos GLT (Geographic Lookup Table). Estos archivos contienen la información geográfica de cada píxel, lo que permite la ortorectificación, cuya función es corregir las distorsiones geográficas generadas por la topografía y/o desplazamientos del sensor.

 c. Generación de los archivos QL y mapa de avance
Posteriormente, se crearon los archivos \*.QL (Quick Look), los cuales se realizan para georreferenciar los pixeles en la imagen hiperespectral.

Estos archivos \*.QL los generé con el mínimo de bandas requeridas (3 bandas) para visualizar la imagen en color verdadero (RGB).

Integrando las franjas de observación, se genera una imagen en color; en donde los colores: rojo (R), verde (G) y azul (B) se pueden enlazar mediante cualquier combinación de bandas espectrales.

El resultado de la integración de las franjas de observación obtenidas de los archivos \*.QL, genera un mosaico que sirve para una revisión rápida de los datos, tratando de identificar zonas sin información (huecos), sombras de nubes, desplazamiento entre franjas de observación, distorsión de la imagen, en otras. En la Figura 17 inciso a) se observa un archivo \*.QL, mientras que en el inciso b) se visualiza el mosaico del mapa de avance.



Figura 17. Generación del archivo \*.QL (a) y mapa de avance (b).

d. Estándares de calidad

El SGM cuenta con un sistema de control de datos para asegurar la calidad de la información adquirida. En la etapa de validación de los datos, se revisan cuatro aspectos clave:

(i) Validación del traslape entre franjas de observación, Figura 18.



Figura 18. Huecos entre franjas de observación.

 (ii) Validación de sombras en la superficie generadas por nubes altas y nubes bajas que interfieren en la medición de los datos, Figura 19.



Figura 19. Presencia de nubes altas (a) y bajas (b).

(iii) Medición de desplazamiento entre franjas de observación, Figura 20.



Figura 20. Desplazamiento entre franjas de observación.

(iv) Cada franja de observación debe cubrir la superficie programada durante el vuelo, tanto al inicio como al final de la adquisición de datos, asegurándose del cubrimiento total del área.

De esta forma se asegura que los datos cumplan con los parámetros de vuelo establecidos.

#### 2. ETAPA DEL PROCESAMIENTO:

a. Corregistro (SWIR/VNIR) y ajuste del pico de CO<sub>2</sub>

Para iniciar la etapa del procesado de los datos, realicé la corrección del corregistro entre los sensores VNIR y SWIR, esto tiene como objetivo corregir el desfasamiento entre las imágenes de los sensores, esto es debido a que, al adquirir los datos, todo el sistema se encuentra en

movimiento, por lo que, llega a existir un desplazamiento (Figura 21a). El objetivo de la corrección, es que ambos sensores apunten al mismo pixel, por lo que una imagen del SWIR debe ajustarse espacialmente a una imagen del VNIR. Posteriormente, realicé el ajuste del pico de CO<sub>2</sub> tomando como base un archivo de referencia solar (generado previamente), al que debe ajustarse debido al desfasamiento espectral que presenta cada banda en sus niveles de energía provocado por factores que interfieren en la recolección de datos (Figura 21b). La corrección del corregistro se realiza por proyecto mientras, que la corrección por ajuste del pico de CO<sub>2</sub> es por línea de vuelo.



Figura 21. Corregistro entre los sensores VNIR y SWIR (a). Ajuste del pico del CO<sub>2</sub> (b).

b. Cálculo de los archivos de reflectancia VELC

De los archivos previos que se calcularon de radiancia (BIL), es necesario convertir estos datos en reflectancia aparente, ya que estos incluyen los ajustes del corregistro y del pico de CO<sub>2</sub>. Esto únicamente se realiza para la parte del espectro del infrarrojo de onda corta (SWIR).

c. Filtrado de los archivos VELC

superficie terrestre.

Una vez creados los archivos VELC, estos deben ser trabajados con un filtro pasa-bajas para suavizar el espectro, eliminando el ruido y mejorando la calidad de los datos, lo que es relevante para etapas posteriores. Para ello apliqué el filtro Savitzky-Golay, que, a diferencia de otros métodos de suavizado, este filtro utiliza el método de mínimos cuadrados lineales para suavizar la señal conservando las características de la señal original.

#### d. Cálculo de los archivos de reflectancia aparente en formato BSQ Realicé otro cálculo de reflectancia aparente a partir de la radiancia, sin embargo, a diferencia de los archivos VELC, este proceso se hace en la parte del espectro visible e infrarrojo de onda corta (VNIR, SWIR), lo cual ayuda a eliminar o reducir los efectos atmosféricos causados por vapor de agua, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, entre otros; para recuperar parámetros físicos de la

Después, convertí los archivos de radiancia de formato BIL a BSQ (Band Sequential) y actualicé los encabezados de los archivos \*.HDR de los BSQ, incluyendo parámetros como el tamaño del pixel en la adquisición, la elevación, altitud y rumbo durante el vuelo con el fin de proporcionar al software los datos necesarios para realizar el cálculo. Además, obtuve datos de ángulos solares (ángulo de elevación solar: es el ángulo entre la horizontal y una línea hacia el sol; ángulo azimutal: define en qué dirección se encuentra el sol respecto al Norte geográfico; y ángulo zenit: representa la posición relativa del sol a la normal local (zenit)) por día de producción con un intervalo de 15 minutos referido al horario del meridiano de Greenwich (Figura 22), los cuales son fundamentales para que el software conozca el ángulo con el que incidió la luz solar en el momento de la adquisición.



Figura 22. Ángulos solares.

Los resultados son archivos de salida en formato BSQ, los cuales son filtrados para atenuar la curva espectral y son creados con el objetivo de generar la máscara de vegetación a partir del Índice de vegetación de diferencia normalizada (NVDI) que estima la densidad vegetal en el área. Sirve para ocultar pixeles que contienen la firma espectral de vegetación sana.

e. Realización de mosaicos de 52 y 121 bandas.

En esta etapa de trabajo, generé dos mosaicos diferentes: uno de 52 bandas para la longitud de onda correspondiente al SWIR (2100-2400nm) utilizando archivos de reflectancia VELC filtrados, y otro mosaico de 121 bandas para el VNIR (400-970nm) utilizando los archivos de reflectancia BSQ filtrados, Figura 23.

Como se mencionó anteriormente, el mosaico de 121 bandas nos servirá para hacer la máscara de vegetación, mientras que el mosaico de 52 bandas nos ayuda a realizar las máscaras de mínimos y máximos (sombras y saturación) y la máscara zero (agua).



Figura 23. Mosaico de 52 bandas (izquierda) y de 121 bandas (derecha).

#### 3. ETAPA DE CLASIFICACIÓN:

a. Máscaras.

Tras crear los mosaicos, generé las máscaras de vegetación, sombras, saturación y de agua. Estas máscaras son imágenes binarias donde se asignan valores de 1 a los píxeles de interés y 0 a los que no lo son. En el caso de la máscara de vegetación, los pixeles que no tengan la firma de vegetación serán los de interés y tendrán el valor de 1, mientras que los pixeles que contengan la firma de vegetación serán de 0.

Para la máscara de sombras que son generadas por topografía, nubes, vegetación entre otros; los pixeles que estén libres de sombras se les asigna un valor de 1, caso contrario cuando sean pixeles de sombra será 0. Mientras que, para la máscara de sombras, los pixeles saturados (pixeles en donde la luz incidente responde a su valor máximo), tendrán un valor de 0 y los que no se encuentren saturados será de 1.

Finalmente, para la máscara de agua (zero), los pixeles que contengan el espectro del agua el valor será de 0 y los que no será de 1.

Una vez creadas, unifiqué y apliqué las máscaras al mosaico de 52 bandas, Figura 24, que es donde se realiza la identificación y clasificación de las firmas espectrales.



Figura 24. Mosaico de 52 bandas con máscara total.

 Realización de la clasificación y generación de los archivos vectoriales (\*.SHP)

Esta etapa implicó la extracción de firmas espectrales a partir del mosaico de 52 bandas. Este proceso es crucial en la metodología de Imágenes Hiperespectrales y para llevarlo a cabo utilicé un método de clasificación supervisada llamado Spectral Angle Mapper (SAM), que calcula el ángulo entre el espectro de un píxel y el espectro de referencia. A medida que el ángulo disminuye, significa que existen coincidencias más cercanas al espectro de referencia, por lo que la similitud entre los espectros aumenta (Figura 25). Para utilizar este modelo, introduje una firma espectral de la biblioteca de la USGS con la finalidad de identificar los pixeles que contienen las firmas espectrales que comparten rangos de absorción con minerales conocidos, los pixeles obtenidos los fui revisando al mismo tiempo que evaluaba la apertura del ángulo.

Posteriormente los pixeles que no fueron clasificados se revisan con el fin de extraer endmembers (firmas espectrales puras que representan un único material). Este procedimiento lo repetí para cada firma espectral y creé los archivos vectoriales (\*.SHP) por cada mineral.



Figura 25. Concepto Spectral Angle Mapper.

c. Extracción de endmembers

Una vez que realicé la clasificación de los minerales con firmas espectrales conocidas aplicando el algoritmo SAM, se revisa la clasificación preliminar cargando todos los archivos vectoriales al mosaico de 52 bandas. De esta forma, observé la tendencia de los minerales, y revisé aquellas zonas en donde no se clasifico ningún mineral, así, las firmas espectrales pertenecientes a minerales no conocidas se extraen para analizarlas e identificarlas en función de sus zonas de absorción y posteriormente para introducirlas al algoritmo SAM. Estas firmas corresponden, por lo general, a mezclas de minerales.

d. Limpieza de los archivos vectoriales (\*.SHP)

Debido a que el algoritmo SAM puede llegar a tomar firmas espectrales que no son del mineral que se está buscando pero que comparte zonas de absorción, es necesario hacer una limpieza de los archivos vectoriales de los minerales previamente creados.

Para ello, se debe revisar cada envolvente de pixeles clasificados, y de ser necesario, se depuran aquellos pixeles que no contienen la firma

espectral del mineral buscado, así mismo, se van agregando los pixeles que no fueron clasificados y que pertenecen al mineral identificado.

#### 4. ETAPA DE INTERPRETACIÓN

a. Correlación de la interpretación con la geología

En este paso, realicé una correlación de la geología reportada en las cartas geológico-mineras y la clasificación para conocer el contexto geológico de la zona de estudio y así ubicar y proponer zonas de interés con minerales de alteración hidrotermal.

Cabe mencionar que el análisis geológico se lleva a cabo utilizando las cartas e informes cartográfico-mineros realizados por el Servicio Geológico Mexicano, los cuales son consultados a través de la base de datos GeoInfomex. De igual manera, se revisa la situación legal de la zona en cuanto a concesiones mineras vigentes, información que se verifica mediante la plataforma CartoMinMex.

b. Elaboración de mapas

Realicé mapas de la localización y geología del área, y de la clasificación de los minerales de alteración. Adicionalmente, también realicé mapas donde se incluyen las zonas de interés interpretadas.

#### c. Elaboración del informe final técnico

Al concluir los análisis, elaboré el informe técnico que presenté al Subgerente de Geofísica Aérea para su revisión, y que posteriormente fue revisado y aprobado por el Gerente de Geofísica. En dicho informe, se detalla el contexto del área procesada, incluyendo su localización, el contexto geológico, los aspectos relacionados con la adquisición y procesamiento de los datos, así como la presentación de los resultados obtenidos. Las zonas que identifiqué como de interés, las revisé más a detalle en cuanto a geología, rutas de acceso, etc.



Diagrama 1. Flujo general del procesamiento de Imágenes Hiperespectrales Aerotransportadas.

# 7. Resultados

#### Contexto Geológico Regional

La ventana de estudio se localiza dentro del terreno tectonoestratigráfico Chihuahua, (Campa & Coney, 1983). Forma parte de la Provincia Geológica Sonorense, y en menor medida de la Provincia Geológica Faja Ignimbritica Mexicana, así como de la subprovincia de Sierras y Valles del Norte (INEGI, 1980), perteneciente a la Provincia Fisiográfica y Metalogénica de la Sierra Madre Occidental.

Según el informe cartográfico-minero Esqueda (SGM, 1998), las unidades litológicas que afloran en el área provienen del Cretácico Superior, cuando se depositó en su base un paquete de rocas volcanosedimentarias (Ks Vs) pertenecientes al Grupo Cabullona, y de forma gradual lutitas, areniscas, tobas riolíticas, estratos calcáreos y conglomeráticos, lentes de tobas andesíticas, y hacia la cima areniscas, flujos riolíticos (Ks Ar-R) y horizontes piroclásticos.

El Paleógeno se encuentra representado en el área principalmente por rocas volcánicas y una importante presencia de rocas sedimentarias, en donde aflora una secuencia de coladas lávicas y tobas de composición intermedia (Tpa A-TA) del Paleógeno, y que fueron afectadas por un pórfido de composición andesítica (Te PA). Durante este mismo periodo se tiene la presencia de tobas riolíticas-riolita (To TR-R), basaltos (To B) y riolitas (To R).

En algunas partes de estas unidades volcánicas existe la evidencia de alteración propilitica, silicificación y sericitización.

En el área, también se tiene la presencia de una secuencia volcánica constituída principalmente por basaltos con intercalaciones de areniscas (Tm B-Ar), conglomerados, tobas félsicas y vitrófidos, estos últimos formando la base de las tobas. Esta unidad descansa directamente sobre areniscas - riolitas (Ks Ar-R), andesitas-tobas andesíticas (Tpa A-TA) y tobas riolíticas-riolita (To TR-R).

#### Interpretación Realizada

Como parte de la última etapa de trabajo, en la el área de estudio logré identificar los minerales de: alunita, caolinita, caolinita +<sup>4</sup> alunita, caolinita + montmorillonita, illita, illita + nontronita y montmorillonita, sobre unidades litológicas de composición pórfido andesítico (TePA), andesita - toba andesítica (TpaA-TA) y basalto (TmB) del Paleógeno.

Con el objetivo de visualizar la distribución espacial de los minerales de alteración que interpreté, realicé el mapa de minerales de alteración sobre la geología cartografiada en la zona, Figura 26, dicho mapa es el resultado final de los levantamientos Aerogeofísicos para Imágenes Hiperespectrales. Cabe mencionar que el mapa representa solo una ventana de la superficie total cubierta y procesada en el estado de Sonora.

En el mapa se puede observar que los minerales caen en una zona de alteración de tipo Oxidación-Argitilización y una zona de Propitilización documentadas en la carta geológicaminera que realiza el SGM. Según el informe geológico-minero (Servicio Geológico Mexicano, Cartografía Geológico-Minera y Geoquímica de la Hoja "ESQUEDA" H12B65 Escala 1:50,000 Mpio. Fronteras, Sonora, México, 1998), la mineralización presente en la zona consiste de magnetita, pirita, arsenopirita, clorita, cuarzo, calcita, hematita, jarosita y limonita, de los cuales estos tres últimos resultaron de procesos supergénicos.

El sistema estructural en la zona indica la presencia de diversas fallas geológicas con diferente rumbo; hacia la parte central se interpreta un bloque hundido de casi 5 km de ancho con rumbo NW-SE, en donde, hacia la parte central del bloque se ubican la mayor cantidad de los envolventes de minerales de alteración que se interpretaron, a lo largo de más de 4.5 km de longitud con una disposición en rumbo NW-SE.

Perpendicular a ese bloque, en la parte centro-sur del área, se presenta un bloque levantado de aproximadamente 1 km de ancho; sobre la falla norte de rumbo casi E-W que lo delimita, se definió la presencia de alunita, caolinita e ilita + nontronita; lo que sugiere que estas zonas de debilidad pudieron ser el conducto por el cual ascendieron los fluidos hidrotermales que dieron lugar al emplazamiento de la mineralización interpretada en esta zona; tal como se representa en el esquema de la Figura 14.

Hacia la parte poniente de la zona, las evidencias de mineralización indican que éstas se presentan sobre trazas de fracturas con rumbo N-S, tal es el caso de las minas abandonadas La Barrita (Mn), La Barra (fluorita), El Plomo (Pb) y La Esmeralda (calcita), en la misma zona, se tiene la presencia de falla normales con dirección NE-SW. En esta zona, con el método de imágenes hiperespectrales no se detectó la presencia superficial de minerales de alteración.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> El signo + se refiere que es una mezcla de dos minerales



Figura 26. Mapa de clasificación de minerales de alteración en la zona de interés, Sonora. (Vázquez Hurtado & Rodríguez Jiménez, 2024)

La distribución de los minerales detectados indica que la mayor densidad de éstos, se encuentran bordeando la parte norte de la unidad pórfido andesítico (Te PA), al centro de la ventana de estudio, dentro de la zona cartografiada como alteración de tipo oxidaciónargilitización y propilitización. Los minerales identificados coinciden con la tabla propuesta por Corbett & Leach (1997), en donde, esquemáticamente, la asociación de minerales de alunita y caolinita, nos indican la posible presencia de una alteración argílica avanzada asociada a depósitos epitermales de alta sulfuración, Figura 27.

La distribución de los minerales de alteración interpretados se ubica en la parte central del área de estudio, a lo largo de una superficie de 3.5 km de ancho por 4.5 km de largo.



Figura 27. Modelo de alteraciones mineralógicas comunes en sistemas hidrotermales. En el recuadro rojo se resalta una zona de la alteración argílica avanzada en donde se interpretó alunita y caolinita. (modificado de (Corbett & Leach, Short Course Manual: Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration and Mineralization., 1997)). Como se mencionó en los antecedentes, los minerales se clasifican en diferentes grupos con base en sus propiedades como lo son la temperatura, pH, presión, entre otras. Una de las clasificaciones más relevantes fue la propuesta por Corbett & Leach (1997), cuyos grupos de minerales se describe a continuación:

Dentro del grupo de la illita, el pH de los fluidos se encuentra en el rango de 4-6 a una temperatura entre 200-250°C, en alteración argílica intermedia. Estas coexisten con el grupo del caolín con un pH de 4-5, dependiendo de la temperatura y la salinidad de los fluidos. La relación profundidad/temperatura de los minerales del grupo de las illitas se encuentran documentadas tanto en las cuencas sedimentarias como en los sistemas geotérmicos activos. Por otra parte, la esmectita (nontronita, montmorillonita) se produce a bajas temperaturas (<100-150°C) y la illita-esmectita interestratificada a unos 100-200°C. Palacio & Godeas (2008), menciona que la illita se considera como un grupo de minerales arcillosos-micáceos de color blanco o blanco amarillento claro, apareciendo con frecuencia como reemplazo en rocas volcánicas o como relleno de espacios abiertos. La illita aparece en ambiente epitermal proximal, distal y en las partes superiores periféricas de algunos sistemas relacionados con intrusiones.

El grupo del caolín se deriva de fluidos con pH moderadamente bajo, en alteración argílica a argílica avanzada, el cual coexiste con el grupo de las alunitas en un rango de pH 3-4. La caolinita se forma en condiciones de baja profundidad y temperatura (<150-200°C), mientras que la pirofilita se forma a altas profundidades y temperatura (<200-250°C). Por otro lado, la dickita se forma en un entorno de transición entre estos dos niveles de profundidad y temperatura. Palacio & Godeas (2008), menciona que la caolinita y dickita son minerales polimorfos. Los afloramientos alterados con caolinita, castañas o rojiza son por meteorización de la pirita. La caolinita reemplaza penetrativamente la roca, y también selectivamente a feldespatos y relleno de cavidades y vetas. Durante el proceso hidrotermal, la caolinita y dickita se presentan en masas y vetas, en forma penetrativa y selectivamente penetrativa dentro de la zona argílica marginal en sistemas de alta sulfuración. Finalmente, la caolinita puede formarse durante la meteorización, mientras que la dickita está restringida a ambientes hidrotermales.

El grupo de las alunitas se da a un pH superior a 2, en alteración argílica avanzada asociada a depósitos epitermales de alta sulfuración, para la formación de alunita junto con los minerales de sílice en una amplia gama de temperaturas. Se produce en asociación con la andalucita a altas temperaturas (aproximadamente >350-400°C). Entre los entornos en que se puede formar la alunita se tiene:

- Alunita magmática-hidrotermal: se forma a aproximadamente a 200-400°C y es típico de depósitos epitermales de alta sulfuración, donde se encuentra dentro de la zona mineralizada por debajo de la misma. También se halla en zonas de alteración argílica avanzada que carecen de mineralización epitermal en la parte superior de los depósitos de pórfido cuprífero.
- 2. Alunita steam-heated: se forma a aproximadamente de 100-150°C a partir de la oxidación atmosférica rica de H<sub>2</sub>S en la zona vadosa sobre la capa freática, asociada con descarga de vapor fumarólica liberada por fluidos profundos de ebullición.

Adicional a lo anterior, Palacio & Godeas (2008), mencionan que los afloramientos que presentan alteración hipogénica portadora de alunita son típicamente de color rosado a rosado claro, en parte por la oxidación de la pirita asociada.

Ahora bien, la identificación de firmas espectrales se realizó mediante la determinación de las zonas de absorción características de cada mineral presente en el área de estudio; las firmas espectrales identificadas con base en la librería de la USGS se muestran en la Tabla 3.



Tabla 3. Firmas espectrales de los minerales identificados a partir del vuelo de Imágenes Hiperespectrales de un tamaño de pixel de 3 metros.

Analizando las firmas espectrales, podemos observar los siguientes rangos de absorción:

Illita: 2202 y 2346 Caolinita: 2165, 2202, 2315, 2352 y 2383. Caolinita+ alunita: 2165, 2202, 2321 y 2383. Caolinita + montmorillonita: 2165, 2202 y 2283. Alunita: 2171, 2202 y 2321 Montmorillonita: 2208

Si bien la forma en las firmas espectrales puras es parecida con las obtenidas por la USGS, los rangos de absorción no son exactamente iguales, esto puede ser por los factores anteriormente mencionados como: la dispersión, la absorción atmosférica y la resolución espectral de los equipos que llegan a alterar las firmas espectrales. Por otra parte, las firmas espectrales que se determinaron en mezcla son porque contienen uno o varios rangos de absorción de dos minerales diferentes, como en el caso de la caolinita+alunita, en donde se tienen los rangos de absorción de 2165 y 2202 característicos de la caolinita, y 2321 el cual no presenta la caolinita, pero es característico de la alunita.

# 8. Conclusiones

El método de Imágenes Hiperespectrales es una gran herramienta debido a la alta resolución espectral que ofrece, permitiendo así la construcción de un espectro continuo por pixel en dónde se puede analizar cada una de las regiones (visible, óxidos y minerales de alteración hidrotermal).

La identificación de minerales de alteración en diversas áreas de estudio ha colaborado a la interpretación geológica en el SGM. Además, gracias a la metodología utilizada desde la adquisición de datos y hasta el procesamiento e interpretación, garantizan la calidad de los resultados obtenidos.

El método cuenta con diferentes ventajas, entre las cuales están las siguientes:

- Al capturar información en 359 bandas, permite identificar y clasificar minerales de alteración en la zona de arcillas (2100-2400 nm), por lo que cuenta con una buena resolución espectral.
- Facilita la prospección minera al aportar información valiosa sobre la distribución de minerales de alteración.
- Al cubrir grandes extensiones de forma rápida, ayuda a identificar zonas con minerales de alteración sin la necesidad de recorrer grandes distancias a pie.
- Es un método no invasivo, ya que no se requiere un contacto directo con la superficie del terreno, ayudando a preservar las áreas estudiadas.

- Es posible analizar la información en diferentes dimensiones (espacial espectral).
- Proporciona información valiosa de áreas de difícil acceso donde la exploración terrestre sería costosa y/o peligrosa.

Aunque es importante mencionar que también se han identificado limitaciones, como, por ejemplo:

- El método se encuentra sujeto a las condiciones meteorológicas, ya que la calidad de las imágenes puede ser afectada por nubes, neblina o sombras y vientos fuertes.
- El volumen de datos generado es muy grande y se requieren equipos de cómputo avanzadas para almacenar y procesar la información.

Sin embargo, al igual que otras metodologías, las imágenes hiperespectrales se deben complementar con otras técnicas de exploración como aeromagnetometría, espectrometría de rayos gamma aéreas, geología regional, entre otras, para obtener interpretaciones más completas según sea el objetivo.

Finalmente, se interpretó el mineral alunita, el cual se asocia a zonas con alteración argílica avanzada asociada a depósitos epitermales de alta sulfuración (200-250°C). Debido a que la alunita se forma en ambientes magmático-hidrotermales, se puede relacionar a yacimientos minerales con posibilidad de contener un interés económico; por lo que se recomienda su verificación en campo para determinar su importancia.

Este hallazgo refuerza la relevancia de las imágenes hiperespectrales en la exploración y evaluación de los recursos minerales, contribuyendo a la gestión sostenible de los recursos naturales. La implementación del método en el Servicio Geológico Mexicano ha complementado estudios geológicos al proporcionar una herramienta útil para la identificación de minerales de alteración, aportando información y contribuyendo en la generación de nuevas áreas prospectivas, en diversas localidades del territorio mexicano.

# 9. Reflexiones y aprendizajes

La participación que tuve dentro del proyecto ha representado una experiencia enriquecedora que ha contribuido tanto en mi desarrollo profesional como personal. Por una parte, aprender el método de las imágenes hiperespectrales represento un gran reto, sin embargo, a través de la capacitación constante que se me ha brindado en el organismo, aprendí a interpretar firmas espectrales y a correlacionar la mineralización presente con los eventos geológicos.

Además, adquirí habilidades prácticas en el uso de software especializado, y me proporcionó un panorama más amplio sobre los retos y oportunidades que se presentan en la exploración minera, lo cual ha sido fundamental para consolidar conocimientos y fortalecer mi capacidad para abordar problemas en el campo de la geofísica y la geología; ampliando mi comprensión sobre cómo las tecnologías avanzadas optimizan la exploración minera y evaluación de recursos minerales.

Por otra parte, a lo largo de este tiempo he conocido profesionales excelentes con los cuales además de compartir una gran amistad, me han compartido conocimientos y experiencias que han ampliado mi entendimiento en diversas áreas.

El método de imágenes hiperespectrales juega un papel importante en los proyectos interdisciplinarios, ya que no solo puede ser utilizado para la identificación de minerales de alteración hidrotermal, sino que también tiene aplicaciones en campos como la geotermia, agricultura, contaminación ambiental por hidrocarburos, eutrofización en lagos y lagunas, entre otras; gracias a su capacidad de capturar información en un rango amplio de energía.

Por lo que, el proyecto no solo mejoró mi comprensión en las tecnologías aplicadas a la minería y la exploración geológica, sino que también ha reafirmado la importancia de la colaboración y el trabajo en equipo para el éxito de proyectos multidisciplinarios que impactan directamente en el desarrollo del país.

Finalmente, agradezco a los directivos su autorización para el uso de los datos con la finalidad de elaborar este Informe de Actividades Profesionales, a mis jefes inmediatos por sus consejos y apoyo en la revisión de este trabajo, a mis compañeros del proyecto por las sugerencias realizadas y al Servicio Geológico Mexicano ya que mi experiencia dentro del organismo ha sido clave en mi formación personal y profesional, y me ha permitido contribuir al avance del conocimiento geológico - geofísico en México.

### 10. Bibliografía

- Campa, M. F., & Coney, P. J. (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. Tucson: University of Arizona.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (1994). *Introduction to Remote Sensig Fifth Edition*. New York: The Guilford Press.
- Camprubí, A., González-Partida, E., Tritlla, G. L., & Carrillo Chávez, A. (2003). Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 10-18.
- Corbett, G. J., & Leach, T. M. (1997). Short Course Manual: Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration and Mineralization. Society of Economic Geology Special Publication.
- EOS DATA ANALYTICS. (21 de 08 de 2024). *Multispectral Vs. Gyperespectral: Choose The Right Tech*. Obtenido de https://eos.com/blog/multispectral-vs-hyperspectral-imaging/
- Gómez Gutiérrez, D. F., & Molano Mendoza, J. C. (2009). Evaluación de zonas de alteración hidrotermal y fases intrusivas, para el prospecto "Stock Porfiríco de Piedra Sentada" (Vereda Santa Lucía) Cauca, Colombia. *Universidad Nacional de Colombia*, 70-94.
- González, A. R., & Vargas Cuentas, N. I. (22 de Enero de 2013). Revista Ingeniería & Desarrollo. Análisis de imágenes hiperespectrales, 14-17. HAL open science.
- INEGI. (1980). *Geografía y Medio Ambiente*. Obtenido de https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/#mapas
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation*. United States of America: Wiley.
- McCullum, A. J., Torres Pérez, J. L., & Bengtsson, Z. (19 de Enero de 2021). Applied Remote Sensing Training Program. *Datos Hiperespectrales para Sistemas Terrestres y Costeros*. NASA.
- Palacio, M., & Godeas, M. (2008). *Guía de minerales de alteración de la República Argentina.* Serie Publicaciones Nº169. Buenos Aires: Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR.
- Raisz, E. (1964). Landforms of Mexico. Prepared for the Geography Branch of the Office of Naval Research by Ewwin Raisz. (insets) Physiographic Provinces. States and Territories. Cambridge.

Secretaría de Economía. (2023). Targets mineros. Dirección General de Desarrollo Minero.

- Servicio Geológico Mexicano. (1998). Cartografía Geológico-Minera y Geoquímica de la Hoja "ESQUEDA" H12B65 Escala 1:50,000 Mpio. Fronteras, Sonora, México. Hermosillo, Sonora: Consejo de Recursos Minerales.
- Servicio Geológico Mexicano. (1999). Carta Geológico-Minera ESQUEDA (H12-B65) Sonora. Pachuca, Hidalgo.
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). Obtenido de https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Geofisica/Introduccion-geofisica.html
- Servicio Geológico Mexicano. (s.f.). *GeoInfomex*. Obtenido de https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/#
- SGM. (2014). Curso de Imágenes Hiperespectrales Aerotransportadas. Pachuca, Hidalgo.
- Shippert, P. (2008). Introduction to Hyperespectral Image Analysis. Earth Science Applications Specialist Research Systems, Inc.
- SPECIM. (2024). *Hyperespectral Imaging Applications*. Obtenido de https://www.specim.com/hyperspectral-imaging-applications/
- SPECIM. (s.f.). AisaDual Hyperespectral Sensor. Obtenido de https://www.specim.com/aisa/
- Spectroscopy Lab, USGS. (2024). USGS science for a changing world. Obtenido de https://www.usgs.gov/labs/spectroscopy-lab/usgs-spectral-library
- Townley, B. K. (2006). *Metalogénesis: Hidrotermalismo y Modelos de Yacimientos*. Geología Económica. Departamento de Geología. Universidad de Chile.
- Vázquez Hurtado, E. A., & Rodríguez Jiménez, C. A. (2024). Clasificación de minerales de alteración, en la zona de estudio Santa Cecilia Sur, Estado de Sonora, empleando Aerogeofísica para Imágenes Hiperespectrales. Pachuca, Hidalgo: SGM.