Geomatica Ambiental

www.geomatica.pe

TELEDETECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

PLATAFORMAS	LANDSAT 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, SENTINEL 1, 2 y 3, CBERS4, TERRA y AQUA
SENSORES	MSS, TM, ETM+, OLI, TIRS, MSI, ASTER L1T, MODIS, C-Band SAR, OLCI, SLSTR, SRAL, MWR, PanMUX, MUXCam, IRS y WFI
MDE	TanDEM-X, GMTED2010, SRTM, ASTER, ALOS World 3D, ALOS PALSAR, Terrain, IGN

Ing. Nino Frank
BRAVO MORALES
Especialista Geomática

2020

TELEDETECCIÓN ESPACIAL Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

SEGUNDA EDICIÓN

Se prohíbe la reproducción parcial o total del presente documento, su tratamiento informático, la transmisión por cualquier forma o medio electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otros métodos, sin previa autorización de los titulares del Copyright ©.

Derecho Reservados. Copyright ©.

©2020 GEOMÁTICA AMBIENTAL S.R.L.
Jr. Iquitos Nº 960
Tingo María – Huánuco – Perú.
Celular: +51-995664488
Email: info@geomatica.pe
Página: https://www.geomatica.pe/

©2020 **Especialista Geomática**
©2020 **Nino Frank Bravo Morales**
©2020 GEOMÁTICA AMBIENTAL S.R.L.
Huánuco – Perú
Celular: +51-995664488
Email: nino@geomatica.pe

PRÓLOGO SEGUNDA EDICIÓN

TEORÍA – TELEDETECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

Es un honor compartir este pequeño manual a lo largo de todo este tiempo, fruto de muchas jornadas laborales en diferentes instituciones públicas y privadas en los últimos ocho años y de compartir mis conocimientos a la gran comunidad de ingeniería, interesados en conocer y aprender un software libre tan versátil y potente, como es el QGIS.

Es muy gratificante saber que son muchas las personas a las que he llegado a enseñar de forma presencial e virtual en los temas de Teledetección, que se encuentran muy satisfechas por la enseñanza personalizada; y no es para más, mencionar que me siento muy a gusto de lo compartido mis enseñanzas en este mundo muy competitivo.

Es así, que este texto nació bajo el nombre de: TELEDETECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES, que impartí en la empresa GEOMATICA AMBIENTAL S.R.L, que dio a disponibilidad de alcanzar a muchos estudiantes y profesionales ligados a la ingeniería, por medio de las diferentes enseñanzas de forma directa e indirecta.

Agradecer primeramente a Dios por darme la vida, por acompañarme siempre en las circunstancias duras de la vida, también a mis padres **BRAVO TRUJILLO INOCENCIO** Y **MORALES BALTAZAR GENOVEBA**, por el amor que me tienen, por siempre aconsejarme y mostrarme las cosas duras de la vida, valorar su abnegado sacrificio por hacer de mí una persona de bien y ser mis guías en la formación de mi carrera profesional. A mi esposa, hijos, hermanas, tíos, y demás familiares por su cariño y gratitud, pensar en ello represento estimulo indeclinable de superación.

Agradecer a **Luca Congedo** por su tiempo y creación del Plugin Semi-Autimatic Classification (SCP siglas en ingles) de libre acceso en QGIS, que nos permite la clasificación semi-automática (clasificación supervisada), Pre-procesamiento, Post-Procesamiento de imágenes satelitales, entre otras.

Esperando que sea de su total agrado y con ánimos de buscar siempre la mejora continua, me despido, no sin antes, agradecer cualquier sugerencia y aporte para la prosperidad del presente.

Atentamente:

Ing. Nino Frank Bravo Morales
Especialista Geomática

INDICE

I. TELEDETECCION 9

1.1. Concepto de teledetección 9

1.2. Componentes de un sistema de Teledetección 9

1.3. El espectro electromagnético 11

1.3.1. Regiones espectrales utilizadas para la observación remota de la tierra. 11

1.4. Firma espectral 12

1.5. Tipos de sensores 13

1.5.1. Sensores pasivos 13

1.5.2. Sensores activos 14

1.5.2.1. Bandas de frecuencias de Radar 14

1.5.2.2. Característica de polarización de Radar 15

1.6. Resolución de los sensores remotos 15

1.6.1. Resolución espacial 15

1.6.2. Resolución espectral 16

1.6.3. Resolución radiométrica 17

1.6.4. Resolución temporal 18

1.7. Tipo de imágenes de teledetección 19

1.7.1. Imagen multiespectral (MS) 19

1.7.2. Imagen pancromática (PAN) 19

1.7.3. Imagen fusionada (PS) 20

II. SATÉLITES 21

2.1. SATÉLITE LANDSAT 22

2.1.1. Satélite Landsat 1, 2 y 3 - MSS 26

2.1.2. Satélite LandSat 4 y 5 – MSS y TM 27

2.1.3. Satélite LandSat-7 – ETM+ 29

2.1.4. Satélite LandSat-8 – OLI y TIRS 31

2.1.4.1. Banda de calidad (BQA.TIF) – Landsat 8 32

2.2. Satélite SENTINEL 34

2.2.1. Sentinel 1 - C-Band SAR 37

2.2.1.1. Órbita de la misión 38

2.2.1.2. Modos de adquisición Sentinel-1 38

2.2.1.3. Nivel de Producto del Sentinel 1 42

2.2.1.4. Software Sentinel Toolbox 42

2.2.1.5. Identificación del producto Sentinel 1 43

2.2.2. Sentinel 2 -MSI 46

2.2.2.1. Características clave 46
2.2.2.2. Nivel de proceso 47
2.2.2.3. Identificación del producto Sentinel 2 48
2.2.3. Sentinel 3 – Multi-instrumental 51
2.2.3.1. características clave 51
2.2.3.2. Características sensor OLCI – Instrumento para el color de la tierra y los océanos..... 52
2.2.3.3. Características del sensor SLSTR – Radiómetro de temperatura de la superficie del mar y la tierra..... 53
2.2.3.4. Características del sensor SRAL - Altímetro de Radar de Apertura Sintética 54
2.2.3.5. Características del sensor MWR - Microwave Radiometer 54
2.3. Satélite AQUA - EOS-PM 1 56
2.3.1. Sensor AMSR-E - (Radiomete avanzado de escaneo de microondas para EOS) 57
2.3.2. Sensor AMSU-A (Unidad avanzada de sondeo por microondas-A)..... 57
2.3.3. Sensor AIRS (Sonda infrarroja atmosférica)..... 58
2.3.4. Sensor HSB - (Sonda de humedad para Brasil) 58
2.3.5. Sensor CERES - (Nubes y el Sistema de Energía Radiante de la Tierra)..... 59
2.3.6. Sensor MODIS - (Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada) 59
2.4. Satélite TERRA - EOS AM-1 60
2.4.1. Sensor MISR - (Espectrorradiómetro de imágenes de ángulos múltiples)..... 61
2.4.2. Sensor MOPPIT - (Mediciones de contaminación en la troposfera)..... 61
2.4.3. Sensor CERES - (Las nubes y el sistema de energía radiante de la Tierra) 62
2.4.4. Sensor ASTER - (Radiómetro avanzado de emisión y reflexión térmica en el espacio)..... 62
2.4.5. Sensor MODIS (Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada) 64
2.4.5.1. Formato de almacenamiento HDF 66
2.4.5.2. Identificación de los productos 66
2.4.5.3. Nivel de Procesamiento - Productos..... 67
2.4.5.4. Acceso de descargar 74
2.5. Satélite CBERS 76
2.5.1. CBERS 4 - China-Brasil Earth Resources Satellite 77

2.6. Diferencia de las resoluciones de las plataformas y sensores..... 79
III. CORRECCIÓN ATMOSFERICA DE SUPERFICIE 80
3.1. Corrección radiométrica y atmosférica en LandSat 4, 5 y 7..... 80
3.1.1. Conversión ND a Radiancia del satélite Landsat 4, 5 Y 7..... 80
3.1.2. Conversión de radiancia a reflectancia al tope de la Atmosfera (TOA)..... 81
3.1.2.1. Determinando Distancia Tierra-Sol..... 82
3.1.2.2. Determinando el valor Valores de irradiancia Media Sola exo-atmosférica $ESUN\lambda$ (W /(m2 * μm)) 82
3.1.2.3. Conversión de grados SUN_ELEVATION a radianes 83
3.2. Radiancia y Reflectancia al tope de la atmosfera de LandSat 8..... 83
3.2.1. Conversión ND a Radiancia en el sensor Landsat 8..... 83
3.2.2. Conversión de ND a Reflectancia al tope de la Atmosfera (TOA) Landsat 8 84
3.3. Conversión a radiométrica y Reflectancia TOA del sensor ASTER L1T..... 84
3.3.1. Conversión de ND a Radiancia espectral ASTER L1T..... 84
3.3.2. Conversión de Radiancia a Reflectancia al tope de la atmosfera (TOA) ASTER L1T..... 85
3.3.2.1. Determinando el valor Valores de irradiancia Media Sola Exo-atmosférica $ESUN\lambda$ (W /(m2 * μm))..... 86
3.4. Conversión a Reflectancia TOA SENTINEL 2..... 86
3.5. Conversión a Reflectancia de superficie MODIS – MOD09..... 87
3.6. Corrección atmosférica por método de sustracción de superficie oscuras (DOS1) para satélites ASTER L1T, Sentinel2, Landsat 4, 5, 7 y 8. 87
3.6.1. Cálculo de las transmisividades 89
3.6.2. Cálculo de la corrección DOS1 89
IV. CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA DE LANDSAT 92
4.1. Corrección coseno o Lambertiano 92
4.2. Corrección Minnaert o no Lambertiano..... 93
4.3. Corrección Topográfica C..... 93
V. CONVERSIÓN A TEMPERATURA DE BRILLO Y DE SUPERFICIE LANDSAT Y ASTER L1T 95
5.1. Determinación de temperatura de Brillo..... 95
5.2. Estimación de la temperatura de superficie del suelo 96
5.2.1. Determinación de la longitud de onda central de las bandas térmicas LandSat y ASTER L1T..... 97
5.2.2. Determinar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) Landsat 4, 5, 7, 8 y sensor ASTER L1T. 97
5.2.3. Determinar la fracción de vegetación – FV..... 98

5.2.4. Determinación de la emisividad de la superficie de la tierra - LSE 99
VI. ÍNDICE DE IMÁGENES SATELITALES 100
6.1. Fundamentos de la vegetación 100
6.1.1. Comportamiento espectral de la hoja 100
6.2. Tipos de índices 103
6.2.1. Índice de vegetación proporcionada - RATIO 103
6.2.2. Índice Vegetación Diferencial - DVI 103
6.2.3. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada - NDVI 104
6.2.4. Índice de vegetación mejorada – EVI 105
6.2.5. Índice de vegetación Transformado - TVI 106
6.2.6. Índice de vegetación Transformado Corregido - CTVI 106
6.2.7. Índice de Vegetación Atmosféricamente Resistente - ARVI 107
6.2.8. Índice de Vegetación Avanzada - AVI 107
6.2.9. Índice de vegetación Ajustado al Suelo - SAVI 108
6.2.10. Índice de Área foliar – LAI 109
6.2.11. Índice de Suelo desnudo - BSI 109
6.2.12. Índice de Diferencia Normalizada Agua - NDWI 110
6.2.13. Modificación del índice de Diferencia Normalizada Agua – MNDWI 111
6.2.14. Índice del Agua ICEDEX 112
6.2.15. Índice de estrés Hídrico - MSI 112
6.2.16. Índice Normalizado de Diferencia de Nieve - NDSI 113
6.2.17. Índice de Diferencia Normalizada de humedad - NDMI 114
6.2.18. Índice Normalizado de Áreas Quemadas - NBRI 115
VII. COMPOSICION DE BANDAS LANDSAT, SENTINEL-2, ASTER Y MODIS 116
7.1. Descripción de las bandas espectrales 117
VIII. Modelo Digital De Terreno - MDT 128
8.1. Tipos de Modelo Digital de Elevación - MDE 129
8.1.1. GMTED2010 - Datos Globales de Elevación del Terreno de Resolución Múltiple 2010 – 250m – 500m – 1000m 129
8.1.2. Misión de la topografía del radar espacial (SRTM) 131
8.1.3. Modelo Digital de Elevación Global – GDEM ASTER 133
8.1.4. TanDEM-X 90m 134
8.1.5. ALOS World 3D - 30m (AW3D30) 135
8.1.6. ALOS PALSAR MDE 12.5m 136
8.1.7. Terrain MDE – 5m 138
8.1.8. Carta Nacional Perú – Instituto Geográfico Nacional (IGN) 138

IX. PROGRAMAS 141
9.1. SNAP 141
9.2. TerraAmazon 141
9.3. GRASS GIS 142
9.4. SAGA GIS 142
9.5. QGIS 143
9.6. Plugin SCP 143
X. BIBLIOGRAFIA 145

I. TELEDETECCION

1.1. Concepto de teledetección

Es “la ciencia y la tecnología por la cual se pueden identificar las características de los objetos de interés, medir o analizar las características sin contacto directo” (JARS, 1993).

Por lo general, la teledetección es la medición de la energía que se emanó de la superficie de la Tierra. Si la fuente de la energía medida es el sol, entonces se llama la teledetección pasiva, y el resultado de esta medición puede ser una imagen digital (RICHARDS y JIA, 2006). Si la energía medida no es emitida por el Sol, pero desde la plataforma de sensor, entonces se define como la teledetección activa, tales como sensores de radar que funcionan en el rango de microondas (RICHARDS y JIA, 2006).

1.2. Componentes de un sistema de Teledetección

Un sistema de teledetección incluye los siguientes elementos: (Según CHUVIECO, 1996).

- **Fuente de Energía:** Es originado de la radiación electromagnética que el sensor va a captar. Puede tratarse de una fuente pasiva como la luz solar o activa cuando es emitida por el sensor que luego capta el reflejo (como el radar).
- **Cubierta terrestre**: Son los rasgos naturales o realizados por el hombre (vegetación, suelo, rocas, construcción, etc.) que refleja la señal hacia el sensor.
- **Sistema sensor:** Compuesto por el sensor propiamente dicho (cámaras, radar, etc.) y la plataforma que lo alberga (satélite, avión, globo). Tiene la misión de captar la energía proveniente de la cubierta terrestre y almacenarla o enviarla directamente al sistema de recepción.
- **Sistema de recepción-comercialización:** Es el que recibe la información del sistema sensor, la guarda en formato apropiado y la distribuye a los usuarios.
- **Interprete:** quien convierte los datos en información temática de interés (agricultura, forestal, geografía, catastro, medio ambiente, militar, etc.) ya sea mediante procedimientos y técnicas visuales o digitales.
- **Usuario final:** Es el beneficiario del documento fruto de la interpretación, así como de decidir sobre las consecuencias que de él deriven.

Figura 1. Los componentes de un sistema de Teledetección (CHUVIECO, 1996).

1.3. El espectro electromagnético

El espectro electromagnético es “el sistema que clasifica, de acuerdo con la longitud de onda, toda la energía (de corto cósmica a largo radio) que se mueve, armónicamente, a la velocidad constante de la luz” (NASA, 2011).

1.3.1. Regiones espectrales utilizadas para la observación remota de la tierra.

- Espectro visible (0.4 - 0.7 µm): Rango de frecuencias del ojo humano. Máxima radiación solar. Subdividido en tres bandas: Rojo (0.6 - 0.7 µm), Verde (0.5 - 0.6 µm) y Azul (0.4 - 0.5 µm).
- Infrarrojo cercano (0.7 - 1.1 µm): Denominado IR fotográfico o reflejado. Energía solar que reflejan los cuerpos. Comportamiento similar al espectro visible.
- Infrarrojo medio (1.1 – 8 µm): Se entremezclan radiación solar y emisión. La atmósfera afecta sensiblemente: aprovechado para medir concentraciones de vapor de agua, ozono, aerosoles...
- Infrarrojo térmico (8 - 14 µm): Radiaciones emitidas por los propios cuerpos. Se puede determinar la Temperatura de un cuerpo (IR térmico). Se puede disponer de imágenes a cualquier hora del día.
- Microondas (1mm-1m): Interés creciente de la Teledetección en esta banda. Las perturbaciones atmosféricas son menores y es transparente a las nubes. Se suelen utilizar sensores activos.

Figura 2. Espectro electromagnético

Cuadro 1. Características de la región espectral

Región Espectral (bandas)	Longitud de onda (λ)	Características
Rayos Gamma	< 0,03 nm	Radiación completamente absorbida por las capas superiores de la atmósfera. No se usa en teledetección
Rayos X	0,03 - 30 nm	Radiación completamente absorbida por la atmósfera. No se usa en teledetección
Ultravioleta	0,03 - 04 µm	La radiación con λ<0,3µm es completamente absorbida por la capa de ozono
Visible (azul, verde y rojo)	0,4 - 0,7 µm	Se puede detectar a través de fotodetectores y películas fotosensibles normales (color y B/N).
Infrarrojo Próximo	0,7 - 1,3 µm	Discrimina masas vegetales y concentraciones de humedad.
Infrarrojo Medio	1,3 - 8 µm	Estimación del contenido de humedad en la vegetación y detección de focos de alta temperatura.
Infrarrojo Térmico	8 - 14 µm	Detecta el calor proveniente de la mayor parte de la cubierta terrestre.
Micro-Ondas	0,1 - 100 cm	Radiación de grandes longitudes de onda, capaces de penetrar nubes, nieblas y lluvia.
Ondas de Radio	> 100 cm	Radiación con las mayores longitudes de onda del espectro. Usadas en telecomunicaciones

1.4. Firma espectral

La firma espectral es la reflectancia como una función de longitud de onda (véase la Figura curvas espectrales de reflectancia de cuatro diferentes Targets); cada material tiene una firma única, por lo tanto, se puede utilizar para la clasificación de materiales (NASA, 2011).

Figura 3. Curvas de reflectancia espectral de cuatro diferentes objetivos (NASA, 2011).

1.5. Tipos de sensores

1.5.1. Sensores pasivos

Son de mayor valor en las aplicaciones de la percepción remota en la evaluación de los recursos naturales. Los sensores pasivos simplemente reciben las señales emitidas naturalmente y reflejadas por los objetos percibidos. Estas señales, generadas por la radiación solar natural, puede proveer una información muy rica sobre los objetos percibidos.

Ejemplos: ASTER, LandSat, MODIS, SENTINEL.

Figura 4. Sensor pasivo de un satélite.

1.5.2. Sensores activos

El sensor emite radiación dirigida hacia el objetivo a ser estudiado. La radiación reflejada de ese objeto es detectada y medida por el sensor.

Ejemplos: Lidar, Radar, Sonar.

Figura 5. Sensor activo de un satélite.

1.5.2.1. Bandas de frecuencias de Radar

Penetración de la señal es el factor principal en la selección de la longitud de onda.

Penetración a través de la vegetación o el suelo incrementa mientras más larga es la longitud de onda.

Cuadro 2. Característica de las bandas de Radar.

Frecuencia bandas	Rango de Frecuencia		Longitud de Onda (cm)		Ejemplo aplicación
P-Band	300 MHz	1 GHz	30	100	Biomasa, humedad del suelo, penetración
L-Band	1 GHz	2 GHz	15	30	Agricultura, Forestal humedad del suelo
S-Band	2 GHz	4 GHz	7.5	15	
C-Band	4 GHz	8 GHz	3.8	7.5	Agricultura y Océano
X-Band	8 GHz	12 GHz	2.4	3.8	Agricultura, Océano, radar de alta resolución
Ku-Band	12 GHz	18 GHz	1.7	2.4	glaciología (mapeo de la cubierta de nieve)
k-Band	18 GHz	27 GHz	1.1	1.7	
Ka-Band	27 GHz	47 GHz	0.8	1.1	Radar de alta resolución

1.5.2.2. Característica de polarización de Radar

Las dimensiones de radar pueden ser polarizadas (usualmente horizontal y vertical)

- HH: Transmitida Horizontalmente, Recibida Horizontalmente.
- HV: Transmitida Horizontalmente, Recibida Verticalmente.
- VH: Transmitida Verticalmente, Recibida Horizontalmente.
- VV: Transmitida Verticalmente, Recibida Verticalmente.

Figura 6. Característica de polarización del radar.

1.6. Resolución de los sensores remotos

1.6.1. Resolución espacial

Es la distancia que corresponde a la unidad mínima de información incluida en la imagen (píxel). Así, a menor tamaño del píxel mayor será la resolución espacial, lo que implica que el sensor obtendrá más detalle de los objetos.

Figura 7. Resolución espacial – Comparación de tamaño de pixel de una imagen.

Mediante la resolución espacial podemos aplicar la escala topográfica para la presentación de mapas:

Cuadro 3. Escala del mapa mediante la resolución espacial (m).

Satélites	Resolución espacial (metros)	Escala cartográfica máxima	Unidad mínima cartografiable ($5mm^2$) /1mm
MODIS	1000	1: 1,500,000	10 ha/1500 m
	500	1: 1,000,000	5 ha/1000 m
	250	1: 500,000	2.5 ha/500 m
Landsat	30	1: 100,000	5 ha/100 m
ASTER	15-30	1: 50,000	1.25 ha/50 m
Sentinel-2	10	1: 15,000	0.1 ha/15 m
CBERS-4	5	1: 10,000	0.05 ha/10 m
IKONOS	4	1: 8,000	0.03 ha/ 8 m
	1	1: 3,000	0.004 ha/ 3 m
QuickBird	2.4	1: 5,000	0.01 ha/ 5 m
	0.6	1: 1,500	0.001 ha/ 1.5 m

Fuente: Lencinas & Siebert

1.6.2. Resolución espectral

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Entre mayor sea esta resolución se tendrá información del comportamiento de una misma cobertura en diferentes bandas espectrales.

Figura 8. comparación de bandas LANDSAT 7 y 8, sentinel-2, ASTER L1T y MODIS

1.6.3. Resolución radiométrica

Nos indica la medida en bits (dígitos binarios), es la gama de valores de brillo disponibles, que en la imagen se corresponden con el alcance máximo de DN; por ejemplo, una imagen con una resolución de 8 bits tiene 256 niveles de brillo (RICHARDS Y JIA, 2006).

Figura 9. Resolución radiométrica: comparación en los niveles de grises o niveles digital (ND) de una imagen (UNESCO RAPCA).

En una imagen cada pixel, puede asumir una cantidad de valores específica, dependiendo de su resolución radiométrica, por ejemplo una imagen de 8bits, va a varias de 0 – 255 tonalidades de gris.

Fórmula para determinar niveles de Gris:

$$2^{(número\ de\ bits)} = \text{Niveles de Gris}$$

Figura 10. Codificación de los ND de una imagen Landsat 8bits.

Cuadro 4. Número de bits determinando el rango de gris o ND.

Bits	Niveles de gris	Rango	
1	2	0	1
2	4	0	3
3	8	0	7
4	16	0	15
5	32	0	31
6	64	0	63
7	128	0	127
8	256	0	255
9	512	0	511
10	1024	0	1023
11	2048	0	2047
12	4096	0	4095
13	8192	0	8191
14	16384	0	16383
15	32768	0	32767
16	65536	0	65535

Fuente: Elaboración propia.

1.6.4. Resolución temporal

Para los sensores de satélites, también existe la resolución temporal, que es el tiempo necesario para volver a visitar la misma zona de la Tierra (NASA, 2011).

Se refiere a la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), así como del diseño del sensor.

- Alta resolución temporal: < 1 día - 3 días
- Media resolución temporal: 4 - 16 días
- Baja resolución temporal: > 16 días

1.7. Tipo de imágenes de teledetección

1.7.1. Imagen multiespectral (MS)

Imagen que lleva asociados varios valores numéricos a cada píxel, tantos como bandas espectrales sea capaz de detectar el sensor. A priori, es el tipo de producto más útil ya que nos proporciona, en cierto modo, la firma espectral de los distintos elementos presentes en la imagen.

Es captada mediante un sensor digital que mide la reflectancia en muchas bandas.

Figura 11.Estructura de las imágenes multiespectrales

1.7.2. Imagen pancromática (PAN)

Dispone de una sola banda espectral que abarca comúnmente gran parte del visible y comienzo del infrarrojo, obteniendo como resultado una imagen que habitualmente se representa en una escala de grises (imagen en blanco y negro).

Como contrapartida, tienen la ventaja de poseer mayor resolución espacial que las multiespectrales que proporciona el mismo satélite. Es por ello que son muy interesantes para la detección de pequeños elementos de la superficie terrestre que no son distinguibles en la imagen multiespectral.

Figura 12.Banda pancromática

1.7.3. Imagen fusionada (PS)

Este tipo de imagen se obtiene mediante la fusión de una imagen multiespectral con una pancromática. Las siglas PS provienen de pan-sharpened, su denominación en inglés. Básicamente, consiste en asignar a cada píxel de la imagen pancromática los valores procedentes de un algoritmo que combina la imagen pancromática con la multiespectral.

Figura 13. Imagen fusionada RGB + Pancromática

II. SATÉLITES

Las imágenes Satelitales están confeccionadas por matrices, en las que cada celda representa un píxel, las dimensiones de este píxel dependerá de la Resolución espacial del sensor. Los sensores registran la radiación electromagnética que proviene de las distintas coberturas y las almacena en cada píxel, de acuerdo a los intervalos de longitudes de onda, en las que este programado el sensor para captar.

Esta energía electromagnética es representada en cada píxel por un valor digital al cual se le agrega una tonalidad, este valor es llamado Nivel Digital (ND), la cantidad de niveles digitales que se podrá representar dependerá de la Resolución Radiométrica del sensor, para un sensor con Resolución Radiométrica de 8 bit los niveles digitales varían entre 0 y 255, siendo en la escala de grises el cero igual al color negro y el 255 igual al color blanco.

La posición de cada píxel en la imagen satelital está determinada por un eje de coordenadas XYZ.

X : Nº de columna de la matriz.

Y : Nº de fila de la matriz.

Z : Nivel digital (valor de intensidad de la escala de grises).

Figura 14. Componentes de una imagen digital.

La asignación de colores más conocida por los usuarios es la del falso color convencional (R=Red (rojo); G=Green (verde); B=Blue (azul)), la cual asigna el color azul a la banda del verde, el color verde a la banda del rojo y el color rojo a la banda del infrarrojo cercano.

La información que se obtiene de las distintas bandas de las imágenes satelitales, son de gran ayuda en diversos ámbitos tales como:

- Agricultura y recursos forestales
- Uso de suelo y Geología.
- Recurso de agua y Medio ambiente.

2.1. SATÉLITE LANDSAT

El programa Landsat es una serie de misiones de observación de la Tierra por satélite administrado conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de EE.UU.

En 1972, el lanzamiento de ERTS-1 (Tierra Recursos Tecnología por Satélite, más tarde renombrado Landsat 1) comenzó la era de la una serie de satélites que tienen desde que adquirida forma continua de tierras datos obtenidos por detección remota basados en el espacio.

El último satélite de la serie es Landsat 8, la Misión de Continuidad de Datos de Landsat (LDCM), se puso en marcha el 11 de febrero de 2013, los datos adquiridos por el satélite continúan para expandir el archive para los usuarios de en todo el mundo.

Serie de satélites Landsat y año de su lanzamiento:

Landsat 1: 23/07/1972 – 06/01/1978

Landsat 2: 22/01/1975 – 25/01/1982

Landsat 3: 05/03/1978 – 31/03/1983

Landsat 4: 16/06/1982 – 14/12/1993

Landsat 5: 07/03/1984 – 05/06/2013

Landsat 6: 03/10/1993 - Lanzamiento fallido.

Landsat 7: 1999 – 2003 OF SLC - actualidad

Landsat 8: 2013 – actualidad

Figura 15.Misión cronológica Landsat

2.1.1. Identificación de los productos

Los productos Landsat se nombran a través de la convención adoptada por la NASA.

Código: **LXSPPPRRRYYYYDDDGGGVV**

Ejemplo: LC80070662014250LGN00

Donde:

L	: Nombre de la misión (**L:** Landsat)
X	: Tipo de sensor: (**C**: Sensor OLI y TIRS; **T**: Sensor TM; **E**: sensor ETM+; **M**: Sensor MSS)
S	: Número de misión LandSat (**8, 7 o 5**).
PPP	: Path referencia global WRS-2 (**007**).
RRR	: Row referencia global WRS-2 (**066**).
YYY	: Año de adquisición de la imagen (**2014**).
DDD	: Día juliano de adquisición (**250**)
GGG	: ID de la estación terrena (**LGN**).
VV	: Número de versión archivo (**00**)

Código: **LXSS_LLLL_PPPRRR_YYYYMMDD_yyyymmdd_CC_TX**

Ejemplo: LC08_L1TP_006066_20170722_20170728_01_T1

Donde:

L	: Nombre de la misión (**L:** Landsat)
X	: Tipo de sensor: (**C**: Sensor OLI y TIRS; **T**: Sensor TM; **E**: sensor ETM+; **M**: Sensor MSS)
SS	: Número de misión LandSat (**08, 07 o 05**).
LLLL	: Nivel de procesado de la imagen según su corrección geométrica y geométrica pudiendo encontrar L1TP, L1GT o L1GS
PPP	: Path referencia global WRS-2 (**006**).
RRR	: Row referencia global WRS-2 (**066**).
YYYYMMDD	: Fecha de adquisición de la imagen: Año/mes/día (20170722).
yyyymmdd	: Fecha de procesado de la imagen: Año/mes/día (20170728).
CC	: Número de colección (01, 02…)
TX	: Categoría de colección (RT = Tiempo real, T1 = Nivel 1, T2 = Nivel 2).

Localización de la zona de análisis Landsat.

2.1.2. Flujo de la corrección de las imágenes Landsat

ACCESO DE DESCARGAR LANDSAT

https://earthexplorer.usgs.gov/

https://lv.eosda.com/

https://landsatlook.usgs.gov/viewer.html

https://glovis.usgs.gov/app

http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/

https://reverb.echo.nasa.gov/

https://landsatonaws.com/

LANDSAT 1 - 3

MSS

2.1.3. Satélite Landsat 1, 2 y 3 - MSS

Landsat 1 (anteriormente ERTS 1, Satélite Tecnológico de los Recursos Terrestres) fue una versión modificada del satélite meteorológico Nimbus 4. La nave espacial en órbita casi polar sirvió como plataforma estabilizada orientada hacia la Tierra para obtener información sobre recursos agrícolas y forestales, geología y recursos minerales, hidrología y recursos hídricos, geografía, cartografía, contaminación ambiental, oceanografía y recursos marinos y fenómenos meteorológicos.

En los tres primeros satélites (Landsat 1, 2 y 3) tiene una longitud de onda desde 0.5 a 1.1 micrómetros, presenta un sólo sensor MSS (Sistema de Escáner Multiespectral), su órbita está en una altitud de 960 km.

Cuadro 1. Característica LandSat 1, 2 y 3 del sensor MSS

LANDSAT 1, 2 y 3 Banda	Sensor	Longitud de onda (µm)	Resolución Espacial (m)	Resolución Radiométrica
4 - Verde	MSS	0.50 - 0.60	60	8 bits
5 - Rojo	MSS	0.60 - 0.70	60	8 bits
6 - Infrarrojo Cercano (NIR1)	MSS	0.70 - 0.80	60	8 bits
7 - Infrarrojo Cercano (NIR2)	MSS	0.80 - 1.10	60	8 bits

Fuente:https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products.

LANDSAT 4 y 5

MSS & TM

2.1.4. Satélite LandSat 4 y 5 – MSS y TM

El satélite LANDSAT-4 se lanzó el 16 de junio de 1982 y LANDSAT-5 fue lanzado el 07 de marzo de 1984, teniendo los dos satélites sensores **MSS** (Sistema de Escáner Multiespectral) y **TM** (Mapeador Temático)

Landsat 5 se ha convertido en el satélite de Observación de la Tierra que más tiempo ha estado operativo. Finalmente fue dado de baja el 5 de junio de 2013. Sus aplicaciones se extienden a campos como la detección de cambios globales, agricultura, calidad del agua y administración de recursos.

MSS tiene una resolución espacial de 60m y el TM tiene una resolución espacial de 30m, ambas con una resolución temporal de 16 días.

Cuadro 5. Característica imagen LandSat 4 y 5

LANDSAT 4 y 5 Banda	Sensor	Longitud de onda (µm)	Resolución Espacial (m)	Resolución Radiométrica
1 - Verde	MSS	0.50 - 0.60	60	8 bits
2 - Rojo	MSS	0.60 - 0.70	60	8 bits
3 - Infrarrojo Cercano (NIR1)	MSS	0.70 - 0.80	60	8 bits
4 - Infrarrojo Cercano (NIR2)	MSS	0.80 - 1.10	60	8 bits
1 - Azul	TM	0.45 - 0.52	30	8 bits
2 - Verde	TM	0.52 - 0.60	30	8 bits
3 - Rojo	TM	0.63 - 0.69	30	8 bits
4 - Infrarrojo Cercano (NIR)	TM	0.76 - 0.90	30	8 bits
5 - Onda corta infrarroja (SWIR) 1	TM	1.55 - 1.75	30	8 bits
6 - Thermal	TM	10.40 - 12.50	120 * (30)	8 bits
7 - Onda corta infrarroja (SWIR) 2	TM	2.08 - 2.35	30	8 bits

* Band TM 6 fue adquirida a una resolución de 120 metros, pero el producto se vuelve a muestrear a los píxeles de 30 metros.

Fuente:https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products.

La Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio

Landsat 7

Continuando el registro de datos de la cubierta terrestre

Lanzado: Delta II · 15 Abril, 1999

Serpentiante Mississippi · 28 Mayo, 2003

Leyenda Delta · 22 Setiembre, 2002

WWW.nasa.gov

2.1.5. Satélite LandSat-7 – ETM+

Este tipo de sensor presenta el satélite de LandSat 7 y las imágenes constan de ocho bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros de Bandas 1 a 5 y 7. La resolución de la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Presenta una resolución temporal de 16 días. El tamaño aproximado es de 170 km escena de norte a sur por 183 km de este a oeste.

El 31 de mayo 2003 el satélite Landsat 7 sufre el fallo en su sistema corrector de exploración de línea (SLC), provocando un bandeado o efecto de gaps en la imagen, la perdida de un 22% de la información de la imagen.

Cuadro 6. Característica imagen Landsat 7 – ETM+

Landsat 7 Banda	Sensor	Longitud de onda (µm)	Resolución Espacial (m)	Resolución Radiométrica
1 - Azul	ETM+	0.45 - 0.52	30	8 bits
2 - Verde	ETM+	0.52 - 0.60	30	8 bits
3 - Rojo	ETM+	0.63 - 0.69	30	8 bits
4 - Infrarrojo Cercano (NIR)	ETM+	0.76 - 0.90	30	8 bits
5 - onda corta infrarroja (SWIR) 1	ETM+	1.55 - 1.75	30	8 bits
6_1 – Termal – Baja ganancia	ETM+	10.40 - 12.50	60 * (30)	8 bits
6_2 – Termal – Alta ganancia	ETM+	10.40 - 12.50	60 * (30)	8 bits
7 - onda corta infrarroja (SWIR) 2	ETM+	2.08 - 2.35	30	8 bits
8 - Pancromática	ETM+	0.52 - 0.90	15	8 bits

* ETM+ Band 6 se adquiere a una resolución de 60 metros, pero el producto se vuelve a muestrear a los píxeles de 30 metros.

Fuente:https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products.

Landsat 8

Landsat Misión de Continuidad de Datos (LDCM)

continuar el registro de las superficies continentales de la tierra como se ve desde el espacio

Lanzado: Atlas V Rocket · 11 Febrero, 2013

Colorado, Operacional Imágen de la tierra (OLI) · 18 Marzo, 2013

Colorado, Sensor Infrarojo Termal (TIRS) · 18 Marzo, 2013

WWW.nasa.gov

2.1.6. Satélite LandSat-8 – OLI y TIRS

El satélite LANDSAT-8, fue lanzado el 11 de febrero de 2013, es un satélite óptico de resolución media cuyo objetivo es proporcionar información para actividades relacionadas con la agricultura, la educación, los negocios, la ciencia y también en el ámbito estatal.

Este satélite contiene dos sensores: Sensor operacional de imágenes de tierra (**OLI**) y un Sensor Infrarojos Térmico (**TIRS**).

OLI está formado por 9 bandas espectrales que van desde lo visible pasando por los infrarojos hasta el espectro de radiación de bajas ondas. Con las imágenes de resolución espacial, que oscilan entre los 15 y los 30m, LANDSAT-8 proporciona imágenes de satélite de calidad que podrían demostrar los diferentes usos que se le podría dar a la tierra desde el espacio.

TIRS está compuesto por dos bandas espectrales, las cuales detectan infrarojos térmicos, una herramienta imprescindible para medir la temperatura de la superficie de la Tierra.

Cuadro 7. Característica imagen Landsat 8

Landsat 8 Banda	Sensor	Longitud de onda (µm)	Resolución Espacial (m)	Resolución Radiométrica
1 - Ultra azul (costero / aerosol)	OLI	0.43 - 0.45	30	16 bits
2 - Azul	OLI	0.45 - 0.51	30	16 bits
3 - Verde	OLI	0.53 - 0.59	30	16 bits
4 - Rojo	OLI	0.64 - 0.67	30	16 bits
5 - Infrarrojo Cercano (NIR)	OLI	0.85 - 0.88	30	16 bits
6 - onda corta infrarroja (SWIR) 1	OLI	1.57 - 1.65	30	16 bits
7 - onda corta infrarroja (SWIR) 2	OLI	2.11 - 2.29	30	16 bits
8 - Pancromática	OLI	0.52 - 0.90	15	16 bits
9 - Cirrus	OLI	1.36 - 1.38	30	16 bits
10 - infrarrojo térmico 1	TIRS	10.60 - 11.19	100 * (30)	16 bits
11 - infrarrojo térmico 2	TIRS	11.50 - 12.51	100 * (30)	16 bits

* Bandas TIRS se adquieren a una resolución de 100 metros, pero se vuelven a muestrear a 30 metros de producto entregado datos.

Fuente:https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products.

Figura 16.Respuesta espectral de algunas coberturas en las bandas del sensor OLI

Fuente: Rodolfo Franco, 2017.

2.1.6.1. Banda de calidad (BQA.TIF) – Landsat 8

Es una banda de datos adicionales muy importante en **Landsat 8**. Cada pixel de la banda de control de calidad contiene un valor decimal que representa las combinaciones de bits de relleno de la superficie, la atmosfera, y las condiciones de sensores que pueden afectar a la utilidad general de un pixel dado.

Los datos mayores a 28,590 de su número digital ND son nubes y Cirrus.

Cuadro 8. Interpretación del valor de pixel en la banda BQA

Valor de pixel (decimal)	Nube	Cirrus	Nieve/Hielo	Vegetación	Agua	Oclusión del terreno	Dropped Frame	Relleno
61440	Sí	Sí	No determinado	No determinado	No determinado	No	No	No
28590	No		Sí	Sí	Tal vez	Sí	Sí	
32	No determinado	No determinado	No determinado	No determinado	Tal vez	No	No	No
0	No determinado	No determinado	No determinado	No determinado	No determinado	No	No	No

Fuente: USGS 2013.

MAPA DE GRILLAS DEL SATELITE LANDSAT

2.2. Satélite SENTINEL

La Agencia Espacial Europea – ESA, está desarrollando una nueva familia de misiones llamadas Sentinel específicamente para las necesidades operativas del programa Copernicus.

Cada misión de Sentinel se basa en una constelación de dos satélites para cumplir con los requisitos de revisión y cobertura, proporcionando conjuntos de datos robustos para los servicios de Copernicus.

Estas misiones cuentan con una gama de tecnologías, como el radar y los instrumentos de imágenes multiespectrales para el monitoreo de la tierra, el océano y la atmósfera.

Fechas previstas para lanzamiento y periodo en operación de los satélites de las

misiones Sentinel.

<u>Descarga de datos Sentinel</u>

ESA Copernicus - https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home - Sentinel 1, 2 y 3

Earthdata search - https://search.earthdata.nasa.gov/ - Sentinel 1

Alaska Satellite Facility - https://vertex.daac.asf.alaska.edu/ Sentinel 1

Land Viewer - https://eos.com/landviewer/ Sentinel 1 y 2

ESA Copernicus - https://scihub.copernicus.eu/s3/#/home - Sentinel 3

Identificación de los productos

Los productos SENTINEL-está en convención gránulos:

Código: MMM_CCCC_ *FFF_DDDDDD_ssss_yyyymmddThhmmss_Zzzzzzz_Xxxxxx_Nxx.yy*

Ejemplo: *S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MTI__20160804T214646_A005842_T18LVR_N02.04*

Donde:

MMM : El identificador de misión (S2A)

CCCC : Clase de archivo (OPER: para todos los productos generados Durante la Fase de Operaciones).

FFF : Categoría de archivo (MSI_)

DDDDDD : Descriptor semántico (L1C_TL)

ssss : El identificador de instancia contiene el Centro de sitios (MTI_)

yyyy : Año de creación (2016)

mm : Mes de creación (08)

dd : Día de creación (04)

Thhmmss : Tiempo de creación hora, minutos y segundos (21:46:46)

Zzzzzzz : Número de órbita absoluta (A005842).

Xxxxxxx : Número de Grilla (T18LVR)

Nxx.yy : Número de línea base de procesamiento (N02.04)

→ SENTINEL-1

ESA Misión del Observatorio de Radar para los Servicios Operativos de Copernicus

www.esa.int

Agencia Espacial Europea - ESA

2.2.1. Sentinel 1 - C-Band SAR

El satélite Sentinel-1 formó parte de la primera misión espacial Copérnico, lanzada por Agencia Espacial Europea ESA en el 2014. Es un satélite Radar de Apertura Sintética (SAR) que permite obtener imágenes independientemente de las condiciones climáticas.

Es una misión de generación de imágenes de radar de día y de noche en órbita polar, el principal objetivo de monitoreo de tierra y océano. La misión es proporcionar la continuidad de datos SAR de banda C luego del retiro de ERS-2 y el final de la misión Envisat.

Para lograr esto, los satélites llevan un sensor **C-Band SAR**, que ofrece imágenes de resolución media y alta en todas las condiciones climáticas. El C-Band SAR es capaz de obtener imágenes nocturnas y detectar pequeños movimientos en el suelo, lo que lo hace útil para el monitoreo de la **tierra y el mar.**

La sigla **GMES** es Monitoreo Global de Medio Ambiente y Seguridad era el programa, ahora llamada **Copernicus** es el nuevo nombre del Programa de Observación de la Tierra de la Comisión Europea.

Sentinel 1A fecha de lanzamiento: 03/04/2014

Sentinel 1B fecha de lanzamiento: 25/04/2016

El objetivo de la misión general de la misión Sentinel 1 es proporcionar la continuidad de las aplicaciones y servicios operativos SAR de banda C en Europa.

- Monitoreo de tierras de bosques, agua, suelo y agricultura
- Soporte de mapas de emergencia en caso de desastres naturales
- Monitoreo marino del ambiente marítimo
- Observaciones del hielo marino y monitoreo del iceberg
- Producción de cartas de hielo de alta resolución
- Pronosticar condiciones de hielo en el mar
- Mapeo de derrames de petróleo
- Detección de buques de mar.
- Monitoreo del cambio climático

2.2.1.1. Órbita de la misión

- Tipo de órbita: sincrónico al sol, casi polar, circular - Heliosincrónica
- Altura de la órbita: 693 km
- Inclinación: 98.18 °
- Resolución temporal: 175 órbitas en 12 días – repetición 6 días.
- Resolución espacial: 5 x 20 m

Figura 17.Órbita del Sentinel 1A y 1B

2.2.1.2. Modos de adquisición Sentinel-1

✓ **Extra-Wide Swath – Franja Extra ancha** (**EW):** Este modo se emplea sobre zonas marítimas y polares, donde se necesita una gran cobertura y tiempos de revisita cortos. El ancho de escena máximo en este modo es de 400km con una resolución de 20x40m.

El modo EW está destinado principalmente para uso sobre hielo marino, zonas polares y ciertas áreas marítimas, en particular para hielo, supervisión de derrames de petróleo y servicios de seguridad.

✓ **Strip Mode** (**SM**): Que proporcionará datos con una resolución de 5x5m y un ancho de escena máximo 80km.

El modo de imagen Stripmap funciona con uno de los seis haces de elevación predefinidos, cada uno en un ángulo de incidencia

diferente. La siguiente tabla muestra la incidencia y los ángulos de fuera de nadir para los haces de Stripmap.

El modo Stripmap se usa para crear imágenes de islas pequeñas y, en casos excepcionales, solo para respaldar las acciones de gestión de emergencias.

- ✓ **Wave Mode** – **Modo de Onda (WV**): Este modo pretende ayudar en la determinación de la dirección y altura de olas en el océano. Se compone de imágenes con una resolución de 20x20km que se adquieren alternativamente con dos ángulos de incidencia cada 100km, es decir, dos imágenes con el mismo ángulo de incidencia están separadas 200km.

  El modo de onda adquiere datos en viñetas de 20 km por 20 km, a una resolución espacial de 5 m por 5 m, cada 100 km a lo largo de la órbita, adquirida alternativamente en dos ángulos de incidencia diferentes. Las viñetas en el mismo ángulo de incidencia están separadas por 200 km. Las hileras alternan ángulos incidentes entre el rango cercano y el rango lejano (aproximadamente 23 ° y 36 ° respectivamente).

Adquisiciones en modo WV alternante

- ✓ **Interferometric Wide Swath – Franja ancha interferométrica (IW):** Es el principal modo de adquisición en tierra y satisface la mayoría de los requisitos de servicio. Adquiere datos con una franja de 250 km a una resolución espacial de 5 m por 20 m (aspecto único). El modo IW captura tres sub-franjas utilizando la observación del terreno con SAR progresivos de exploración (TOPSAR). Con la técnica TOPSAR, además de dirigir el haz en rango como en ScanSAR, el haz también se dirige electrónicamente de atrás hacia adelante en la dirección de acimut para cada ráfaga, evitando las festoneadas y dando como resultado una calidad de imagen homogénea en toda la franja.

  El modo TOPSAR reemplaza el modo ScanSAR convencional, logrando la misma cobertura y resolución que ScanSAR, pero con una relación señal / ruido casi uniforme y una relación de ambigüedad de destino distribuida.

Figura 1: Adquisición de sub-hilera TOPSAR

Los productos IW SLC contienen una imagen por sub-franja y una por canal de polarización, para un total de tres (polarización simple) o seis imágenes (polarización dual) en un producto IW.

Después de la fusión de ráfagas y sub-hileras, se puede crear el producto completo, como es el caso de los productos GRDH que se muestran en la Figura 3. La técnica TOPSAR reduce en gran medida los efectos de festoneado en comparación con el ScanSAR convencional.

Figura 18. Productos de datos que opera Sentinel-1

2.2.1.3. Nivel de Producto del Sentinel 1

- **Single Look Complex** (**L-1 SLC**): Productos SAR de nivel 1 georreferenciados utilizando datos de la órbita y la altitud del satélite.
- **Ground Range Detected** (**L-1 GRD**): Productos SAR de nivel 1 que han sido proyectados usando un modelo elipsoidal de La Tierra. Estos productos podemos encontrarlos además con 3 resoluciones: Resolución completa (FR), Alta Resolución (HR) y Media Resolución (MR).
- **Ocean** (**L-2 OCN**): Productos oceánicos de nivel 2 con información sobre la velocidad y la dirección del viento.

Además, hay que tener en cuenta la polarización. Los productos en modo WV solo estarán disponibles para polarización simple (VV o HH) y para los demás modos, SM, IW y EW, estarán disponibles en polarización dual (VV+VH o HH+HV) o simple.

2.2.1.4. Software Sentinel Toolbox

Es un software sin costo y de código abierto para el procesamiento y análisis de imágenes de radas de Sentinel-1 y diferentes satélites.

Incluye las siguientes herramientas:

- Calibración
- Filtro de ruido speckle
- Corrección de terreno
- Producción de mosaico
- Polarimetría
- Interferómetro
- Clasificación.

2.2.1.5. Identificación del producto Sentinel 1

Los productos SENTINEL 1-está en convención gránulos:

Código: *MMM_BB_ TTTR_LFPP_YYYYMMDDTHHMMSS_ YYYYMMDDTHHMMSS 00000_DDDDDD_CCCC*

Ejemplo: *S1B_IW_GRDH_1SDV_20170315T105332_20170315T105357_004718_0083C9_2C28*

Donde:

MMM	: El identificador de misión (S1A o **S1B**)
BB	: El modo del producto: **IW**, EW y WV
TTT	: Tipo de Producto puede ser: SLC, **GRD** u OCN.
R	: Clase de resolución puede ser F (resolución completa), **H** (resolución alta), M (resolución media)
L	: Nivel de Procesamiento: 0, **1** o 2
F	: Clase de producto puede ser estándar (**S**) o anotación (A).
PP	: La polarización SH (polarización única HH), SV (polarización VV única), DH (polarización dual HH + HV) y **DV** (polarización doble VV + VH).
YYYY	: Año de creación (**2017**)
MM	: Mes de creación (**03**)
DD	: Día de creación (**15**)
THHMMSS	: Tiempo de creación hora, minutos y segundos (**10:53:32**)
00000	: Número de órbita absoluta (**004718**).
DDDDDD	: Toma de datos de la misión (**0083C9**)
CCCC	: El identificador único del producto (**2C28**)

Cuadro 9. Comparación de imágenes de radar

DESCRIPCIÓN	RADARSAT-2	SENTINEL-1	RISAT-1
Agencia	Programa espacial canadiense (CSP)	Agencia Espacial Europea (ESA)	Organización espacial de Investigación de la India (ISRO)
Instrumento	C-band SAR (5.4 GHz)	C-band SAR (5.4 GHz)	C-band SAR (5.35 GHz)
Ángulo Incidente	Side-looking, 15-45° offnadir	Side-looking, 15-45° offnadir	36.85°
Polarización	HH, HV, VV, & VH	(VV & VH) o (HH & HV)	HH & HV
Altitud del satélite	798km	693km	542km
Orbita	Sun Synchronous (dusk/dawn)	Sun Synchronous (dusk/dawn)	Sun Synchronous (dusk/dawn)
Resolución temporal	24 días	12 días	25 días
Resolución espacial	100m	5m x 20m	~25m
Ancho de Barrido	500km (ScanSAR mode)	250km (IWS mode)	115km (MRS)
Hora Local de sobrevuelo	6:00 a.m. descending	6:00 a.m. descending	6:00 a.m
Lanzamiento	14 diciembre del 2007	3 April del 2014	26 abril del 2012
Duración de la misión	7 años mínimos	7 años	5 años

→ SENTINEL-2

ESA Misión óptica de Alta Resolución para los Servicios Operativos de Copernicus

www.esa.int

Agencia Espacial Europea - ESA

2.2.2. Sentinel 2 -MSI

Es una misión de imágenes multiespectrales de alta resolución en órbita polar para el monitoreo de la tierra para proporcionar, por ejemplo, imágenes de la vegetación, la cubierta del suelo y del agua, las vías navegables interiores y las zonas costeras. Sentinel-2 también puede brindar información para servicios de emergencia.

El Sentinel-2 tiene un escaneo Multi espectral que permite obtener información en las dos longitudes de onda, visibles e infrarrojos, permitiendo monitorizar los cambios en la tierra y en la vegetación, así como vigilar a nivel mundial el cambio climático, con una resolución de 10m. Las imágenes están disponibles de manera gratuita y pueden ser utilizadas en un rango amplio de aplicaciones.

El Sentinel-2B vuela a 180° opuesto a Sentinel-2A, con ambas naves ocupando órbitas sincrónicas del Sol a una altitud de aproximadamente 786 km y cubriendo las superficies terrestres, grandes islas, aguas continentales y costeras de la Tierra 84° N y 56° S cada cinco días.

2.2.2.1. Características clave

sensor óptico multiespectral

10 – 60m resolución, 5 días el tiempo de revisita

Sentinel 2A fecha de lanzamiento: 22/06/2015

Sentinel 2B fecha de lanzamiento: 07/03/2017

Figura 19. Sentinel 2 – bandas espectrales y resolución espacial

Cuadro 10. Característica imagen Sentinel-2 sensor MSI

Bandas	Sensor	S2A Longitud de Onda (micrómetros)	S2B Longitud de Onda Central (micrómetros)	Resolución (metros)
Banda 1 – Costero / aerosol	MSI	0.430 – 0.457	0.4423	60
Banda 2 - Azul		0.400 – 0.535	0.4921	10
Banda 3 - Verde		0.537 – 0. 582	0.559	10
Banda 4 - Rojo		0.646 – 0.684	0.665	10
Banda 5 - Visible e Infrarrojo Cercano (NIR 1)		0.694 – 0.713	0.7038	20
Banda 6 - Visible e Infrarrojo Cercano (NIR 2)		0.731 – 0.749	0.7391	20
Banda 7 - Visible e Infrarrojo Cercano (NIR 3)		0.769 – 0.797	0.7797	20
Banda 8 - Visible e Infrarrojo Cercano (NIR 4)		0.773 – 0.908	0.833	10
Banda 8A - Visible e Infrarrojo Cercano (NIR 5)		0.848 – 0.881	0.864	20
Banda 9 - Vapor de Agua		0.932 – 0.958	0.9432	60
Banda 10 - Cirrus		1.337 – 1.412	1.3769	60
Banda 11 - Onda Corta Infrarroja (SWIR)		1.539 – 1.682	1.6104	20
Banda 12 - Onda Corta Infrarroja (SWIR)		2.078 – 2.320	2.1857	20

2.2.2.2. Nivel de proceso

- ✓ **Nivel-0:** Llamada también data raw o cruda, se refiere a la data adquirida del satélite sin ningún tipo de procesamiento.
- ✓ **Nivel-1:** Es la data satelital procesada con algunas correcciones básicas (radiométrica, geométrica, remuestreo, etc.). Para el caso de las imágenes Sentinel-2, estas suelen ser distribuidas con Nivel de tratamiento 1C (Level-1C), ello es, en valores de reflectancia en el Tope de la Atmósfera (TOA).
- ✓ **Nivel-2:** Se refiere a la data obtenida a partir de la corrección atmosférica de la data Sentinel-2 Level-1C. La data con nivel de procesamiento 2A (Level-2A) suele ser referida también como Reflectancia en la Superficie (**SR** o Surface Reflectase) o como reflectancia Bajo la Atmósfera (BOA). De ser necesario, esta data puede ser empleada para la obtención de Índices Normalizados (NDVI, NDWI, NBR, etc.), Ratios (B8/B4, B4/B3, etc.) y/o Variables Biofísicas (LAI, FAPAR, FCOVER, etc.).
- ✓ **Nivel-3:** Es la data obtenida a partir producto de un mosaico espacio-temporal. Este tipo de información suele ser generada para estudios que buscan analizar un determinado fenómeno dentro de intervalo de tiempo (mensual, semestral o anual), como es el caso de la deforestación.

Nivel de Procesamiento Sentinel 2

2.2.2.3. Identificación del producto Sentinel 2

Los productos SENTINEL 2-está en convención gránulos:

Código: *MMM_FFFCCC_YYYYMMDDTHHMMSS_ROOO_AAAAAA_ YYYYMMDDTHHMMSS*

Ejemplo: S2A_MSIL1C_20180416T151711_N0206_R125_T18LVQ_20180416T184426

Donde:

MMM	: El identificador de misión (**S2A** o S2B)
FFF	: Categoría de archivo **MSI**
CCC	: Tipo de nivel **L1C:** Nivel-1C
YYYY	: Año de creación (**2018**)
MM	: Mes de creación (**04**)
DD	: Día de creación (**16**)
THHMMSS	: Tiempo de creación hora, minutos y segundos (**15:17:11)**
ROOO	: Número de orbita (**N0206**).
DDDDDD	: Toma de datos de la misión (**0083C9**)
AAAAAA	: Número de Grilla (**T18LVQ**)
CCCC	: El identificador único del producto (**2C28**)

MAPA DE GRILLAS DEL SATELITE SENTINEL-2

→ SENTINEL-3

ESA Misión Global Terrestre y Oceánica para los Servicios Operativos de Copernicus

www.esa.int

Agencia Espacial Europea - ESA

2.2.3. Sentinel 3 – Multi-instrumental

Es el tercero de los satélites del programa Copérnico de la Comisión Europea y la Agencia Espacial Europea. Su objetivo es estudiar los océanos y sus propiedades, obteniendo datos cada poco día de propiedades de esta como nivel, movimiento, temperatura, color, y velocidad del viento sobre ella.

También medirá la calidad de las aguas costeras y la polución en la atmósfera, además de ser capaz de detectar incendios forestales, cambios en el uso de la tierra, y de medir la disminución en la cobertura de nieve, glaciares y capas de hielo.

Los datos que obtenga, de acceso gratuito como todos los del programa Copérnico, servirán para mejorar los modelos de meteorología y clima que manejamos, ayudarán con la planificación de las rutas de los barcos, y permitirán hacer mejores predicciones de los niveles de agua de los ríos; también servirán para monitorizar el estado de los ecosistemas marinos, fundamentales por la cantidad de alimento que obtenemos del mar.

2.2.3.1. características clave

- Imágenes de resolución media y altimetría
- 300 – 1200m resolución, < 2 días el tiempo de revisita
- Monitorea los parámetros de la superficie del mar y la tierra
- Sentinel 3A fecha de lanzamiento: 16/02/2016
- Sentinel 3B fecha de lanzamiento: 25/04/2018
- Presenta cuatro sensores: OLCI, SLSTR, SRAL, MWR

Figura 20.Tiempo de revisita menos a 2 días.

2.2.3.2. Características sensor OLCI – Instrumento para el color de la tierra y los océanos

Presenta 21 bandas espectrales en el rango (0.400-1.020 micrómetros) con un ancho de 1270 kilómetros.

- **El nivel 1:** incluye mediciones **radiométricas** al tope de la atmosfera (TOA), corregidas radiométricamente, calibradas y caracterizada espectralmente. Los productos se generan en FR (300 m) y en RR (1.2 km) para todo el mundo con el La misma cobertura.
- El **nivel 2:** consisten en cantidades geofísicas derivadas del procesamiento de los datos de medición proporcionados en el producto de nivel 1. Se aplica para territorio marinas y terrestres.

Los productos de datos de nivel 1 y 2 de OLCI están disponibles para descargar al público en general.

Cuadro 11. Característica del sensor OLCI – FR – Nivel 1 – 300m

Bandas Sentinel-3	Resolución temporal (días)	Longitud de Onda Central (micrómetros)	Resolución (metros)
Banda 1 Radiancia	1 - 2	0.400	300
Banda 2 Radiancia		0.413	
Banda 3 Radiancia		0.443	
Banda 4 Radiancia		0.490	
Banda 5 Radiancia		0.510	
Banda 6 Radiancia		0.560	
Banda 7 Radiancia		0.620	
Banda 8 Radiancia		0.665	
Banda 9 Radiancia		0.674	
Banda 10 Radiancia		0.681	
Banda 11 Radiancia		0.709	
Banda 12 Radiancia		0.754	
Banda 13 Radiancia		0.761	
Banda 14 Radiancia		0.764	
Banda 15 Radiancia		0.768	
Banda 16 Radiancia		0.779	
Banda 17 Radiancia		0.865	
Banda 18 Radiancia		0.885	
Banda 19 Radiancia		0.900	
Banda 20 Radiancia		0.940	
Banda 21 Radiancia		1.020	

Proceso de obtención datos satélite Sentinel-3 OLCI

2.2.3.3. Características del sensor SLSTR – Radiómetro de temperatura de la superficie del mar y la tierra

Presenta 9 bandas espectrales (de 0.550 a 12.0 micrómetro) con un ancho de 1420 o 750 kilómetros.

El **nivel 1** incluye mediciones radiométricas de al tope de la atmosfera (TOA), corregidas radiométricamente, calibradas y caracterizada espectralmente.

El **nivel 2** consisten en cantidades geofísicas derivadas del procesamiento de los datos de medición proporcionado en el producto de nivel 1. Característica del sensor SLSTR

Banda	Longitud de onda central (µm)	Ancho de banda (µm)	Función	Comentarios		Resolución (metros)
S1	554.27	19.26	Cribado de nubes, monitoreo de vegetación, aerosol.	VNIR	Bandas de reflectancia solar	500
S2	659.47	19.25	NDVI, monitoreo de vegetación, aerosol.			
S3	868.00	20.60	NDVI, señalización en la nube, co-registro de píxeles.			
S4	1374.80	20.80	Detección de cirros en tierra.	SWIR		
S5	1613.40	60.68	Aclaramiento ruidoso, hielo, nieve, monitoreo de vegetación.			
S6	2255.70	50.15	Estado de vegetación y nebulización			
S7	3742.00	398.00	SST, LST, fuego activo	Bandas térmicas IR ambiente (200 K -320 K)		1000
S8	10854.00	776.00	SST, LST, fuego activo			
S9	12022.50	905.00	SST, LST			
F1	3742.00	398.00	Fuego activo	Bandas térmicas de emisión de fuego IR		
F2	10854.00	776.00	Fuego activo			

2.2.3.4. Características del sensor SRAL - Altímetro de Radar de Apertura Sintética

Altímetro radar para el estudio de la topografía oceánica en las bandas Ku y C con una resolución de 300 metros.

Nivel 1: Corregido por efectos instrumentales (SR_1_SRA).

Nivel 2: Corregido por los efectos geofísicos divididos en terrestres (SR_2_LAN) y marítimos (SR_2_WAT).

2.2.3.5. Características del sensor MWR - Microwave Radiometer

radiómetro de microondas en 23.8 y 36.5 GHz.

La Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio

Aqua Terra

Es un satélite multinacional de investigación científica que recopila datos sobre una amplia gama de variables y procesos atmosféricos, terrestres y oceánicos, incluida la precipitación, la evaporación y el ciclo del agua.

Lanzado: Delta II Rocket - 4 Mayo, 2002

Phytopankton que florece en la costa atlántica - 21 Diciembre, 2010

WWW.nasa.gov

2.3. Satélite AQUA - EOS-PM 1

Es un satélite estadounidense, desarrollado en asociación con Japón y Brasil. Como su nombre lo indica, fue diseñado para monitorear varios tipos de fenómenos físicos relacionados con la circulación de energía y agua en la Tierra. Para esto, ofrece una serie de datos sobre las interacciones que ocurren entre la atmósfera, el océano y el continente, como la humedad y la temperatura de la atmósfera, la evaporación, las nubes, la precipitación, la temperatura en la superficie del océano, la humedad del suelo, el hielo, nieve, entre otros.

Fue lanzado el 4 de mayo de 2002 (tras varios retrasos) desde la base de Vandenberg por un cohete Delta II a una órbita heliosincrónica de unos 705 km de altura.

Aplicaciónes princiaples

- ✓ Obtención de mediciones de flujo de energía radiante;
- ✓ Adquisición de datos de humedad atmosférica;
- ✓ Mediciones de temperatura de mar y superficie terrestre;
- ✓ Evaluación de propiedades físicas de nubes;
- ✓ Detección de velocidad del viento;
- ✓ Monitoreo de datos sobre cambio climático global;
- ✓ Dinámica del uso del suelo y la cobertura.

Cuadro 12. Características del satélite AQUA

Misión del Sistema de Observación de la Tierra (EOS)	
Instituciones responsables	NASA
País / región	Estados Unidos, Japón y Brasil
Satélite	AQUA - EOS PM-1
Lanzamiento	04/05/2002
Lugar de lanzamiento	Campo de tiro Vandenberg
Lanzador de vehículos	Delta II
Situación actual	activo
Orbita	polar, circular, heliosincrónica
Altitud	705 km
Pendiente	98.2°
Tiempo de duración de la órbita	99 min
Tiempo de cambio	1:30 p.m.
Período de revisión	1 a 2 días
Vida útil proyectada	6 años
Instrumentos sensores	AMSR-E, MODIS, AMSU-A, AIRS, HSB y CERES

2.3.1. **Sensor AMSR-E** - (Radiomete avanzado de escaneo de microondas para EOS)

Fonte: NASA, 2006

Se ha desarrollado por la Agencia Nacional de Desarrollo Espacial de Japón (NASDA), para operar en modelos numéricos de predicción global aplicados a la meteorología. Sirve para mejorar la precisión, por ejemplo, de la predicción de fenómenos locales, tales como fuertes lluvias localizadas, propiedades físicas de las nubes, temperatura en la superficie del océano, velocidad del viento, flujo de energía radiante, presencia de agua, nieve o hielo en la superficie del Tierra Como opera en la región de microondas, puede recopilar datos durante el día o la noche y sin la interferencia de las nubes. Tiene 20 canales espectrales y opera en seis frecuencias, con doble polarización, ofreciendo escenas de 1,445 km de longitud.

Cuadro 13. Características del sensor AMSR-E

Sensor	Canales espectrales / Bandas	Frecuencia	Ángulo de visión	Polarización	Resolución espacial	Resolución temporal	Área de imagen
AMSR-E	Banda K	6.925 GHz	55°	Horizontal y vertical	75 x 43 km	diariamente	1445 km
		10.65 GHz			51 x 29 km		
		18.7 GHz			27 x 16 km		
		23.8 GHz			32 x 18 km		
		36.5 GHz			14 x 8 km		
		89 GHz			6 x 4 km		

2.3.2. **Sensor AMSU-A** (Unidad avanzada de sondeo por microondas-A)

Fonte:NASA, 2006

Es un instrumento que opera en el rango de microondas con varios canales que miden la temperatura atmosférica global y adquieren datos sobre el agua disponible en la atmósfera en todas sus formas (excepto las pequeñas partículas de hielo que son transparentes a las longitudes de onda). sensor). El sistema de sonido tiene 15 canales espectrales con una frecuencia que oscila entre 15 y 90 GHz. La combinación de datos de este instrumento con los disponibles por AIRS da como resultado una mayor

precisión en la evaluación de los datos sobre temperatura y humedad en la atmósfera.

2.3.3. **Sensor AIRS** (Sonda infrarroja atmosférica)

Fonte:NASA, 2006

Es un instrumento de alta resolución espectral que opera con 2,378 bandas en el rango infrarrojo térmico (3.7 - 15.4 µm) y 4 bandas que operan en el rango visible e infrarrojo cercano (0.4 - 1.0 µm). Fue diseñado por el Jet Propulsion Laboratory con el objetivo de trabajar junto con AMSU-A y HSB para determinar la temperatura de la atmósfera con una precisión de 1ºC en capas de 1 km y 20% de humedad en capas de 2 km. Los datos de estos instrumentos se utilizan, principalmente, en pronósticos meteorológicos y cambios climáticos globales. Las escenas tienen 1.650 km de largo. La resolución espacial en el infrarrojo térmico es de 13,5 y en el infrarrojo visible y cercano es de 2,3 km en el nadir.

2.3.4. **Sensor HSB** - (Sonda de humedad para Brasil)

Fonte:NASA, 2006

Fue diseñado para detectar datos de humedad atmosférica en la troposfera. Es el resultado de la cooperación científica entre la NASA y la AEB (Agencia Espacial Brasileña). Fue desarrollado por el Instituto Nacional de Investigación Espacial (INPE) para operar a bordo del satélite AQUA, que junto con los instrumentos AIRS y AMSU-A constituyen un sistema multidisciplinario avanzado para estudiar y monitorear los cambios climáticos del sistema global. Este instrumento proporcionó datos de excelente calidad hasta el 5 de febrero de 2003. El radiómetro de microondas HSB funcionó en 4 canales en los rangos 1 a 150 y 3 a 183 GHz, generó escenas de 1,650 km de longitud y una resolución espacial de 13.5 km.

2.3.5. **Sensor CERES** - (Nubes y el Sistema de Energía Radiante de la Tierra)

Fonte: NASA, 2006

Fue diseñado por el Centro de Investigación Langley (NASA) para medir el flujo radiante de la Tierra y proporcionar datos para estimar las propiedades físicas de las nubes, ubicadas en la parte superior de la atmósfera. En combinación con MODIS, ofrece información detallada sobre las propiedades de la nube. El primer instrumento CERES se lanzó a bordo del satélite TRMM en 1997, el segundo a bordo del satélite TERRA en 1999 y el tercero en el satélite AQUA en 2002.

2.3.6. **Sensor MODIS** - (Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada)

Fonte:NASA, 2006

Es un instrumento desarrollado por Goddard Space Flight Center (NASA). Opera en 36 canales espectrales a longitudes de onda que varían de 0.4 a 14.4 µm y resolución espacial de 250 a 1000 metros. Además del satélite AQUA, MODIS está a bordo del satélite TERRA (lanzado en 1999) y juntos, los dos instrumentos pueden adquirir imágenes de la Tierra en 1-2 días. Las imágenes MODIS ofrecen una base sistemática de datos en la elaboración de productos sobre las interacciones entre la atmósfera, la tierra y el océano. Se utiliza en la medición de las propiedades de las nubes, el flujo de energía radiante, las propiedades de los aerosoles, los cambios en el uso y la cobertura del suelo, los incendios, las actividades volcánicas, entre otros.

2.4. Satélite TERRA - EOS AM-1

La plataforma orbital TERRA se lanzó el 18 de diciembre de 1999 a bordo del vehículo de lanzamiento Atlas IIAS, como parte del programa de la NASA llamado Sistema de Observación de la Tierra (EOS). Es una misión multinacional que involucra asociaciones con agencias aeroespaciales en Canadá y Japón. El objetivo principal de la misión es contribuir a la investigación sobre la dinámica atmosférica global y sus interacciones con la superficie de la Tierra y el océano.

En estas tres esferas, la plataforma TERRA contribuye a la investigación sobre:

a. **Atmósfera:** flujo de energía radiactiva, composición de la troposfera, aerosoles, temperatura y humedad, cobertura de nubes;
b. **Superficie** del suelo: cambios en la cobertura del suelo y el uso del suelo, dinámica de la vegetación, dinámica de la agricultura, temperatura de la superficie, incendios y eventos volcánicos;
c. **Océanos:** temperatura superficial, fitoplancton y materia orgánica disuelta. En las regiones polares, el satélite obtiene información sobre los cambios en la capa de hielo de la Tierra, el hielo marino y la capa de nieve.

Cuadro 14. Características del satélite TERRA

Misión del Sistema de Observación de la Tierra (EOS)	
Instituciones responsables	NASA
País / región	Estados Unidos, Japón y Canadá
Satélite	TIERRA (EOS-AM1)
Lanzamiento	18/12/1999
Lugar de lanzamiento	Base de la Fuerza Aérea Vandenberg
Lanzador de vehículos	Atlas IIAS
Situación actual	activo
Orbita	Polar y heliosincrónico
Altitud	705 km
Pendiente	98.2°
Tiempo de duración de la órbita	98.1 min
Tiempo de cambio	10:30 a.m.
Período de revisión	1 a 2 días
Vida útil proyectada	6 a 7 años
Instrumentos sensores	ASTER, MODIS, MISR, CERES y MOPPIT

2.4.1. **Sensor MISR -** (Espectrorradiómetro de imágenes de ángulos múltiples)

Es capaz de generar imágenes en cuatro bandas espectrales diferentes, desde nueve ángulos de visión diferentes y, cuando se combina con técnicas estereoscópicas, hace posible la construcción de modelos 3D y permite realizar estimaciones de la cantidad total de luz solar reflejada por varios Los ambientes de la tierra. Estos datos se utilizan para investigar la influencia del aerosol, las nubes y las propiedades de la superficie en el balance de radiación y en la climatología.

Cuadro 15. Características del sensor MISR

Sensor	Bandas espectrales	Resolución espectral	Resolución espacial	Resolución temporal	Área de imagen
MISR	Azul	446 nm	1.1 km	2 a 9 días según la latitud	360 x 20000 km
	Verde	558 nm	(275 m en el nadir)		
	Rojo	672 nm	275 m		
	Infrarrojo cercano	866 nm	1.1 km		
			(275 m en el nadir)		

2.4.2. **Sensor MOPPIT** - (Mediciones de contaminación en la troposfera)

Trabaja con la adquisición de mediciones globales de monóxido de carbono y metano en la atmósfera inferior para comprender cómo interactúan estos gases con la superficie de la Tierra, los océanos y el sistema de biomasa. Las diversas fuentes de estos gases incluyen la contaminación de áreas industriales, rebaños de ganado y la descomposición de biomasa. Al estudiar dónde se concentran los gases atmosféricos y cómo circulan en la atmósfera, los científicos buscan información más completa sobre cómo la contaminación del aire interactúa y afecta el medio ambiente. El sensor obtiene datos de radiación emitidos y reflejados por la Tierra a partir de tres bandas espectrales, con una

resolución espacial de 22 km en el nadir y escenas de 640 km.

2.4.3. **Sensor CERES** - (Las nubes y el sistema de energía radiante de la Tierra)

CERES fue diseñado por el Centro de Investigación Langley (NASA) para medir el flujo radiante de la Tierra y proporcionar datos para estimar las propiedades físicas de las nubes, ubicadas en la parte superior de la atmósfera. En combinación con MODIS, ofrece información detallada sobre la propiedad de la nube. El primer instrumento CERES se lanzó a bordo del satélite TRMM en 1997, el segundo a bordo del satélite TERRA en 1999 y el tercero en el satélite AQUA en 2002.

Cuadro 16. Características del sensor CERES

Sensor	Bandas espectrales	Resolución espectral	Resolución espacial	Resolución temporal	Área de imagen
CERES	1 (onda corta)	0.3 - 5.0 µm	20 km	4 días	sd
	2 (onda larga)	8 - 12 µm			
	3 (total)	0.3 -> 100 µm			
sd = sin datos / información					

2.4.4. **Sensor ASTER** - (Radiómetro avanzado de emisión y reflexión térmica en el espacio)

Se produjo a través de un esfuerzo cooperativo entre la NASA, el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón y el Centro de Análisis de Datos de Sensores Remotos de Japón (ERSDAC), sin embargo, el rango de 0.76 a 0.86 µm se captura dos veces (en Nadir y Off-Nadir) para generar modelos digitales de elevación.

Los científicos usan los datos ASTER para crear mapas detallados de la temperatura superficial de la tierra, emisividad, reflectancia y elevación. Es importante para la detección de cambios, calibración / validación y estudios de superficie terrestre.

Los detectores SWIR ya no funcionan desde abril 2008, los datos de VNIR y TIR continúan mostrando una excelente calidad, cumpliendo todos los requisitos.

Cuadro 17. Características del sensor ASTER

Subsistema	Bandas ASTER	Resolución Espectral (micrómetro)	Resolución Espacial	Resolución Radiométrica
VNIR	Banda 1 - Verde	0.52 - 0.60	15	8bits
	Banda 2 - Rojo	0.63 - 0.69		
	Banda 3N - Infrarrojo Cercano	0.78 - 0.86		
	Banda 3B - Infrarrojo Cercano	0.78 - 0.86		
SWIR	Banda 4 - SWIR 1	1.60 - 1.70	30	
	Banda 5 - SWIR 2	2.145 - 2.185		
	Banda 6 - SWIR 3	2.185 - 2.225		
	Banda 7 - SWIR 4	2.235 - 2.285		
	Banda 8 - SWIR 5	2.295 - 2.365		
	Banda 9 - SWIR 6	2.360 - 2.430		
TIR	Banda 10 - TIR 1	8.125 - 8.475	90	16 bits
	Banda 11 - TIR 2	8.475 - 8.825		
	Banda 12 - TIR 3	8.925 - 9.275		
	Banda 13 - TIR 4	10.25 - 10.95		
	Banda 14 - TIR 5	10.95 - 11.65		

Fuente: LPDAAC.USGS.GOV

Diagrama 1. Estimación de la superficie de temperatura terrestre LST – ASTER.

2.4.5. **Sensor MODIS** (Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada)

Es un instrumento que viaja a bordo de los satélites: TERRA (EOS a.m.) y AQUA (EOS p.m.). La órbita del satélite TERRA alrededor de la tierra va de norte a sur cruzando el Ecuador por la mañana, mientras que el satélite AQUA va de sur a norte cruzando el Ecuador por la tarde.

El sensor forma parte de la misión EOS (Sistema de Observación de la Tierra) de la NASA, fue creado para capturar imágenes de la atmósfera, océano y superficie, transmitiendo datos en 36 bandas, que van desde el espectro visible hasta el infra rojo térmico, con resoluciones espaciales de 250, 500 y 1000 metros.

Figura 21.Resumen de las resoluciones espectrales y espaciales MODIS y la comparación con los sensores de TM / Landsat-5 y ETM + / Landsat-7.

Cuadro 18. Características de las bandas del sensor MODIS.

Banda	Resolución espectral (µm)	Resolución espacial (m)	Resolución temporal	Resolución Radiométrica	Uso primario
1 - RED	0.62 – 0.67	250	diaria	12 bits	Límite de tierra, nubes y aerosoles
2 - NIR	0.841 – 0.876				
3 - BLUE	0.459 – 0.479	500			Propiedades de la tierra, nubes y aerosoles
4 - GREN	0.545 – 0.565				
5 – SWIR 1	1.230 – 1.250				
6 – SWIR 2	1.628 – 1.652				
7 – SWIR 3	2.105 – 2.155				
8	0.405 – 0.420	1000			Biogeoquímica, color del océano y fitoplancton
9	0.438 – 0.448				
10	0.483 – 0.493				
11	0.526 – 0.536				
12	0.546 – 0.556				
13	0.662 – 0.672				
14	0.673 – 0.683				
15	0.743 – 0.753				
16	0.862 – 0.877				
17	0.890 – 0.920				Vapor de agua atmosférico
18	0.931 – 0.941				
19	0.915 – 0.965				
20	3.660 – 3.840				Temperatura de la superficie y nubes
21	3.929 – 3.989				
22	3.929 – 3.989				
23	4.020 – 4.080				
24	4.433 – 4.498				Temperatura atmosférica
25	4.482 – 4.549				
26	1.360 – 1.390				Vapor de agua en nubes Cirrus
27	6.535 – 6.895				
28	7.175 – 7.475				
29	8.400 – 8.700				Propiedades de nubes
30	9.580 – 9.880				Ozono
31	10.780 – 11.280				Temperatura de la Superficie y nubes
32	11.770 – 12.270				
33	13.185 – 13.485				Altitud máxima de las nubes
34	13.485 – 13.785				
35	13.785 – 14.085				
36	14.085 – 14.385				

2.4.5.1. Formato de almacenamiento HDF

Los productos MODLAND se encuentra en el formato *Hierarchical Data Format* (HDF), desarrollado por el Centro Nacional de Aplicaciones de Supercomputación (NCSA). De acuerdo al NCSA, este formato de archivo físico, en el nivel más sencillo sirve para almacenar datos como cualquier otro formato, pero en su nivel de más complejidad, es una colección de aplicaciones y utilizadas para manipular los datos (FISHTALER, 1998).

2.4.5.2. Identificación de los productos

Los productos MODIS se nombran a través de la convención adoptada por la NASA. Las diferentes porciones del nombre del archivo permiten conocer la plataforma, el nombre del producto, su fecha de adquisición, versión y localización.

Código: NOM.AYYYYDDD.hxxxvyyy.vvv.aaadddhhss.hdf

Ejemplo: MOD09GA.A2017223.h10v09.006.2017225031049.hdf

Donde:

NOM	: Nombre corto – MOD09GA
AYYYYDDD	: Año de adquisición (A2017) y día juliano (223).
hxxvyy	: ID del archivo (**horizontal h10, vertical v09**)
vvv	: Versión de proceso (006)
aaadddhhss	: Año de producción (2017), día juliano (225), y tiempo (03:10:49)
hdf	: Formato de datos (HDF-EOS).

Figura 22. Localización de la zona de análisis.

2.4.5.3. Nivel de Procesamiento - Productos

Los datos captados por el sensor MODIS se integran en tres productos básicos (MOD. 01 al 03), los cuales contienen las 36 bandas captadas. A partir de ellos, se derivan toda una serie de productos seleccionando los canales de mejor respuesta al objeto de estudio.

Cuadro 19. Productos del sensor MODIS

Clave	Descripción del producto
MOD01	Level 1A: Contiene datos crudos de las 36 bandas e información auxiliar del satélite, así como de los instrumentos de toma
MOD02	Level 1B: Incluyendo la calibración de radiancias y georeferencia para las 36 bandas. De él se obtienen 4 productos:1B 1Km, 1B 500m, 1B 250m y 1B OBC (calibración a bordo del satélite).
MOD03	Conjunto de datos georeferidos.
MOD04	Productos de aerosoles.
MOD05	Total de agua precipitada (método del infrarrojo cercano).
MOD06	Productos de las nubes (grosor óptico, partículas de radio, etc.).
MOD06	Productos de las nubes (fase y propiedades de la parte superior de las nubes).
MOD07	Perfiles atmosféricos
MOD08	Productos atmosféricos Nivel 3
MOD09	Reflectancia superficial corregida atmosféricamente.
MOD10	Cobertura de nieve.
MOD11	Superficie de temperatura y Emisión de calor.
MOD12	Cobertura terrestre / Cambios de cobertura terrestre.
MOD13	Índices de vegetación.
MOD14	Anomalías termales, incendios, biomasa.
MOD15	Índices de hojas y FPAR
MOD16	Resistencia superficial y evapotranspiración.
MOD17	Producción de vegetación y productividad primaria neta.
MOD18	Índice normalizado de radiancia del agua.
MOD19	Concentración de pigmentos
MOD20	
MOD21	Concentración de clorofila.
MOD22	Radiación activa fotosintética (PAR).
MOD23	Concentración de sólidos suspendidos en el agua oceánica.
MOD24	Concentración de materia orgánica

MOD25	Coccolith concentración
MOD26	Coeficiente de atenuación del agua oceánica.
MOD27	Productividad primaria del océano.
MOD28	Temperatura superficial del mar
MOD29	Cobertura de hielo en océano.
MOD30	Perfiles de humedad y temperatura
MOD31	Concentración de Phycocrythrin.
MOD32	Matchup DB y estructura de los procesos oceánicos.
MOD33	Coordenadas de la cobertura de nieve
MOD34	Malla de índices de vegetación
MOD35	Masas de nubes
MOD36	Coeficiente total de absorción.
MOD37	Propiedades Océano Aerosol
MOD39	Valor épsilon en el agua
MOD43	Albedo 16 Day Level 3
MOD44	Campos continuos y conversión de la cobertura vegetal.

2.4.5.3.1. Características del producto de MODIS 09

La reflectancia superficial es la cantidad de luz reflejada por la superficie de la tierra; es una relación de superficie Radiancia a la irradiancia superficial, y como tal no tiene unidad, y típicamente tiene valores entre 0.0 y 1.0.

Los valores de reflectancia de superficie de MODIS 09 se escalan en 10,000 y luego se transmiten a enteros de 16 bits, de manera que la superficie los valores de reflectancia en los archivos MOD09 están típicamente entre -100 y 16,000. Por este motivo se va a multiplicar por 0.0001 a las bandas para obtener valores de -0.01 a 1.6 de la corrección atmosférica.

Las imágenes de MODIS ya se proporcionan en reflectancia de superficie escalada, que puede convertirse en reflectancia de superficie con un cálculo simple utilizando un valor de cuantificación, con esta fórmula:

$$p_\lambda = \text{ND}*0.0001$$

Donde:

ND: Número digital de las bandas MODIS

Cuadro 20. Productos de la versión 6 de la Reflectancia de la superficie MODIS 09

Producto	Plataforma	Resolución espectral	Resolución espacial	Resolución temporal	Rango Valido	Factor de escala
MOD09GA	TERRA	Bandas 1 - 7	500	Día	-100 a 16000	0.0001
MYD09GA	AQUA	Bandas 1 - 7	500	Día	-100 a 16000	0.0001
MOD09GQ	TERRA	Bandas 1 - 2	250	Día	-100 a 16000	0.0001
MYD09GQ	AQUA	Bandas 1 - 2	250	Día	-100 a 16000	0.0001
MOD09Q1	TERRA	Bandas 1 - 2	250	8 día	-100 a 16000	0.0001
MYD09Q1	AQUA	Bandas 1 - 2	250	8 día	-100 a 16000	0.0001
MOD09A1	TERRA	Bandas 1 - 7	500	8 día	-100 a 16000	0.0001
MYD09A1	AQUA	Bandas 1 - 7	500	8 día	-100 a 16000	0.0001

Fuente: EARTHDATA USGS

Diagrama 2. Determinación de las reflectancias de superficie MODIS MOD09.

2.4.5.3.2. Características del producto MODIS 11

El producto MODIS 11 versión 6 proporciona diariamente, semanal o mensual por píxel, la temperatura de superficie terrestre (LST) pudiendo ser de resolución espacial de 1000, 5600 o un mosaico global. Cada clave contiene varias capas incluyendo la capa de día y noche de la temperatura de la superficie terrestre (LST) junto con sus capas de indicador de calidad asociadas, capas de emisividad y sus correspondientes capas de control de día y noche y capas de observación.

$$LST = ND*0.02$$

Cuadro 21. Producto de la versión 6 de la superficie de temperatura y emisividad.

Clave	Resolución temporal	Resolución espacial	Sensor	Rango valido	Factor de escala	Extensión
MOD11A1	Diario	1000	TERRA	7500 - 65535	0.02	Zona
MOD11A2	8 días	1000	TERRA	7500 - 65535	0.02	Zona
MOD11B1	Diario	5600	TERRA	7500 - 65535	0.02	Zona
MOD11B2	8 días	5600	TERRA	7500 - 65535	0.02	Zona
MOD11B3	Mensual	5600	TERRA	7500 - 65535	0.02	Zona
MOD11C1	Diario	5600	TERRA	7500 - 65535	0.02	Global
MOD11C2	8 días	5600	TERRA	7500 - 65535	0.02	Global
MOD11C3	Mensual	5600	TERRA	7500 - 65535	0.02	Global
MYD11A1	Diario	1000	AQUA	7500 - 65535	0.02	Zona
MYD11A2	8 días	1000	AQUA	7500 - 65535	0.02	Zona
MYD11B1	Diario	5600	AQUA	7500 - 65535	0.02	Zona
MYD11B2	8 días	5600	AQUA	7500 - 65535	0.02	Zona
MYD11B3	Mensual	5600	AQUA	7500 - 65535	0.02	Zona
MYD11C1	Diario	5600	AQUA	7500 - 65535	0.02	Global
MYD11C2	8 días	5600	AQUA	7500 - 65535	0.02	Global
MYD11C3	Mensual	5600	AQUA	7500 - 65535	0.02	Global

Diagrama 3. Estimación de la superficie de temperatura terrestre MODIS 11.

2.4.5.3.3. Características del producto MODIS 13

El producto MODIS 13 versión 6 proporciona un valor de índice de vegetación (VI) en una base por píxel. Hay dos capas de vegetación primaria. El algoritmo para este producto elige el mejor valor de píxel disponible de todas las adquisiciones del período de 16 días o mensual. Los criterios utilizados son nubes bajas, ángulo de visión bajo y el valor NDVI / EVI más alto. El primero es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual se conoce como el índice de continuidad del NDVI derivado de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA-AVHRR). La segunda capa de vegetación es el índice de vegetación mejorado (EVI), que ha mejorado la sensibilidad en regiones de alta biomasa.

Proporcionado junto con las capas de vegetación y las dos capas de garantía de calidad (QA) y las bandas de reflectancia 1 (rojo), 2 (infrarrojo cercano), 3 (azul) y 7 (infrarrojo medio), así como cuatro capas de observación. La validación en la etapa 3 se ha logrado para todos los productos vegetación MODIS MOD13 / MYD13.

$$NDVI = ND*0.0001$$

$$EVI = ND*0.0001$$

Cuadro 22. Producto de la versión 6 del índice de vegetación (NDVI y EVI)

Clave	Resolución temporal	Resolución espacial	Sensor	Factor de escala	Rango valido	Extensión
MOD13A1	16 días	500	TERRA	0.0001	-2000 a 10000	Zona
MOD13A2	16 días	1000	TERRA	0.0001		Zona
MOD13A3	Mensual	1000	TERRA	0.0001		Zona
MOD13C1	16 días	5600	TERRA	0.0001		Global
MOD13C2	Mensual	5600	TERRA	0.0001		Global
MOD13Q1	16 días	250	TERRA	0.0001		Zona
MYD13A1	16 días	500	AQUA	0.0001		Zona
MYD13A2	16 días	1000	AQUA	0.0001		Zona
MYD13A3	Mensual	1000	AQUA	0.0001		Zona
MYD13C1	16 días	5600	AQUA	0.0001		Global
MYD13C2	Mensual	5600	AQUA	0.0001		Global
MYD13Q1	16 días	250	AQUA	0.0001		Zona

Diagrama 4. Estimación del índice de vegetación utilizando MODIS 13.

2.4.5.3.4. Características del producto MODIS 15

El modelo MODIS 15 versión 6 Nivel 4, Combinación de Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) y el Índice de Área de Hoja (LAI) es un conjunto de datos compuestos de 4 y 8 días con un tamaño de píxel de 500 metros.

LAI se define como el área unilateral de la hoja verde por unidad de área de tierra en las todas las hojas anchas y como la mitad de la superficie total de la aguja por unidad de área de tierra en las copas de coníferas. La FPAR se define como la fracción de radiación fotosintéticamente activa incidente (400-700nm) absorbida por los elementos verdes de un dosel de vegetación.

El producto LAI ha alcanzado la fase 2 de validación y el producto FPAR ha alcanzado la fase 1 de validación.

Cuadro 23. Producto de la versión 6 de la combinación de Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) y el índice de área de Hoja (LAI).

Clave	Resolución temporal	Resolución espacial	Sensor	Rango valido	Factor de escala	Extensión
MCD15A2H	8 días	500	TERRA & AQUA	0 a 100	FPAR - 0.01 LAI - 0.1	Zona
MCD15A3H	4 días	500	TERRA & AQUA	0 a 100	FPAR - 0.01 LAI - 0.1	Zona
MOD15A2H	8 días	500	TERRA	0 a 100	FPAR - 0.01 LAI - 0.1	Zona
MYD15A2H	8 días	500	AQUA	0 a 100	FPAR - 0.01 LAI - 0.1	Zona

Diagrama 5. Estimación de la Fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa (FPAR) y el Índice de Área de Hoja (LAI) MODIS MOD15.

2.4.5.3.5. Características del producto MODIS 43

El producto de MODIS 43 es la Función de Distribución de Reflectancia Bidireccional (BRDF) especifica el comportamiento de la dispersión superficial como una función de la iluminación y ángulos de visión a una longitud de onda particular. El MODIS BRDF / Producto Albedo también proporciona Reflectancias Ajustadas por Nadir BRDF (NBAR) --- reflectancias superficiales corregidas a una geometría de vista nadir común en el ángulo zenital local del mediodía solar del día de interés (**MCD43A4**). El

producto **MCD43A4** es el combinado, tiene el lujo de elegir el mejor pixel representativo de un grupo que incluye todas las adquisiciones de los sensores TERRA y AQUA desde el periodo de recuperación.

El **MCD43A4** proporciona los datos de reflectancia de 500 metros de las bandas "terrestres" MODIS 1 – 7 bandas, han logrado la fase 3 de validación.

Level-3 500m Los productos MODIS Land (MODLAND) se archivan en mosaicos de superficie igual a 2400 x 2400 píxeles en una proyección sinusoidal (SIN). Estos productos se publican en formato de datos jerárquicos - Sistema de observación de la Tierra (HDF-EOS).

Cuadro 24. Característica del producto MODIS MCD43A4

Banda	Resolución temporal	Resolución espacial	Sensor	Resolución radiométrica	Factor de escala	Rango valido	Extensión
Reflectancia Band1	16 días	500	TERRA & AQUA	16bits	0.0001	0 a 32766	Zona
Reflectancia Band2	16 días	500	TERRA & AQUA	16bits	0.0001	0 a 32766	Zona
Reflectancia Band3	16 días	500	TERRA & AQUA	16bits	0.0001	0 a 32766	Zona
Reflectancia Band4	16 días	500	TERRA & AQUA	16bits	0.0001	0 a 32766	Zona
Reflectancia Band5	16 días	500	TERRA & AQUA	16bits	0.0001	0 a 32766	Zona
Reflectancia Band6	16 días	500	TERRA & AQUA	16bits	0.0001	0 a 32766	Zona
Reflectancia Band7	16 días	500	TERRA & AQUA	16bits	0.0001	0 a 32766	Zona

2.4.5.4. Acceso de descargar

USGS EarthExplorer (EE): https://earthexplorer.usgs.gov/

LP DAAC: https://reverb.echo.nasa.gov/reverb/ o https://search.earthdata.nasa.gov/

USGS Global Visualization Viewer (GloVis): https://glovis.usgs.gov/

LP DAAC acceso directo: https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool

LAADS DAAC: https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/

MAPA DE GRILLAS DEL SATELITE TERRA & AQUA - MODIS

2.5. Satélite CBERS

Debido al éxito del CBERS-1 y 2, los dos gobiernos decidieron, en noviembre de 2002, dar continuidad al Programa CBERS firmando un nuevo acuerdo para el desarrollo y lanzamiento de otros dos satélites, los CBERS-3 y 4.

En ese proyecto, la participación brasileña fue ampliada al 50%, lo que lleva a Brasil a una condición de igualdad plena con el socio chino.

Los satélites CBERS-3 y 4 representan una evolución con respecto a los satélites CBERS-1, 2 y 2B. Para los CBERS-3 y 4, se utilizan en el módulo de carga útil cuatro cámaras (Cámara Pancromática y Multiespectral - PAN, Cámara Multiespectral Regular - MUX, Imageador Multiespectral y Termal - IRS, y Cámara de Campo Largo - WFI) con desempeños geométricos y radiométricos mejorado.

Las diferencias entre los satélites de la primera generación del Programa CBERS (CBERS-1, 2 y 2B) y los de la segunda (CBERS-3 y 4) se presentan en el cuadro siguiente:

Cuadro 25. Características de los satélite CBERS

Satélite	Lanzamiento	Situación actual	Sensor
CBERS-1	10/14/1999	Inactivo el agosto 2003	CCD, IRMSS e WFI
CBERS-2	10/21/2003	Inactivo 10/01/2009	CCD, IRMSS e WFI
CBERS-2B	09/19/2007	Inactivo 12/05/2010	CCD, HRC, WFI
CBERS-3	12/09/2013	Se perdió	PAN, MUX, IRS, WFI
CBERS-4	7/12/2014	Activo	PAN, MUX, IRS, WFI
CBERS-4A	20/12/2019	Activo	PAN, MUX, IRS, WFI

2.5.1. CBERS 4 - China-Brasil Earth Resources Satellite

Lanzamiento: 07 de diciembre de 2014 Taiyan Centro de Lanzamiento, China

El satélite CBERS-4 lleva cuatro sensores:

- Sensor PanMux (PanMUX)
- Sensor Multiespectral (MUXCam)
- Sensor Escáner infrarrojo de resolución media (IRS)
- Sensor de imagen de campo amplio (WFI)

Cuadro 26. Características del satélite CBERS 4

CBERS 4 Banda	Sensor	Longitud de onda (µm)	Resolución espacial (m)	Resolución Radiométrica (Bits)	Resolución Temporal	Dimensiones (km)
1. Banda PAN	PANMUX	0.51 - 0.85	5	8	52	60x120
2. Banda GREEN	PANMUX	0.52 - 0.59	10	8	52	60x120
3. Banda RED	PANMUX	0.63 - 0.69	10	8	52	60x120
4. Banda NIR	PANMUX	0.77 - 0.89	10	8	52	60x120
5. Banda BLUE	MUXCAM	0.45 - 0.52	20	8	26	120x120
6. Banda GREEN	MUXCAM	0.52 - 0.59	20	8	26	120x120
7. Banda RED	MUXCAM	0.63 - 0.69	20	8	26	120x120
8. Banda NIR	MUXCAM	0.77 - 0.89	20	8	26	120x120
9. Banda PAN	IRS	0.50 - 0.9	40	8	26	120x120
10. Banda SWIR	IRS	1.55 - 1.75	40	8	26	120x120
11. Banda SWIR	IRS	2.08 - 2.35	40	8	26	120x120
12. Banda TIR	IRS	1.04 - 1.25	80	8	26	120x120
13. Banda BLUE	WFI	0.45 - 0.52	64	10	3	866x866
14. Banda GREEN	WFI	0.52 - 0.59	64	10	3	866x866
15. Banda RED	WFI	0.63 - 0.69	64	10	3	866x866
16. Banda NIR	WFI	0.77 - 0.89	64	10	3	866x866

Link descarga banda satélite: http://www.dgi.inpe.br/catalogo/

MAPA DE GRILLAS DEL SATELITE CBERS 4

2.6. Diferencia de las resoluciones de las plataformas y sensores.

Se ha realizado un análisis de las características que presenta la plataforma y el sensor, teniendo en cuenta su resolución.

Cuadro 27. Diferencia de características de plataformas y sensores.

DESCRIPCIÓN	PLATAFORMA						
	LANDSAT 4	LANDSAT 5	LANDSAT 7	LANDSAT 8	SENTINEL 2	EOS TERRA	EOS (TERRA y AQUA)
Sensor	TM	TM	ETM+	OLI/ TIRS	MSI	ASTER	MODIS
Lanzamiento	16/07/1982	1/03/1984	15/04/1999	11/02/2013	Sentinel2A: 23/06/2015 Sentinel2B: 07/03/2017	18/12/1999	18/12/1999 (TERRA) 04/05/2002 (AQUA)
Altitud de órbita	705km	705km	705km	705km	786km	708km	708km (TERRA) 705km (AQUA)
Resolución Radiométrica	8bits	8bits	8bits	16bits	12bits	8bits (B1-9) 16bits (B10 -14)	12bits
Resolución Espacial (metros)	30m	30m	30m (B8 15m)	30m (B8 15m)	10m (banda 2, 3, 4 y 8) 20m (banda 5, 6, 7, 8A, 11 y 12) 60m (banda 1, 9 y 10)	15m (VNIR) 30m (SWIR) 90m (TIR)	250m (B1-2) 500m (B3-7) 1000m (B8-36)
Resolución espectral	7 bandas	7 bandas	8 bandas	11 bandas	13 bandas	14 bandas	36 bandas
Frecuencia de nuevas imágenes	16 días	16 días	16 días	16 días	5 días	16 días	1 día
Tamaño de la imagen	180km x 180km	180km x 180km	180km x 180km	185km x 185km	Ancho de franja de 290km	60km x 60km	2330km x 10km
Archivo	1982 - 1993	1984 - 2011	1999 - 2003 (SLC - ON) 2003 - Presente (SLC - OF)	2013 - Presente	2015 - Presente	2000 - Presente	2000 - Presente

Fuente: Elaboración propia

III. CORRECCIÓN ATMOSFERICA DE SUPERFICIE

3.1. Corrección radiométrica y atmosférica en LandSat 4, 5 y 7

3.1.1. Conversión ND a Radiancia del satélite Landsat 4, 5 Y 7

La radiancia es el "Flujo de energía (principalmente energía irradiante o incidente) por ángulo sólido que abandona una unidad de área de una superficie en una dirección dada", "Radiancia es lo que mide el sensor y depende en cierta medida de la reflectancia" (NASA, 2011).

Las imágenes de Landsat son provistas en radiancia, escaladas previamente al resultado. Para imágenes Landsat, la Radiancia espectral en el sensor ($L\lambda$, medida en [vatios/ (metro cuadrado * ster * μm)]) está dada por las dos ecuaciones siguientes para determinar L_λ (https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product):

$$L_\lambda = ML * Qcal + AL$$

$$L_\lambda = \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{Qcalmax - Qcalmin}\right)(Qcal - Qcalmin) + LMIN_\lambda$$

Donde:

$$ML = \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{Qcalmax - Qcalmin}\right)$$

$$AL = Lmin_\lambda - \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{Qcalmax - Qcalmin}\right)Qcalmin$$

Donde:

L_λ	: Radiancia espectral en el sensor (Radiancia en el satélite).
ML	: Factor Multiplicativo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de banda).
AL	: Factor Aditivo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de banda).
$Qcal$	: Valor de pixel discretizados y calibrados del producto estándar (Valor digitales DN).
$LMAX_\lambda$	: Radiancia espectral máxima correspondiente a la banda Qcalx.
$LMIN_\lambda$	: Radiancia espectral mínima correspondiente a la banda Qcalx.
$Qcalmax$	: Valor máximo del píxel, va depender de la resolución radiométrica, ejemplo de 8bits es 255.
$Qcalmin$	: Valor mínimo del píxel, en este caso 1

3.1.2. Conversión de radiancia a reflectancia al tope de la Atmosfera (TOA)

Esta conversión es conociendo el ángulo cenital solar que viene dado en los metadatos de la imagen y la distancia Tierra-Sol en el momento de la toma de la imagen. Para poder utilizar la información radiométrica de la imagen en todas las facetas es necesario convertir la reflectancia aparente (TOA).

Se va usar el método adoptado por USGS (United States Geological Survery) para la corrección al tope de la atmosférica, el cual se basa en el modelo de transferencia radiactiva MODTRAN (Moderate resolution atmospheric transmission) (BERK *et al.,* 2005). Los objetivos de este método son eliminar de la radiancia recibida por el sensor los efectos de la absorción y dispersión causados por las moléculas y partículas atmosféricas en suspensión y en segundo lugar, convertir esa radiancia a valores de reflectividad TOA, siendo este valor adimensional y expresado en tanto por uno. Para ello se usa la siguiente expresión:

$$p_\lambda = \frac{\pi * L_\lambda * d^2}{ESUN_\lambda * SEN(\theta_{SE})} \qquad p_\lambda = \frac{\pi * L_\lambda * d^2}{ESUN_\lambda * COS(\theta_{ZE})}$$

Donde:

p_λ : Reflectancia en el techo de la atmosfera del sensor

L_λ : Radiancia espectral en el sensor (Radiancia en el satélite).

d : Distancia Tierra-Sol en el momento de la toma de la imagen, expresada en Unidades Astronómicas (Calculado según una formula en función del día juliano).

$ESUN_\lambda$: Irradiancia Media Solar exo-atmosférica.

θ_{SE} : Ángulo local de elevación del sol. El ángulo de elevación del centro del escenario en grados se proporciona en los metadatos (SUN_ELEVATION).

θ_{ZE} : Ángulo zenital solar en grados, el cual es equivalente a: 90° - θ_{SE}, donde θ_{SE} es la elevación solar.

3.1.2.1. Determinando Distancia Tierra-Sol

Para determinar el parámetro "*d*" también se puede calcular a partir de la siguiente formula (CHUVIECO, 2007):

$$d = 1 + 0.0167 * (SENO((2 * PI() * ((Día\ Juliano - 93.5)))/365))$$

$$d = 1 - 0.0167 * COS(2 * PI() * (Día\ Juliano - 3)/365)))$$

$$d = 1 - 0.01672 * COS(RADIANS(0.9856) * (Día\ Juliano - 4))))$$

El valor del parámetro "*d*" varía a lo largo del año entre 0.983 y 1.017 Unidades Astronómicas.

3.1.2.2. Determinando el valor Valores de irradiancia Media Sola exo-atmosférica $ESUN_\lambda$ (W /(m2 * μm))

Para LandSat se encuentran en el siguiente cuadro:

Cuadro 28. Valores de irradiancia Media Sola Exo-atmosférica $ESUN_\lambda$ Landsat

Banda	Landsat 8 OLI	Landsat 7 ETM+	Landsat 5 TM	Landsat 4 TM	Landsat 4 y 5 MSS	Landsat 1 – 3 MSS
1	1895.33	1970	1958	1958	1848	
2	2004.57	1842	1827	1826	1588	
3	1820.75	1547	1551	1554	1235	
4	1549.49	1044	1036	1033	856.6	1848
5	951.76	225.7	214.9	214.7		1588
6	247.55					1235
7	85.46	82.06	80.65	80.7		856.6
8	1723.88	1369				
9	366.97					

Fuente: https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product

Si deseamos calcular $\boldsymbol{ESUN_\lambda}$, podemos utilizar esta fórmula:

$$ESUN_\lambda = \frac{\pi * d^2 * RADIANCE_MAXIMUM}{REFLECTANCE_MAXIMUM}))$$

Fuente: https://grass.osgeo.org/grass72/manuals/i.landsat.toar.html

Donde $RADIANCE_MAXIMUM$ y $REFLECTANCE_MAXIMUM$ son provistas en los metadatos de la imagen (_MTL.txt).

3.1.2.3. Conversión de grados SUN_ELEVATION a radianes

Para convertir de grados a radianes el ángulo de elevación del sol local (SUN_ELEVATION o $\theta SE°$), se utiliza la siguiente formula:

$$(\theta SE°) * \pi / 180$$

$$(\theta ZE°) * \pi / 180$$

Donde:

θ_{SE} : Ángulo local de elevación del sol. El ángulo de elevación del centro del escenario en grados se proporciona en los metadatos (SUN_ELEVATION).

θ_{ZE} : Ángulo zenital solar en grados, el cual es equivalente a: 90° - θ_{SE}, donde θ_{SE} es la elevación solar.

3.2. Radiancia y Reflectancia al tope de la atmosfera de LandSat 8

3.2.1. Conversión ND a Radiancia en el sensor Landsat 8

Las imágenes Landsat 8 consisten en una serie cuantificada y calibrada de niveles digitales que pueden ser reescalados a valores de radiancia y reflectancia usando para ello los coeficientes radiométricos provistos en el archivo de metadato (_MTL.txt), tal y como se describe a continuación:

$$L_\lambda = ML * Qcal + AL$$

Donde:

L_λ : Radiancia espectral en el sensor (Radiancia en el satélite).

ML : Factor Multiplicativo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de banda)

AL : Factor Aditivo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de banda)

$Qcal$: Valor de pixel discretizados y calibrados del producto estándar (Valor digitales DN).

3.2.2. Conversión de ND a Reflectancia al tope de la Atmosfera (TOA) Landsat 8

Se usan los coeficientes de reflectancia suministrados en el archivo de metadatos. El siguiente algoritmo es usado para convertir los niveles digitales a valores de reflectancia:

$$\rho\lambda = \frac{M\rho * Qcal + A\rho}{\text{SEN}\ (\theta_{SE})} \qquad \rho\lambda = \frac{M\rho * Qcal + A\rho}{\text{COS}\ (\theta_{ZE})}$$

Donde:

ρλ: Reflectancia TOA del sensor, con corrección del ángulo solar.

Qcal: Valores de los píxeles de productos estándar cuantifican y calibrados (ND).

Mρ: Factor de cambio de escala multiplicativo *(REFLECTANCE_MULT_BAND_x,* donde x es el número de bandas).

Aρ: Banda especifica aditivo reescala el factor de los metadatos *(REFLECTANCE_ADD_BAND_x,* donde x es el número de bandas*).*

θ_{SE}*:* Ángulo de elevación del sol local. El ángulo de elevación del sol centro de la escena en grados se proporciona en los metadatos *(SUN_ELEVATION).*

θ_{ZE}*:* Ángulo zenital solar en grados, el cual es equivalente a: 90° - θ_{SE} , donde θ_{SE} es la elevación solar.

Fuente: https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product

3.3. Conversión a radiométrica y Reflectancia TOA del sensor ASTER L1T

3.3.1. Conversión de ND a Radiancia espectral ASTER L1T

Los valores digitales de ocho bits de cada banda fueron transformados en valores de radiancia en la atmósfera superior. Este procedimiento, que evita pérdida de información, puede ser realizado utilizando la siguiente ecuación según ABRAMS y KOOK, 1999:

$$L_\lambda = (ND - 1) * UCC$$

Donde:

L_λ = Radiancia de la banda

UCC = Coeficiente de transformación (Unidad de conversión del factor).

ND = Reflectancia expresada como un valor digital de ocho bits.

Los factores de conversión son provistos por la NASA en cada meta archivo que acompaña a la imagen procesada a nivel L1B.

La radiación solar reflejada que detecta el sensor debe necesariamente atravesar la atmósfera, que está constituida por gases y polvo. Estos elementos producen un debilitamiento y distorsión de la respuesta debido a la absorción selectiva de algunas longitudes de onda en particular con respecto a otras, que llegan con mínimas perturbaciones hasta el sensor. Estos fenómenos pueden suprimirse aplicando una corrección atmosférica (GREEN *et al*. 1993).

Cuadro 29. Coeficiente de conversión datos ASTER L1T

Banda ASTER	Coeficiente de conversión - UCC	W/(m²*sr*µm)
B1	0.676	Ganancia alta
B2	0.708	Ganancia alta
B3N	0.862	Ganancia normal
B4	0.2174	Ganancia normal
B5	0.0696	Ganancia normal
B6	0.0625	Ganancia normal
B7	0.0597	Ganancia normal
B8	0.0417	Ganancia normal
B9	0.0318	Ganancia normal
B10	0.006822	Ganancia normal
B11	0.00678	Ganancia normal
B12	0.00659	Ganancia normal
B13	0.005693	Ganancia normal
B14	0.005225	Ganancia normal

Fuente: ABRAMS y KOOK, 1999.

3.3.2. Conversión de Radiancia a Reflectancia al tope de la atmosfera (TOA) ASTER L1T

Se calcula usando la ecuación de Landsat estándar de:

$$p_\lambda = \frac{\pi * L_\lambda * d^2}{ESUN_\lambda * SEN(\theta_{SE})}$$

Donde:

p_λ : Reflectancia en el techo de la atmosfera del sensor

L_λ : Radiancia espectral en el sensor (Radiancia en el satélite).

d : Distancia Tierra-Sol en el momento de la toma de la imagen, expresada en Unidades Astronómicas (Calculado según una formula en función del día juliano).

$ESUN_\lambda$: Irradiancia Media Solar exo-atmosférica.

θ_{SE} : Ángulo local de elevación del sol. El ángulo de elevación del centro del escenario en grados se proporciona en los metadatos (SUN_ELEVATION).

θ_{ZE} : Ángulo zenital solar en grados, el cual es equivalente a: 90° - θ_{SE}, donde θ_{SE} es la elevación solar.

3.3.2.1. Determinando el valor Valores de irradiancia Media Sola Exo-atmosférica $ESUN_\lambda$ (W /(m2 * μm))

Los valores de ESUN [W /(m2 * μm)] para el sensor ASTER se muestran en la siguiente tabla (SMITH, 2004). Valores de ESUN para bandas ASTER.

Cuadro 30. Irradiancia Exoatmosférica para cada banda del sensor ASTER L1T

Banda	$ESUN_\lambda$
B1	1848
B2	1549
B3N	1114
B4	225.4
B5	86.63
B6	81.85
B7	74.85
B8	66.49
B9	59.85

Fuente: SMITH, 2004

3.4. Conversión a Reflectancia TOA SENTINEL 2

Las imágenes de Sentinel-2 ya se proporcionan en reflectancia de TOA escalada, que puede convertirse en reflectancia de TOA con un cálculo simple utilizando el valor de cuantificación proporcionado en los metadatos, con esta fórmula:

$$p_\lambda = ND * 0.0001$$

Donde:

ND: Número Digital de las bandas SENTINEL 2.

Para la corrección atmosférica aplicando DOS1 vamos a utilizar la irradiancia Exoatmosférica para cada banda SENTINEL-2 para ello se menciona en el siguiente cuadro.

Cuadro 31. Irradiancia Exoatmosférica para cada banda del SENTINEL 2

Banda	$ESUN_\lambda$
1	1913.57
2	1941.63
3	1822.61
4	1512.79
5	1425.56
6	1288.32
7	1163.19

8	1036.39
8A	955.19
9	813.04
10	367.15
11	245.59
12	85.25

Fuente: ANDRÉS, 2015.

3.5. Conversión a Reflectancia de superficie MODIS – MOD09

Las imágenes de MODIS del producto MOD09 ya se proporcionan en reflectancia de superficie escalada, que puede convertirse en reflectancia de superficie con un cálculo simple utilizando un valor de cuantificación, con esta fórmula:

$$p_\lambda = \text{ND*0.0001}$$

Donde:

ND: Número digital de las bandas MODIS 09

3.6. Corrección atmosférica por método de sustracción de superficie oscuras (DOS1) para satélites ASTER L1T, Sentinel2, Landsat 4, 5, 7 y 8.

El cálculo del valor de la reflectancia en superficie implica introducir algún tipo de corrección sobre el efecto que imprime la atmósfera sobre la señal recibida por el sensor (APN, 2005).

Para el cálculo la reflectividad de la superficie necesitamos estimar la transmisividad de la atmósfera (descendente T_v y ascendente T_Z), la irradiancia difusa (E_{doun}) y la radiancia atmosférica debida a la dispersión (L_p).

La reflectancia de la superficie (p_s), tal como lo describe Moran *et al.* (1992), es:

$$p_s = \frac{\pi * \left(L_\lambda - L_p\right) * d^2}{T_v * \left[\left(ESUN_\lambda * SEN_{(\theta SE)} * T_Z\right) + E_{doun}\right]}$$

Donde:

L_p : Es el efecto bruma, en ingles Path radiance

$L\lambda$: Radiancia espectral en el sensor (Radiancia en el satélite).

d : Distancia Tierra-Sol en el momento de la toma de la imagen, expresada en Unidades Astronómicas (Calculado según una formula en función del día juliano).

$ESUN_\lambda$: Irradiancia Media Solar exo-atmosférica.

E_{doun} : Es la irradiancia difusa descendiente, se considera igual a **cero** (Song. et al., 2001; Barnaby & Pellikka, 2003).

T_v : Es la transmitancia de la atmosfera en la dirección de visión.

T_Z : Es la transmitancia atmosférica en la dirección de iluminación.

θ_{SE} : Ángulo local de elevación del sol. El ángulo de elevación del centro del escenario en grados se proporciona en los metadatos (SUN_ELEVATION).

Figura 23.Radiancia recibida por el sensor remoto e interacciones atmósfera energía EM (modificado de JENSEN, 1996).

3.6.1. Cálculo de las transmisividades

Para determinar la transmisividad "T_v" y "T_Z", se va calcular con el espesor óptico para dispersión de Rayleigh (KAUFMAN, 1989).

$$\tau_r = 0.008569\lambda^{-4}\left(1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4}\right)$$

$$\tau_v = exp^{\frac{\tau_r}{COS_{(\theta V)}}} \qquad \tau_Z = exp^{\frac{\tau_r}{SEN_{(\theta E)}}}$$

Donde:

λ : Valor promedio del rango espectral de la banda.

τ_r : Espesor óptico para dispersión de Rayleigh.

θZ : Ángulo zenital solar en grados, el cual es equivalente a: 90° - θ_{SE}

θV : El ángulo de observación del sensor, entonces el ángulo es 0° y COS (0°) = 1

3.6.2. Cálculo de la corrección DOS1

El Dark Object Substrction (DOS) o substracción de objeto oscuro es una familia de correcciones atmosféricas basadas en imagen. CHAVEZ (1996) explica que "la suposición básica es que en la imagen algunos píxeles están completamente en sombra, y sus radiancias recibidas en el satélite se deben a la dispersión atmosférica (efecto bruma). Esta suposición es combinada con el hecho de que muy pocos elementos en la superficie de la Tierra tienen un color negro absoluto, por lo tanto, una reflectancia asumida de uno por ciento es mejor que un cero por ciento". Es importante mencionar que la exactitud de las técnicas basadas en imagen es generalmente menor que las correcciones basadas en medidas físicas, pero son muy útiles cuando no están disponibles mediciones atmosféricas que puedan mejorar la estimación de la reflectancia de la superficie terrestre.

El efecto bruma es dado por (SOBRINO, *et al*., 2004):

$$L_P = L_{min} - L_{DO1\%}$$

Donde:

L_{min} : "Radiancia que corresponde a un valor digital para el cual la suma de todos los píxeles con valores digitales menores o iguales a este valor es igual al 0.01 % de todos los píxeles de la imagen considerada" Sobrino, *et al*., 2004), por lo tanto, la radiancia obtenida con ese valor de conteo digital ($DNmin$)

$L_{DO1\%}$: Radiancia del objeto oscuro, con un valor asumido de reflectancia de 0.01

En particular para imágenes Landsat:

$$L_{min} = ML * ND_{min} + AL$$

Donde:

ML : Factor Multiplicativo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de banda)

AL : Factor Aditivo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de banda).

ND_{min} : Valor digital mínimo.

Las imágenes Sentinel-2 son convertidas a radiancia antes del cálculo DOS1.

La **Radiancia de Objeto Oscuro** es dada por (SOBRINO, *et al*., 2004):

$$L_{DO1\%} = \frac{0.01 * \left[(ESUN_\lambda * SEN_{(\theta SE)} * T_Z) + E_{doun}\right] * T_v}{\pi * d^2}$$

Por lo tanto, el efecto bruma es:

$$L_P = L * ND_{min} + AL - \frac{0.01 * \left[(ESUN_\lambda * SEN_{(\theta SE)} * T_Z) + E_{doun}\right] * T_v}{\pi * d^2}$$

Existen varias técnicas DOS (ejemplo: DOS1, DOS2, DOS3, DOS4), basadas en diferentes asunciones acerca de Tv, Tz, y E_{doun}. La técnica más simple es la DOS1, donde se hacen las siguientes suposiciones (MORAN *et al.,* 1992):

Donde:

T_v = 1

T_z = 1

E_{doun} = 0

Por lo tanto, el efecto bruma es:

$$L_p = ML * ND_{min} + AL - \frac{0.01 * ESUN_\lambda * SEN_{(\theta SE)}}{\pi * d^2}$$

Y la **reflectancia de superficie** terrestre resultante está dada por:

$$p_s = \frac{\pi * \left(L_\lambda - L_p\right) * d^2}{ESUN_\lambda * SEN_{(\theta SE)}}$$

Donde:

L_p : Es el efecto bruma, en ingles Path radiance

$L\lambda$: Radiancia espectral en el sensor (Radiancia en el satélite).

d : Distancia Tierra-Sol en el momento de la toma de la imagen, expresada en Unidades Astronómicas (Calculado según una formula en función del día juliano).

$ESUN_\lambda$: Irradiancia Media Solar exo-atmosférica.

θ_{SE} : Ángulo local de elevación del sol. El ángulo de elevación del centro del escenario en grados se proporciona en los metadatos (SUN_ELEVATION).

IV. CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA DE LANDSAT

Corrección de iluminación, también conocida como topográfica, se refiere a la compensación de la irradiancia solar para minimizar el Variabilidad de la reflectancia observada para objetivos similares.

Esto es un paso importante en el preprocesamiento de alta resolución Datos de teledetección para la detección de cambios forestales.

4.1. Corrección coseno o Lambertiano

En este método, se supone que la superficie tiene el comportamiento Lambertiano, es decir, ser un reflector difuso perfecto, teniendo la misma cantidad de reflectancia en todas las direcciones de vista. Por lo tanto, la

función de corrección Lambertiano intenta corregir solo las diferentes iluminaciones causadas por la orientación de la superficie (Jones et al., 1988).

Para el supuesto Lambertiano, el más utilizado la corrección es este método de coseno usando la ecuación (1), (2) y (3), propuesto por *Teillet et al.* 1982.

$$\cos i = \cos E \cos Z + \sin E \sin Z \cos(A_0 - A_S)$$

$$L_n(\lambda) = \frac{\mathrm{L}(\lambda)}{\cos i}$$

$$L_H = L_I \left(\frac{\cos Z}{\cos i}\right)$$

Donde:

L = Radiancia

Z = Ángulo zenital solar

i = Ángulo de incidente con respecto a la superficie normal

L_H = Radiancia de una superficie horizontal

L_I = Radiancia de una superficie inclinada

E = Pendiente inclinada

A_0 = Azimut solar

A_S = Aspecto superficial del ángulo de inclinación

Aunque el supuesto de Lambert es simple y conveniente Para la corrección topográfica, existe un problema reconocido en la Imágenes corregidas. Así, al corregir el efecto topográfico.

bajo una suposición de superficie de Lambert, las imágenes tendieron a ser

Corrección excesiva, con pendientes que se alejan del sol. Más brillante que las pendientes orientadas al sol debido a la luz del sol difusa relativamente más influyente en la pendiente sombreada (Jones et al., 1988).

4.2. Corrección Minnaert o no Lambertiano

Más realistas, dispersan la luz de forma no uniforme, en el estudio de Smith et al. (1980), la constante de Minnaert k esta entre 0 y 1 = caso labertiano, se derivó primero linealizando la siguiente ecuación:

$$L_H = L_T \left(\frac{\cos Z}{\cos i}\right)^k$$

Donde:

Z = Ángulo zenital solar

i = Ángulo de incidente con respecto a la superficie normal

L_H = Radiancia de una superficie horizontal

L_T = Radiancia de una superficie inclinada

k = Constante Minnaert

Si comparamos este método con el la corrección coseno, el método matemáticamente, se puede ver que el Minnaert constante, k, se usa para debilitar el poder topográfico corrección. En otras palabras, se utiliza para describir la rugosidad. De la superficie del terreno. Como resultado, se puede resolver el problema de la sobre corrección en el área que está alejada del sol. El valor de k se encuentra entre 0 y 1, mientras que 1 caracteriza una superficie de Lambert.

4.3. Corrección Topográfica C

Este enfoque semi-empírico, desarrollado por Teillet et al. (1982), es similar a la corrección de Minnaert. El factor c debe modelar la irradiancia difusa y compensar los Efectos de sobrecorrección de la corrección del coseno (Twele et al. 2006). El factor c puede derivarse del cociente de gradiente y la intersección de la línea de regresión:

$$L_H = L_T \left(\frac{\cos Z + C}{\cos i + C}\right)$$

Donde:

Z = Ángulo zenital solar

i = Ángulo de incidente con respecto a la superficie normal

L_H = Radiancia de una superficie horizontal

L_T = Radiancia de una superficie inclinada

C = $\frac{b}{m}$ para $L_T = m(\cos i) + b$

m = Gradiente de línea de regresión: $L_T - \cos i$

b = Intersección de línea de regresión: $L_T - \cos i$

V. CONVERSIÓN A TEMPERATURA DE BRILLO Y DE SUPERFICIE LANDSAT Y ASTER L1T

5.1. Determinación de temperatura de Brillo

A partir de los valores de radiancia, utilizando las bandas térmicas fácilmente se puede derivar la temperatura a la altura del sensor. Las bandas del TIRS se pueden convertir a temperatura de brillo utilizando las constantes que están en el archivo de metadatos.

$$T_b = \frac{K_2}{ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

Fuente: https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product

Donde:

T_b : Temperatura de brillo aparente en grados.

$L\lambda$: Radiancia espectral en el sensor (Radiancia en el satélite), unidad de medida (vatios/(metro cuadrado * ster * μm)

K_1 : Es la constante de conversión térmica específica para cada banda termal, que lo encontramos en el metadato (K1_CONSTANT_BAND_X), unidad de medida (en vatios /metro cuadrado * ster * μm)

K_2 : Es la constante de conversión térmica específica para cada banda termal, que lo encontramos en el metadato (K2_CONSTANT_BAND_X), unidad de medida (en grados kelvin).

Las constantes $K1$ y $K2$ para sensores Landsat son proporcionadas en el siguiente cuadro.

Cuadro 32. Constantes de calibración de la banda térmica del satélite LandSat

Satélite	Bandas térmicas	K1 W m-2 sr-1 µm-1	K2 Kelvin
Landsat 4 TM	6	671.62	1284.30
Landsat 5 TM	6	607.76	1260.56
Landsat 7 ETM+	6	666.09	1282.71
Landsat 8 TIRS	10	774.89	1321.08
	11	480.89	1201.14

Fuente: Landsat 4, 5 - CHANDER y MARKHAM (2003); LandSat 7 - NASA (2011); LandSat 8 - (ALEXANDER, 2013).

K_1 y K_2 son calculadas como (JIMENEZ-MUNOZ & SOBRINO, 2010):

$$K_1 = \frac{C_1}{\lambda^5} \qquad K_2 = \frac{C_2}{\lambda}$$

Donde (MOHR, NEWELL, & TAYLOR, 2015):

C_1 : Primera constante de radiación = $1.191 * 10^{-16}\ Wm^2sr^{-1}$

C_2 : Segunda constante de radiación = $1.4388 * 10^{-2}\ mK$

Por lo tanto, $K1$ y $K2$ para bandas ASTER L1T se proporcionan en el siguiente cuadro.

Cuadro 33. Constantes de calibración de la banda térmica del sensor ASTER L1T.

Satélite Terra	Banda	K1 W m-2 sr-1 µm-1	K2 Kelvin
ASTER	10	3024	1733
ASTER	11	2460	1663
ASTER	12	1909	1581
ASTER	13	890	1357
ASTER	14	646.4	1273

5.2. Estimación de la temperatura de superficie del suelo

Varios estudios han descrito la estimación de la Temperatura de Superficie del Suelo. Ésta puede ser calculada a partir de la Temperatura de Brillo TB como (WENG, *et al*. 2004):

$$T_S = \frac{T_b}{\left[1 + \left(\frac{\lambda * T_b}{C_2}\right) * Ln_{LSE}\right]} - 273$$

Donde:

T_s : Temperatura de Superficie del Suelo.
T_b : Temperatura de brillo aparente.
C_2 : $h * \frac{c}{s} = 1.4388 * 10^{-2} m\ K$
h : Constante de Planck $h = 6.626 * 10^{-34}$ Js
c : Velocidad de la Luz $c = 2.998 * 10^8$ m/s
s : Constante de Boltzmann $1.38 * 10^{-23}$ J/K
LSE : Emisividad de la superficie – también conocido como "*e*".
λ : Longitud de onda central de la banda térmica emitida según banda.

5.2.1. Determinación de la longitud de onda central de las bandas térmicas LandSat y ASTER L1T

Longitud de onda central del satélite LandSat 4, 5, 7 y 8, de sus respectivas bandas terminales

Cuadro 34. Longitud de onda central del satélite LandSat 4, 5, 7 y 8

Satélite	Bandas térmicas	Longitud de onda central (m)
Landsat 4, 5, y 7	6	11.45
Landsat 8	10	10.8
Landsat 8	11	12

Longitud de onda central del sensor ASTER L1T, de sus respectivas bandas terminales.

Cuadro 35. Longitud de onda central del sensor ASTER L1T

Satélite	Bandas térmicas	Longitud de onda central (m)
ASTER	10	8.3
ASTER	11	8.65
ASTER	12	9.1
ASTER	13	10.6
ASTER	14	11.3

Fuente: Elaboracion propia

5.2.2. Determinar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) Landsat 4, 5, 7, 8 y sensor ASTER L1T

El Índice de Diferencia de Vegetación Normalizado, también conocido como NDVI (ROUSE *et al*., 1974) por sus siglas en inglés. Es un índice usado para medir la diferencia normalizada entre las reflectancias del rojo y del infrarrojo cercano, proporcionando una medida sobre la cantidad, calidad y desarrollo de la cobertura vegetal y vigorosidad en áreas extensas.

El NDVI (ROUSE *et al*. 1974) es el índice de vegetación más utilizado para todo tipo de aplicaciones. La razón fundamental es su sencillez de cálculo, y disponer de un rango de variación fijo (entre –1 y +1), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes, etc.

$$NDVI = \frac{(\rho s_{NIR} - \rho s_{RED})}{(\rho s_{NIR} + \rho s_{RED})}$$

Donde:

NDVI : Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

ρs_{NIR} : Reflectancia de la banda Infrarrojo cercano – NIR.

ρs_{RED} : Reflectancia de la banda roja - RED

Utilizando en la formula en las imágenes Landsat y ASTER L1T es:

$$NDVI_{L8} = \frac{\rho s_{B5} - \rho s_{B4}}{\rho s_{B5} + \rho s_{B4}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots . LandSat\ 8$$

$$NDVI_{L5,L7} = \frac{\rho s_{B4} - \rho s_{B3}}{\rho s_{B4} + \rho s_{B3}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots LandSat\ 4,5,7$$

$$NDVI_{ASTER} = \frac{\rho s_{B3N} - \rho s_{B2}}{\rho s_{B3N} + \rho s_{B2}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots ASTER\ L1T$$

5.2.3. Determinar la fracción de vegetación – FV

Para determinar la fracción de vegetación se obtiene mediante la fórmula (CARLSON y RIPLEY, 1997):

$$FV = \left[\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}\right]^2$$

Donde:

FV : Fracción de vegetación

NDVI : Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

$NDVI_{max}$: Valor de NDVI máximo para la vegetación de mayor verdor = 0.5

$NDVI_{min}$: Valor de NDVI mínimo presente en el suelo desnudo = 0.2

5.2.4. Determinación de la emisividad de la superficie de la tierra - LSE

La clasificación del NDVI para determinar la emisividad de la superficie según (SOBRINO et al., 2004)

Cuadro 36. Comparativo de clasificación de NDVI.

Fuente	Clasificación NDVI			Área de Estudio
	1	3	2	
SOBRIO *et al*., 2004	NDVI < 0.2	NDVI > 0.5	0.2 ≤ NDVI ≥ 0.5	Valencia, España
JIMÉNEZ - MUÑOZ 2009	NDVI < 0.18	NDVI > 0.85	0.18 ≤ NDVI ≥ 0.85	Albacete, España
QUIN *et al*., 2011	NDVI < 0.2	NDVI > 0.65	0.2 ≤ NDVI ≥ 0.65	Tengchong, China

Clasificación 1 = Es la cubierta de suelo desnudo y la emisividad del Suelo corresponde un valor medio de 0.97 (SOBRINO *et al*., 2004).

$$NDVI < 0.2; LSE_1 = 0.97 \ldots\ldots\ldots.. Ecuación\ 36$$

Clasificación 3 = Es la cubierta de vegetación con un valor contante para emisividad de la vegetación de 0.99 (SOBRINO *et al*., 2004).

$$NDVI \geq 0.5; LSE_3 = 0.99 \ldots\ldots\ldots.. Ecuación\ 37$$

Clasificación 2 = Se refiere al caso de superficie heterogéneas y rugosas. Está compuesta de vegetación y suelo desnudo. Para este caso se va utilizar la siguiente ecuación para determinar la emisividad (SOBRINO *et al*., 2004).

$$0.2 \leq NDVI < 0.5; LSE_2 = 0.0986 + 0.004*\mathrm{FV} \ldots\ldots\ldots.. Ecuación\ 38$$

Donde:

LSE : Emisividad de la superficie de la tierra

NDVI : Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

FV : Fracción de vegetación.

VI. ÍNDICE DE IMÁGENES SATELITALES

El análisis de la vegetación y la detección de los cambios en los patrones de vegetación son claves para la evaluación y el monitoreo de recursos naturales. Entonces no resulta sorpresivo que la detección y la evaluación cuantitativa de la vegetación verde es una de las aplicaciones principales de la teledetección para el manejo de recursos naturales y la toma de decisiones (EASTMAN, 2003).

La clorofila absorbe energía fuertemente en las bandas centradas en 0.45 y 0.67 µm. Es por ello que nuestros ojos perciben la vegetación sana de color verde, debido a la gran absorción en azul y rojo por las hojas y la reflexión en el verde. Cuando la vegetación no está sana, disminuye la clorofila, y el resultado es un incremento de la reflectancia espectral en el rojo, por lo que las hojas se ven con un tono amarillento (mezcla de verde y rojo).

6.1. Fundamentos de la vegetación

6.1.1. Comportamiento espectral de la hoja

La clorofila no absorbe toda la luz del sol uniformemente, Las moléculas de clorofila preferentemente absorben la luz roja y azul para usar en la fotosíntesis. Ellas deben absorber tanta cantidad como 70% a 90% de la luz incidente en esas regiones. Mucho menos cantidad de la luz verde es absorbida y más es reflejada, entonces el observador humano, que puede ver sólo el espectro visible, observa la reflexión dominante de la luz verde como vegetación viva

Espectro de absorción para la clorofila

Reflectancia espectral típica de una hoja viva.

Muy poca de esta energía infrarroja es absorbida internamente, es principalmente (por encima del 60%) esparcida de manera ascendente (la que se llama energía reflectada) o descendente (energía trasmitida). Entonces la estructura interna de la hoja es responsable por el brillo de la reflectancia infrarroja de la vegetación viva.

Este comportamiento explica la gran utilidad del espectro infrarrojo cercano para los estudios de vegetación y, por supuesto, facilita la separación de las superficies de vegetación de las superficies sin vegetación, que son usualmente muy oscuras en el infrarrojo cercano. Además las diferencias en la reflectancia de las especies de plantas frecuentemente son más pronunciadas en el infrarrojo cercano.

Las diferencias entre las clases de vegetación se distinguen mejor en el infrarrojo que en el visible.

Entonces, los cambios en el vigor de la vegetación y las imágenes del infrarrojo han sido valiosos en la detección y mapeo de presencia, distribución, y extensión de los cultivos enfermos e infestaciones de insectos. Además, los cambios en la estructura de la hoja

que acompañan la madurez natural de los cultivos están sujetos a detección con imágenes del infrarrojo.

La signatura espectral característica de la vegetación sana muestra un claro comportamiento entre las bandas roja (0.6 a 0.7 µm) y el infrarrojo cercano (0.7 a 1.1 µm). Se produce un notable contraste espectral entre la banda RED del espectro y la de la NIR, lo que permite separar la vegetación sana de otras cubiertas (CHUVIECO, 2008).

Contraste espectral de la vegetación sana entre las bandas RED e NIR del espectro

Cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, su reflectividad será inferior en el NIR, aumentando paralelamente en el rojo (al tener menor absorción clorofílica), con lo que el contraste en ambas capas será mucho menor. Los índices más empleados son el cociente simple entre las bandas (Ci), y el denominado índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) propuesto originalmente por ROUSE et al, (1974).

6.2. Tipos de índices

6.2.1. Índice de vegetación proporcionada - RATIO

El cociente simple (Ci) representa la relación entre las reflectividades del infrarrojo cercano y del rojo. Se ha usado para estimaciones de biomasa e índice de área foliar (LAI) desde 1969 referencia (JORDAN, 1969).

$$RATIO = \frac{(\rho s_{NIR})}{(\rho s_{RED})}$$

Donde:

$RATIO$: Índice de vegetación proporcionada

ρs_{NIR} : Reflectancia de la banda Infrarrojo cercano – NIR.

ρs_{RED} : Reflectancia de la banda roja - RED

Por lo tanto, en los satélites:

$$RATIO = \frac{(\rho s_{B4})}{(\rho s_{B3})} \quad \ldots\ldots\ldots. Landsat\ 5,7$$

$$RATIO = \frac{(\rho s_{B5})}{(\rho s_{B4})} \quad \ldots\ldots\ldots. Landsat\ 8$$

$$RATIO = \frac{(\rho s_{B3N})}{(\rho s_{B2})} \quad \ldots\ldots\ldots. ASTER\ L1T$$

$$RATIO = \frac{(\rho s_{B8})}{(\rho s_{B4})} \quad \ldots\ldots\ldots. SENTINEL - 2$$

$$RATIO = \frac{(\rho s_{B17})}{(\rho s_{B8})} \quad \ldots\ldots\ldots. SENTINEL - 3$$

$$RATIO = \frac{(\rho s_{B2})}{(\rho s_{B1})} \quad \ldots\ldots\ldots. MODIS\ 09$$

6.2.2. Índice Vegetación Diferencial - DVI

Diferencia entre las bandas infrarrojo cercana (IRC) y rojo (R) de un sensor

$$DVI = \rho s_{NIR} - \rho s_{RED}$$

Por lo tanto, en los satélites:

$$DVI = \rho s_{B4} - \rho s_{B3} \ldots\ldots\ldots\ldots. LandSat\ 5,7$$

$$DVI = \rho s_{B5} - \rho s_{B4} \ldots\ldots\ldots\ldots. LandSat\ 8$$

$$DVI = \rho s_{B3N} - \rho s_{B2} \ldots\ldots\ldots\ldots. ASTER\ L1T$$

$$DVI = \rho s_{B8} - \rho s_{B4} \ldots\ldots\ldots\ldots. SENTINEL - 2$$

$$DVI = \rho s_{B17} - \rho s_{B8} \ldots\ldots\ldots\ldots. SENTINEL - 3$$

$$DVI = \rho s_{B2} - \rho s_{B1} \ldots\ldots\ldots\ldots. MODIS\ 09$$

6.2.3. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada - NDVI

El Índice de Diferencia de Vegetación Normalizado, también conocido como NDVI (ROUSE *et al*., 1974) por sus siglas en inglés. Es un índice usado para medir la diferencia normalizada entre las reflectancias del rojo y del infrarrojo cercano, proporcionando una medida sobre la cantidad, calidad y desarrollo de la cobertura vegetal y vigorosidad en áreas extensas.

$$NDVI = \frac{(\rho s_{NIR} - \rho s_{RED})}{(\rho s_{NIR} + \rho s_{RED})}$$

Por lo tanto, en los satélites:

$$NDVI = \frac{\rho s_{B4} - \rho s_{B3}}{\rho s_{B4} + \rho s_{B3}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots LandSat\ 5,7$$

$$NDVI = \frac{\rho s_{B5} - \rho s_{B4}}{\rho s_{B5} + \rho s_{B4}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots LandSat\ 8$$

$$NDVI = \frac{\rho s_{B3N} - \rho s_{B2}}{\rho s_{B3N} + \rho s_{B2}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots ASTER\ L1T$$

$$NDVI = \frac{\rho s_{B8} - \rho s_{B4}}{\rho s_{B8} + \rho s_{B4}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots SENTINEL - 2$$

$$NDVI = \frac{\rho s_{B17} - \rho s_{B8}}{\rho s_{B17} + \rho s_{B8}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots SENTINEL - 3$$

$$NDVI = \frac{\rho s_{B2} - \rho s_{B1}}{\rho s_{B2} + \rho s_{B1}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots MODIS\ 09$$

Característica de NDVI en una planta sana y enferma.

VALOR NDVI	Descripción
< 0	El material inanimado/ muerto, por ejemplo: carretera, edificios, el suelo o las plantas muertas.
0 -> 0.33	Material vegetativo no saludable
0.33 -> 0.66	Material vegetativo sano
-> 0.66	Material vegetal muy saludable

Ejemplo

de cálculo y valor de NDVI

Fuente: Adaptado de Earth Observatory (NASA)

6.2.4. Índice de vegetación mejorada – EVI

se optimizó a partir del NDVI aumentando la sensibilidad en las regiones de alta biomasa y mejoró el monitoreo de la vegetación mediante la disociación de la señal del fondo del dosel y una reducción de la influencia atmosférica. La ecuación utilizada para su obtención se indica a continuación:

$$EVI = G * \frac{(\rho s_{NIR} - \rho s_{RED})}{(\rho s_{NIR} + C_1 \rho s_{RED} - C_2 * \rho s_{BLUE} + L)}$$

Donde:

ρs_{NIR} : Reflectancia de la banda Infrarrojo cercano – NIR.

ρs_{RED} : Reflectancia de la banda roja – RED

ρs_{BLUE} : Reflectancia de la banda azul – BLUE

L : Ajuste del fondo del dosel, siendo L = 1.

G : Factor de ganancia, siendo G = 2.5

C_1 : Coeficientes de resistencia de aerosoles, siendo C_1 = 6

C_2 : Coeficientes de resistencia de aerosoles, siendo C2 = 7.5

Por lo tanto:

$$EVI = 2.5 * \frac{(\rho s_{B4} - \rho s_{B3})}{(\rho s_{B4} + 6 * \rho s_{B3} - 7.5 * \rho s_{B1} + 1)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots Landsat\ 5,7$$

$$EVI = 2.5 * \frac{(\rho s_{B5} - \rho s_{B4})}{(\rho s_{B5} + 6 * \rho s_{B4} - 7.5 * \rho s_{B2} + 1)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots Landsat\ 8$$

$$EVI = 2.5 * \frac{(\rho s_{B8} - \rho s_{B4})}{(\rho s_{B8} + 6 * \rho s_{B4} - 7.5 * \rho s_{B2} + 1)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots SENTINEL - 2$$

$$EVI = 2.5 * \frac{(\rho s_{B2} - \rho s_{B1})}{(\rho s_{B2} + 6 * \rho s_{B1} - 7.5 * \rho s_{B3} + 1)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots MODIS\ 09$$

6.2.5. Índice de vegetación Transformado - TVI

DERING y colaboradores citados por EASTMAN (2003), modifica el NDVI agregando una constante de 0.5 a todos sus valores y calculando la raíz cuadrada de los resultados. La constante 0.5 se introduce para evitar operar con valores negativos del NDVI. El cálculo de la raíz cuadrada se emplea para corregir los valores del NDVI que se aproximan a una distribución Poison e introducir una distribución normal. Con estos dos elementos, el TVI toma la siguiente forma:

$$TVI = \sqrt{\frac{(\rho s_{NIR} - \rho s_{RED})}{(\rho s_{NIR} + \rho s_{RED})} + 0.5}$$

Por lo tanto, en los satélites:

$$TVI = \sqrt{\frac{(\rho s_{B4} - \rho s_{B3})}{(\rho s_{B4} + \rho s_{B3})} + 0.5} \ldots\ldots\ldots\ldots . LandSat\ 5,7$$

$$TVI = \sqrt{\frac{(\rho s_{B5} - \rho s_{B4})}{(\rho s_{B5} + \rho s_{B4})} + 0.5} \ldots\ldots\ldots\ldots . LandSat\ 8$$

$$TVI = \sqrt{\frac{(\rho s_{B3N} - \rho s_{B2})}{(\rho s_{B3N} + \rho s_{B2})} + 0.5} \ldots\ldots\ldots\ldots . ASTER\ L1T$$

$$TVI = \sqrt{\frac{(\rho s_{B8} - \rho s_{B4})}{(\rho s_{B8} + \rho s_{B4})} + 0.5} \ldots\ldots\ldots\ldots . SENTINEL - 2$$

$$TVI = \sqrt{\frac{(\rho s_{B17} - \rho s_{B8})}{(\rho s_{B17} + \rho s_{B8})} + 0.5} \ldots\ldots\ldots\ldots . SENTINEL - 3$$

$$TVI = \sqrt{\frac{(\rho s_{B2} - \rho s_{B1})}{(\rho s_{B2} + \rho s_{B1})} + 0.5} \ldots\ldots\ldots\ldots . MODIS\ 09$$

6.2.6. Índice de vegetación Transformado Corregido - CTVI

Propuesto por PERRY y LAUTENSCHLAGER citados por EASTMAN (2003), apunta a corregir el TVI. Resulta obvio que agregar una constante de 0.5 a todos los valores del NDVI no siempre elimina los valores negativos porque los valores del NDVI pueden tener el rango -1 a +1. Los valores menores que -0.5 dejan pequeños valores negativos luego de la operación de adición. Entonces, el CTVI se realiza para resolver esta situación al dividir (NDVI + 0.50) por su valor absoluto y multiplicar el resultado por la raíz cuadrada del valor absoluto. Esto suprime el NDVI negativo. La ecuación se escribe:

$$CTVI = \frac{NDVI + 0.5}{ABS(NDVI + 0.5)}\sqrt{ABS(NDVI + 0.5)}$$

6.2.7. Índice de Vegetación Atmosféricamente Resistente - ARVI

Kaufman y Tanré, citados por Chuvieco (2008) proponen un ajuste del NDVI a las condiciones atmosféricas, teniendo en cuenta la diferente dispersión de los canales azul y rojo del espectro. De esta forma se define el ARVI de la siguiente manera:

$$ARVI = \frac{\rho s_{NIR} - (\rho s_{RED} - 1) * (\rho s_{RED} - \rho s_{BLU})}{\rho s_{NIR} + (\rho s_{RED} - 1) * (\rho s_{RED} - \rho s_{BLU})}$$

Donde:

ρs_{NIR} : Reflectancia de la banda infrarrojo cercano – NIR.

ρs_{RED} : Reflectancia de la banda roja – RED.

ρs_{BLU} : Reflectancia de la banda azul – BLU.

Por lo tanto, en los satélites:

$$ARVI = \frac{\rho s_{B4} - (\rho s_{B3} - 1) * (\rho s_{B3} - \rho s_{B1})}{\rho s_{B4} + (\rho s_{B3} - 1) * (\rho s_{B3} - \rho s_{B1})} \ldots\ldots\ldots. LandSat\ 5,7$$

$$ARVI = \frac{\rho s_{B5} - (\rho s_{B4} - 1) * (\rho s_{B4} - \rho s_{B2})}{\rho s_{B5} + (\rho s_{B4} - 1) * (\rho s_{B4} - \rho s_{B2})} \ldots\ldots\ldots. LandSat\ 8$$

$$ARVI = \frac{\rho s_{B8A} - (\rho s_{B4} - 1) * (\rho s_{B4} - \rho s_{B2})}{\rho s_{B8A} + (\rho s_{B4} - 1) * (\rho s_{B4} - \rho s_{B2})} \ldots\ldots\ldots. SENTINEL - 2$$

$$ARVI = \frac{\rho s_{B2} - (\rho s_{B1} - 1) * (\rho s_{B1} - \rho s_{B3})}{\rho s_{B2} + (\rho s_{B1} - 1) * (\rho s_{B1} - \rho s_{B3})} \ldots\ldots\ldots. MODIS\ 09$$

6.2.8. Índice de Vegetación Avanzada - AVI

Es un indicador numérico, similar a NDVI, que utiliza las bandas espectrales rojo y del infrarrojo cercano. Al igual que el NDVI, AVI se utiliza en estudios de vegetación para controlar las variaciones de los cultivos y forestales a través del tiempo. A través de la combinación de múltiples temporales de la AVI y el NDVI, los usuarios pueden discriminar diferentes tipos de vegetación y fenología extraer características / parámetros.

$$AVI = \sqrt[3]{(\rho s_{NIR} * (1 - \rho s_{RED}) * (\rho s_{NIR} - \rho s_{RED})}$$

Por lo tanto, en los satélites:

$$AVI = \sqrt[3]{(\rho s_{B4} * (1 - \rho s_{B3}) * (\rho s_{B4} - \rho s_{B3})} \ldots\ldots\ldots. LandSat\ 5,7$$

$$AVI = \sqrt[3]{(\rho s_{B5} * (1 - \rho s_{B4}) * (\rho s_{B5} - \rho s_{B4})} \ldots\ldots\ldots. LandSat\ 8$$

$$AVI = \sqrt[3]{(\rho s_{B3N} * (1 - \rho s_{B2}) * (\rho s_{B3N} - \rho s_{B2})} \ldots\ldots\ldots. ASTER\ L1T$$

$$AVI = \sqrt[3]{(\rho s_{B8} * (1 - \rho s_{B4}) * (\rho s_{B8} - \rho s_{B4})} \ldots\ldots\ldots. SENTINEL - 2$$

$$AVI = \sqrt[3]{(\rho s_{B2} * (1 - \rho s_{B1}) * (\rho s_{B2} - \rho s_{B1})} \ldots\ldots.\ldots. MODIS\ 09$$

6.2.9. Índice de vegetación Ajustado al Suelo - SAVI

Fue desarrollado por Huete en 1988. Se trata de un índice muy adecuado para trabajos en zonas semiáridas, donde la contribución del suelo es muy importante. Así cuando se realice un estudio sobre una zona de estas características, este índice resultará más consistente que el NDVI, gracias a esa mayor distinción entre el suelo y la vegetación.

$$SAVI = \frac{(\rho s_{NIR} - \rho s_{RED})}{(\rho s_{NIR} + \rho s_{RED} + L)} * (1 + L)$$

L = 0.5, si L sería 0, entonces SAVI es igual al NDVI.

Por lo tanto, en los satélites:

$$SAVI = \frac{(\rho s_{B4} - \rho s_{B3})}{(\rho s_{B4} + \rho s_{B3} + L)} * (1 + L) \ldots\ldots\ldots. Landsat\ \ 5,7$$

$$SAVI = \frac{(\rho s_{B5} - \rho s_{B4})}{(\rho s_{B5} + \rho s_{B4} + L)} * (1 + L) \ldots\ldots\ldots. Landsat\ 8$$

$$SAVI = \frac{(\rho s_{B3N} - \rho s_{B2})}{(\rho s_{B3N} + \rho s_{B2} + L)} * (1 + L) \ldots\ldots\ldots. ASTER\ L1T$$

$$SAVI = \frac{(\rho s_{B8A} - \rho s_{B4})}{(\rho s_{B8A} + \rho s_{B4} + L)} * (1 + L) \ldots\ldots\ldots. SENTINEL - 2$$

$$SAVI = \frac{(\rho s_{B2} - \rho s_{B1})}{(\rho s_{B2} + \rho s_{B1} + L)} * (1 + L) \ldots\ldots\ldots. MODIS\ 09$$

6.2.10. Índice de Área foliar – LAI

El área foliar está definida por toda la vegetación por unidad de área utilizada por la vegetación. El LAI es un indicador de la biomasa de cada pixel de la imagen (SEBAL 2002).

$$LAI = \frac{\ln\left[\frac{0.69 - SAVI}{0.59}\right]}{0.91}$$

Donde:

SAVI: Índice de Vegetación Ajustado al Suelo

6.2.11. Índice de Suelo desnudo - BSI

Es un indicador numérico que combina azul, rojo, onda corta infrarroja y bandas espectrales del infrarrojo cercano para capturar las variaciones del suelo. Estas bandas espectrales se utilizan de una manera normalizada. Las bandas infrarrojas de onda corta y las bandas espectrales rojos se utilizan para cuantificar la composición mineral del suelo, mientras que el azul y los cerca de bandas espectrales de infrarrojos se utilizan para mejorar la presencia de vegetación.

BSI puede ser utilizado en numerosas aplicaciones de teledetección, como el mapeo de suelos, identificación de cultivos (en combinación con el NDVI), etc.

$$BSI = \frac{(\rho s_{SWIR1} + \rho s_{RED}) - (\rho s_{NIR} + \rho s_{BLU})}{(\rho s_{SWIR1} + \rho s_{RED}) + (\rho s_{NIR} + \rho s_{BLU})}$$

Donde:

ρs_{NIR} : Reflectancia de la banda infrarrojo cercano – NIR.

ρs_{RED} : Reflectancia de la banda roja – RED.

ρs_{BLU} : Reflectancia de la banda azul – BLU.

ρs_{SWIR1} : Reflectancia de la banda infrarrojo de onda corta 1 – SWIR1.

Por lo tanto, en los satélites:

$$BSI = \frac{(\rho s_{B5} + \rho s_{B3}) - (\rho s_{B4} + \rho s_{B1})}{(\rho s_{B5} + \rho s_{B3}) + (\rho s_{B4} + \rho s_{B1})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots LandSat\ 5,7$$

$$BSI = \frac{(\rho s_{B6} + \rho s_{B4}) - (\rho s_{B5} + \rho s_{B2})}{(\rho s_{B6} + \rho s_{4}) + (\rho s_{B5} + \rho s_{B2})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots LandSat\ 8$$

$$BSI = \frac{(\rho s_{B11} + \rho s_{B4}) - (\rho s_{B8A} + \rho s_{B2})}{(\rho s_{B11} + \rho s_{B4}) + (\rho s_{B8A} + \rho s_{B2})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots SENTINEL - 2$$

$$BSI = \frac{(\rho s_{B6} + \rho s_{B1}) - (\rho s_{B2} + \rho s_{B3})}{(\rho s_{B6} + \rho s_{B1}) + (\rho s_{B2} + \rho s_{B3})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots MODIS\ 09$$

6.2.12. Índice de Diferencia Normalizada Agua - NDWI

El NDIW es una variación del NDVI. Si en la ecuación invertimos el orden del NIR y cambiamos la banda roja por la verde, el resultado será contrario al NDVI, la vegetación será suprimida y los cuerpos de agua se realzarán (McFeeters, 1996).

$$NDWI = \frac{(\rho s_{GRE} - \rho s_{NIR})}{(\rho s_{GRE} + \rho s_{NIR})}$$

Donde:

ρs_{NIR} : Reflectancia de la banda infrarrojo cercano – NIR.

ρs_{GRE} : Reflectancia de la banda verde – GRE

Por lo tanto, en los satélites:

$$NDWI = \frac{(\rho s_{B2} - \rho s_{B4})}{(\rho s_{B2} + \rho s_{B4})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots LandSat\ 5,7$$

$$NDWI = \frac{(\rho s_{B3} - \rho s_{B5})}{(\rho s_{B3} + \rho s_{B5})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots LandSat\ 8$$

$$NDWI = \frac{(\rho s_{B1} - \rho s_{B3N})}{(\rho s_{B1} + \rho s_{B3N})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots ASTER\ L1T$$

$$NDWI = \frac{(\rho s_{B3} - \rho s_{B8})}{(\rho s_{B3} + \rho s_{B8})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots SENTINEL - 2$$

$$NDWI = \frac{(\rho s_{B4} - \rho s_{B2})}{(\rho s_{B4} + \rho s_{B2})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots MODIS\ 09$$

En 1988, Clevers modificó el índice, para medir la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo (Muñoz Aguayo, 2015), la expresión es:

$$NDWI = \frac{(\rho s_{NIR} - \rho s_{SWIR})}{(\rho s_{NIR} + \rho s_{SWIR})}$$

Donde:

ρs_{NIR} : Reflectancia de la banda infrarrojo cercano – NIR.

ρs_{SWIR} *:* Reflectancia de la banda infrarrojo medio – SWIR.

Por lo tanto, en los satélites:

$$NDWI = \frac{(\rho s_{B4} - \rho s_{B5})}{(\rho s_{B4} + \rho s_{B5})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots LandSat\ 5,7$$

$$NDWI = \frac{(\rho s_{B5} - \rho s_{B6})}{(\rho s_{B5} + \rho s_{B6})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots LandSat\ 8$$

$$NDWI = \frac{(\rho s_{B3N} - \rho s_{B4})}{(\rho s_{B3N} + \rho s_{B4})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots ASTER\ L1T$$

$$NDWI = \frac{(\rho s_{B8} - \rho s_{B11})}{(\rho s_{B8} + \rho s_{B11})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots SENTINEL - 2$$

$$NDWI = \frac{(\rho s_{B2} - \rho s_{B6})}{(\rho s_{B2} + \rho s_{B6})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots MODIS\ 09$$

6.2.13. Modificación del índice de Diferencia Normalizada Agua – MNDWI

Este índice surgió como respuesta a la incapacidad del índice de diferencia de agua normalizado (NDWI) para separar territorios cubiertos del agua. Por este motivo en 2006, Xu propuso modificar el NDWI reemplazando la banda del Infrarrojo Cercano (NIR) por la banda del Infrarrojo Medio (SWIR). Los valores de este índice varían entre -1 y 1, donde los valores superiores a cero corresponden a cuerpos de agua. (Ariza, Garcia J., Rojas B., & Ramírez D., 2014).

$$MNDWI = \frac{(\rho s_{GRE} - \rho s_{SWIR})}{(\rho s_{GRE} + \rho s_{SWIR})}$$

Donde:

ρs_{NIR} : Reflectancia de la banda infrarrojo cercano – NIR.

ρs_{GRE} : Reflectancia de la banda verde – GRE

Por lo tanto, en los satélites:

$$NDWI = \frac{(\rho s_{B2} - \rho s_{B5})}{(\rho s_{B2} + \rho s_{B5})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots LandSat\ 5,7$$

$$NDWI = \frac{(\rho s_{B3} - \rho s_{B6})}{(\rho s_{B3} + \rho s_{B6})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots LandSat\ 8$$

$$NDWI = \frac{(\rho s_{B1} - \rho s_{B4})}{(\rho s_{B1} + \rho s_{B4})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots ASTER\ L1T$$

$$NDWI = \frac{(\rho s_{B3} - \rho s_{B11})}{(\rho s_{B3} + \rho s_{B11})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots SENTINEL - 2$$

$$NDWI = \frac{(\rho s_{B4} - \rho s_{B6})}{(\rho s_{B4} + \rho s_{B6})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots MODIS\ 09$$

6.2.14. Índice del Agua ICEDEX

El índice ICEDEX es utilizado por el Instituto Ambiental Español (CEDEX) para mapear aguas continentales y es uno de los que presenta valores más estables, siendo uno de los menos sensibles a la influencia de vegetación o a la presencia de material en suspensión (sedimentos, algas). Este índice se obtiene a partir de las relaciones entre las bandas del Rojo (R), Infrarrojo Cercano (NIR) e Infrarrojo Medio (SWIR), (Ariza, Garcia J., Rojas B., & Ramírez D., 2014)

$$ICEDEX = \frac{\rho s_{NIR}}{\rho s_{RED}} - \frac{\rho s_{NIR}}{\rho s_{SWIR}}$$

Donde:

ρs_{NIR} : Reflectancia de la banda infrarrojo cercano – NIR.

ρs_{RED} : Reflectancia de la banda roja – RED.

ρs_{SWIR1} : Reflectancia de la banda infrarrojo de onda corta – SWIR.

Por lo tanto, en los satélites:

$$ICEDEX = \frac{\rho s_{B4}}{\rho s_{B3}} - \frac{\rho s_{B4}}{\rho s_{B5}} \ldots\ldots\ldots\ldots LandSat\ 5,7$$

$$ICEDEX = \frac{\rho s_{B5}}{\rho s_{B4}} - \frac{\rho s_{B5}}{\rho s_{B6}} \ldots\ldots\ldots\ldots LandSat\ 8$$

$$ICEDEX = \frac{\rho s_{B3}}{\rho s_{B2}} - \frac{\rho s_{B3}}{\rho s_{B4}} \ldots\ldots\ldots\ldots ASTER\ L1T$$

$$ICEDEX = \frac{\rho s_{B8A}}{\rho s_{B4}} - \frac{\rho s_{B8A}}{\rho s_{B11}} \ldots\ldots\ldots\ldots SENTINEL\ 2$$

$$ICEDEX = \frac{\rho s_{B2}}{\rho s_{B1}} - \frac{\rho s_{B2}}{\rho s_{B6}} \ldots\ldots\ldots\ldots MODIS\ 09$$

6.2.15. Índice de estrés Hídrico - MSI

De todos los índices de uso común no miden el verdor, el más conocido es el denominado MSI – Moisture Stress Index o Índice de Estrés Hídrico (ROCK *et al*. 1985), que combina las reflectividades captadas en el infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo medio (SWIR). En las La banda NIR responde a la biomasa presente; y la banda SWIR es fuertemente afectada por el contenido de agua en la planta.

El Índice de Estrés hídrico se calcula mediante la siguiente expresión:

$$MSI = \frac{\rho s_{SWIR}}{\rho s_{NIR}}$$

Donde:

ρs_{SWIR} : Reflectancia de la banda infrarrojo medio – SWIR.

ρs_{NIR} : Reflectancia de la banda infrarrojo cercano – NIR.

Por lo tanto, en los satélites:

$$MSI = \frac{\rho s_{B5}}{\rho s_{B4}} \ldots\ldots\ldots . LandSat\ 5,7$$

$$MSI = \frac{\rho s_{B6}}{\rho s_{B5}} \ldots\ldots\ldots . LandSat\ 8$$

$$MSI = \frac{\rho s_{B4}}{\rho s_{B3}} \ldots\ldots\ldots . ASTER\ L1T$$

$$MSI = \frac{\rho s_{B11}}{\rho s_{B8A}} \ldots\ldots\ldots . SENTINEL2$$

$$MSI = \frac{\rho s_{B6}}{\rho s_{B2}} \ldots\ldots\ldots . MODIS\ 09$$

El MSI puede ser una alternativa para conocer el estado de estrés hídrico de un cultivo o una cobertura vegetal, y está relacionado con la temperatura de la planta y la humedad aprovechable del suelo (PALACIOS et al., 2012).

6.2.16. Índice Normalizado de Diferencia de Nieve - NDSI

Es un indicador numérico que pone de relieve la cubierta de nieve en las zonas terrestres. La onda verde y corta las bandas espectrales infrarrojos se utilizan mapa la extensión de la capa de nieve. La nieve y las nubes reflejan la mayor parte de la radiación incidente en la banda visible. Sin embargo, la nieve absorbe la mayor parte de la radiación incidente en el infrarrojo de onda corta, mientras que las nubes no lo hacen. Esto permite que el NDSI para distinguir la nieve de las nubes.

NDSI se utiliza comúnmente en la capa de nieve / hielo aplicaciones de mapas y también se puede utilizar, subsidiaria, en la vigilancia de glaciares.

$$NDSI = \frac{(\rho s_{GRE} - \rho s_{SWIR1})}{(\rho s_{GRE} + \rho s_{SWIR1})}$$

Donde:

ρs_{GRE} : Reflectancia de la banda verde – GRE

ρs_{SWIR1} : Reflectancia de la banda infrarrojo de onda corta 1 – SWIR1.

Por lo tanto, en los satélites:

$$NDSI = \frac{(\rho s_{B2} - \rho s_{B5})}{(\rho s_{B2} + \rho s_{B5})} \ldots\ldots\ldots\ldots . . LandSat\ 5,7$$

$$NDSI = \frac{(\rho s_{B3} - \rho s_{B6})}{(\rho s_{B3} + \rho s_{B6})} \ldots\ldots\ldots\ldots . . LandSat\ 8$$

$$NDSI = \frac{(\rho s_{B1} - \rho s_{B4})}{(\rho s_{B1} + \rho s_{B4})} \ldots\ldots\ldots\ldots . . ASTER\ L1T$$

$$NDSI = \frac{(\rho s_{B3} - \rho s_{B11})}{(\rho s_{B3} + \rho s_{B11})} \ldots\ldots\ldots\ldots SENTINEL - 2$$

$$NDSI = \frac{(\rho s_{B4} - \rho s_{B6})}{(\rho s_{B4} + \rho s_{B6})} \ldots\ldots\ldots\ldots MODIS\ 09$$

6.2.17. Índice de Diferencia Normalizada de humedad - NDMI

Es un indicador numérico, que se utiliza en combinación con otros índices de vegetación (NDVI y / o AVI), que se asocia con la humedad de la vegetación. NDIM utiliza las ondas de infrarrojos y corta las bandas espectrales del infrarrojo cercano para capturar las variaciones de la humedad en las zonas con vegetación.

Vigilancia de la sequía y cambios sutiles en las condiciones de humedad de la vegetación son aplicaciones de teledetección, donde NDWI es aplicable. NDIM también se puede utilizar para determinar las humedades de combustible para las evaluaciones del peligro de incendios forestales.

$$NDMI = \frac{(\rho s_{NIR} - \rho s_{SWIR1})}{(\rho s_{NIR} + \rho s_{SWIR1})}$$

Donde:

ρs_{NIR} : Reflectancia de la banda infrarrojo cercano – NIR.

ρs_{SWIR1} : Reflectancia de la banda infrarrojo de onda corta 1 – SWIR1.

Por lo tanto, en los satélites:

$$NDMI = \frac{(\rho s_{B4} - \rho s_{B5})}{(\rho s_{B4} + \rho s_{B5})} \ldots\ldots\ldots\ldots LandSat\ 5,7$$

$$NDMI = \frac{(\rho s_{B5} - \rho s_{B6})}{(\rho s_{B5} + \rho s_{B6})} \ldots\ldots\ldots\ldots LandSat\ 8$$

$$NDMI = \frac{(\rho s_{B3N} - \rho s_{B4})}{(\rho s_{B3N} + \rho s_{B4})} \ldots\ldots\ldots\ldots ASTER\ L1T$$

$$NDMI = \frac{(\rho s_{B8A} - \rho s_{B11})}{(\rho s_{B8A} + \rho s_{B11})} \ldots\ldots\ldots\ldots SENTINEL - 2$$

$$NDMI = \frac{(\rho s_{B2} - \rho s_{B6})}{(\rho s_{B2} + \rho s_{B6})} \ldots\ldots\ldots\ldots MODIS\ 09$$

6.2.18. Índice Normalizado de Áreas Quemadas - NBRI

Los incendios forestales son un hecho por el hombre grave o fenómenos naturales que destruyen los recursos naturales, la acción viva, desequilibra el medio ambiente local, liberan gran cantidad de Gases de Efecto Invernadero etc. La comunidad científica ha introducido la Relación de Quemados Índice Normalizado (NBRI) para estimar la gravedad de los incendios, principalmente en las zonas boscosas. NBRI se aprovecha de las ondas de infrarrojos y corta las bandas espectrales del infrarrojo cercano, que son sensibles a los cambios de vegetación, para detectar áreas quemadas y supervisar la recuperación del ecosistema.

$$NBRI = \frac{(\rho s_{NIR} - \rho s_{SWIR2})}{(\rho s_{NIR} + \rho s_{SWIR2})}$$

Donde:

ρs_{NIR} : Reflectancia de la banda infrarrojo cercano – NIR.

ρs_{SWIR2} : Reflectancia de la banda infrarrojo de onda corta 2 – SWIR2.

Por lo tanto, en los satélites:

$$NBRI = \frac{(\rho s_{B4} - \rho s_{B7})}{(\rho s_{B4} + \rho s_{B7})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots LandSat\ 5,7$$

$$NBRI = \frac{(\rho s_{B5} - \rho s_{B7})}{(\rho s_{B5} + \rho s_{B7})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots LandSat\ 8$$

$$NBRI = \frac{(\rho s_{B3N} - \rho s_{B7})}{(\rho s_{B3N} + \rho s_{B7})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots ASTER\ L1T$$

$$NBRI = \frac{(\rho s_{B8A} - \rho s_{B12})}{(\rho s_{B8A} + \rho s_{B12})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots SENTINEL - 2$$

$$NBRI = \frac{(\rho s_{B2} - \rho s_{B7})}{(\rho s_{B2} + \rho s_{B7})} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots MODIS\ 09$$

VII. COMPOSICION DE BANDAS LANDSAT, SENTINEL-2, ASTER Y MODIS

Una composición de bandas es una imagen compuesta por la combinación de tres bandas diferentes del sensor y dispuestas cada una en los tres canales de proyección en pantalla: **Rojo (R), Verde (G) y Azul (B).** La escena en RGB resulta en una imagen a color.

Cuadro 37. Principales combinaciones de las bandas de los satélites.

Combinación RGB					Aplicación principal/Descripción
SENTINEL 2	MODIS 09 - 43	ASTER	LandSat 4, 5 y 7	LandSat 8	
4,3,2	1,4,3		3,2,1	4,3,2	Color Natural/ Es una composición que se aproxima al color real de las coberturas ante la vista humana.
8A,4,3	2,1,4	3,2,1	4,3,2	5,4,3	Infrarrojo Color/ Esta combinación da como resultado una imagen muy similar a la tradicional fotografía aérea infrarrojo color. Es útil para estudios de vegetación, patrones de suelos, crecimiento de cultivos y monitoreo de drenajes. La vegetación saludable tiende a una apariencia rojo brillante.
8A,11,4	2,6,1	3,4,2	4,5,3	5,6,4	Combinación útil para diferenciar tierra / agua y para destacar áreas de bosque.
11,8A,4	6,2,1	4,3,2	5,4,3	6,5,4	Análisis de vegetación.
12,8A,3	7,2,4	7,3,1	7,4,2	7,5,3	Natural con remoción atmosférica.
12,8A,4	7,2,1	7,3,2	7,4,3	7,5,4	Combinación de infrarrojos.
12,11,4	7,6,1	7,4,2	7,5,3	7,6,4	Permite destacar formaciones rocosas. También útil para para distinguir áreas urbanas.
12,11,8A	7,6,2	7,4,3	7,5,4	7,6,5	Penetración Atmosférica/ Debido a que no incorpora bandas del espectro visible esta combinación reduce las influencias atmosféricas en la imagen. Es útil para estudios geológicos, así como para análisis de humedad en suelos.
12,4,2	7,1,3		7,3,1	7,4,2	Geología/ Permite destacar elementos geológicos.
11,8A,2	6,2,3		5,4,1	6,5,2	Agricultura.
8A,11,2	2,6,3		4,5,1	5,6,2	Combinación útil para distinguir vegetación saludable.
2,11,12	3,6,7		1,5,7	2,6,7	Nieve y Nube.

Fuente: https://lv.eosda.com/

7.1. Descripción de las bandas espectrales

Banda Azul (0.45 – 0.52µm): Diseñada para penetración en cuerpos de agua, es útil para el mapeo de costas, para diferenciar entre suelo y vegetación y para clasificar distintos cubrimientos boscosos, por ejemplo conífero y latifoliadas. También es útil para diferenciar los diferentes tipos de rocas presentes en la superficie terrestre.

Banda Verde (0.52 – 0.60 µm): Especialmente diseñada para evaluar el vigor de la vegetación sana, midiendo su pico de reflectancia (o radiancia) verde. También es útil para diferenciar tipos de rocas y, al igual que la banda 1, para detectar la presencia o no de limonita.

Banda Roja (0.63 – 0.69 µm): Es una banda de absorción de clorofila, muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal. También sirve en la diferenciación de las distintas rocas y para detectar limonita.

Banda IR cercano (0.76 – 0.90 µm): Es útil para determinar el contenido de biomasa, para la delimitación de cuerpos de agua y para la clasificación de las rocas.

Banda IR medio (1.55 – 1.75 µm): Indicativa del contenido de humedad de la vegetación y del suelo. También sirve para discriminar entre nieve y nubes.

Banda Térmica (10.4 – 12.5 µm): El infrarrojo termal es útil en el análisis del stress de la vegetación, en la determinación de la humedad del suelo y en el mapeo de temperatura.

LANDSAT 8

LANDSAT 8
Banda (432)

LANDSAT 8
Banda (543)

LANDSAT 8
Banda (564)

LANDSAT 8
Banda (654)

LANDSAT 8
Banda (753)

LANDSAT 8
Banda (743)

LANDSAT 8

LANDSAT 8
Banda (764)

LANDSAT 8
Banda (765)

LANDSAT 8
Banda (742)

LANDSAT 8
Banda (652)

LANDSAT 8
Banda (562)

LANDSAT 8
Banda (267)

LANDSAT 5 Y 7

LANDSAT 5, 7
Banda (321)

LANDSAT 5, 7
Banda (432)

LANDSAT 5, 7
Banda (453)

LANDSAT 5, 7
Banda (543)

LANDSAT 5, 7
Banda (742)

LANDSAT 5, 7
Banda (743)

LANDSAT 5 Y 7

LANDSAT 5, 7
Banda (753)

LANDSAT 5, 7
Banda (754)

LANDSAT 5, 7
Banda (731)

LANDSAT 5, 7
Banda (541)

LANDSAT 5, 7
Banda (451)

LANDSAT 5, 7
Banda (157)

SENTINEL 2

SENTINEL-2
Banda (432)

SENTINEL-2
Banda (8A43)

SENTINEL-2
Banda (8A,11,4)

SENTINEL-2
Banda (11,8A,4)

SENTINEL-2
Banda (12,8A,3)

SENTINEL-2
Banda (12,8A,4)

SENTINEL 2

SENTINEL-2
Banda (12,11,4)

SENTINEL-2
Banda (12,11,8A)

SENTINEL-2
Banda (12,4,2)

SENTINEL-2
Banda (11,8A,2)

SENTINEL-2
Banda (8A,11,2)

SENTINEL-2
Banda (2,11,12)

MODIS 09

MOD09AG
Banda (1,4,3)

MOD09AG
Banda (2,1,4)

MOD09AG
Banda (2,6,1)

MOD09AG
Banda (6,2,1)

MOD09AG
Banda (7,2,4)

MOD09AG
Banda (7,2,1)

MODIS 09

MOD09AG
Banda (7,6,1)

MOD09AG
Banda (7,6,2)

MOD09AG
Banda (7,1,3)

MOD09AG
Banda (6,2,3)

MOD09AG
Banda (2,6,3)

MOD09AG
Banda (3,6,7)

ASTER L1T

ASTER L1T
Banda (321)

ASTER L1T
Banda (342)

ASTER L1T
Banda (432)

ASTER L1T
Banda (731)

ASTER L1T
Banda (732)

ASTER L1T
Banda (742)

ASTER L1T

VIII. Modelo Digital De Terreno - MDT

Uno de los elementos básicos de cualquier representación digital de la superficie terrestre son los Modelos Digitales de Terreno (**MDT**). Constituyen la base para un gran número de aplicaciones en ciencias de la Tierra, ambientales e ingenierías de diverso tipo.

Se denomina MDT al conjunto de capas (generalmente ráster) que representan distintas características de la superficie terrestre derivadas de una capa de elevaciones a la que se denomina Modelo Digital de Elevaciones (**MDE**), entre otros que almacenan (Pendiente, Relieve, Orientación, Mapa de sombra, etc.).

El **MDE** se le conoce como terreno desnudo o sin vegetación, mientras que el Modelo Digital de Superficie (**MDS**) se define el terreno y las cosas sobre él, incluido los edificios, la cubierta forestal, puentes, entre otros.

Figura 24.Diferencia del MDS y MDT.

8.1. Tipos de Modelo Digital de Elevación - MDE

Es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno, siendo una distribución continua.

Figura 25.Modelo digital de elevación y su representación.

8.1.1. GMTED2010 - Datos Globales de Elevación del Terreno de Resolución Múltiple 2010 – 250m – 500m – 1000m

El US Geological Survey (USGS) y la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) han colaborado en el desarrollo de un modelo de elevación global notablemente mejorado denominado Global Multi-Resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010) que reemplaza a GTOPO30 como el conjunto de datos de elevación de Opción para aplicaciones a escala global y continental.

GMTED2010 proporciona un nuevo nivel de detalle en los datos topográficos globales. El paquete de productos GMTED2010 contiene siete nuevos productos de elevación ráster para cada una de las resoluciones espaciales de 30, 15 y 7.5 segundos de arco.

Los nuevos productos de elevación se han producido utilizando los siguientes métodos de agregación: elevación mínima, elevación máxima, elevación media, elevación media, desviación estándar de la elevación, submuestra sistemática y énfasis en la línea de ruptura. También se han producido metadatos para identificar la fuente y los atributos de todos los datos de elevación de entrada utilizados para derivar los productos de salida.

Este nuevo conjunto de productos proporciona cobertura global de todas las áreas terrestres desde latitud 84 ° N a 56 ° S para la mayoría de los productos.

GMTED2010 se puede resumir en términos de la resolución y el Error cuadrático medio (RMSE) de los productos con respecto a un conjunto global de puntos de control (precisión global estimada de 6 m RMSE) proporcionado por NGA. A 30 segundos de arco, el rango GMTED2010 RMSE está entre 25 y 42 metros; a 15 segundos de arco, el rango RMSE está entre 29 y 32 metros; y con 7,5 segundos de arco, el rango RMSE está entre 26 y 30 metros.

Página de descarga GMTED2010

https://earthexplorer.usgs.gov/

https://topotools.cr.usgs.gov/gmted_viewer/viewer.htm

Figura 26. Página Topotools de descarga GMTED2010 MDE 250m

8.1.2. Misión de la topografía del radar espacial (SRTM)

Los conjuntos de datos SRTM de la NASA se lanzó el 11 de febrero del 2000 es el resultado de un esfuerzo de colaboración entre la NASA y la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA), así como la participación de la Agencia Nacional de Imágenes y Cartografía (NIMA) las agencias espaciales alemanas e italianas, para generar un modelo de elevación digital (MDE) casi global de la Tierra mediante interferometría de radar. Su fin es obtener un modelo digital de elevación de la zona del globo terráqueo entre 56° S a 60° N, de modo que genere una completa base de mapas topográficos digitales de alta resolución de la Tierra.

A finales del 2014, la mayor resolución posible los datos SRTM se dio a conocer al público. este modelo de elevación digital global de 1 arco tiene una resolución espacial de unos 30 metros que cubre la mayor parte del mundo.

SRTM V1 Primera versión al público

Los datos generados por el proyecto en zonas diferentes a los Estados Unidos fueron remuestreados para ser liberados al público a una resolución de 3 Arcos-Segundo, aproximadamente 90 metros (295 pies)

SRTM V2 Segunda versión al público

En septiembre del 2014, la Casa Blanca anuncio que los datos de alta resolución generados por la NASA en la Misión SRTM en el 2000, serían liberados al año siguiente

Los nuevos datos estarían disponibles a una resolución de 1 Arco-Segundo, aproximadamente 30 metros (98 pies), remuestreados para revelar cabalmente las mediciones originales.

SRTM V3 o SRTM+: Tercera versión al público

La NASA ha liberado al público una versión corregida (llenado de vacíos) de los Modelos de Elevación Digital generados por la Misión SRTM, conocida como "SRTM Plus" o SRTM NASA Versión 3. en ausencia de errores (vacíos) SRTM Plus utiliza SRTM Versión 2. En la mayoría de las zonas que presentaron vacíos fueron rellenados utilizando datos de los modelos de elevación ASTER. Adicionalmente en pequeñas áreas se realizó el llenado de vacíos utilizando los modelos de elevación GMTED2010 recopilados por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), SRTM+ está actualmente disponible en ambas resoluciones 90 y 30 metros

SRTM V4 90m: Cuarta versión al público

Están disponibles en formato ArcGIS ASCII y GeoTiff para facilitar su uso en una variedad de aplicaciones de procesamiento de imágenes y SIG. Los datos se pueden descargar mediante un navegador o acceder directamente desde el sitio ftp.

Página de descarga: http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp

Característica NASA SRTMGL1.003

Extensión geográfica: 60° N y 56° S

Dimensión imagen: 3601x3601

Formato: HGT

Datum: WGS84

Resolución espacial: 1 segundo de arco (30 m)

Figura 27. Zona de cobertura del MDE – SRTM.

Acceso de descargar

LP DAAC Global Data Explorer: https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/

USGS EarthExplorer (EE): https://earthexplorer.usgs.gov/

LP DAAC: https://reverb.echo.nasa.gov/ o https://search.earthdata.nasa.gov/

LP DAAC datos directos: https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool

OpenTopography:
http://opentopo.sdsc.edu/raster?opentopoID=OTSRTM.082015.4326.1

SRTM v4: http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/

8.1.3. Modelo Digital de Elevación Global – GDEM ASTER

El Modelo de Elevación Digital Global de Emisiones Térmicas Espaciales y Radiómetro de Reflexión (ASTER) fue desarrollado conjuntamente por la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA) y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI).

ASTER es un sensor a bordo del satélite Terra, lanzado a la órbita terrestre por la NASA en 1999.

Los datos del ASTER son utilizados para crear mapas detallados de la temperatura de la superficie de la tierra, emisividad, reflactancia y elevación (MDE).

El ASTER cubre superficies de tierra entre 83 ° N y 83 ° S y está compuesto por 22,702 ráster. El GDEM ASTER se distribuye como archivos de formato (GeoTIFF) con coordenadas geográficas (latitud, longitud). Los datos se colocan en una cuadrícula de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 m en el ecuador) y se hace referencia al geoide del Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84).

El GDEM 2 de ASTER se beneficia de mejoras sustanciales con respecto al GDEM 1, se advierte a los usuarios que los productos todavía pueden contener anomalías y artefactos que reducirán su usabilidad para ciertas aplicaciones, ya que pueden introducir grandes errores de elevación en escalas locales.

Característica del GDEM ASTER 2

Extensión geográfica: 83° N y 83° S

Dimensión imagen: 3601x3601 pixel

Formato: GEOTIFF

Datum: WGS84

Resolución espacial: 1 segundo de arco (30 m)

Acceso de descargar

LP DAAC Global Data Explorer: https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/

USGS EarthExplorer (EE): http://earthexplorer.usgs.gov/

LP DAAC Reverb: https://reverb.echo.nasa.gov/ o https://search.earthdata.nasa.gov/

8.1.4. TanDEM-X 90m

TanDEM-X (complemento TerraSAR-X para mediciones digitales de elevación) es una misión de radar de observación de la Tierra que consiste en un interferómetro SAR construido por dos satélites casi idénticos que vuelan en formación cerrada. Con una separación típica entre los satélites de 120 a 500 m, se ha generado un Modelo de Elevación Digital global (DEM).

El objetivo principal de la misión TanDEM-X es crear un mapa 3D preciso de las superficies terrestres de la Tierra que sea homogéneo en calidad y sin precedentes en precisión. La adquisición de datos se completó en enero de 2015 y la producción de la DEM global se completó en septiembre de 2016. El error absoluto de altura es de aproximadamente 1 m en un orden de magnitud por debajo del requisito de 10 m.

El DEM TanDEM-X 90m (3 arcsec) es una variante del producto DEM de 12m (0.4 arcsec) en la versión 1.0. de toda la masa terrestre de la tierra de polo a polo.

Cómo registrarse

Vaya a https://sso.eoc.dlr.de/pwm-tdmdem90

Haga clic en "Registro de nuevo usuario" (debajo de la máscara de inicio de sesión) para acceder al formulario de registro

Complete el formulario. Nota: la dirección de correo electrónico es también su nombre de usuario

Haga clic en "Crear" y aparecerá el formulario de verificación.

Se enviará un correo electrónico con un enlace de confirmación a su cuenta de correo electrónico. Haga clic en él y copie el código del correo electrónico en el formulario de registro. Asegúrese de que su programa de correo electrónico no bloqueó el correo electrónico de confirmación.

Se realiza un reenvío a la declaración de protección de datos y las condiciones de la licencia. Después de su aceptación, la cuenta se configura automáticamente.

Se enviará un correo electrónico adicional que contiene los términos de la licencia y la política de privacidad.

Descargar MDE TanDEM-X 90m

Ingrese la URL de la interfaz del mapa en una nueva pestaña del navegador web: https://download.geoservice.dlr.de/TDM90

Figura 28. Página de descarga del MDE TanDEM X 90m

8.1.5. ALOS World 3D - 30m (AW3D30)

La Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) publica el conjunto de datos del modelo de superficie digital (MDS) global con una resolución espacial de pixel de 30 metros de forma gratuita. El conjunto de datos ha sido compilado con imágenes adquiridas por el satélite de observación avanzada de la tierra "DAICHI" (ALOS).

El conjunto de datos se publica en base al conjunto de datos MDS (versión de pixel de 5 metros) de los "Datos Topográficos 3D del Mundo", que es la información de elevación a escala global más precisa en este momento y su precisión de elevación también está en un nivel mundial nivel como una versión de pixel de 30 metros. Este conjunto de datos se espera que sea útil para la investigación científica, la educación, así como el sector privado de servicios que utiliza la información geoespacial.

Registre su información de la siguiente URL para descargar el conjunto de datos. Se requiere su dirección de correo electrónico.

Registrarse: http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/registration.htm

Este es un registro temporal y le enviará un correo electrónico para que acepte su solicitud de registro. Después de la confirmación de su solicitud, la información de descarga se enviará por correo electrónico.

Descargar: http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm

Figura 29. Zona de cobertura del MDE – ALOS World 3D – 30m

8.1.6. ALOS PALSAR MDE 12.5m

ALOS (Satélite avanzado observación de la Tierra), también conocido como DAICHI, es un satélite artificial Japonés dedicado a la observación terrestre. Fue lanzado el 24 de enero de 2006 mediante un cohete H-II desde la base de Tanegashima. ALOS-1 fue una misión de la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa JAXA, hasta el 2011 se obtuvieron información.

Proyecto RTC de ASF

La creación de productos radiométricamente corregidos por el terreno (RTC) es un proyecto de **Alaska Satellite Facility -ASF** que hace que los datos de SAR sean accesibles para una comunidad más amplia de usuarios. El proyecto corrige la geometría y la radiometría del radar de apertura sintética (SAR) y presenta los datos en el formato GeoTIFF compatible con GIS.

La publicación de los nuevos productos ALOS PALSAR RTC comenzó en octubre de 2014 y se completó un año después. Los datos incluidos en el proyecto **RTC** son fino polarización simple (**FBS**) y polarización dual (**FBD**) escenas en todas las áreas terrestres mundiales, excepto en la Antártida, Groenlandia, Islandia y el norte de Eurasia.

Figura 30. Cobertura del área de obtención del MDE ALOS PALSAR.

Producto RTC

Los productos son de una resolución alta (12,5 m) y uno bajo (30 m) para todas las áreas del proyecto.

El paquete de productos de **alta** resolución incluye:

- ✓ Gamma nada de poder, punto flotante
- ✓ UTM GeoTIFF 12.5m
- ✓ Mapa de ángulo de incidencia de GeoTIFF, radianes flotantes de 32 bit
- ✓ DEM INT16 GeoTIFF 12.5m
- ✓ Geo-JPEG browse 1000 x 1000 (color para FBD y PLR)
- ✓ Metadatos compatibles con ISO 19115
- ✓ KMZ con 30m de superposición

Nombre

AP_23894_FBD_F6980_RT1.dem.tif
AP_23894_FBD_F6980_RT1.geo.jpg
AP_23894_FBD_F6980_RT1.geo.jpg.aux.xml
AP_23894_FBD_F6980_RT1.geo.wld
AP_23894_FBD_F6980_RT1.inc_map.tif
AP_23894_FBD_F6980_RT1.iso.xml
AP_23894_FBD_F6980_RT1.kmz
AP_23894_FBD_F6980_RT1.ls_map.tif
AP_23894_FBD_F6980_RT1_HH.tif
AP_23894_FBD_F6980_RT1_HV.tif

Figura 31. Modelo Digital de Elevación ALOS PALSAR de 12.5m

8.1.7. Terrain MDE – 5m

La resolución espacial del MDE de descarga quedará determinada por el nivel de escala manejada en la vista. Dispondremos de 14 niveles de resolución espacial. Más proximidad al territorio nos permitirá disponer de fragmentos de mayor resolución, aunque menor superficie. Las resoluciones transcurren entre los 10 kilómetros y algo menos de 5 metros a partir de fragmentos de mosaicos de 512×512 y en sistema WGS84 Pseudo Mercator.

Página de descarga: https://eos.com/landviewer

Figura 32. MDE Terrain de todo el mundo 5m.

8.1.8. Carta Nacional Perú – Instituto Geográfico Nacional (IGN)

El IGN, ente rector de la cartografía nacional, planea, dirige, ejecuta y controla las actividades relacionadas con la geomántica, manteniendo actualizada la base de datos geoespaciales; en concordancia con la infraestructura de datos espaciales del Perú; a fin de mantener permanentemente actualizada la cartografía básica oficial del país; poniéndola a disposición de las entidades públicas y privadas que la requieran para los fines del desarrollo y la defensa nacional.

Son 501 cartas nacionales topográficas del Perú en escala 1:100 000 en formato shapefile que puedes descargar completamente gratis. Aplicativo Web que permite la descarga de cartografía base. Archivos en formato shape (*.shp). Los archivos están comprimidos en *.zip

La información por cada hoja consta de las siguientes coberturas: Hidrografía, Hipsografía.

Las hojas pueden descargarse por N° de Hoja según formato de la carta nacional, o agrupadas por departamento, provincia o distrito para facilitar un grupo de descargas, de la siguiente página se descarga:

http://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/

Figura 33.Página del Geoservidor de la Carta Nacional IGN - Perú

MAPA DE GRILLAS DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL PERÚ

IX. PROGRAMAS

9.1. SNAP

La herramienta SNAP (Plataforma de aplicación de Sentinel), este software es proporcionada por la Agencia Espacial Europea – ESA, para el análisis de imágenes satélite provenientes, principalmente, de su flota de satélites Sentinel, o para el análisis de cualquier imagen aérea basada en bandas multiespectrales de trabajo.

Los paquetes Toolboxes como Sen2Cor, Sen2Three, Sen2Res es para el proceso en Sentinel-2.

Figura 34. Versión 7 del software SNAP.

9.2. TerraAmazon

Es una herramienta computacional diseñada para el monitoreo de bosques tropicales.

Proporciona funciones tales como:

- Herramientas de procesamiento de imágenes
- Herramientas de procesamiento de vectores
- Acceso a bases de datos distribuidas.
- Difusión de datos basados en servicios web.
- Acceso a series de tiempo.
- Gestión de proyectos
- Control de producción multiusuario.

TerraAmazon está construido sobre la base de Terralib, es un código abierto y multiplataforma.

Biblioteca que soporta el desarrollo de aplicaciones GIS personalizadas

Figura 35.Versión 7.1 de TerraAmazon

9.3. GRASS GIS

GRASS (Sistema de Soporte de Análisis de Recursos Geográficos), es un paquete de software de Sistema de Información Geográfica (GIS) gratuito y de código abierto utilizado para la gestión y el análisis de datos geoespaciales, el procesamiento de imágenes, la producción de gráficos y mapas, el modelado espacial y visualización. GRASS GIS se utiliza actualmente en entornos académicos y comerciales en todo el mundo, así como por muchas agencias gubernamentales y empresas de consultoría ambiental. Es un miembro fundador de la Open Source Geospatial Foundation (OSGeo).

Figura 36.Iconos del software GRASS GIS

9.4. SAGA GIS

SAGA en abreviado significa Sistema para análisis geocientíficos automatizados, es un software de Sistemas de Información Geográfica y de código abierto, diseñado para una implementación fácil y efectiva de algoritmos espaciales. Ofrece un conjunto completo y creciente de métodos geocientíficos.

SAGA Proporciona una interfaz de usuario fácilmente accesible con muchas opciones de visualización.

Figura 37.Visualización de la presentación de SAGA GIS

9.5. QGIS

QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto licenciado bajo GNU - General Public License . QGIS es un proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Corre sobre Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android y soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos ráster y bases de datos.

QGIS proporciona una creciente gama de capacidades a través de sus funciones básicas y complementos. Puede visualizar, gestionar, editar y analizar datos y diseñar mapas imprimibles.

Figura 38.Versión 3.12 del software QGIS

9.6. Plugin SCP

El Complemento de Clasificación Semiautomática (SCP) es un complemento gratuito de código abierto para QGIS que permite la clasificación semiautomática (también clasificación supervisada y no supervisada) de imágenes de sensores remotos. Además, proporciona varias herramientas para la descarga de imágenes gratuitas (Landsat, Sentinel-2, Sentinel-3, ASTER L1T, MODIS 09), el preprocesamiento de imágenes, el posprocesamiento de clasificaciones y el cálculo de ráster.

Versión Plugin SCP 6. para QGIS

X. BIBLIOGRAFIA

- ABRAMS, M., HOOK, S., and RAMACHANDRAN, B., 1999, Aster user handbook, Version 2, NASA/Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, at https://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_user_guide_v2.pdf
- ALEXANDER ARIZA, 2013. Descripción y corrección de productos LandSat 8 LDCM (http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf).
- ANDRÉS LEÓN, 2015. Descripción, descarga y manipulación de productos Sentinel-2 (https://es.slideshare.net/AlejandroLeon31/guia-sentinel2-espaol).
- calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote
- CHANDER, G. & MARKHAM, B. 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 41, 2674 - 2677
- CHANDER, G., MARKHAM, B. L., y HELDER, D. L. (2009). Summary of current radiometric
- CHUVIECO E, 1996. Teledetección ambiental, la observación de la tierra desde el espacio.
- CHUVIECO SALINERO, E. 2008. Teledetección Ambiental. 2 ed. Barcelona, ES, Ariel. 592 p.
- Congedo Luca (2016). Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. DOI: http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1.
- EASTMAN, R. 2003. IDRISI Kilimanjaro-Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes. Clark Labs. 312 p.
- JARS, 1993. Remote Sensing Note. Japan Association on Remote Sensing. Available at http://www.jars1974.net/pdf/rsnote_e.html
- JIMENEZ-MUNOZ, J. C. & SOBRINO, J. A. 2010. A Single-Channel Algorithm for Land-Surface Temperature Retrieval From ASTER Data IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 7, 176-179.
- MOHR, P. J.; NEWELL, D. B. & TAYLOR, B. N. 2015. CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2014 National Institute of Standards and Technology, Committee on Data for Science and Technology.
- NASA (Ed.) 2011. Landsat 7 Science Data Users Handbook Landsat Project Science Office at NASA's Goddard Space Flight Center in Greenbelt, 186

(https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf)

- RICHARDS, J. A. y JIA, X., 2006. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Berlin, Germany: Springer.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. W., SCHELL, J. A., DEERING, D. H. y HARÍAN, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement andretrogadation (Greenwave effect) of natural vegetation. Greenbelt, MD. USA, NASA/GSFCT.
- Rouse, J; Haas, R; Schell, J; Deering, D; Harlan, J. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. Greenbelt. Maryland, US. NASA/GSFC. 87 p.
- Sensing of Environment, (5), 893–903. doi:10.1016/j.rse.2009.01.007
- SOBRINO, J. A., RAISSOUNI, N., & LI, Z. -L. (2001). A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. Remote Sensing of Environment, 75, 256 – 266.
- KEELEY, JE (2009). Intensidad del fuego, severidad del fuego y gravedad de la quemadura: Una breve revisión y uso sugerido. International Journal of Wildland Fire, 18 (1), 116 - 126.
- CHAO CHEN, QIMING QIN, LI CHEN, HONG ZHENG, WENZHE FA, ABDUWASIT GHULAM, y CHENGYE ZHANG. 2015, "Photometric correction and reflectance calculation for lunar images from the Chang'E-1 CCD stereo camera," J. Opt. Soc. Am. A 32, 2409-2422 (2015).
- Ariza, A., García J., S., Rojas B., S., & Ramírez D., M. 2014. Desarrollo de un modelo de corrección de imágenes de satélite para inundaciones: (CAIN - Corrección Atmosférica e Índices de Inundación). UN-SPIDER, pp. 1-10.
- McFeeters, S. K., 1998. The use of normalized difference wáter index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal Of Remote Sensing, 17, pp. 1425-1432.
- Muñoz Aguayo, P. 2015. Índices de vegetación. Centro de Información de Recursos Naturales CIREN. Santiago: CIREN.
- Xu, H. 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal Of Remote Sensing, 27(14), 3025-3033. doi:doi:10.1080/01431160600589179.