

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

TRABAJO FIN DE MASTER



ESCUELA DE INGENIEROS DE MINAS, ENERGÍA Y MATERIALES

APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN EN LA EXPLORACIÓN GEOMINERA Y DE RECURSOS NATURALES

Autora: D^a. Romina Arenas Corujo

Director: D. Pablo Cienfuegos Suárez

JUNIO, 2016



Tabla de contenido

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 9 |
| 1.1 | Objetivos del Trabajo Fin de Master | 12 |
| 1.2 | Estructura | 12 |
| 1.3 | Metodología | 14 |
| 1.4 | Fuentes de información | 15 |
| 1.5 | Créditos | 15 |
| 2 | ANTECEDENTES | 16 |
| 2.1 | Plataformas de observación de la Tierra | 17 |
| 2.1.2 | Programas nacionales e internacionales de observación de la tierra | 22 |
| 2.1.3 | Principales Misiones de Observación de la Tierra | 24 |
| 3 | PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA TELEDETECCIÓN | 35 |
| 3.1.1 | Captura de la información | 35 |
| 3.1.2 | El espectro electromagnético | 36 |
| 3.1.3 | Comportamiento espectral de las cubiertas | 37 |
| 3.1.4 | Paso de Niveles Digitales a Radiancias espectrales | 41 |
| 3.1.5 | Paso de Radiancias espectrales a Reflectividades a la altura del sensor (Top OF Atmosphere) | 41 |
| 3.1.6 | Paso de Reflectividades TOA a Reflectividades en superficie | 42 |
| 3.1.7 | Obtención de firmas espectrales | 43 |
| 3.1.8 | Firmas espectrales | 43 |
| 3.1.9 | Imágenes de sensores ópticos | 46 |
| 3.1.10 | Descripción de una imagen bruta procedente de satélite | 47 |
| 3.1.11 | Tipos de resoluciones | 48 |
| 4 | METODOLOGÍA y MATERIALES | 55 |
| 4.1 | Metodología | 55 |
| 4.2 | Imágenes ASTER | 55 |
| 4.2.1 | Descripción cronológica | 57 |
| 4.2.2 | Situación actual | 58 |
| 4.2.3 | Subsistema VNIR | 59 |
| 4.2.4 | Subsistema SWIR | 60 |
| 4.2.5 | Subsistema TIR | 61 |
| 4.2.6 | Ventajas y aplicaciones de la Teledetección | 62 |
| 4.3 | Herramientas comerciales | 67 |
| 4.4 | Herramientas gratuitas | 68 |



| | | |
|----------|---|------------|
| 5 | TRATAMIENTO DE IMÁGENES | 69 |
| 5.1 | Histograma de una imagen | 69 |
| 5.2 | Histograma unidimensional | 70 |
| 5.3 | Histograma Multidimensional..... | 70 |
| 5.4 | Condiciones de iluminación | 71 |
| 5.4.1 | Transferencia de contraste | 72 |
| 5.4.2 | Aumento lineal de contraste | 72 |
| 5.5 | Procesamiento de datos digitales | 73 |
| 5.5.1 | Procesamiento digital en falso color | 74 |
| 5.5.2 | El color digital en imágenes | 75 |
| 5.5.3 | Filtros..... | 76 |
| 5.6 | Extracción de información | 78 |
| 5.6.1 | Cocientes de bandas..... | 78 |
| 5.6.2 | Clasificación multiespectral..... | 79 |
| 5.6.3 | Métodos Mixtos..... | 80 |
| 5.7 | Correcciones de imágenes | 80 |
| 5.7.1 | Correcciones Radiométricas..... | 80 |
| 5.7.2 | Correcciones Geométricas | 81 |
| 5.7.3 | Rectificación por GCPs..... | 82 |
| 5.7.4 | Rectificación por Interpolación | 83 |
| 6 | APLICACIONES | 84 |
| 6.1 | Introducción | 84 |
| 6.2 | Aplicaciones en distintas longitudes de onda..... | 84 |
| 6.3 | Introducción a los productos de imágenes..... | 86 |
| 6.3.1 | Explicación de los productos corrientes | 86 |
| 6.4 | Exploración geominera, Cartografía de litologías y exploración de minerales | 89 |
| 6.4.1 | Imágenes del sensor ASTER | 90 |
| 6.4.2 | Satélites LandSat..... | 101 |
| 6.4.3 | Imágenes ALI (Advanced Land Imager)..... | 103 |
| 6.4.4 | Imágenes HYPERION..... | 106 |
| 6.4.5 | Mina Cuprita, Nevada, EEUU. | 111 |
| 6.5 | Calidad del agua | 115 |
| 6.6 | Aplicaciones a la Cartografía Topográfica | 115 |
| 7 | CONCLUSIONES | 117 |
| 8 | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 118 |
| 8.1 | General: | 118 |



| | | |
|-----|--|-----|
| 8.2 | Específica de procesamiento digital de imágenes: | 118 |
|-----|--|-----|



Tabla de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.- Esquema de una onda electromagnética. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 10 |
| Figura 2.- Parámetros de una onda. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 11 |
| Figura 3- Representación de la teledetección espacial. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 16 |
| Figura 4 - Diversas posibilidades de teledetección Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015. Teledetección desde helicóptero. Teledetección terrestre, no tripulado. | 17 |
| Figura 5.-Satélites en órbitas geoestacionarias. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 19 |
| Figura 6.-Satélite en órbita heliosíncrona. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 20 |
| Figura 7.- Tipos de sensores. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 .. | 21 |
| Figura 8.- Formación de una imagen con sensor multiespectral. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 21 |
| Figura 9.- Dibujo del satélite Ingenio orbitando en el espacio. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015. | 24 |
| Figura 10.- Imágenes del satélite PAZ en construcción. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 24 |
| Figura 11 - Satélite Spútnik (Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015). .. | 25 |
| Figura 12 - Dibujo del satélite PAZ en órbita Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 26 |
| Figura 13.- Constelación de satélites SPOT. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015. | 27 |
| Figura 14.- Constelación de satélites Rapid Eye. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 28 |
| Figura 15.- Satélite Landsat 8. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 30 |
| Figura 16.- Ancho de banda para los sensores OLI y TIRS en Landsat 8 y ETM+ en Landsat 7. | 31 |
| Figura 17.-Interfase de Earth Explorer para la descarga de imágenes de Landsat 8..... | 34 |
| Figuran 18.- Los factores que intervienen en la formación de una imagen por teledetección, cuando se utilizan sensores pasivos. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015. | 35 |
| Figura 19.- Regiones del espectro electromagnético. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 37 |
| Figura 20.- Representación de los distintos tipos de comportamiento de la radiación solar. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 38 |
| Figura 21.- La siguiente ilustración representa las distintas técnicas existentes en teledetección según el tipo de radiación capturada por los sensores. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 40 |
| Figura 22.- Pasos a seguir para obtener firmas espectrales a partir de los niveles digitales que proporciona el sensor: Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 41 |
| Figura 23.- Gráfico que representa la firma espectral de 4 tipos de cubiertas: agua, vegetación sana, hormigón y nieve. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015. | 44 |



| | |
|---|----|
| Figura 24.- Comportamiento espectral de la cubierta vegetal. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 44 |
| Figura 25.- Comportamiento espectral del agua y la nieve. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 45 |
| Figura 26.- Comportamiento espectral del suelo desnudo. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015. | 46 |
| Figura 27.- Esquema del paso de radiación a bandas de imagen. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015. | 47 |
| Figura 28.- Ejemplo de visualización en escala de grises de una imagen con una sola banda de 10x10 píxeles. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015. | 48 |
| Figura 29.- Distintos satélites según el tamaño de píxel de las imágenes que capturan. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015. | 50 |
| Figura 30.- En esta figura se muestra un ejemplo de las distintas firmas espectrales obtenidas de una misma cubierta, caolinita en este caso, dependiendo de la resolución espectral del sensor que capture la información. La primera firma espectral empezando por arriba corresponde al sensor TM a bordo de algunos satélites de la serie Landsat que posee 7 bandas espectrales, la siguiente firma corresponde al sensor GERIS con 63 canales espectrales, la siguiente al sensor HIRIS con 192 bandas espectrales, la cuarta al sensor AVIRIS que tiene 224 canales espectrales y la última es la curva hiperespectral de la caolinita obtenida en laboratorio, con la que se pueden comparar las anteriores. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015. | 51 |
| Figura 31.- Misma imagen con distinta profundidad de bit. Para la imagen de la derecha se utilizan 2 bit por píxel, por lo que la imagen se representa con 4 niveles de gris, y para la imagen de la izquierda se utilizan 8 bits por píxel por lo que la imagen se puede representar con 256 niveles de gris distintos. Por tanto la imagen de la izquierda proporcionará un grado de detalle más fino. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015. | 51 |
| Figura 32.- Importancia de la resolución radiométrica en las imágenes para teledetección. En la columna de la derecha se muestran dos imágenes con resolución radiométrica de 8 bit por píxel y en la columna de la izquierda se muestran las mismas imágenes mejorando la resolución a 11 bits por píxel. Al comparar las dos imágenes de arriba, se puede apreciar cómo en la imagen de la derecha aparecen zonas saturadas que desaparecen aumentando la profundidad de bit. Al comparar las dos imágenes de abajo, se puede apreciar cómo en la imagen de la derecha aparecen zonas de sombra, que se aclaran al aumentar la resolución radiométrica. En este caso, al mejorar la resolución radiométrica, mejorará la fotointerpretación o descripción de cubiertas. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015. | 52 |
| Figura 33.- Ancho de barrido de un satélite que describe una órbita casi polar. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015. | 52 |
| Figura 34.- El instrumento ASTER antes del lanzamiento. | 56 |
| Figura 35. Esquema del subsistema VNIR. FUENTE: NASA. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology | 59 |
| Figura 36. Esquema del Subsistema SWIR. FUENTE: NASA. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology | 60 |
| Figura 37. Esquema del Subsistema TIR. FUENTE: NASA. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology | 61 |
| Figura 38 - Imagen del sensor MODIS. Incendios declarados en la Comunidad de Valencia. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 63 |
| Figura 39 - Imagen Landsat 5 en falso color. Identificación de cultivos de regadío. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 64 |
| Figura 40.- Distribución de la vegetación a nivel mundial. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 64 |



| | |
|--|-----|
| Figura 41.- Imagen del satélite Landsat 8. Zona deforestada en plena selva amazónica, cercana al río Amazonas a su paso por Perú. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 65 |
| Figura 42.-Imagen del satélite worldview-2. 50cm de tamaño de píxel. Infraestructuras de la ciudad de Bangkok, Tailandia Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015 | 66 |
| Figura 43. Histograma de una imagen. La dispersión de los niveles de grises en B es mayor que en A; por lo cual B posee mayor contraste que A. | 71 |
| Figura 44. Histograma de una imagen, con la función de transferencia de contraste. | 72 |
| Figura 45. Histograma de una imagen, con la función de transferencia lineal de contraste. | 73 |
| Figura 46. Película infrarroja. | 75 |
| Figura 47. Esquema de filtro. | 76 |
| Figura 48.Izquierda: Imagen Color Real del sensor HyMap; Derecha: Imagen de clasificación de minerales a partir de este sensor Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team..... | 86 |
| Figura 49. Imagen 3D creada a partir de una imagen ASTER (Combinación Infrarrojo Color y DEM generado con el par estereoscópico que dispone este satélite) Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team. | 87 |
| Figura 50.Izquierda: Imagen PROCESAMIENTO DE LOS PRODUCTOS | 88 |
| Figura 51. Características de las bandas del sensor ASTER | 91 |
| Figura 52. Comparación entre LANDSAT y ASTER..... | 91 |
| Figura 53. Comparación. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team. | 92 |
| Figura 54. El Complejo ígnea Bushveld (BIC). Numerosas minas, balsas de residuos y los estanques de lixiviación se muestran en azul en la imagen ASTER. La imagen fue adquirida 24 de octubre del 2006, tiene una superficie de 52 por 38 km, y está situado a 25,6 grados de latitud sur, 27,4 grados de longitud este. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems, and U.S./Japan ASTER Science Team. | 93 |
| Figura 55. Death Valley, California. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems, and U.S./Japan ASTER Science Team. | 94 |
| Figura 56. Mina La Escondida (Chile). La imagen de la izquierda es un compuesto 3-2-1 RGB convencional. La imagen de la derecha muestra SWIR bandas 4-6-8 en RGB, y pone de relieve las diferencias litológicas y de alteración de las unidades de superficie. La imagen se encuentra en 24,3 grados de latitud sur y 69,1 grados de longitud oeste. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems, and U.S./Japan ASTER Science Team. | 95 |
| Figura 57. Pirineos (España). Las bandas 4, 3 y 2 se muestran en rojo, verde y azul. En esta combinación, la nieve es de color azul, la vegetación es, rocas desnudas verdes son de color rosa y azul oscuro, y las nubes son de color blanco. La imagen se encuentra en 42.6 grados de latitud norte y 0,6 grados de longitud este. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems, and U.S./Japan ASTER Science Team. | 96 |
| Figura 58. Cartografía de minerales. Fuente: Web: www.rs-geoimage.com | 97 |
| Figura 59. Cartografía de minerales. Fuente: Web: www.rs-geoimage.com | 97 |
| Figura 60. Cartografía de minerales. Fuente: Web: www.rs-geoimage.com | 98 |
| Figura 61. Caso: Quellaveco. Fuente: Web: www.rs-geoimage.com | 99 |
| Figura 62. Caso: Norte de Chile. Fuente: Web: www.rs-geoimage.com | 99 |
| Figura 63. Aplicación de realces. Fuente: Web: www.rs-geoimage.com | 100 |
| Figura 64. Análisis de firmas espectrales. Fuente: Web: www.rs-geoimage.com | 100 |
| Figura 65. Esquema del Subsistema. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team. | 101 |
| Figura 66. Características de las bandas de las imágenes LANDSAT. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team. | 102 |
| Figura 67. Comparación de la resolución espectral entre los sensores ALI y LANDSAT | 104 |



| | |
|---|-----|
| Figura 68. Comparación Ejemplos de imágenes ALI. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team..... | 104 |
| Figura 69. Comparación Cobertura de ALI en el sur del Perú. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team. | 105 |
| Figura 70. Comparación de firmas espectrales de la USGS remuestreadas a ALI y ASTER | 106 |
| Figura 71. Comparación Imágenes captadas por HYPERION a nivel mundial. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team..... | 107 |
| Figura 72. Comparación del tamaño de las escenas de LANDSAT y los sensores del satélite EO-1..... | 107 |
| Figura 73. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team. | 108 |
| Figura 74. Comparación Cobertura de imágenes HYPERION en el sur de Perú. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team. | 109 |
| Figura 75.PROCESAMIENTO Ejemplos de imagines HYPERION capturas en Perú. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems, and U.S./Japan ASTER Science Team..... | 110 |
| Figura 76. Comparación entre firmas de laboratorio de la USGS y las mismas remuestreadas a la imagen HYPERION. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team. | 111 |
| Figura 77.- Imagen del distrito de mina Cuprita, donde se muestra con bandas SWIR 4-6-8 como composición RGB. (Note: Area covered is 15 x 20 km) áreas de color rojo-rosa marcan rocas sobre todo opalizadas con caolinita y/o alunita; el área blanca es Playa Stonewall; áreas verdes son calizas, y las zonas color azul-gris son rocas volcánicas alteradas. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team. | 112 |
| Figura 78.-Clasificación espectral Angle Mapper de los datos Cuprita SWIR. (Nota: azul = caolinita; alunita rojo =; verde claro = calcita, de color verde oscuro = alunita + caolinita; cian = montmorillonita; púrpura = inalterado; amarillo = sílice o dickite) Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team. | 113 |
| Figura 79.-Los espectros de ASTER imagen (izquierda) y los espectros de la biblioteca (derecha) para los minerales cartografiados en Cuprita. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team..... | 114 |
| Figura 80. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team. | 114 |
| Figura 81. Extracción de Modelos de Elevación Digital. DEM elaborado a partir de las bandas 3N y 3B de ASTER. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team. | 116 |



Tabla de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Algunas de las misiones más conocidas a nivel mundial. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015. | 27 |
| Tabla 2.- Algunas de las misiones más conocidas a nivel mundial. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN Distribución de las bandas en OLI y TIRS. | 31 |
| Tabla 3. Ejemplo de niveles de procesado que establece la NASA para las imágenes Landsat 8. | 54 |
| Tabla 4. Bandas de ASTER. FUENTE: Aster Users Handbook | 56 |
| Tabla 5. Bandas de ASTER. FUENTE: Aster Users Handbook. | 85 |



1 INTRODUCCIÓN

Los ojos de los seres humanos se pueden considerar como sensores remotos ya que detectan la luz reflejada por los objetos de nuestro entorno. Sin embargo, la visión humana sólo es capaz de percibir una pequeña parte del espectro electromagnético, el visible. Por eso, los instrumentos para teledetección fuera de las longitudes de onda visibles representan realmente una extensión de nuestro campo visual y proporcionan acceso a información adicional sobre el mundo físico que nos rodea.

En los últimos tiempos, la Teledetección se ha configurado como una herramienta de indudable valor para el estudio de la superficie terrestre.

Son muchas las disciplinas que están haciendo uso de los datos capturados por los satélites artificiales para caracterizar los cambios que se producen en nuestro planeta.

En teledetección, lo normal es caracterizar a las ondas electromagnéticas por su longitud de onda medida en o nanómetros (nm), micrómetros (μm) o milímetros (mm). De esta forma quedan definidas varias regiones del espectro. Aunque por conveniencia se le asignan diferentes nombres a estas regiones (ultravioleta, visible, infrarrojo, microondas, etc.), no existen divisiones exactas entre unas y otras.

Los sensores montados a bordo de los satélites de teledetección son capaces de detectar y grabar radiaciones de las regiones del espectro electromagnético, desde el ultravioleta hasta las microondas.

El sensor captura la energía que refleja la Tierra procedente del sol, la discretiza y almacena y la transmite a una estación de recepción y procesamiento en la Tierra donde los datos se convierten en imágenes digitales. La imagen procesada se interpreta, visualmente y/o digitalmente, para extraer información acerca de los objetos que fueron iluminados.

El paso final del proceso de teledetección consiste en aplicar la información extraída de la imagen para conseguir un mejor conocimiento de la zona de estudio, revelando nuevas informaciones o ayudándonos a resolver un problema particular.

Vamos a resumir las características de la fuente de iluminación utilizada en la teledetección óptica, que como ya hemos dicho se trata de radiación electromagnética procedente del sol, para que se entiendan mejor los siguientes apartados.



La energía del sol o energía electromagnética se transmite por el espacio a través de ondas con una velocidad, que en el vacío, es de 300.000 Km/s.

Una onda electromagnética resulta de la propagación simultánea en el espacio de un campo eléctrico (E) y otro magnético (M) variables.

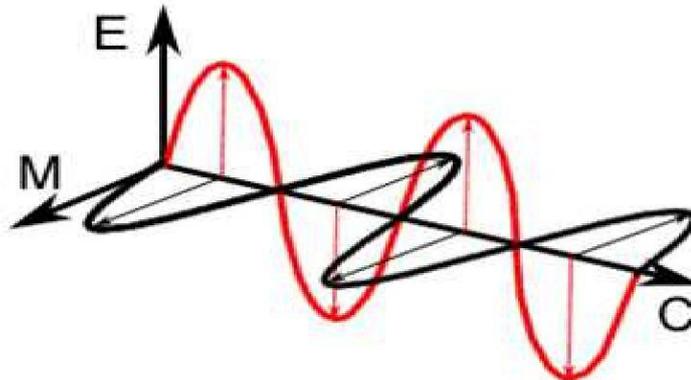


Figura 1.- Esquema de una onda electromagnética. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015

Los parámetros que definen cada tipo de onda son: la amplitud (A), la longitud de onda (λ) y la frecuencia (F). La amplitud es la distancia desde el punto más alto de la onda (pico) hasta la base de la onda (eje horizontal de equilibrio), se mide en voltios/metro. La longitud de onda se define como la distancia entre dos picos contiguos de la onda, midiéndose en unidades de longitud. La frecuencia es el número de ciclos por unidad de tiempo que pasan por un punto fijo y se mide en hercios (Hz).

Cuando la onda se propaga a velocidad constante, existe una relación inversamente proporcional entre longitud de onda y frecuencia, es decir, a mayor frecuencia menor longitud de onda y viceversa. Ya que la velocidad de propagación es la misma para todos los tipos de energía electromagnética, se cumplirá siempre que la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia.

$$C = \lambda \cdot F$$

C = velocidad de la luz (3×10^8 m/s)

λ = longitud de onda (m)

F = frecuencia (1/s)

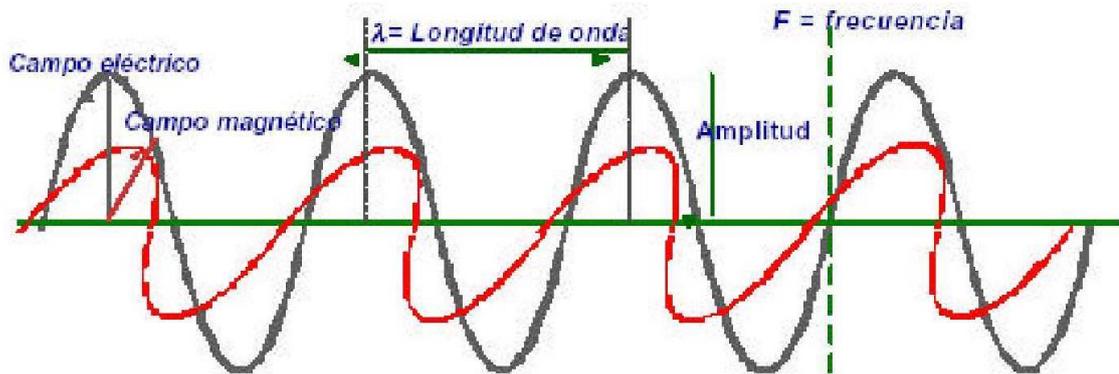


Figura 2.- Parámetros de una onda. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015

Tanto la longitud de onda como la frecuencia permiten clasificar los diferentes tipos de energía electromagnética, recibiendo todos, en conjunto, el nombre de espectro electromagnético, y recibiendo denominaciones particulares cada una de las porciones del mismo (ultravioleta, visible, infrarrojo...).

La emisión y reflexión térmica radiómetro espacial avanzado (ASTER) sensor es parte de cinco sistemas de sensores a bordo de Terra. Terra es un satélite que fue lanzado el 18 de diciembre de 1999 a las Vandenberg Air Force Base, California, EE.UU.. ASTER es único, ya que ofrece casi simultánea capturar de imágenes estéreo, minimizando los cambios temporales y errores de modelado sensor. Se utiliza sus datos en una amplia gama de aplicaciones relacionadas con el cambio global, incluyendo la vegetación, geología y suelos, la climatología y la creación de modelos de elevación digital.

ASTER tiene 14 bandas de información que consiste en visible infrarrojo cercano (VNIR), infrarrojo de onda corta (SWIR) y el infrarrojo térmico (TIR). PCI Geomática apoya 1A y 1B ASTER Nivel de datos en .HDF formato. Aunque ambos formatos son compatibles se recomienda el uso del nivel 1A para obtener el la más alta precisión.

El siguiente tutorial muestra cómo procesar los datos ASTER en Geomatica Focus antes de utilizarla en la corrección atmosférica (ATCOR) GUI. Los siguientes pasos se deben tomar para que el ATCOR Interfaz gráfica de usuario para rellenar automáticamente con todos los metadatos correctos importados de los datos ASTER



1.1 Objetivos del Trabajo Fin de Master

Este TFM está orientado a introducir las nociones básicas y los fundamentos científicos de la teledetección, así como las aplicaciones de ésta en un sentido amplio y con perspectivas de futuro. Además se hará una introducción a las técnicas informáticas habituales mediante la utilización de software de dominio público.

El objetivo de este proyecto es realizar un análisis de los datos obtenidos a partir de las imágenes del sensor ASTER recogidas del satélite TERRA desde la página web del USGS y procesadas mediante programas de tratamiento GIS, con la aplicación final destinada a la exploración geológica y minera así como el desarrollo de recursos naturales.

Otros objetivos son:

- Adquirir conocimientos sobre la teledetección espacial, los fundamentos físicos, los sensores y misiones existentes y los productos terrestres, atmosféricos y marinos que pueden obtenerse.
- Conocer las diversas fuentes de datos disponibles para la obtención de imágenes.
- Conocer y manejar adecuadamente las principales herramientas software existente.
- Adquirir conocimientos sobre las técnicas de tratamiento digital de imágenes de teledetección orientadas a la mejora y extracción de la información de interés para cada aplicación.
- Adquirir las capacidades y habilidades para la generación de productos y servicios de teledetección y para la extracción de la mayor cantidad de información de las imágenes procedentes de satélites de observación de la Tierra.

1.2 Estructura

El documento se compone de una primera parte de introducción, unos antecedentes y fundamentos teóricos en los que se engloba el marco histórico y la situación actual de la teledetección, ventajas y aplicaciones, principios físicos, plataformas de observación, procesamiento digital de las imágenes, el uso de la teledetección radar, distribución de la información, para finalizar con un caso práctico de aplicación a la zona de Asturias y de Ayoluengo (Burgos), un análisis del coste que tendría la implantación de este sistema en una empresa, y las conclusiones extraídas a la finalización del proyecto.



En primer lugar, con carácter teórico, se introduce la teledetección históricamente, para dar una visión global de la evolución de sus aplicaciones y los diversos campos en los que está presente; también se hace hincapié en la influencia de la tecnología de cada época en las técnicas de teledetección usadas, sobre todo en nuestra época de nuevas tecnologías o tecnologías digitales. Los fundamentos del procesamiento digital de imágenes se presentan de manera intuitiva, sin entrar en formulaciones matemáticas o informáticas complicadas. Las bases científicas de los dispositivos sensores y los parámetros que determinan qué se puede observar con éstos y cómo se interpreta lo observado, se dan a continuación. Estos conocimientos son suficientes para la realización del primer trabajo práctico, que introduce a las herramientas informáticas de procesamiento e interpretación de imágenes y da un ejemplo sencillo de una medida hecha a través de una imagen de satélite.

En la segunda parte, de aplicación práctica, se explica el uso del programa Grass, un SIG adaptado para teledetección. Los campos más actuales en los que se usa la teledetección y algunas aplicaciones de futuro y menos conocidas se presentan, que sirven para fijar, mediante ejemplos, los conceptos introducidos en la primera parte. El uso del programa Grass para hacer un análisis visual básico e interpretación de unas imágenes de satélite, utilizando los conocimientos adquiridos en la parte de aplicaciones, constituye la parte aplicada.



1.3 Metodología

Esta consistió en el aprendizaje del manejo de los programas que se van a emplear en el procesamiento de las imágenes y la búsqueda de las mejores composiciones y métodos para este fin.

La metodología del TFM es teórico-práctica.

La parte teórica consta del estudio, por parte del alumno de los conocimientos básicos de física y de procesamiento de imágenes necesarios para comprender el proceso de adquisición, restauración, visualización, medida e interpretación presentes en todo proceso de teledetección.

La parte práctica consistirá en la realización de un trabajo práctico que le introducirá al procesamiento de imágenes de teledetección. En este trabajo empleará un programa genérico (y, por ello, sencillo) de procesamiento de imágenes digitales. El trabajo práctico deberá incluir una explicación del procedimiento guiado, en términos de lo estudiado en la parte teórica.

- La parte teórica consta del estudio, por parte del alumno de algunas aplicaciones de la teledetección a las ciencias, principalmente aquellas relacionadas con el medio ambiente. Esta parte teórica es introductoria, pero servirá para que el alumno fije conceptos introducidos en la primera parte y le dará pie para buscar más información en las direcciones de Internet que se recomiendan.
- La parte práctica consistirá en la realización por el alumno de una práctica con un programa GIS apto para teledetección: Grass. Gran parte de la práctica consistirá en familiarizarse con conceptos de los GIS como son la gestión de ficheros, la organización de bases de datos y la visualización y fusión por capas. El resto de la práctica consistirá en el análisis e interpretación de una imagen multispectral del satélite Landsat. La discusión del análisis se podrá hacer en términos de lo tratado en la parte teórica.



1.4 Fuentes de información

Las fuentes de información se basaron en la búsqueda a través de internet y en bibliotecas de informes sobre proyectos previos, estudio de libros y la ayuda incluida en los programas a utilizar.

1.5 Créditos

Algunas de las imágenes han sido obtenidas de las páginas web de soporte del proyecto ASTER, como NASA/METI/AIST/Japan Space Systems, and U.S./Japan ASTER Science Team.

Desde el 1 de abril de 2016 todos los productos de datos ASTER ya están disponibles sin costo alguno para todos los usuarios. En un anuncio conjunto por los EE.UU. y Japón, todo el archivo ASTER se abrió al público. Cualquier escena, y todos los productos derivados, se pueden solicitar por cualquier persona.



2 ANTECEDENTES

La teledetección es la técnica para detectar objetos terrestres a distancia. Para hacer teledetección se necesita un sensor que sea capaz de registrar radiación electromagnética de la superficie de la Tierra, los objetos terrestres a teledetectar y el instrumento portador de ese sensor. La técnica de teledetección también incluye todo el trabajo realizado a posteriori con esas imágenes, es decir, su procesamiento e interpretación.

Cuando el sensor encargado de detectar los objetos viaja a bordo de un satélite hablamos de teledetección espacial, si captura información desde un avión se habla de teledetección aerotransportada y también se puede hacer teledetección con sensores a bordo de otros instrumentos: avionetas, aviones no tripulados o teledirigidos o colocando el sensor en una plataforma elevada del suelo (radiómetros de superficie).

La teledetección aeroportada es conocida como fotogrametría o técnica de obtener imágenes de la tierra a partir de sensores a bordo de aviones tripulados. Esta técnica puede ser considerada un caso particular de teledetección, y comenzó medio siglo antes que la teledetección espacial.

El LIDAR es también una forma de teledetección mediante sensores activos que emiten rayos láser y recogen la información que vuelve al rebotar el rayo en los distintos objetos.

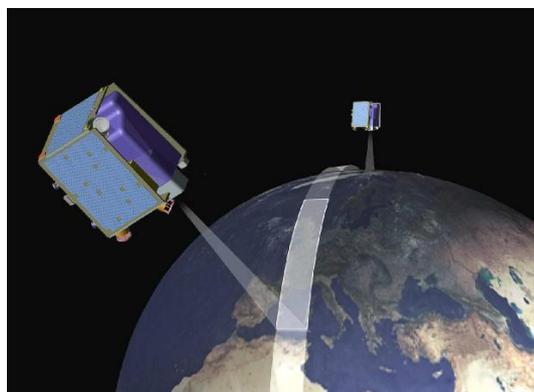


Figura 3- Representación de la teledetección espacial. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015



Figura 4 - Diversas posibilidades de teledetección Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015. Teledetección desde helicóptero. Teledetección terrestre, no tripulado.

2.1 Plataformas de observación de la Tierra.

Los satélites de observación de la Tierra varían en función de varios aspectos: el tipo de órbita que describen, los instrumentos de medición que llevan a bordo y, en cuanto al sensor de generación de imágenes, la resolución espacial, las características espectrales y el ancho de franja de captura. Todos estos parámetros se definen al principio de la misión dependiendo de la aplicación a la que se vaya a destinar el satélite.

Para monitorizar la meteorología a gran escala y alta frecuencia temporal, es conveniente que el satélite se sitúe en una órbita geoestacionaria. En esa órbita (a unos 35.900Km de altitud), el satélite tiene una visión constante de casi un hemisferio entero de la Tierra. Por el contrario estas órbitas están muy alejadas de la superficie terrestre y resulta difícil obtener una resolución espacial elevada. Aunque para algunas aplicaciones, como el seguimiento de nubes sobre los continentes, no se requiere una gran resolución espacial. En las aplicaciones que requieren imágenes de alta resolución de una zona específica, como la monitorización del lago de un glaciar o la captación de los edificios destruidos por un terremoto, es necesario utilizar un sensor de alta resolución. Normalmente, un sensor de ese tipo captura una franja estrecha y se encuentra en un satélite de órbita terrestre baja (a unos 700 km de la Tierra), para poder obtener imágenes de hasta 50 cm de tamaño de píxel. Desde esa órbita no se puede monitorizar continuamente la misma zona debido al movimiento relativo del satélite respecto a la Tierra.



2.1.1.1 Tipos de órbitas

Cuando se lanza un satélite puede permanecer en la misma órbita durante muchos años, ya que la fuerza de gravedad de la Tierra contrarresta a la fuerza centrífuga y esto permite que el satélite siga una inercia. Como los satélites tienen su órbita fuera de la atmósfera, no les afecta la resistencia del aire, por lo que, de acuerdo con la ley de la inercia, la velocidad del satélite es constante.

La atracción gravitatoria disminuye al alejarnos de la Tierra, mientras que la fuerza centrífuga aumenta al incrementarse la velocidad orbital. Por lo tanto, un satélite en una órbita baja (unos 700 km o menos de la superficie terrestre) se expone a una inmensa atracción gravitacional y debe moverse a gran velocidad para generar una fuerza centrífuga correspondiente. Existe una conexión directa entre la distancia a la Tierra y la velocidad orbital del satélite. Hay dos tipos de órbitas donde se colocan los satélites de observación de la tierra:

2.1.1.1.1 Órbitas geoestacionarias o geosíncronas

A mucha mayor distancia de la Tierra, unos 35.900 Km, los satélites necesitan menos velocidad para estar en órbita y la velocidad que se necesita para el equilibrio orbital coincide exactamente con la velocidad de rotación de la tierra. Es decir que a esa distancia, un satélite sobre el ecuador está estacionario con respecto a la Tierra, estará siempre sobre el mismo punto, ya que el tiempo que se tarda en realizar una órbita completa es de 24 horas, lo que corresponde al tiempo de rotación de la Tierra.

Un satélite geoestacionario aporta por tanto la ventaja de que siempre ve la Tierra desde la misma perspectiva, por lo que puede registrar la misma imagen a breves intervalos de tiempo. Esto es particularmente útil para observar las condiciones meteorológicas. También tiene la ventaja, al estar en una órbita lejana, de que puede tomar una imagen completa de todo el disco de la Tierra (parte de la Tierra que se ve desde un punto del espacio).

Un inconveniente de las órbitas geoestacionarias es la gran distancia a la Tierra, que reduce la resolución espacial que se puede lograr. Existen varios satélites meteorológicos distribuidos regularmente sobre la órbita geoestacionaria, cubriendo todo el mundo y



proporcionando una visión global. También estas órbitas son empleadas por muchos de telecomunicaciones, incluidos los de televisión.

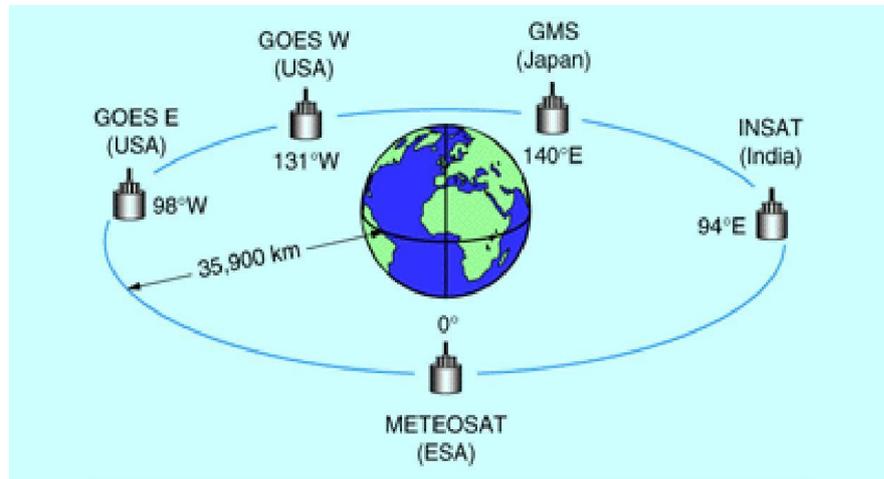


Figura 5.-Satélites en órbitas geoestacionarias. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015

2.1.1.1.2 Órbitas heliosíncronas

Son órbitas polares o cuasi polares (casi pasan por los polos). Muchos satélites que giran alrededor de la Tierra están equipados con sistemas de sensores pasivos que dependen de la iluminación solar. Al ir midiendo la reflexión de la luz solar procedente de la Tierra se deben ajustar sus órbitas al ritmo del día y de la noche. Esto es importante para poder comparar imágenes registradas a lo largo de un periodo de tiempo. Si se van a utilizar para realizar comparaciones, las condiciones de luz deben ser idénticas. Los registros deben tener lugar a la misma hora local del día para que la altitud del Sol sobre el horizonte sea la misma, y el plano de la órbita del satélite debe permanecer a un ángulo constante a la luz del Sol. Estos prerequisites pueden cumplirse situando el satélite en una órbita polar o heliosíncrona.

Al girar el satélite en su órbita, la Tierra gira sobre su eje. Cada vez que el satélite completa una vuelta se escanea una nueva franja de la superficie de la Tierra y, pasado un cierto número de vueltas, se habrá obtenido toda la superficie de la Tierra. Algunos satélites escanean una franja ancha cada vez y pueden de este modo cubrir la totalidad de la superficie de la Tierra en unas pocas vueltas. Por contra, los satélites de alta resolución que escanean sólo tiras finas tardan varios días en completar la cobertura de la Tierra.



Figura 6.-Satélite en órbita heliosíncrona. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015

2.1.1.2 Tipo de sensores

En teledetección, el dispositivo utilizado para adquirir imágenes se suele denominar “sensor”. La clasificación general de los sensores de observación de la Tierra se realiza atendiendo a la forma de “trabajar” para registrar la radiación electromagnética. Según esto tenemos:

- Sensores pasivos: se llaman así porque no emiten ningún tipo de radiación, solo capturan la información procedente de la radiación solar que refleja la Tierra o que emiten los propios objetos terrestres.
- Sensores activos: se llaman así porque emiten ellos mismos la radiación electromagnética que se refleja en los objetos y miden la energía que se devuelven reflejada al sensor (proceso de escaneo de la superficie terrestre).

Los sensores pasivos se clasifican según del número de bandas o canales espectrales de las imágenes adquiridas:



- Sensores pancromáticos: capturan información en una sola banda, normalmente en el rango entre la radiación visible y el infrarrojo próximo. Las imágenes obtenidas se visualizan en escala de grises.
- Sensores multispectrales: capturan información en varias bandas, asignando una banda para cada rango del espectro electromagnético del que pueden capturar información.
- Sensores hiperespectrales: cuando el número de bandas en el que capturan información es muy elevado, llegando a varias centenas, se habla de sensores hiperespectrales. Hoy en día son los menos numerosos a bordo de satélites pero su número se está incrementando debido a la creciente demanda de este tipo de imágenes.

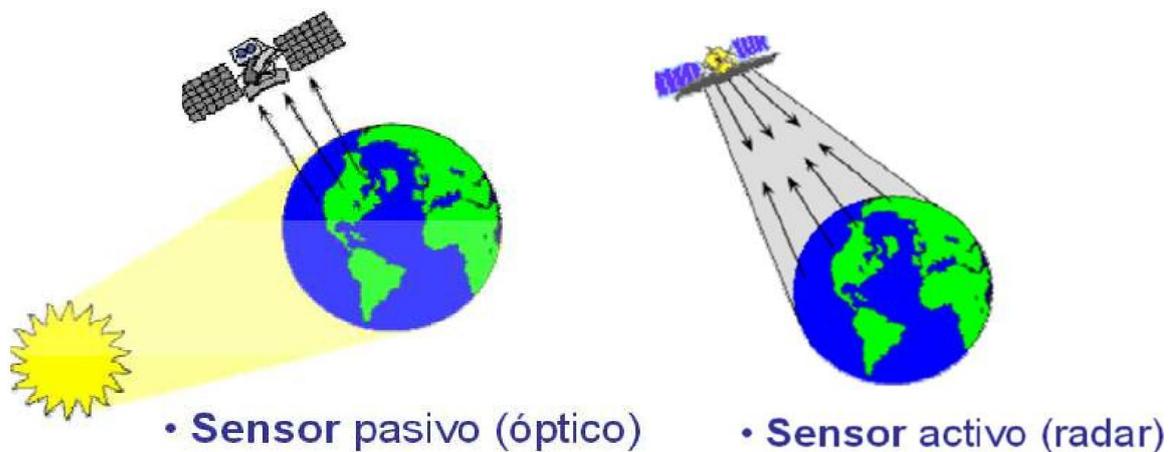


Figura 7.- Tipos de sensores. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015

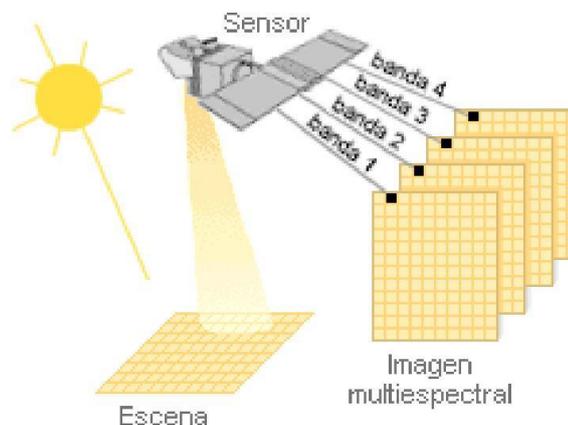


Figura 8.- Formación de una imagen con sensor multispectral. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015



Los sensores activos se clasifican dependiendo de la longitud de onda en que trabajan. Para trabajos de teledetección se distinguen dos tipos de sensores activos:

- sensores RADAR (RADio Detection And Ranging) en el rango de las microondas.
- sensores LIDAR (LigHt Detection and Ranging) emite pulsos de luz polarizada entre el ultravioleta y el infrarrojo cercano.

Los sensores LIDAR permiten obtener mayor detalle en la observación que los sensores RADAR porque trabajan con longitudes de onda más pequeñas pero, por el contrario, el láser no puede atravesar las nubes. Los sensores LIDAR no se utilizan en teledetección espacial, se colocan a bordo de aviones.

2.1.2 Programas nacionales e internacionales de observación de la tierra.

En este apartado vamos a hablar de las iniciativas públicas más importantes que existen a nivel mundial, europeo y nacional para observación de la Tierra desde el espacio.

Actualmente existe una iniciativa a nivel mundial conocida por las siglas GEO (Group on Earth Observations) cuyo objetivo es proveer a todos los países miembros con datos de la Tierra de alta calidad, fácilmente accesibles, en tiempo real, y de forma continuada, así como sus metadatos y productos derivados que puedan aportar información para ayudar a los gobiernos en la toma de decisiones.

España participa en esta iniciativa desde el comienzo a través de AEMET (Agencia Estatal de Meteorología).

De momento GEO está en fase de organización, no hay nada operativo todavía.

Como iniciativa europea más importante en cuanto a la observación de la Tierra hay que hablar del programa COPERNICUS, dentro del cual se están desarrollando la serie de satélites SENTINEL.

El Sentinel 1 está equipado con un sistema RADAR a bordo y se lanzará muy probablemente en abril de 2014. El par de satélites gemelos Sentinel 2 que llevarán a bordo un sensor óptico multiespectral con 13 bandas espectrales, con 10 metros de resolución geométrica



en 4 de ellas y un periodo de revisita de 5 días en zonas cercanas al Ecuador y de 2 a 3 días en latitudes medias; su lanzamiento está previsto para el año 2015.

El Sentinel 3 que irá equipado con dos sensores ópticos de baja resolución geométrica (entre 300 y 1 Km dependiendo de la banda) pero buena resolución espectral y periodo de revisita menor de 2 días. Los Sentinel 4 y 5 están previstos para el 2020.

Las iniciativas españolas para observación de la Tierra se enmarcan dentro del PNOT (Plan Nacional de Observación del Territorio). Los programas más importantes dentro de esta Plan nacional que se llevan a cabo son:

- El PNT (Plan Nacional de Teledetección) cuyo objetivo es aunar esfuerzos entre todas las Administraciones Públicas españolas para la adquisición conjunta de coberturas para España con imágenes de satélite y los posteriores procesamientos necesarios que los usuarios puedan utilizar estas imágenes en sus distintos proyectos.
- El PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) cuyo objetivo es similar al PNT pero adquiriendo imágenes desde sensores a bordo de aviones, que tienen también un amplio campo de aplicaciones.
- El desarrollo de los satélites PAZ e INGENIO. El Ministerio de Defensa junto con el Ministerio de Industria firmaron en 2007 un acuerdo para el desarrollo, financiación, puesta en órbita y explotación de 2 satélites españoles dentro del programa PNOTS (Plan Nacional de Observación del Territorio por Satélite), un satélite denominado INGENIO, con sensores ópticos a bordo, gestionado por el CDTI o Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial y orientado principalmente a usuarios civiles. Proporcionará imágenes pancromáticas con 2,5 m de tamaño de píxel y multiespectrales de 10 metros de píxel. Según su periodo de revisita, podrá realizar ocho coberturas anuales completas de todo el territorio español y su lanzamiento está previsto para el año 2018.



Figura 9.- Dibujo del satélite Ingenio orbitando en el espacio. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015.

Otro satélite denominado PAZ, dotado de un sistema radar SAR, que es gestionado por el Ministerio de defensa. Este satélite responderá en mayor medida a requisitos de seguridad y defensa aunque cuenta con una capacidad de utilización dual (militar y civil). Su lanzamiento está previsto para el año 2016.



Figura 10.- Imágenes del satélite PAZ en construcción. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015

2.1.3 Principales Misiones de Observación de la Tierra

El año que simboliza la entrada de la teledetección en la era moderna es 1957 con el lanzamiento del satélite Sputnik, primer satélite artificial puesto en órbita alrededor de la Tierra por la Unión Soviética. La observación sistemática de la Tierra desde el espacio se inicia el año 1960 con el lanzamiento del satélite TIROS-I, primer satélite meteorológico con una cámara de



televisión de baja resolución, que permitía a los meteorólogos discriminar entre nubes, agua, hielo y nieve. La familia de satélites TIROS, rebautizados como NOAA a partir de 1970, sigue todavía en actividad



Figura 11 - Satélite Spútnik (Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015).

En 1969, el vuelo tripulado Apolo 9 realizó la primera toma de fotografía orbital multiespectral para el estudio de los recursos terrestres.

Los resultados obtenidos en el estudio de recursos naturales terrestres con los datos de los primeros satélites meteorológicos y las misiones espaciales tripuladas, impulsaron el desarrollo por la NASA del programa ERTS (Earth Resources Technological Satellite) conocido también como constelación LANDSAT.

LANDSAT 1 fue el primer satélite específicamente dedicado a teledetección. Fue puesto en órbita por el gobierno norteamericano en julio de 1972 y estuvo operativo hasta principios de 1978. El último de esta constelación, el LANDSAT 8 se lanzó al espacio en febrero de 2013.

A raíz de los datos suministrados por los satélites LANDSAT, muchos países decidieron disponer de sus propios satélites para observación de la Tierra. Algunos ejemplos son: Francia con la constelación de satélites SPOT, Canadá con el RADARSAT, Japón con la serie de satélites ALOS, India con los IRS, la Unión Europea con la constelación de METEOSAT, etc.

Actualmente el gobierno español, en el marco del Plan Nacional de Observación de la Tierra, está desarrollando 2 satélites propios bajo la coordinación y liderazgo de los Ministerios de Industria y Defensa:



Satélite PAZ que llevará a bordo un sistema RADAR de teledetección y será mayoritariamente para uso militar aunque también se distribuirá imágenes para uso civil. Su lanzamiento está previsto para finales de este año 2014.

Satélite INGENIO, que llevará a bordo sistemas ópticos de teledetección y tendrá un uso civil. Su lanzamiento está previsto para finales del año 2015.



Figura 12 - Dibujo del satélite PAZ en órbita Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015

Hoy en día, hay permanentemente en órbita decenas de satélites de observación de la Tierra que generan miles de imágenes cada día para aplicaciones de uso civil y militar.

De acuerdo con los datos de la NASA (agencia gubernamental norteamericana para la administración del espacio), a fecha de agosto de 2013, existen alrededor de 3.000 satélites operativos orbitando alrededor de la Tierra de los cuales más de una centena están dedicados a la observación de la Tierra desde el espacio o teledetección espacial con distintos objetivos y escalas.



Tabla 1. Algunas de las misiones más conocidas a nivel mundial. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015.

| Satélite | País | Órbita | Sensor | Uso |
|------------------|-------------------------------|----------------------|---------------|---------------------------------|
| LANDSAT | Norteamérica (NASA) | Heliosíncrona | Óptico | I.Geográfica y ambiental |
| SPOT | Francia (CNES) | Heliosíncrona | Óptico | I.Geográfica y ambiental |
| RAPID-EYE | Alemania | Heliosíncrona | Óptico | I.Geográfica y ambiental |
| CBERS | China y Brasil | Heliosíncrona | Óptico | I.Geográfica y ambiental |
| WORLDVIEW | Estados Unidos (DigitalGlobe) | Heliosíncrona | Óptico | I.Geográfica y ambiental |
| DEIMOS | España (Deimos Imaging) | Heliosíncrona | Óptico | I.Geográfica y ambiental |
| METEOSAT | Europa (ESA) | Geosíncrona | Óptico | Meteorología |
| GOES | Norteamérica (USNWS) | Geosíncrona | Óptico | Meteorología |
| COSMO-SKY | Italia | Heliosíncrona | Radar | Militar y civil |
| ALOS | Japón | Heliosíncrona | Radar | Militar |
| RADARSAT | Canadá | Heliosíncrona | Radar | Militar y civil |
| TERRASAR-X | Alemania | Heliosíncrona | Radar | Militar y civil |

2.1.3.1 El programa SPOT

La constelación Spot son una serie de satélites desarrollados por el CNES (Centro Nacional de Estudios Espaciales Francés) para la monitorización de la superficie terrestre. Su órbita alrededor de la Tierra es heliosíncrona, casi polar y circular, a 822 km de altura.

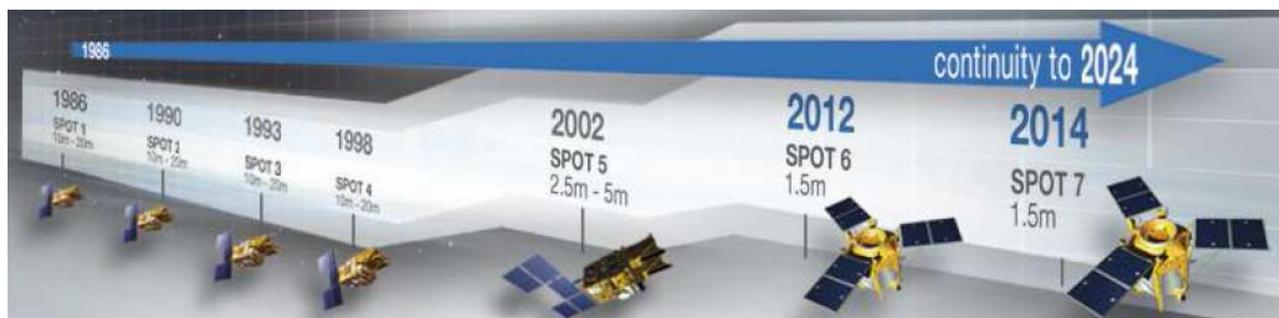


Figura 13.- Constelación de satélites SPOT. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015.



El primer satélite de la serie, el Spot 1, se lanzó al espacio en 1986; el siguiente el Spot 2 en 1990, el Spot 3 en 1993, el Spot 4 en 1998, el Spot 5 en 2002, y el último lanzado fue el Spot 6, en 2013. Los tres últimos siguen en funcionamiento, con un periodo de revisita sobre el mismo punto de entre 3 y 26 dependiendo del ángulo de inclinación de satélite al tomar la imagen. Conjuntamente permiten la observación diaria de, prácticamente, cualquier punto del globo terráqueo con una resolución de diez metros.

El SPOT 5, lleva a bordo un sensor de alta resolución que captura 2 imágenes pancromáticas simultáneas con una resolución de 5 metros que convierten a 2,5 metros en postproceso y otro sensor estereoscópico de alta resolución que genera maquetas digitales en relieve.

El Spot 6 ofrece una resolución espacial pasa de 1,5 m con SPOT 6, lo cual aumenta considerablemente el nivel de detalle. Cuando lancen SPOT 7, pondrán ofrecer servicios como la periodicidad diaria de las imágenes para cada punto del globo. La constelación SPOT garantiza de esta manera la continuidad de los productos de alta resolución y amplia cobertura hasta el 2024.

2.1.3.2 El programa RAPID EYE

La constelación Rapid Eye son una serie de 5 satélites idénticos lanzados en agosto de 2008 y desarrollados por MacDonald Dettwiler (MDA) para la compañía alemana Rapid Eye. Todos orbitan alrededor de la Tierra en órbita heliosincrónica, con una inclinación de 97.811 respecto del Ecuador, a 630 km de altura, y con un período de revisita diario entre los 5 satélites. Capturan imágenes con una resolución espacial de 6.5 metros.

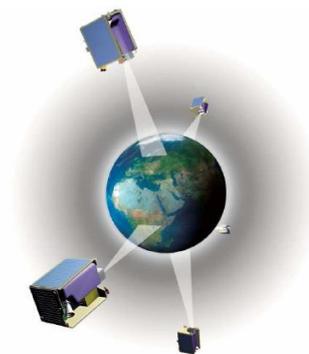


Figura 14.- Constelación de satélites Rapid Eye. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015



2.1.3.3 El programa CBERS

El Programa CBERS, desarrollado en virtud de la cooperación entre China y Brasil, es un importante y muy útil proveedor de datos para ambos países y sus vecinos, y también para África. La órbita de los satélites CBERS es circular, heliosincrónica, cuasi-polar, a 744 km de altitud, y con 98,311 de inclinación con respecto al Ecuador.

El primer satélite, CBERS-1, se lanzó en 1999. El segundo satélite CBERS-2 se lanzó cuatro años más tarde, en 2003. El tercero de la serie, el CBERS-2B fue lanzado con éxito en e 2007.

La segunda generación CBERS se compone de los satélites CBERS-3 y -4. El CBERS-3 falló en su lanzamiento el año pasado, y el CBERS-4 está previsto ser lanzado en diciembre de este año 2014.

Actualmente, todos los datos CBERS recogidos en Cuiaba, la estación en tierra brasileña, se distribuyen gratuitamente vía Internet: www.dgi.inpe.br/CDSR.

2.1.3.4 El programa LANDSAT

Los Landsat son una serie de satélites construidos y puestos en órbita por Estados Unidos para la monitorización de la superficie terrestre. Todos orbitan u orbitaban alrededor de la Tierra en órbita circular heliosincrónica, a 705 km de altura, y con una inclinación de 98.2º respecto del Ecuador. La órbita de los satélites está diseñada de tal modo que cada vez que éstos cruzan el Ecuador lo hacen de Norte a Sur sobre las diez de la mañana hora local. Los Landsat están equipados con sensores específicos para la teledetección multiespectral en el rango óptico del espectro electromagnético.

El primer satélite de la serie, el Landsat 1, se lanzó al espacio en 1972; el siguiente el Landsat 2 en 1975, el Landsat 3 en 1978, el Landsat 4 en 1982, el Landsat 5 en 1985, el Landsat 6 tuvo el lanzamiento fallido en 1993, el Landsat 7 en 1999, y el último de la serie, el Landsat 8, fue lanzado en febrero de 2013. Estos dos últimos siguen en funcionamiento, adquiriendo imágenes con un tamaño de pixel de 30 metros y un periodo de revisita sobre el mismo punto de la Tierra de 16 días cada satélite y desfasados 8 días entre ellos.

El programa Landsat ofrece la grabación de imágenes desde satélite más antigua y continuada en el tiempo. Durante más de 40 años los satélites Landsat han adquirido información



espectral de la superficie de la Tierra, creando un archivo de imágenes inigualable en todo el mundo en cuanto a antigüedad, continuidad, cobertura mundial y detalle.



Figura 15.- Satélite Landsat 8. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015

Hoy en día continúan adquiriendo imágenes los satélites: Landsat 7 y Landsat 8. La NASA lleva unos años con una política de distribución gratuita de imágenes Landsat. Se pueden descargar a través del catálogo de productos del USGS: <http://earthexplorer.usgs.gov/>

El satélite Landsat 8 incorpora dos instrumentos de barrido: *Operational Land Imager (OLI)*, y un sensor térmico infrarrojo llamado *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*.

Las bandas espectrales del sensor OLI, aunque similares a el sensor Landsat 7 ETM +, proporcionan una mejora de los instrumentos de las misiones Landsat anteriores, debido a la incorporación de dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible (banda 1), diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras, y un nuevo canal infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes cirrus. Adicionalmente una nueva banda de control de calidad se incluye con cada producto de datos generado. Esto proporciona información más detallada sobre la presencia de características tales como las nubes, agua y nieve.

Por otra parte el sensor TIRS recoge dos bandas espectrales en longitudes de onda incluidas por la misma banda en los anteriores sensores TM y ETM+.

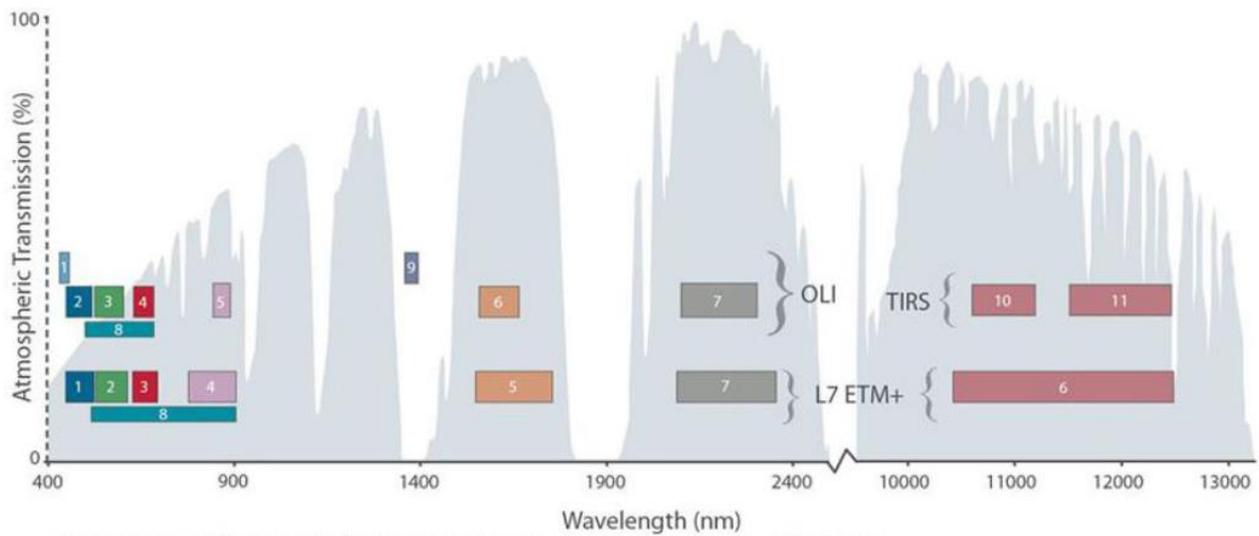


Figura 16.- Ancho de banda para los sensores OLI y TIRS en Landsat 8 y ETM+ en Landsat 7.

Tabla 2.- Algunas de las misiones más conocidas a nivel mundial. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN Distribución de las bandas en OLI y TIRS.

| Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) February 11, 2013 | Bandas | longitud de onda (micrómetros) | Resolución (metros) |
|---|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| | Banda 1 - Aerosol costero | 0.43 - 0.45 | 30 |
| | Banda 2 - Azul | 0.45 - 0.51 | 30 |
| | Banda 3 - Verde | 0.53 - 0.59 | 30 |
| | Banda 4 - Rojo | 0.64 - 0.67 | 30 |
| | Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR) | 0.85 - 0.88 | 30 |
| | Banda 6 - SWIR 1 | 1.57 - 1.65 | 30 |
| | Banda 7 - SWIR 2 | 2.11 - 2.29 | 30 |
| | Banda 8 - Pancromático | 0.50 - 0.68 | 15 |
| | Banda 9 - Cirrus | 1.36 - 1.38 | 30 |
| *Banda 10 - Infrarrojo térmico (TIRS) 1 | 10.60 - 11.19 | 100 | |
| *Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2 | 11.50 - 12.51 | 100 | |

Las bandas TIRS se adquieren a una resolución de 100 metros, pero se vuelven a remuestrear a 30 metros. La resolución espacial o nivel de detalle, es a menudo el aspecto más interesante de una imagen de satélite, pero menos apreciado y valorado es cómo se utilizan los cambios en la energía por irradiación reflejada por los materiales de superficie con el fin de lograr identificar las características de interés. Estos aspectos pueden identificarse gracias a la respuesta espectral relativa (RSR) de cada banda.



- Sensor *Operational Land Imager* (OLI). Este sensor avanza en la tecnología de sensores Landsat, utilizando un enfoque demostrado ya por el sensor *Advanced Land Imager* ubicado en el satélite experimental de la NASA Observing-1 (EO-1). En el comienzo los satélites Landsat estaban equipados con sensores "whiskbroom" los cuales empleaban espejos de exploración como instrumentos visión para barrer el campo espectral a través de un ancho de banda superficial y transmitir la luz a unos detectores. A diferencia del OLI, el cual utiliza un sensor del tipo "pushbroom" compuesto por una serie de baterías larga de detectores, con más de 7.000 detectores por banda espectral, alineados en su plano focal en su respectivo ancho de banda. El diseño del "pushbroom" lo hace un instrumento más sensible proporcionando una mejor información de la superficie terrestre con menos partes móviles. Sus imágenes tienen una resolución espacial de 15 m. pancromáticas y 30 m. (incluido el visible, infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta) a lo largo de 185 km. de ancho de imagen, cubriendo así amplias zonas de la tierra mientras que proporciona una resolución suficiente como para distinguir las características tales como centros urbanos, granjas, bosques y otros tipos de cubiertas del suelo. El OLI fue diseñado para tener una vida útil de cinco años y detectar las mismas bandas espectrales de los anteriores instrumentos del Landsat (es decir sensores, TM y ETM+).
- Sensor térmico infrarrojo (TIRS). Todo en la Tierra emite radiación térmica infrarroja, termino comúnmente conocido como calor. La física nos dice que la cantidad de la radiación emitida es proporcional a la temperatura del objeto. El sensor TIRS fue añadido a la carga útil del LDCM (Landsat Data Continuity Mission) cuando se hizo evidente que los gestores de los recursos hídricos se basaban en las mediciones de alta precisión de la energía térmica de la tierra obtenidas por los predecesores del LDCM (el TM del satélite Landsat 5 y Enhanced Thematic Mapper Plus ETM+ del Landsat 7) con el fin de hacer un seguimiento del uso de la tierra y el agua. La decisión de añadir el sensor TIRS se hizo después de que el diseño de la misión se había iniciado. Los ingenieros tenían menos de cuatro años para diseñar y construir TIRS por lo que recurrieron a una nueva tecnología desarrollada por la NASA llamada Quantum Well Infrared Photodetectors (QWIPs). Una de las diferencias más importantes entre las especificaciones del OLI y el TIRS es que TIRS sólo tiene una vida útil de tres años. Esta característica se especificó con el fin de ayudar a acelerar el desarrollo del TIRS.



Los sensores de Landsat 8 OLI y TIRS registran imágenes que constan de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros de Bandas 1 a 7 y 9.

La nueva banda 1 (ultra-azul) es útil para la costa y aerosoles estudios. La nueva banda 9 es útil para la detección de nubes tipo cirros. La resolución para banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas de la superficie más precisos y se recogen a 100 metros. El tamaño aproximado escena es de 170 km al norte-sur por 183 km al este-oeste.

| Bandas | Longitud de onda (micrómetros) | Resolución (metros) |
|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| Banda 1 Aerosol Costero | 0,43 a 0,45 | 30 |
| Banda 2 Azul | Desde 0,45 hasta 0,51 | 30 |
| Banda 3 Verde | 0,53-0,59 | 30 |
| Banda 4 Rojo | 0,64-0,67 | 30 |
| Banda 5 Infrarrojo Cercano (NIR) | 0,85-,88 | 30 |
| Banda 6 SWIR 1 | 1,57-1,65 | 30 |
| Banda 7 SWIR 2 | 02.11 a 02.29 | 30 |
| Banda 8 Pancromática | 0,50-0,68 | 15 |
| Banda 9 Nubes Cirrus | 1,36-1,38 | 30 |
| Banda 10 Infrarojo Térmico (TIRS) 1 | 10,60-11,19 | 100 * (30) |
| Banda 11 Infrarojo Térmico (TIRS) 2 | 11,50-12,51 | 100 * (30) |

El programa Landsat ofrece la grabación de imágenes desde satélite más antigua y continuada en el tiempo. Durante más de 40 años los satélites Landsat han adquirido información espectral de la superficie de la Tierra, creando un archivo de imágenes inigualable en todo el mundo en cuanto a antigüedad, continuidad, cobertura mundial y detalle.

Landsat 8 es un satélite de moderada resolución lanzado el 20 de Mayo del 2013 por el Servicio Geológico y la Agencia Espacial de los Estados Unidos (USGS y NASA). Este proporciona un recurso único para aquellos que trabajan en la agricultura, la geología, la silvicultura, la ordenación del territorio, la educación, la cartografía y la investigación del cambio global.

Hoy en día continúan adquiriendo imágenes los satélites: Landsat 7 y Landsat 8. La NASA lleva unos años con una política de distribución gratuita de imágenes Landsat. Se pueden descargar a través del catálogo de productos del USGS: <http://earthexplorer.usgs.gov/>

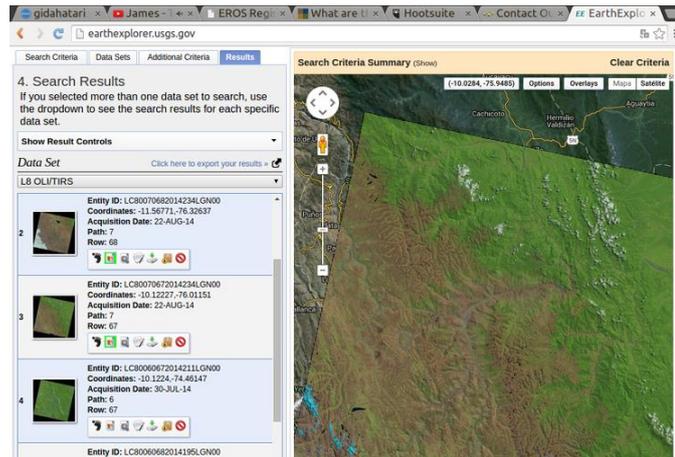


Figura 17.-Interfase de Earth Explorer para la descarga de imágenes de Landsat 8

2.1.3.5 Satélite Terra

TERRA (EOS AM-1) es un satélite multinacional de la NASA de investigación científica por satélite. Funciona en sincronía con la órbita del sol alrededor de la Tierra.

TERRA recopila datos acerca de los sistemas de bio-geoquímicos y de la energía de la Tierra utilizando cinco sensores que observan la atmósfera, la superficie terrestre, los océanos, la nieve y el hielo, y el balance de energía. Cada sensor tiene características únicas que permiten a los científicos satisfacer una amplia gama de objetivos de la ciencia. Los cinco sensores de a bordo Terra son:

- **ASTER** (espacial avanzado de emisiones térmicas y reflexión Radiométrica)
- **CERES** (Nubes y la Tierra, energía radiante del sistema)
- **MISR** (Multiángulo de imágenes espectralradiométricas.)
- **MODIS** (Imágenes de resolución moderada espectralradiométrica)
- **MOPITT** (Mediciones de la contaminación en la tropósfera)

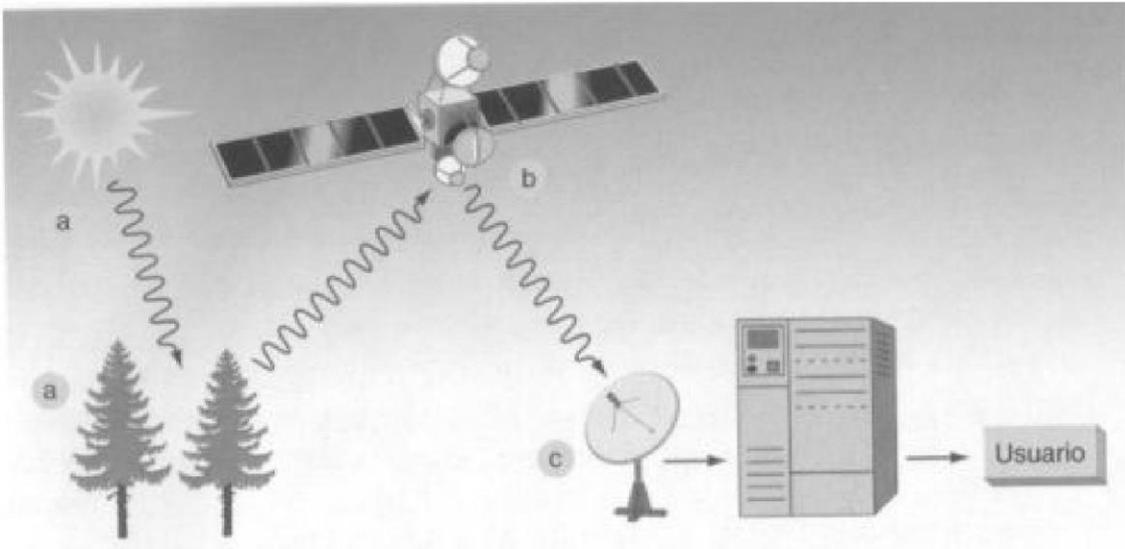
Debido a que los cinco instrumentos están en el mismo satélite hacen observaciones simultáneas, los científicos son capaces de comparar diferentes aspectos de las características de la Tierra a través del tiempo. (NASA)



3 PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA TELEDETECCIÓN

La luz visible es sólo una de las muchas formas de radiación electromagnética que existen. Así, las ondas de radio, el calor, los rayos ultravioleta o los rayos X son otras formas comunes.

3.1.1 Captura de la información



Figuran 18.- Los factores que intervienen en la formación de una imagen por teledetección, cuando se utilizan sensores pasivos.
Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015.

- a) Fuente de iluminación: en el caso de los sensores pasivos es el Sol.
- b) Sensor que registra la energía del sol reflejada por la superficie de la Tierra.
- c) Antena en Tierra para recepción de la información capturada por los sensores.
- d) Procesadores y software adecuados para el procesamiento y análisis de la información.
- e) Usuarios de los distintos productos obtenidos de los procesos anteriores.



3.1.2 El espectro electromagnético

Las radiaciones electromagnéticas más utilizadas en teledetección (según su longitud de onda) son:

- La radiación ultravioleta: la luz solar es la fuente principal de la radiación ultravioleta. La franja del UV más empleada en teledetección va desde 0,34 a 0,4 μm , y se utiliza fundamentalmente para aplicaciones oceánicas.
- El espectro visible: se llama así a la región del espectro comprendida entre 0,4 y 0,7 micrómetros aproximadamente. Es la única radiación electromagnética que el ojo humano puede percibir. Dentro del espectro visible se pueden distinguir tres franjas: el azul (de 0,4 a 0,5 μm), el verde (de 0,5 a 0,6 μm) y el rojo (de 0,6 a 0,7 μm).
- El infrarrojo cercano (NIR): se llama así a la región del espectro comprendida entre 0,7 y 1,3 micrómetros aproximadamente. Resulta de especial importancia para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad porque estas cubiertas tienen picos de reflectancia en este intervalo del espectro.
- El infrarrojo medio (SWIR): se llama así a la región del espectro comprendida entre 1,3 y 8 micrómetros aproximadamente. Resulta idóneo para estimar contenidos de humedad en la vegetación y para detección de focos de temperatura.
- El infrarrojo lejano o térmico (TIR): se llama así a la región del espectro comprendida entre 8 y 100 micrómetros aproximadamente. Detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.
- Las microondas: comprenden la región del espectro a partir de 1 mm hasta 1 metro. Se utilizan en teledetección porque es un tipo de radiación bastante transparente a las cubiertas nubosas, es decir, que atraviesa bastante las nubes.

Se suele llamar dominio óptico del espectro a toda la parte visible e infrarroja, puesto que es la parte que comúnmente capturan los sensores ópticos.

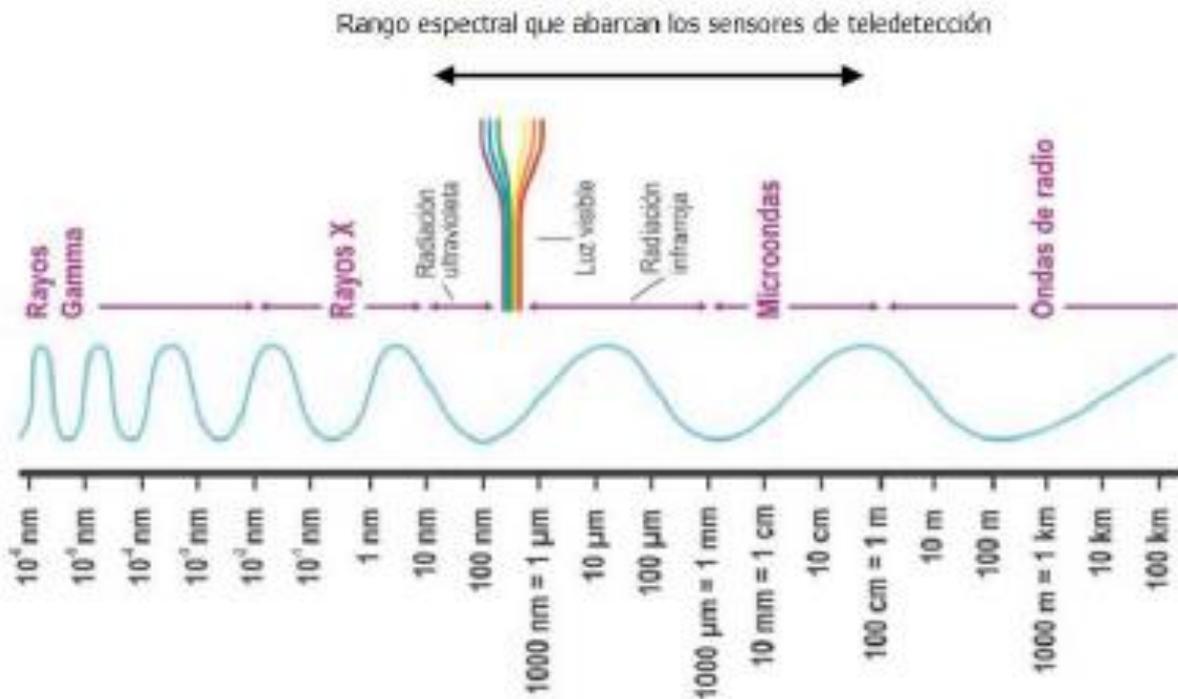


Figura 19.- Regiones del espectro electromagnético. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015

3.1.3 Comportamiento espectral de las cubiertas

Cuando la radiación procedente del sol (llamada radiación incidente) incide en las distintas cubiertas terrestres, puede ser reflejada por la superficie de la Tierra, puede ser transmitida, absorbida o dispersada.

La cantidad de energía que es reflejada, transmitida o absorbida por la superficie terrestre depende de la longitud de onda de la radiación incidente y de las características de cada cubierta (propiedades químicas, rugosidad, etc).

También los sensores reciben radiación electromagnética que emiten las distintas cubiertas terrestres en forma de energía térmica (infrarrojo térmico).

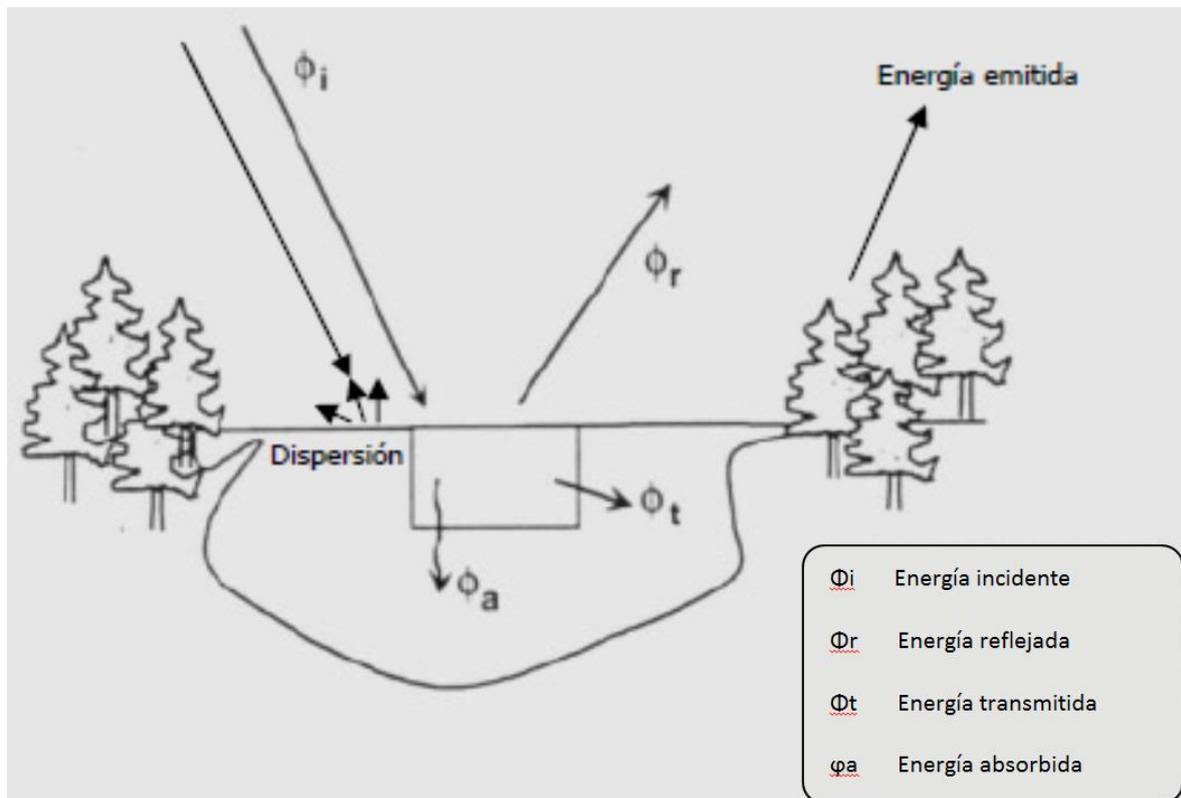


Figura 20.- Representación de los distintos tipos de comportamiento de la radiación solar. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015

A continuación vamos a describir más en detalle en qué consiste cada uno de los procesos citados.

- Transmisión: se produce cuando la radiación incidente traspasa una cubierta.
- Absorción: se produce cuando la radiación incidente ocasiona un calentamiento de la materia o cubierta, es decir que se produce una transformación energética. Es de carácter discreto con la longitud de onda.
- Emisión: la radiación también puede ser emitida por la materia, normalmente a longitudes de onda en el rango del infrarrojo térmico en función de su estructura y temperatura.
- Dispersión: se produce cuando la radiación incidente es dispersada en todas las direcciones. Producen dispersión las cubiertas cuya rugosidad es comparable a la longitud de onda de la energía incidente. Es de carácter continuo con la longitud de onda.
- Reflexión: se produce cuando la cubierta refleja o retorna la radiación incidente con un ángulo de reflexión aproximadamente igual y opuesto al ángulo de incidencia. Cuando toda o casi



toda la energía es reflejada en una dirección única se considera “reflexión especular”, pero si la energía es reflejada de forma uniforme en todas las direcciones se habla de “reflexión difusa”

Producen reflexión especular las cubiertas que se consideran lisas en relación con la longitud de onda de la radiación incidente, y reflexión difusa las superficies que se consideran rugosas.

Los sensores para observación de la Tierra, se diseñan para operar o capturar energía en las bandas (longitudes de onda) donde los efectos de la absorción atmosférica están menos patentes, estos intervalos del espectro se denominan ventanas atmosféricas.

En cambio el efecto de la dispersión es continuo con la longitud de onda, y no es posible evitarla de la misma manera, habrá que corregir este efecto en las imágenes posteriormente a la toma.

Cuando la energía del sol incide sobre una superficie, la fracción de energía que se refleja se denomina reflectividad o reflectancia (ρ), la fracción de energía que se absorbe se denomina absorptividad (α) y la que se transmite se denomina transmisividad (T). Según las relaciones del balance energético, se cumple que: $\rho + \alpha + T = E$ incidente.

La variable que más interesa en teledetección de las tres, es la reflectividad puesto que se puede calcular a partir de la energía reflejada que detectan los sensores ópticos. Además también interesa la propia energía térmica que emiten las cubiertas terrestres.

La energía reflejada se puede cuantificar midiendo la porción de energía incidente que es reflejada y que depende o es función de la longitud de onda de la radiación incidente y se denomina reflectancia o reflectividad espectral.

Por tanto la reflectancia espectral se define como el cociente entre la radiación reflejada por una cubierta y la radiación incidente, estando en función de la longitud de onda.

$$R = R \text{ incidente} / R \text{ reflejada}$$

Siendo R incidente, la parte de radiación procedente del sol que incide en la superficie de la Tierra y R reflejada, la parte de radiación que refleja esta superficie.



La reflectividad es característica de cada tipo de cubierta y permite diferenciarla de otras, y a partir de esta variable se podrán elaborar las firmas espectrales para cada material que veremos más adelante.

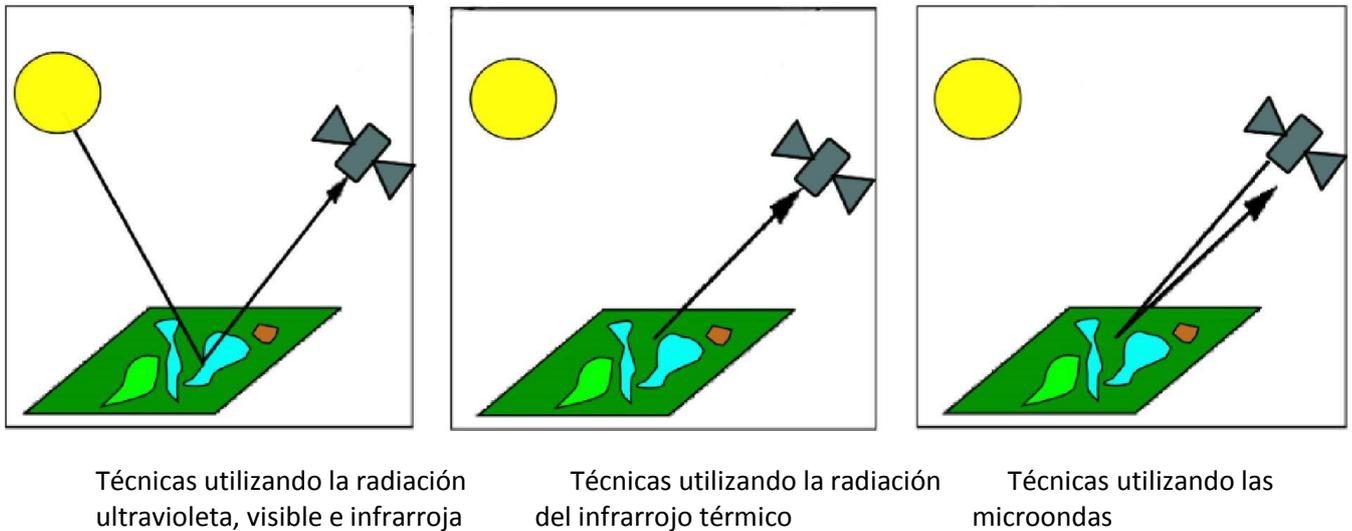


Figura 21.- La siguiente ilustración representa las distintas técnicas existentes en teledetección según el tipo de radiación capturada por los sensores. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015.

Hay que aclarar, que los sensores a bordo de satélites, no miden directamente la radiación reflejada por las cubiertas de la superficie terrestre, puesto que cuando llega al sensor se ha visto afectada por varios condicionantes atmosféricos que modifican los valores originales. La energía reflejada sufre procesos de dispersión al interactuar con los componentes gaseosos y los aerosoles de la atmósfera.

A la radiación electromagnética que miden los sensores se le llama Radiancia (L), que se define como la cantidad de energía electromagnética que pasa a través o es emitida desde un área en particular, confinada en un ángulo sólido en una dirección específica. El ángulo sólido tiene su vértice en la apertura del sistema sensor y base en la superficie de reflexión. Cuando la radiancia se refiere a una porción concreta del espectro electromagnético se le denomina radiancia espectral ($L\lambda$).

Mediante los cálculos adecuados, habrá que transformar estas radiancias espectrales medidas por los sensores en reflectividades propias de cada cubierta para poder elaborar firmas espectrales.

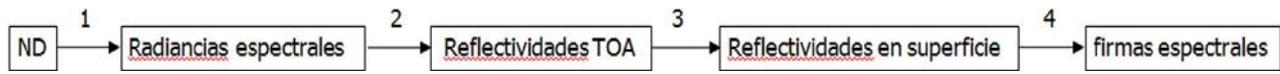


Figura 22.- Pasos a seguir para obtener firmas espectrales a partir de los niveles digitales que proporciona el sensor:
Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015

3.1.4 Paso de Niveles Digitales a Radiancias espectrales

En este primer paso se convierten la señal de salida del sensor (Niveles Digitales) en magnitudes de significado físico (radiancias espectrales) mediante una expresión matemática que relaciona ambas medidas denominada “calibración del sensor”.

Esta expresión matemática puede aproximarse a una transformación lineal (ecuación de una recta):

$$L_k = a_k + b_k * ND_k$$

Donde L_k es la radiancia de una banda determinada; a_k y b_k los coeficiente de calibración en dicha banda.

Será necesario entonces conocer los parámetros “a” y “b” de la recta que serán los coeficientes de calibración del sensor (ganancia y offset) y que normalmente son proporcionados junto con la imagen en el archivo de los metadatos. Tendrán que proporcionar una ganancia y un offset para cada banda de la imagen y habrá que transformar los ND de cada banda a valores de radiancias.

3.1.5 Paso de Radiancias espectrales a Reflectividades a la altura del sensor (Top Of Atmosphere)

El siguiente paso consiste en convertir las radiancias espectrales obtenidas en valores de reflectividad a la altura del sensor, es decir, en el techo de la atmósfera.



La radiancia medida por un sensor depende de la reflectancia de la superficie observada y de la geometría de iluminación. Pero esta medida está perturbada por dos fenómenos atmosféricos: la absorción gaseosa, y la dispersión por moléculas gaseosas y aerosoles.

Para obtener las reflectancias a la altura del sensor a partir de las radiancias calculadas, se utiliza una expresión matemática similar a la siguiente que relaciona ambas medidas sin considerar los efectos atmosféricos:

$$\rho_{\lambda} = \pi * L_{\lambda} * d^2 / ESUN_{\lambda} * \cos \theta_s$$

ρ_{λ} = Unitless planetary reflectance

L_{λ} = spectral radiance (from earlier step)

d = Earth-Sun distance in astronomical units

$ESUN_{\lambda}$ = mean solar exoatmospheric irradiances

θ_s = solar zenith angle

3.1.6 Paso de Reflectividades TOA a Reflectividades en superficie.

Este paso consiste en realizar una corrección atmosférica a los valores de reflectividad TOA para eliminar el efecto de la atmósfera sobre la radiación y convertir los valores a reflectividades en la superficie de la Tierra que son reflectividades propias de las cubiertas terrestres.

Para calcular la reflectancia en superficie, es necesario tener un modelo de las interacciones atmosféricas. La siguiente ecuación corresponde a uno de los modelos más simplificados que existen:

$$\rho = \frac{\pi (L_{sat} - L_p) d^2}{(E_{sol} \cos \theta_{sol} T_{sol})}$$

L_{sat} = radiancia total medida por el satélite en el techo de la atmósfera ($L_{sat} = DN \times \text{gain} + \text{offset}$).

L_p = radiancia resultado de la interacción de la radiación EM con los componentes de la atmósfera.

d^2 = distancia tierra sol en unidades astronómicas.

E_{sol} = irradiancia solar espectral en el techo de la atmósfera.



θ_{sol} = ángulo cenital solar (radianes).

T_{sol} = Transmitancia atmosférica en el camino del sol a la superficie.

3.1.7 Obtención de firmas espectrales.

El paso final será obtener las firmas espectrales que consiste en generar un gráfico o tabla para cada cubierta, colocando las longitudes de onda en un eje del gráfico o fila de la tabla y las correspondientes reflectividades calculadas, para esa longitud de onda, en el otro eje o columna de la tabla. Se suele representar la longitud de onda en micras (μm) y la reflectividad en tanto por ciento (%).

3.1.8 Firmas espectrales

A partir de las reflectividades en superficie calculadas, se pueden obtener las firmas espectrales de las distintas cubiertas terrestres.

La firma espectral de una cubierta representa la variación de la reflectividad en superficie de una cubierta en función de la longitud de onda de la radiación incidente. Es el DNI de las cubiertas.

La superficie de la Tierra está formada por un conjunto heterogéneo de cubiertas con un comportamiento espectral distinto. Cada material, cada sustancia o cada ser vivo reflejan y emiten energía electromagnética de forma distinta, y por tanto cada uno tendrá una firma espectral característica que lo identifica.

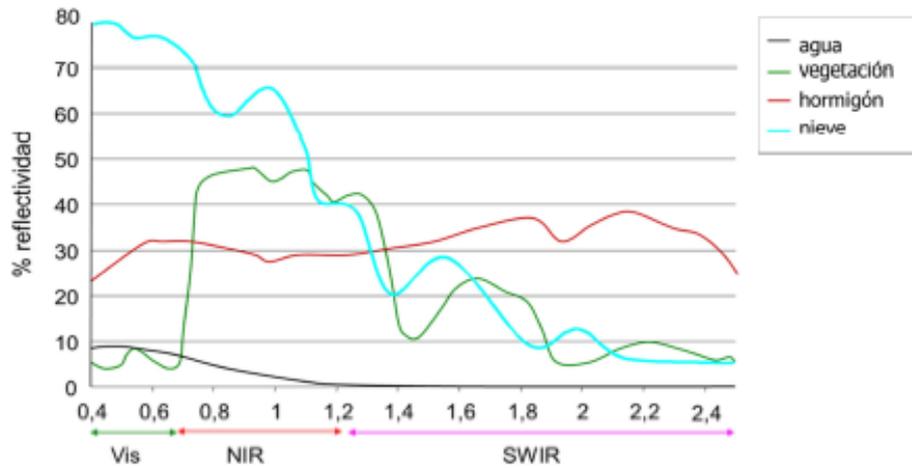


Figura 23.- Gráfico que representa la firma espectral de 4 tipos de cubiertas: agua, vegetación sana, hormigón y nieve. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015.

El estudio del comportamiento espectral de las distintas cubiertas terrestres es una parte muy extensa dentro del proceso de teledetección, lo que vamos a ver es solo algunos ejemplos de las cubiertas más características.

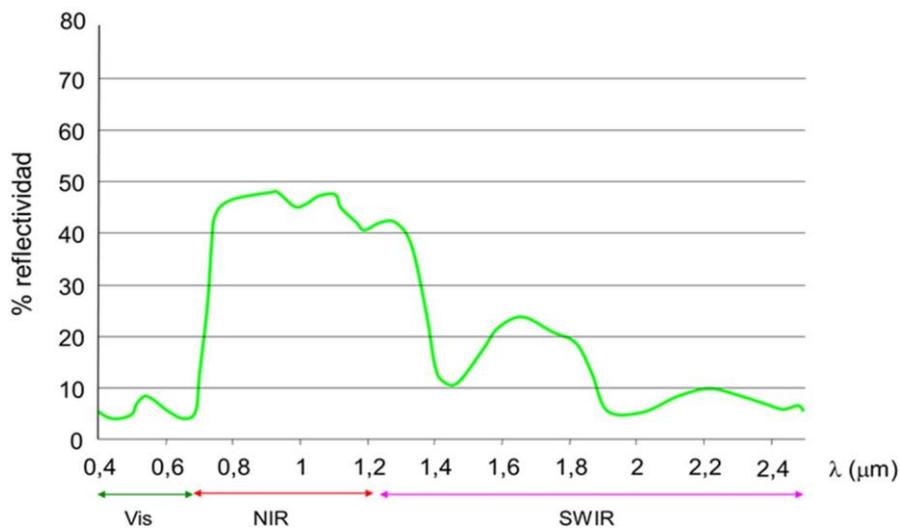


Figura 24.- Comportamiento espectral de la cubierta vegetal. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015

La reflectancia de la vegetación sana es bastante baja en la porción del espectro electromagnético correspondiente al visible. Esto es así porque la mayor parte de la energía de ese tipo que llega a las hojas es absorbida, y una cantidad mucho menor es reflejada.



- En la parte del visible: entre las dos bandas de absorción de la clorofila se produce un pico de reflectancia que corresponde a la longitud de onda del verde. Esto es así porque las hojas reflejan intensamente la energía que corresponde a la longitud de onda del verde (por eso las vemos de este color), y absorben o transmiten en las longitudes de onda que corresponden al resto de los colores.
- En el infrarrojo cercano, el aumento en la reflectancia se debe a la estructura interna de las hojas, mientras que la reflectancia en el infrarrojo medio aumenta si el contenido de humedad de las hojas es mayor.

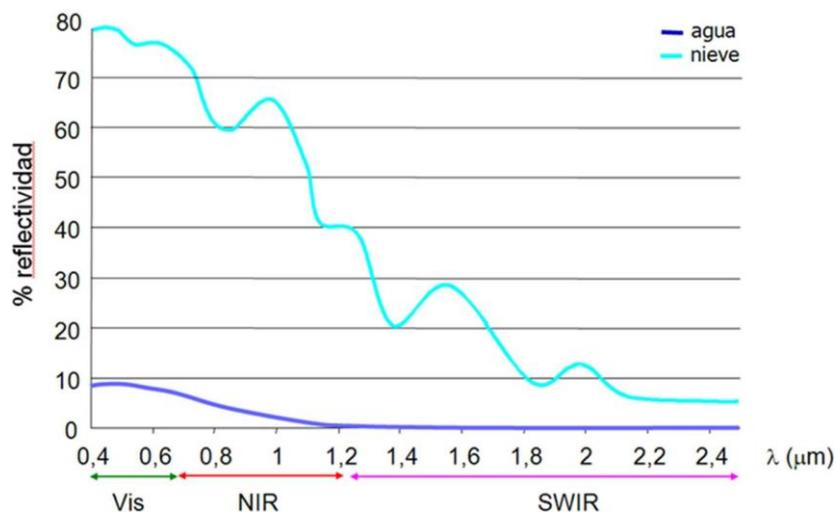


Figura 25.- Comportamiento espectral del agua y la nieve. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015

El agua absorbe o transmite la mayor parte de la radiación visible que recibe. Por tanto presentará una curva espectral plana, baja y de sentido descendente. Aunque en aguas poco profundas, la reflectividad aumenta. Los factores que afectan a este comportamiento son: profundidad, contenido en materias en suspensión (clorofila, arcillas y nutrientes) y rugosidad de la superficie (factor, éste último extremadamente importante).

La nieve ofrece un comportamiento totalmente diferente al del agua, con una reflectividad elevada en las bandas visibles, reduciéndose drásticamente en el infrarrojo cercano y térmico

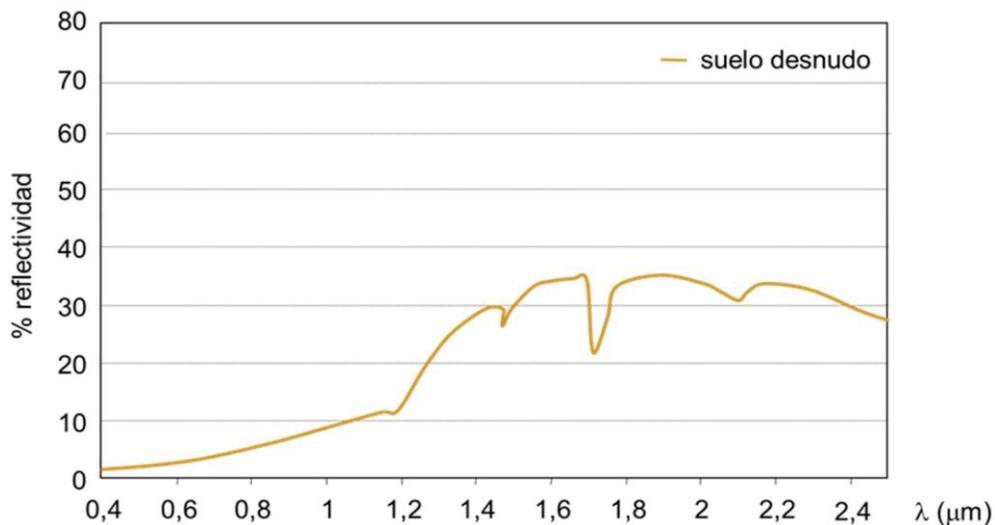


Figura 26.- Comportamiento espectral del suelo desnudo. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015.

El comportamiento espectral del suelo desnudo es mucho más uniforme que el de la vegetación, mostrando una curva espectral bastante plana y de carácter ascendente. Los principales factores que intervienen en este caso son la composición química del suelo, su textura y estructura y el contenido en humedad. Cuanto más seco y apelmazado sea un suelo, mayor será su reflectividad.

Al igual que para la vegetación, el contenido en humedad es uno de los elementos destacados en la reflectividad en longitudes de onda largas (infrarrojo medio) y así suelos con alto contenido en humedad darán una reflectividad alta en esa banda.

La obtención de firmas espectrales se ve directamente afectada por la resolución espectral del sensor con el que se capture la información. Los sensores hiperespectrales, que capturan información en cientos de bandas espectrales, son los más idóneos para elaborar firmas espectrales.

3.1.9 Imágenes de sensores ópticos

Los instrumentos usados en teledetección son sensores electrónicos que recogen la radiación o energía que refleja la superficie de la Tierra. Esta energía recibida por el sensor es transformada en señales eléctricas por los detectores. Estas señales continuas (analógicas) son amplificadas y digitalizadas, es decir cuantificadas de manera discontinua



Los sensores están diseñados para poder capturar de forma separada las radiaciones de acuerdo con diferentes intervalos de longitudes de onda del espectro electromagnético, llamados canales o bandas espectrales. Una imagen generalmente contiene varios canales que se escogen en función de la respuesta específica de los objetos que componen la superficie terrestre. Así, a cada píxel se asignan tantas mediciones digitalizadas o discretizadas como bandas tenga la imagen. Los niveles digitales resultantes en los diferentes canales son posteriormente transmitidos a la estación de Tierra donde son registrados línea tras línea.

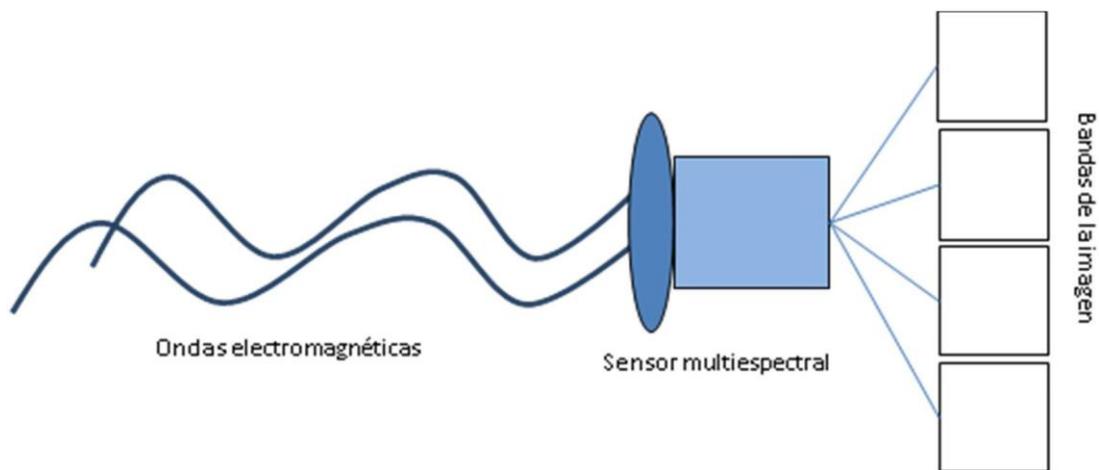


Figura 27.- Esquema del paso de radiación a bandas de imagen. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015.

3.1.10 Descripción de una imagen bruta procedente de satélite

Una imagen de satélite en bruto, tal como normalmente llega al usuario final, consiste en un conjunto de matrices, una por cada banda del sensor, en la que aparecen números del 0 al 255 (en el caso más general de contar con 8 bit de profundidad de píxel). El cero indica que no llega nada de radiación desde ese punto (se visualizará negro) y el 255 que llega el valor más alto de radiación (se visualizará como píxel blanco). Estos valores radiométricos se denominan Niveles Digitales y, dependiendo de la aplicación, será necesario transformarlos en algún tipo de variable física o realizar algún tratamiento para mejorar la visualización de la imagen.

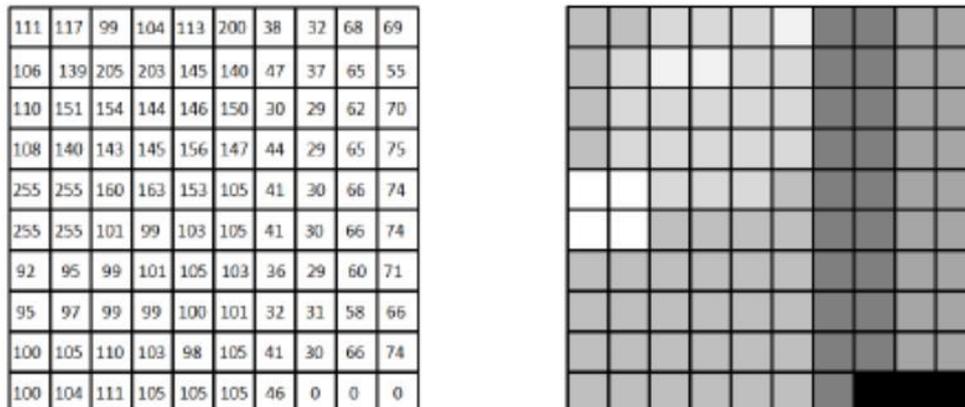


Figura 28.- Ejemplo de visualización en escala de grises de una imagen con una sola banda de 10x10 píxeles. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015.

3.1.11 Tipos de resoluciones

La radiación electromagnética que emite y refleja la superficie terrestre es un fenómeno continuo que un sensor debe muestrear y discretizar para almacenarlo como imagen. El modo en que esta discretización se lleva a cabo define los cuatro tipos de resolución con los que se trabaja en teledetección.

Para elegir las imágenes adecuadas para un determinado trabajo, el usuario deberá establecer los requisitos necesarios en cuanto a resolución espacial, espectral, temporal y radiométrica:

- resolución geométrica o espacial: habrá que estipular el tamaño de píxel necesario para poder identificar los objetos de interés. Una forma habitual de definir la resolución geométrica necesaria, es establecer una relación entre el tamaño de píxel de la imagen y la escala a la que se pretende trabajar. Está determinada por el tamaño del píxel de la imagen, medido en metros sobre el terreno. Este concepto designa al objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen. Existe un amplio rango de resoluciones espaciales en los satélites hoy día disponibles, desde 50 centímetros (satélites de muy alta resolución espacial) hasta 5 kilómetros (satélites meteorológicos). La resolución geométrica es la característica que más encarece las imágenes de satélite, por lo que será importante saber elegir el tamaño de píxel adecuado a nuestras necesidades para no adquirir imágenes con un precio más elevado del necesario.



- resolución espectral: indica el número y anchura de las regiones del espectro en las que el sensor puede captar radiación electromagnética. Cuantas más bandas sea capaz de capturar y más estrechas sean, mejor resolución espectral ofrecerá el sensor. Si se va a trabajar realizando clasificación espectral o con firmas espectrales, habrá que determinar las bandas necesarias para la identificación de las cubiertas de interés.
- resolución temporal: para estudios multitemporales, es muy importante determinar el intervalo de fechas necesario para identificar las variaciones en el tiempo del fenómeno que se estudia. Resolución temporal o periodo de revisita: Indica el intervalo de tiempo entre cada imagen obtenida por el sensor del mismo punto de la superficie terrestre. Este tipo de resolución depende básicamente de las características de la órbita (altura, velocidad e inclinación), del ancho de barrido de la imagen y del ángulo de inclinación del sensor. Con los satélites que llevan a bordo sensores orientables de alta resolución espacial, la zona de la Tierra de la que captan imágenes es relativamente independiente de la posición que ocupe el satélite, por lo que la resolución temporal pasa a ser algo más flexible. Generalmente, a mayor resolución espacial disminuye la temporal y también la espectral. El problema es que cada aumento de resolución multiplica el volumen de datos que el sensor debe preprocesar y enviar a las estaciones de Tierra. Sin embargo la aparición de sensores de orientación modificable ha permitido compatibilizar alta resolución espacial y alta resolución temporal a costa de una toma de imágenes no sistemática.
- Resolución radiométrica: también llamada profundidad de BIT, indica el número de bits por píxel que se utiliza para almacenar la imagen y por tanto la cantidad de niveles de gris en que se almacena la radiación recibida para ser procesada posteriormente. Da muestra la sensibilidad del sensor, es decir la capacidad de discriminar entre pequeñas variaciones en la radiación que capta. Es un factor a tener en cuenta para las aplicaciones donde se requiera mucho grado de detalle en la imagen. Es muy importante entender bien los cuatro conceptos que se definen a continuación para el manejo de imágenes de satélite.

Las profundidades de píxel más comúnmente utilizadas en teledetección varían entre:

8 bits/píxel = 2^8 posibilidades binarias = 256 niveles digitales

16 bits/píxel = 2^{16} posibilidades binarias = 65536 niveles digitales

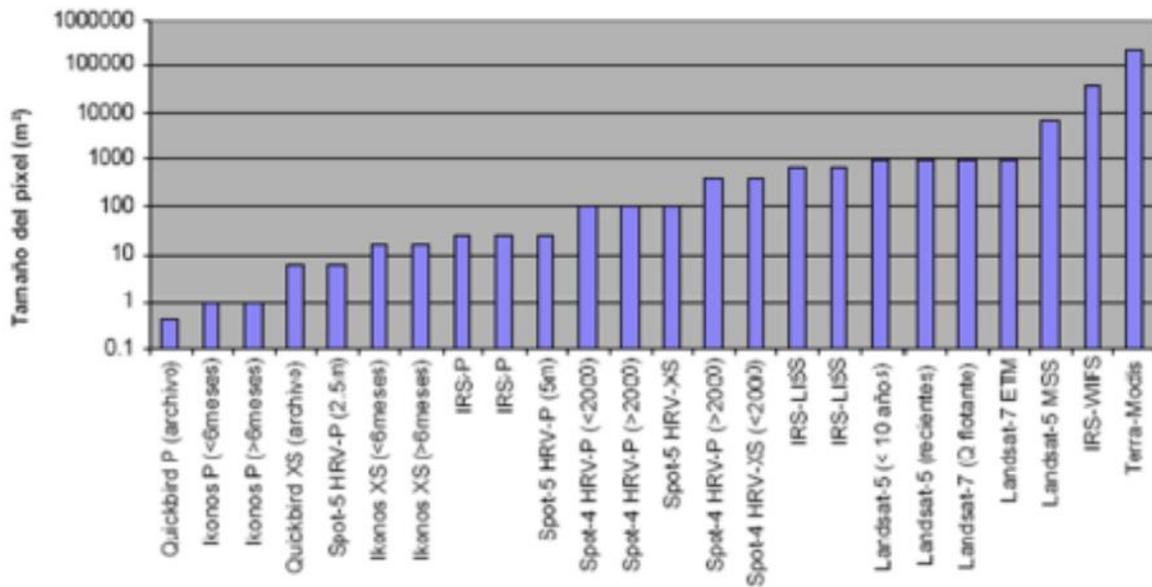


Figura 29.- Distintos satélites según el tamaño de píxel de las imágenes que capturan. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015.

Ejemplos: el sensor HRV a bordo de SPOT5 tiene 4 bandas, el sensor OLI a bordo de Landsat8 tiene 11, el sensor MODIS a bordo de Terra/Aqua tiene 36. Los sensores hiperespectrales llegan a tener cientos de canales con un ancho de banda muy estrecho (unos pocos nm) para poder separar de forma precisa distintos objetos por su comportamiento espectral.

El elevado número de canales permite, no sólo tener una representación mucho más completa de las firmas espectrales de los objetos observados, sino también conseguir correcciones atmosféricas mucho mejores, con lo que las estimaciones de las variables derivadas podrán ser mucho más precisas.

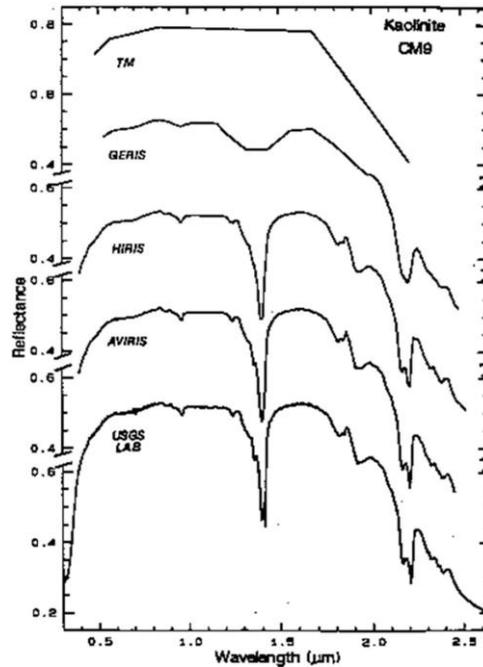
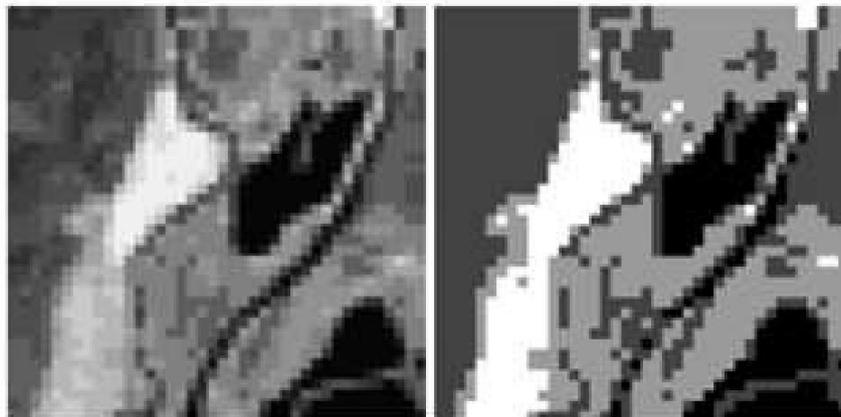


Figura 30.- En esta figura se muestra un ejemplo de las distintas firmas espectrales obtenidas de una misma cubierta, caolinita en este caso, dependiendo de la resolución espectral del sensor que capture la información. La primera firma espectral empezando por arriba corresponde al sensor TM a bordo de algunos satélites de la serie Landsat que posee 7 bandas espectrales, la siguiente firma corresponde al sensor GERIS con 63 canales espectrales, la siguiente al sensor HIRIS con 192 bandas espectrales, la cuarta al sensor AVIRIS que tiene 224 canales espectrales y la última es la curva hiperespectral de la caolinita obtenida en laboratorio, con la que se pueden comparar las anteriores. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015.



8 bits: 256 niveles de gris 2 bits: 4 niveles de gris

Figura 31.- Misma imagen con distinta profundidad de bit. Para la imagen de la derecha se utilizan 2 bit por píxel, por lo que la imagen se representa con 4 niveles de gris, y para la imagen de la izquierda se utilizan 8 bits por píxel por lo que la imagen se puede representar con 256 niveles de gris distintos. Por tanto la imagen de la izquierda proporcionará un grado de detalle más fino. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015.



Figura 32.- Importancia de la resolución radiométrica en las imágenes para teledetección. En la columna de la derecha se muestran dos imágenes con resolución radiométrica de 8 bit por píxel y en la columna de la izquierda se muestran las mismas imágenes mejorando la resolución a 11 bits por píxel. Al comparar las dos imágenes de arriba, se puede apreciar cómo en la imagen de la derecha aparecen zonas saturadas que desaparecen aumentando la profundidad de bit. Al comparar las dos imágenes de abajo, se puede apreciar cómo en la imagen de la derecha aparecen zonas de sombra, que se aclaran al aumentar la resolución radiométrica. En este caso, al mejorar la resolución radiométrica, mejorará la fotointerpretación o descripción de cubiertas. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015.



Figura 33.- Ancho de barrido de un satélite que describe una órbita casi polar. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015.

Por último comentar que el diseño de los sensores para observación de la Tierra se hace teniendo en cuenta todas las consideraciones hechas hasta ahora.



3.5.3. Imagen adecuada para una determinada aplicación

Una vez establecidos los requisitos anteriores, habrá que localizar entonces las plataformas del mercado (satélite y sensor) que mejor se adecuen a mis necesidades, sin olvidar el presupuesto disponible.

Para realizar el pedido de imágenes a la empresa suministradora correspondiente, habrá que definir también todos o algunos de los parámetros que se describen a continuación:

- zona de estudio: Se define generalmente por un polígono georreferenciado, en formato shape o similar. Habrá que tener en cuenta el tamaño mínimo del pedido que permite el satélite/sensor.
- ventana de adquisición: donde se define el marco temporal en el que la imagen debe ser adquirida.
- prioridad del pedido: Algunos satélites ofrecen la posibilidad, siempre con un incremento en el precio, de priorizar el pedido de una imagen.
- porcentaje de nubes: El precio ofertado por los distribuidores incluye el suministro de imágenes con un porcentaje máximo de nubes que oscila entre el 10 y el 20%, en función del satélite. Este porcentaje se puede reducir a cambio de un sobrecosto de las imágenes.
- ángulo de adquisición máximo: Este parámetro indica el mayor ángulo de adquisición con que se puede tomar la imagen con respecto a la vertical del satélite. A mayor ángulo aumente la resolución temporal del satélite, con lo que aumentan las posibilidades de adquisición exitosa de la imagen, pero en una imagen tomada con un ángulo excesivamente oblicuo, disminuye la resolución espacial y precisión de localización.
- nivel de procesado: Este parámetro hace referencia a las correcciones geométricas y radiométricas que pueden aplicarse a la imagen antes de ser distribuidas al usuario final. Cada distribuidor tiene sus niveles específicos de procesado, no siendo coincidentes para todas las plataformas satelitales. Se puede adquirir desde una imagen de nivel 0, donde no se incluye corrección alguna, hasta una imagen corregida radiométrica y geoméricamente y ortorrectificada. Entre ambas opciones pueden existir varios niveles, aunque siempre se suministra la información y archivos necesarios para que los usuarios puedan procesar la imagen a un nivel superior. Generalmente cuanto mayor nivel de procesado tenga, mayor será el precio de la imagen.



Tabla 3. Ejemplo de niveles de procesado que establece la NASA para las imágenes Landsat 8.

| | |
|---|--|
| Productos de Nivel 0 (L0): | Los productos del tipo L0 son imágenes digitales con todas las transmisiones de datos y objetos sin formato. Estos productos están al mismo tiempo ordenados de manera proporcional, espacial y secuencialmente por bandas multiespectrales. |
| Productos de Nivel 1 Radiometric (L1R): | Los productos del tipo L1R consisten en datos de imágenes radiométricamente corregidas. Estos se encuentran derivados de datos L0 y son escalados a valores de radiancia espectral o reflectancia. |
| Productos de Nivel 1 Systematic (L1G): | Los productos del tipo L1G consisten en productos de datos del tipo L1R con correcciones geométricas sistemáticas aplicadas y muestreos para el registro en una proyección cartográfica, estos datos se encuentran referenciados al Sistema Geodésico Mundial de 1984 (WGS84). |
| Productos de Nivel 1 Gt (L1Gt): | Los productos del tipo L1Gt consisten en datos del tipo L1R con correcciones geométricas sistemáticas aplicadas y muestreos para el registro a una proyección cartográfica referenciada a WGS84. Este tipo de datos (L1Gt) utilizan la información de posición a bordo o efemérides definitivas, así como el uso de los datos controlados de elevación para corregir los errores de paralaje. |
| Productos de Nivel 1 Terrain (L1T): | Los productos de datos L1T consisten en productos de datos L1R con correcciones geométricas sistemáticas aplicadas, utilizando para ello puntos de control terrestre (GCP) o información de posición integrada a bordo para entregar una imagen registrada a una proyección cartográfica, referenciada a WGS84. Adicionalmente los datos también contienen una corrección topográfica por el desplazamiento del terreno debido al relieve. |



4 METODOLOGÍA y MATERIALES

4.1 Metodología

La metodología seguida ha sido realizar una búsqueda de documentación bibliográfica en las bibliotecas del EIMEM y en internet.

Posteriormente, el aprendizaje de un software de tratamiento de imágenes de satélite ASTER.

4.2 Imágenes ASTER

ASTER (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) es un esfuerzo cooperativo entre la NASA y el Ministerio de Comercio Economía e Industria de Japón METI. En 1999 el instrumento se lanzó a bordo del satélite TERRA de la NASA. El objetivo principal de la misión ASTER es mejorar el entendimiento de los procesos a escala local y regional que ocurren sobre o cerca de la superficie de la tierra y en la atmósfera inferior, incluyendo la interacción superficie-atmósfera. ASTER presenta una órbita heliosincrónica a una distancia de 705 kilómetros, con un ciclo de repetición de 16 días, un ancho de barrido de 60 kilómetros y una distancia entre orbitas de 172 Km.

ASTER está compuesto por 3 subsistemas, VNIR, SWIR y TIR; cada uno de cuales presenta características particulares tales como 3 bandas en la región espectral del visible e infrarrojo cercano (VNIR) con una resolución espacial de 15 metros; 6 bandas en la región espectral del infrarrojo de onda corta (SWIR) con una resolución espacial de 30 metros y 5 bandas en el infrarrojo térmico con una resolución espacial de 90 metros. ASTER también presenta un telescopio con visión hacia atrás que escanea en la región espectral de la banda 3B, lo que nos permite realizar modelos digitales de terreno (MDT) por pares estereoscópicos (Gonzáles).

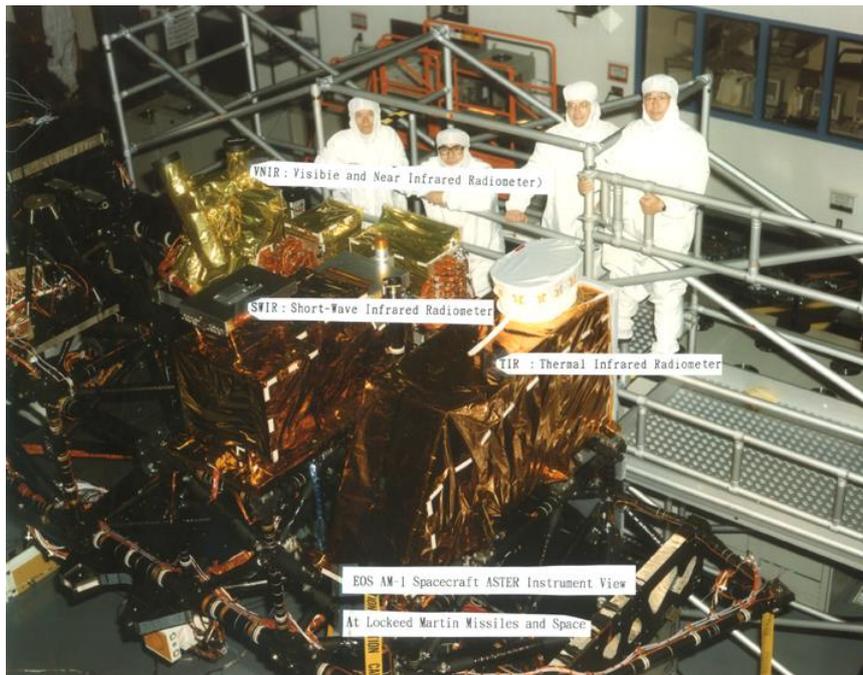


Figura 34.- El instrumento ASTER antes del lanzamiento.

El sistema multiespectral ASTER consta de 14 bandas desde al visible al infrarrojo termal.

El siguiente cuadro representa las 14 bandas:

Tabla 4. Bandas de ASTER. FUENTE: Aster Users Handbook

| Subsistema | No de Banda | Rango Espectral μm | Resolución Espacial |
|------------|-------------|-------------------------------|---------------------|
| VNIR | 1 | 0,52-0,60 | 15m |
| | 2 | 0,63-0,69 | |
| | 3N | 0,76-0,86 | |
| | 3B | 0,76-0,86 | |
| SWIR | 4 | 1,60-1,70 | 30m |
| | 5 | 2,145-2,185 | |
| | 6 | 2,185-2,225 | |
| | 7 | 2,235-2,285 | |
| | 8 | 2,295-2,365 | |
| | 9 | 2,360-2,430 | |
| TIR | 10 | 8,125-8,475 | 90m |
| | 11 | 8,475-8,825 | |
| | 12 | 8,925-9,275 | |
| | 13 | 10,25-10,95 | |
| | 14 | 10,95-11,65 | |



El sistema ASTER tiene dos tipos de datos Nivel 1, 1A y 1B

Nivel 1A se define como la reconstrucción del dato no procesado a máxima resolución. El dato Nivel 1A viene acompañado por un archivo suplementario con las efeméride de posicionamiento del satélite y un archivo auxiliar con la tabla de coeficientes de calibración radiométrica, de corrección geométrica y otros datos sin Aplicar a la imagen.

El Nivel 1B es generado aplicando esos coeficientes del archivo auxiliar, no así el suplementario.

El Nivel 1A es el dato de origen para producir el Modelo Digital de Elevaciones DEM pues posee los parámetros geométricos necesarios que permiten elaborar el DEM sin puntos de control de campo.

Las imágenes a partir de los DEM se obtienen las curvas de contorno relativas se verifica la precisión geométrica de los datos ASTER con puntos de control de campo PCC, de haber un desplazamiento mayor a 15m o 1 píxel para escala 1:100.000, es necesario ajustar la imagen y el DEM. El resultado de la fusión de la información generada a partir de las imágenes ASTER con el procesamiento digital de los datos raster y vectoriales hasta llegar a la representación cartográfica donde cada elemento está representado por un atributo numérico que extrae la simbología a graficar del diccionario de líneas y puntos de elementos geográficos. Teniendo en cuenta el amplio diapason de bandas espectrales sobre todo en el infrarrojo térmico, estas imágenes son ideales para los estudios de vegetación, geológicos y medio ambientales.

Esta amplia región espectral es cubierta por tres telescopios para los subsistemas VNIR, SWIR y TIR. Un cuarto telescopio en la región del visible-infrarrojo cercano VNIR, es utilizado en posición vista atrás para generar la visión estereoscópica (Abrahms, 1997)

4.2.1 Descripción cronológica

El Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) de Japón y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (NASA) anunciaron conjuntamente el lanzamiento de la emisión y reflexión térmica radiómetro espacial avanzado (ASTER) Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEM V2) el 17 de octubre, 2011.

La primera versión del ASTER GDEM, publicado en junio de 2009, se ha generado utilizando imágenes estéreo pares recogidos por el instrumento ASTER a bordo de Terra. ASTER



cobertura GDEM se extiende desde los 83 grados de latitud norte hasta 83 grados al sur, que abarca el 99 por ciento de la superficie terrestre de la Tierra.

La mejora GDEM V2 añade 260.000 estereopares adicionales, mejorando la cobertura y reducir la aparición de artefactos. El algoritmo de la producción refinada proporciona una mejor resolución espacial, una mayor precisión horizontal y vertical, y la cobertura del cuerpo de agua superior y la detección. El ASTER GDEM V2 mantiene el formato GeoTIFF y la misma estructura de mallado y el azulejo como V1, con envíos de 30 metros y azulejos 1 x 1 grado.

La Versión 2 muestra mejoras significativas respecto a la versión anterior. Sin embargo, se aconseja a los usuarios que los datos contienen anomalías y artefactos que impedirán la eficacia para su uso en ciertas aplicaciones. Los datos se proporcionan "tal cual", y ni la NASA ni Space Systems / Japón (METI J-Spacesystems) serán responsables de los daños resultantes del uso de los datos.

Como una contribución del METI y la NASA para el Sistema de Observación de la Tierra Mundial de Sistemas (GEOSS), los datos ASTER GDEM V2 están disponibles de forma gratuita a los usuarios de todo el mundo a partir de los procesos de la tierra Distributed Active Archive Center (LP DAAC) y J-Spacesystems.

4.2.2 Situación actual

Desde el lanzamiento del primer satélite LANDSAT de observación de la Tierra, comenzó la técnica de la teledetección espacial. Podemos decir entonces que la teledetección es una técnica relativamente reciente, puesto que la humanidad lleva tan solo 42 años almacenando imágenes de la tierra procedentes de sensores a bordo de satélites. Al ser reciente, es una técnica en constante evolución: existe un constante avance en la calidad de los sensores a bordo de los satélites para poder obtener imágenes con mejores resoluciones, los propios satélites están evolucionando, y se perfeccionan también las técnicas de tratamiento de las imágenes una vez capturadas.

Todo lo anterior permite que la teledetección pueda ser utilizada cada día para un mayor número de aplicaciones y permite la posibilidad de abordar nuevos objetivos científicos.

En la actualidad, el gran potencial que ofrece esta tecnología se refleja en la extensa oferta que existe de imágenes captadas por multitud de satélites que orbitan alrededor de la Tierra. Esta



diversidad de opciones obliga al usuario a realizar un análisis de la oferta existente y sus costes, labor que requiere del conocimiento básico de los datos disponibles y su utilidad.

También hay que decir que toda esta información, a día de hoy, permanece en cierto modo ajena a muchos usuarios potenciales de esta tecnología porque desconocen las ventajas que podría aportar la teledetección a sus trabajos.

Desde el 1 de abril de 2016 todas las imágenes de la Tierra desde un instrumento de teledetección japonesa que funciona a bordo de la nave espacial Terra de la NASA desde finales de 1999 ya está disponible sin costo alguno. Hay un acceso ilimitado a la base de datos completa de 16 más años para el Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) de Japón espacial avanzado de emisiones y reflexión térmica Radiometer (ASTER) de instrumentos. La base de datos de Aster se compone actualmente de más de 2,95 millones de escenas individuales.

En la mayoría de las aplicaciones descritas, la teledetección se combina con otras técnicas o con otras fuentes de datos para llegar al resultado final, es decir, que muchas veces la teledetección funciona como apoyo para conseguir mejores resultados.

4.2.3 Subsistema VNIR

Telescopio de vista atrás (En la figura el de color rojo) - El subsistema VNIR de vista atrás es del mismo diseño que el telescopio nadir y sólo contiene una matriz de línea de detectores de silicio de carga acoplada y no hay lámparas de calibración, ya que sólo se utiliza para adquirir una imagen de par estéreo.

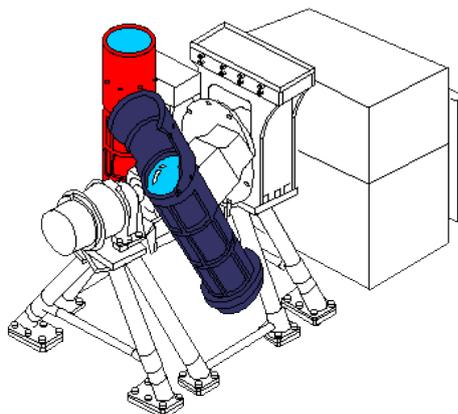


Figura 35. Esquema del subsistema VNIR. FUENTE: NASA. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology



Telescopio de visión Nadir (azul oscuro) - El punto más bajo del subsistema VNIR buscado es un telescopio reflexión-refracción que muestra la mejora del diseño de Schmidt. El plano focal de este telescopio contiene tres detectores acoplados con arreglos lineales de carga 5000 de silicio. El punto más bajo y el de mirado hacia atrás se utilizan para la misma imagen estéreo de órbita y se pueden girar como una unidad de +/- 24 grados para proporcionar una amplia capacidad que apunta perpendicularmente a la trayectoria. La luz procedente de cualquiera de las dos lámparas halógenas se usa periódicamente para la calibración del subsistema. (Technology, 2012)

El subsistema VNIR obtiene imágenes del visible e infrarrojo cercano (0.52-0.86 μm) en tres bandas con una resolución espacial de 15 metros, Además tiene una banda adicional que permite visión estereoscópica y la Generación del Modelo Digital de Terreno de cada escena.

4.2.4 Subsistema SWIR

Cryocooler (verde) - El conjunto de detectores lineales de barrera de silice - silicio platino Schottky en cada uno de los seis canales SWIR se enfría a 80 K utilizando una fracción de ciclo refrigerador Stirling con una mecánica de larga duración y de baja vibración.

Módulo de señalización (azul) - El espejo de punteo puede apuntar +/- 8,54 grados desde la dirección del nadir para permitir la cobertura de cualquier punto de la Tierra durante el ciclo de mapeo de 16 días de la nave espacial. Este espejo también se utiliza periódicamente a la luz directa de cualquiera de las dos lámparas de calibración del telescopio de subsistema.

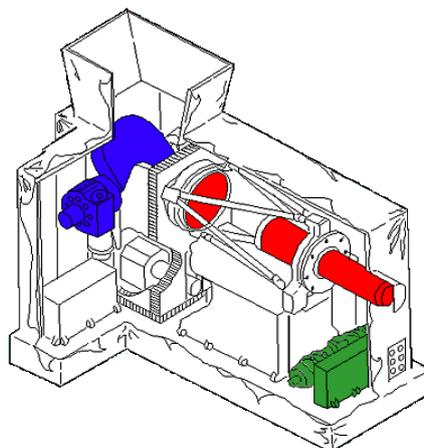


Figura 36. Esquema del Subsistema SWIR. FUENTE: NASA. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology



Telescopio (rojo) - El subsistema SWIR utiliza un único telescopio refractor esférico fijo.

El subsistema SWIR registra la información en 6 bandas del infrarrojo De onda corta (1.600-2.430 mm) con una resolución espacial de 30 Metros.

4.2.5 Subsistema TIR

Cryocooler (amarillo) - Los diez detectores de mercurio de telurio de cadmio en cada uno de los cinco canales TIR se enfría a 80 K utilizando una fracción de ciclo de refrigeración Stirling de mecánica de larga duración y de baja vibración.

Placa de referencia (Cuerpo Negro) (Verde) - Una placa de referencia de alta emisividad se utiliza como la referencia de calibración de a bordo para el subsistema de TIR. Esta placa de referencia se ve antes y después de cada observación para proporcionar una estimación de la deriva del instrumento y periódicamente esta placa se calienta a través de una gama de temperatura para proporcionar una estimación para ambos, ganancia del instrumento y el desplazamiento.

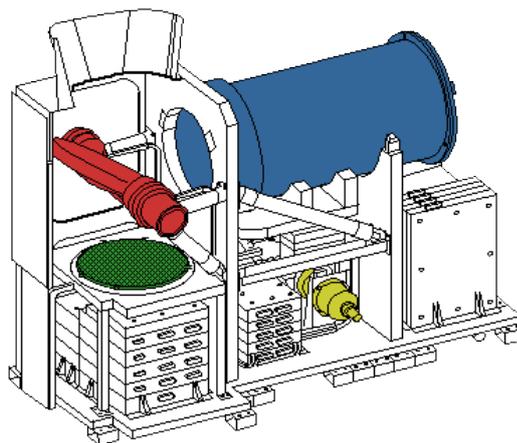


Figura 37. Esquema del Subsistema TIR. FUENTE: NASA. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology

Espejo de exploración (rojo) - El espejo de exploración se utiliza tanto para la exploración y como para señalar. En el modo de exploración el espejo oscila a través de la pista de tierra aproximadamente 7 Hz. Este espejo puede señalar +/- 8,54 grados desde la dirección del nadir para permitir la cobertura de cualquier punto de la Tierra durante el ciclo de mapeo de 16



días de la nave espacial. Este espejo también puede girar 180 grados de la dirección del nadir para proporcionar una vista de la placa de referencia para la calibración.

Telescopio (azul) - El subsistema TIR utiliza un sistema catadióptrico de Newton con un espejo primario esférico y la lente para la corrección de la aberración. A diferencia del telescopio VNIR, el telescopio del subsistema TIR es fijo y ambos apuntando y el escaneo se realiza mediante el espejo.

El subsistema TIR obtiene datos en 5 bandas en la región del Infrarrojo térmico (8.125-11.65 mm) con una resolución espacial de 90 Metros. (Technology, 2012)

Sobre esto en la página de ASTER hay más cosas pero me parecía ya de mecánica mas complicada sobre cómo están hechos los telescopios

4.2.6 Ventajas y aplicaciones de la Teledetección

Las principales ventajas que aporta la teledetección espacial frente a otras técnicas de percepción remota como la fotogrametría, o los trabajos con radiómetros de campo son:

- Monitorización global de la tierra.
- Permite realizar estudios de regiones más amplias.
- Observación a distintas escalas.
- Permite estudios multitemporales con mayor periodicidad.
- Multidisciplinaridad: útil es muchas disciplinas.

Todas estas ventajas descritas han propiciado el desarrollo y utilización de este tipo de productos de manera sistemática en múltiples disciplinas tales como: agricultura, medio ambiente, cartografía, urbanismo.....etc.

A continuación vamos a describir algunos ejemplos de aplicaciones actuales, y los tipos de imágenes que se requieren para cada aplicación.

Emergencias

Son aplicaciones en las que requieren imágenes con alta frecuencia temporal en el periodo de tiempo que se están produciendo el fenómeno, por ejemplo: incendios forestales, inundaciones, vertidos de petróleo, terremotos...etc. Estos casos es donde más se utilizan imágenes radar, ya



que pueden tomar imágenes en cualquier momento del día (aunque sea de noche) y en condiciones meteorológicas más adversas. Para estos casos se buscan también plataformas satelitales que posean “constelaciones” de satélites, iguales o complementarios, para recoger la información demandada con frecuencia requerida.



Figura 38 - Imagen del sensor MODIS. Incendios declarados en la Comunidad de Valencia. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015

Aplicaciones para agricultura

La teledetección permite clasificar los tipos de cultivos que aparecen en las imágenes y ayuda a conocer el estado fenológico de cada cultivo mediante las firmas espectrales, por lo que puede ser utilizada para:

- Obtener estadísticas de superficies de cultivos.
- Evolución de superficies ocupadas por cultivos.
- Seguimiento del estado vegetativo de los cultivos y detección de anomalías.
- Gestión del agua de riego y control de su aplicación.
- Agricultura de precisión: predicción del rendimiento de los cultivos y del momento óptimo para su cosecha.

Para estas aplicaciones será necesario disponer de imágenes con una frecuencia temporal que permita hacer un buen seguimiento de los cultivos (de media se necesitará frecuencia semanal o quincenal como mucho).

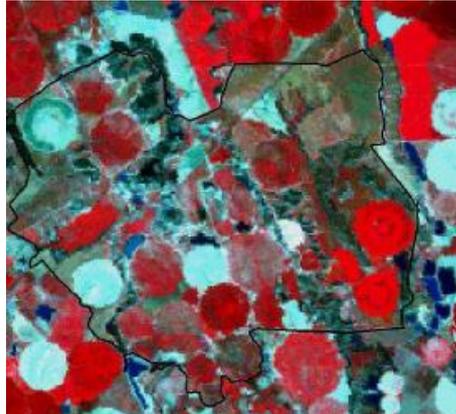


Figura 39 - Imagen Landsat 5 en falso color. Identificación de cultivos de regadío. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015

Estudios de biodiversidad

La teledetección permite clasificar los tipos de suelo o coberturas vegetales que aparecen en las imágenes, por lo que puede ser utilizada para:

- Seguimiento de especies y poblaciones animales.
- Realizar cartografía e inventarios de la cobertura vegetal del suelo.
- Evaluar las condiciones de estrés en la vegetación por los efectos de la sequía o la deforestación.

La siguiente imagen muestra una representación de un índice de vegetación (el NDVI) obtenido para toda la Tierra a partir de imágenes del sensor MODIS, a bordo de los satélites Terra y Aqua, con 1 Km de tamaño de píxel. A golpe de vista permite hacerse una idea muy exhaustiva de dónde se encuentran localizadas las zonas de mayor vegetación en el mundo y donde los grandes desiertos.

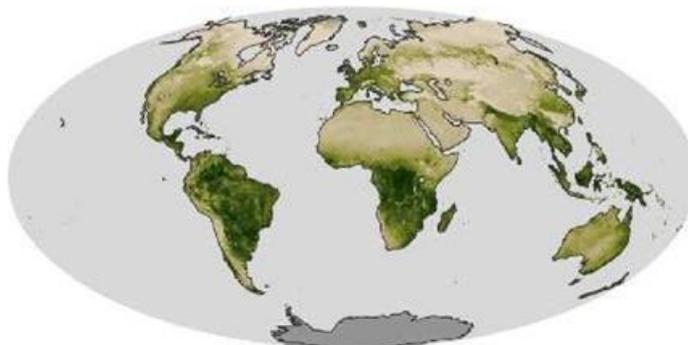


Figura 40.- Distribución de la vegetación a nivel mundial. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015



Desarrollo sostenible

A partir de las imágenes obtenidas por teledetección, es posible calcular distintos parámetros medio ambientales que puede servir de gran ayuda para realizar:

- Inventarios regionales del medio ambiente para estudios de impacto ambiental.
- Verificación y control de la calidad del agua, turbidez y contenido de algas.
- Seguimiento de la capa de ozono.
- Cartografía de áreas quemadas y seguimiento de los procesos de repoblación natural.



Figura 41.- Imagen del satélite Landsat 8. Zona deforestada en plena selva amazónica, cercana al río Amazonas a su paso por Perú. Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015

Oceanografía

A partir de las imágenes ópticas de media o baja resolución espacial, imágenes radar y obteniendo modelo de altitudes con sensores LIDAR, es posible llevar a cabo:

- Estudio de los océanos: altura de los mares, batimetría, concentración de fitoplancton, medición de las corrientes, vientos y olas.
- Vigilancia de los océanos: seguimiento del nivel medio de los mares, temperatura, color del agua y previsión del fenómeno El Niño.

Catastro



La teledetección aporta información espacial en cuanto a localización de las distintas parcelas, e información temática en cuanto al uso del suelo para ayudar en la gestión de impuestos. Serán necesarias imágenes de alta resolución para una buena identificación de las parcelas pequeñas y sólo será necesaria una sola imagen de la zona de estudio en un periodo de tiempo amplio (dependiendo del periodo de actualización del catastro).

Planificación urbanística

Para esta aplicación se requerirán imágenes de muy alta resolución espacial (unos 50 cm) con una buena combinación de color y realce para estudio de zonas urbanas. No es necesaria frecuencia temporal. Se podrán realizar:

- Estudios de expansión urbanística.
- Planificar rutas para transporte urbano
- Evolución de las costas españolas.



Figura 42.-Imagen del satélite worldview-2. 50cm de tamaño de píxel. Infraestructuras de la ciudad de Bangkok, Tailandia Fuente: Curso de teledetección, fotogrametría, LIDAR y ocupación del suelo IGN 2015

Otras aplicaciones

Existen muchísimas otras aplicaciones aquí no citadas, aunque se podrían destacar algunas por su frecuencia cada vez mayor:

- Detección automática de cambios
- Investigación y aplicaciones científicas
- Actualización cartográfica
- Estudios geológicos



4.3 Herramientas comerciales

ENVI: Programa centrado en el procesado y análisis de imágenes de todo tipo. Es bastante flexible con los formatos de lectura y resulta muy amigable al usuario. Hecho con el lenguaje IDL, permite incorporar módulos adicionales. ERDAS: Probablemente el programa de mayor implantación comercial, siendo un estándar en cuanto a formatos de intercambio, especialmente con los SIG. Está disponible para plataformas muy variadas. Puede programarse usando el Model Maker.

ESRI: ArcGIS es un conjunto de productos SIG. Se agrupa en varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica. ArcGIS Desktop, familia de aplicaciones SIG de escritorio, es una de las más utilizadas, incluyendo ArcReader, ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox, ArcScene y ArcGlobe, además de diversas extensiones.

Idrisi: Herramienta que incorpora bastantes utilidades de análisis digital de imágenes y, por su bajo precio, ha sido utilizado profusamente en la docencia de la teledetección. Se ha desarrollado por la Universidad de Clark (USA).

E-Cognition: Programa que incorpora múltiples aspectos de análisis de contexto y morfología matemática. Resulta idóneo para reconocimiento de patrones espaciales.

ER-Mapper: Programa australiano que recoge la mayor parte de las funcionalidades comunes en teledetección, siendo bastante eficiente en la gestión de imágenes muy voluminosas gracias a incorporar algoritmos virtuales y sistemas innovadores de compresión.

PCI-Geomatica: Nueva versión del conocido programa canadiense PCI, que incorpora en un esquema más integrado sus paquetes de análisis digital de imágenes, ortorectificación, producción de mapas y SIG. Proporciona herramientas de análisis bastante potentes, gracias a su cercana conexión con el centro canadiense de teledetección. Puede utilizarse una versión demo reducida, denominada Freeview.

DRAGON: Programa de bajo coste en entorno Windows para análisis digital de imágenes. Resulta muy adecuado para un entorno docente.

Miramón: Programa de SIG y teledetección desarrollado por el CREAM de la Universidad de Barcelona. Bajo coste y amplias funcionalidades



4.4 Herramientas gratuitas

Grass: Programa orientado a SIG y tratamiento de imágenes. Desarrollado para UNIX, en distintas plataformas, pero hay versiones para Linux y recientemente para Windows (WinGRASS). Fue inicialmente desarrollado como herramienta militar del ejército americano. Entre las organizaciones que lo utilizan destacan NASA, NOAA, USGS, etc.

Orfeo-Monteverdi: Orfeo Toolbox (OTB) es una librería de procesamiento de imágenes de teledetección desarrollada inicialmente por CNES en 2006 con el objetivo de facilitar el uso de las imágenes de diferentes sensores. En especial la constelación Orfeo (Pleiades y Cosmo-Skymed). Monteverdi es la versión más robusta y operacional.

SeaDAS: Herramienta software de la NASA para la visualización, procesamiento y análisis de imágenes de sensores de Color del Océano. Soporta las principales misiones de la NASA y recientemente de la ESA.

Multispec: Programa desarrollado por la Universidad de Purdue, pionera en los años 70. Resulta muy adecuado para el entorno docente, pues tiene pocos requisitos de hardware. También existe una nueva versión para 32 bits (32-bit version).

SPRING: Programa desarrollado por el INPE (Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales brasileño). Cuenta con una amplia lista de funcionalidades, si bien se orienta principalmente hacia el entorno SIG. Versiones en portugués, inglés y español.

Image Analysis Toolbox (IAT): Este programa desarrolla e implementa la capacidad de análisis de imagen para una variedad de imágenes multiespectrales y hiperespectral y se procesa en línea por los usuarios finales. Los resultados del análisis son georreferenciados y pueden ser completamente integrados con la información ya contenida en el MapPlace. Se añadió la suite de herramientas de análisis de la IAT a la página Asistente de Exploración del MapPlace. La apariencia y el funcionamiento del IAT fue diseñada para mantener el aspecto general y la sensación del Asistente de Exploración. El propósito de la caja de herramientas es proporcionar la posibilidad a los usuarios MapPlace experimentar con una variedad de procedimientos de imágenes y análisis en la búsqueda de objetivos de exploración.



5 TRATAMIENTO DE IMÁGENES

Algunos pasos aplicados al procesamiento de la imagen:

- Selección de la región y área exacta de interés
- Obtención del histograma
- Selección de bandas
- Configuración a DATUM de uso mundial WGS84
- Georreferenciación de la imagen
- Aplicar filtro corrección atmosférica
- Aplicar filtro vegetación
- Aplicar filtro anomalías
- Aplicar filtro zonas negras
- Obtener "PPI"= PIXEL PURITY INDEX-10,000 Iteraciones.
 - Procesar su "MNF"= "MINIMUM NOISE FRACTION"-Índice de mínima distorsión en mezcla de elementos en píxeles en 3 bandas.
 - Seleccionar las librerías espectrales (algoritmos) de los minerales incluyendo los determinantes, sus asociados y los relacionados, de acuerdo a los modelos geológicos mundialmente aceptados desarrollados por destacados científicos, geólogos e investigadores de los principales centros mundiales en este campo.

5.1 Histograma de una imagen

En procesamiento de imágenes se trabaja siempre con los tonos de grises (DN) atribuidos a los píxeles de una imagen. El histograma es una de las formas más comunes de representar la distribución de los DN de una imagen, y la más útil en procesos de imágenes. Los DN proveen la información sobre cuántos píxeles en la imagen, tiene cada posible valor de DN (que en el caso



de imágenes de 8 bits, varían de 0 a 255) o, de una forma equivalente, cual es la proporción de la imagen que corresponde a cada valor de DN. Los histogramas representan los datos digitales DN o discretos de una imagen. Esto tiene importancia al momento de procesar el realce y contraste de las imágenes.

5.2 Histograma unidimensional.

Es el caso de una sola banda. El histograma puede ser calculado para la imagen entera o para una porción de la imagen, lo cual depende del programa que utilice el usuario. Así, un histograma de una imagen entera será distinto de una porción de esa misma imagen.

La forma de un histograma provee información importante en caso de imágenes, tales como amplitud de los valores DN, lo que da la medida de contraste de una imagen, es decir, a mayor amplitud en el eje de DN, mayor es el contraste de una imagen. Un histograma no contiene información espacial sobre la imagen, por ejemplo, donde está localizado un píxel con determinada intensidad. Al computar la distribución de intensidades DN de una imagen, esa información espacial no es necesaria, ya que se trata la distribución en forma aleatoria.

Una imagen que contiene áreas con suelo y agua, presentará un histograma bimodal. Los píxeles del agua, más oscuros, aparecerán cerca del origen. El resto aparecerán en forma menos pronunciada por el resto de los DN. Una imagen con un área homogénea, con una sola población, p.e. suelo, producirá un histograma con un solo pico. Es el caso del histograma unimodal.

Por otro lado imágenes con diferentes tipos de cobertura superficial, mostraran picos múltiples, y si tuvieran diferencias significativas en sus valores medios de respuesta espectral, serán claramente separados en el histograma. La observación de un histograma brinda una aproximación sobre las características espectrales de una imagen. El proceso de comprensión de un histograma, es la base necesaria para la aplicación de funciones de realce y aumento de contrastare en imágenes.

5.3 Histograma Multidimensional.

Corresponde a las imágenes multiespectrales, es decir con dos o más bandas. Se llama “**scatograma**”, en ellos se plotean los DN de una banda contra los DN de otra banda. Mostrarán visualmente el grado de correlación entre las dos bandas consideradas, e identificarán las situaciones en que la superficie muestra diferentes tipos de respuesta en las dos bandas. Los “scatogramas” son útiles en técnicas de contrastes aplicadas en imágenes multiespectrales e hiperespectrales, para producir imágenes coloridas realzadas.



Contraste de una imagen

Las imágenes en sensores remotos son adquiridas con una cierta resolución radiométrica, normalmente es de 6 a 8 bits. En el caso de 8 bits, las imágenes poseen, 256 valores de grises entre el negro y el blanco. Sin embargo, los datos contenidos en una imagen de satélite no se esparcirán en todo el intervalo de niveles de grises, siendo lo más común que se concentren en una pequeña faja. Esto ocurre porque los sistemas registran toda una gama posible de valores de reflectancia, originada por todos los tipos de materiales naturales y sobre las más diversas

5.4 Condiciones de iluminación.

Se debe mencionar que, la vista humana sólo consigue discriminar cerca de 30 niveles de grises. Por esta razón una imagen de satélite vista en la forma como fue adquirida por el sensor, aparece con bajo contraste. Para que las informaciones en ellas contenidas puedan ser extraídas por el ojo humano, ese histograma comprimido tiene que ser entonces expandido para ocupar todo el intervalo disponible (0 a 255). Este concepto es la base del llamado aumento de contraste. El aumento de contraste es probablemente una de la más, poderosa e importante, técnicas usada en procesamiento para extraer información de imágenes en sensores remotos. A pesar de ser considerada (erróneamente) como una técnica simple, un aumento de contraste nunca revelará información ya contenida en los datos originales de la imagen; sino que permitirá tener una visión más clara de esos datos. El contraste de una imagen es una medida de dispersión de los niveles de intensidad que en ella ocurren. Por eso en el histograma de una imagen, cuanto mayor dispersión de tiene los datos, mayor contraste tendrá la imagen. Dentro de los sistemas de sensores remotos ese intervalo de apertura será siempre positivo y ocurrirá dentro del rango de 0 a 255.

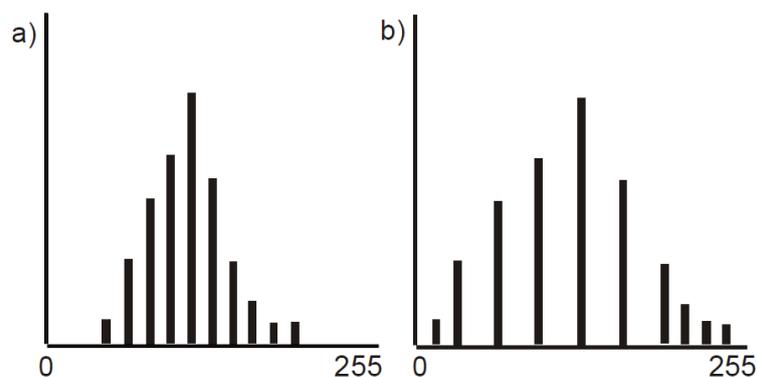


Figura 43. Histograma de una imagen. La dispersión de los niveles de grises en B es mayor que en A; por lo cual B posee mayor contraste que A.



Una de las aplicaciones más comunes de aumento de contraste, es la preparación de composición colorida usando 3 bandas de un sensor. Para lograr una buena distribución en los colores, es necesario que esas 3 bandas tengan sus contrastes aumentados. De ese modo se obtendrá una mayor variación de matices en los 3 colores básicos (rojo, verde y azul) los que serán atribuidos a las 3 bandas.

5.4.1 Transferencia de contraste

Cuando el contraste de una imagen es modificado, el histograma de la imagen resultante es diferente de la imagen original, y los dos histogramas estarán relacionados por la función de transferencia de contraste. La forma en que los sistemas de procesamiento digital de imágenes realizan la función de transferencia, se llama "Look-up Table (LUT)". Mediante ese artificio, se calcula para cada píxel de la imagen, las nuevas intensidades de contraste, expandiéndolos entre 0 y 255 (Figura 44).

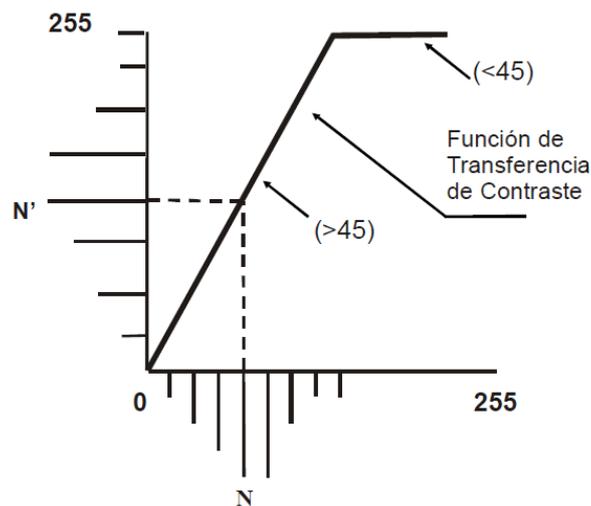


Figura 44. Histograma de una imagen, con la función de transferencia de contraste.

5.4.2 Aumento lineal de contraste

La forma más simple de transferencia de contraste de una imagen, es a través del aumento lineal de contraste. La función de transferencia es una recta, en la cual se deben tener en cuenta, la inclinación y los puntos de intersección con el eje x. Estos dos parámetros son los que controlan la cantidad de aumento de contraste y la intensidad media final. La inclinación de la



recta controla la cantidad de expansión de las intensidades de la imagen original. Dependiendo de la inclinación de la recta, se perderá información de píxeles originales, o se estarán tomando píxeles que no existen o representan información que no es importante para realzar el contraste de la imagen (Figura 45). Según los datos originales, se pueden tener los siguientes tipos de aumentos de contraste: lineal y bilineal. Dentro de los no lineales: ecualización de histograma, normalización de histograma, aumento logarítmico de contraste y aumento exponencial de contraste.

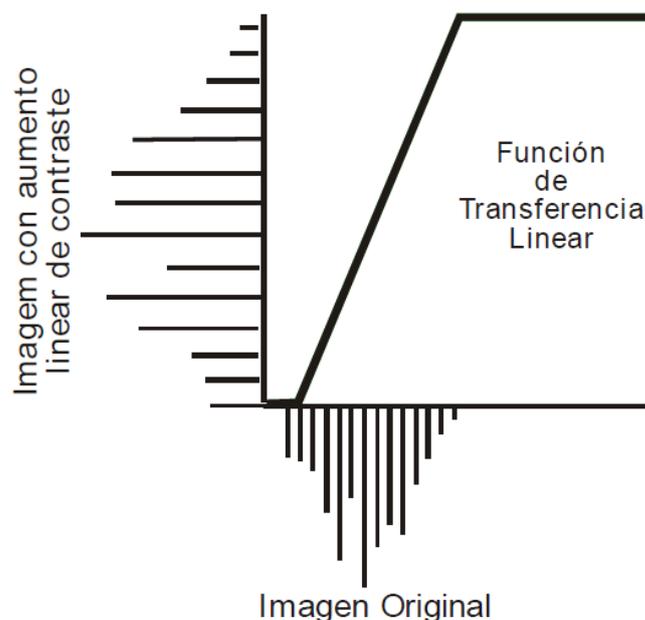


Figura 45. Histograma de una imagen, con la función de transferencia lineal de contraste.

5.5 Procesamiento de datos digitales

En procesamiento digital de imágenes, su naturaleza multiespectral y / o hiperespectrales, hace que estén compuestas por diversas bandas. Las composiciones de colores de conjuntos de tres bandas, constituyen una poderosa forma de sintetizar, en una sola imagen, gran cantidad de información, al mismo tiempo, que se representa esa información en diferentes colores, facilitando su interpretación. En la interpretación de imágenes se deben tener en cuenta tres propiedades básicas: tonalidad, textura y contexto.

1) Tonalidad: se refiere al color o brillo de los objetos que componen la escena. Los tonos están relacionados a las propiedades de reflectancia de los materiales superficiales y depende de la porción del espectro electromagnético cubierto por la imagen. 2) Textura: es la combinación de



magnitud y frecuencia de la variación tonal en una imagen, se produce por el efecto conjunto de todas las pequeñas fracciones de un área. 3) Contexto: son atributos conocidos del terreno que se estudia. Por ejemplo, un valle o un desierto.

5.5.1 Procesamiento digital en falso color

Para fotografías en blanco y negro, se utiliza película "pancromática", sensible a todas las longitudes de onda del espectro visible y aún más sensible en los extremos de la escala cromática que el ojo humano, por lo que registran una serie de detalles que a simple vista pasarían desapercibidos. Existen otras emulsiones con grado de sensibilidad distinto para las diferentes longitudes de onda, una de ellas es la "ortocromática" sensible sólo a la escala cromática comprendida entre el violeta y el amarillo.

La fotografía color, son sensibles a las longitudes de onda del espectro visible; el color se logra por la superposición de tres capas de emulsiones sensibles a la luz. Las capas del amarillo, magenta y cian, son sensibles a los colores azul, verde y rojo, respectivamente. Una cuarta capa situada debajo de la amarilla filtra las radiaciones azuladas, producidas por la dispersión en la atmósfera de parte de la radiación electromagnética proveniente del sol. Esta capa evita que esta radiación llegue a las capas magenta y cian. Una vez revelada la película, los colores resultantes son semejantes a los originales.

Las fotografías color ofrecen todas las ventajas de las fotografías pancromáticas; además de la mayor facilidad para la identificación de materiales, aportan los cambios de matiz, dato que falta en las fotografías blanco y negro, donde el único elemento discriminatorio del color de un material es la variación dentro de la gama de grises.

La fotografía de película infrarroja, aparecida en 1945, es también conocida como "falso color", porque los objetos no aparecen con los mismos colores que los originales. Tiene más capacidad de penetración a través de la niebla debido a que el extremo azul del espectro es eliminado mediante filtros especiales. Son sensibles al verde, rojo e infrarrojo hasta 0.9 micrones (Figura 46).

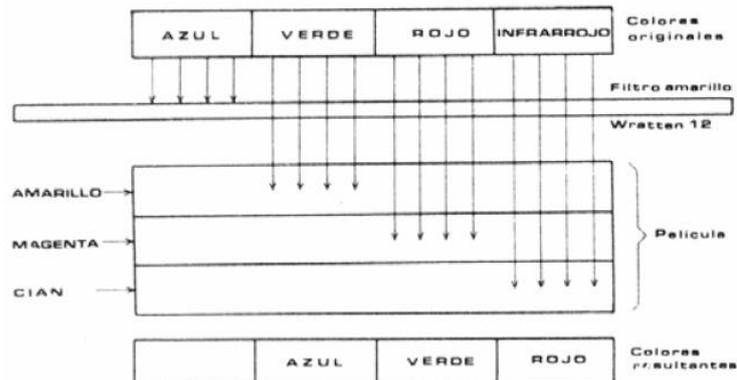


Figura 46. Película infrarroja.

La película infrarroja está formada por tres capas, amarillo, magenta y cian, sensibles a las radiaciones electromagnéticas correspondientes a los colores verde, rojo e infrarrojo, respectivamente. Una vez revelada la película, los colores finales no responden a los originales.

5.5.2 El color digital en imágenes

La composición de color, falso color, es la forma más tradicional de combinar tres bandas espectrales de sensores de satélites. El sensor Thematic Mapper del satélite Landsat, tiene 7 bandas; tres de ellas dentro de las longitudes de onda correspondientes al azul, verde y rojo. Con estas bandas puede lograrse una composición del color muy similar al natural, es el llamado "Visible" o "color real simulado".

Otra combinación de falso color, son en el sensor MSS, RGB=754, y el sensor TM, RGB=432. Produce imágenes donde la vegetación verde, refleja intensamente la energía en las longitudes de onda del infrarrojo. Esto fue muy utilizado en diferentes conflictos bélicos para separar vegetación verdadera de camuflaje.

Se pueden hacer múltiples combinaciones de color que se emplean en el análisis visual, pero la más característica es la que se denomina "falso color compuesto (FCC)". En lugar de aplicar los colores azul, verde y rojo a sus respectivas bandas del espectro electromagnético, se aplican a las bandas verde (V), rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC) respectivamente. De esta forma se obtendrá otra gama de colores que generalmente resulta muy útil desde el punto de vista de la interpretación visual permitiendo realzar e identificar ciertos rasgos en la imagen. A partir de las



imágenes TM se ha comprobado la eficacia de la combinación de las bandas 4/7/5 para detectar zonas quemadas. 7/4/3 para discriminación de cultivos.7/3/1 para estudios oceanográficos y cuerpos de agua. 3/4/5 y 4/5/7 para estudio de diferentes ambientes geológicos.

5.5.3 Filtros

Los filtros se aplican en análisis digital de imágenes para acentuar o suavizar el contraste espacial o variaciones en la frecuencia de los valores de DN de los píxeles que componen la imagen. Estas funciones hacen un realce visual de la imagen para mejorar su interpretación. Estos tipos de filtros operan por una matriz móvil, denominada “kernel” o máscara, con un tamaño variable. Hay una imagen de entrada para ser filtrada, una máscara o “kernel” que es el filtro, y una imagen resultante filtrada. Cada elemento de la matriz, “kernel” o máscara, contiene un coeficiente o factor de ponderación. El procedimiento es el siguiente, suponiendo un filtro de 3x3: el filtro se posiciona en la esquina superior izquierda de la imagen, multiplicando cada DN de las 9 celdas de la imagen, por el respectivo valor de las 9 celdas del filtro; substituye el valor del píxel central de esa porción de imagen (en este caso sería el píxel de la 2° línea y 2° columna) por la suma de esos 9 valores, encontrándose entonces el nuevo valor del píxel de la imagen de salida. El próximo paso, el filtro se mueve un píxel a lo largo de la línea y realiza nuevamente la operación, encontrándose el valor del píxel de la 2° línea y 3° columna de la imagen de salida. Esta operación se realiza píxel a píxel por toda la imagen (Figura 29). El tamaño del filtro aplicado determina el grado de suavizado o el tamaño de los elementos lineales a destacar.

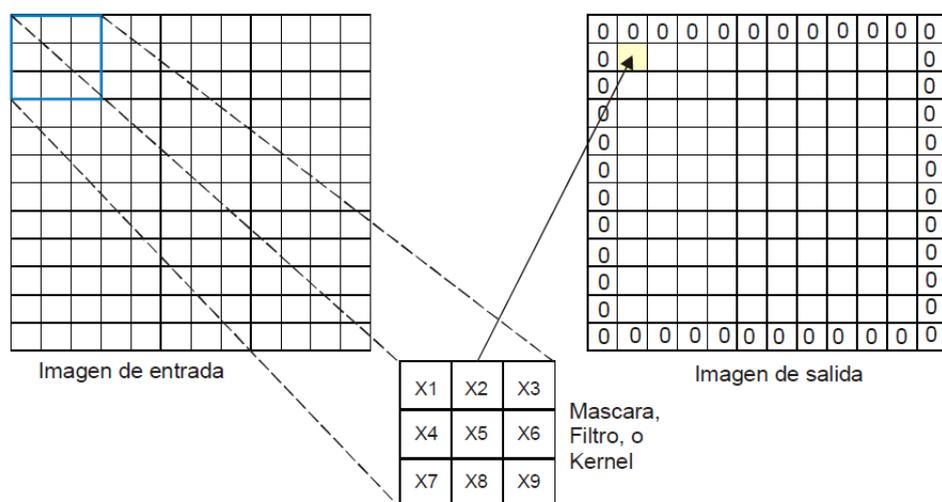


Figura 47. Esquema de filtro.



Sin embargo a diferencia de las técnicas anteriores, el filtrado modifica los valores de DN originales, por lo cual se deben tener en cuenta para los tratamientos posteriores. Los filtros más usados son los que se aplican en el dominio espacial. Existen dos tipos de filtros básicos: los de paso bajo y los de paso alto.

- **Filtros de Paso Bajo:** su función es eliminar la información de alta frecuencia, dejando pasar las de baja frecuencia, produciendo un suavizado en la imagen resultante. Remueve los ruidos electrónicos comunes en imágenes de sensores remotos, pero como efecto negativo produce un “desenfoco” en toda la imagen produciendo pérdida de información de detalle.

- **Filtros de Paso Alto:** eliminan las frecuencias bajas, dejando apenas las de alta, sin eliminar los de baja, normalmente expresadas por bordes o límites entre áreas de diferentes valores de DN. Resaltando ciertos rasgos donde el contraste espacial es alto.

Los resultados que se obtienen con los distintos filtros usados en imágenes son:

- Suavizado: corrige el ruido y los errores producidos como consecuencia de la transmisión de los datos de la imagen. Realizan una medida local sobre el entorno de cada píxel, de manera de equipararlo con los píxeles vecinos. Tienen el inconveniente de causar difusión en los bordes. Para evitarlo se utilizan los denominados filtros no lineales en los que se especifica un valor umbral, de forma que sólo actúan en los casos en los que la imagen difiera del original en una cantidad al umbral establecido. Los filtros de mediana se basan en sustituir el ND del píxel central por la mediana de los DN correspondientes a los píxeles vecinos; estos filtros son menos sensibles a los valores extremos y modifican menos los valores originales que el filtro de media, preservando mejor los bordes.

- Refuerzo de bordes: se aplica para producir imágenes con definiciones más claras en los bordes, lo cual se consigue aumentando la diferencia de valor entre los píxeles adyacentes a un borde. Se asigna a la matriz un coeficiente tal que refuerce el contraste entre el píxel central y los vecinos. Se acentúan los contornos entre áreas homogéneas, como parcelas, contactos entre formaciones litológicas. Se acentúan rasgos lineales, como rutas, fracturas, diques. Estos filtros también se pueden construir para realzar determinadas direcciones (filtros direccionales) que resultan útiles en la detección de determinado sistema de estructuras lineales (fallas, diabladas, diques).



- Extracción de bordes: también denominados detectores de contornos. Su finalidad es tener una imagen que contenga exclusivamente información sobre los bordes existentes en la imagen original. El trazado de los contornos resulta de representar los vectores direccionales cuyos módulos son las diferencias registradas en todas las direcciones que superen un determinado umbral. Son filtros de paso alto que hacen 0 (cero) los valores digitales de las áreas de la imagen que no registren variaciones. Los más empleados son los Sobel y Roberts.

5.6 Extracción de información

Los procesos para restaurar y mejorar la visión de la imagen utilizados por las computadoras, mejoraron el estudio de las interpretaciones de las imágenes. Los diferentes procesos que identifican y extraen la información, utilizando las computadoras, tienen la capacidad de identificar y extraer regiones o porciones de información. Un usuario, debe instruir a la computadora y debe evaluar la importancia de la información extraída.

5.6.1 Cocientes de bandas

Una de las formas de extraer información es mediante los cocientes entre imágenes. Los cocientes entre bandas dividen los DN en una banda por el DN correspondiente en otra banda, para cada píxel, trazando los nuevos valores como una imagen.

Un total de 15 imágenes, más un número igual de proporciones inversas (el recíproco de las primeras 15 proporciones) puede prepararse a partir de estas seis bandas originales. Los extremos negros y blancos de la escala de grises representan los píxel con una gran diferencia en la reflectividad, entre las dos bandas espectrales. Los espectros más oscuras son áreas dónde el denominador de la razón es mayor que el numerador. Recíprocamente el numerador es mayor que el denominador para los espectros luminosos. Donde el denominador y numerador son iguales, no hay diferencias entre las dos bandas.

Por ejemplo, una imagen con vegetación mostrará, máxima reflectancia en la TM 4 del infrarrojo y más baja en la TM 2 del verde; así la razón $4/2$ de una imagen con vegetación, mostrará los espectros más luminosos, en correlación con cultivos.

Si se tienen materiales rojos, con alto volumen de óxido férrico, tendrán su reflectancia máxima en la banda 3. Así, en la razón $3/1$, los afloramientos de con materiales férricos tendrán espectros muy luminosos. Cualquiera de estas tres razones puede combinarse para producir una



imagen color asignando cada imagen a un color primario. Por ejemplo razones $3/1$, $5/7$ y $3/5$ puestas en las bandas del RGB respectivamente; mostraran más variaciones de color con mucha información geológica y grandes contrastes entre unidades litológicas que las imágenes de color convencionales.

También se pueden realizar otras combinación, como dividir la resta y la suma de dos bandas, por ejemplo $(4-5) / (4+ 5)$. Se usan relaciones de este tipo para procesar datos de los satélites medioambientales.

En geología los cocientes más usados son:

TM3/TM1: para materiales limolíticos.

TM5/TM7: arcillas, carbonato, áreas de alteración hidrotermal.

TM5/TM4: buena discriminación de rocas y vegetación.

5.6.2 Clasificación multiespectral

Las imágenes representan la respuesta espectral de cada píxel, en cada una de sus diferentes longitudes de onda. Esa respuesta espectral varia de una a otra banda, causando que un objeto que se identifica en una banda en otra no se vea. La clasificación de Multiespectral es un proceso de identificación y extracción de información de esas firmas espectrales; asignando los píxeles, a diferentes categorías (clases) basado en las firmas espectrales similares. Las diferentes clases pueden ser, agua, agricultura, urbanismo, desierto, montañas. Teniendo en cuenta la escala, otras clases pueden ser, granito, riolitas, yeso, areniscas rojas, pelitas, calizas, volcanitas terciarias, etc..

La clasificación es una fase fundamental en el análisis de imágenes y su objetivo es categorizar los píxeles de la imagen en varias clases para obtener mapas temáticos de las distintas coberturas existentes en la imagen. Hay dos grandes tipos de clasificaciones multiespectrales:

1. Clasificación supervisada. El analista define en la imagen una área pequeña, llamada muestra, que es representativa de cada categoría o clase del terreno que se elija. Se usan valores espectrales para cada píxel en un sitio de prueba para definir el espacio de decisión para esa clase. Después de que se definen los grupos para cada sitio de prueba, la computadora clasifica



todos los píxel restantes de la imagen tomando como base esas pruebas. Es decir busca todos los píxeles similares o iguales a esa prueba tomada por el analista.

2. Clasificación No Supervisada. El analista elige, cuantas clases debe buscar, y la computadora separa los píxel en esas clases sin la dirección del analista. La clasificación presenta un problema en la última etapa, y consiste en encontrar la relación o asignación entre las clases espectrales presentes en la imagen y la realidad de la escena. Una misma clase espectral, puede corresponder a varios objetos naturales, mientras que un mismo objeto puede tener varias respuestas espectrales. En las técnicas de clasificación la etapa crítica, es la identificación de las clases espectrales y la asignación de las categorías.

5.6.3 Métodos Mixtos

Tanto el método supervisado como el no supervisado presentan ventajas y desventajas. El supervisado puede resultar subjetivo pues el analista establece categorías sin valorar las características espectrales de la imagen y el segundo no garantiza que las clases establecidas tengan un significado real.

5.7 Correcciones de imágenes

El objetivo de realizar las correcciones en las imágenes adquiridas por los sensores remotos es eliminar o minimizar las distorsiones o degradaciones producidas durante el proceso de adquisición de las imágenes. La naturaleza de esas distorsiones o degradaciones dependen principalmente del tipo de sensor (cámara o sensor de barradura) utilizado y del tipo de plataforma (satélite o avión).

5.7.1 Correcciones Radiométricas

Las distorsiones radiométricas son cambios producidos en los valores de intensidad (nivel de gris) de los píxeles que componen una imagen. Dichas distorsiones son resultado de efectos de la atmósfera sobre el Espectro Electromagnético. La atmósfera actúa de dos maneras: 1) extendiendo selectivamente la energía en relación a los varios longitudes de onda; y 2) absorbiendo la energía en determinadas longitudes de onda, debido a los gases atmosféricos.



Además de la atmósfera, otro tipo de distorsión encontrada en las imágenes, son los efectos de los instrumentos que componen los sensores.

Existen varios métodos, para realizar las correcciones por efectos atmosféricos. Desde ajustes de gain/offset, indicados para imágenes multiespectrales, como Landsat, Spot, AVHRR, etc.; hasta métodos más sofisticados como ATRem y EFORT, indicados para imágenes de sensores hiperespectrales, como AVIRIS, Hydice, Hyperión EO-1.

Todos estos métodos realizan la siguiente función en los datos de las imágenes: transforman los valores de radiancia a reflectancia, lo que produce que se pueda comparar los valores de reflectancia de los píxels con los de reflectancia de los materiales (roca, suelo, agua, vegetación, etc.) medida en el campo o en laboratorio.

5.7.2 Correcciones Geométricas

Las principales fuentes de distorsiones geométricas en imágenes son:

- la rotación de la Tierra durante el tiempo de adquisición de las imágenes;
- la velocidad limitada de barradura de los sensores (en relación a la velocidad de la plataforma);
- el campo de visada largo de algunos sensores;
- la curvatura de la Tierra;
- las variaciones en la latitud y la velocidad de altitud de la plataforma;
- efectos panorámicos relacionados a la geometría de mapeo.

Los procesos de correcciones geométricas tienen las siguientes etapas:

- determinación de la relación entre el sistema de coordenadas del mapa y de la imagen,
- establecimiento de un conjunto de puntos definiendo los centros de los píxeles en la imagen corregida; ese conjunto de puntos es definido por una grilla con las propiedades cartográficas del mapa (escala, proyección, etc.),
- cálculo de los valores de intensidad de los píxeles en la imagen rectificadas, por interpolación de los DN de la imagen original.



5.7.2.1 Métodos de Corrección Geométrica

La relación entre dos sistemas de coordenadas (mapa e imagen) puede ser establecida en las siguientes dos maneras: 1) conocimiento de los parámetros geométricos de la órbita de los satélites y de otras variables como modelo de geometría orbital; 2) definición de puntos de control en el terreno (GCPs). Estos dos métodos son generalmente utilizados de forma complementaria.

5.7.2.1.1 Modelo de Geometría Orbital

Se basa en el conocimiento de las características de la órbita del satélite, de la rotación de la Tierra y del factor de muestreo del sensor, la precisión es baja con error medio del 2%.

Elimina distorsiones de tipo: cambios de escala, corrección del ángulo de inclinación entre órbita y eje terrestre. Este método de corrección es generalmente aplicado en el proceso inicial.

5.7.3 Rectificación por GCPs

Es aplicada como opción, en forma complementaria a la anterior para refinar la precisión de la corrección y adecuar la imagen al mapa en forma más precisa. El grado de precisión va a depender del GPS (Global Positioning Systems) utilizado.

Los GPS son identificados interactivamente, extrayendo sus coordenadas de la imagen en líneas y columnas en el mapa en unidades cartográficas (p.e. UTM) valiéndose de una mesa digitalizadora para mayor precisión.

Un mínimo de 6 a 10 GPS son recomendados para una imagen de 1000 x 1000 píxeles, los cuales deben estar bien distribuidos en toda la imagen.

La transformación de coordenadas es realizada por un polinomio lineal de bajo orden (generalmente primer orden), estableciendo el ajuste por el método de cuadrados mínimos, recibe el nombre de transformación AFIM (affine transformation)..sdcasc.

El programa a utilizar debe tener la opción de error de posicionamiento, antes de aplicar la transformación, y de eliminación de GPS con error alto (error máximo ideal, es de 30 metros para el caso del Landsat / TM).



5.7.4 Rectificación por Interpolación

Los procesos de rectificación producen la creación de una nueva imagen cuyos píxeles no corresponden espacialmente a la imagen original, debiendo entonces asignar un nuevo valor a los nuevos DN en la nueva imagen. Para lo cual se usa el remuestreo por interpolación de valores.

Los métodos por interpolación más usados, son: el vecino más cercano (nearest neighbor), distancia mínima y convolución cúbica.

El método a escoger dependerá de la utilidad que se le dé a la imagen rectificadora. Método del vecino más próximo es el que mejor preserva los DN de la imagen original en la imagen rectificadora. Ese método es el indicado si luego se realizaran procesamientos de clasificación, componentes principales, operaciones aritméticas, etc).



6 APLICACIONES

6.1 Introducción

La información recogida por los sensores de teledetección es procesada y analizada mediante programas software conocidos como herramientas de procesamiento de teledetección. Existen un gran número de programas de código abierto y otras tantas de pago para procesar esta clase de información. A continuación se enumeran las herramientas de cada tipo más usadas para el procesamiento de las imágenes de teledetección. Además, para cada una de ellas se incluye una información resumida de sus principales aplicaciones:

6.2 Aplicaciones en distintas longitudes de onda

AZUL VISIBLE: Cartografía de aguas someras. Diferenciación de suelo y vegetación.

VERDE VISIBLE: Diferenciación de la vegetación por su salud.

ROJO VISIBLE: Diferenciación de la vegetación por especies.

INFRARROJO CERCANO: Cartografía de la vegetación. Cartografía del vigor/salud de la vegetación. Diferenciación de la vegetación por especies.

INFRARROJO MEDIO: Diferenciación de los tipos de rocas por composición. Detección de humedad en la vegetación y suelo. Cartografía de la estructura geológica. Trazado de límites *tierra/agua*.



Tabla 5. Bandas de ASTER. FUENTE: Aster Users Handbook.

| Agricultura y sus recursos | Mapeo de Uso de la Tierra | Geología | Hidrología | Costas | Monitoreo Ambiental |
|--|---|---|--|--|---|
| Discriminación de vegetales y tipos de madera | Clasificación del uso de la tierra | Mapeo Geológico | Determinación de límites de cuerpos | Determinación de concentración de sedimentos. | Monitoreo de Deforestación |
| Mediciones de cosechas y madera | Mapeo cartográfico | Revisión de mapas geológicos | Mapeo de inundaciones | Mapeo de cambios de líneas costeras | Monitoreo de actividad cenizas volcánicas |
| Precisión en el manejo de cultivo de la tierra | 2.3 Categorizing land capabilities | Clasificación de tipos de rocas | Determinación de área nevadas y englazadas | Mapeo de arrecifes y costas de aguas someras | Monitoreo y mapeo de aguas contaminadas |
| Supervisado de cosechas y bosques | Monitoreo urbano | Mapeo de depósitos volcánicos de superficie | Medición de cambios y extensión de glaciares | Mapeo y monitoreo trayectoria de témpanos. | Determinación de efectos de desastres naturales |
| Determinación del rango de biomasa y salud | Planificación urbana regional | Estructural y Tectónica | Medición de sedimentos en turbidez | Erosión e inundación de playas | Impacto de zonas de desertificación |
| Determinación de condiciones de la tierra | Mapeo de carreteras | Recursos Minerales | Monitoreo de irrigación de campos | Monitoreo de arrecifes de corales | Rastreo de derrame de petróleo. Bitumen. |
| Monitoreo de desiertos | Mapeo de limite de tierras con agua | Petróleo y gas (Bitumen) | Monitoreo de polución en lagos | Determinación de patrones de circulación costera | Monitoreo de zonas quemadas. |
| Evaluación de la fauna y su hábitat | Monitoreo de transportes y rutas | Geomorfología | Estimación de escurrimiento de nieve fundida | Medición de temperatura del mar en superficie | 6.8 Mapping and monitoring lake eutrophication |
| Caracterización del rango de vegetación del bosque | Planeamiento de áreas e industrias desechadas | Mapeo de impacto de cráteres | Caracterización de lluvia tropical | | Monitoreo de polución en labores mineras. |
| Supervisión de infecciones por insectos | Mapeo y monitoreo de zonas lluviosas | | | | Monitoreo de plumas volcánicas |
| Monitoreo de prácticas de irrigación | Rastreo de impacto económico en el uso de la tierra | | | | |



6.3 Introducción a los productos de imágenes

6.3.1 Explicación de los productos corrientes

Uno de los aspectos más valiosos de las imágenes digitales es que pueden ser procesadas, manipuladas y realzadas por computadora para generar una serie de productos de información diferentes. A continuación se enumeran algunos de los productos más corrientes que se extraen de las imágenes obtenidas por satélite. Muchos de ellos pueden adquirirse directamente del distribuidor de imágenes. También es posible comprar las imágenes en bruto y contratar a una empresa especializada para extraer de ellas productos personalizados. Esta tarea puede llevarla a cabo el usuario final si dispone de programas de procesamiento de imágenes.

Mapas de clasificación: Son probablemente los de tipo más común entre los creados a partir de imágenes de satélite. En estos mapas temáticos, las zonas de terreno se clasifican y agrupan en clases de ocupación y uso del suelo. Las clasificaciones pueden ser amplias, como zonas urbanas, boscosas, de campo abierto y de aguas. También pueden ser muy específicas, diferenciando campos de maíz, trigo, soja o remolacha. Normalmente, los distintos tipos de terreno están codificados por colores. También se utilizan para determinar zonas de interés.

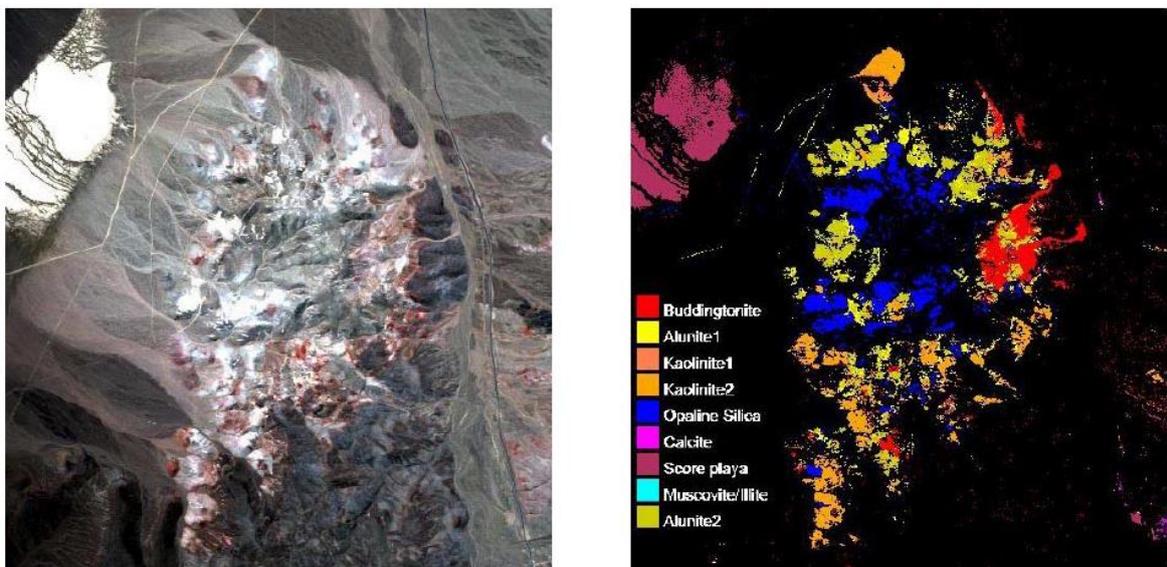


Figura 48. Izquierda: Imagen Color Real del sensor HyMap; Derecha: Imagen de clasificación de minerales a partir de este sensor Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team.



MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN (DEM) — Llamados también modelos digitales del terreno, estos conjuntos de datos contienen medidas de la elevación del terreno obtenidas aplicando procedimientos fotogramétricos a pares de imágenes estereoscópicas solapadas. Los DEM se usan con frecuencia para crear modelos tridimensionales y en los programas informáticos de visualización comúnmente usados en ingeniería civil, cartografía geológica y simulación de vuelo. Actualmente existen dos conocidos satélites que toman imágenes con un par estereoscópico: Ikonos y Aster de los cuales se pueden obtener modelos de elevación digital a 1 y 15 metros respectivamente.

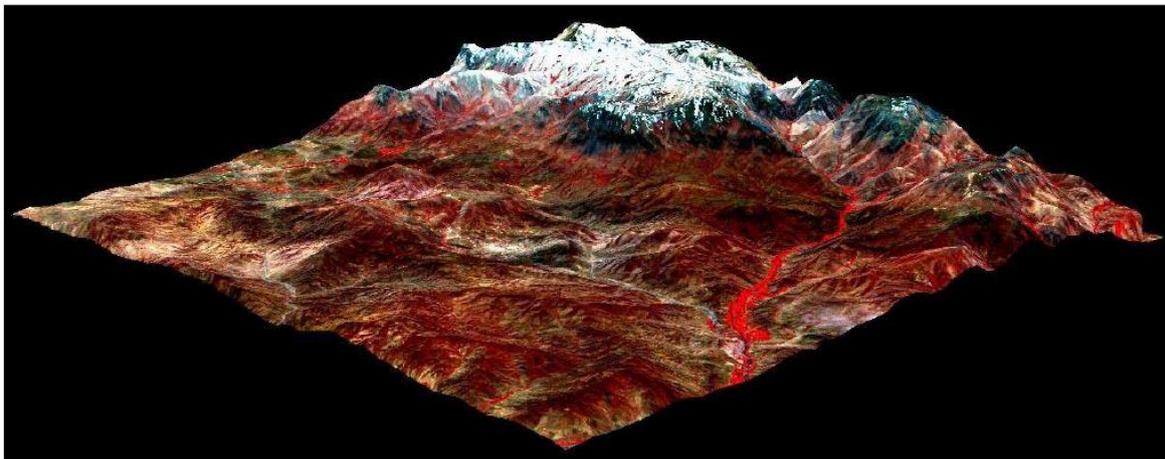


Figura 49. Imagen 3D creada a partir de una imagen ASTER (Combinación Infrarrojo Color y DEM generado con el par estereoscópico que dispone este satélite) Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team.

FUSIONES — Es posible fundir dos tipos de imágenes de satélite distintas para crear un producto híbrido que aune las ventajas de ambas imágenes. Lo más habitual es fundir una imagen pancromática, como la SPOT de 10 metros con otra multiespectral SPOT de 20 metros o Landsat de 30 metros. Esto produce una imagen que contiene los datos multiespectrales y la información espacial de la imagen pancromática.

MOSAICOS — Es frecuente que la escena de la imagen del satélite no abarque el área de interés en su totalidad. En ese caso se pueden solicitar dos o más escenas adyacentes y el distribuidor efectuará un mosaico utilizando complejos algoritmos informáticos que hagan coincidir exactamente los bordes de las escenas y equilibren los colores para crear una base de datos sin fisuras de la zona extensa.

DETECCIÓN DE CAMBIOS — Para crear una imagen de detección de cambios se aplican algoritmos especiales a dos imágenes de satélite de la misma zona, tomadas en momentos



distintos. El ordenador examina todos y cada uno de los píxeles de las dos escenas para determinar qué valores de píxel han cambiado. En la mayoría de los casos, el área modificada se resulta en color. Este procedimiento se utiliza habitualmente para cartografiar automáticamente extensas zonas e identificar cambios como nuevos edificios, carreteras, urbanizaciones y también desastres naturales como inundaciones, aluviones, etc. De este modo se identifican también cambios radicales, como la transformación de bosques en zonas de cultivo.

| RESOLUCIÓN DIGITAL | |
|-------------------------|---------------------------|
| Resolución de la Imagen | Escala topográfica típica |
| 1000 metros | 1:1.500.000 |
| 30 metros | 1:80.000 |
| 20 metros | 1:50.000 |
| 10 metros | 1:25.000 |
| 5 metros | 1:12.000 |
| 1 metro | 1:2.000 |

Figura 50. relación entre resolución digital los productos | y escala.

Las imágenes obtenidas por los satélites pueden tratarse para realzar su apariencia visual y su exactitud geométrica. Al comprar las imágenes, el proveedor ofrece múltiples posibilidades de procesamiento y es muy importante considerar qué grado de procesamiento se va a necesitar. Esta elección se hará, principalmente, de acuerdo con el tipo de programa informático que se utilizará para trabajar con las imágenes.

DATOS EN BRUTO — Se trata del nivel inferior del procesamiento. En la mayoría de las imágenes de satélite, los datos en bruto poseerán cierto grado de corrección geométrica y radiométrica, lo que significa, simplemente, que se han eliminado las distorsiones causadas por el propio sensor.

CORRECCIÓN GEOMÉTRICA — Los datos de las imágenes se han vuelto a muestrear para corregir los errores geométricos causados por la rotación terrestre y el ángulo de incidencia del sensor.

GEOCODIFICACIÓN BÁSICA — Los datos se transportan a coordenadas geográficas utilizando para ello la información de ubicación registrada por el satélite cuando se captó la imagen que, a continuación, se traslada a la proyección topográfica preferida por el cliente.



GEOCODIFICACIÓN TOTAL — Los datos se corrigen mediante puntos de control en tierra, tanto procedentes de mapas como de mediciones GPS.

ORTORRECTIFICACIÓN — La ortorrectificación es un proceso computacional por el que se eliminan de las imágenes las distorsiones horizontales y verticales principalmente debidas al relieve. Este proceso mejora de forma espectacular la calidad y utilidad de la imagen porque le otorga las mismas cualidades que posee un mapa.

REALCE — El proveedor aplica algoritmos informáticos para aumentar la calidad de la imagen y destacar ciertos rasgos. El realce más común realizado por el proveedor es el llamado “Contrast Stretching”, por el que se reasignan los valores de reflejando de los píxeles para abarcar toda la gama de la escala de 256 tonos de gris. Este procedimiento se asemeja a ajustar el mando de un receptor de televisión. Evita que se pierdan detalles en zonas muy oscuras o muy brillantes.

6.4 Exploración geominera, Cartografía de litologías y exploración de minerales

Las imágenes de satélite han demostrado ser una herramienta importante en la exploración geológica – minera, minimizando costos en la etapa exploratoria.

Las imágenes de satélite se han aplicado con mucho éxito en la geología estructural, los mosaicos de estas permiten la detección de grandes rasgos lineales, la banda del infrarrojo cercano es la más utilizada para esta tarea porque proporciona mayor información debido a la respuesta espectral de determinadas litologías en este rango de la longitud de onda.

En los últimos años la aparición de una serie de sensores multiespectrales e hiperespectrales, han permitido discriminar entre distintos tipos de litológica, identificar minerales como la alunita, illita, clorita, caolinita, epidota, óxidos, entre otros. Las bandas más usadas para el mapeo de minerales son las correspondientes al espectro visible e infrarrojo. Para el caso de los silicatos de utiliza las bandas del infrarrojo térmico.

Las imágenes satelitales también son utilizadas en la elaboración de mapas geomorfológicos, actualización de cartas geológicas

Las imágenes más utilizadas en la exploración geológica – minera son: LANDSAT, ASTER, ALI, QUICKBIRD, SPOT, HYPERION y los aerotransportados: GEOSCAN, MASTER, AVIRIS, HYPMAP, entre otros.



La caracterización de la superficie terrestre mediante sensores remotos ha posibilitado, entre otras aplicaciones geológicas, la localización de áreas de potencial minero.

A continuación presentamos un breve resumen de las imágenes que utilizamos en la exploración geológica – minera.

6.4.1 Imágenes del sensor ASTER

ASTER es un sensor multiespectral, sus escenas cubren aproximadamente 60 Km² y tienen una resolución temporal de 16 días al igual que LANDSAT. ASTER se aplica en estudios de recursos naturales en general

Los datos de ASTER se han utilizado ampliamente para una amplia gama de aplicaciones geológicas, incluyendo cartografía litológica y estructural, la exploración minera, la prospección de hidrocarburos y geología ambiental.

El uso de los datos ASTER en la exploración litológica / estructural de la mena en particular para los pórfidos de cobre, oro epitermal, cromita, magnetita, sulfuros masivos y el uranio se ha incrementado en los últimos años.

La capacidad de los datos multiespectrales ASTER para el mapeo geológico mineral y la alteración se ha simulado para Mountin Fitton, Australia del Sur (Hewson et al., 2001). Este sitio de la prueba ha sido objeto de reconocimiento previamente por AMS hiperespectral visible de onda corta (HyMAP), infrarrojo térmico escáner multiespectral (TIMS) de datos y varias campañas de campo recogiendo mediciones espectrales relevantes. Aplicaron tramo descorrelación en ASTER bandas simulados 3-2-1 para delinear el drenaje y la vegetación, y la banda de 13-12-10 para la identificación de áreas ricas en cuarzo. También Mezcla implementado Tuned filtrado adaptado, método de las bandas SWIR ASTER simulados para obtener finales miembros espectralmente sin mezclar relacionados con las áreas ricas en minerales de ensambles de alteración hidrotermalmente. Sus resultados mostraron una buena precisión con mediciones espectrales de campo, y se comparan bien con salidas HyMAP y TIMS que fueron recogidos previamente para la zona de estudio.



| Sensor | Subsistema | Banda No. | Rango Espectral | Resolución Especial | Resolución Radiométrica |
|--------|------------|---------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| ASTER | VNIR | 1 | 0.52 - 0.60 | 15 m | 8 bits |
| | | 2 | 0.63 - 0.69 | | |
| | | 3N | 0.78 - 0.86 | | |
| | | 3B | 0.78 - 0.86 | | |
| | SWIR | 4 | 1.600 - 1.700 | 30 m | 8 bits |
| | | 5 | 2.145 - 2.185 | | |
| | | 6 | 2.185 - 2.225 | | |
| | | 7 | 2.235 - 2.285 | | |
| | | 8 | 2.295 - 2.365 | | |
| | | 9 | 2.360 - 2.430 | | |
| | TIR | 10 | 8.125 - 8.475 | 90 m | 12 bits |
| | | 11 | 8.475 - 8.825 | | |
| | | 12 | 8.925 - 9.275 | | |
| | | 13 | 10.25 - 10.95 | | |
| 14 | | 10.95 - 11.65 | | | |

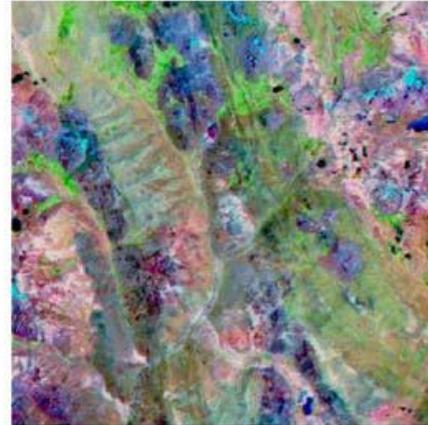


Figura 51. Características de las bandas del sensor ASTER

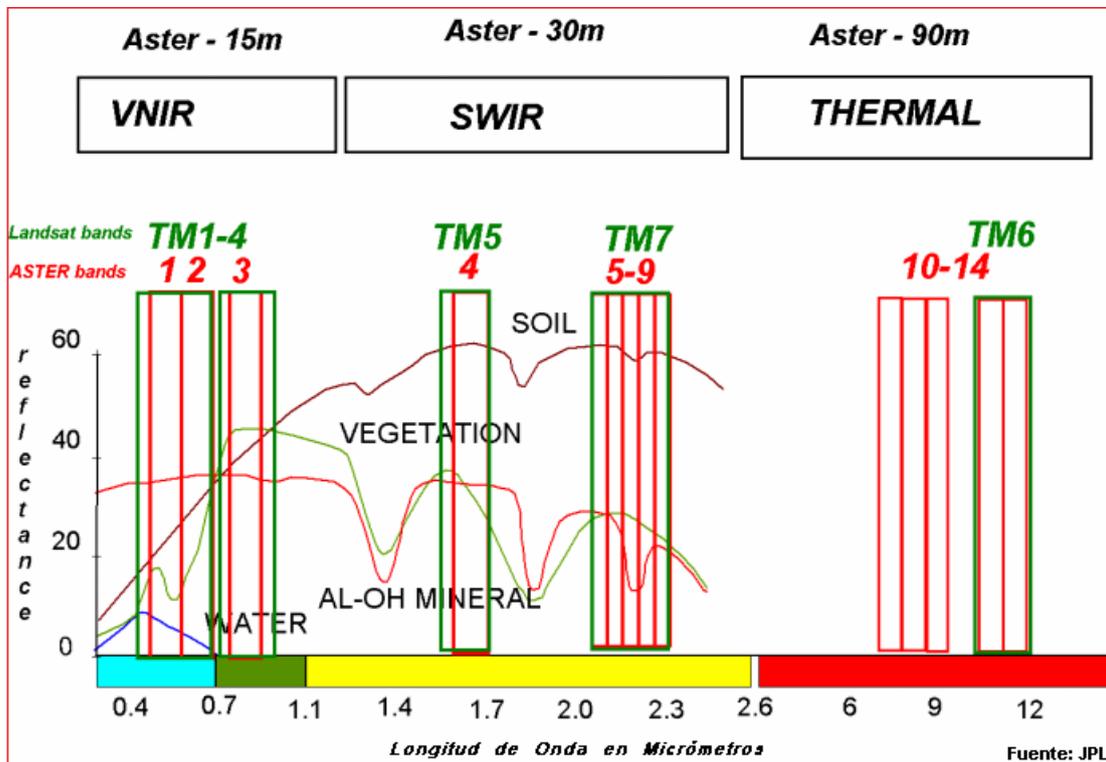


Figura 52. Comparación entre LANDSAT y ASTER

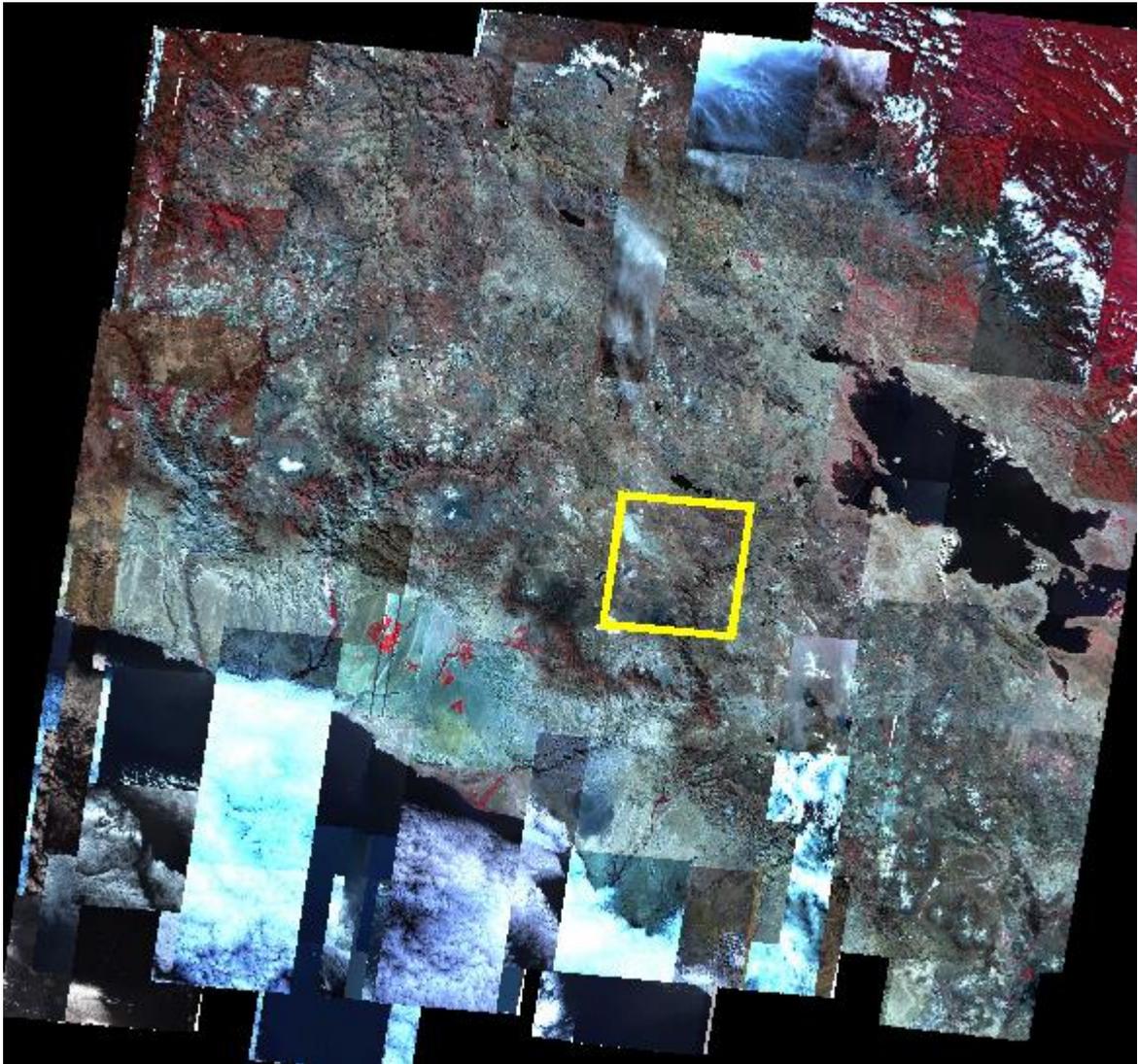


Figura 53. Comparación. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team.

ASTER tiene imágenes de todo el mundo desde el año 2000 hasta la actualidad

Las características espectrales y geométricas fueron diseñadas especialmente para aplicaciones geológicas. ASTER permite la discriminación litológica, mapeo de estructuras geológicas y la identificación de áreas de alteración hidrotermal, a su vez gracias a las 6 bandas en el SWIR, nos permite analizar las características de absorción de distintos minerales. Entre los minerales que se pueden discriminar se encuentran la caolinita, alunita, illita, clorita, epidota, jarosita, dickita, sericita, entre otros.

Aster también es muy utilizada en la generación de modelos de elevación del terreno.



El Complejo ígnea Bushveld (BIC) es una gran intrusión ígnea en capas dentro de la corteza terrestre, se expone en el borde de la cuenca del Transvaal en Sudáfrica. El complejo contiene las mayores reservas del mundo de los metales del grupo del platino, platino, paladio, osmio, indio, rodio y renio, junto con grandes cantidades de hierro, estaño, cromo, titanio y vanadio. Numerosas minas, balsas de residuos y los estanques de lixiviación se muestran en azul en la imagen ASTER. La imagen fue adquirida 24 de octubre del 2006, tiene una superficie de 52 por 38 km, y está situado a 25,6 grados de latitud sur, 27,4 grados de longitud este.

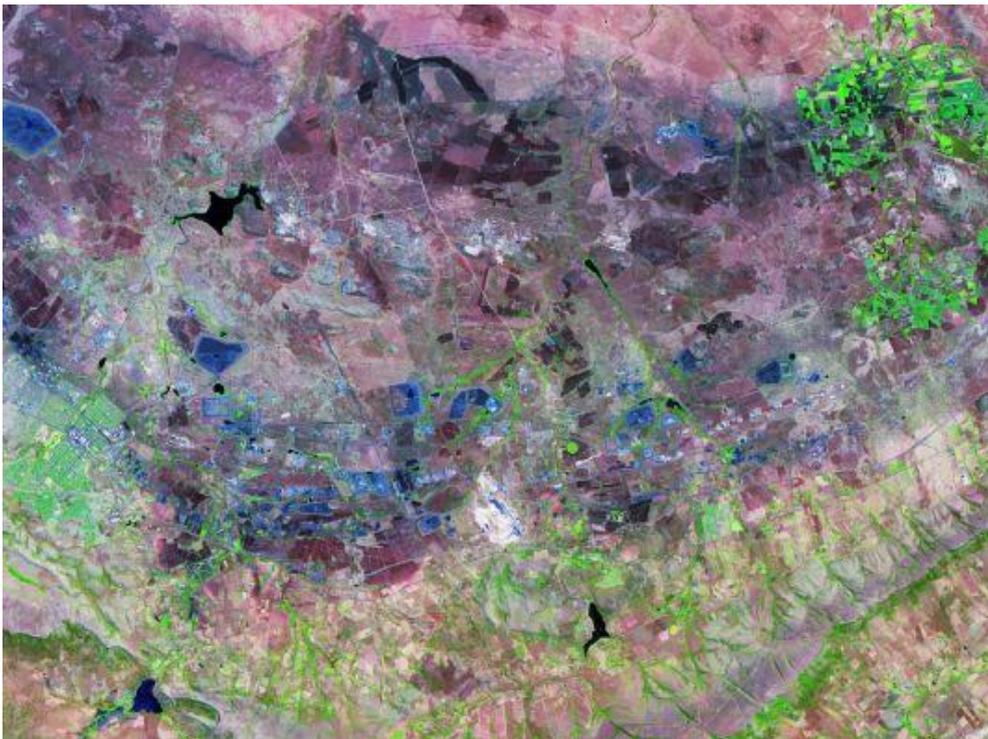


Figura 54. El Complejo ígnea Bushveld (BIC). Numerosas minas, balsas de residuos y los estanques de lixiviación se muestran en azul en la imagen ASTER. La imagen fue adquirida 24 de octubre del 2006, tiene una superficie de 52 por 38 km, y está situado a 25,6 grados de latitud sur, 27,4 grados de longitud este. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems, and U.S./Japan ASTER Science Team.

Esta vista en perspectiva en 3-D que mira hacia el norte sobre Death Valley, California, fue producido por drapeado ASTER datos infrarrojos térmicos durante la noche sobre los datos topográficos del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Los datos ASTER se adquirieron 7 de abril de 2000, con los canales infrarrojos térmicos multiespectrales, y cubren un área de 60 por 80 km (37 por 50 millas). Bandas de 13, 12 y 10 se muestran en rojo, verde y azul, respectivamente. Los datos han sido equipo mejorado para exagerar las variaciones de color que ponen de relieve las diferencias en los tipos de materiales de superficie. Los depósitos de sal en el suelo del Valle de la Muerte aparecen en tonos de amarillo, verde, púrpura, y rosa, lo que indica la presencia de



minerales de carbonato, sulfato y cloruro. El Panamint Mountains al oeste, y el Negro Mountains al este, están formados por calizas sedimentarias, areniscas, pizarras y rocas metamórficas. Las áreas rojas brillantes están dominadas por el mineral de cuarzo, tal como se encuentra en las areniscas; áreas verdes son calizas. En la parte central inferior de la imagen es el Whitney, el punto más bajo en América del Norte. La imagen se encuentra en 36.4 grados de latitud norte y 116,9 grados de longitud oeste.

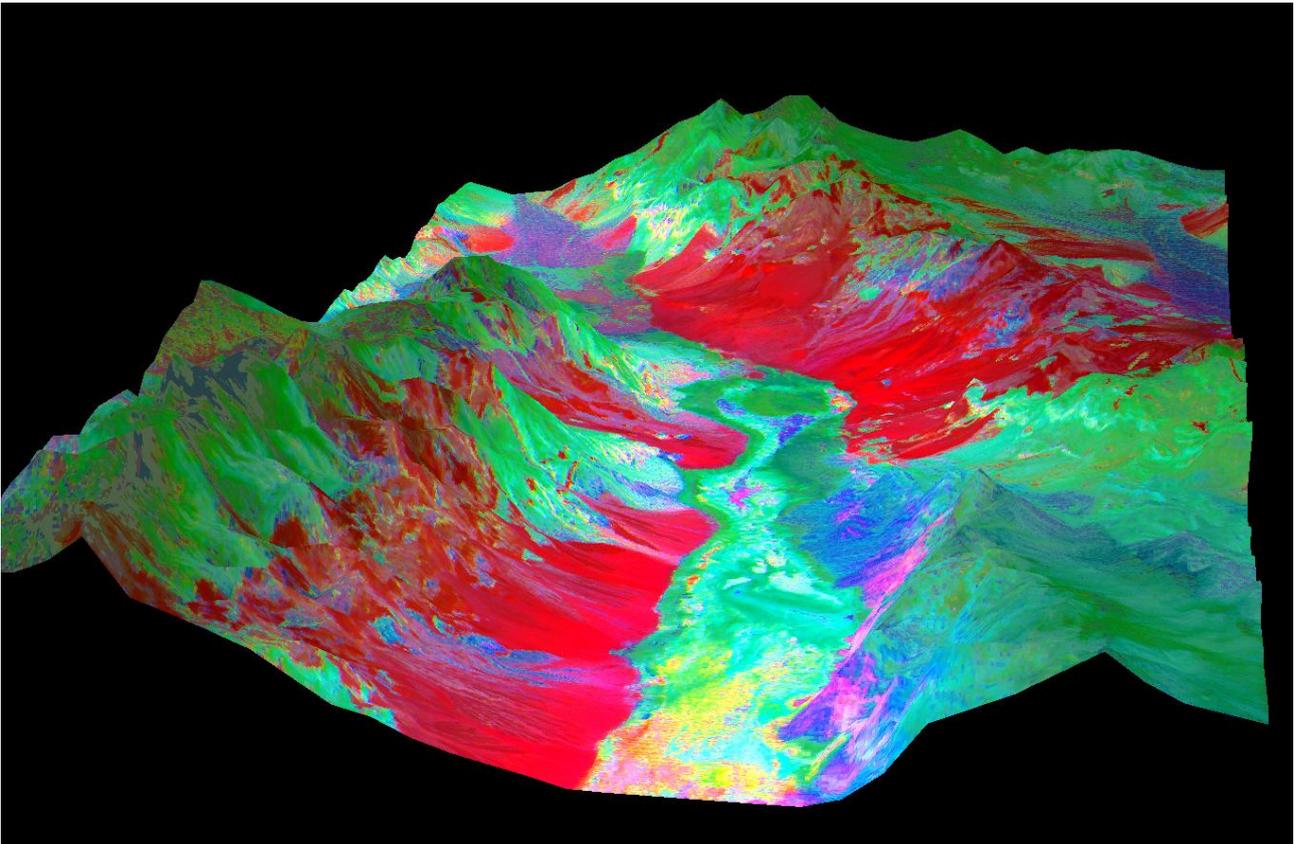


Figura 55. Death Valley, California. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems, and U.S./Japan ASTER Science Team.



Esta imagen ASTER 30 cubre en un 37 km en el desierto de Atacama, Chile y fue adquirida el 23 de abril de 2000. La Escondida Cu-Au-Ag mina a cielo abierto está a una altitud de 3050 m, y entró en funcionamiento en 1990. Actual capacidad es de 127.000 toneladas / día de mineral; en 1999 la producción fue de 827.000 toneladas de cobre, 150.000 onzas de oro y 3,53 millones de onzas de plata. La principal concentración del mineral se realiza en el lugar; el concentrado se envía entonces a la costa para su posterior procesamiento a través de 170 km de largo. La Escondida está relacionado geológicamente a tres cuerpos de pórfido que penetraron a lo largo del sistema de fallas de West Fisura chilena. Una tapa supergénica de alto grado se superpone al mineral de sulfuro primario.



Figura 56. Mina La Escondida (Chile). La imagen de la izquierda es un compuesto 3-2-1 RGB convencional. La imagen de la derecha muestra SWIR bandas 4-6-8 en RGB, y pone de relieve las diferencias litológicas y de alteración de las unidades de superficie. La imagen se encuentra en 24,3 grados de latitud sur y 69,1 grados de longitud oeste. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems, and U.S./Japan ASTER Science Team.



Pirineos (España): Esta imagen ASTER, adquirida el 1 de agosto de 2000, cubre un área de 57 km y un 29 cubre parte de los Pirineos centrales en España. Los Pirineos, en el sudoeste de Europa se extienden por alrededor de 435 kilómetros (unas 270 millas) del Golfo de Vizcaya hasta el Mar Mediterráneo, que separa la Península Ibérica del resto de Europa. Los Pirineos forman la mayor parte de la frontera entre Francia y España, y abarcan el pequeño principado de Andorra. Aproximadamente dos tercios de las montañas se encuentran en España. Los Pirineos centrales se extienden a la Collines du Perche y contienen los picos más altos del sistema, incluyendo el Pico de Aneto, el más alto en 3.404 metros. Las bandas 4, 3 y 2 se muestran en rojo, verde y azul. En esta combinación, la nieve es de color azul, la vegetación es, rocas desnudas verdes son de color rosa y azul oscuro, y las nubes son de color blanco. La imagen se encuentra en 42.6 grados de latitud norte y 0,6 grados de longitud este.

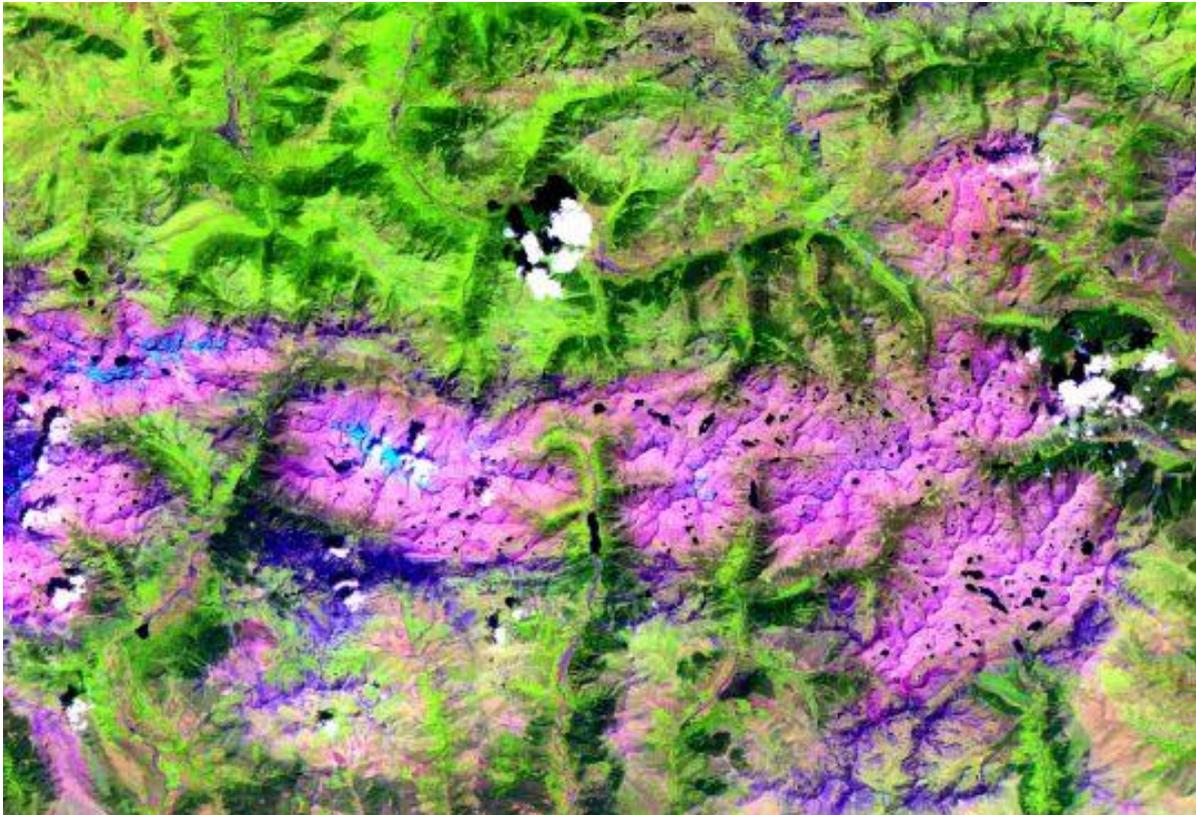


Figura 57. Pirineos (España). Las bandas 4, 3 y 2 se muestran en rojo, verde y azul. En esta combinación, la nieve es de color azul, la vegetación es, rocas desnudas verdes son de color rosa y azul oscuro, y las nubes son de color blanco. La imagen se encuentra en 42.6 grados de latitud norte y 0,6 grados de longitud este. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems, and U.S./Japan ASTER Science Team.

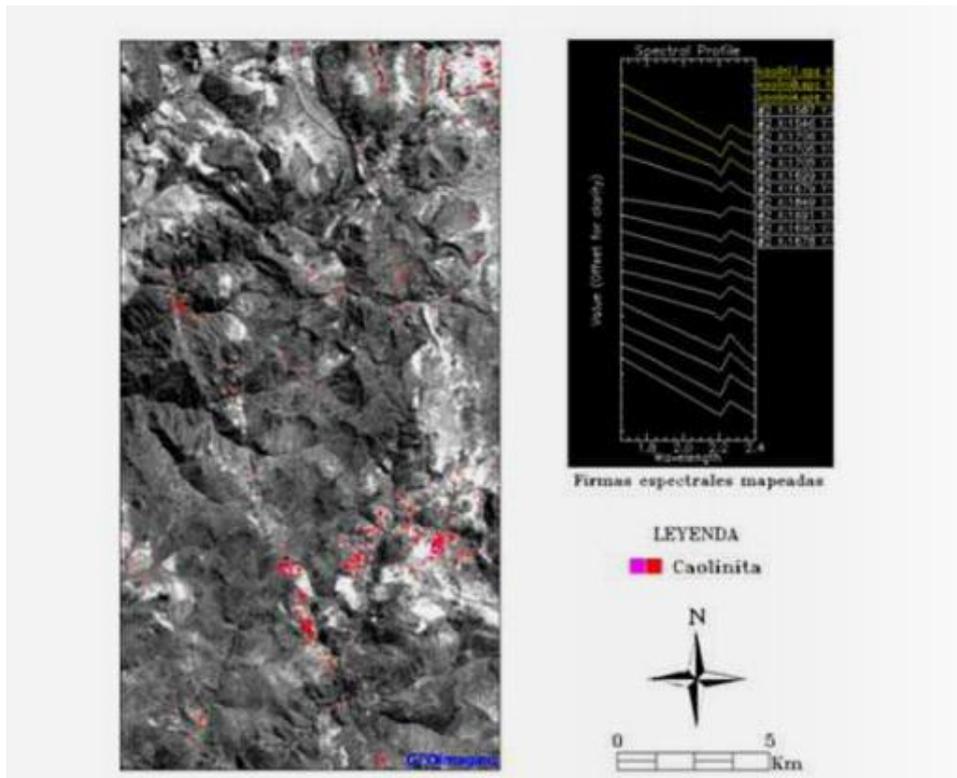


Figura 58. Cartografía de minerales. Fuente: Web: www.rs-geoimage.com

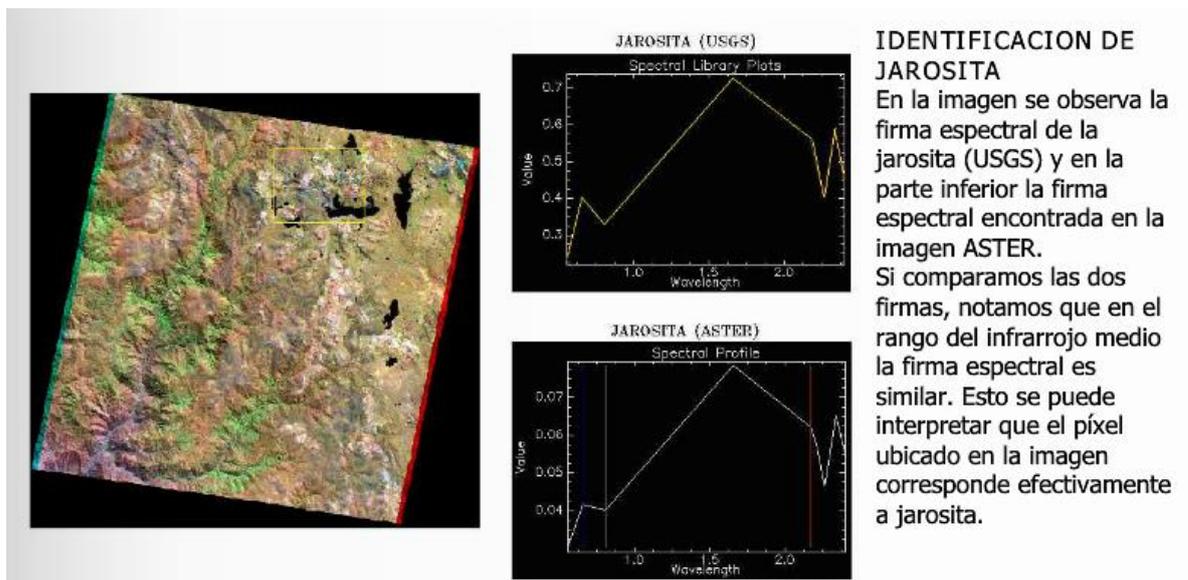
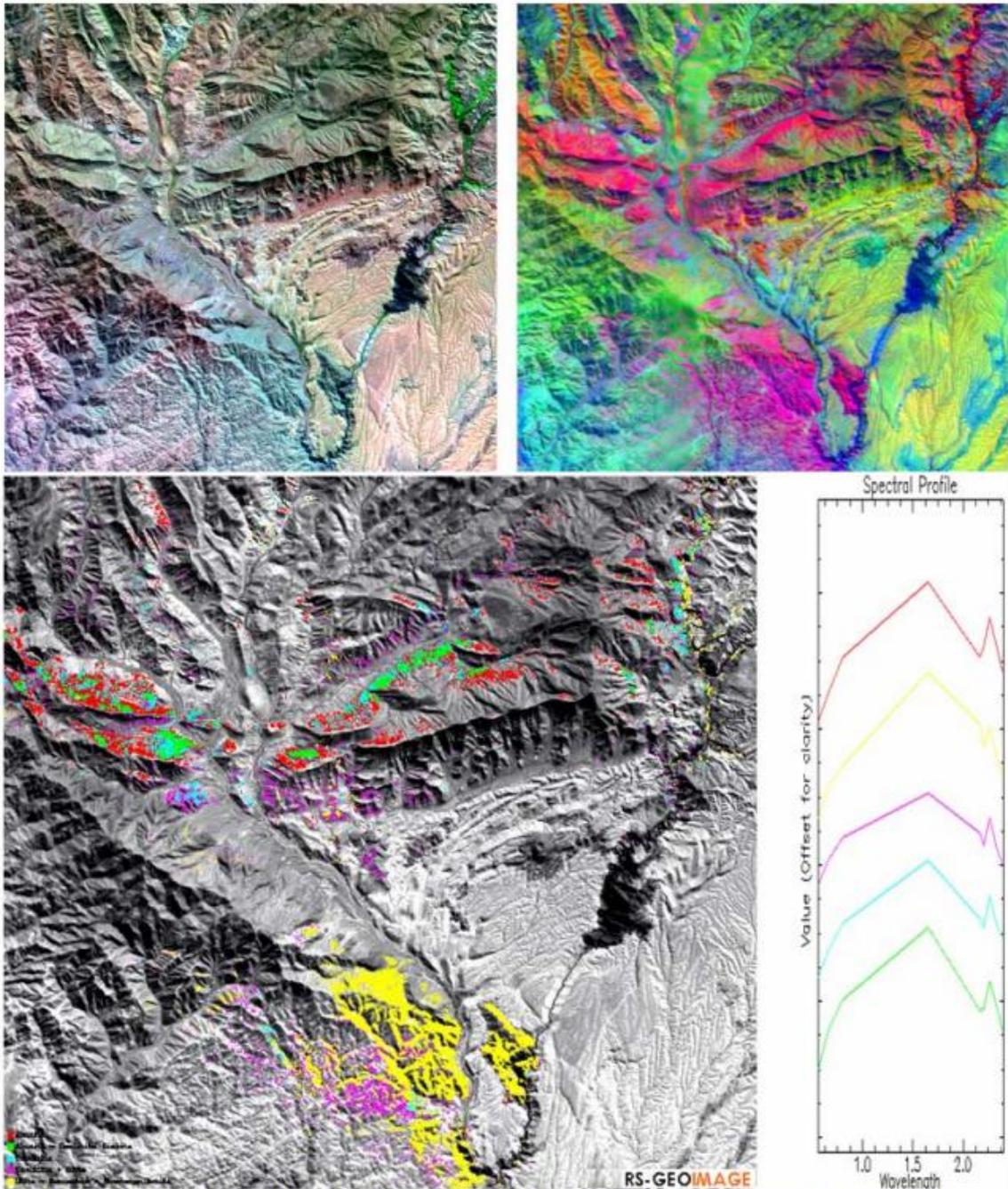


Figura 59. Cartografía de minerales. Fuente: Web: www.rs-geoimage.com



Mapeo de Minerales utilizando Análisis Espectral e imágenes ASTER

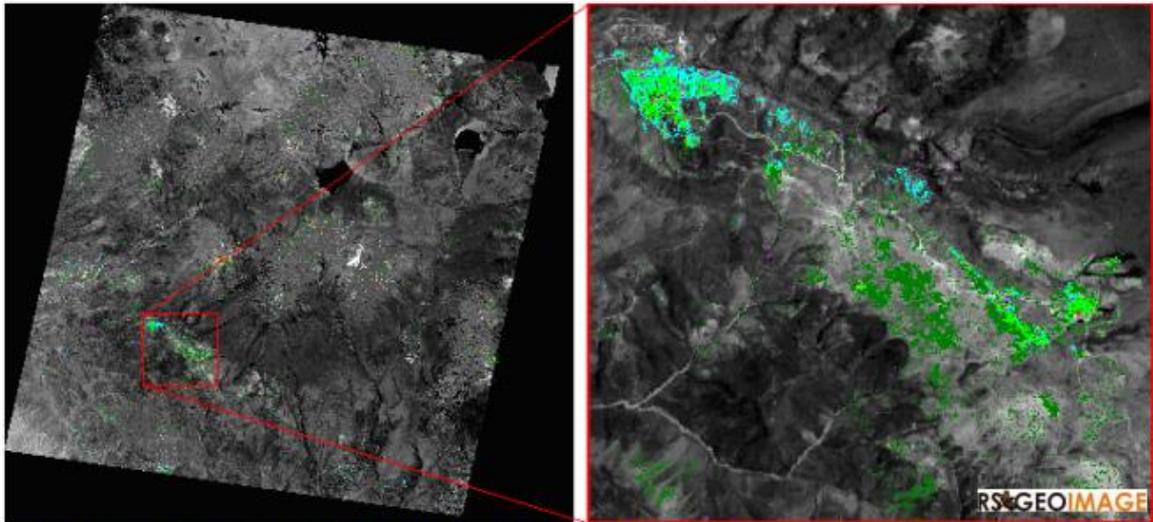


Mapeo de los minerales: alunita, caolinita, illita, esmectita y sus respectivas mezclas.

Figura 60. Cartografía de minerales. Fuente: Web: www.rs-geoimage.com



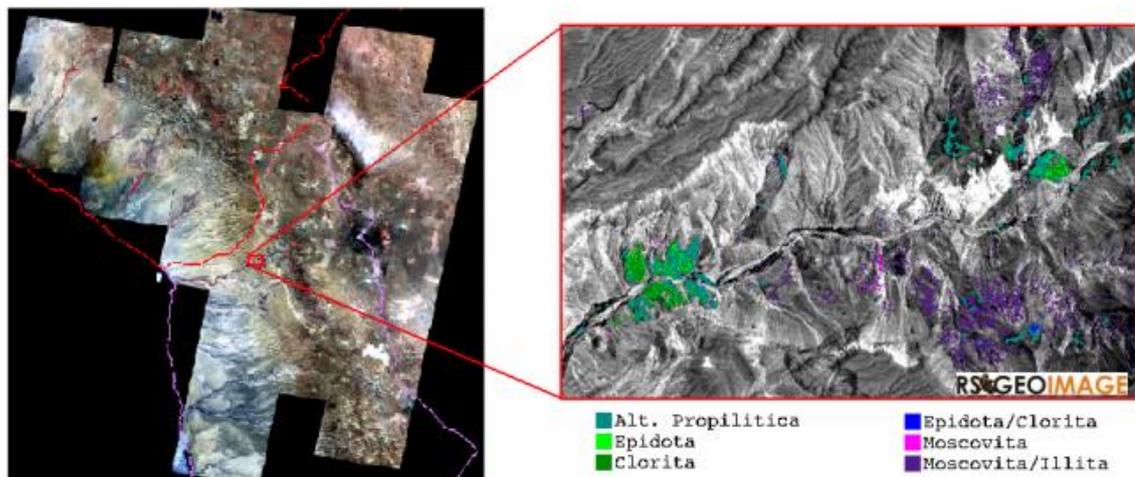
Caso: Quellaveco



En la imagen se muestra el resultado del mapeo de minerales en el área de QUELLAVECO y alrededores (Propiedades de ANGLO AMERICAN QUELLAVECO y SOUTHERN PERU). Se pudo encontrar el predominio de Illita (Illita 1 ■, Illita 2 ■), esmectita - illita ■. También se pudo identificar firmas espectrales de esmectita ■ y moscovita ■.

Figura 61. Caso: Quellaveco. Fuente: Web: www.rs-geoimage.com

Caso: Norte de Chile



En el área se pudo identificar firmas espectrales de minerales típicos de alteración propilitica (epidota, clorita epidota/clorita) y alteración filica (Moscovita, moscovita/illita). Se pudo observar pequeñas áreas de illita y caolinita con intensidad muy débil.

Figura 62. Caso: Norte de Chile. Fuente: Web: www.rs-geoimage.com



Aplicación de ratios

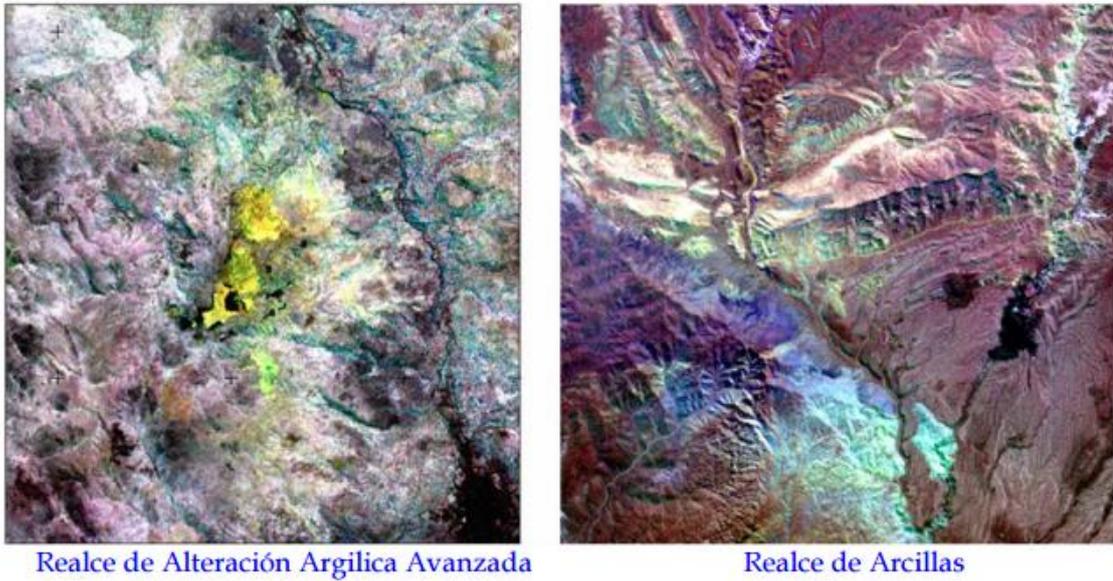
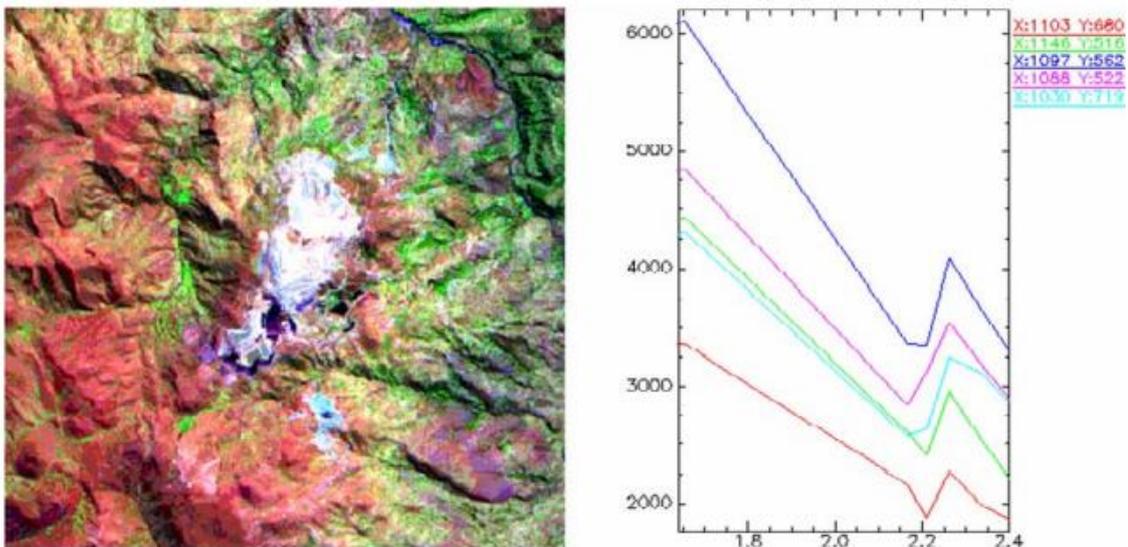


Figura 63. Aplicación de realces. Fuente: Web: www.rs-geoimage.com

Análisis de firmas espectrales



Las firmas extraídas de la mina Pierina (alunita, caolinita, illita y la mezcla de la alunita + caolinita y/o dickita).

Figura 64. Análisis de firmas espectrales. Fuente: Web: www.rs-geoimage.com



6.4.2 Satélites LandSat

Los satélites LANDSAT han capturado imágenes de la tierra desde 1972, es un sensor multiespectral que capta tomado imágenes multiespectrales de mediana resolución por desde 1972, por esto LANDSAT posee un archivo histórico incomparable en calidad, detalle, cobertura y duración. Mediante la combinación de bandas se puede resaltar variaciones de color, tonalidad, textura de las rocas, es muy utilizada para el mapeo de estructuras y detectar zonas de óxidos y arcilla.

Debido a la resolución espacial de las imágenes LANDSAT se puede trabajar a escalas aproximadas de: 1/80,000 con las bandas de 30 metros y 1/35,000 para la banda pancromática de 15 metros.

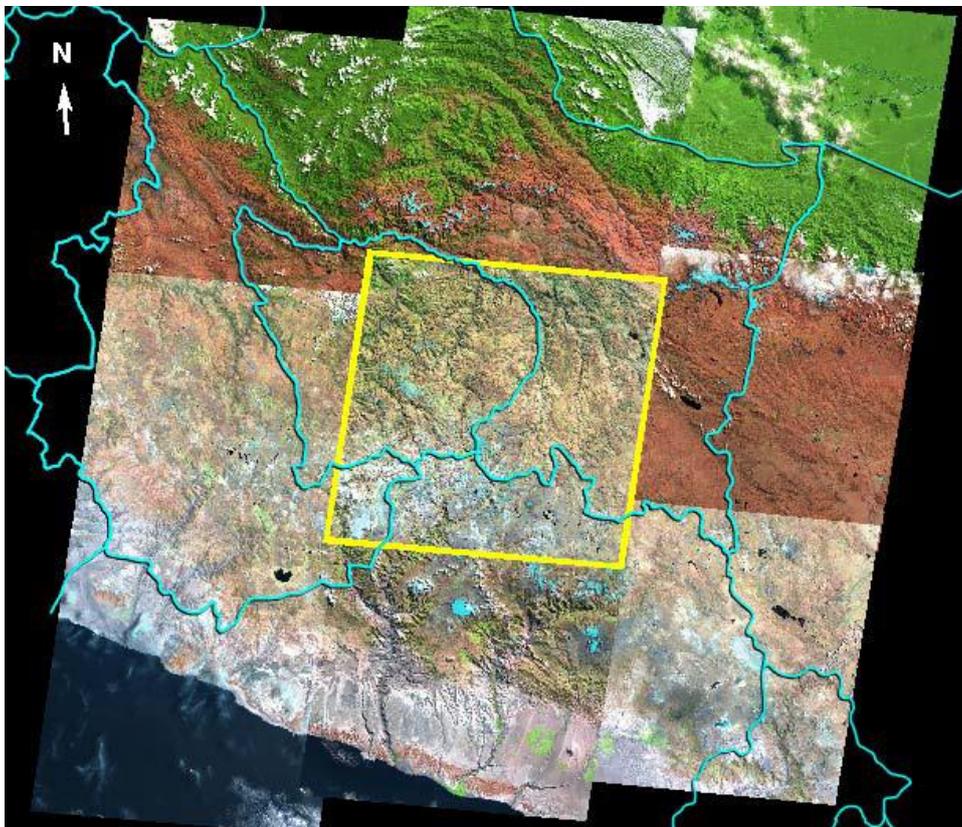


Figura 65. Esquema del Subsistema. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team.

LANDSAT tiene imágenes de todo el mundo desde la década del 80 hasta la actualidad.



LANDSAT 5 (TM), Captura imágenes desde el año 1984 hasta la actualidad, el ancho de la escena es alrededor de 180 Km² y posee 7 bandas espectrales:

- Banda 1 (Azul): Usada para el mapeo de aguas costeras, mapeo de tipo de forestación o agricultura y la identificación de los centros poblados.
- Banda 2 (Verde): Corresponde a la reflectancia del verde de la vegetación vigorosa o saludable. También es usada para la identificación de centros poblados.
- Banda 3 (Rojo): Es usada para la discriminación de especies de plantas, la determinación de límites de suelos y delineaciones geológicas así como modelos culturales.
- Banda 4 (Infrarrojo Reflectivo): Determina la cantidad de biomasa presente en un área, enfatiza el contraste de zonas de agua-tierra, suelo-vegetación.
- Banda 5 (Infrarrojo Medio): Es sensible a la cantidad de agua en las plantas. Usada en análisis de las mismas, tanto en época de sequía como cuando es saludable. También es una de las pocas bandas que pueden ser usadas para la discriminación de nubes, nieve y hielos.
- Banda 6 (Termal): Para la vegetación y detección de la vegetación que se encuentra enferma, intensidad de calor, aplicaciones de insecticidas, para localizar la polución termal, ubicar la actividad geotermal, actividad volcánica, etc.
- Banda 7 (Infrarrojo medio): Es importante para la discriminación de tipos de rocas y suelos, así como el contenido de humedad entre suelo y vegetación.

LANDSAT 7 (ETM), este sensor a diferencia del LANDSAT – TM, captura imágenes pancromáticas con 15 metros de resolución y dos imágenes termales en una en ganancia baja y la otra en ganancia alta, cubren un área aproximada de 180 Km². A partir del año 2003 LANDSAT – ETM tubo problemas y a partir del 14 de julio del mismo año, las imágenes se colectan en modo SLC-off.

| LANDSAT - TM | | |
|--------------|-----------------|-------------------|
| Banda | Resol. Espacial | Rango Espectral |
| 1 | 30 metros | Azul (0.45-0.52) |
| 2 | 30 metros | Verde (0.52-0.60) |
| 3 | 30 metros | Rojo (0.63-0.69) |
| 4 | 30 metros | NIR (0.76-0.9) |
| 5 | 30 metros | SWIR (1.55-1.75) |
| 6 | 120 metros | TIR (10.4-12.5) |
| 7 | 30 metros | SWIR (2.08-2.35) |

| LANDSAT - ETM | | |
|---------------|-----------------|---------------------|
| Banda | Resol. Espacial | Rango Espectral |
| 1 | 30 metros | Azul (0.45-0.515) |
| 2 | 30 metros | Verde (0.525-0.605) |
| 3 | 30 metros | Rojo (0.63-0.69) |
| 4 | 30 metros | NIR (0.75-0.90) |
| 5 | 30 metros | SWIR (1.55-1.75) |
| 6 | 60 metros | TIR (10.4-12.5) |
| 7 | 30 metros | SWIR (2.09-2.35) |
| 8 | 15 metros | Panro (0.52-0.9) |

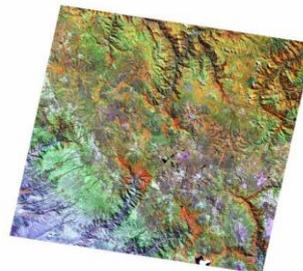


Figura 66. Características de las bandas de las imágenes LANDSAT. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team.



6.4.2.1 Combinación de bandas con LANDSAT

Gracias a las combinaciones de bandas podemos resaltar variaciones de color, textura, tonalidad y diferenciar los distintos tipos de cobertura que existen en la superficie, estas son las combinaciones de bandas más usadas:

Bandas 3, 2, 1 (RGB): Es una imagen de color natural. Refleja el área tal como la observa el ojo humano en una fotografía aérea a color.

Bandas 4, 3, 2 (RGB): Tiene buena sensibilidad a la vegetación verde, la que aparece de color rojo, los bosques coníferos se ven de un color rojo más oscuro, los glaciares se ven de color blanco y el agua se ve de color oscuro debido a sus características de absorción.

Bandas 7, 4, 1 (RGB): Esta combinación de bandas es ampliamente utilizada en geología. Utiliza las tres bandas menos correlacionadas entre sí. La banda 7, en rojo, cubre el segmento del espectro electromagnético en el que los minerales arcillosos absorben, más que reflejar, la energía; la banda 4, en verde, cubre el segmento en el que la vegetación refleja fuertemente; y la banda 1, en azul, abarca el segmento en el cual los minerales con óxidos de hierro absorben energía.

Bandas 7, 4, 2 (RGB): Permite discriminar los tipos de rocas. Ayuda en la interpretación estructural de los complejos intrusivos asociados a los patrones volcano-tectónicos.

Bandas 5, 4, 3 (RGB): En esta combinación la vegetación aparece en distintos tonos de color verde.

Bandas 7, 3, 1 (RGB): Ayuda a diferenciar tipos de rocas, definir anomalías de color que generalmente son de color amarillo claro algo verdoso, la vegetación es verde oscuro a negro, los ríos son negros y con algunas coloraciones acules a celestes, los glaciares de ven celestes.

6.4.3 Imágenes ALI (Advanced Land Imager)

Es un sensor que se encuentra a bordo del satélite EO-1, el cual fue lanzado el 21 de noviembre del año 2000. El sensor ALI, se creó con la finalidad de seguir la continuidad de los datos LANDSAT. ALI tiene 10 bandas, de las cuales la primera es pancromática con 10 metros de resolución espacial y 9 multiespectrales (6 en el VNIR y 3 en el SWIR) tienen una resolución de 30 metros y son tomadas en el VNIR y el SWIR.



| ALI Band # | | ALI spectral range (µm) | Landsat 7 Band # | ETM+ spectral range (µm) | Description |
|------------|--------|-------------------------|------------------------|--------------------------|--------------|
| Band 1 | (PAN) | .048-0.69 | Band 8 | 52- 90 | panchromatic |
| Band 2 | (MS-1) | 0.433-0.463 | <i>(not available)</i> | | VNIR (blue) |
| Band 3 | (MS-1) | 0.45-0.515 | Band 1 | 0.45-0.52 | VNIR (blue) |
| Band 4 | (MS-2) | 0.525-0.605 | Band 2 | 0.53-0.61 | VNIR (green) |
| Band 5 | (MS-3) | 0.63-0.69 | Band 3 | 0.63-0.69 | VNIR (red) |
| Band 6 | (MS-4) | 0.775-0.805 | Band 4 | 0.78-0.90 | VNIR |
| Band 7 | (MS-4) | 0.845-0.89 | <i>(not available)</i> | | VNIR |
| Band 8 | (MS-5) | 1.2-1.3 | <i>(not available)</i> | | SWIR |
| Band 9 | (MS-5) | 1.55-1.75 | Band 5 | 1.55-1.75 | SWIR |
| Band 10 | (MS-7) | 2.08-2.35 | Band 7 | 2.09-2.35 | SWIR |
| | | | | | |
| | | | Band 6 | 10.40-12.50 | TIR |
| | | <i>(not available)</i> | | | |



Fuente: USGS

Figura 67. Comparación de la resolución espectral entre los sensores ALI y LANDSAT

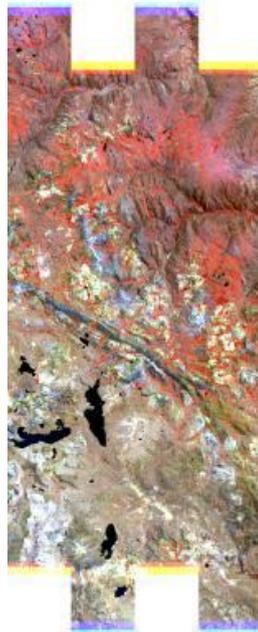


Figura 68. Comparación Ejemplos de imágenes ALI. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team.

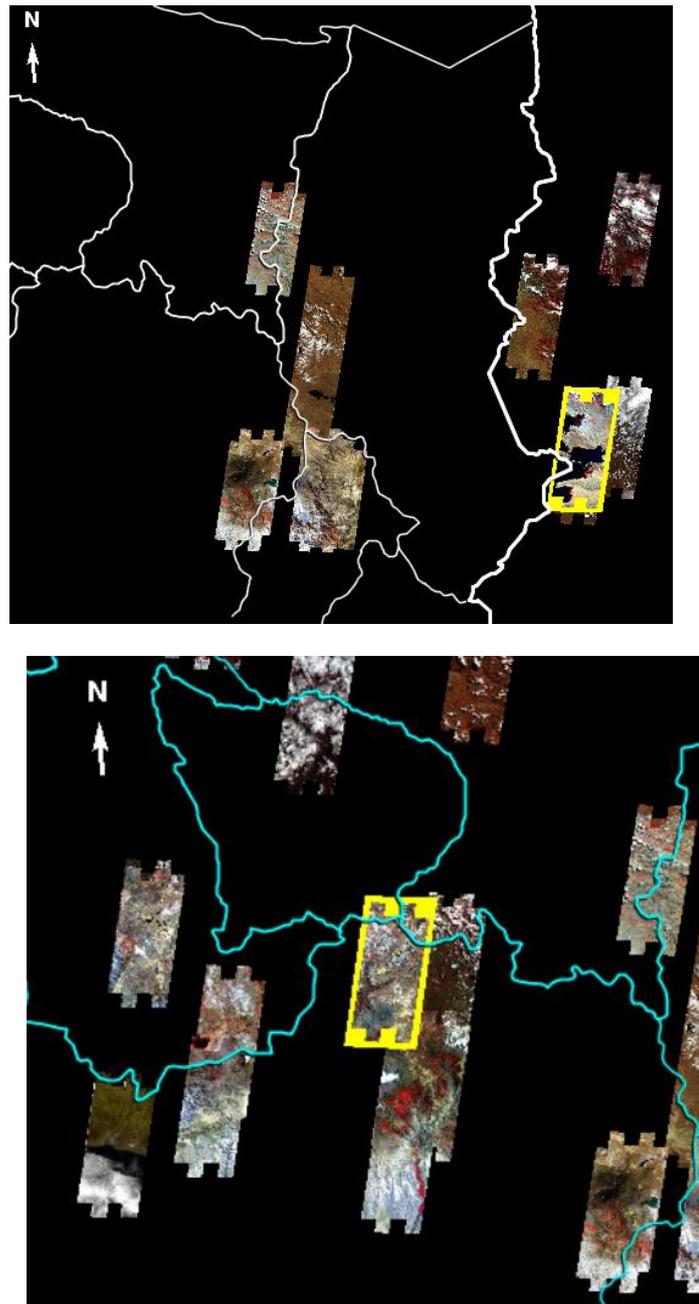


Figura 69. Comparación Cobertura de ALI en el sur del Perú. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team.

6.4.3.1 ALI en la exploración geológico – minera

ALI al igual que LANDSAT y ASTER permite la discriminación litológica y el mapeo de estructuras geológicas, a diferencia de LANDSAT y ASTER, ALI solo tiene 37 km x 42 km - 180 km (la longitud de la toma es variable).



En el mapeo de óxidos y arcillas ALI da resultados más fiables, debido a sus características espectrales.

Si comparamos ALI y ASTER, ALI es mejor en el mapeo de óxidos, puesto q tienen 6 bandas en el VNIR y ASTER solo posee 3, en el caso del mapeo de arcillas, ASTER es el mejor sensor multiespectral hasta la fecha.

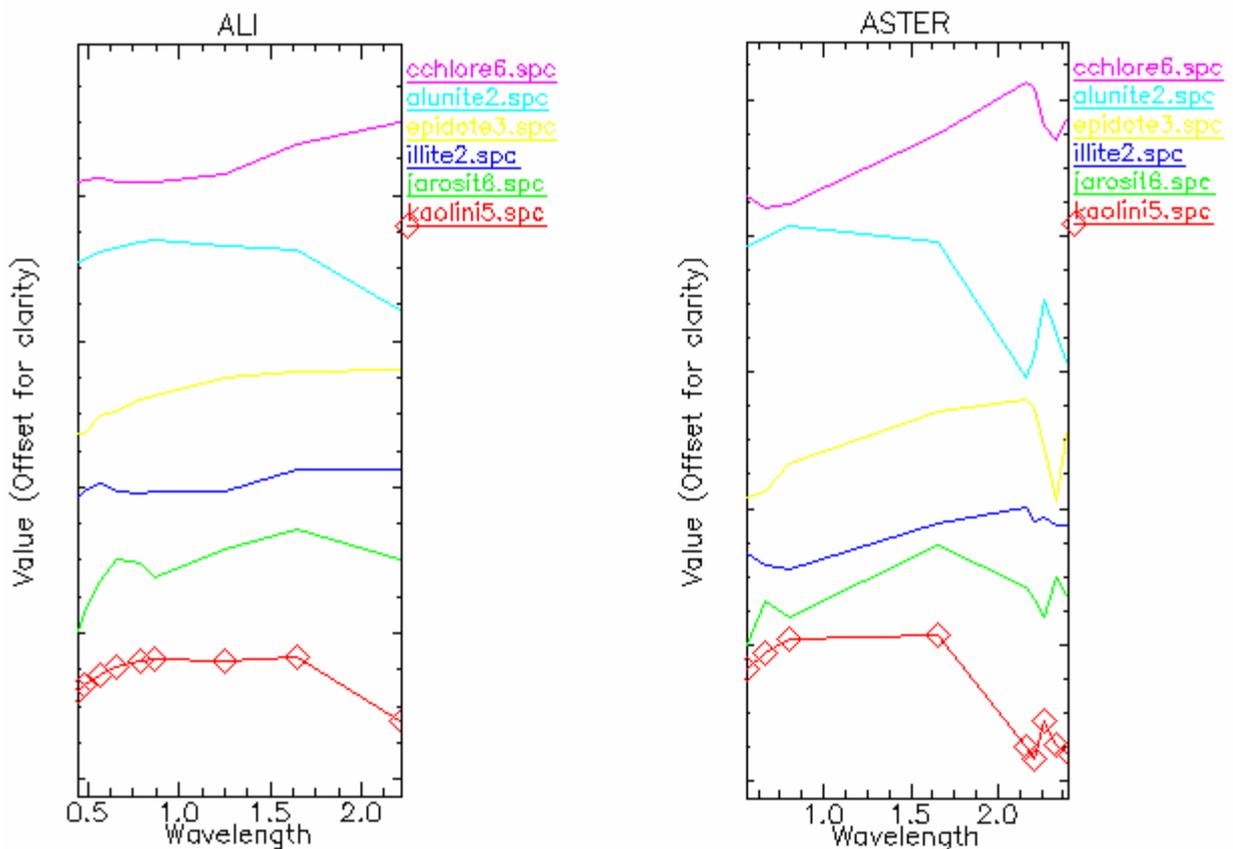


Figura 70. Comparación de firmas espectrales de la USGS remuestreadas a ALI y ASTER

6.4.4 Imágenes HYPERION

Este sensor se encuentra a bordo del satélite EO-1, HYPERION es el primer sensor hiperespectral a bordo de un satélite, tienen 220 bandas, las cuales abarcan el rango espectral de a los 356 a 2577 nm, con una resolución espacial de 30 metros, gracias a su resolución espectral se puede hacer mapeos detallados de cobertura vegetal, minerales, etc.

HYPERION de igual forma que ALI, no tiene recubierto todo el mundo.

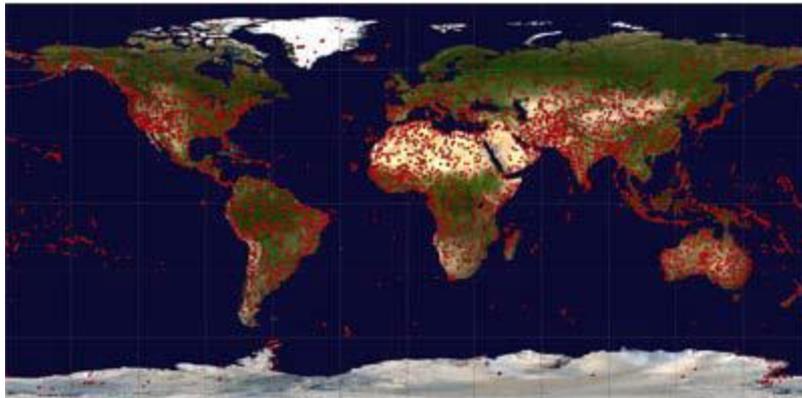


Figura 71. Comparación Imágenes captadas por HYPERION a nivel mundial. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team.

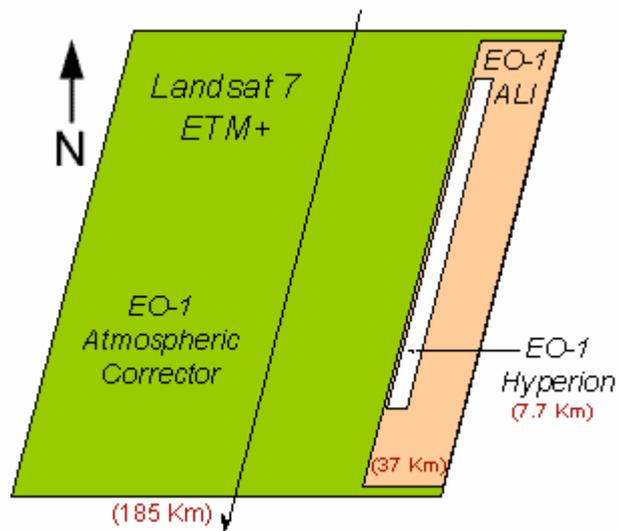


Figura 72. Comparación del tamaño de las escenas de LANDSAT y los sensores del satélite EO-1

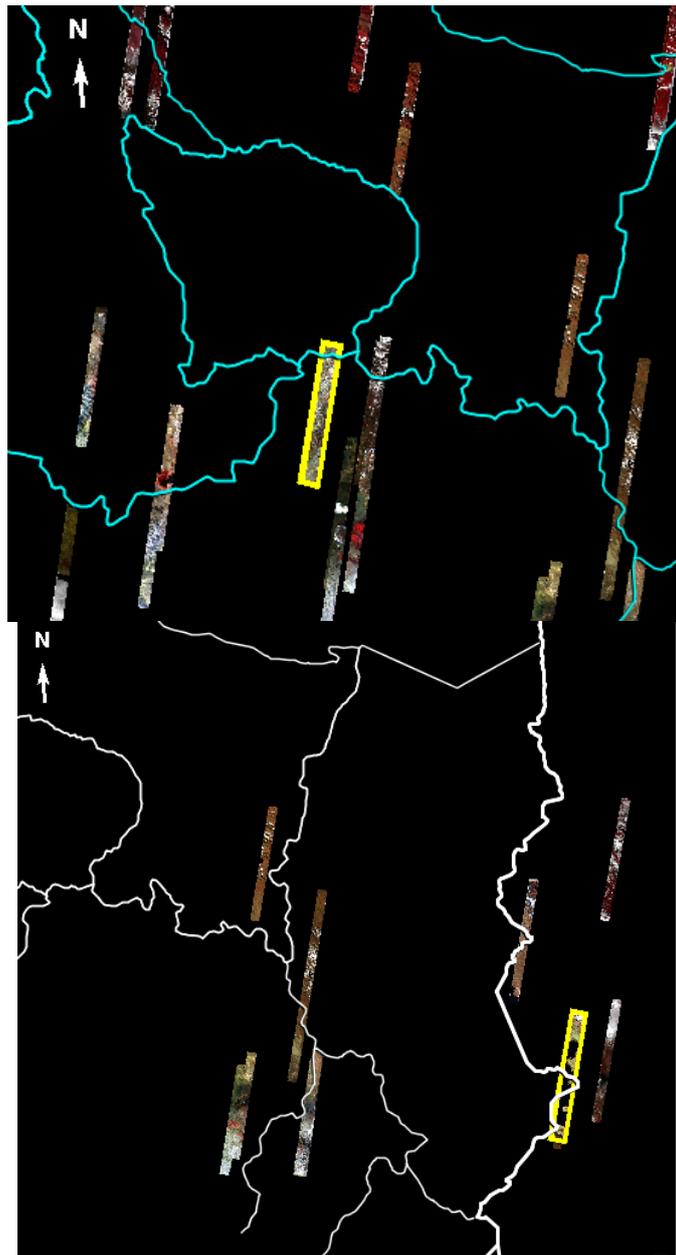


Figura 73. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team.

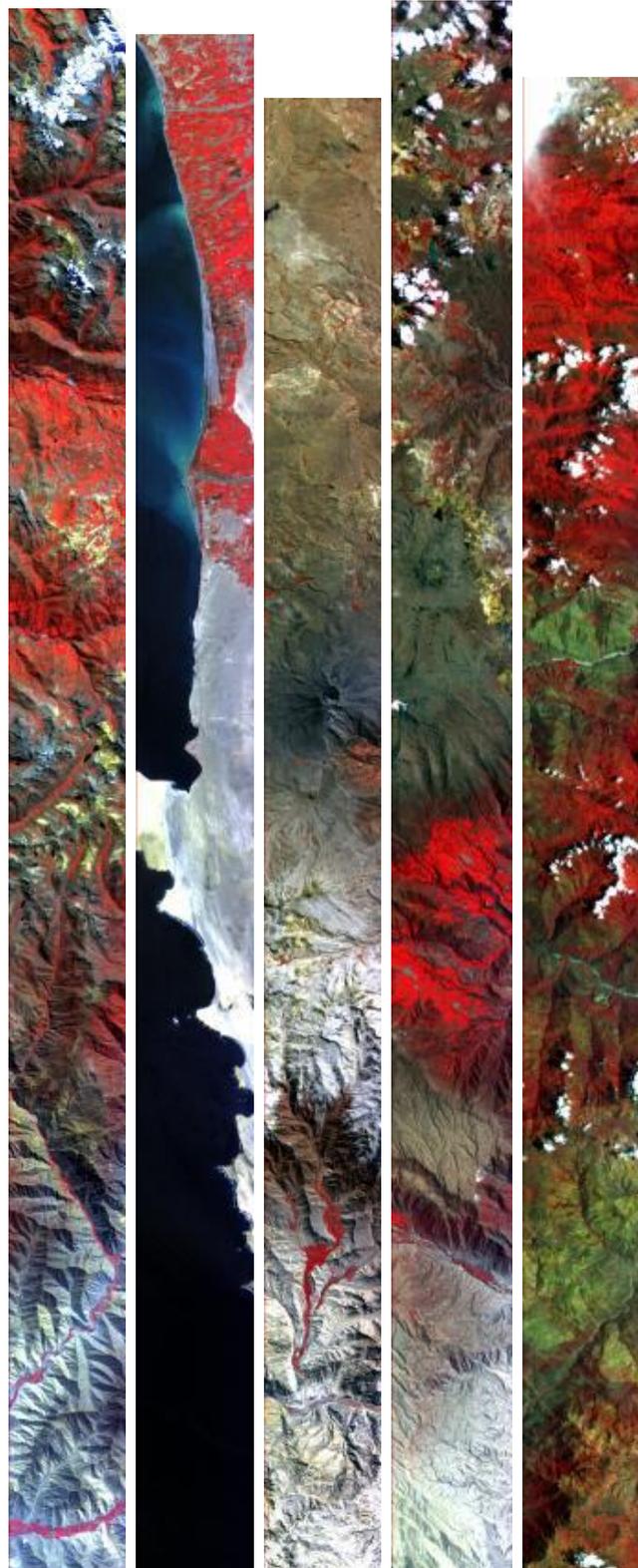


Figura 74. Comparación Cobertura de imágenes HYPERION en el sur de Perú. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team.



Las imágenes HYPERION son usadas para el detallado de minerales, el procesamiento de datos HYPERION, se hace mediante técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes hiperespectrales.

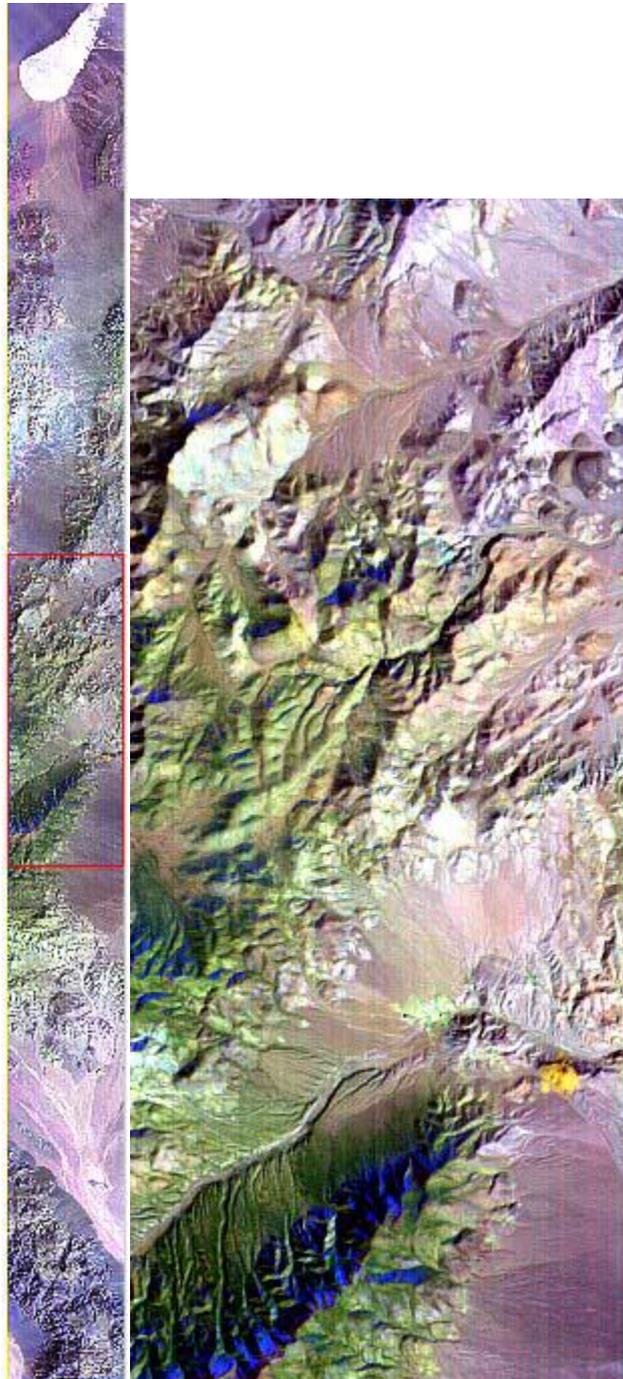


Figura 75. PROCESAMIENTO Ejemplos de imágenes HYPERION capturas en Perú. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems, and U.S./Japan ASTER Science Team



Imagen HYPERION de la zona de Goldfielf/Cuprite, Nevada, USA.

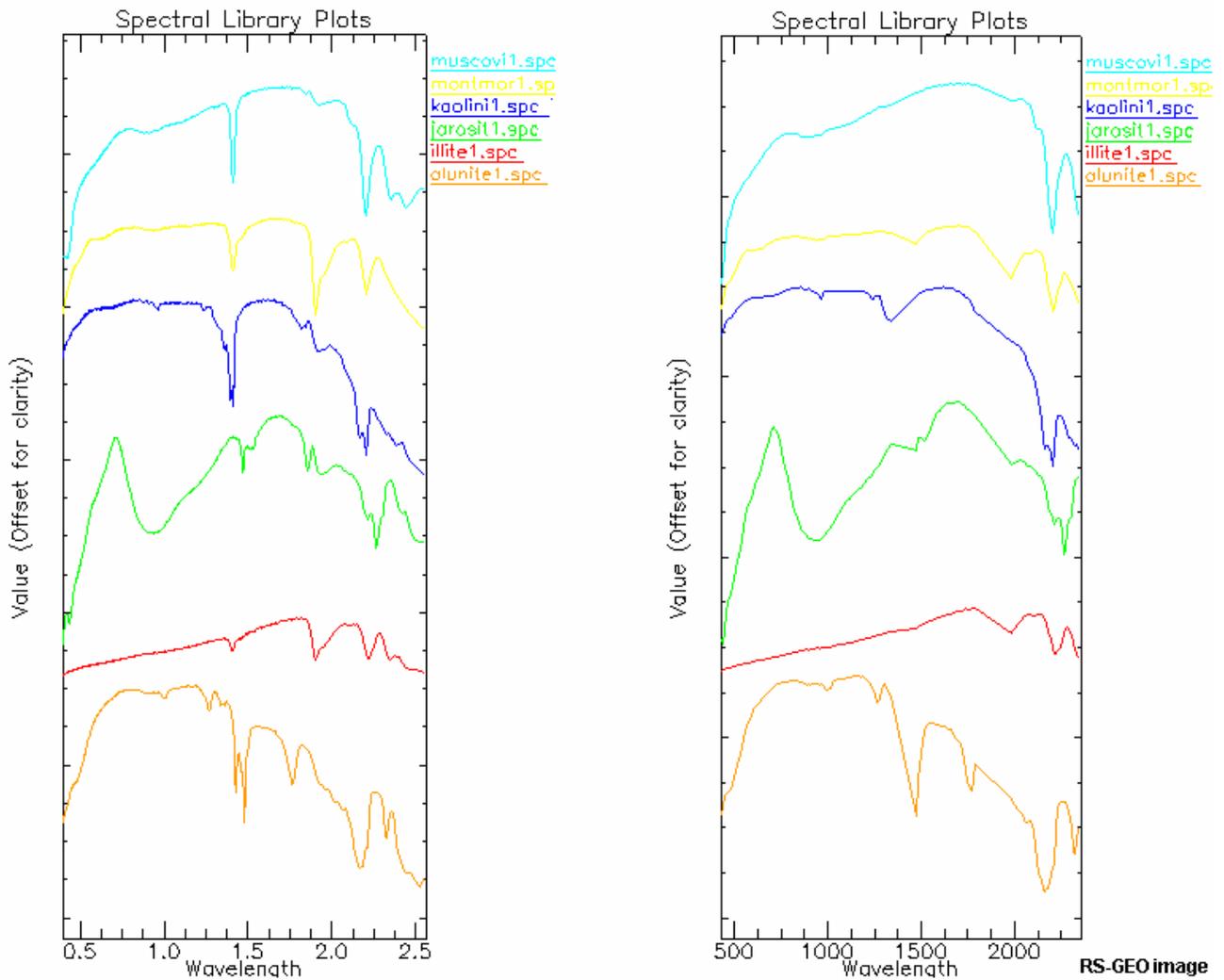


Figura 76. Comparación entre firmas de laboratorio de la USGS y las mismas remuestreadas a la imagen HYPERION. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team.

6.4.5 Mina Cuprita, Nevada, EEUU.

El distrito minero de Cuprita se encuentra en Nevada el centro-oeste, y es uno de una serie de centros de alteración explorados para los metales preciosos. En la zona existen rocas sedimentarias del Cámbrico y rocas volcánicas cenozoicas que sufrieron una alteración hidrotermal por soluciones de ácido-sulfato de origen profundo en el Mioceno, formando tres conjuntos de alteración cartografiables:

- 1) rocas que contienen cuarzo y y caolinita;



2) rocas que contienen ópalo, alunita y caolinita opalizada.

3) rocas con alteración de arcillitas que contienen caolinita y hematites..

Una visión general de la alteración se muestra en la Figura 70, donde se muestra la combinación de bandas de 4,6 y 8 en RGB y se procesa para aumentar la saturación del color.



Figura 77.- Imagen del distrito de mina Cuprita, donde se muestra con bandas SWIR 4-6-8 como composición RGB. (Note: Area covered is 15 x 20 km) áreas de color rojo-rosa marcan rocas sobre todo opalizadas con caolinita y/o alunita; el área blanca es Playa Stonewall; áreas verdes son calizas, y las zonas color azul-gris son rocas volcánicas alteradas. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team.

Los datos de la región SWIR se procesaron para reflectancia de la superficie por la LP-DAAC y los espectros de imagen fueron examinados para objetivos conocidos en Cuprita. Evidencia de SWIR diafonía era evidente, lo que hace difícil utilizar los datos para el análisis espectral, utilizando comparaciones directas con la biblioteca o espectros de campo. Para reducir los artefactos de diafonía, se utilizó un espectro de Stonewall Playa como un blanco brillante,



resampled a las longitudes de onda del aster, y se divide en los datos de reflectancia SWIR. Los espectros de la biblioteca fueron compilados para los minerales conocidos que se produzca en Cuprita; luego fueron a un nuevo muestreo longitudes de onda ASTER SWIR. Estos espectros se utilizan con un algoritmo de clasificación supervisada, espectral Angle Mapper, para mapear las apariciones espectrales similares en los datos SWIR. El resultado de esta clasificación se muestra en la Figura 18.

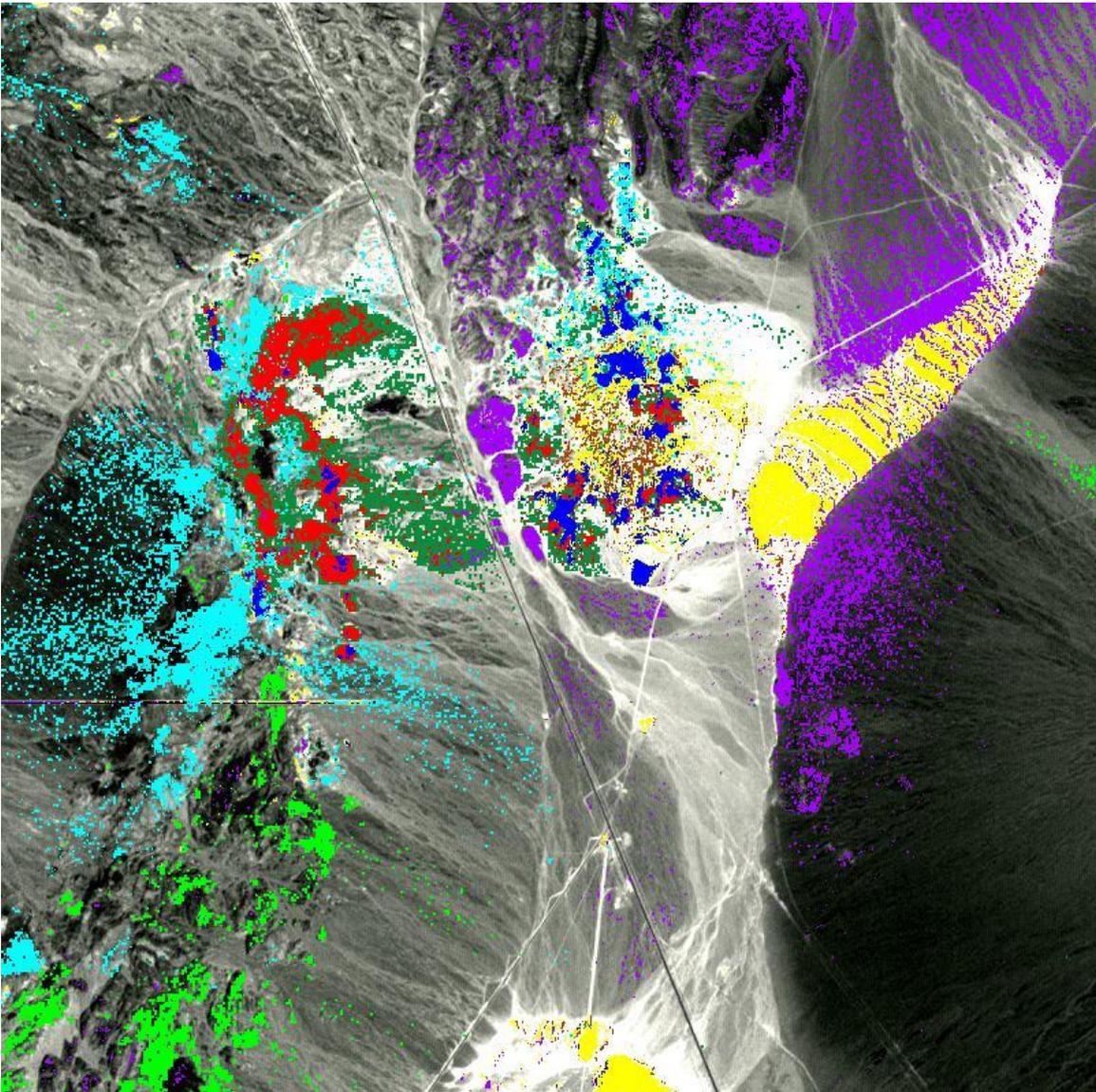


Figura 78.-Clasificación espectral Angle Mapper de los datos Cuprita SWIR. (Nota: azul = caolinita; alunite rojo =; verde claro = calcita, de color verde oscuro = alunite + caolinita; cian = montmorillonita; púrpura = inalterado; amarillo = sílice o dickite) Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team.



Cuando este mapa se comparó con la clasificación de mineral más detallada producido a partir de los datos AVIRIS, la correspondencia es excelente. Los espectros de la biblioteca resampled se muestran en la Figura 19 en comparación con los espectros de imagen ASTER extraído de las zonas de 3x3 píxeles.

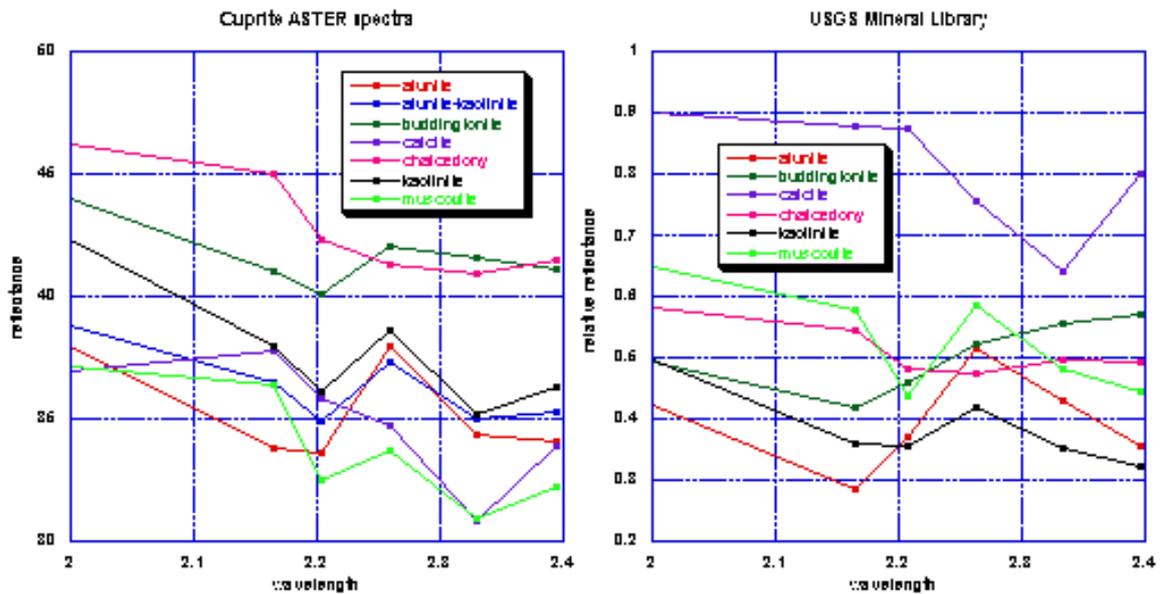


Figura 79.-Los espectros de ASTER imagen (izquierda) y los espectros de la biblioteca (derecha) para los minerales cartografiados en Cuprite. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team.

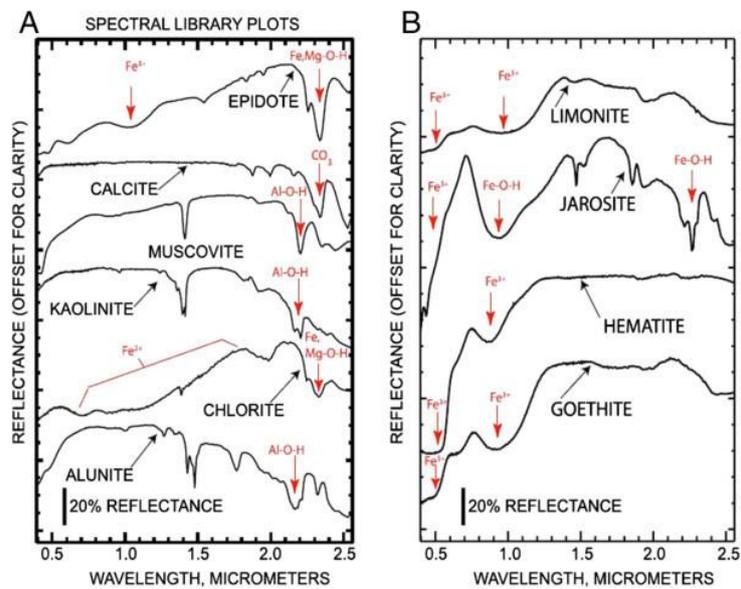


Figura 80. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team.



6.5 Calidad del agua

La monitorización de la calidad del agua mediante teledetección se obtiene normalmente mediante varios parámetros fundamentales: turbidez, temperatura, clorofila, CDOM, etc.

La existencia de una relación directa entre la variación de la reflectividad de los canales y la variación de los parámetros de calidad de agua se ha estudiado mediante sensores de resolución espacial baja y media (SeaWiFS, MODIS, MERIS, etc) para aguas abiertas.

Recientemente, el satélite WorldView2 de alta resolución y con 8 bandas espectrales ha sido lanzado y proporciona mediciones de la calidad del agua en las zonas costeras o de aguas continentales con 2 m. de resolución.

6.6 Aplicaciones a la Cartografía Topográfica

Este campo tradicionalmente realizado con éxito por la topografía y fotogrametría, ha sido ocupado recientemente por la teledetección, tanto en sus aspectos altimétricos (generación automática de Modelos Digitales del Terreno – MDT), como planimétricos (detección automática de formas, generación semiautomática (raster) de contornos, etcétera).

La fotogrametría digital se puede considerar la convergencia entre los métodos tradicionales fotogramétricos (analógicos y analíticos) y el tratamiento digital de imágenes (sistemas de procesamiento tradicional de la teledetección).

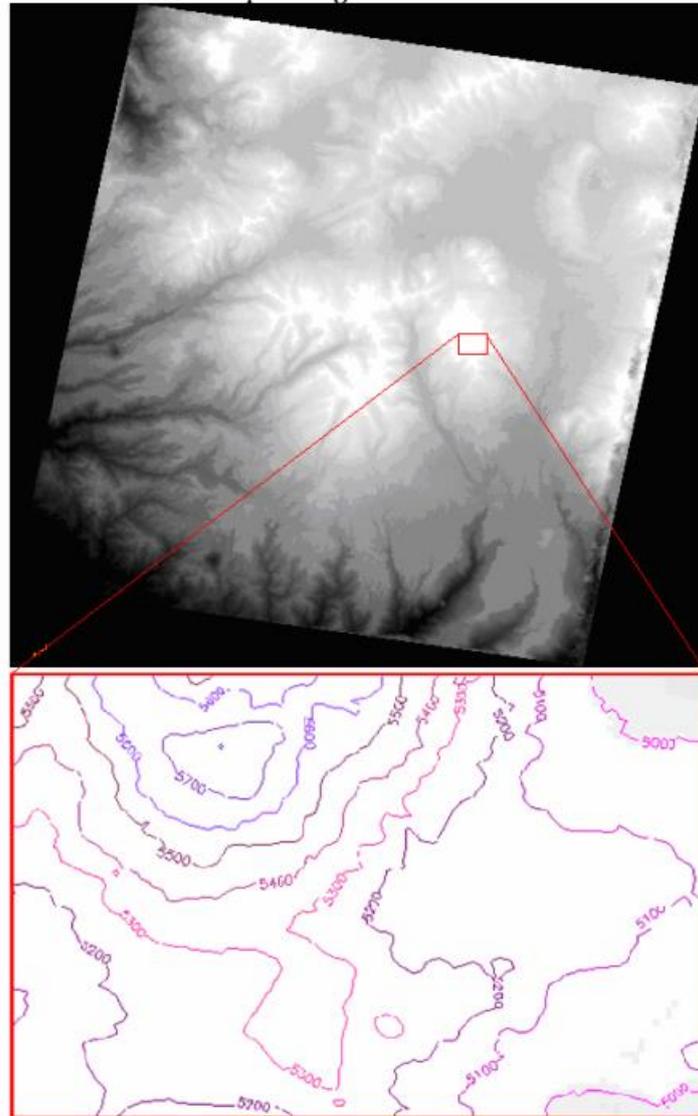


Figura 81. Extracción de Modelos de Elevación Digital. DEM elaborado a partir de las bandas 3N y 3B de ASTER. Fuente: NASA/METI/AIST/Japan Space Systems and U.S./Japan ASTER Science Team.



7 CONCLUSIONES

La teledetección es una herramienta muy eficaz a la hora de explorar grandes extensiones de terreno con una buena relación calidad-precio.

Si bien hoy día la investigación ha avanzado de forma extraordinaria, no todo es accesible en materia de teledetección.

Este TFM se centra en el tratamiento de imágenes procedentes del sensor ASTER a bordo del satélite Terra. La elección de estas imágenes frente a otros potenciales candidatos, estriba en su alta potencialidad y su nulo coste de adquisición.

A modo de ejemplo comparativo:

- Las imágenes ASTER presentan 14 bandas distribuidas en el rango de visible, infrarrojo cercano, medio y térmico, lo que las sitúa por delante de otros satélites de recursos naturales (Landsat únicamente presenta 7 u 8 bandas).

- La resolución espacial es equivalente a la de Landsat, con 15 metros en bandas del visible e infrarrojo cercano, 30 en bandas del infrarrojo medio, y 90 en infrarrojo térmico. Además dispone de una banda 'oblicua' que almacena datos por delante de la posición del satélite, de tal forma que permite al usuario la obtención de estereoscopía a lo largo de una misma órbita, y la elaboración de modelos digitales de elevación.

- La cobertura de adquisición de las imágenes ASTER es de 60x60 kilómetros lo que las iguala con el satélite SPOT, si bien éste se limita a 4 bandas espectrales.

- El precio de una imagen ASTER es gratuita (desde 1/04/2016) (similar a un libro técnico especializado), entre cien y diez veces más baratas que otros satélites. Así, es muy útil en proyectos de bajo coste (un Proyecto Final de Carrera, por ejemplo).

- Junto con las imágenes sin tratar (brutas) de ASTER, también está a disposición de los usuarios, y de forma gratuita, otra serie de productos preprocesados: Modelos digitales de Elevación (30 metros de paso), ortoimágenes, imágenes calibradas radiométricamente (valor de reflectancia, irradiancia, temperatura,...) lo que permite que el usuario pueda utilizarlas en su proyecto con la máxima celeridad.



8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abrahms, M. (1997). *ASTER Users Handbook*. California.

González, C. V. (s.f.). *Geosoluciones*. Obtenido de Geosoluciones: www.rs-geoimage.com

Gupta, R. P. (1948). *Remote Sensing Geology*. India: Springer-Verlag.

Lo, D. C. (1986). *Applied Remote Sensing*. England: Logman Group.

NASA. (s.f.). *Terra*. Obtenido de The EOS Flagship: <http://terra.nasa.gov/about/terra-instruments>

Technology, C. I. (2012). *ASTER*. Obtenido de ASTER: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>

8.1 General:

- Pinilla, C. (1995). Elementos de teledetección. *Madrid: RA-MA Editorial*. Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio, E. Chuvieco, Ariel Ciencia, 2006.

8.2 Específica de procesamiento digital de imágenes:

- *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*, Markus Neteler and Helena Mitsova. The International Series in Engineering and Computer Science: Volume 773, Springer, 2008
- Jensen, J. R. (1986). *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. Univ. of South Carolina, Columbia..
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2002). *Digital image processing*.
- Vargas González, C (2009). Imágenes ASTER. Remote Sensing Geoimage.S.A.C. web: www.rs-geoimage.com