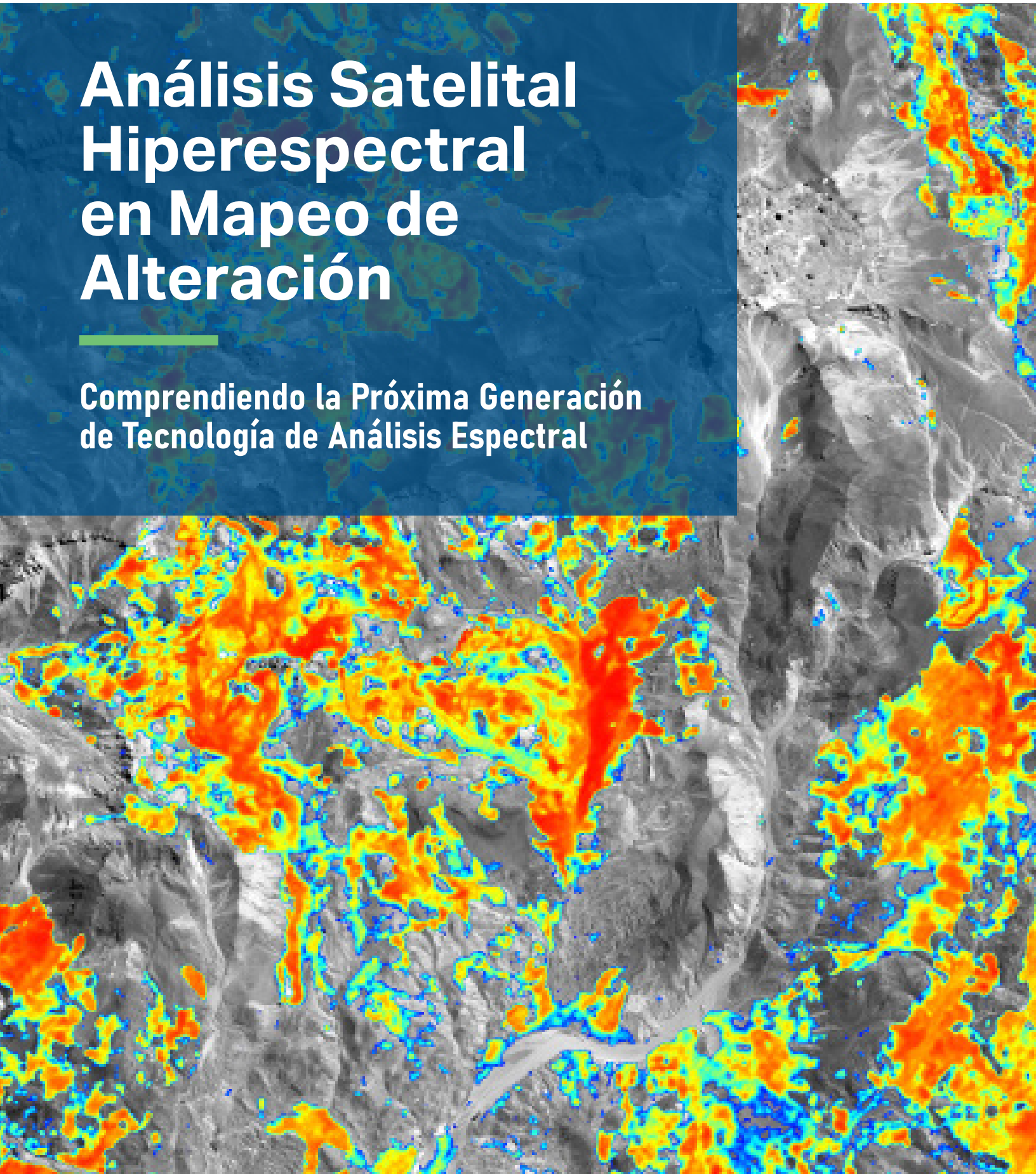
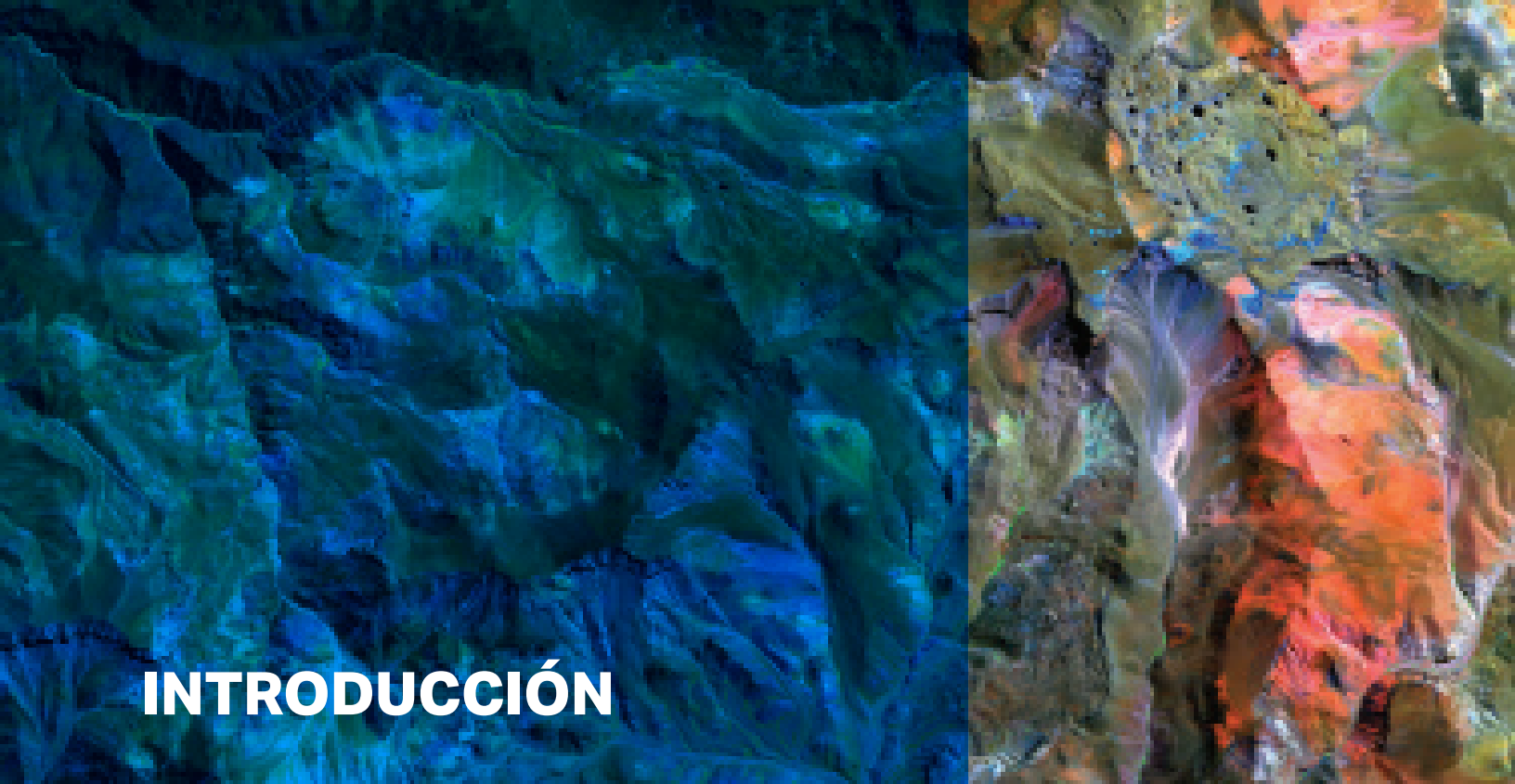


Análisis Satelital Hiperespectral en Mapeo de Alteración

**Comprendiendo la Próxima Generación
de Tecnología de Análisis Espectral**





INTRODUCCIÓN

Aunque la tecnología de análisis hiperespectral ha existido durante más de treinta años, constatar el alcance de sus beneficios no ha resultado viable para muchos dentro de la industria de exploración mineral. Las barreras técnicas, como los altos costos y las enormes exigencias de procesamiento para conjuntos de datos de gran tamaño, han impedido una amplia adopción. Gracias a los avances en tecnología de detección, capacidades informáticas y técnicas de procesamiento, la adopción de datos hiperespectrales se ha generalizado en toda la industria. Los espectrómetros portátiles, el escaneo de testigos y los sensores hiperespectrales aéreos se han convertido en un estándar del sector cuando se trabaja en los terrenos y tipos de depósitos adecuados. Si bien la próxima generación de satélites han incorporado sensores hiperespectrales de alta calidad, siguen existiendo desafíos tecnológicos.

La incorporación de cientos de bandas espectrales significan conjuntos de datos mucho más grandes, que requieren técnicas de procesamiento especializadas que a menudo son costosas. Sin embargo, los avances en los métodos de procesamiento, como los algoritmos de Deep Learning, han ayudado a mejorar los resultados, reducir los costos y acelerar los tiempos de procesamiento.

Este Ebook sirve como guía para la captura de imágenes hiperespectrales satelitales para la identificación de objetivos de minerales de alteración y explora las diferencias entre esta nueva tecnología y los sensores multiespectrales bien establecidos y ampliamente adoptados, como ASTER.

Comprendiendo las Diferencias Clave entre el Análisis Multiespectral y el Hiperespectral

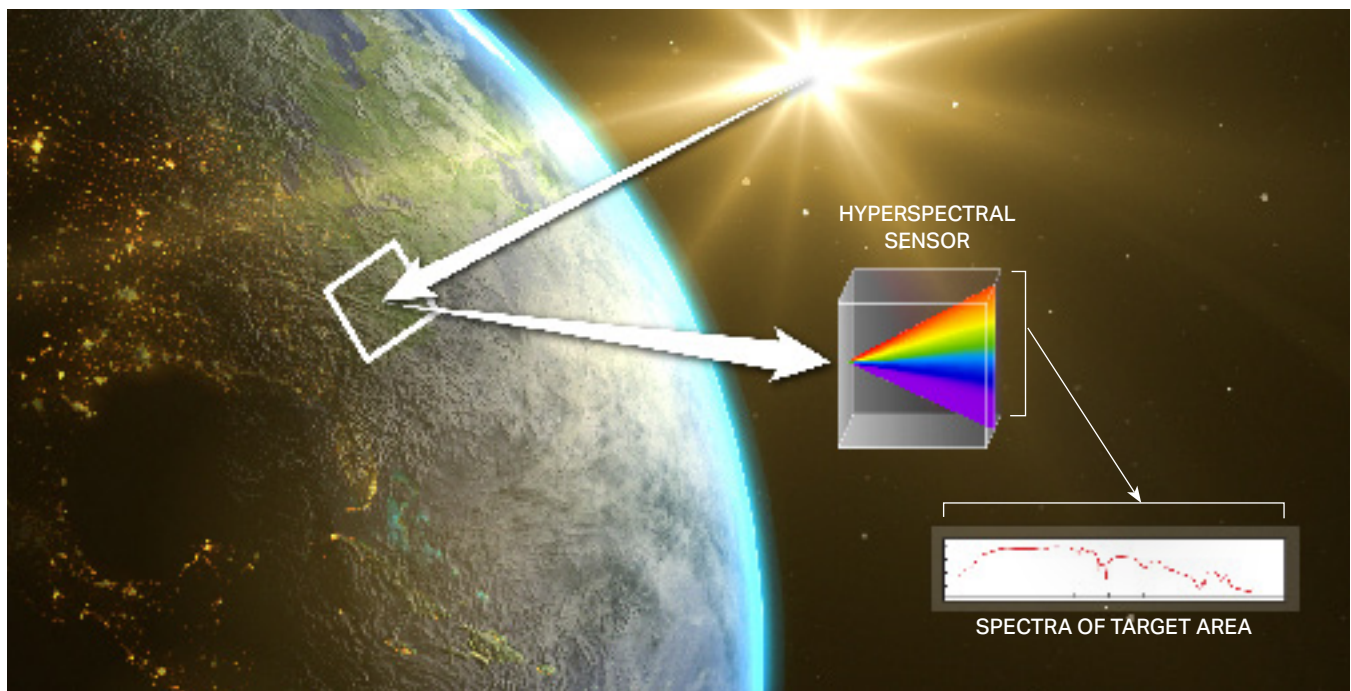
Análisis Espectral y el Auge de la Obtención de las Imágenes Multiespectrales

Aunque el ojo humano es un espectrómetro natural capaz de detectar varias longitudes de onda dentro del rango visible del espectro electromagnético, tomaron varios siglos para descubrir y aplicar los conocimientos más allá de la luz visible.

El análisis espectral detecta diferentes materiales (en este caso, minerales) por la cantidad de energía que absorben o reflejan en longitudes de onda específicas a lo largo del espectro electromagnético. El análisis multiespectral se define como cualquiera que supere tres bandas, pero la mayoría de los satélites multiespectrales puede detectar entre 8 y 16 bandas espectrales, dependiendo del satélite.

Durante las últimas décadas, el análisis multiespectral se ha convertido en un elemento básico del mapeo de minerales de alteración, disponible principalmente a través de los satélites ASTER (Radiómetro Avanzado de Emisión y Reflexión Térmica Espacial) y WorldView-3.

El análisis multiespectral emplea cámaras especializadas equipadas con múltiples sensores para capturar imágenes en distintos rangos de longitud de onda del espectro electromagnético, que a menudo se extienden más allá de la luz visible. Cada sensor o filtro aísla una banda de luz específica, que los materiales reflejan o absorben de forma diferente. Al combinar estas "capas" de información, los analistas pueden detectar patrones, identificar detalles ocultos sobre la composición de un objeto y generar métricas cuantitativas como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).



Captura de Imágenes Hiperespectrales para Teledetección Satelital

¿Qué es la captura de imágenes hiperespectrales?



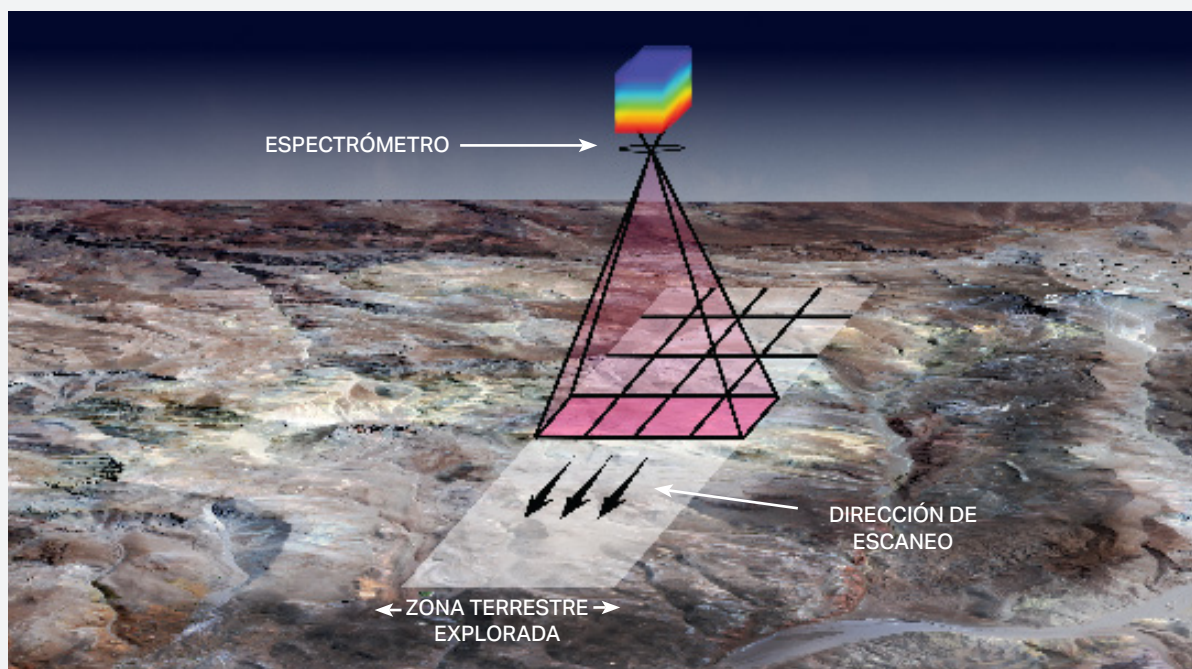
La captura de imágenes espectrales emplea cámaras o sensores especializados, conocidos como espectrómetros, para detectar longitudes de onda dentro y fuera del espectro de luz visible. La captura de imágenes hiperespectrales es un gran avance en la espectroscopía. Captura cientos de bandas de longitud de onda contiguas y estrechas, mientras que las imágenes multispectrales normalmente detectan solo una docena de bandas aproximadamente.

Una cámara hiperespectral captura la luz de una escena dividiéndola en longitudes de onda individuales, lo que da como resultado una imagen bidimensional con información espectral para cada píxel. Cada píxel de una imagen hiperespectral corresponde a un espectro único, similar a las huellas dactilares. Dado que los materiales interactúan con la luz de forma diferente, sus firmas espectrales varían. Estos espectros se pueden utilizar para identificar y cuantificar materiales dentro de la escena, como minerales o vegetación.

La captura de imágenes hiperespectrales satelitales es una tecnología avanzada de teledetección que puede detectar y analizar cientos de bandas contiguas del espectro electromagnético (EMS) dentro de una amplia gama de longitudes de onda. A diferencia de los sistemas tradicionales de captura de imágenes multispectrales, que normalmente operan en solo unas cuantas bandas espectrales amplias, los sensores hiperespectrales capturan datos en cientos o incluso miles de bandas espectrales contiguas y estrechas. Esta información espectral detallada permite una caracterización más precisa de los materiales en la superficie de la Tierra, proporcionando información detallada sobre la composición química, la mineralogía, la vegetación y más.

El análisis hiperespectral captura información espectral detallada mediante la obtención de imágenes de objetos o escenas en numerosas bandas espectrales contiguas y estrechas. Posteriormente estos datos se traducen en reflectancia superficial para producir un "cubo de datos" donde cada píxel contiene una "huella dactilar" espectral única del material. A continuación, el software especializado emplea algoritmos para analizar estas firmas espectrales, extrayendo información específica, identificando sustancias y mapeando propiedades. En otras palabras, con la captura y análisis de imágenes hiperespectrales, solo necesitamos un píxel para determinar la posible presencia de minerales de alteración, pero con las imágenes multispectrales, necesitaríamos analizar muchos píxeles para tomar la misma determinación.

Resolución Espacial versus Espectral



La **resolución espacial** y la **resolución espectral** son conceptos esenciales en teledetección.

Resolución espacial corresponde al nivel de detalle de una imagen, determinado por el tamaño y el número de píxeles. Una mayor resolución espacial significa que cada píxel representa un área más pequeña en el terreno, lo que permite obtener imágenes más precisas y detalladas.

Resolución espectral se refiere a la capacidad de un sensor para diferenciar entre intervalos estrechos de longitud de onda de radiación electromagnética. Un sensor con alta resolución espectral puede capturar más bandas dentro del espectro electromagnético, lo que le permite detectar variaciones sutiles en los materiales en función de sus firmas espectrales.

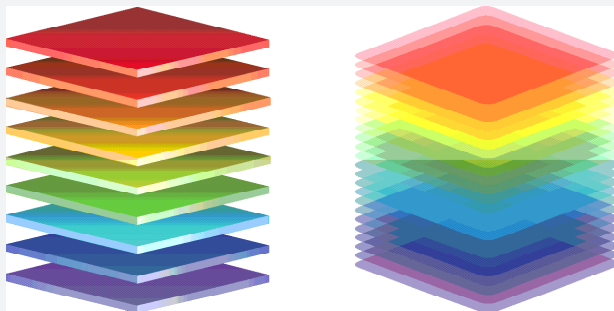
Aunque los sensores multispectrales normalmente capturan datos en un número limitado de bandas amplias, los sensores hiperspectrales recopilan información en cientos de bandas espectrales contiguas.

Los usuarios de datos deben comprender los beneficios y limitaciones entre la resolución espacial, la resolución espectral, la relación señal-ruido, el tamaño de la zona y el tamaño de los datos. A veces, los satélites hiperspectrales pueden tener una resolución espacial menor o igual que los satélites multispectrales. Sin embargo, la mayor resolución espectral significa que cada píxel contiene mucha más información, lo que significa que se puede identificar los minerales con mucha más confianza.



Cubos de Datos y Procesamiento de Datos Hiperspectrales

Un cubo de datos hiperspectrales es un sofisticado conjunto de datos tridimensional que integra información espacial (x,y) y espectral (z), proporcionando una vista completa del entorno muestreado. Cada píxel de una escena captura un espectro continuo de intensidades de luz en una amplia gama de longitudes de onda, que a menudo ascienden a cientos. Esta abundante información espectral funciona como una huella digital única para identificar diversos materiales. En la geología de exploración, se pueden distinguir con precisión muchos más minerales de alteración, lo que permite tomar decisiones más informadas respecto de la exploración mineral.



MULTIESPECTRAL

HIPERESPECTRAL

El procesamiento de datos de imágenes hiperspectrales para el mapeo de minerales de alteración es un flujo de trabajo de varios pasos diseñado para transformar datos espectrales sin procesar en información geológica detallada, lo que representa un avance significativo por sobre el laborioso trabajo de campo tradicional. El proceso comienza con un preprocesamiento crucial, que incluye la calibración radiométrica para convertir las lecturas del sensor en unidades de radiancia estandarizadas y reflectancia en la parte superior de la atmósfera, seguido de correcciones atmosféricas que eliminan las interferencias por vapor de agua y aerosoles.

Luego se aplican correcciones geométricas para alinear los datos con precisión a las coordenadas geográficas reales y a los modelos topográficos de elevación. Con los datos limpios en forma de cubo de datos, la reducción de la dimensionalidad se realiza a menudo para gestionar el inmenso volumen de datos, con técnicas como el Análisis de Componentes Principales (PCA) o la Fracción Mínima de Ruido (MNF) utilizadas para aislar las bandas espectrales más informativas, centrándose en la región de infrarrojo de onda corta (SWIR) donde muchos minerales de alteración exhiben características espectrales únicas (Living Optics, 2025).

Sin embargo, el paso más crítico para el mapeo de minerales es la descomposición espectral o de píxeles, una técnica analítica avanzada que se utiliza porque los píxeles individuales en una imagen hiperspectral a menudo representan una mezcla de múltiples minerales, especialmente en entornos geológicos complejos. La descomposición de píxeles descompone matemáticamente el espectro de un píxel mezclado en firmas espectrales puras de minerales individuales, y calcula la abundancia fraccional de cada miembro puro dentro de ese píxel (Amigo, 2020). Los geólogos pueden identificar y mapear las zonas de alteración que indican potenciales depósitos minerales determinando la proporción y distribución de minerales de alteración clave como arcillas, sulfatos y carbonatos.

La etapa final implica convertir estos mapas de abundancia fraccional en información procesable a través de la clasificación y la visualización. Este proceso proporciona a los geólogos una evaluación cuantitativa y con precisión espacial de la mineralogía, lo que ayuda a identificar objetivos prometedores y optimizar los programas de exploración.

Las Posibilidades de la Captura de Imágenes Hiperespectrales Satelitales en el Mapeo de Alteración

¿Cuáles son exactamente las ventajas de la captura de imágenes satelitales hiperespectrales cuando se aplica al mapeo de alteración? En resumen, la próxima generación de sensores satelitales espectrales se puede utilizar para extraer información geológica mucho más relevante con mucha mayor precisión, lo que permite una mejor toma de decisiones de exploración basada en datos, en comparación con soluciones multispectrales anteriores.

El producto de mapeo de alteración regional multispectral de PhotoSat que utiliza el sensor ASTER puede identificar ocho minerales distintos. En cambio, nuestra nueva solución de Identificación de Objetivos de Exploración Hiperespectral (más información sobre esto a continuación) puede identificar actualmente más del doble de la cantidad de minerales con mucha mayor precisión y fiabilidad.

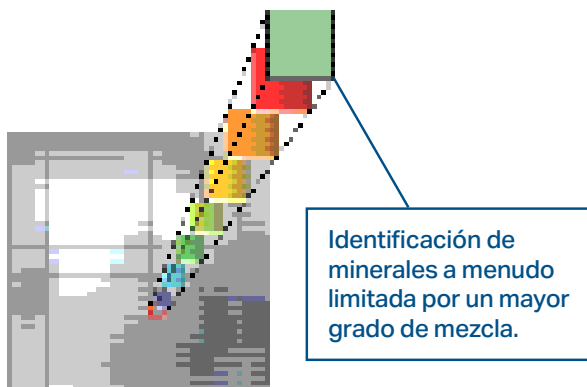
Mientras que la captura de imágenes satelitales multispectrales ofrece una excelente visión general adecuada para el mapeo de alteración básico, la captura de imágenes hiperespectrales permite extraer mucha más información geológica para identificar objetivos de exploración que otros han pasado por alto.

Es importante destacar que, con los datos hiperespectrales se pueden identificar múltiples minerales dentro del mismo píxel, y los minerales se pueden identificar incluso cuando el píxel está compuesto mayormente por vegetación (firma mixta de vegetación y mineral), lo cual no sucede con los datos multispectrales, donde se necesita prácticamente terreno descubierto para una identificación positiva.

MULTIESPECTRAL



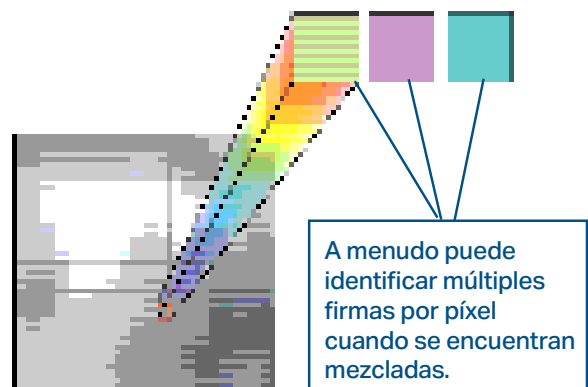
No puede identificar minerales con confianza cuando las firmas se encuentran muy mezcladas.

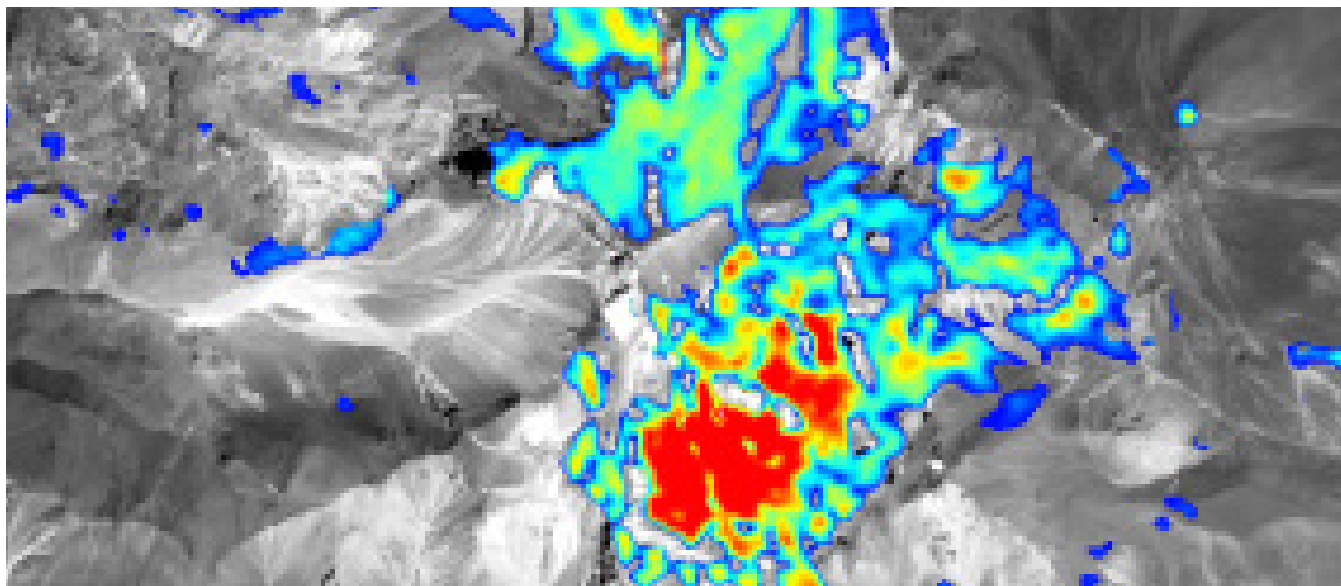


HIPERSPECTRAL



Alta resolución espectral significa que los minerales pueden identificarse con mayor confianza incluso cuando las firmas se encuentran muy mezcladas.





Identificación Hiperespectral de Objetivos de Exploración Mineral

PhotoSat ha desarrollado nuevas soluciones de identificación de minerales de alteración que utilizan datos satelitales hiperespectrales reales. Estos productos combinan los beneficios de diversos sensores satelitales multispectrales e hiperespectrales con la amplia experiencia de PhotoSat en la generación de soluciones de mapeo de minerales de alteración basadas en algoritmos de Deep Learning patentados.

Los conjuntos de datos hiperespectrales procesados con los modelos de Deep Learning patentados de PhotoSat pueden potenciar los proyectos de exploración al mapear más minerales, abundancias relativas y cambios en las composiciones/cristalinidades minerales para identificar patrones de alteración que los conjuntos de datos multispectrales tradicionales pasan por alto.

Las principales ventajas de los productos de alteración hiperespectral incluyen:

- Mapear más minerales de alteración clave, como pirofilita, moscovita e illita
- Diferenciar composiciones y cristalinidades de minerales como la alunita potásica versus la alunita sódica o la muscovita alta en aluminio versus la muscovita baja en aluminio
- Detectar firmas sutiles de alteración a escala subpíxel mediante modelos avanzados de Deep Learning, que mejoran la precisión y reducen los falsos positivos
- Capacidad de mapear abundancias relativas de minerales, lo que permite el desarrollo de mejores objetivos de exploración
- Elementos visuales atractivos que ayudan a elaborar una interpretación integral del modelo del depósito mineral para inversionistas, ejecutivos y otras partes interesadas

Estos nuevos productos son la “próxima generación” de mapeo satelital de alteración, que utilizan datos hiperespectrales para mejorar las capacidades de los conjuntos de datos multispectrales tradicionales como ASTER.



Identificación Hiperespectral de Objetivos de Exploración Regional (R-HET)

El análisis satelital hiperespectral es completamente remoto y puede cubrir extensas áreas, lo que lo convierte en una solución rentable para la exploración regional. Esta primera nueva oferta de PhotoSat incorpora datos satelitales hiperespectrales en nuestros modelos de Deep Learning patentados para producir conjuntos de datos regionales de alta calidad con el fin de contribuir a una mejor generación de proyectos basada en datos. El R-HET de PhotoSat es una evolución de la solución tradicional de mapeo de alteración regional ASTER.

Identificación Hiperespectral de Objetivos de Exploración Distrital (P-HET)

Previsto para su lanzamiento en 2026, PhotoSat también está desarrollando una oferta hiperespectral a escala de propiedades que utiliza los nuevos modelos de Deep Learning hiperespectral de PhotoSat para proporcionar las mismas ventajas que el producto regional, pero a resoluciones espaciales mucho más altas, para su aplicación en áreas a menor escala (propiedades de exploración). Utilizar una alta resolución espacial permitirá identificar características más finas, lo que facilitará un mejor uso en el campo para identificar minerales en afloramientos. Estos datos ayudarán a los geólogos a generar objetivos para el trabajo de campo. Todas las funcionalidades asociadas con el producto regional también deberían aplicarse al producto a escala de propiedades.



Impulsando la Exploración Mineral con Imágenes Hiperespectrales

Con la capacidad de capturar y analizar cientos de bandas espectrales, las imágenes hiperespectrales ofrecen información geológica detallada sin precedentes que no es posible obtener con datos multispectrales, lo que permite a los geólogos tomar decisiones de exploración más informadas. A medida que la industria minera adopta estos avances tecnológicos, el potencial para descubrir nuevos depósitos y optimizar las estrategias de exploración se vuelve significativamente más prometedor.

PhotoSat es un socio de confianza que respalda proyectos de minería seguros y responsables en todo el mundo. Con más de 200 años de experiencia conjunta en ingeniería, geología y geofísica, PhotoSat ofrece soluciones innovadoras que abarcan desde la exploración hasta el cierre. PhotoSat es el experto líder en soluciones satelitales producidas con software patentado y modelos de Deep Learning diseñados y probados para datos de satélites ópticos.

Solicite una cotización.

Fuentes:

Williams, N. (n.d.). *History of Spectroscopy*. Ossila. <https://www.ossila.com/pages/history-of-spectroscopy>

Windham, C. (2023). *The ASTER Spectral Library – a True Monument of Remote Sensing Data*. <https://apollomapping.com/blog/aster-spectral-library-true-monument-remote-sensing-data>

What is Hyperspectral Data Processing? Techniques & Applications. (2025, June 24). Living Optics. <https://www.livingoptics.com/glossary/hyperspectral-data-processing/>

Amigo, M., et al. (2020). *Hyperspectral Imaging*. Elsevier.

Goetz, A. F. H. (2009). Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view. *Remote Sensing of Environment*, 113, S5–S16. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.12.014>



Las decisiones dependen de la calidad de la información en que se basan. En PhotoSat, estamos profundamente convencidos de que mejores datos conducen a mejores decisiones. Nuestra misión es respaldar proyectos seguros y responsables, desde la exploración de minerales hasta el desarrollo de recursos, en todo el mundo. Proporcionamos datos e información especializada asociada en los que geólogos e ingenieros pueden confiar.



PhotoSat Information Ltd.
#580—1188 West Georgia Street
Vancouver BC Canada V6A4E2
1-604-681-9770

PhotoSat.ca