



PROYECTO I+D+I-XVII-2023-048
“ANÁLISIS DE PROBLEMAS TERRITORIALES EN EL ECUADOR UTILIZANDO MACHINE LEARNING Y SENSORES REMOTOS DESDE UNA PERSPECTIVA DE CAMBIO CLIMÁTICO (APTECUCC)”

Entregable V.1.5 Informe sobre sostenibilidad del método de clasificación (M2).

Actividad T.1.7. Análisis de sostenibilidad del método desarrollado a partir del uso de datos satélite libres y disponibles (por ejemplo, Sentinel-2) (M2).

Para el análisis de sostenibilidad se han revisado las perspectivas de funcionamiento de los satélites que proveen la información utilizada hasta la fecha en los procesos de clasificación supervisada para obtener los mapas de cobertura vegetal y uso del suelo de las cuatro zonas de estudio.

Landsat 8-9:

El programa Landsat consiste en una serie de satélites de observación de la Tierra operados por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Su objetivo principal es proporcionar datos continuos y globales sobre la superficie terrestre para diversos fines como la monitorización ambiental, la gestión de recursos naturales, y el seguimiento de cambios en la superficie del planeta a lo largo del tiempo.

Landsat 8 fue lanzado el 11 de febrero de 2013. Cuenta con una resolución espacial de 30 metros en las bandas ópticas. También tiene una resolución temporal que permite capturar imágenes de cualquier lugar en la Tierra cada 16 días.

Respecto a la vida útil de los satélites más recientes, la vida operativa de Landsat 8 se estima en al menos cinco años, aunque es posible que continúe operando más allá de ese período si los sistemas a bordo continúan funcionando correctamente y hay financiamiento para su operación.

Componentes de lanzamiento y nave espacial:

- Construido por Orbital Science Corporation (anteriormente Landsat Data Continuity Mission, o LDCM) fue lanzado en un cohete Atlas-V desde la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg, California
- **Peso:** 2.071 kg (4.566 lbs) completamente cargado con combustible (sin instrumentos)
- **Longitud:** 3 m (9.8 pies) - **Diámetro:** 2,4 m (7.9 pies)
- **Velocidad de datos:** 384 Mbps en frecuencia de banda X; 260,92 Mbps en frecuencia de banda S

“Landsat 8 lleva dos sensores. El sensor Operational Land Imager está construido por Ball Aerospace & Technologies Corporation. El sensor infrarrojo térmico está construido por el Centro de vuelos espaciales Goddard de la NASA”.(USGS, 2014)

Las especificaciones proporcionadas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS (2014) indican que los instrumentos que el satélite lleva son el *Operational Land Imager (OLI)* y el sensor infrarrojo térmico (**TIRS**).

OLI mide en las porciones visible, infrarroja cercana e infrarroja de onda corta (VNIR, NIR y SWIR) del espectro. **TIRS** mide la temperatura de la superficie terrestre en dos bandas térmicas con una nueva tecnología que aplica física cuántica para detectar el calor. Las imágenes del Landsat 8 tienen resoluciones espaciales pancromáticas de 15 metros y multiespectrales de 30 metros a lo largo de una franja de 185 km (115 millas).

Landsat 9 fue lanzado el 27 de septiembre de 2021 y sigue realizando observaciones globales para monitorear, comprender y gestionar los recursos naturales de la Tierra, continuando con el objetivo de las Misiones Landsat.

Componentes de lanzamiento y nave espacial:

- Proveedor de naves espaciales: Northrop Grumman
- Autobús de la nave espacial: Northrop Grumman Innovation Systems (anteriormente Orbital ATK)
- Vehículo de lanzamiento: United Launch Alliance Atlas V 401
- Velocidad de la nave espacial: 16,760 millas/h (26,972 km/h)
- Vida útil del diseño: 5 años
- Consumibles: 10 años

El satélite lleva dos instrumentos científicos, el Operational Land Imager 2 (**OLI-2**) y el Sensor infrarrojo térmico 2 (**TIRS-2**). **OLI-2** captura observaciones de la superficie de la Tierra en bandas visibles, infrarrojas cercanas e infrarrojas de onda corta, y **TIRS-2** mide la radiación infrarroja térmica, o calor, emitido desde la superficie de la

Tierra. Tanto OLI como TIRS tienen una vida útil de diseño de misión de cinco años, aunque la nave espacial tiene más de 10 años de consumibles. (USGS, 2021) ¹

Las mejoras de Landsat 9 incluyen su capacidad para capturar imágenes con una resolución espacial de 30 metros. Una mayor resolución radiométrica para OLI-2, lo que permite a los sensores detectar diferencias más sutiles, especialmente en áreas más oscuras como agua o bosques densos. Con la resolución radiométrica más alta, Landsat 9 es capaz de diferenciar 16.384 tonos de una longitud de onda determinada. Además de la mejora de OLI-2, TIRS-2 ha reducido significativamente la luz parásita en comparación con el sensor infrarrojo térmico Landsat 8 (TIRS), lo que permite una corrección atmosférica mejorada y mediciones de temperatura de superficie más precisas. (USGS, 2021) ²

Operational Land Imager 2 (OLI-2)

El diseño del OLI-2 es una copia del OLI del Landsat 8 y proporciona imágenes consistentes con las cualidades espectrales, espaciales, radiométricas y geométricas del Landsat anterior. OLI-2 proporcionará datos para nueve bandas espectrales con una distancia máxima de muestreo en tierra (GSD), tanto en trayectoria como en trayectoria cruzada, de 30 metros (98 pies) para todas las bandas excepto la banda pancromática, que tiene una GSD de 15 metros (49 pies). OLI-2 proporciona fuentes de calibración internas para garantizar la precisión y estabilidad radiométrica, así como la capacidad de realizar calibraciones solares y lunares. (USGS, 2021) ²

Consta de nueve bandas espectrales que son:

- Banda 1 Aerosol costero visible (0,43 - 0,45 μm) 30 m
- Banda 2 Azul visible (0,450 - 0,51 μm) 30 m
- Banda 3 Verde visible (0,53 - 0,59 μm) 30 m
- Banda 4 Roja (0,64 - 0,67 μm) 30 m
- Banda 5 Infrarrojo cercano (0,85 - 0,88 μm) 30 m
- Banda 6 SWIR 1 (1,57 - 1,65 μm) 30 m
- Banda 7 SWIR 2 (2,11 - 2,29 μm) 30 m
- Banda 8 Pancromática (PAN) (0,50 - 0,68 μm) 15 m
- Banda 9 Cirrus (1,36 - 1,38 μm) 30 m

Sensor infrarrojo térmico 2 (TIRS-2)

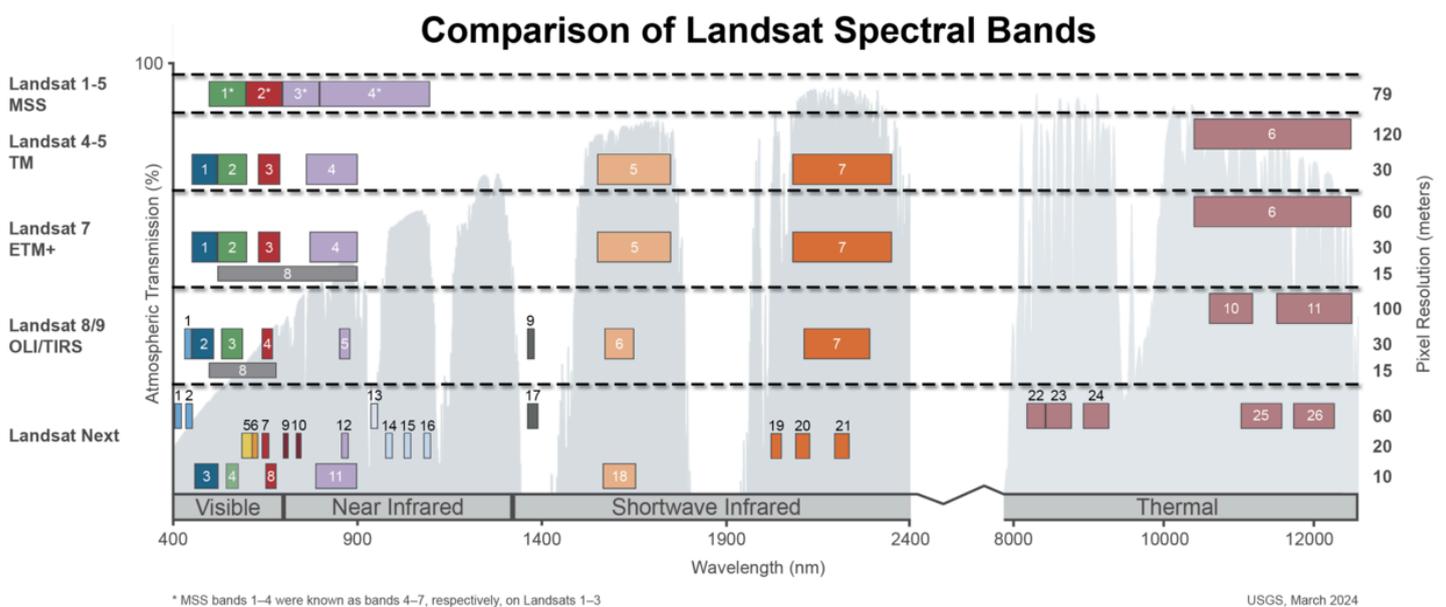
El sensor infrarrojo térmico 2 (TIRS-2) de Landsat 9 mide la radiación térmica emitida desde la superficie terrestre en dos bandas infrarrojas térmicas con la misma

tecnología que se utilizó para el TIRS del Landsat 8; sin embargo, el TIRS-2 es una versión mejorada del TIRS del Landsat 8, tanto en lo que respecta a la clase de riesgo del instrumento como al diseño para minimizar la luz parásita. TIRS-2 proporciona dos bandas espectrales con una distancia máxima de muestreo en tierra, tanto en la trayectoria como en la trayectoria transversal, de 100 m (328 pies) para ambas bandas. TIRS-2 proporciona una fuente interna de calibración de cuerpo negro, así como capacidades de visualización espacial. (USGS, 2021) **2**

Consta con dos bandas adicionales que son:

- Banda 10 TIRS 1 (10,6 - 11,19 μm) 100 m
- Banda 11 TIRS 2 (11,5 - 12,51 μm) 100 m

La siguiente ilustración muestra un gráfico comparativo entre las diferentes bandas espectrales de Landsat



Fuente: USGS - Las longitudes de onda de paso de banda de los sensores Landsat 1-9

<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-9>

Las imágenes del Landsat 8 y Landsat 9 Operational Land Imager (OLI) y del sensor térmico infrarrojo (TIRS) constan de nueve bandas espectrales y dos bandas térmicas. El tamaño aproximado de la escena es 170 km de norte a sur por 183 km de este a oeste (106 millas por 114 millas). (USGS, 2021) **3**

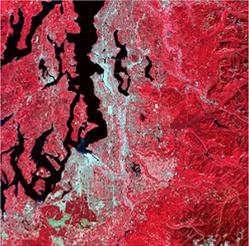
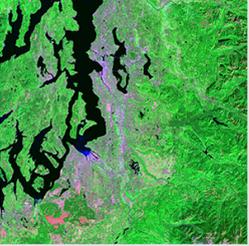
La siguiente tabla muestra la longitud de onda y resolución espacial de las diferentes bandas de Landsat. La figura posterior muestra las combinaciones de bandas más comunes utilizadas en análisis con imágenes de Landsat y la siguiente, un análisis específico de las bandas 8, 9 y Next (que se lanzará a futuro) de Landsat.

Bandas	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
Banda 1 - Aerosol costero	0,43-0,45	30
Banda 2 - Azul	0,45-0,51	30
Banda 3 - Verde	0,53-0,59	30
Banda 4 - Rojo	0,64-0,67	30
Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0,85-0,88	30
Banda 6 - Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	1,57-1,65	30
Banda 7 - Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2	2.11-2.29	30
Banda 8 - Pancromática	0,50-0,68	15
Banda 9 - Cirro	1,36-1,38	30
Banda 10 - Infrarrojo Térmico (TIRS) 1	10.6-11.19	100 (remuestreado a 30)*
Banda 11 - Infrarrojo Térmico (TIRS) 2	11.50-12.51	100 (remuestreado a 30)*

Fuente: USGS - Designaciones de bandas de los satélites Landsat
<https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites>

Common Landsat Band Combinations

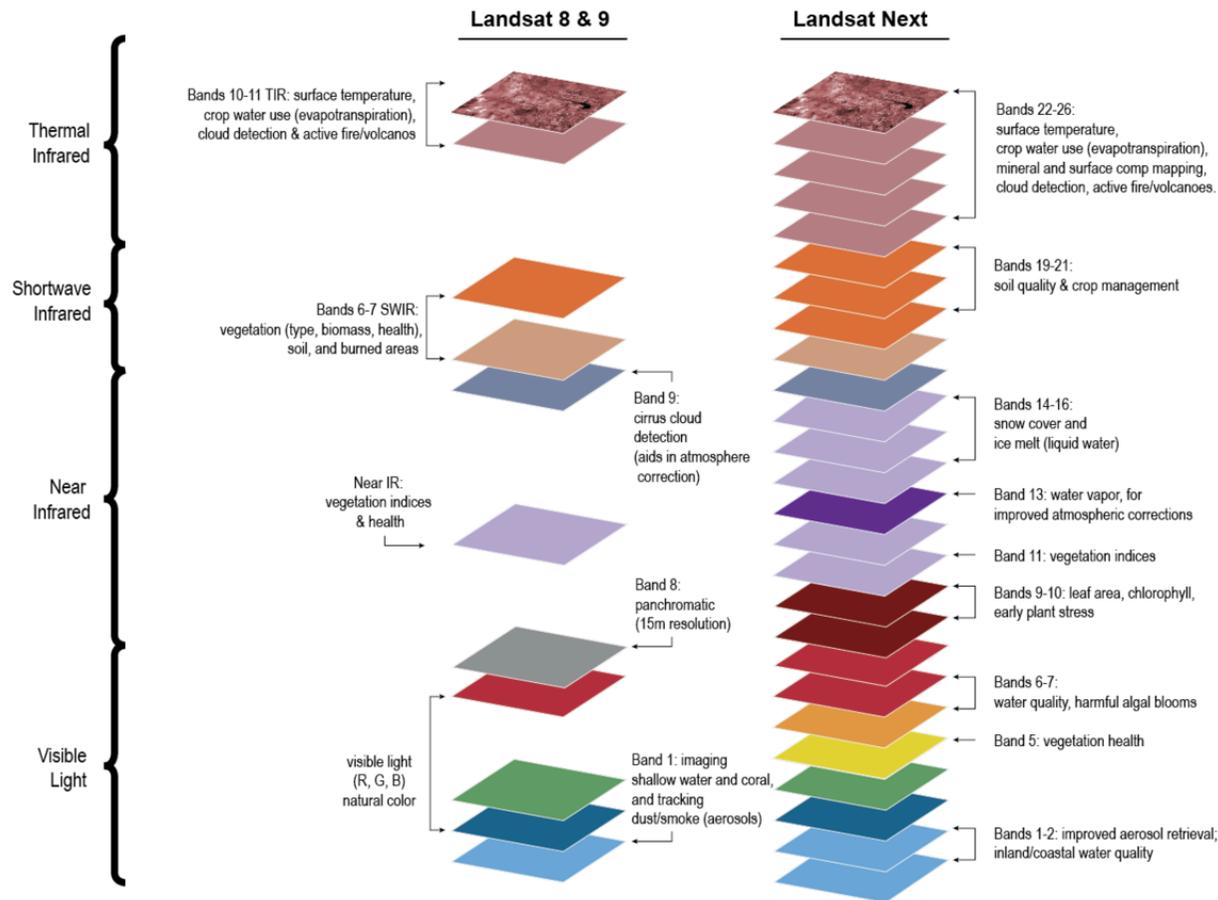
Images: Landsat 8 Path 46 Row 27 acquired August 23, 2020. Band numbers displayed as R,G,B.

Natural Color	Color Infrared (CIR)	False Color (Urban)
		
Landsat 8/9 OLI 4,3,2 Landsat 7 ETM+ 3,2,1 Landsat 4-5 TM 3,2,1 Landsat 4-5 MSS N/A Landsat 1-3 MSS N/A	Landsat 8/9 OLI 5,4,3 Landsat 7 ETM+ 4,3,2 Landsat 4-5 TM 4,3,2 Landsat 4-5 MSS 3,2,1 Landsat 1-3 MSS 6,5,4	Landsat 8/9 OLI 7,6,4 Landsat 7 ETM+ 7,5,3 Landsat 4-5 TM 7,5,3 Landsat 4-5 MSS N/A Landsat 1-3 MSS N/A
False Color (Vegetative Analysis)	Shortwave Infrared	
		
Landsat 8/9 OLI 6,5,4 Landsat 7 ETM+ 5,4,3 Landsat 4-5 TM 5,4,3 Landsat 4-5 MSS 4,3,2 Landsat 1-3 MSS 7,6,5	Landsat 8/9 OLI 7,5,4 Landsat 7 ETM+ 7,4,3 Landsat 4-5 TM 7,4,3 Landsat 4-5 MSS N/A Landsat 1-3 MSS N/A	

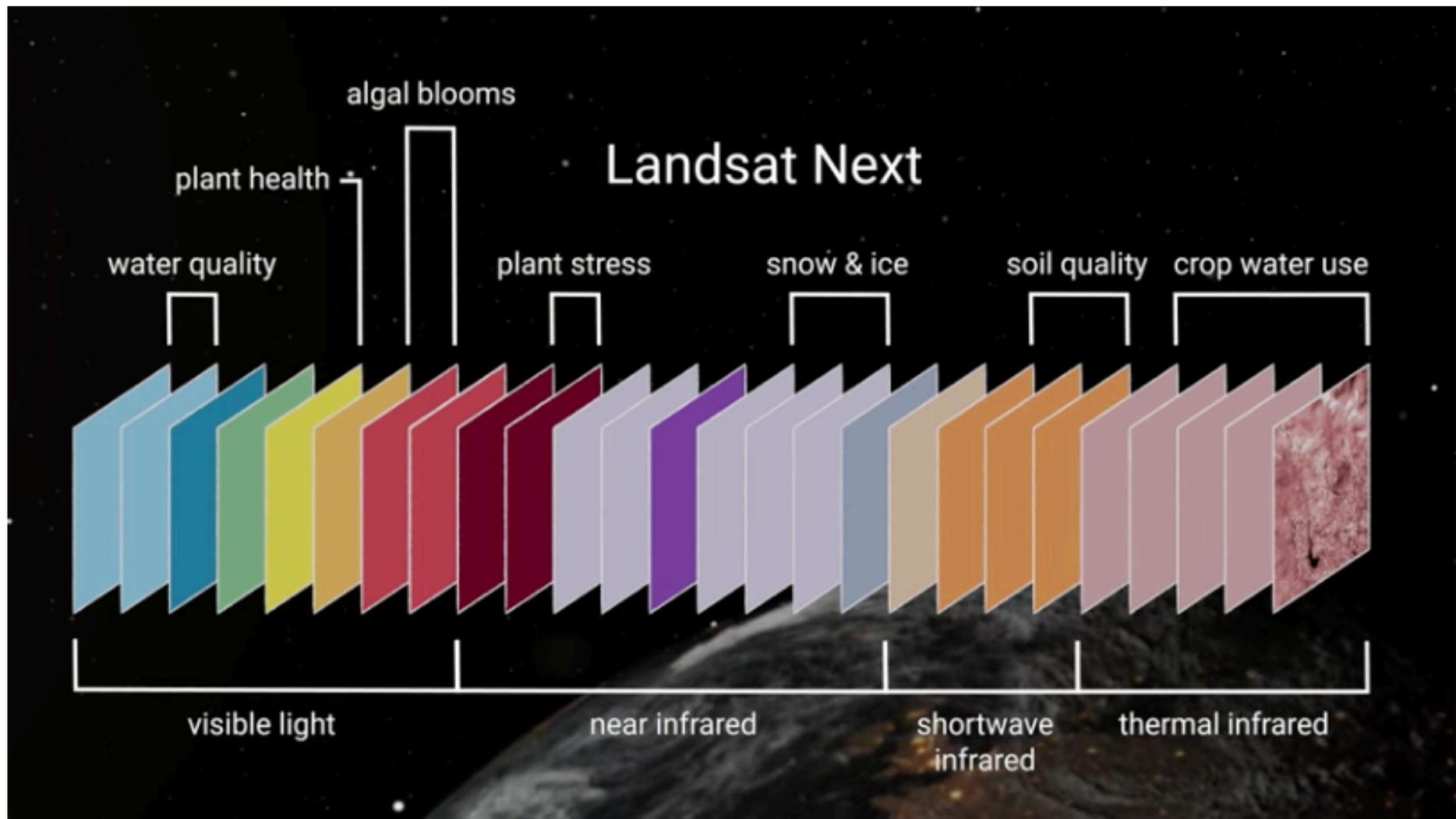
Fuente: USGS - Common Landsat Band Combinations
<https://www.usgs.gov/media/images/common-landsat-band-combinations>

Spectral Comparison: Landsat 8/9, and Landsat Next

Increased spectral coverage with Landsat Next will enable new applications



Fuente: USGS - Bandas espectrales de los sensores a bordo de Landsat 8 y Landsat 9, en comparación con las de Landsat Next <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-next>



Fuente: USGS - *Equipo de comunicación y participación pública del Landsat de la NASA* - Landsat Next será "súper espectral" y agregará 15 nuevas bandas para admitir aplicaciones de usuarios emergentes, para un total de 26 bandas espectrales.

<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-next>

Spectral band number/name		Pixel Resolution (m)	Wavelength Range (nm)	Observational Rationale
1	Violet	60	402 - 422	Aerosol retrieval, atmospheric correction, detection of colored dissolved organic matter
2	Coastal/Aerosol	20	433 - 453	Landsat heritage, Sentinel-2 synergy, vegetation health and plant vigor assessments
3	Blue	10	457.5 - 522.5	Landsat heritage, Sentinel-2 synergy, bathymetry, soil/vegetation mapping, detection of snow impurities
4	Green	10	542.5 - 577.5	Landsat heritage, Sentinel-2 synergy, vegetation health and plant vigor assessments
5	Yellow	20	585 - 615	Detection of leaf chlorosis and vegetation stress, aquatic health and water quality assessments
6	Orange	20	610 - 630	Phycocyanin (cyanobacteria) detection
7	Red 1	20	640 - 660	Landsat heritage, phycocyanin fluorescence (cyanobacteria) detection, chlorophyll content mapping
8	Red 2	10	650 - 680	Landsat heritage, Sentinel-2 synergy, chlorophyll content and vegetation mapping, vegetation differentiation
9	Red Edge 1	20	697.5 - 712.5	Sentinel-2 synergy, leaf area index mapping, chlorophyll content and plant stress mapping
10	Red Edge 2	20	732.5 - 747.5	Sentinel-2 synergy, leaf area index mapping, chlorophyll content and plant stress mapping
11	NIR Broad	10	784.5 - 899.5	Sentinel-2 synergy, 10 meter NDVI, biomass content and shoreline detection
12	NIR 1	20	855 - 875	Landsat heritage, Sentinel-2 synergy, biomass content and shoreline detection
13	Water Vapor	60	935 - 955	Sentinel-2 synergy, atmospheric correction for land surface temperature, surface reflectance

Fuente: USGS - Bandas Espectrales Landsat Next - Tabla 1

<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-next>

13	Water Vapor	60	935 - 955	Sentinel-2 synergy, atmospheric correction for land surface temperature, surface reflectance
14	Liquid Water	20	975 - 995	Liquid water and water surface state detection, vegetation water content mapping
15	Snow/Ice1	20	1025 - 1045	Snow grain size mapping
16	Snow/Ice 2	20	1080 - 1100	Ice absorption, snow grain size mapping
17	Cirrus	60	1360 - 1390	Landsat heritage, Sentinel-2 synergy, detection of cirrus (high-altitude) clouds
18	SWIR 1	10	1565 - 1655	Landsat heritage, Sentinel-2 synergy, detection of non-photosynthetic vegetation, fuel moisture mapping
19	SWIR 2a	20	2025.5 - 2050.5	Cellulose/crop residue mapping
20	SWIR 2b	20	2088 - 2128	Landsat heritage, cellulose/crop residue and soil moisture content mapping, fire scar detection
21	SWIR 2c	20	2191 - 2231	Landsat heritage, cellulose/crop residue and soil moisture content mapping, fire scar detection
22	TIR 1	60	8175 - 8425	ASTER synergy, mineral and surface composition mapping
23	TIR 2	60	8425 - 8775	ASTER synergy, emissivity separation, volcano/sulfur dioxide emissions mapping
24	TIR 3	60	8925 - 9275	ASTER synergy, mineral and surface composition mapping
25	TIR 4	60	11025 - 11575	Landsat heritage, surface temperature retrieval, carbonate mineral mapping
26	TIR 5	60	11725 - 12275	Landsat heritage, surface temperature retrieval, snow grain size and moisture content mapping

Fuente: USGS - Bandas Espectrales Landsat Next - Tabla 1

<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-next>

Como colofón de el marco teórico correspondiente al análisis de características principales de Landsat, se adjunta una ilustración que muestra breves detalles de las diferentes misiones de esta constelación de satélites:

Proyecciones a futuro: Landsat Next tiene previsto su lanzamiento para finales de 2030 y estará constituido por una constelación de tres satélites, de los cuales cada uno llevará sensores para adquirir datos en un total de 26 bandas espectrales. Acorde a la información revisada en la página oficial del Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS (2023) ⁴ Landsat Next proporcionará nuevas capacidades para la próxima generación de usuarios de Landsat. La resolución espacial y temporal mejorada de la constelación “superespectral” Landsat Next de 26 bandas desbloquearán nuevas aplicaciones para la calidad del agua, la producción de cultivos y el estrés de las plantas, la dinámica del clima y la nieve, la salud del suelo y otras variables ambientales esenciales.

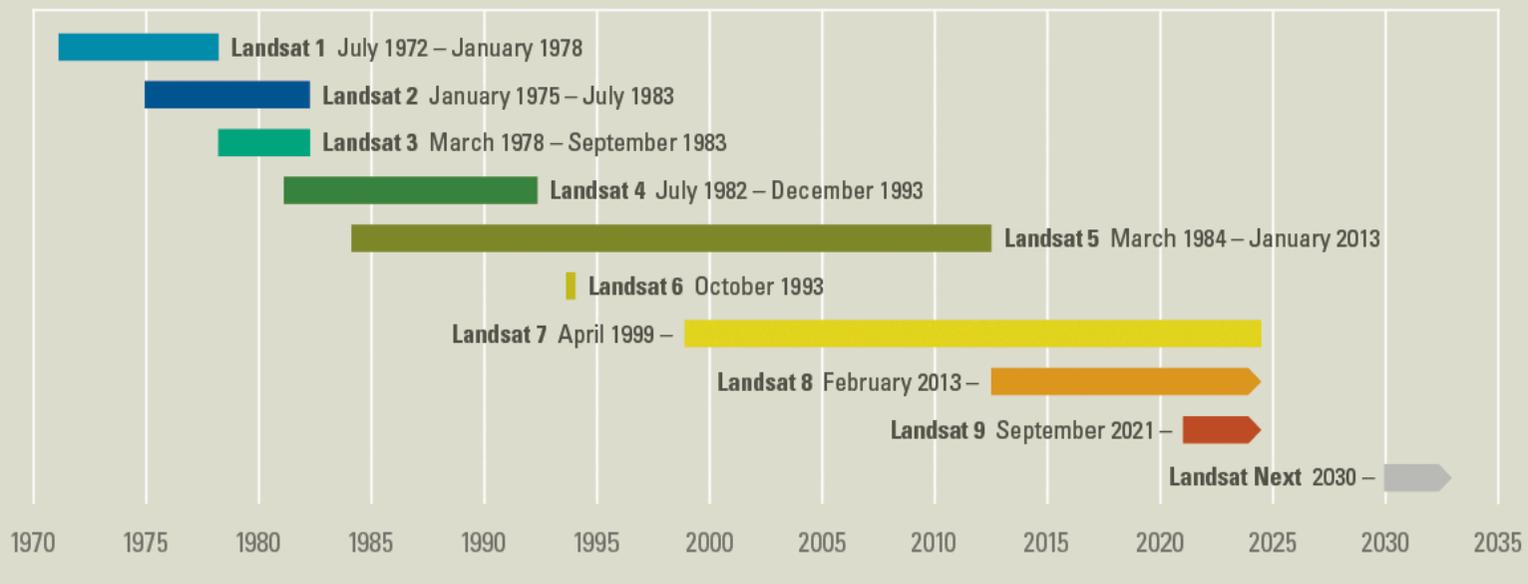
Landsat Next ofrecerá una cobertura global, sinóptica y repetitiva de las superficies terrestres de la Tierra a una escala donde los cambios naturales e inducidos por el hombre pueden detectarse, diferenciarse, caracterizarse y monitorearse a lo largo del tiempo, proporcionando una revisita temporal colectiva mejorada de seis días. La constelación de tres observatorios idénticos puestos en órbita en el mismo vehículo de lanzamiento estarán espaciados 120 grados a una altitud orbital de 653 kilómetros (406 millas).

Según el Centro de Ciencia y Observación de Recursos Terrestres - EROS (2023) ¹⁰ cada observatorio constará de una nave espacial y un Landsat Next Instrument Suite (LandIS), que adquirirá todas las bandas casi simultáneamente, minimizando los cambios de iluminación entre bandas, facilitando tanto la detección de pantallas de nubes como los productos derivados de datos multiespectrales de reflectancia de superficie y emisiones térmicas.

EROS (2023) ¹⁰ resalta respecto a las 26 bandas espectrales se incluyen versiones mejoradas de las 11 bandas “predecesoras” de Landsat, diez nuevas bandas espectrales visibles para onda corta y tres bandas térmicas adicionales para respaldar la aplicación emergente de Landsat. Todas las bandas tendrán resoluciones espaciales más altas que las misiones anteriores, “con distancias de muestreo terrestres de 10 a 20 metros para las bandas visible, infrarroja cercana e infrarroja de onda corta y 60 metros para las bandas infrarrojas atmosférica y térmica” (EROS, 2023) ¹⁰ Se espera que con estas mejoras Landsat Next recopile en promedio aproximadamente 20 veces más datos que su predecesor, Landsat 9.

Toda esta información refleja la sostenibilidad del proyecto a futuro con el uso de imágenes satelitales libres, lo cual es un insumo valioso para continuar con investigaciones de esta clase.

Landsat Missions: Imaging the Earth Since 1972



Fuente: USGS - Landsat Missions Timeline
<https://www.usgs.gov/media/images/landsat-missions-timeline>

Comparación de los canales de proyección e índices para Landsat Next, Misiones de Expansión Sentinel Copernicus - Sentinel 6-B (en relación a las variables usadas en el Entregable V.1.4 Informe con los resultados de la validación de la clasificación de US. (índices que más se repiten) y Landsat 8 - Landsat 9

Las imágenes de los sensores Landsat y Sentinel se han aplicado en diversas tareas de teledetección principalmente por su disponibilidad. Aplicaciones de monitoreo de la superficie terrestre se realizan mediante la combinación de las imágenes antes mencionadas, lo cual va tomando importancia en esta clase de análisis (Li et al., 2022), así como en tareas de clasificación (Zhou et al., 2017). Las imágenes Landsat tienen dos ventajas para su uso: (i) su disponibilidad de forma gratuita, lo cual se ha establecido desde el año 2008 y (ii) presentan continuidad de datos. Por su parte, Sentinel, específicamente Sentinel-2, mantiene una amplia disponibilidad de imágenes de resolución media (Wulder et al., 2015; Heiskanen et al., 2017).

Si bien la combinación antes referida es importante, también es necesario analizar la utilidad de estas imágenes de forma individual, con lo cual se puede afirmar que las imágenes Landsat demuestran su versatilidad debido a la gran variedad de aplicaciones en las que se han utilizado, lo cual se refleja en trabajos de investigación publicado sobre evaluación de cambios en coberturas terrestres (Gozdowski et al., 2022); detección de líneas de costa (Viaña-Borja et al., 2019) y evaluación de la expansión urbana y determinados usos del suelo (Tan et al., 2009), lo cual se relaciona directamente con el trabajo de investigación propuesto.

Por otra parte, las imágenes de Sentinel (tanto 1 como 2), presentan idoneidad para analizar cambios en la cobertura terrestre y vegetación, debido a que ofrecen una resolución espacial más fina que las de otras imágenes (Anokye et al., 2022), mostrando además alta precisión en los resultados (Denize et al., 2019). Diversos trabajos de aplicación, demuestran la utilidad de estas imágenes. Estos trabajos se han aplicado en tareas de análisis cartográficos de tierras abandonadas (Goga et al., 2020); monitoreo de vegetación (Imangholiloo et al., 2019), así como estudios de segmentación (Salgueiro et al., 2022) y series de tiempo (Interdonato et al., 2019), además de aplicaciones de Machine Learning (específicamente Deep Learning) en las cuales se han fusionado tanto imágenes de Sentinel 1 con Sentinel 2 (Hu et al., 2021).

Como lo han reflejado los diferentes estudios citados, tanto a nivel individual como mediante su combinación, las imágenes de libre acceso (Landsat y Sentinel) son una gran fuente de datos para la implementación de diferentes análisis relacionados con tareas de diversa índole entre las cuales figuran principalmente el análisis de coberturas de suelo, clasificación de coberturas terrestres, expansión de zonas

urbanas y de cultivos, entre otras, lo cual proporciona recursos de suma utilidad para la elaboración de nuevas investigaciones.

Es importante mencionar que en la mayoría de zonas de estudio, las imágenes de Landsat, sobre todo para periodos temporales anteriores a 2010, fueron un insumo fundamental para las tareas de clasificación de coberturas de suelo; no obstante para el periodo 2018, específicamente en Cuenca, Loja y Guayaquil se utilizaron imágenes de Sentinel 2, debido a su mejor calidad.

A continuación se detallan las variables seleccionadas para cada zona de estudio durante los periodos de tiempo específicos determinados para esta investigación. Posteriormente se realiza un resumen de los principales hallazgos del análisis de clasificación de las diferentes imágenes (de acuerdo con cada zona y periodo de tiempo) y de las coberturas de suelo principales, lo cual se definió en el informe 1.4 “Resultados de validación de la clasificación de usos de suelo”, disponible en este [enlace](#), y que contiene un marco teórico esencial para comprender de mejor manera los resultados obtenidos.

Cuenca 1990: 5 variables seleccionadas: SR_B1, SR_B2, SR_B4, SR_B7, y NDBI. Imágen usada: **Landsat 5.**

Cuenca 2000: 9 variables seleccionadas: SR_B1, SR_B2, SR_B3, SR_B4, SR_B5, SR_B7, NDVI, RVI y BUI. Imágen usada: **Landsat 5.**

Cuenca 2008: 7 variables seleccionadas: SR_B1, SR_B3, SR_B4, SR_B7, RGRI, BUI, y MNDWI. Imágen usada: **Landsat 7.**

Cuenca 2018: 4 variables seleccionadas: B3, B9, NDVI y NDBI. Imágen usada: **Sentinel 2 L1C.**

Quito 1990: 10 variables seleccionadas: SR_B1, SR_B2, SR_B4, SR_B5, SR_B7, NDVI, VARI, RGRI, ExG y BUII. Imágen usada: **Landsat 5.**

Quito 2000: 9 variables seleccionadas: SR_B1, SR_B2, SR_B4, SR_B7, NDVI, VARI, ExG, NDBI y BUI. Imágen usada: **Landsat 5.**

Quito 2008: 12 variables seleccionadas: SR_B1, SR_B2, SR_B5, SR_B7, VDVI, VARI, RGRI, MGRVI, CIVE, RVI, BUI y MNDWI. Imágen usada: **Landsat 7.**

Quito 2018: 7 variables seleccionadas: SR_B1, SR_B2, SR_B3, SR_B5, NGRDI, ExG y RVI. Imágen usada: **Landsat 8.**

Loja 1990: 11 variables seleccionadas: SR_B1, SR_B2, SR_B3, SR_B4, SR_B7, NDVI, VARI, RGRI, CIVE, NDBI y BUI. Imágen usada: **Landsat 5.**

Loja 2000: 12 variables seleccionadas: SR_B1, SR_B2, SR_B3, SR_B4, SR_B5, SR_B7, NDVI, MGRVI, CIVE, NDBI, BUI y MNDWI. Imágen usada: **Landsat 5.**

Loja 2008: 6 variables seleccionadas: SR_B7, NDVI, NGRDI, MGRVI, CIVE y BUI. Imágen usada: **Landsat 7.**

Loja 2018: 6 variables seleccionadas: B2, B3, B5, NGRDI, RVI y NDBI. **Sentinel 2.**

Guayaquil 1990: 9 variables seleccionadas: SR_B1, SR_B2, SR_B4, SR_B5, SR_B7, NDVI, RVI, BUI y MNDWI. Imágen usada: **Landsat 5**.

Guayaquil 2000: 7 variables seleccionadas: SR_B1, SR_B4, SR_B7, VDMI, MGRVI, ExG y BUI. Imágen usada: **Landsat 5**.

Guayaquil 2008: 4 variables seleccionadas: SR_B1, SR_B4, NDBI y MNDWI. Imágen usada: **Landsat 7**.

Guayaquil 2018: 7 variables seleccionadas: B5, B7, B11, B12, NDVI, NDBI y MNDWI. Imágen usada: **Sentinel 2**.

Cuenca: De manera general, en Cuenca se utilizaron, para los periodos 1990, 2000 y 2008, imágenes de Landsat; mientras que en el periodo 2018 se utilizó una imagen de Sentinel 2. La clasificación en general ha presentado valores que implican una clasificación poco precisa para los tres periodos descritos al inicio de este párrafo; sin embargo, con la imagen de Sentinel, la clasificación mejoró levemente. Los diferentes análisis de esta zona de estudio muestran variabilidad en los niveles de precisión, obteniendo principalmente que las coberturas de vegetación arbustiva y herbácea se clasificaron incorrectamente en todos los periodos analizados, mientras que, por el contrario, las coberturas correspondientes a cuerpos de agua, se clasificaron correctamente en todos los periodos de tiempo investigados.

Quito: En esta zona de estudio se utilizaron imágenes de Landsat para todos los periodos. La clasificación en general ha presentado valores que implican una clasificación poco precisa para los tres periodos descritos al inicio de este párrafo; sin embargo, se notó una mejora ostensible en el valor correspondiente al periodo 2018, aunque este no es óptimo. Los diferentes análisis de esta zona de estudio muestran variabilidad en los niveles de precisión, obteniendo principalmente que las coberturas de vegetación arbustiva y herbácea se clasificaron de forma defectuosa en todos los periodos analizados, mientras que, por el contrario, las coberturas correspondientes a bosques, se clasificaron de manera aceptable en todos los periodos de tiempo investigados. Como información adicional relevante se debe decir que en esta zona de estudio no se obtuvieron resultados de clasificación para cuerpos de agua.

Loja: En esta zona de estudio se utilizaron imágenes de Landsat para los periodos 1990, 2000 y 2008; mientras que en el periodo 2018 se utilizó una imagen de Sentinel 2. La clasificación en general ha presentado valores que implican una clasificación poco precisa para los periodos 2000 y 2008; pero mucho mejores para los periodos 1990 y 2018. Los diferentes análisis de esta zona de estudio muestran variabilidad en los niveles de precisión, obteniendo principalmente que las coberturas de vegetación arbustiva y herbácea se clasificaron de forma defectuosa en todos los periodos analizados, mientras que, por el contrario, las coberturas correspondientes a bosques y zonas antrópicas (zonas sin cobertura vegetal), se

clasificaron de manera aceptable en todos los períodos de tiempo investigados. Al igual que en Quito, en la presente zona de estudio no se obtuvieron resultados de clasificación para cuerpos de agua.

Guayaquil: En esta zona de estudio se utilizaron, para los periodos 1990, 2000 y 2008, imágenes de Landsat; mientras que en el periodo 2018 se utilizó una imagen de Sentinel 2. La clasificación en general ha presentado valores que implican una clasificación poco precisa para los periodos 1990 y 2000, aunque estos mejoraron para los periodos 2008 y 2018. En el análisis de esta zona de estudio, se aprecia variabilidad en los niveles de precisión para los diferentes períodos considerados, principalmente en las clases correspondientes a cuerpos de agua y tierra agropecuaria, cuyos resultados de clasificación son aceptables de manera general. Los valores más bajos de clasificación se encuentran en la clase perteneciente a zonas antrópicas (zonas sin cobertura vegetal).

Con base en los hallazgos obtenidos, se puede afirmar que las imágenes de Landsat y Sentinel, debido principalmente a su resolución espacial, no permiten una correcta diferenciación de coberturas de suelo, omitiendo algunas como cuerpos de agua, a pesar de la existencia de estos en zonas de estudio como Quito y Loja. Además es necesario mejorar la resolución espacial para determinar de mejor manera las coberturas de vegetación arbustiva y herbácea, especialmente para obtener una mejor diferenciación de coberturas similares como bosques y discriminar adecuadamente las zonas antrópicas o sin cobertura vegetal. Finalmente, es importante decir que, si bien el uso de estas imágenes presenta varias ventajas como las mencionadas en apartados anteriores, también existe la desventaja de que al utilizarlas, los resultados de clasificación no presentan valores óptimos, de acuerdo con el umbral establecido por Congalton y Green (2009).

Conclusiones: El uso de los datos de satélites libres Landsat es oportuno y sostenible para la investigación y clasificación realizada, puesto que brinda datos con gran nivel de precisión, recalando que “Los datos Landsat son fundamentales para mapear los recursos naturales e impactan numerosos beneficios sociales, como la seguridad alimentaria, el uso del agua, la respuesta a desastres y más” (Centro de Ciencia y Observación de Recursos Terrestres - EROS, 2023) **10.** Su uso y alta eficiencia es preciso para cumplir con los objetivos del proyecto “Análisis de Problemas Territoriales en el Ecuador utilizando Machine Learning y Sensores Remotos desde una Perspectiva de Cambio Climático”. Concluyendo que al ser una fuente de consulta confiable con información técnica de alta calidad su proyección a futuro es viable para próximas investigaciones ya que “Landsat también proporciona datos esenciales para monitorear los ecosistemas, la calidad del agua, la cobertura y el uso del suelo, y un registro de datos incomparable sobre el medio ambiente y el cambio climático.” (EROS, 2023) **10.**

SENTINEL-2

El programa Sentinel-2 es una constelación de satélites de observación de la Tierra operados por la Agencia Espacial Europea (ESA) como parte del programa Copernicus. Estos satélites están diseñados para proporcionar imágenes ópticas de alta resolución y frecuencia de la superficie terrestre, lo que los hace valiosos para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la monitorización ambiental, la agricultura, y la gestión de desastres. Cada misión Sentinel se basa en una constelación de satélites para cumplir con los requisitos de cobertura y revisión, proporcionando conjuntos de datos sólidos para los servicios de Copernicus. Estas misiones llevan consigo una gama de tecnologías, como radares e instrumentos de imágenes multiespectrales para la vigilancia terrestre, oceánica y atmosférica. (ESA, 2014) ⁵

Los satélites ya lanzados de la familia Sentinel - Copernicus son: Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3, Sentinel-5 Precursor, Sentinel-5 y Sentinel-6A.

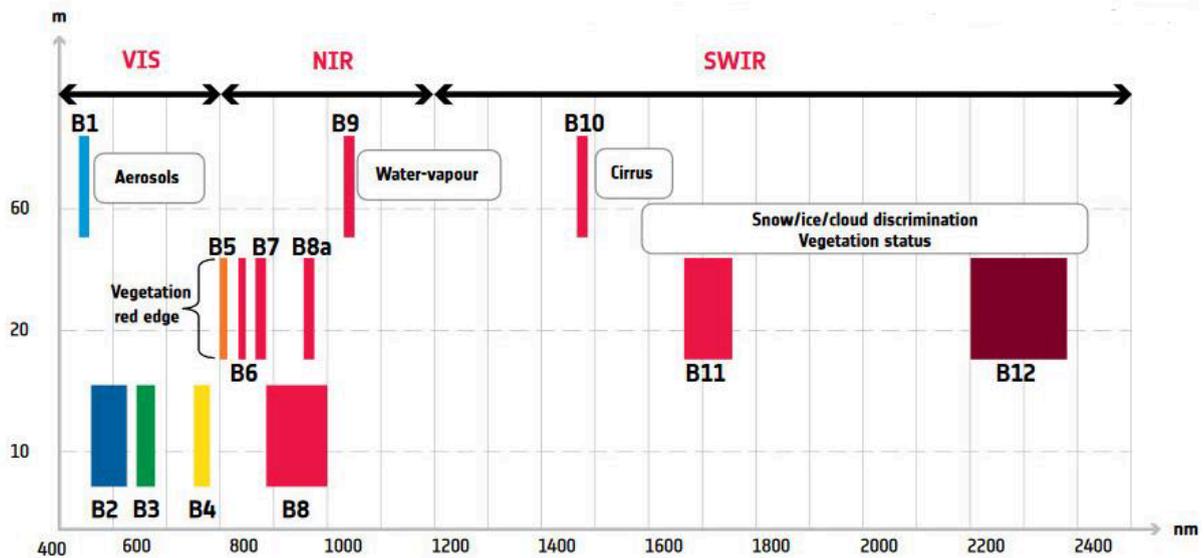
Según la ESA (2015)⁶ Sentinel-2 lleva una innovadora cámara multiespectral de alta resolución, con 13 bandas espectrales que aportan una nueva perspectiva de la superficie terrestre y la vegetación. La misión se basa en una constelación de dos satélites idénticos en la misma órbita, separados por 180 grados, para lograr una cobertura y una descarga de datos óptimos. Cada cinco días los satélites cubrirán todas las superficies terrestres, grandes islas y aguas costeras. Cada uno de los satélites Sentinel-2 lleva un innovador generador de imágenes multiespectral de alta resolución, que combinado con su franja de 290 km de ancho y sus frecuentes visitas, ofrece vistas sin precedentes de la Tierra.

“La misión proporciona información principalmente para prácticas agrícolas y para abordar la cuestión global de la seguridad alimentaria” (ESA, 2015) ⁶. Sin embargo es importante mencionar que “los datos de la misión también se han utilizado para monitorear cambios en las capas de hielo y glaciares, la erosión costera, la deforestación, la tierra quemada como resultado de incendios forestales, la contaminación en lagos y aguas costeras, y más”. (ESA, 2021) ⁸.

El satélite Sentinel-2 de última generación actualmente en uso es Sentinel-2B, que fue lanzado el 7 de marzo de 2017. Sentinel-2B cuenta con una resolución espacial de 10 metros en las bandas espectrales visibles e infrarrojas cercanas, lo que significa que puede capturar imágenes con un alto nivel de detalle. Junto con su gemelo Sentinel-2A, lanzado en 2015, estos satélites proporcionan una cobertura global. La vida útil de los satélites Sentinel-2 se estima en al menos siete años.

Resolución espacial Sentinel-2: La resolución espacial de cada una de las bandas se resume en las siguientes líneas y en la siguiente figura:

4 bandas a 10 m: banda 2, banda 3, banda 4 y banda 8.
 6 bandas a 20 m: banda 5, banda 6, banda 7, banda 8a, banda 11 y banda 12.
 3 bandas a 60 m: banda 1, banda 9 y banda 10.



Fuente: ESA - Bandas del satélite Sentinel 2.7

Resolución espectral: Los datos de Sentinel-2 se adquieren en 13 bandas espectrales tal y como se muestra en la Tabla 2.

Banda Sentinel 2	Longitud de onda central (µm)	Resolución espacial (m)
Banda 1 – coastal aerosol	0.443	60
Banda 2 - azul	0.490	10
Banda 3 – verde	0.560	10
Banda 4 – rojo	0.665	10
Banda 5 – Vegetation Red Edge	0.705	20
Banda 6 – Vegetation Red Edge	0.740	20
Banda 7 – Vegetation Red Edge	0.783	20
Banda 8 – NIR	0.842	10
Banda 8A – Vegetation Red Edge	0.865	20
Banda 9 – Vapor de agua	0.945	60
Banda 10 – SWIR – cirros	1.375	60
Banda 11 – SWIR	1.610	20
Banda 12 - SWIR	2.190	20

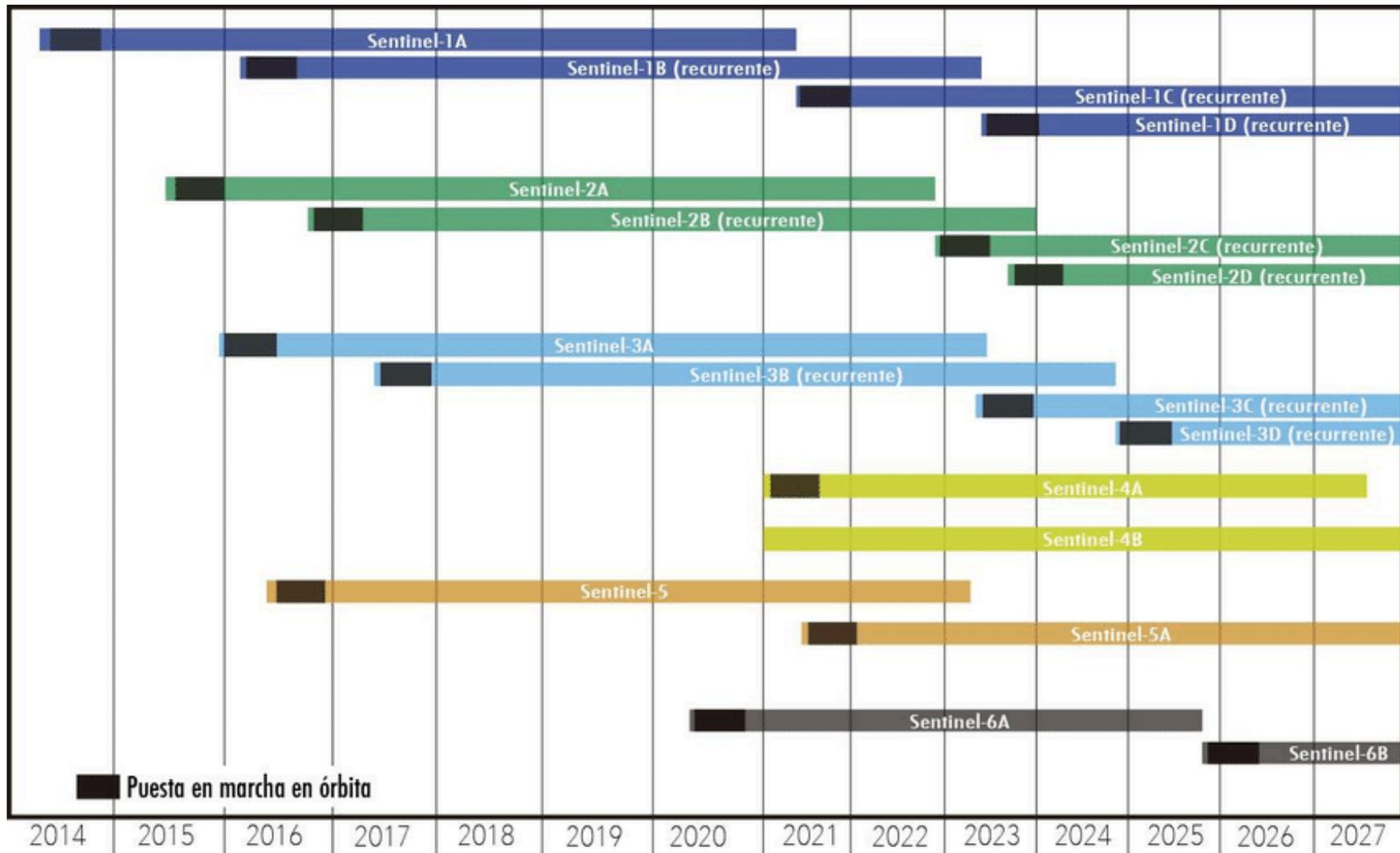
Fuente: ESA - Bandas del satélite Sentinel 2 7.

Proyecciones a futuro: Las proyecciones futuras para el programa Sentinel-2 incluyen el lanzamiento de más satélites de la serie, así como mejoras en la tecnología para ofrecer datos aún más precisos y oportunos. Se espera que estas mejoras aumenten la eficiencia y la utilidad del programa para los usuarios en todo el mundo. Sentinel-2C, tiene previsto su lanzamiento para principios de 2024. “La misión se basa en una constelación de dos satélites idénticos en la misma órbita, separados 180° para una cobertura y entrega de datos óptimas. Entonces, cuando Sentinel-2A se retire, Sentinel-2C estará allí para ocupar su lugar y, eventualmente, Sentinel-2D reemplazará a Sentinel-2B.” (ESA, 2021) 8.

De acuerdo con lo mencionado por la ESA, **Sentinel-4** es una carga útil dedicada al monitoreo atmosférico que se embarcará en un satélite Meteosat Third Generation-Sounder (MTG-S) en órbita geoestacionaria.” (ESA, 2014) 5. Por otra parte **Sentinel-5** es una carga útil que monitoreará la atmósfera desde una órbita polar a bordo de un satélite MetOp de segunda generación.” (ESA, 2014) 5.

Con proyección al futuro, se están desarrollando seis misiones de expansión Sentinel (Sentinel 6-B), previstas para 2025 , que buscan ampliar las capacidades actuales del componente espacial de Copernicus. Estas son.- **CHIME:** Misión de imágenes hiperspectrales de Copernicus para el medio ambiente, **CIMR:** Radiómetro de microondas de imágenes Copernicus, **CO2M:** Monitoreo antropogénico de dióxido de carbono de Copernicus, **CRISTAL:** Altimetro de topografía de hielo y nieve polar de Copernicus, **LSTM:** Monitoreo de la temperatura de la superficie terrestre de Copernicus y **ROSE-L:** Radar de apertura sintética de banda L Copernicus.

De manera similar a lo mencionado con Landsat, las imágenes satelitales de Sentinel consisten en un insumo valioso, pues al ser una fuente de datos satelitales gratuitos y con proyección a mantenerse de esa forma en el futuro con innovaciones adicionales, la convierten en una fuente útil para continuar generando investigaciones de esta clase.



Fuente: ResearchGate - Fechas previstas para lanzamiento y periodo en operación de los satélites de las misiones Sentinel
https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Fechas-previstas-para-lanzamiento-y-periodo-en-operacion-de-los-satelites-de_fig1_311548331



PROGRAMME OF THE
EUROPEAN UNION



co-funded with



Copernicus

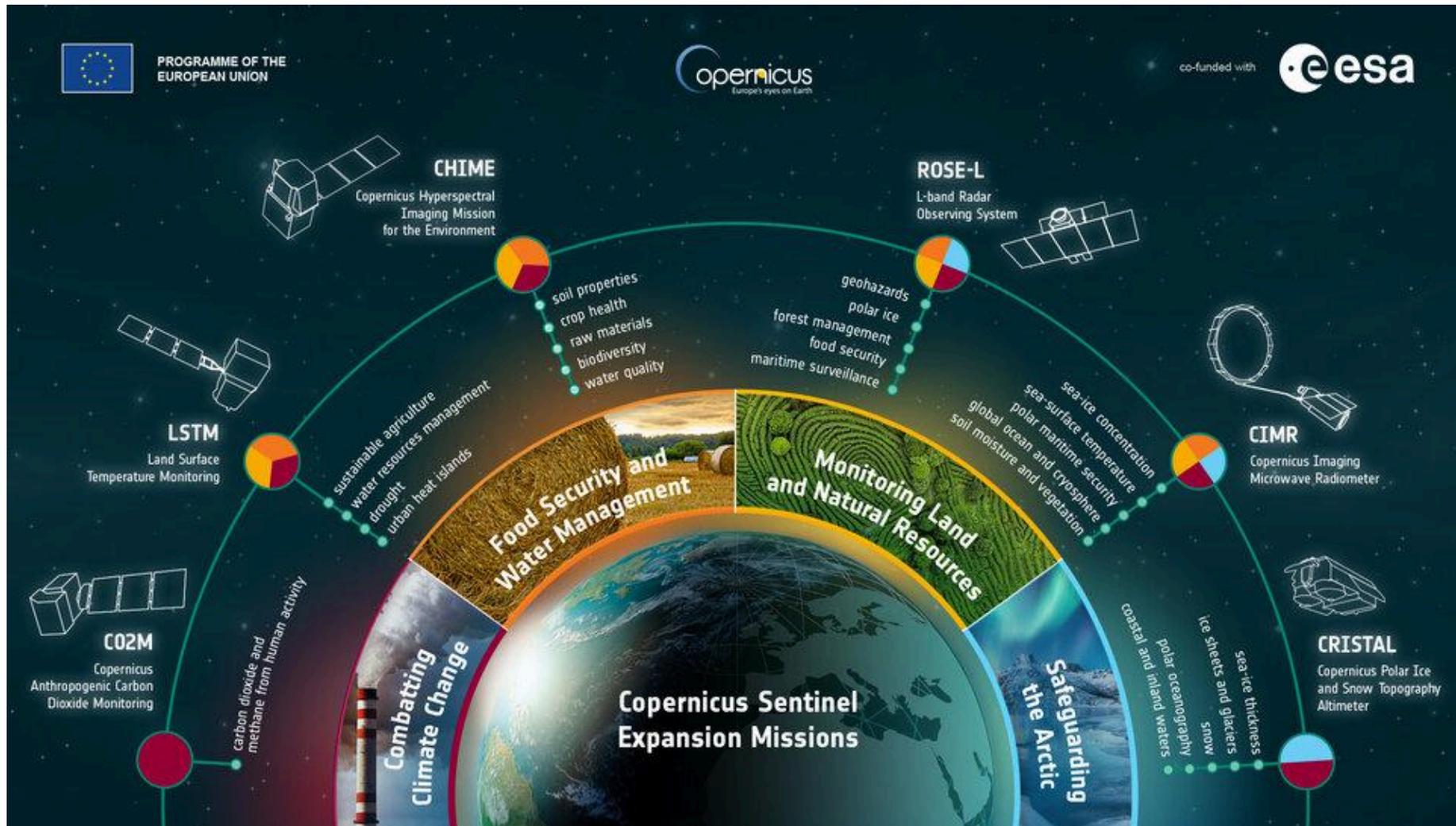
Fuente: SentiWiki -ESA - Programa Sentinel
<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/sentiwiki>



PROGRAMME OF THE EUROPEAN UNION



co-funded with



Fuente: ESA - Copernicus Sentinel Expansion missions

https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Copernicus_Sentinel_Expansion_missions

Conclusiones:

De manera similar a lo mencionado con Landsat, el uso de los datos de satélites libres de las misiones Sentinel es oportuno y sostenible para la investigación y clasificación realizada, puesto que nos brinda datos exactos y precisos, recalando que “ayudan a abordar desafíos como la urbanización, la seguridad alimentaria, el aumento del nivel del mar, la disminución del hielo polar, los desastres naturales y, por supuesto, el cambio climático.” (ESA, 2022) ⁹. Resaltando que se constituye como una fuente de información sólida, que brinda precisión y confiabilidad para cumplir con los objetivos del proyecto “Análisis de Problemas Territoriales en el Ecuador utilizando Machine Learning y Sensores Remotos desde una Perspectiva de Cambio Climático”. Por lo que su proyección a futuro es viable para futuras investigaciones ya que la ESA (2021) ⁸, señala que estos datos son particularmente importantes para la predicción efectiva del rendimiento y las aplicaciones relacionadas con la vegetación de la Tierra; sin embargo “los datos de la misión también se han utilizado para monitorear cambios en las capas de hielo y glaciares, la erosión costera, la deforestación, la tierra quemada como resultado de incendios forestales, la contaminación en lagos y aguas costeras, y otras aplicaciones.” ESA (2021) ⁸.

Notas numeradas:

- ¹ Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS (2014). Landsat 8: el primer satélite Landsat del siglo XXI, proporciona información vital con dos nuevos instrumentos. Recuperado el 13 de mayo de 2024, de [<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>]
 - ² Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS (2021). Landsat 9: El próximo hito en la observación de la Tierra. Recuperado el 15 de mayo de 2024, de [<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-9>]
 - ³ Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS (2021). ¿Cuáles son las designaciones de bandas de los satélites Landsat?. Recuperado el 17 de mayo de 2024, de [<https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites>]
 - ⁴ Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS (2023). Landsat Next. Recuperado el 21 de mayo de 2024, de [<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-next>]
 - ⁵ The European Space Agency - ESA (2014). The Sentinel Missions. Recuperado el 23 de mayo de 2024, de [https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/The_Sentinel_missions]
 - ⁶ The European Space Agency - ESA (2015). Sentinel 2. Recuperado el 27 de mayo de 2024, de [https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2]
 - ⁷ Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, Gobierno de España (2018). El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial: *El componente espacio Copernicus*. Recuperado el 5 de junio de 2024, de la base de datos del Instituto Geográfico Nacional de España, de [<https://shorturl.at/xS5Ow>]
 - ⁸ The European Space Agency - ESA (2021). Preparándose para el tercer satélite Sentinel-2. Recuperado el 5 de junio de 2024, de [https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Gearing_up_for_third_Sentinel-2_satellite]
 - ⁹ The European Space Agency - ESA (2022). Misiones de expansión Copernicus Sentinel. Recuperado el 7 de junio de 2024, de [https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Copernicus_Sentinel_Expansion_missions]
 - ¹⁰ Centro de Ciencia y Observación de Recursos Terrestres - EROS (2023). *Landsat Next*. Recuperado el 7 de junio de 2024, de [<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-next>]
-

Referencias bibliográficas

Anokye, M., Twumasi, Y. A., Ning, Z. H., Apraku, C. Y., Armah, R. N. D., Frimpong, D. B., ... & Owusu, F. (2022). *Assessing land cover change around bayou perot-little lake, new orleans using sentinel 2 satellite imagery*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 46, 15-20. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVI-M-2-2022/15/2022/>

Congalton, R. G., & Green, K. (2009). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. CRC press.

Denize, J., Hubert-Moy, L., Betbeder, J., Corgne, S., Baudry, J., & Pottier, E. (2018). *Evaluation of using sentinel-1 and-2 time-series to identify winter land use in agricultural landscapes*. Remote Sensing, 11(1), 37. <https://doi.org/10.3390/rs11010037>

Goga, T., Szatmári, D., Feranec, J., & Papčo, J. (2020). *Abandoned agricultural land identification using object-based approach and Sentinel data in the Danubian lowland, Slovakia*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43, 1539-1545. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1539-2020>

Gozdowski, D., Žukovskis, J., Razinkovas-Baziukas, A., & Wójcik-Gront, E. (2022). *Land cover changes in selected areas next to lagoons located on the southern coast of the Baltic Sea, 1984–2021*. Sustainability, 14(4), 2006. <https://doi.org/10.3390/su14042006>

Heiskanen, J., Liu, J., Valbuena, R., Aynekulu, E., Packalen, P., & Pellikka, P. (2017). *Remote sensing approach for spatial planning of land management interventions in West African savannas*. Journal of Arid Environments, 140, 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.12.006>

Imangholiloo, M., Rasinmäki, J., Rauste, Y., & Holopainen, M. (2019). *Utilizing Sentinel-1A radar images for large-area land cover mapping with machine-learning methods*. Canadian Journal of Remote Sensing, 45(2), 163-175. <https://doi.org/10.1080/07038992.2019.1635877>

Li, Y., Shi, Q., He, L., Cai, R., Meng, L., Li, J., & Plaza, A. (2022). *Fusing Sentinel-2 and Landsat-8 surface reflectance data via pixel-wise local normalization*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 15, 7359-7374. [10.1109/JSTARS.2022.3200713](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3200713)

Heiskanen, J., Liu, J., Valbuena, R., Aynekulu, E., Packalen, P., & Pellikka, P. (2017). *Remote sensing approach for spatial planning of land management interventions in West African savannas*. Journal of Arid Environments, 140, 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.12.006>

Hu, B., Xu, Y., Huang, X., Cheng, Q., Ding, Q., Bai, L., & Li, Y. (2021). *Improving urban land cover classification with combined use of sentinel-2 and sentinel-1 imagery*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(8), 533. <https://doi.org/10.3390/ijgi10080533>

Interdonato, R., Ienco, D., Gaetano, R., & Ose, K. (2019). *DuPLO: A DUal view Point deep Learning architecture for time series classification*. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 149, 91-104. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.01.011>

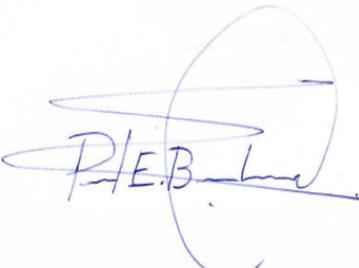
Salgueiro, L., Marcello, J., & Vilaplana, V. (2022). *SEG-ESRGAN: A multi-task network for super-resolution and semantic segmentation of remote sensing images*. *Remote Sensing*, 14(22), 5862. <https://doi.org/10.3390/rs14225862>

Tan, K.C., Lim, H.S., MatJafri, M.Z. et al. *Landsat data to evaluate urban expansion and determine land use/land cover changes in Penang Island, Malaysia*. *Environ Earth Sci* 60, 1509–1521 (2010). <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0286-z>

Viaña-Borja, S. P., & Ortega-Sánchez, M. (2019). *Automatic methodology to detect the coastline from Landsat images with a new water index assessed on three different Spanish Mediterranean deltas*. *Remote Sensing*, 11(18), 2186. <https://doi.org/10.3390/rs11182186>

Wilder, M.A., Hilker, T., White, J.C., Coops, N.C., Masek, J.G., et al., 2015. *Virtual constellations for global terrestrial monitoring*. *Remote Sensing of Environment*. 170, 62 - 76. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.001>

Zhou, T., Pan, J., Zhang, P., Wei, S., & Han, T. (2017). *Mapping winter wheat with multi-temporal SAR and optical images in an urban agricultural region*. *Sensors*, 17(6), 1210. <https://doi.org/10.3390/s17061210>

Elaborado por:		Fecha aprobación: XX/06/24
		
Ing.(MSc) Diego Pacheco P	Ing.(MSc) Paul Bravo López	Arq. Ma. Eugenia González