



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Desarrollo de una Aplicación en Matlab para el  
Procesamiento y Visualización de Imágenes Satelitales de  
Landsat

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación, Sonido e  
Imagen

AUTOR/A: Llinás Suau, Aina

Tutor/a: Flores Asenjo, Santiago José

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

## **RESUMEN**

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en el diseño y desarrollo de una aplicación de Matlab con App Designer dedicada al procesamiento y visualización de imágenes satelitales obtenidas del programa Landsat. La aplicación permite a los usuarios realizar un análisis avanzado, incluyendo la visualización en color verdadero y falso color, cálculos de índices como el NDVI y la generación de mapas de temperatura gracias a la banda de infrarrojo térmico, a partir de imágenes satelitales de alta resolución descargadas de repositorios públicos.

Palabras clave: Landsat, Imágenes Satelitales, Procesamiento de Imágenes, Teledetección, NDVI

## **ABSTRACT**

This final degree project focuses on designing and developing a Matlab application with App Designer dedicated to processing and visualizing satellite images obtained from the Landsat program. The application allows users to perform advanced analyses, including true-color and false-color visualization, calculations of indices such as NDVI, and generation of temperature maps from high-resolution satellite images downloaded from public repositories.

Key words: Landsat, Satellite Images, Image Processing, Remote Sensing, NDVI

# ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....   | <b>6</b>  |
| 1.1. PRESENTACIÓN .....  | 6         |
| 1.2. OBJETIVOS .....   | 6         |
| 1.3. ETAPAS Y METODOLOGÍA.....   | 6         |
| <b>2. TELEDETECCIÓN</b> .....  | <b>8</b>  |
| 2.1. INTRODUCCIÓN Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA .....                            | 8         |
| 2.1.1. <i>Etapa precursora (finales XIX- 1920)</i> .....                 | 8         |
| 2.1.2. <i>Primeras aplicaciones científicas (1920-1945)</i> .....        | 8         |
| 2.1.3. <i>Aplicación generalizada de la foto aérea (1945-1960)</i> ..... | 9         |
| 2.1.4. <i>Nacimiento de la teledetección espacial (1960-1972)</i> .....  | 9         |
| 2.1.5. <i>Desarrollo de programas operativos (1972-2000)</i> .....       | 9         |
| 2.1.6 <i>Programas actuales y futuros (2000-)</i> .....                  | 9         |
| 2.2. PRINCIPIOS FÍSICOS .....  | 9         |
| 2.2.1. <i>La radiación electromagnética</i> .....                        | 10        |
| 2.2.2. <i>El espectro electromagnético</i> .....                         | 11        |
| 2.2.3. <i>Representación de imágenes satelitales</i> .....               | 13        |
| 2.2.3.1. Temperatura .....   | 14        |
| 2.2.3.2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....      | 15        |
| 2.3. SENSORES Y PLATAFORMAS .....  | 16        |
| 2.3.1. <i>Características de los instrumentos: resolución</i> .....      | 16        |
| 2.3.1.1. Resolución espacial.....  | 16        |
| 2.3.1.2. Resolución espectral.....                                       | 16        |
| 2.3.1.3. Resolución radiométrica .....                                   | 16        |
| 2.3.1.4. Resolución temporal .....                                       | 16        |
| 2.3.2. <i>Instrumentación de teledetección: tipos</i> .....              | 17        |
| 2.3.2.1. Sensores pasivos.....   | 17        |
| 2.3.2.2. Sensores activos.....   | 18        |
| 2.3.3. <i>Satélites de teledetección</i> .....                           | 18        |
| 2.3.3.1. Tipos según su órbita.....                                      | 18        |
| 2.3.3.2. Tipos según su aplicación.....                                  | 19        |
| <b>3. PROGRAMA LANDSAT</b> .....   | <b>20</b> |
| 2.1. HISTORIA Y EVOLUCIÓN .....  | 20        |
| 2.2. SATÉLITES.....  | 21        |
| 2.2.1. <i>Landsat 7</i> .....  | 21        |
| 2.2.2. <i>Landsat 8</i> .....  | 22        |
| 2.2.3. <i>Landsat 9</i> .....  | 23        |
| 2.3. DISPONIBILIDAD Y ACCESO A LOS DATOS LANDSAT .....                   | 23        |
| 2.4. FUTURO DEL PROGRAMA LANDSAT .....                                   | 24        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN.....</b>                          | <b>25</b> |
| 2.1. DISEÑO DE LA INTERFAZ DE LA APLICACIÓN.....                    | 26        |
| 2.2. IMPLEMENTACIÓN DE LA APLICACIÓN .....                          | 27        |
| <b>5. PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b>                                | <b>35</b> |
| 2.1. COLOR VERDADERO .....  | 35        |
| 2.2. FALSO COLOR .....  | 36        |
| 2.3. NDVI .....   | 39        |
| 2.4. TEMPERATURA .....  | 40        |
| 2.5. OTRAS PRUEBAS.....   | 41        |
| 2.6. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA Y USABILIDAD DE LA APLICACIÓN..... | 43        |
| 2.6.1. <i>Color Verdadero</i> .....                                 | 43        |
| 2.6.2. <i>Falso Color</i> .....                                     | 44        |
| 2.6.3. <i>NDVI</i> .....  | 44        |
| 2.6.4. <i>Temperatura</i> .....                                     | 45        |
| <b>6. CONCLUSIONES .....</b>  | <b>47</b> |
| <b>7. BIBLIOGRAFÍA .....</b>  | <b>48</b> |
| <b>ANEXOS.....</b>  | <b>50</b> |



## ÍNDICE DE IMÁGENES

|  |    |
|--|----|
| <i>Imagen 1. Propagación de la energía electromagnética</i> .....  | 11 |
| <i>Imagen 2. Espectro electromagnético</i> .....   | 12 |
| <i>Imagen 3. Línea temporal del programa Landsat (Landsat NASA, 2022b</i> .....  | 21 |
| <i>Imagen 4. Vista de la interfaz de la aplicación en App Designer</i> .....   | 26 |
| <i>Imagen 5. Vista del código de la aplicación en App Designer</i> .....   | 26 |
| <i>Imagen 6. Interfaz de la aplicación VisionGeo</i> .....   | 27 |
| <i>Imagen 7. Opciones de visualización de las imágenes satelitales</i> .....   | 28 |
| <i>Imagen 8. Visualización en Color Verdadero utilizando DN</i> .....  | 36 |
| <i>Imagen 9. Visualización en Color Verdadero utilizando Reflectancia</i> .....  | 37 |
| <i>Imagen 10. Visualización en Color Verdadero utilizando Reflectancia (eq.)</i> .....   | 37 |
| <i>Imagen 11. Visualización en Falso Color con bandas 432 utilizando DN</i> .....  | 38 |
| <i>Imagen 12. Visualización en Falso Color con bandas 742 utilizando DN</i> .....  | 39 |
| <i>Imagen 13. Visualización en Falso Color con bandas 742 utilizando Reflectancia</i> .....  | 40 |
| <i>Imagen 14. Visualización en Falso Color con bandas 742 utilizando Reflectancia(eq.)</i> ..  | 40 |
| <i>Imagen 15. Visualización del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)</i>  | 41 |
| <i>Imagen 16. Visualización del mapa de temperatura de la zona</i> .....   | 42 |
| <i>Imagen 17-18-19. Visualización de Color Verdadero en DN, Reflectancia y Reflectancia (eq.) de las imágenes de prueba 2</i> .....              | 43 |
| <i>Imágenes 20-21-22. Visualización de Falso Color en 742 utilizando DN, Reflectancia y Reflectancia (eq.) de las imágenes de prueba 2</i> ..... | 43 |
| <i>Imagen 23. Visualización de NDVI de las imágenes de prueba 2</i> .....  | 43 |
| <i>Imagen 24. Visualización del mapa de temperatura de las imágenes de prueba 2</i> .....  | 44 |
| <i>Imágenes 25-26. Comparación de Color Verdadero en VisionGeo (izquierda) y MultiSpec (derecha)</i> .....                                       | 44 |
| <i>Imágenes 27-28. Comparación de Falso Color 742 en VisionGeo (izquierda) y MultiSpec (derecha)</i> .....                                       | 45 |
| <i>Imágenes 29-30. Comparación de Falso Color 742 en VisionGeo (izquierda) y MultiSpec (derecha)</i> .....                                       | 46 |
| <i>Imágenes 31-32. Comparación de temperatura en VisionGeo (izquierda) y MultiSpec (derecha)</i> .....   | 46 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Tabla 1. Principales bandas espectrales y sus aplicaciones.....</i>          | <i>13</i> |
| <i>Tabla 2. Satélites de teledetección para aplicaciones específicas.....</i>   | <i>20</i> |
| <i>Tabla 3. Bandas espectrales de Landsat-7.....</i>                            | <i>22</i> |
| <i>Tabla 4. Bandas espectrales de Landsat-8.....</i>                            | <i>23</i> |
| <i>Tabla 5. Combinaciones comunes en falso color, uso e interpretación.....</i> | <i>38</i> |

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Presentación

La teledetección espacial está revolucionando cada vez más campos, estableciéndose como la base fundamental para estudios de investigación y análisis de la Tierra en áreas tan diversas como la agricultura, la meteorología o la oceanografía, entre otras. Por ello, se ha propuesto para este proyecto el diseño y desarrollo de una aplicación dedicada al procesamiento y visualización de imágenes satelitales obtenidas del programa Landsat.

## 1.2. Objetivos

El desarrollo de esta aplicación busca alcanzar los siguientes objetivos clave:

- Procesamiento de imágenes satelitales en color verdadero y falso color con la integración de funciones para combinar distintas bandas y generar imágenes mejoradas
- Implementación de cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada
- Generación de mapas de color a partir de la banda de infrarrojo térmico
- Validación de resultados obtenidos comparándolo con otras herramientas existentes

## 1.3. Etapas y metodología

En este proyecto se han identificado tres claras etapas.

En primer lugar, tuvo lugar la etapa de revisión bibliográfica. Durante esta fase se realizó una investigación sobre las características técnicas de los satélites Landsat 7, 8 y 9, así como sus respectivas bandas espectrales. Además, se exploraron los métodos y técnicas de procesamiento de las imágenes satelitales a través de la lectura de páginas web, documentos oficiales y la asistencia a clases online. Este proceso de recopilación de información proporcionó las bases teóricas necesarias para la siguiente etapa del proyecto: el desarrollo de la aplicación.

En la segunda etapa, se llevó a cabo el proceso de desarrollo de la aplicación. en la que se realiza la implementación de la interfaz gráfica y de técnicas para la generación de imágenes de color verdadero y falso color. Además, se incorpora el cálculo del índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la generación de mapas de temperatura con Matlab. El desafío de esta etapa no era solo la elaboración de la aplicación y su buen funcionamiento, sino también que esta fuera intuitiva y transparente para el usuario, permitiendo su uso sin necesidad de tener conocimientos avanzados sobre teledetección, y siendo al mismo tiempo útil para aquellos que sí poseen dichos conocimientos.

Por último, etapa de validación y evaluación comprende la comparación de los resultados obtenidos con herramientas existentes, junto con un análisis de usabilidad y funcionalidad de la aplicación.

## **2. TELEDETECCIÓN**

### **2.1. Introducción y evolución histórica**

La teledetección es una técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre a partir de sensores instalados en plataformas espaciales, capaz de obtener información sin contacto directo entre el “captador” y el “objetivo” (F. Rasilla & Oria, 2009). La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la Tierra (Instituto Geográfico Nacional, 2024)

Esta constituye un medio único de monitorización sistemática a escala global para múltiples propósitos, con una amplia variedad de aplicaciones. Desde un enfoque científico, se utiliza en disciplinas como la geología, la oceanografía y el estudio del medio ambiente. También se emplea para la evaluación y prevención de desastres naturales, así como para el análisis meteorológico. Su uso en el ámbito de la agrícola y cartográfico, es bastante destacado entre otras muchas aplicaciones.

La teledetección es una disciplina que empezó a desarrollarse en el siglo XX y en la que se distinguen dos etapas básicas: la teledetección aérea y la teledetección espacial.

#### **2.1.1. Etapa precursora (finales XIX- 1920)**

En 1909, se realizaron las primeras fotografías desde un avión cuando un pasajero hizo una fotografía cerca de Roma. Sin embargo, ya se habían usado algunas técnicas más básicas para este tipo de fotografías como cámaras fotográficas atadas a palomas o globos cautivos. En el primer caso, se trataba de imágenes incontroladas, ya se tomaban con una técnica de disparo retrasado cuando la paloma empezaba a volar.

Aunque esos sistemas mostraron el valor de la fotografía aérea, el nacimiento de la teledetección aérea surge con el empleo del avión como plataforma (Sobriño, 2001), principalmente durante la Primera Guerra Mundial, donde tanto el ejército alemán como el francés emplearon cámaras en sus aviones militares. Esto llevó al desarrollo de diferentes tipos de cámaras y marcó el inicio de los primeros avances cartográficos.

#### **2.1.2. Primeras aplicaciones científicas (1920-1945)**

Entre 1920 y 1939, la fotografía aérea se dedica a la prospección geológica y minera, a la realización de inventarios forestales y a la cartografía de zonas del planeta mal conocidas o donde los levantamientos topográficos clásicos revestían especiales dificultades (sudeste asiático, Marruecos, Siria, Sahara...) (Sobriño, 2001).

Es durante la Segunda Guerra Mundial, que las exigencias bélicas dan un nuevo impulso a la mejora tecnológica de películas y lentes, incluso la introducción de nuevos sensores como el radar.

### **2.1.3. Aplicación generalizada de la foto aérea (1945-1960)**

Los años posteriores a la guerra es el periodo de aplicación generalizada de la foto aérea y las técnicas fotométricas para la cartografía, no sólo topográfica, sino geológica, agrícola, forestal, etc. (Sobrino, 2001). Por lo que la teledetección empieza a desarrollarse como una disciplina.

### **2.1.4. Nacimiento de la teledetección espacial (1960-1972)**

Durante las siguientes décadas las técnicas de teledetección aéreas alcanzan su etapa de madurez y, a su vez, impulsada por la denominada Guerra Fría (1947-1953), nace una nueva forma de observar la Tierra, la teledetección espacial. En sus primeras etapas, se llevaba a cabo con cámaras y sensores primitivos.

La primera fotografía espacial fue tomada por el Explorer-6 en 1959 y es en los años siguientes que se crean los primeros satélites meteorológicos, para supervisar el tiempo atmosférico y el clima de la Tierra. El 23 de julio de 1972, se abre una nueva etapa en la historia de la teledetección con la puesta en órbita del satélite Landsat 1, inicialmente nombrado ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite).

### **2.1.5. Desarrollo de programas operativos (1972-2000)**

Este periodo puede determinarse como el de madurez de la teledetección espacial, con el establecimiento operativo de satélites para la observación de la atmósfera y de sensores de alta resolución para las aplicaciones terrestres. Destaca la investigación y experimentación con nuevos sensores pasivos y activos en un amplio rango de longitudes de onda y encaminados a reducir la resolución espacial (Sobrino, 2001).

Durante estas tres décadas, se ponen en órbita diversos satélites de programas que actualmente siguen en uso, como Landsat, Meteosat o RADARSAT.

### **2.1.6 Programas actuales y futuros (2000-)**

Ya en este siglo, la teledetección se ha centrado en la continuación de programas previos y su mejora. Además, se cuentan con más de 30 años de observación continuada que permiten el almacenamiento de gran cantidad de datos a los que se puede acceder para futuros proyectos e investigaciones.

Además, se busca desarrollar tecnologías más avanzadas y métodos innovadores para una monitorización más efectiva, abordando desafíos emergentes como el cambio climático, la gestión de recursos naturales y planificación urbana.

## **2.2. Principios físicos**

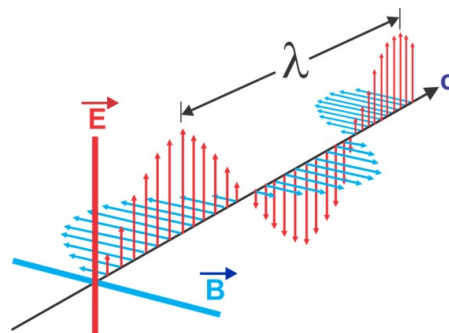
La teledetección se basa en los principios del electromagnetismo, el cual se define como la fuerza que une agrupaciones de átomos para constituir moléculas. Cada elemento presente en la superficie terrestre, ya sea vegetación, rocas, minerales, fauna, entre

otros, está compuesto por diversas moléculas y estructuras que poseen propiedades electromagnéticas únicas. Dentro de estas estructuras se incluyen los electrones, que circulan en órbitas específicas alrededor de un núcleo atómico y cuya cantidad está determinada por la carga eléctrica del núcleo, la cual, a su vez, depende del número de protones presentes. Cuando un electrón cambia de una órbita externa a una interna, puede emitir una partícula de luz llamada fotón, cuya longitud de onda está definida por las órbitas que atraviesa el electrón.

La capacidad de observación remota se debe a la interacción de la energía electromagnética con los objetos presentes en la superficie, también conocida como “radiación electromagnética”.

### 2.2.1. La radiación electromagnética

La energía electromagnética (EM) es una forma de energía que se propaga mediante ondas que se desplazan por el espacio a la velocidad de la luz ( $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ) de forma armónica y continua, conteniendo dos campos (eléctrico y magnético) ortogonales entre sí (*Imagen 1*). A diferencia de otros tipos de onda, como el sonido, esta se puede propagar en el vacío, sin necesidad de un medio material. Se caracteriza por longitudes de onda muy diferentes, que condicionan el comportamiento de la onda.



*Imagen 1. Propagación de la energía electromagnética*  
(Innovatione AgroFood Design, 2024)

El estudio de la radiación electromagnética se estudia desde el punto de vista de la física mediante dos enfoques principales: la teoría de las ondas y la teoría cuántica. Aunque tradicionalmente se consideraban teorías contrapuestas, actualmente son consideradas complementarias: se considera que la radiación EM posee una naturaleza dual, corpuscular y ondulatoria (F. Rasilla & Oria, 2009).

Según la teoría ondulatoria, atribuida al físico holandés Christian Huygens (1629 - 1695):

$$c \left( \frac{m}{s} \right) = \lambda (m) \cdot f (Hz) \quad (1)$$

Donde  $c$  es la velocidad de propagación de la luz,  $\lambda$  y  $f$  son la longitud de onda y la frecuencia respectivamente. A partir de esta fórmula puede deducirse que longitudes de

onda cortas tendrán altas frecuencias y, al contrario, ondas largas tendrán bajas frecuencias (Pérez Gañán & UVQ, 2019).

Sin embargo, esta no abarca todos los aspectos de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia. Para ello, se recurre a la teoría cuántica desarrollada por Max Planck (1858 – 1947), en la que se define la energía de un fotón como:

$$Q (J) = h (J \cdot s) \cdot f(Hz) \tag{2}$$

Donde Q es la cantidad de energía de un fotón, h es la constante de Planck, equivalente de  $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  y f es la frecuencia.

Por tanto, existe una relación entre ambas definiciones:

$$Q (J) = h (J \cdot s) \cdot f(Hz) = h (J \cdot s) \cdot \frac{c \left(\frac{m}{s}\right)}{\lambda (m)} \tag{3}$$

Analizando esta expresión, como se ha mencionado anteriormente se aprecia que las ondas electromagnéticas de alta frecuencia tienen una longitud de onda corta y, además, mucha energía. Como consecuencia, las ondas electromagnéticas de baja frecuencia tienen grandes longitudes de onda y poca energía, que aumentará la dificultad de que estas radiaciones sean detectadas.

### 2.2.2. El espectro electromagnético

Las radiaciones electromagnéticas se caracterizan por tener longitudes muy diferentes. Al campo completo de todas estas radiaciones se le llama espectro electromagnético. Este comprende desde la radiación de energía baja y frecuencia bajas que se desplaza en ondas largas (como las microondas o las ondas de radio) hasta la radiación de energía alta y frecuencia altas que se desplaza en ondas cortas (como los rayos X y los rayos gamma) (*Diccionario de Cáncer del NCI, 2024*).

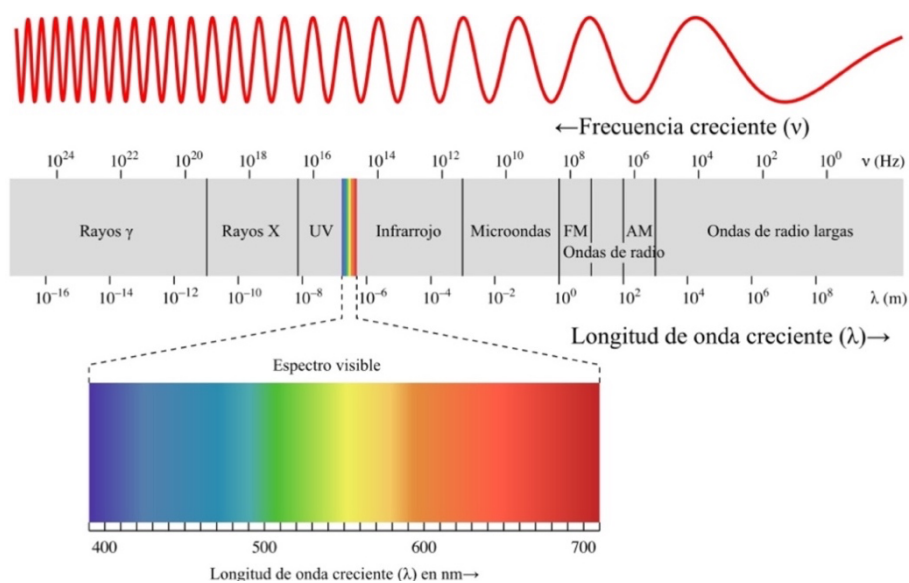


Imagen 2. Espectro electromagnético (Mato, 2018)



Dentro del espectro (*Imagen 2*), se distinguen una serie de regiones en función de su longitud de onda y aplicación. Entre estas, se distingue el rango visible, la porción del espectro electromagnético que puede ser captada por el ojo humano, siendo las longitudes de onda más largas asociadas al color rojo y las más cortas al violeta. Esta situación justifica el empleo de la teledetección: gran parte de la radiación presente no es perceptible para nuestros ojos, sin embargo, puede ser captada por algunos dispositivos.

Cada banda del espectro permite conocer elementos y objetos de la superficie terrestre, así como la caracterización de diferentes parámetros: químicos, térmicos, geométricos, nucleares. A continuación, en la *Tabla 1*, se muestra las aplicaciones más comunes de estas principales bandas.

En la *Tabla 1*, además, se puede apreciar la gran cantidad de información que proporciona el infrarrojo en teledetección. Su capacidad para penetrar la atmósfera, detectar temperatura, discriminar materiales, facilitar la visión nocturna y complementar la luz visible, lo convierten en un elemento esencial.

| <b>Banda espectral</b>                            | <b>Aplicaciones</b>   |
|---|---|
| Azul (0,45 – 0,5 $\mu\text{m}$ )                  | Penetración del agua, uso de la tierra, características de vegetación, sedimentos               |
| Verde (0,5 – 0,6 $\mu\text{m}$ )                  | Reflexión verde de la vegetación sana   |
| Rojo (0,6 – 0,7 $\mu\text{m}$ )                   | Discriminación de la vegetación por la absorción de la clorofila                                |
| Pancromático (0,5 – 0,75 $\mu\text{m}$ )          | Trazado del uso de la tierra  |
| Infrarrojo reflectivo (0,75 – 0,9 $\mu\text{m}$ ) | Biomasa identificación de cultivos, límites de tierra y agua                                    |
| Infrarrojo medio (1,5 – 1,75 $\mu\text{m}$ )      | Cantidad de vegetación, zonas áridas, nubosidad, hielo, nieve                                   |
| Infrarrojo medio (2 – 2,35 $\mu\text{m}$ )        | Geología, formación de rocas  |
| Infrarrojo térmico (10 – 12,5 $\mu\text{m}$ )     | Diferenciación temperatura, descargas térmicas, clasificación de la vegetación, inercia térmica |
| Microonda de onda corta (0,1 – 5 cm)              | Cubrimiento de la nieve, profundidades, contenido de agua en la vegetación                      |
| Microonda de onda larga (5 -24 cm)                | Medida del suelo, límites entre tierra y agua, penetración de la vegetación                     |

*Tabla 1. Principales bandas espectrales y sus aplicaciones (Rodríguez Chávez y Arredondo, 2005)*

La porción del espectro de interés más reciente para la teledetección es la región de microondas, que cubre las longitudes de ondas más largas utilizadas para la detección remota (desde aproximadamente 1 mm hasta 1 m). Estas longitudes de onda tienen la

particularidad de atravesar sin dificultad las nubes y penetrar ligeramente en la superficie terrestre (F. Rasilla & Oria, 2009).

### 2.2.3. Representación de imágenes satelitales

Los sensores capturan la imagen y almacenan esa información como un número digital, conocido como DN (Digital Number), en un rango de 0 a 255 (8 bits de resolución radiométrica). Este número representa la intensidad de la radiación electromagnética capturada directamente por el sensor en cada píxel de una imagen.

Para representar en medidas físicas la cantidad real de energía radiada por la superficie, se convierte el DN en radiancia. La radiancia es el flujo emitido captado por el sensor por unidad de superficie y por unidad de rango sólido ( $L(W/m^2/strad)$ ). Para poder pasar de DN a radiancia en unidades del sistema internacional, es necesario conocer las características del sensor que ha captado la imagen. Por ejemplo, para el caso del sensor ETM+ del Landsat 7, estas características vendrán especificadas en un fichero de metadatos .MTL\_txt, adjunto con las imágenes de las bandas al ser descargadas, con las que podremos realizar la conversión con la siguiente expresión:

$$L_{\lambda} = \frac{L_{\lambda_{MAX}} - L_{\lambda_{MIN}}}{Q_{CAL_{MAX}} - Q_{CAL_{MIN}}} (DN - Q_{CAL_{MIN}}) + L_{\lambda} \quad (4)$$

Donde los valores  $L_{\lambda_{MAX}}$ ,  $L_{\lambda_{MIN}}$ ,  $Q_{CAL_{MAX}}$  y  $Q_{CAL_{MIN}}$  aparecen en el fichero .MTL.txt como RADIANCE\_MAXIMUM\_BAND\_i, RADIANCE\_MINIMUM\_BAND\_i, QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_i y QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_i, respectivamente, siendo i cualquiera de las 8 bandas.

También se puede simplificar la ecuación anterior para dejarla en el siguiente formato:

$$L_{\lambda} = Gain * DN + Bias \quad (5)$$

Cuyos valores también aparecen en el fichero de metadatos .MTL.txt como RADIANCE\_MULT\_BAND\_i en el caso de Gain y RADIANCE\_ADD\_BAND\_i en el caso de Bias, siendo un valor distinto en cada una de las bandas.

Una vez calculada la radiancia, como paso opcional, podría aplicarse una corrección atmosférica si se dispone de valores locales de diferentes parámetros meteorológicos. La NASA ofrecía una página (<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov>) que suministraba valores de transmitancia, radiancia de subida y radiancia de bajada, desde el año 2000, pero dejó de ser operativa desde que son públicos los datos con la corrección atmosférica ya incluida (Level 2).

Usando estos valores, se podría aplicar la siguiente fórmula para conseguir unos valores de radiancia corregidos:

$$L_{\lambda 2} = \frac{L_{\lambda} - L_{up}}{\varepsilon \tau} - \frac{L_{\lambda} - \varepsilon}{\varepsilon} L_{down} \quad (6)$$

Donde  $L_{up}$  es la radiancia de subida,  $L_{down}$  es la radiancia de bajada,  $\varepsilon$  es la emisividad del suelo y  $\tau$  es la transmitancia.

Aun así, ambos valores, de radiancia obtenida y radiancia corregida no difieren mucho entre sí. En cambio, sí sería una corrección relevante en el caso de querer comparar el terreno en distintas fechas o en diferentes épocas del año. De lo contrario, todos los píxeles de una misma imagen sufren la misma corrección, por lo que la diferencia entre ellos seguiría siendo la misma.

Sin embargo, en el sector de la teledetección, la magnitud que más interesa es la reflectancia. La reflectancia es la relación entre el flujo reflejado y el incidente, es decir, la fracción de la radiación incidente que refleja una superficie en comparación con la radiación incidente total. Esta es una medida adimensional que permite caracterizar la superficie terrestre, ya sea suelo, vegetación, agua o cualquier otro elemento.

Se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{E_{sun,\lambda} * \text{sen}(\theta_{SE})} = A * L_{\lambda} \quad (7)$$

donde  $\rho_{\lambda}$  es la reflectancia para una determinada longitud de onda (adimensional y con valores entre 0 y 1),  $L_{\lambda}$  es la radiancia previamente calculada,  $d$  es la distancia Tierra-Sol (en unidades astronómicas),  $E_{sun,\lambda}$  es la irradiancia espectral emitida por el Sol en esa banda, y  $\theta_{SE}$  es el ángulo de elevación del Sol, que, en el caso de los demás datos procedentes del Landsat 7, también se encuentra en el fichero .MTL.txt como SUN\_ELEVATION.

En cuanto a la distancia de la Tierra al Sol, dependiente del día del año en que se tome la imagen, y la irradiancia espectral emitida por el Sol, dependiente de la banda usada, se pueden encontrar en la Tabla 6 y Tabla 4 de (Chander, 2009).

De esta forma se consigue eliminar los errores de la posición solar o la diferencia de cantidad de energía emitida por el Sol en cada banda, hecho que favorece la comparación entre distintas escenas y épocas del año.

A partir de estos datos, ya se puede hacer los estudios de la superficie terrestre deseados, como el índice de vegetación y la temperatura.

### 2.2.3.1. Temperatura

En el caso concreto de la temperatura, la reflectancia es una medida poco relevante. La Banda 6 del instrumento ETM+ del satélite Landsat 7, conocida como Infrarrojo Térmico, mide la radiación térmica emitida por la superficie terrestre. A diferencia de otras bandas espectrales que capturan la radiación solar reflejada, la Banda 6 detecta el calor emitido directamente por la superficie, sin una significativa influencia del Sol. Por tanto, en el cálculo de la temperatura no se utiliza la información de la reflectancia, sino la radiancia.

Tras haber convertido los DNs para las bandas térmicas a valores de radiancia, simplemente hay que aplicar la inversa de la función de Planck para obtener los valores de temperatura. La expresión para el instrumento ETM+ es:

$$T = \frac{1282,71}{\ln\left(\frac{666,09}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (8)$$

donde  $L_\lambda$  es la radiancia calculada anteriormente (o  $L_{\lambda 2}$  en el caso de haber hecho la corrección atmosférica), resultando en una temperatura en grados Kelvin.

### 2.2.3.2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), usado para evaluar la salud y la densidad de vegetación en un área determinada, se puede calcular a partir de los valores de reflectancia en las bandas roja (RED) e infrarrojo cercano (NIR) como:

$$\rho_\lambda = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (9)$$

Mediante esta ecuación se puede crear un nuevo canal (una nueva banda) en la imagen, cuyo contenido serían los valores NDVI píxel a píxel.

Teniendo en cuenta que la reflectancia (tanto para el NIR como para el rojo) puede tomar valores entre 0 y 1, el NDVI tomará valores entre -1 y 1, donde los valores negativos se suelen corresponder con agua. Los valores cercanos a cero (entre -0.1 y 0.1) suelen corresponder a áreas con suelos áridos, rocas, arena o nieve. Valores positivos bajos (entre 0.2 y 0.4) suelen representar arbustos y pastizales, mientras que valores altos cercanos a 1 indican bosques templados y tropicales.

Las plantas absorben radiación solar en la región espectral de radiación fotosintética activa, que utilizan como fuente de energía en el proceso de fotosíntesis. Sin embargo, las células vegetales han evolucionado para dispersar la radiación solar en la región espectral del infrarrojo cercano, que contiene aproximadamente la mitad del total de la energía solar. Esto se debe a que la energía por fotón en el infrarrojo cercano (de longitud de onda mayor a los 700 nm) no es suficiente para sintetizar las moléculas orgánicas: una fuerte absorción en este punto solo causaría un sobrecalentamiento de la planta que dañaría los tejidos. Por tanto, la vegetación aparece relativamente oscura en la radiación fotosintética activa y relativamente brillante en el infrarrojo cercano. En contraste, las nubes y la nieve tienden a ser bastante brillantes en el rojo como también en otras longitudes de onda visibles (mostrándose de color blanco), y bastante oscura en el infrarrojo cercano (debida a que el agua absorbe bien la radiación infrarroja). (Wikipedia, 2023).

## **2.3. Sensores y plataformas**

### **2.3.1. Características de los instrumentos: resolución**

La radiación (emitida o reflejada) de la superficie terrestre es un fenómeno continuo presente en cuatro dimensiones: espacio, tiempo, longitud de onda y radiancia). Un sensor debe ser capaz de muestrear ese continuo discretizándolo. Salvo en determinadas excepciones, se trabajará con ventanas atmosféricas y se seleccionará aquella combinación de regiones del espectro que mayor información puedan proporcionar sobre los fenómenos que se quieran estudiar. La forma en la que se lleva a cabo esta discretización determina los cuatro tipos de resolución con los que se trabaja en teledetección (Pérez Gañán & UVQ, 2019).

#### **2.3.1.1. Resolución espacial**

Define la capacidad del sistema para distinguir objetos en función de su tamaño. Es decir, la resolución espacial suele interpretarse como el tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen: el tamaño del píxel sobre el terreno. La resolución espacial dependerá de una serie de factores: a) la altura del sensor con respecto a la Tierra, b) el ángulo de visión, c) la velocidad de escaneado y d) las características ópticas del sensor (Pérez Gutiérrez y Muñoz Nieto, 2006).

#### **2.3.1.2. Resolución espectral**

Indica el número de canales espectrales y ancho de banda en los que el sensor puede captar radiación electromagnética. En principio, cuantas más bandas, más información puede obtenerse y, cuanto más estrechas, más capacidad de discriminación. Por tanto, el número de bandas y su localización en el espectro dependerán de los objetivos que se pretendan cubrir con la puesta en funcionamiento del sensor.

#### **2.3.1.3. Resolución radiométrica**

Hace referencia a la sensibilidad del sensor, es decir, la capacidad de este de distinguir entre diferentes niveles de intensidad de la radiación que recibe. Esta resolución está directamente relacionada con el número de bits que almacena un píxel, ya que define la cantidad de niveles de intensidad de radiación que puede representar. Un píxel de 8 bits, por ejemplo, puede almacenar  $2^8 = 256$  niveles de intensidad; en cambio, un píxel de 16 bits, puede almacenar  $2^{16} = 65536$  niveles. Por tanto, cuantos más bits se dediquen a un píxel, mayor será la resolución radiométrica del sensor.

#### **2.3.1.4. Resolución temporal**

Determina el tiempo en el que el sensor tarda en volver a visitar la misma zona de la superficie terrestre, es decir, la periodicidad en el que adquiere imágenes de la misma porción de la Tierra.

Esta temporalidad dependerá de la órbita que siga cada satélite. En el caso de METEOSAT, que sigue una órbita geosíncrona, la resolución temporal es de 15/30 min. En cambio, en el caso de LANDSAT 7, que sigue una órbita heliosíncrona, tarda 16 días en pasar por la misma zona terrestre.

### 2.3.2. Instrumentación de teledetección: tipos

Los sensores de teledetección son aquellos aparatos que disponen de la tecnología necesaria para capturar imágenes a distancia en diferentes bandas espectrales y que son transportados en una plataforma. Estos se dividen en dos categorías: los sensores pasivos y los sensores activos.

#### 2.3.2.1. Sensores pasivos

Los sensores pasivos son aquellos que recogen las radiaciones emitidas por los objetos o la superficie terrestre a partir de la energía solar. Por tanto, para usar los datos capturados por este tipo de sensor y poder llevar a cabo las correcciones necesarias, es necesario considerar las condiciones solares en el momento de la adquisición de la imagen.

Estos son el tipo de sensor más común para la teledetección relacionada con la vegetación, ya que hay algunas partes del espectro solar que proporcionan información muy útil para el monitoreo de las propiedades de la planta.

- **Instrumentos óptico-analógicos:** son aquellos que se usaban al principio de la teledetección sobre todo para las misiones aéreas o espaciales, que dependían de componentes ópticos, filtros y películas para capturar imágenes en un formato analógico. Las cámaras fotográficas podían adquirir imágenes en la banda pancromática e infrarrojo en escala de grises e imágenes a color (con tres emulsiones RGB). Además, también se usaban las cámaras de video, que no requerían película y permitían la grabación magnética de las imágenes.
- **Instrumentos óptico-electrónicos:** la radiancia recibida se descompone en varias longitudes de onda. Existen dos grandes tipos de los sistemas óptico-electrónicos: los radiómetros de barrido, que son más habituales en teledetección, y los radiómetros de empuje. Los primeros, disponen de un espejo móvil que oscila y envía información de franjas de terreno distintas con cada movimiento de dicho espejo. En cuanto a los radiómetros de empuje, disponen de una cadena de detectores que cubre todo el campo visual del sensor en vez de componentes móviles. Pero la calibración de todos los sensores resulta una tarea muy compleja que supone problemas para captar el infrarrojo.
- **Espectrómetros de imagen:** obtienen imágenes en un gran número de bandas espectrales (entre 64 y 200 bandas a intervalos de 10 - 20 nm) obteniendo un espectro casi continuo de radiación (Alonso Sarría, 2006). En este caso, también existen instrumentos tanto de barrido como de empuje. Para obtener imágenes de mayor resolución espacial se usan espectrómetros aerotransportados como

AVIRIS (Airbone Visible/Infra-Red Imaging Spectrometer) con 224 bandas de 0,4 a 2,5  $\mu\text{m}$  con píxeles de 4 a 20 m según la altura del avión.

- **Radiómetro de microondas:** sensores pasivos en la banda de microondas u ondas milimétricas (1 - 1000 GHz), compuestos por una antena que actúa como elemento receptor y amplificador de la señal (que es débil) y un detector. Estos tienen una baja resolución espacial limitada por el tamaño de la antena, pero resultan muy útiles para caracterizar superficies frías (hielo, nieve) o contenido de humedad en suelos o vegetación.

### **2.3.2.2. Sensores activos**

Los sensores activos son aquellos que emiten su propia energía y miden el retorno de esa energía al reflejarse en la superficie terrestre. Aunque ninguno de los satélites del programa Landsat contempla este tipo de instrumentos.

### **2.3.3. Satélites de teledetección**

Los satélites son la plataforma de teledetección más común que transporta los aparatos necesarios para captar, almacenar y transmitir imágenes a distancia (sensores). Existen dos tipos fundamentales de satélites dependiendo de su órbita: los geosíncronos y los heliosíncronos.

La órbita de un satélite es la trayectoria que recorre el satélite en el espacio alrededor de la Tierra, determinada por una serie de parámetros específicos. Estos parámetros incluyen: la altitud, que indica la distancia vertical entre el satélite y la superficie terrestre; la inclinación, que determina el ángulo entre el plano del ecuador terrestre y el plano de la órbita del satélite; y por último, el periodo orbital, que representa el tiempo que tarda el satélite en completar una órbita alrededor de la Tierra.

#### **2.3.3.1. Tipos según su órbita**

Los satélites geosíncronos se sitúan sobre el Ecuador en una órbita a 36000 km de la superficie terrestre y permanecen siempre en la vertical de un punto determinado acompañando a la Tierra en su movimiento de rotación, como Meteosat (Alonso Sarría, 2006). La órbita geoestacionaria, por ejemplo, es un caso particular de la órbita geosíncrona. Esta consiste en una inclinación de 0 grados, una altitud de 35786 km sobre el nivel del mar y un periodo orbital igual que el de la Tierra.

Los satélites heliosíncronos, en cambio, se desplazan en órbita generalmente circulares y polares (el plano de la órbita es casi paralelo al eje de rotación de la Tierra) de modo que, aprovechando el movimiento de rotación terrestre, puede captar imágenes de diferentes puntos cada vez que pase por el mismo punto de órbita (Alonso Sarría, 2006). Esta órbita se diseña de forma que el satélite pasa siempre sobre el mismo punto a la misma hora local, como es el caso de Landsat. Este tipo de satélite son un caso particular de órbita baja LEO, ya que tienen una altitud entre 400 y 1000 km.

### 2.3.3.2. Tipos según su aplicación

La teledetección, impulsada por la tecnología de los satélites y sus avanzados sensores, ha revolucionado por completo nuestra capacidad para entender y vigilar el planeta Tierra. Con el paso del tiempo, se han ido desarrollando satélites con aplicaciones más específicas, extendiendo su utilidad más allá del simple monitoreo terrestre.

A continuación, en la *Tabla 2*, se mencionan algunas aplicaciones específicas y ejemplos de satélites creados para dicha aplicación.

| <b>Aplicación</b>             | <b>Satélite</b>            |
|-------------------------------|----------------------------|
| Observación de la Tierra      | Landsat, SPOT              |
| Meteorológicos                | Meteosat, Tiros, Noaa      |
| Oceanográficos                | SEAWIFS, Envisat, Aquarius |
| Agricultura y silvicultura    | EOS SAT, Sentinel-2        |
| Protección del medio ambiente | Suomi NPP, Terra, Aura     |
| Geología                      | Aster, ALOS                |

*Tabla 2. Satélites de teledetección para aplicaciones específicas*



### 3. PROGRAMA LANDSAT

#### 2.1. Historia y evolución

El programa Landsat es un programa conjunto entre la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) que ofrece el catálogo más amplio de observaciones de la Tierra a nivel global (PNT, 2024). Con una serie de satélites que han orbitado nuestro planeta desde 1972, Landsat ha proporcionado un registro invaluable de los cambios en la superficie terrestre a lo largo de las décadas.

William Pecora, director del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), propuso en 1965 la idea de un programa de satélites de teledetección para recopilar datos sobre los recursos naturales de nuestro planeta.

Sin embargo, la propuesta de Landsat 1 creó cierta oposición debido a preocupaciones financieras, de seguridad y geopolíticas. A pesar de ello, en 1970 la NASA recibió luz verde para construir el satélite, y en sólo dos años Landsat 1 fue lanzado, siendo el primero de nueve, hasta el momento, y marcando el comienzo de la teledetección terrestre desde el espacio.

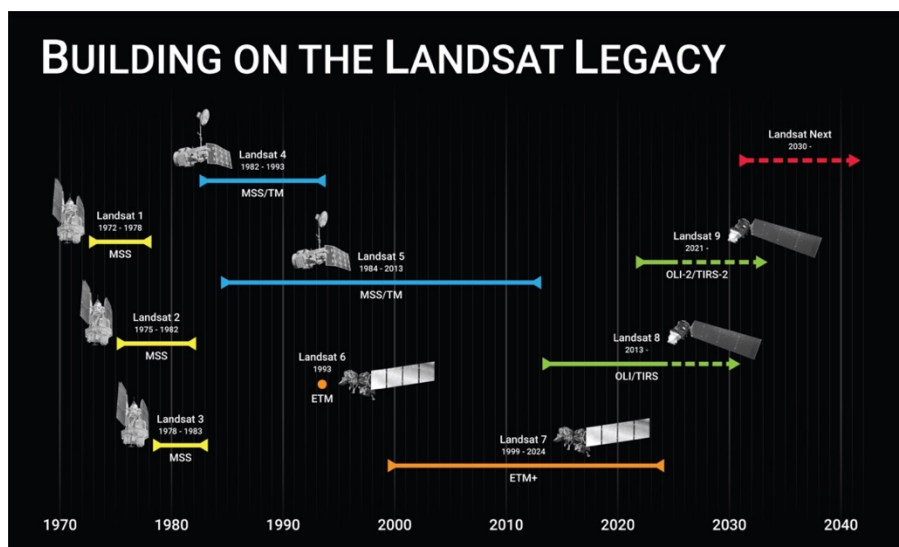


Imagen 3. Línea temporal del programa Landsat (Landsat NASA, 2022b)

Los primeros seis satélites establecieron las bases para el programa Landsat, proporcionando un registro continuo de la superficie terrestre desde 1972 hasta 1999. Cada nuevo satélite incorporó mejoras en la resolución espacial, cobertura espectral y la calidad de las imágenes, ampliando las capacidades del programa de observación y monitoreo de la Tierra.

Landsat-1, de órbita polar heliosíncrona, contaba con dos instrumentos: un sistema de tres cámaras llamadas RBV (Return Beam Vidicom) que capturaba imágenes en tres bandas espectrales con una resolución espacial de 80m y un MSS (Multispectral

Scanner), un radiómetro espectral de barrido en 4 bandas. Las cámaras RBV no funcionaron correctamente, por lo que en el Landsat-3 se sustituyen por una cámara pancromática de 40m de resolución espacial como apoyo al MSS. Landsat-2 y Landsat-3 continuaron la serie, con Landsat-3 agregando una quinta banda en el sistema MSS para capturar imágenes en el espectro de infrarrojo térmico.

La segunda generación de satélites, Landsat-4 y Landsat-5, mantuvo la órbita polar heliosíncrona y los MSS, eliminando las cámaras RBV y añadiendo el sensor de imágenes Landsat Thematic Mapper (TM), un radiómetro multiespectral de barrido de 7 bandas, que ofrecía mayor capacidad de captura de imágenes y una mejor resolución espacial. Sin embargo, el Landsat-6, lanzado 1993, se perdió debido a un fallo durante el lanzamiento.

A pesar de ese contratiempo, el programa Landsat perseveró y continuó con futuros proyectos para recopilar datos de la superficie terrestre.

## 2.2. Satélites

En esta sección del trabajo, se explicará de manera detallada la tercera generación de satélites Landsat, que continúan su misión en órbita en la actualidad. Se analizarán sus características, capacidades y contribuciones significativas a la teledetección.

### 2.2.1. Landsat 7

El Landsat-7 fue lanzado el 15 de abril de 1999, desde Western Test Range de la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg, California, en un vehículo de lanzamiento extensible Delta-II. Orbita a una altitud de 705 km con una inclinación de 98,2° respecto al plano de rotación terrestre y ofrece una cobertura repetida de la Tierra cada 16 días. Este difiere de sus predecesores al no contar con los sistemas MSS ni TM. En su lugar, utiliza el ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus).

| Banda | Nombre                      | Longitud de onda (µm) | Resolución espacial |
|-------|-----------------------------|-----------------------|---------------------|
| 1     | Azul                        | 0,441 – 0,514         | 30x30               |
| 2     | Verde                       | 0,519 – 0,601         | 30x30               |
| 3     | Rojo                        | 0,631 – 0,692         | 30x30               |
| 4     | Infrarrojo cercano (NIR)    | 0,772 – 0,898         | 30x30               |
| 5     | Infrarrojo corto 1 (SWIR-1) | 1,547 – 1,749         | 30x30               |
| 6     | Infrarrojo térmico (TIR)    | 10,31 – 12,36         | 60x60               |
| 7     | Infrarrojo corto 2 (SWIR-2) | 2,064 – 2,345         | 30x30               |
| 8     | Pancromática                | 0,515 – 0,896         | 15x15               |

*Tabla 3. Bandas espectrales de Landsat-7*

El ETM+ incluye características adicionales que lo convierten en un instrumento más versátil y eficiente para estudios de cambio global, monitoreo y evaluación de cobertura

terrestre, y mapeo de grandes áreas que sus predecesores en diseño (Landsat NASA, 2022). En la *Tabla 3* se aprecia que añade una banda pancromática con una resolución espacial de 15 metros y aumenta la resolución espacial de la banda 6 (infrarrojo térmico) a 60 metros. Además, contiene una calibración radiométrica absoluta del 5% y un grabador de datos a bordo.

En cuanto a características de las imágenes capturadas por Landsat-7, estas tienen una resolución radiométrica de 8 bits, por lo que consta de 256 niveles de radiación, y el tamaño de la imagen capturada es de 185x172 km.

Sin embargo, aunque sigue en estado operativo, desde 2003 presenta una avería en el corrector de alineamiento (SLC, Scan Line Corrector) del sensor ETM+, provocando que las imágenes capturadas en la banda 6 (infrarrojo térmico) no se alinean correctamente con las imágenes de las otras bandas. Aun así, sigue proporcionando datos que complementan a Landsat-8 y Landsat-9.

### 2.2.2. Landsat 8

Landsat-8 fue lanzado el 11 de febrero de 2013 desde la Base de Fuerza Aérea Vandenberg, California, en un cohete Atlas-V 401(Landsat NASA, 2022). Al igual que Landsat-7, orbita a una altitud de 705 km con una inclinación de 98,2° y ofrece una cobertura repetida de la Tierra cada 16 días. En cambio, a diferencia de su predecesor, cuenta con dos instrumentos científicos no utilizados con anterioridad: el Operational Land Imager (OLI), un radiómetro de empuje de más de 7000 detectores por banda, y un Thermal InfraRed Sensor (TIRS), otro sensor de empuje con mejor resolución espacial que en Landsat-7.

| Banda | Nombre                      | Longitud de onda (μm ) | Resolución espacial |
|-------|-----------------------------|------------------------|---------------------|
| 1     | Coastal                     | 0,435 – 0,451          | 30x30               |
| 2     | Azul                        | 0,452 – 0,512          | 30x30               |
| 3     | Verde                       | 0,533 – 0,590          | 30x30               |
| 4     | Rojo                        | 0,636 – 0,673          | 30x30               |
| 5     | Infrarrojo Cercano (NIR)    | 0,851 – 0,879          | 30x30               |
| 6     | Infrarrojo Corto 1 (SWIR-1) | 1,566 – 1,651          | 30x30               |
| 7     | Infrarrojo Corto 2 (SWIR-2) | 2,107 – 2,294          | 30x30               |
| 8     | Pancromática                | 0,503 – 0,676          | 15x15               |
| 9     | Cirrus                      | 1,363 – 1,384          | 30x30               |
| 10    | Infrarrojo térmico 1        | 10,30 – 11,30          | 100x100             |
| 11    | Infrarrojo térmico 2        | 11,50 – 12,50          | 100x100             |

*Tabla 4. Bandas espectrales de Landsat-8*

Mientras que OLI ofrece cobertura en nueve bandas espectrales, añadiendo al satélite anterior una banda por debajo del azul (coastal / aerosol) y una banda SWIR (Cirrus), TIRS recopila datos para dos bandas espectrales más estrechas en la región térmica.

Los datos de ambos instrumentos se combinan en un único producto con 12 bits de resolución radiométrica, con corrección atmosférica, radiométrica, geométrica y del terreno (Level 2).

En este caso, las imágenes capturadas por el satélite tienen un tamaño de 185x180 con una resolución radiométrica de 12 bits.

### **2.2.3. Landsat 9**

Landsat-9 fue lanzado el 27 de septiembre de 2021 y se encuentra en estado operativo desde el 6 de enero de 2022. Este tiene un diseño muy similar al de Landsat-8 e, incluso, se une en su órbita con un desfase de 8 días. Por tanto, combinando la información de ambos satélites se reduce el tiempo de visita a 8 días en lugar de 16.

Es decir, teniendo el Landsat-9 los mismos instrumentos que el Landsat-8, tanto OLI como TIRS, este último trabajará en las mismas bandas espectrales que su predecesor, mostradas en la *Tabla 4*. Además, al igual que Landsat-8, tiene una mayor capacidad de imagen que los satélites anteriores, lo que permite agregar datos más valiosos al archivo global de tierras, realizando unas 1400 imágenes al día.

## **2.3. Disponibilidad y acceso a los datos Landsat**

La misión Landsat, desarrollada y operada por agencias gubernamentales de los Estados Unidos como el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y la NASA, se erige como un ejemplo destacado de financiación pública en el ámbito espacial. Este compromiso con el financiamiento público garantiza que los datos recopilados por los satélites Landsat sean considerados un recurso público accesible para todos.

La difusión pública de esta información es fundamental, ya que fomenta la transparencia, la colaboración y la innovación científica a nivel global. Al permitir que investigadores, científicos, estudiantes y ciudadanos utilicen estos datos, se promueve el desarrollo de soluciones sostenibles para abordar problemas mundiales. Este acceso libre no solo impulsa avances científicos y significativos en diversos campos, sino que también promueve la educación y la divulgación científica, aumentando la comprensión pública de la Tierra y sus sistemas.

Existen varias plataformas en línea que ofrecen acceso a imágenes Landsat, siendo tres de las más recomendadas GLOVIS (<https://glovis.usgs.gov>), Earth Explorer del USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>), y el Global Land Cover Facility (GLCF, <http://www.landcover.org>) de la Universidad de Maryland. Los primeros sitios, GLOVIS y Earth Explorer, son especialmente completos, proporcionando datos Landsat desde los años 70. Por otro lado, el GLCF ofrece imágenes de alta calidad, como las GeoCover, que son seleccionadas por su menor cobertura de nubes y su precisión ortogeoreferencia.

## **2.4. Futuro del programa Landsat**

El programa Landsat pretende seguir avanzando en la observación, análisis y comprensión de nuestro planeta. Para ello, proponen una nueva misión llamada Landsat Next.

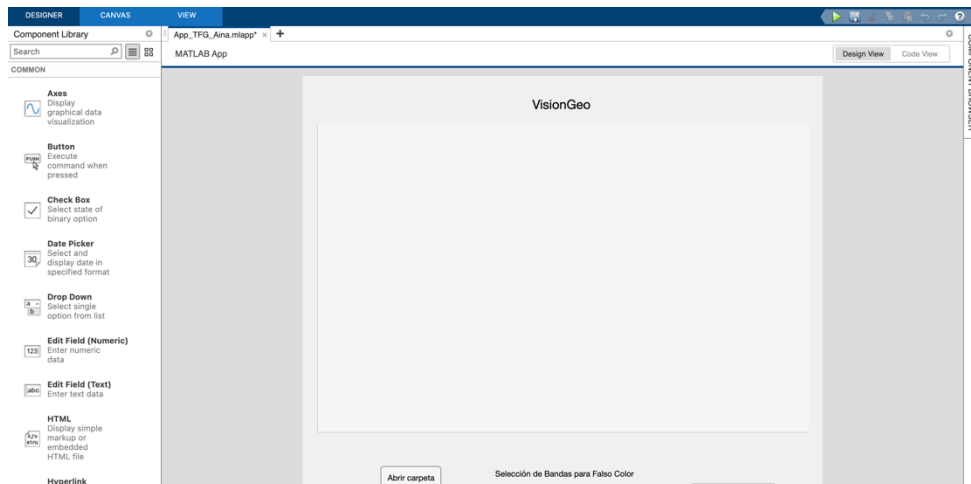
Landsat Next, programado para ser lanzado a finales de la década de 2030, representa una evolución significativa en las capacidades de observación de la Tierra. En la próxima misión promete no solo mantener el legado perdurable del extenso registro de la superficie terrestre de Landsat, sino que también revolucionar el alcance y la accesibilidad de los datos accionables para los usuarios finales. Con mejoras anticipadas en la resolución temporal, espacial y espectral, potencialmente duplicando o triplicando las capacidades actuales, Landsat Next trascenderá los límites de su predecesor, empoderando a los usuarios con perspectivas sin precedentes sobre los procesos dinámicos de la Tierra (Landsat NASA, 2022).

Esta nueva misión representará un salto cuánto en capacidades de medición. La mejorada resolución temporal y espacial de la nueva constelación superespectral de 26 bandas de Landsat Next mejorará aplicaciones existentes y desbloqueará nuevas que apoyan evaluaciones de calidad del agua y salud acuática, producción agrícola y conservación del suelo, etc. También contará con una banda de vapor de agua que permitirá la corrección atmosférica sin datos auxiliares de otros satélites.

Esta próxima misión consistirá en una constelación de tres observatorios satelitales idénticos, cada uno equipado con una Suite de Instrumentos Landsat Next (LandIS) que adquirirán datos de casi todas las bandas de forma simultánea. Estos observatorios estarán espaciados 120 grados entre sí en una órbita heliosíncrona alrededor del Sol, a una altitud de 653 km. Con un diseño que permite una resolución espacial de 10-20 metros en el visible, el infrarrojo cercano y el infrarrojo corto, y de 60 metros en las bandas atmosféricas y térmicas.

## 4. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN

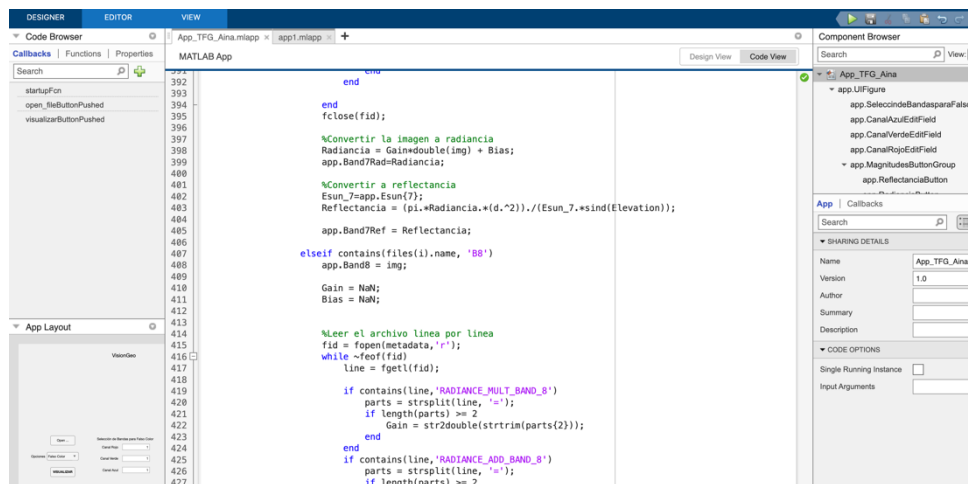
Una vez completado el estudio previo y establecidas las bases teóricas necesarias para el correcto funcionamiento de la aplicación, se inició el proceso de desarrollo. Para ello, se utilizó la herramienta de desarrollo App Designer de Matlab, que permite el diseño de una interfaz gráfica mediante dos vistas estrechamente vinculadas entre sí: una vista de diseño de la aplicación (*Imagen 4*) y una vista con el código (*Imagen 5*). Por tanto, aquel usuario que desee utilizar esta aplicación deberá disponer de una licencia de Matlab.



*Imagen 4. Vista de la interfaz de la aplicación en App Designer*

En esta vista, además, es donde se añaden todos los elementos y componentes que se desean en la interfaz de tu aplicación. En el lado izquierdo de la *Imagen 4*, se pueden ver algunos de los elementos disponibles que se pueden incorporar a la pantalla principal simplemente arrastrándolos hacia esta y colocándolos en la posición deseada, según las funciones que va a realizar la aplicación.

En la siguiente vista (*Imagen 5*), sin embargo, es la parte del programa que contiene tanto el código generado automáticamente al añadir objetos nuevos en la vista del diseño, como el Code Editor, donde se construye el código y las funcionalidades de la aplicación.



*Imagen 5. Vista del código de la aplicación en App Designer*

En esta sección, también se pueden ver a la izquierda el Code Browser, en el que se muestra un listado de callbacks, las funciones relacionadas con los botones de la interfaz. A la derecha, aparece el Component Browser, una lista de todos los elementos ordenados en tu aplicación y el nombre por el que se les identifica y con el que se tiene que hacer referencia a ellos en la implementación.

## 2.1. Diseño de la interfaz de la aplicación

El primer paso, fue determinar qué funciones se deseaba que tuviera la aplicación para poder diseñar una interfaz acorde con las acciones que iba realizar. La idea general era que a partir de unas imágenes satelitales de Level 1, la aplicación realizara las correcciones correspondientes internamente dependiendo del día en que fueron tomadas esas imágenes y el usuario pudiera elegir entre visualizar:

- Imágenes en color verdadero
- Imágenes en falso color creada por distintas bandas espectrales a libre elección
- Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)
- Mapa de temperatura

Uno de los objetivos principales de la interfaz de la aplicación es que fuera intuitiva y transparente para el usuario. Por ello, se decidió que todas las acciones disponibles se presentaran en la pantalla principal en lugar de ventanas emergentes, de modo que el usuario pueda ver y acceder a todas sus opciones de primeras.

Como en todas las aplicaciones, esta necesitaba un sello de identidad para su fácil reconocimiento como es el nombre. Tras considerar varias opciones, se optó por “VisionGeo”, que refleja adecuadamente el propósito de la aplicación.

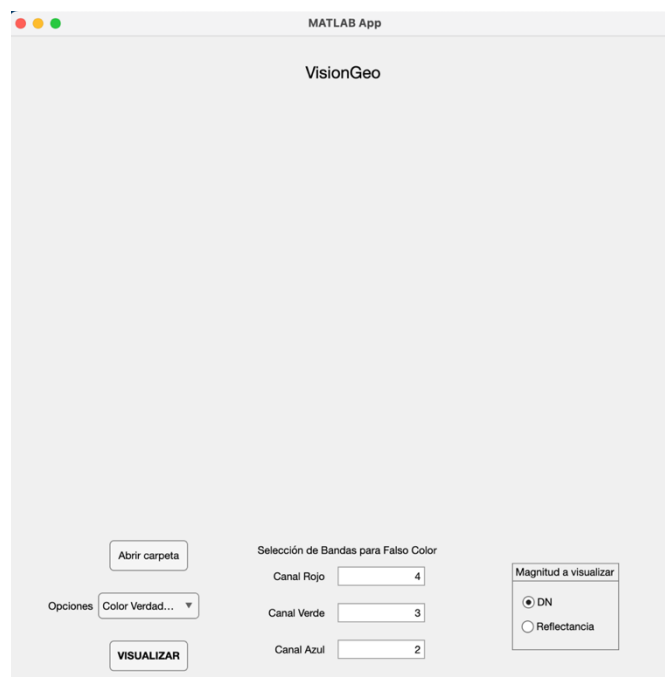


Imagen 6. Interfaz de la aplicación VisionGeo

La interfaz (*Imagen 6*) se divide en cuatro secciones. La primera, el espacio central, es donde se visualizará la imagen según la opción elegida. Seguidamente, la sección de abajo a la izquierda. Aquí se encuentra el botón *Abrir carpeta* para elegir la carpeta en la que se encuentran las imágenes satelitales en diferentes bandas con el fichero .MTL.txt de metadatos, un desplegable *Opciones* con las opciones de visualización (*Imagen 7*) y el botón *VISUALIZAR*, que se debe pulsar para que la imagen aparezca en pantalla.



*Imagen 7. Opciones de visualización de las imágenes satelitales*

La sección central inferior es la *Selección de Bandas para Falso Color* en las que se puede elegir qué bandas se desean en cada canal para formar una imagen en falso color. Por último, la sección de *Magnitud a visualizar*, en la parte inferior izquierda. En esta, el usuario puede elegir con qué magnitud prefiere trabajar según sus intereses, si DN o Reflectancia.

## 2.2. Implementación de la aplicación

El código de la aplicación empieza con el nombre del archivo .mlapp definido como `classdef` seguido de la declaración de propiedades (`properties`) tanto públicas como privadas.

Una vez creados los componentes y se pone en marcha la aplicación, se ejecuta el siguiente código:

```
function startupFcn(app)

    app.OpcionesDropDown.Items = {'Color Verdadero', 'NDVI', 'Falso Color', 'Temperatura'};

    temp=load('distance_Earth-Sun-UA.mat');
    app.distancia=temp.distancia;

    % Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote Sensing Of Environment, 113(5), 893-903. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007
    app.Esun= {1995, 1812, 1533, 1039, 230.8, NaN, 84.90, 1362};

    %Bandas de falso color por defecto
    app.CanalRojoEditField.Value = 4;
    app.CanalVerdeEditField.Value = 3;
    app.CanalAzulEditField.Value = 2;

end
```



Es decir, lo primero que hace la aplicación al iniciarse es: establecer las cuatro opciones de disponibles en el DropDown y cargar los datos de la distancia Tierra-Sol del archivo *distance\_Earth-Sun\_UA.mat* y almacenarlos en la propiedad *app.distancia*. Seguidamente, se definen los valores de irradiancia espectral emitida por el Sol (*Esun*) para cada una de las bandas y define las bandas por defecto usadas en el falso color las bandas 4-3-2 para el canal rojo, verde y azul, respectivamente.

El código que se ejecuta al pulsar el botón de *Abrir carpeta*, se divide en dos partes: la primera te permite elegir la carpeta con la que se desea trabajar y busca algunos datos ríossarios para la segunda parte, que consiste en las correcciones correspondientes para cada una de las bandas.

```
function open_fileButtonPushed(app, event)
    folder = uigetdir ('Seleccione la carpeta');
    if folder == 0
        return;
    end

    Elevation = NaN;

    %Leer el archivo de metadatos
    metadataFile = dir(fullfile(folder, '*_MTL.txt'));
    if ~isempty(metadataFile) %si metaFile no está vacío
        metadata =
fullfile(metadataFile(1).folder,metadataFile(1).name); %Lee y analiza

        %Extraemos la fecha del fichero MTL.txt
        fid = fopen(metadata,'r');
        while ~feof(fid)
            line = fgetl(fid);

            if contains(line,'DATE_ACQUIRED')
                parts = strsplit(line, '=');
                if length(parts) >= 2
                    fecha = strtrim(parts{2});
                end
            end

            if contains (line,'SUN_ELEVATION')
                parts = strsplit(line, '=');
                if length(parts) >= 2
                    Elevation = str2double(strtrim(parts{2}));
                end
            end
        end

        year=fecha(1:4);
        firstday=[year '-01-01'];
        dia=days(datetime(fecha)-datetime(firstday))+1;
        day = find(app.distancia.Var1 == dia);
        d = app.distancia.Var2(day);
    else
        errordlg('No se encuentra el archivo');
        return;
    end
end
```

En esta primera parte, el código permite al usuario elegir la carpeta que contiene las imágenes con las que quiere trabajar. Una vez elegida esta carpeta, el programa busca el archivo .MTL.txt de metadatos, del que quiere extraer la fecha en la que fue tomada la imagen y la elevación del Sol, guardándolos en las variables *fecha* y *Elevation*, respectivamente. A partir de la fecha, se calcula qué día del año es esa fecha concreta, para poder determinar a qué distancia estaban el Sol y la Tierra ese día, dato que necesitamos para las correcciones en la segunda parte del código.

La segunda parte del código, como ya se ha mencionado, consiste en las correcciones correspondientes para cada una de las ocho bandas:

```
%Leer y enumerar todos los archivos .tif de la carpeta
files = dir (fullfile (folder, '*.tif'));

%Asignar cada archivo a la banda correspondiente
for i = 1:length (files)
    filepath = fullfile (files(i).folder, files(i).name);
    img = imread(filepath);

    if contains(files(i).name, 'B1')
        app.Band1 = img;

        Gain = NaN;
        Bias = NaN;

        fid = fopen(metadata, 'r');
        while ~feof(fid)
            line = fgetl(fid);

            if contains(line, 'RADIANCE_MULT_BAND_1')
                parts = strsplit(line, '=');
                if length(parts) >= 2
                    Gain = str2double(strtrim(parts{2}));
                end
            end
            if contains(line, 'RADIANCE_ADD_BAND_1')
                parts = strsplit(line, '=');
                if length(parts) >= 2
                    Bias = str2double(strtrim(parts{2}));
                end
            end
        end

        end
        fclose(fid);

        %Convertir la imagen a radiancia
        Radiancia = Gain*double(img) + Bias;
        app.Band1Rad=Radiancia;

        %Convertir a reflectancia
        Esun_1=app.Esun{1};
        Reflectancia =
        (pi.*Radiancia.*(d.^2))./(Esun_1.*sind(Elevation));
        app.Band1Ref = Reflectancia;
```

Esta segunda parte, hace una lista de todos los archivos .tif que hay en la carpeta especificada y los recorre para asignar cada archivo a la banda correspondiente. En

este caso, se hace con la banda 1. Si el nombre del archivo contiene B1, esta imagen se guarda en la propiedad `app.Band1`, que corresponde con la magnitud de Digital Number. Entonces, inicia las variables `Gain` y `Bias`, donde se guardará el valor de `RADIANCE_MULT` y `RADIANCE_ADD` de dicha banda extraído del archivo de metadatos. Una vez encontrados estos valores, se hace la conversión a Radiancia y Reflectancia, correspondientes con las ecuaciones (5) y (7), respectivamente, y se guardan en las propiedades `app.Band1Rad` y `app.Band1Ref`.

Este proceso se repite en todas las bandas, utilizando sus respectivos valores de `Gain` y `Bias`, excepto en la banda 6 de infrarrojo térmico. En la carpeta de las imágenes, hay dos correspondientes a esta banda. Se ha seleccionado una de ellas (`VCID_1`) para realizar los cálculos, ya que los resultados no verían entre una imagen y la otra. En esta banda, se calcula la radiancia, pero no la reflectancia. Esto se debe a que la radiación recibida en la banda de infrarrojo térmico proviene casi exclusivamente del calor de la superficie, por lo que calcular la reflectancia es innecesario.

Además, al final del código de *Abrir carpeta*, se añaden las siguientes líneas de código para que, por defecto, al cargar las imágenes, se visualice directamente DN en color verdadero:

```
app.DNButton.Value=true;
app.OpcionesDropDown.Value='Color Verdadero';
visualizarButtonPushed(app);
```

Por último, al pulsar el botón de *Visualizar* se ejecuta el callback *visualizarButtonPush*. En este caso, podemos dividir este código en cuatro partes, dependiendo de la opción de visualización elegida. En el caso de que la opción elegida sea Color Verdadero:

```
case 'Color Verdadero'
    switch app.MagnitudavisualizarButtonGroup.SelectedObject.Text
        case 'DN'
            ColorVerdadero = cat(3, app.Band3, app.Band2,
app.Band1); %combina las tres bandas
        case 'Reflectancia'
            ColorVerdadero = cat(3, app.Band3Ref, app.Band2Ref,
app.Band1Ref); %combina las tres bandas
    end

    imshow(ColorVerdadero, [], 'Parent', app.imag_orig_view);
    %muestra la imagen en la interfaz
```

Además, hay que tener en cuenta con cuál de las magnitudes desea el usuario visualizar la imagen. Es decir, si la opción elegida es 'Color Verdadero', verifica cuál de las magnitudes está seleccionada. En el caso de DN, combina la banda 3-2-1 (Rojo-Verde-Azul) guardadas en las propiedades correspondientes al DN. De lo contrario, combina las mismas bandas, pero guardadas en las propiedades correspondientes a la Reflectancia. Estas últimas habrán sido corregidas por la aplicación.

Por tanto, a diferencia de la idea principal, en la que la aplicación transformaba de forma interna los datos en formato DN (Level 1) a unidades de Reflectancia (Level 2), ahora el usuario puede elegir si quiere visualizar la imagen en una u otra magnitud.

En el caso de que la opción elegida sea NDVI:

```
case 'NDVI'

    % añadimos eps al denominador para evitar posibles divisiones
    % por cero
    ndvi = (double(app.Band4Ref) - double(app.Band3Ref)) ./
    (double(app.Band4Ref) + double(app.Band3Ref)+eps);

    % definimos el mapa de colores para representación de NDVI.
    Tomado de aquí: https://custom-scripts.sentinel-
    hub.com/sentinel-2/max\_ndvi/

    ndvi_colors=[0 0 0; 0.75 0.75 0.75; 0.86 0.86 0.86; 1 1 0.88; 1
    0.98 0.8; 0.93 0.91 0.71; 0.87 0.85 0.61; 0.8 0.78 0.51; 0.74 0.72
    0.42; 0.69 0.76 0.38; 0.64 0.8 0.35; 0.57 0.75 0.32; 0.5 0.7 0.28;
    0.44 0.64 0.25; 0.38 0.59 0.21; 0.31 0.54 0.18; 0.25 0.49 0.14; 0.19
    0.43 0.11; 0.13 0.38 0.07; 0.06 0.33 0.04; eps 0.27 eps];

    ndvi_valores=[-1; -0.2; -0.1; 0; 0.025; 0.05; 0.075; 0.1; 0.125;
    0.15; 0.175; 0.2; 0.25; 0.3; 0.35; 0.4; 0.45; 0.5; 0.55; 0.6; 1];

    N=128; % escala de 128 colores.

    % interpolamos los 21 colores para ajustarlos a los 21 valores.
    De esta forma tenemos N=128 colores equiespaciados entre -1 y 1:

    ndvi_map=interp1(ndvi_valores,ndvi_colors,linspace(-
    1,1,N),'pchip');

    % solamente representamos valores válidos (entre -1 y 1)
    imshow(ndvi, [-1 1], 'Colormap',ndvi_map,'Parent',
    app.imag_orig_view);
    c=colorbar(app.imag_orig_view);
    c.Label.String = 'NDVI';
```

Este es el código que se ejecuta al pulsar el botón de Visualizar en el caso de que la opción seleccionada por le usuario sea NDVI. Primero, calcula el índice a partir de la ecuación (9), usando las bandas almacenadas en las propiedades correspondientes a la reflectancia. Después se define un mapa de 21 colores en formato RGB para representar NDVI y también 21 valores del índice correspondientes a los colores definidos anteriormente. Seguidamente, se interpolan estos valores para obtener una escala de N=128 colores equiespaciados entre -1 y 1.

En cambio, si la opción de visualización elegida es el Falso Color, aparte de considerar la magnitud con la que desea trabajar el usuario, también se tiene en cuenta con qué bandas desea formar el falso color. Por tanto, se guardan los números indicados en las variables *canalrojo*, *canalverde* y *canalazul* (definidas como valores enteros del 1 al 8) y, según la magnitud seleccionada, se muestra la combinación de esas bandas en pantalla.

```

case 'Falso Color'

canalrojo = app.CanalRojoEditField.Value;
canalverde = app.CanalVerdeEditField.Value;
canalazul = app.CanalAzulEditField.Value;

    switch app.MagnitudavisualizarButtonGroup.SelectedObject.Text

        case 'DN'
            seleccion = {app.Band1, app.Band2, app.Band3,
app.Band4, app.Band5, app.Band6, app.Band7, app.Band8};

        case 'Reflectancia'
            seleccion = {app.Band1Ref, app.Band2Ref,
app.Band3Ref, app.Band4Ref, app.Band5Ref, NaN, app.Band7Ref,
app.Band8Ref};
        end

FalsoColor = cat(3, seleccion{canalrojo}, seleccion{canalverde},
seleccion{canalazul});

imshow(FalsoColor, 'Parent', app.imag_orig_view);

```

Por último, se tiene el caso de que la opción a visualizar elegida sea el mapa de temperatura. Para ello, se hace el cálculo de la temperatura en grados Kelvin a partir de la radiancia con la ecuación (8) y se muestran los valores desde -10°C a 50°C, utilizando el mapa de colores 'jet', junto con la barra de colores correspondiente a la escala de temperaturas.

```

case 'Temperatura'

% Despreciamos la corrección atmosférica
Radianciacorregida=app.Band6Rad;

% Eliminamos posibles valores negativos o iguales a 0 y le
asignamos el valor eps para que no dé problemas al invertir
outofrange=Radianciacorregida<=0;
Radianciacorregida(outofrange)=eps;

invrad=Radianciacorregida.^-1;
denom=log(666.09*invrad+1);
invdenom=denom.^-1;
TempK=1282.71*invdenom;

% Pasamos a centígrados
TempC=TempK-273.15;

% Representamos valores desde -10°C hasta 50°C
imshow(TempC, [-10 50], 'Colormap',jet,'Parent',
app.imag_orig_view);
c=colorbar(app.imag_orig_view);
c.Label.String = '°C';

end

```

Además, debido a la decisión de que el usuario pueda elegir con qué magnitud desea visualizar la imagen, se ha añadido un nuevo callback llamado *App.OpcionesDropDownValueChanged*. Este nuevo callback es para deshabilitar la opción de *Selección de bandas para Falso Color* en caso de que no sea la opción de visualización elegida o la opción de Magnitudes a visualizar, si la opción elegida no tiene más remedio que verse con una u otra magnitud.

```
function OpcionesDropDownValueChanged(app, event)
    value = app.OpcionesDropDown.Value;

    switch value
        case 'Color Verdadero'
            app.CanalRojoEditField.Enable='off';
            app.CanalVerdeEditField.Enable='off';
            app.CanalAzulEditField.Enable='off';

            app.MagnitudavisualizarButtonGroup.Visible="on";

        case 'NDVI'
            app.CanalRojoEditField.Enable='off';
            app.CanalVerdeEditField.Enable='off';
            app.CanalAzulEditField.Enable='off';

            app.MagnitudavisualizarButtonGroup.Visible="off";

        case 'Falso Color'
            app.CanalRojoEditField.Enable='on';
            app.CanalVerdeEditField.Enable='on';
            app.CanalAzulEditField.Enable='on';

            app.MagnitudavisualizarButtonGroup.Visible="on";

        case 'Temperatura'
            app.CanalRojoEditField.Enable='off';
            app.CanalVerdeEditField.Enable='off';
            app.CanalAzulEditField.Enable='off';

            app.MagnitudavisualizarButtonGroup.Visible="off";

    end
end
```

De esta forma, la opción de *Selección de Bandas para Falso Color* solo está activa en el caso de que la opción seleccionada sea *Falso Color* y la elección de magnitudes, solo en el caso de *Falso Color* y *Color Verdadero*, ya que en el caso de *NVDI* se muestra la reflectancia y en el caso de *Temperatura*, la temperatura calculada con la radiancia.

La implementación del código debería haber terminado aquí, pero al realizar las pruebas, se observó que las imágenes en reflectancia se veían muy oscuras. Por ese motivo, se decidió añadir una nueva opción en *Magnitud a visualizar* llamada *Reflectancia (eq.)*, en la que el usuario puede visualizar la imagen en reflectancia ecualizada para que no se vea tan oscura. Para ello, se ha añadido el siguiente código en *visualizarButtonPush* para el caso de *Color Verdadero* y *Falso Color*, respectivamente:

```
case 'Reflectancia (eq.)'
```

```
    ColorVerdadero = rescale(cat(3, app.Band3Ref, app.Band2Ref,  
app.Band1Ref));
```

```
case 'Reflectancia (eq.)'
```

```
    seleccion = {app.Band1Ref, app.Band2Ref, app.Band3Ref,  
app.Band4Ref, app.Band5Ref, NaN, app.Band7Ref, app.Band8Ref};
```

```
    FalsoColor = cat(3, imadjust(seleccion{canalrojo}),  
imadjust(seleccion{canalverde}), imadjust(seleccion{canalazul}));
```

Es decir, en el caso de que la magnitud elegida sea la reflectancia ecualizada, el código ajusta las bandas en reflectancia con *rescale*, en Color Verdadero, y *imadjust*, en Falso Color, para enseñarlas en pantalla.

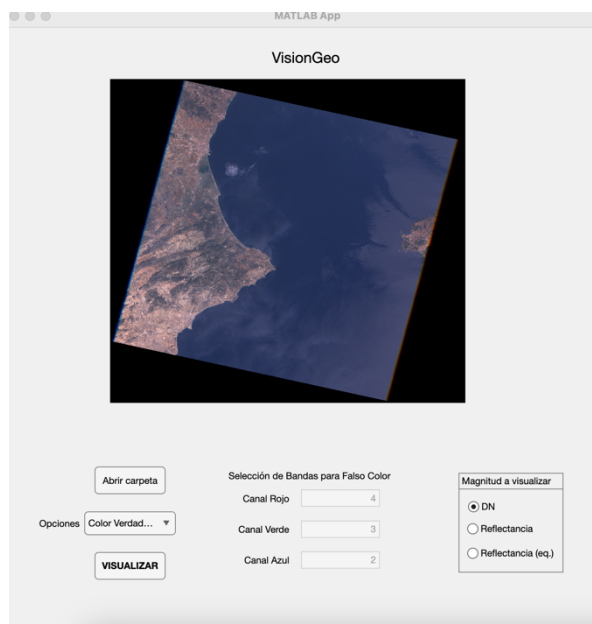
## 5. PRUEBAS Y RESULTADOS

En esta sección, se realizan una serie de pruebas de la aplicación para demostrar su correcto funcionamiento. Para ello, se ha utilizado la versión R2022b de Matlab y una carpeta de imágenes capturadas por el satélite Landsat 7 utilizando el instrumento ETM+, que proporciona imágenes de las bandas indicadas en la *Tabla 3*. En este caso, las imágenes corresponden al día 152 del año 2001, es decir, día 1 de julio de 2001 en la región de la Comunidad Valenciana, España.

A continuación, se proporcionan las imágenes obtenidas para cada una de las opciones de visualización de la aplicación desarrollada para las imágenes de prueba seleccionadas:

### 2.1. Color Verdadero

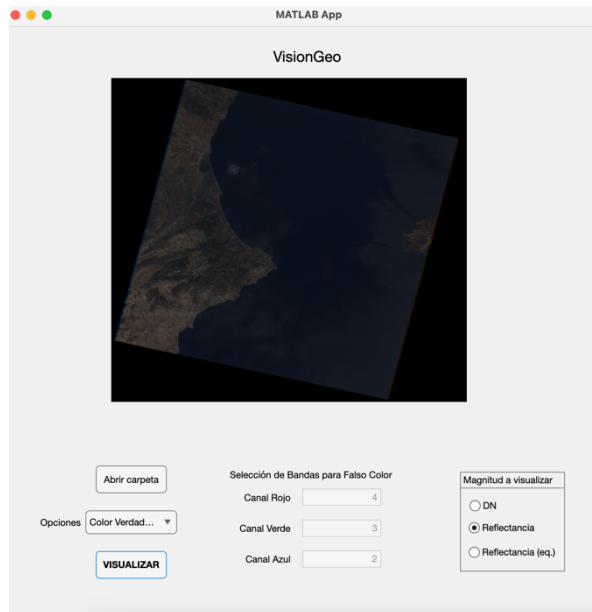
En el primer caso, y como imagen por defecto al seleccionar la carpeta, se muestra la imagen de la zona en color verdadero en DN con la opción de *Selección de Bandas para Falso Color* deshabilitada. Es decir, la combinación de las bandas 3, 2 y 1 como canal rojo, verde y azul.



*Imagen 8. Visualización en Color Verdadero utilizando DN*

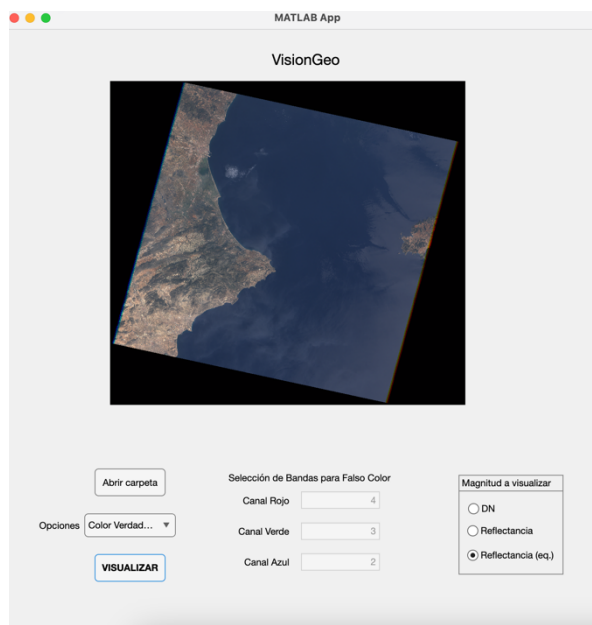
En la *Imagen 8* se representa una vista aproximada de cómo se vería la escena capturada a simple vista obtenidos directamente del sensor (valores DN), siendo los colores similares a los que percibe el ojo humano. Por tanto, la vegetación se ve en tonos verdes, el agua en tonos azules, el suelo en tonos marrones y las áreas urbanas en tonos más grises.





*Imagen 9. Visualización en Color Verdadero utilizando Reflectancia*

En este caso, al elegir visualizarla con la magnitud de Reflectancia, la imagen sigue representando una vista aproximada a lo que vería el ojo humano, pero más oscura debido a las correcciones realizadas. Por ello y para mejorar su visualización, se ha agregado la opción de ecualizar la imagen en reflectancia (*Imagen 10*).



*Imagen 10. Visualización en Color Verdadero utilizando Reflectancia (eq.)*

## 2.2. Falso Color

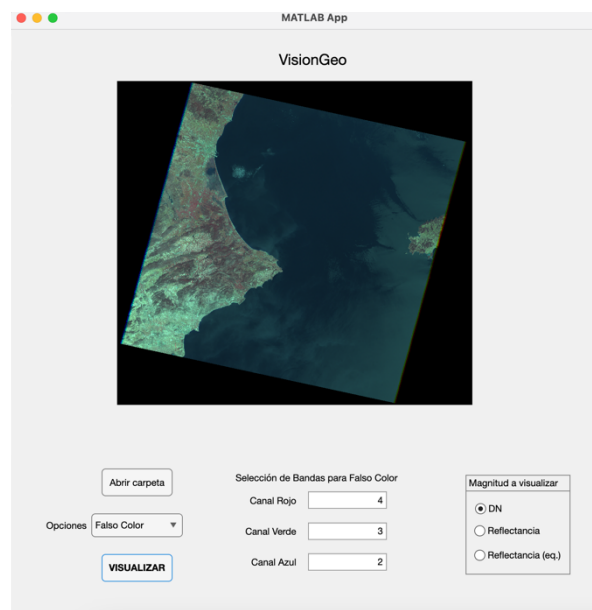
Las imágenes en falso color son aquellas que se producen utilizando diferentes combinaciones de bandas, según el tipo de objetos que deben detectarse en la imagen.

En la *Tabla 5*, se indican algunas de las combinaciones en falso color más comunes y su uso.

| Bandas  | Uso  |
|---------|--|
| 3, 2, 1 | Estudios urbanos y detección de sedimentos de agua<br>Combinación de bandas de color más natural.  |
| 4, 3, 2 | Detectar vegetación:<br>Vegetación= tonos rojizos; áreas urbanas = tonos azul claro;<br>suelos = marrones claros a oscuros<br>Ayuda a distinguir el agua clara (azul oscuro) del agua turbia (cian). |
| 5, 4, 3 | Vegetación = tonalidades de verde; áreas urbanas y suelo expuesto = tonos rosados; agua = negro.   |
| 4, 5, 3 | Vegetación = tonos marrones verdes y amarillos; áreas urbanas = azul claro; agua = azul oscuro.  |
| 7, 4, 2 | Vegetación = tonos verdes; áreas con vegetación dispersa =tonos anaranjados o marrones; vegetación seca= naranja; áreas urbanas = magenta;   |
| 7, 5, 3 | Común en geología:<br>Superficies calientes= rojo o amarillo; agua = azul oscuro a negro; vegetación = tonos verdes; áreas deforestadas recientemente = azul brillante.                              |

*Tabla 5. Combinaciones comunes en falso color, uso e interpretación (Jiménez, 2024)*

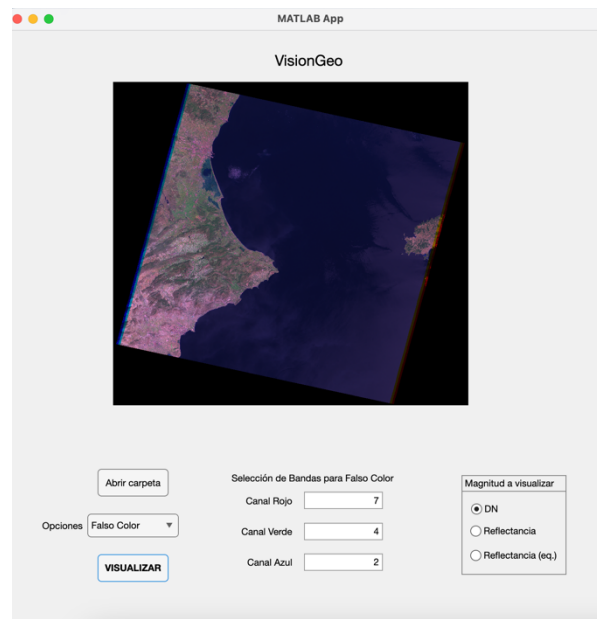
La aplicación representa por defecto la combinación de 432 en DN, que se usa habitualmente para detectar vegetación, mostrando la siguiente imagen:



*Imagen 11. Visualización en Falso Color con bandas 432 utilizando DN*

En este caso, al asignar la banda 4 (infrarrojo cercano) al color R en RGB, la vegetación aparecerá en tonos rojizos. Si comparamos la imagen en falso color 432 con la Imagen 8 de Color Verdadero, las zonas rojizas del falso color coinciden con las zonas más verdes del color verdadero. En cambio, las zonas urbanas se muestran en tono azul claro, como en este caso la ciudad de Valencia.

Para asegurar el buen funcionamiento de esta función de la aplicación, se hace una prueba con otra combinación de bandas en falso color. Por ejemplo, 742:



*Imagen 12. Visualización en Falso Color con bandas 742 utilizando DN*

En el caso de la *Imagen 11*, la vegetación saludable se muestra en verde brillante mientras que el suelo árido se representa en tonos rosas. En cuanto a las zonas urbanas, estas se muestran en diferentes tonos magentas.

Además, eligiendo como opción a visualizar Falso Color, también es posible elegir con qué magnitud se desea trabajar. Igual que en la *Imagen 9*, al elegir Reflectancia como magnitud, la *Imagen 12* puede aparecer muy oscura. Como solución, se ofrece la opción de equalizar la imagen (*Imagen 13*), lo que mejora y facilita su interpretación.

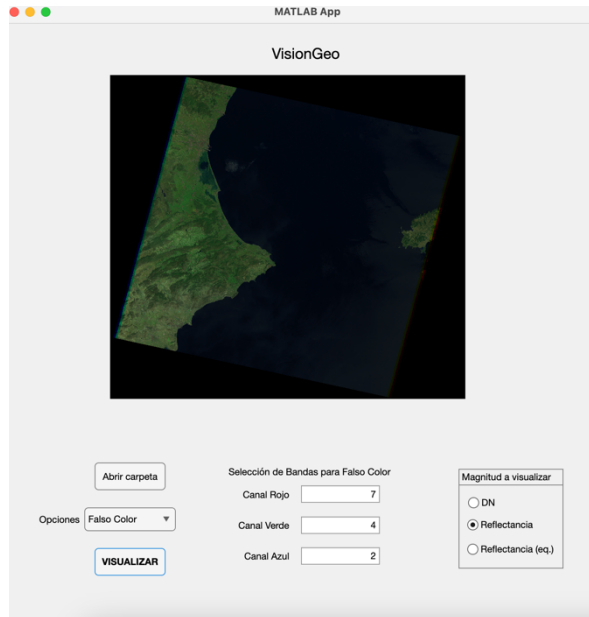


Imagen 13. Visualización en Falso Color con bandas 742 utilizando Reflectancia

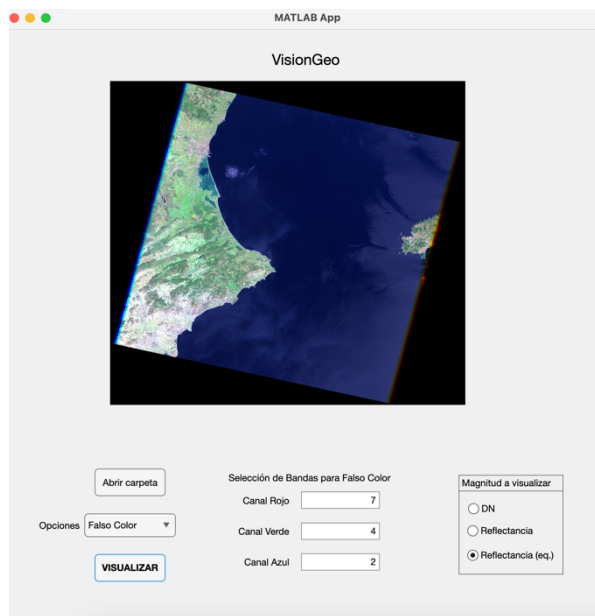
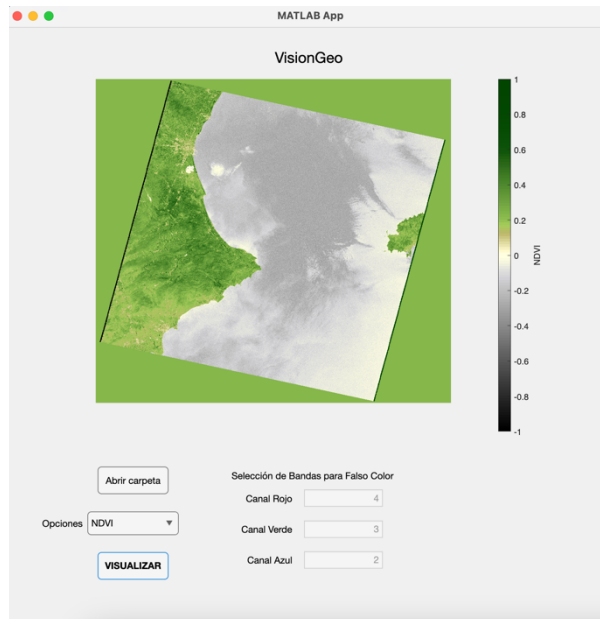


Imagen 14. Visualización en Falso Color con bandas 742 utilizando Reflectancia(eq.)

### 2.3. NDVI

El NDVI funciona aprovechando las distintas propiedades de reflectancia de la vegetación y otros tipos de cubierta terrestre en las bandas NIR y roja del espectro electromagnético (Gelerter, 2023). En la aplicación, la selección de la magnitud está desactivado, ya que solo se trabaja con los valores de reflectancia. Con esta técnica y mediante a un mapa de color apropiado, podemos recrear una representación visual de la cubierta vegetal de esta zona.



*Imagen 15. Visualización del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)*

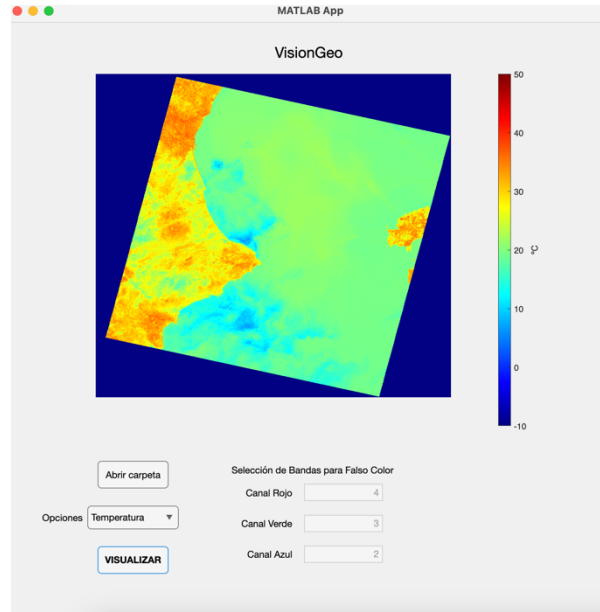
Los valores del NDVI, tal y como muestra la barra de color, comprende valores entre -1 y 1. Según los estudios, los valores próximos a 1 indican una vegetación densa y sana, y los valores próximos a -1 indican una vegetación escasa o poco sana. Además, como demuestra en el caso de la *Imagen 14*, los valores de NDVI inferiores a 0 indican agua o elementos no vegetales.

## 2.4. Temperatura

Un mapa de calor es una representación gráfica de datos en la que los valores, en este caso de temperatura, se representan mediante colores. Los datos de temperatura se capturan mediante el uso de sensores térmicos en satélites, como la banda 6 del Landsat 7. Estos sensores detectan la radiación térmica emitida por la superficie terrestre, que después se convierten en temperatura a partir de la ecuación (8).

En la aplicación se ha usado el mapa de color 'jet' para representar las temperaturas de la imagen de prueba, donde los colores más cálidos indican altas temperaturas mientras que los colores más fríos indican bajas temperaturas.

En la *Imagen 15*, podemos observar, por ejemplo, la diferencia de temperaturas en el mar. La mayor parte de esta zona ronda los 20 grados, mientras que en algunas zonas cerca de la península, aparecen algunas corrientes de agua de temperatura más baja. De la misma forma que aparecen zonas en la superficie terrestre más cálidas que otras, como la zona más próxima a Castellón de la imagen.



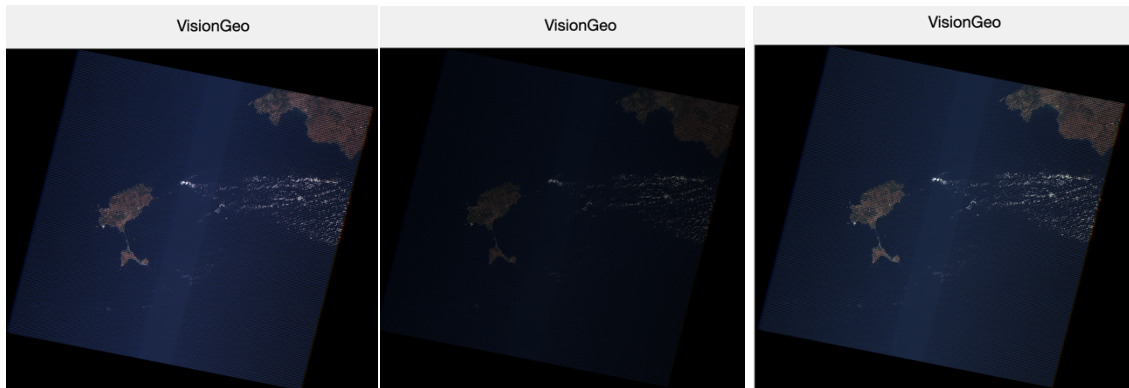
*Imagen 16. Visualización del mapa de temperatura de la zona*

## 2.5. Otras pruebas

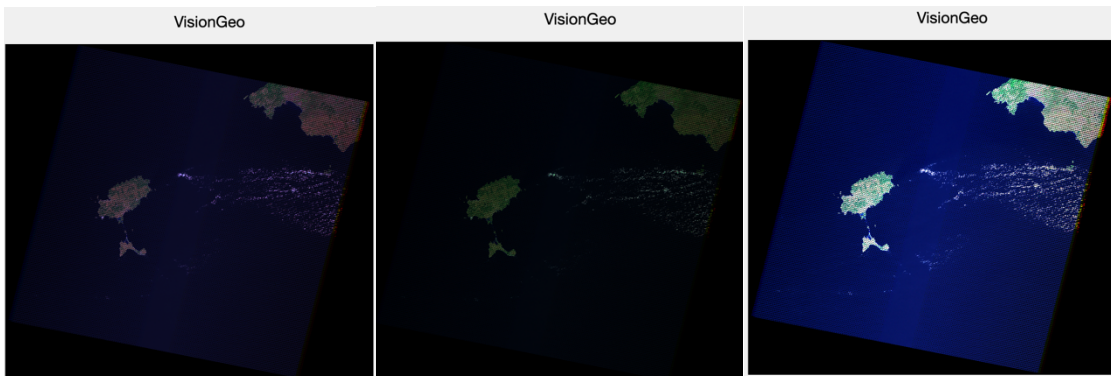
Para comprobar el buen funcionamiento de la aplicación, se han realizado más pruebas con otras imágenes de Landsat 7. Estas fueron tomadas por el satélite Landsat 7 utilizando el instrumento ETM+, el día 9 de septiembre de 2005 sobre las islas de Ibiza, Formentera y parte de Mallorca.

Al ser imágenes posteriores a 2003, se observa cierta irregularidad en ellas debido a la avería del Landsat 7 en el corrector de alineamiento. Sin embargo, han seguido siendo útiles proporcionando datos complementarios a Landsat 8 y Landsat 9. Aun así, se consiguen ver e interpretar todas las opciones de visualización de las imágenes disponibles en la aplicación.

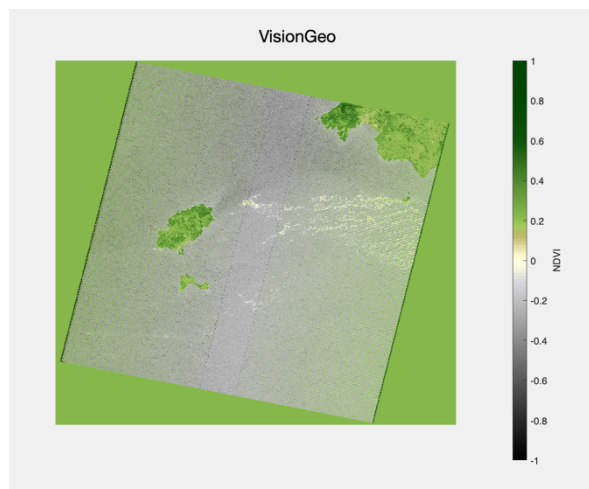
La radiancia captada por el sensor en esta época del año es menor que en las imágenes anteriores, por eso las imágenes en DN salen oscuras y por ende, también las de Reflectancia. Además, al ser una época más avanzada en el año, aumenta la probabilidad de la aparición de nubes, lo cual se puede observar entre las tres islas.



*Imagen 17-18-19. Visualización de Color Verdadero en DN, Reflectancia y Reflectancia (eq.) de las imágenes de prueba 2*



*Imágenes 20-21-22. Visualización de Falso Color en 742 utilizando DN, Reflectancia y Reflectancia (eq.) de las imágenes de prueba 2*



*Imagen 23. Visualización de NDVI de las imágenes de prueba 2*



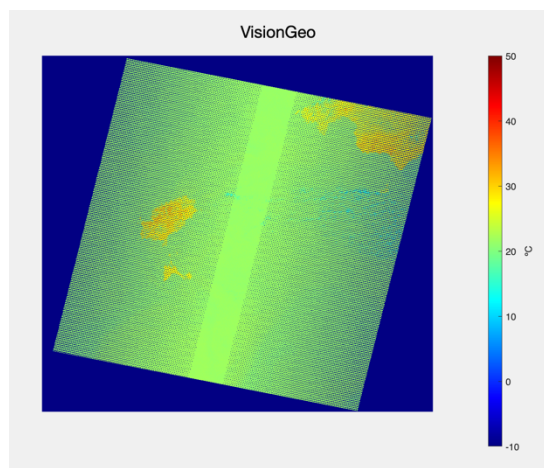


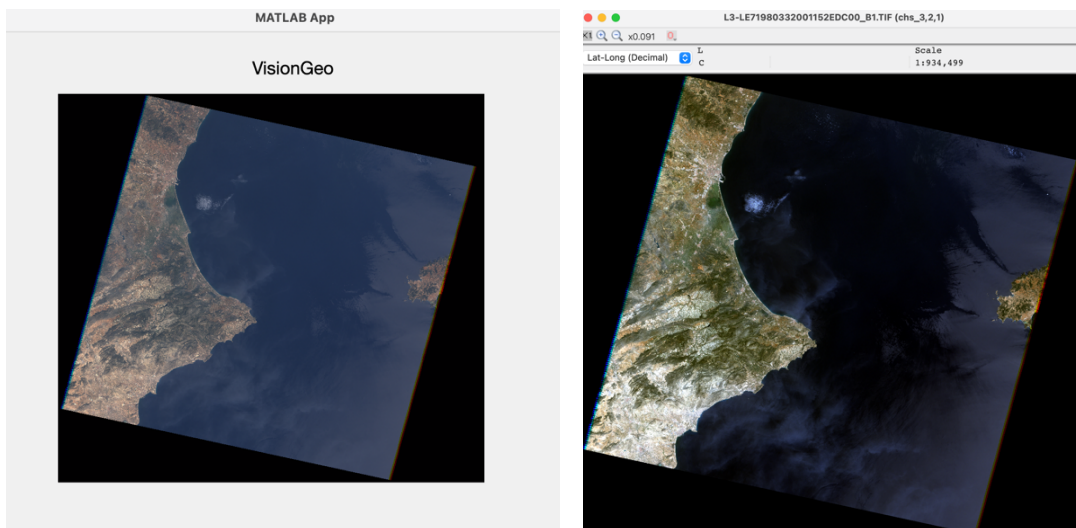
Imagen 24. Visualización del mapa de temperatura de las imágenes de prueba 2

## 2.6. Evaluación de la eficiencia y usabilidad de la aplicación

Para evaluar la eficiencia de la aplicación mediante la comparación de los resultados obtenidos con VisionGeo y los obtenidos con MultiSpec, un sistema de procesado para analizar de forma interactiva imágenes multiespectrales de la Tierra.

Se realizará una comparación en cada una de las cuatro opciones de visualización disponibles en la aplicación:

### 2.6.1. Color Verdadero



Imágenes 25-26. Comparación de Color Verdadero en VisionGeo (izquierda) y MultiSpec (derecha)

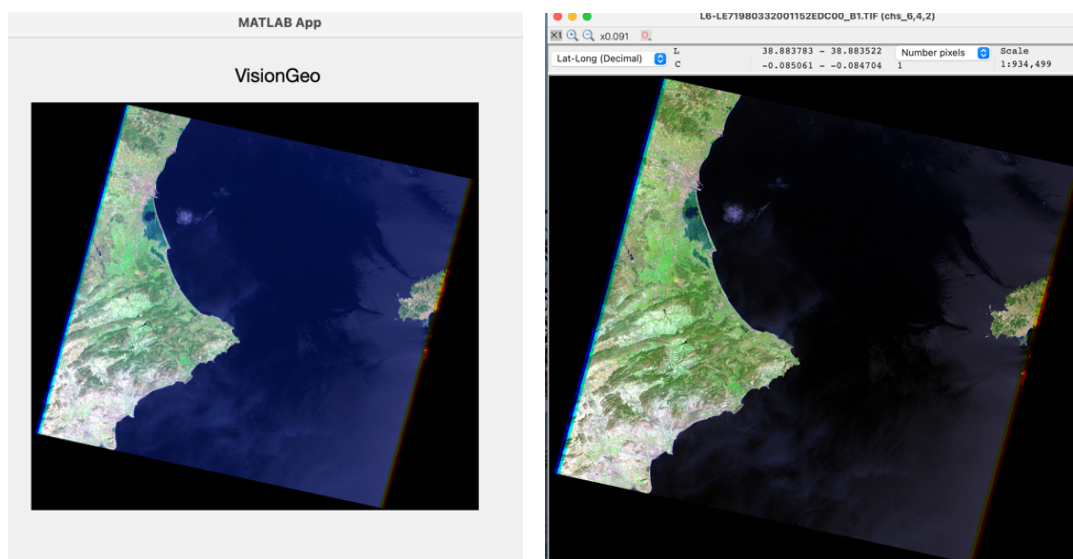
Si se comparan las imágenes generadas en Color Verdadero por VisionGeo y MultiSpec (Imágenes 16-17), se observa cierta diferencia en sus colores. MultiSpec representa colores más vivos y con más contraste que pueden resultar más atractivos, aunque no



necesariamente más realistas. Sin embargo, en términos de facilidad de uso de la aplicación, VisionGeo es más sencillo e intuitivo.

En VisionGeo, simplemente se debe seleccionar la carpeta y elegir Color Verdadero como opción a visualizar, mientras que en MultiSpec hay que elegir las tres imágenes que se deben superponer por separado y decirle a la aplicación qué banda debe pintar como canal rojo, verde y azul.

### 2.6.2. Falso Color



*Imágenes 27-28. Comparación de Falso Color 742 en VisionGeo (izquierda) y MultiSpec (derecha)*

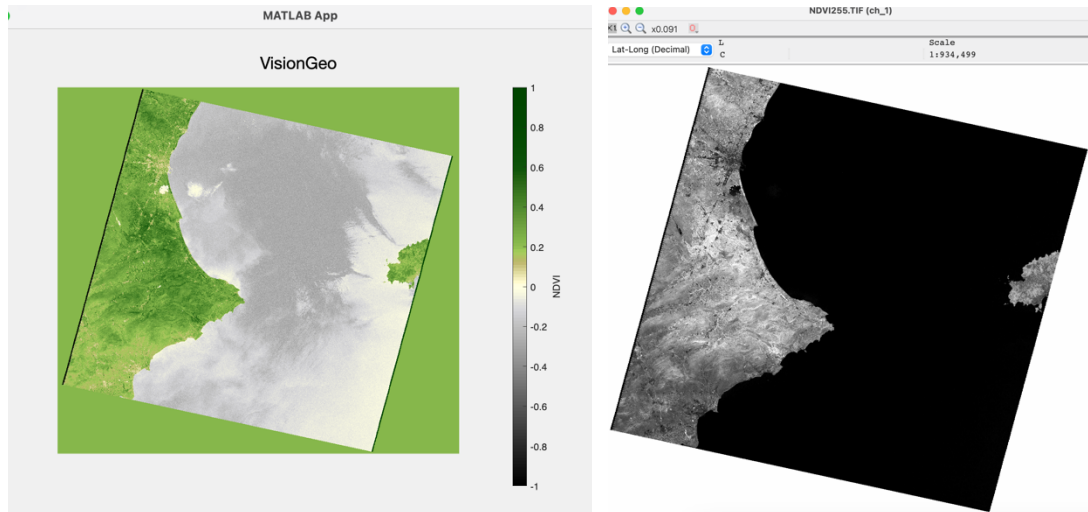
De la misma forma que en Color Verdadero, en cuanto a color, MultiSpec presenta colores más vivos y con más contraste. Sin embargo, VisionGeo sigue siendo más sencillo e intuitivo de usar.

En MultiSpec se deben cargar todas las bandas manualmente en el programa y elegir cuál de ellas se le asigna a cada canal en una ventana independiente a la principal, mientras que en VisionGeo las imágenes se cargan automáticamente al elegir la carpeta y simplemente elegir cuál de ellas va a cada canal en la misma pantalla principal.

### 2.6.3. NDVI

En el caso de la visualización del NDVI, sin duda, VisionGeo es más efectivo, ya que aparece la imagen simplemente con elegir la opción correspondiente y pulsar el botón de visualizar. En cambio, con MultiSpec el usuario debe hacer la conversión manual a radiancia buscando los valores de Bias y Gain de cada una de las bandas, guardar las imágenes de radiancia generadas, convertir estas a radiancia de forma y combinar las imágenes aplicando la fórmula de NDVI, manualmente también. Y si lo que se desea es

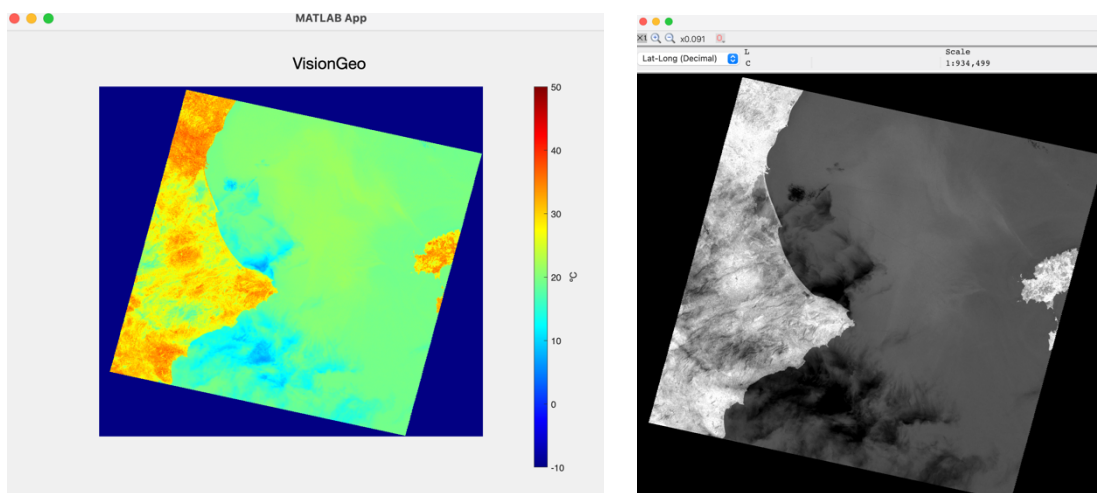
una imagen en color para que sea más visual, se debe generar una imagen en falso color.



Imágenes 29-30. Comparación de Falso Color 742 en VisionGeo (izquierda) y MultiSpec (derecha)

#### 2.6.4. Temperatura

En cuanto a la visualización de la temperatura, igual que en la visualización de NDVI, VisionGeo genera el mapa de la temperatura mediante colores fríos para las zonas frías y colores cálidos para las zonas cálidas, proporcionando una temperatura aproximada con la barra de colores. Por otro lado, MultiSpec muestra directamente la radiación captada por el sensor, donde las zonas más oscuras indican menor radiación y, por tanto, temperaturas más bajas, pero sin especificar exactamente la temperatura en ese punto. En este caso, se podría decir que VisionGeo resulta más efectivo e intuitivo que MultiSpec.



Imágenes 31-32. Comparación de temperatura en VisionGeo (izquierda) y MultiSpec (derecha)

En términos de funcionalidad, ambos programas ofrecen casi las mismas funciones. Sin embargo, además de que en VisionGeo es más sencillo identificar cuáles son las funciones disponibles, en algunos casos como la visualización de la temperatura y el NDVI, MultiSpec no ofrece la visualización del mapa en color ni la indicación de la barra de colores.

Considerando otros aspectos, en cuanto al tiempo de carga de las imágenes, VisionGeo es más lento debido al procesamiento de datos. Sin embargo, en MultiSpec, el usuario debe realizar las conversiones y correcciones manualmente, hecho que alarga mucho más la visualización de las imágenes comparado con el tiempo de carga de VisionGeo y además complica su uso.

## 6. CONCLUSIONES

En este proyecto, se ha cumplido con el objetivo de desarrollar una aplicación en App Designer de Matlab para el procesamiento de imágenes satelitales en color verdadero y falso color, además de la integración del cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada y generación de mapas de temperatura. Para ello, se realizó un estudio previo sobre las características técnicas de los satélites Landsat 7, 8 y 9 y los métodos para el procesamiento de sus bandas espectrales.

Posteriormente, tuvo lugar el desarrollo de la aplicación, centrándonos en el procesamiento de imágenes procedentes del Landsat 7, sin ningún tipo de corrección previa (Level 1). Para asegurar su facilidad de uso y intuitividad, se diseñó una interfaz con todas las opciones disponibles en la misma pantalla principal. A parte de las funciones iniciales, fueron implementándose otras funciones, como la selección de la magnitud a visualizar, según iban surgiendo nuevas necesidades que resolver, resultando en una aplicación más completa de que lo iba a ser originalmente.

Los resultados obtenidos de la aplicación y su comparación con los resultados de programas ya existentes demuestran su capacidad para procesar correctamente las imágenes, haciendo las correcciones indicadas y mostrando la combinación de bandas deseada por el usuario. Gracias a esa comparación, se determina que la aplicación desarrollada consigue ser mucho más intuitiva y fácil de usar a la hora de lograr visualizar la configuración de bandas requerida.

Para mejorar la aplicación, se podrían considerar algunas adiciones y actualizaciones. Una posible mejora sería la incorporación de un botón que permita al usuario guardar las imágenes mostradas pantalla con la combinación de banda deseada. Además, se podría incluir un botón para guardar las imágenes en radiancia. Aunque estas no sean muy interesantes visualmente, podrían ser útiles para investigaciones del usuario.

Otra posible mejora sería incorporar la posibilidad de tratar imágenes de los satélites Landsat 7 y 8, pero con las correcciones del sensor y de atmósfera ya aplicadas. Esta característica no sería demasiado difícil de incluir, ya que se podría reutilizar prácticamente toda la parte de visualización que ha sido desarrollada.

En resumen, este trabajo ha completado con éxito el desarrollo de una aplicación de Matlab para el procesamiento de imágenes satelitales, que no solo facilita la visualización de las combinaciones de bandas deseadas, sino que puede ser un herramienta para usuarios con intereses de investigación y análisis de imágenes satelitales.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Alonso Sarría, F. (2006, febrero). Sistemas de información geográfica.

<https://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/index.html>

Ayuda y Documentación – MATLAB & Simulink – MathWorks España. (2024).

[https://es.mathworks.com/help/matlab/learn\\_matlab/help.html](https://es.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/help.html). Recuperado en junio de 2024.

Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing Of Enviroment*, 113(5), 893-903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>

Diccionario de cáncer del NCI. (2024). Cancer.gov.

<https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionario-cancer/def/espectro-electromagnetico>

F. Rasilla, D., & Oria, F. (2009, marzo). Fundamentos de Teledetección.

[https://personales.unican.es/rasillad/docencia/g174/1\\_fundamentos/fundamentos\\_teledeteccion.html](https://personales.unican.es/rasillad/docencia/g174/1_fundamentos/fundamentos_teledeteccion.html)

Gelerter, D. (2023, 25 abril). *Imágenes NDVI: Guía definitiva en 3 pasos para comprenderlas y utilizarlas*. Granja12.

<https://www.farm21.com/es/ndvi-images-ultimate-guia-de-3-pasos/>

Innovatione AgroFood Design. (2024, 15 marzo). *Fundamentos y principios de teledetección – Innovatione*. <https://innovatione.eu/2019/06/24/fundamentos-de-teledeteccion/>

Instituto Geográfico Nacional. (2024). Teledetección. En

<https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf>. Recuperado en junio de 2024.

Jiménez (2024, 22 de febrero). Combinación RGB con las bandas del satélite Landsat 5, 7 y 8. Hidráulica fácil.

<https://www.hidraulicafacil.com.mx/2016/03/Com.Landsat7.html>

Kogut, P. (1970, 1 enero). Teledetección satelital: tipos, usos y aplicaciones. EOS Data Analytics. <https://eos.com/es/blog/teledeteccion/>

Landsat NASA. (2022b, febrero 17). *Landsat Science*. Landsat Science | A Joint NASA/USGS Earth Observation Program. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>

Mato, A. (2018, 29 septiembre). Espectro electromagnético. Red de Datos.

<http://adrianredesdedatos.blogspot.com/2018/09/espectro-electromagnetico.html>

PNT, (2024). Programa Landsat – Plan Nacional de Teledetección – PNT.  
<https://pnt.ign.es/programa-landsat>. Recuperado en junio de 2024.

Sobrino, J. A. (2001). *Teledetección*. Universitat de València.  
Universidad Virtual de Quilmes, & Pérez Gañán, R. (1988). Introducción a la teledetección / 1. Principios básicos de la teledetección.  
<https://static.uvq.edu.ar/mdm/teledeteccion/unidad-1.html>

Wikipedia. (2023, 1 mayo). Índice de vegetación de diferencia normalizada. Wikipedia, la Enciclopedia Libre.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Índice\\_de\\_vegetación\\_de\\_diferencia\\_normalizada](https://es.wikipedia.org/wiki/Índice_de_vegetación_de_diferencia_normalizada)

## **ANEXOS**

### **ANEXO I: VisionGeo.mlapp**

Archivo .mlapp de la aplicación desarrollada para el proyecto con App Designer

### **ANEXO II: distance\_Earth-Sun\_UA.mat**

Archivo que contiene los datos de la distancia de la Tierra al Sol dependiendo del día del año en UA.

### **ANEXO II: LE71980332001152EDC00**

Carpeta que incluye las imágenes satelitales utilizadas para las pruebas de la aplicación