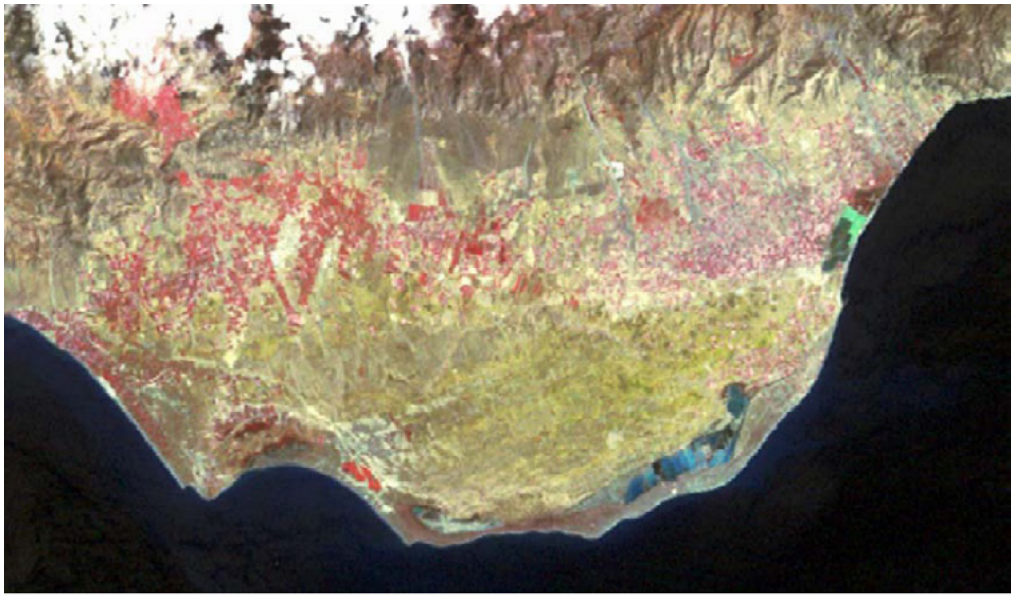

3 de Junio 1975, Landsat 2 MSS (Nir-R-G)

24 de Junio 2013, Landsat 8 OLI (Nir-R-G)

1. INTRODUCCIÓN A LA TELEDETECCIÓN

1.1. Definición y conceptos básicos

La **teledetección** es la ciencia y tecnología que permite obtener información de objetos o fenómenos a distancia, sin estar en contacto físico directo con ellos. Esto se logra mediante la captura y análisis de la radiación electromagnética que emiten o reflejan dichos objetos, utilizando sensores especializados, como los instalados en satélites, aviones, drones o estaciones terrestres.

En su sentido más amplio, la teledetección abarca el conjunto de técnicas que permiten observar y medir las características de la Tierra y su atmósfera, obteniendo datos sobre el suelo, la vegetación, el agua y otros elementos naturales o artificiales. La **fuente de energía** que se emplea en la teledetección puede ser natural, como la radiación solar, o artificial, cuando los propios sensores emiten ondas, como ocurre en los sensores radar (RAdio Detection And Ranging). En función de esta fuente de energía, los sensores se clasifican en **pasivos** (que dependen de la radiación solar o de la emitida por los objetos) y **activos** (que emiten su propia energía y miden la radiación reflejada).

Los datos obtenidos a través de la teledetección son procesados y analizados para generar imágenes o mapas temáticos, que permiten estudiar y monitorear cambios en la superficie terrestre o fenómenos atmosféricos en diferentes escalas espaciales y temporales. En el ámbito agrícola, esta información es fundamental para la toma de decisiones relacionadas con la gestión de cultivos, el monitoreo de la salud vegetal, la optimización del riego y la evaluación de rendimientos, entre otros aspectos.

La teledetección en la agricultura representa una herramienta esencial para mejorar la productividad, la sostenibilidad y la gestión de los recursos agrícolas. Gracias a la capacidad de obtener datos precisos y actualizados sobre la salud de los cultivos, estado nutritivo, el manejo del agua y del suelo, y la detección de plagas, los agricultores pueden implementar prácticas más eficientes y responsables. A medida que las tecnologías de teledetección continúan evolucionando, su rol en la agricultura moderna se volverá aún más relevante para enfrentar los desafíos de un mundo en constante cambio climático y con demandas crecientes de producción de alimentos.

1.2. Evolución histórica de la teledetección

El origen histórico de la **teledetección** se remonta a varias etapas de avance tecnológico que permitieron la observación a distancia de la Tierra, a menudo en respuesta a necesidades militares, científicas o geográficas. La teledetección ha evolucionado desde sus humildes comienzos en la fotografía aérea hasta convertirse en una herramienta sofisticada de observación global, impulsada por avances en tecnología espacial, informática y desarrollo de nuevos sensores. Desde la **fotografía aérea en globos** hasta el uso de **satélites multisensoriales**, cada avance ha permitido obtener una visión más detallada y precisa de la Tierra desde el espacio. A continuación, un resumen de las etapas clave en el desarrollo de la teledetección.

1.2.1. Fotografía aérea (Siglo XIX - principios del siglo XX)

El concepto inicial de teledetección se puede situar a mediados del siglo XIX, cuando se utilizaron globos aerostáticos para tomar fotografías aéreas del terreno. En 1858, el francés **Gaspard-Félix Tournachon** más conocido como **Nadar** (1820-1910) fue el primero en capturar imágenes aéreas de París desde un globo, marcando el comienzo de la observación de la Tierra desde el aire. En este período, las imágenes se tomaban con cámaras fotográficas convencionales y servían principalmente para estudios topográficos y militares.

Durante la **Primera Guerra Mundial**, la fotografía aérea se consolidó como una herramienta esencial para la vigilancia y la estrategia militar. Aviones equipados con cámaras comenzaron a capturar imágenes detalladas del terreno, lo que permitió observar y mapear grandes extensiones de territorio de manera más efectiva.

1.2.2. Década de 1930 y 1940

Durante la **Segunda Guerra Mundial**, los avances tecnológicos, especialmente el **radar**, mejoraron la capacidad de detectar objetos y superficies a distancia, incluso en condiciones de poca visibilidad (nubes, oscuridad). Este fue un hito en la teledetección activa. El radar permitió detectar aviones enemigos y otros objetivos sin necesidad de contacto directo, es decir, sin pisar el terreno, lo que fue una innovación clave.

1.2.3. Década de 1950 a 1960

El verdadero despegue de la teledetección ocurrió con el desarrollo de la tecnología espacial a mediados del siglo XX. En la década de 1960, con el lanzamiento de los primeros satélites artificiales, la teledetección pasó a un nivel superior. El primer satélite lanzado al espacio, el **Sputnik 1** por la Unión Soviética el **4 de octubre de 1957**, fue un hito, pero no fue diseñado específicamente para la observación de la Tierra (Figura 1.1). «Sputnik» (Спутник) significa en ruso «satélite» marcando su relevancia como el primer satélite artificial lanzado al espacio. La intención principal de la Unión Soviética con el lanzamiento del **Sputnik 1** fue demostrar su capacidad tecnológica y científica, lo que tenía varias implicaciones clave:

- **Lograr la supremacía espacial**: El lanzamiento del Sputnik 1 fue un hito crucial en la *Carrera Espacial* entre Estados Unidos y la Unión Soviética durante la Guerra Fría. Los soviéticos querían mostrar al mundo su liderazgo en la exploración espacial, lo que también implicaba superioridad tecnológica y militar, en especial con el uso de cohetes y misiles de largo alcance.
- **Impulsar el prestigio nacional**: El éxito del Sputnik 1 aumentó el prestigio de la Unión Soviética a nivel global. En ese contexto de rivalidad, ser el primero en colocar un satélite en el espacio reforzó la imagen del poder soviético y su capacidad científica.
- **Desarrollar la ciencia y la investigación espacial**: El Sputnik 1 también fue diseñado para recopilar datos importantes sobre el espacio exterior, como la densidad de las capas superiores de la atmósfera y la propagación de señales de radio en la ionosfera. Aunque era un satélite simple, aportó datos valiosos para futuros desarrollos en tecnología espacial.

El **TIROS-1** (Television Infrared Observation Satellite 1), lanzado por Estados Unidos el 1 de abril de 1960, fue el primer satélite meteorológico exitoso de la historia (Figura 1.1). La principal intención de este lanzamiento fue:

- **Monitoreo meteorológico**: El objetivo principal del TIROS-1 era **mejorar la capacidad de observar el clima** desde el espacio. Fue diseñado para transmitir imágenes de la Tierra que permitieran observar la formación de nubes y patrones meteorológicos. Esto representaba un avance significativo en la previsión del clima y el seguimiento de tormentas, como huracanes, mucho antes de que llegaran a la superficie terrestre.
- **Desarrollar tecnología satelital para pronósticos meteorológicos**: Estados Unidos buscaba probar si los satélites podían usarse para **predecir el clima con mayor precisión**. Hasta ese momento, los pronósticos dependían de observaciones desde el suelo y vuelos de aviones, pero un satélite en órbita podría ofrecer una **vista global** en tiempo real de los sistemas climáticos.
- **Aplicación civil y comercial**: A diferencia de satélites como el Sputnik 1, que tenía un enfoque principalmente político y militar, TIROS-1 estaba orientado a **aplicaciones civiles**, con el fin de mejorar la vida cotidiana de las personas mediante avances en la ciencia meteorológica.
- **Fortalecer el liderazgo científico de EE. UU.**: En plena Guerra Fría y en la carrera espacial, Estados Unidos también quería mostrar su liderazgo en aplicaciones pacíficas de la tecnología espacial, especialmente después de que la Unión Soviética tomara la delantera con el lanzamiento del Sputnik 1. TIROS-1 fue una demostración de que los satélites no solo eran herramientas para el espionaje o la competencia militar, sino también para el beneficio global.

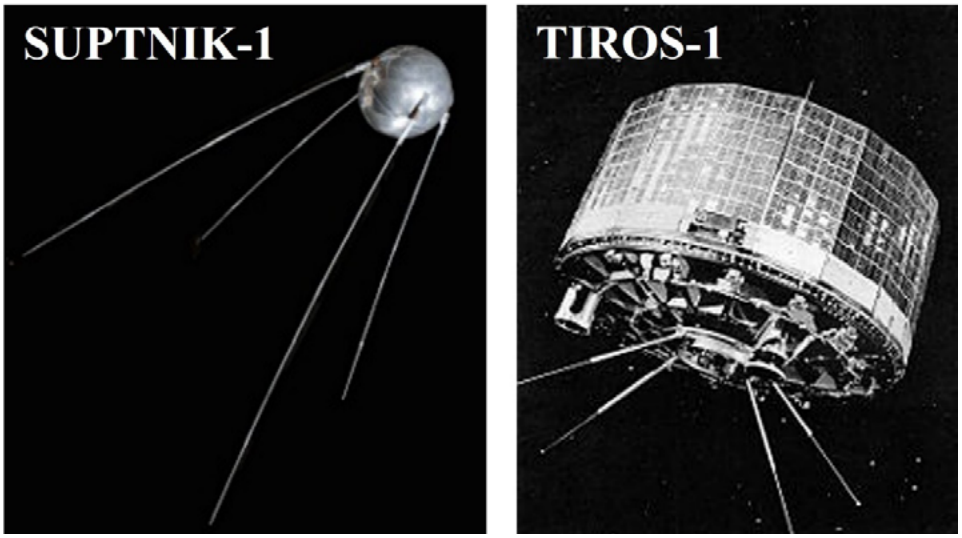

Figura 1.1. Primeros satélites artificiales:
Suptnik-1 (https://i3.wp.com/www.360onhistory.com/wp-content/uploads/2023/10/Sputnik.png?ssl=1),
y Tiros-1 (https://www.elaisian.com/es/2021/12/30/las-imagenes-satelitales-y-el-mundo-agricola/)

1.2.4. Década de 1970 a 1980

El primer satélite dedicado a la teledetección fue el Landsat-1, lanzado por la NASA en 1972 (Figura 1.2A). Landsat permitió la captura de imágenes multiespectrales de la superficie terrestre, lo que sentó

las bases de la teledetección moderna. Este satélite marcó el inicio del monitoreo sistemático de los recursos naturales, brindando datos cruciales sobre la vegetación, el agua, los suelos y el uso de la tierra. La razón principal por la que Landsat-1 permitió el estudio global de los recursos terrestres, mientras que otros satélites anteriores no lo hacían, radica en varias características avanzadas de este satélite:

- Instrumentos especializados: Landsat-1 estaba equipado con un escáner multiespectral (MSS), un instrumento clave para capturar imágenes de la Tierra en varias longitudes de onda del espectro electromagnético (desde el espectro visible hasta el infrarrojo cercano). Esta tecnología era más avanzada que la de los satélites meteorológicos previos, como TIROS-1, que solo capturaban imágenes en el espectro visible. La capacidad de observar en el infrarrojo cercano fue crucial porque las diferentes longitudes de onda interactúan de manera distinta con las superficies terrestres (como suelos y vegetación), lo que permite diferenciar tipos de suelo, analizar la humedad, la salinidad, distinguir la vegetación de otras cubiertas terrestres, evaluar la salud de las plantas, así como otros parámetros importantes.
- Resolución espacial y cobertura global: Landsat-1 tenía una resolución espacial relativamente buena para la época, alrededor de 60 metros por píxel, lo que permitía distinguir con mayor detalle las características del suelo y otros elementos geográficos. Anteriormente, los satélites no tenían esta capacidad de resolución suficiente para estudios detallados de la superficie terrestre. La Figura 1.2B, muestra la primera imagen de Dallas-Fort Worth, Texas, captada por Landsat-1 en 1972. Esta imagen muestra una combinación en falso color de las bandas infrarrojo cercano, rojo y verde, donde los tonos rojos indican terrenos con vegetación y los grises y blancos son superficies urbanas o rocosas.

Además, Landsat-1 fue diseñado para proporcionar una cobertura casi global y sistemática de la superficie de la Tierra, lo que permitió el análisis de grandes extensiones de terreno y la comparación de datos a lo largo del tiempo.

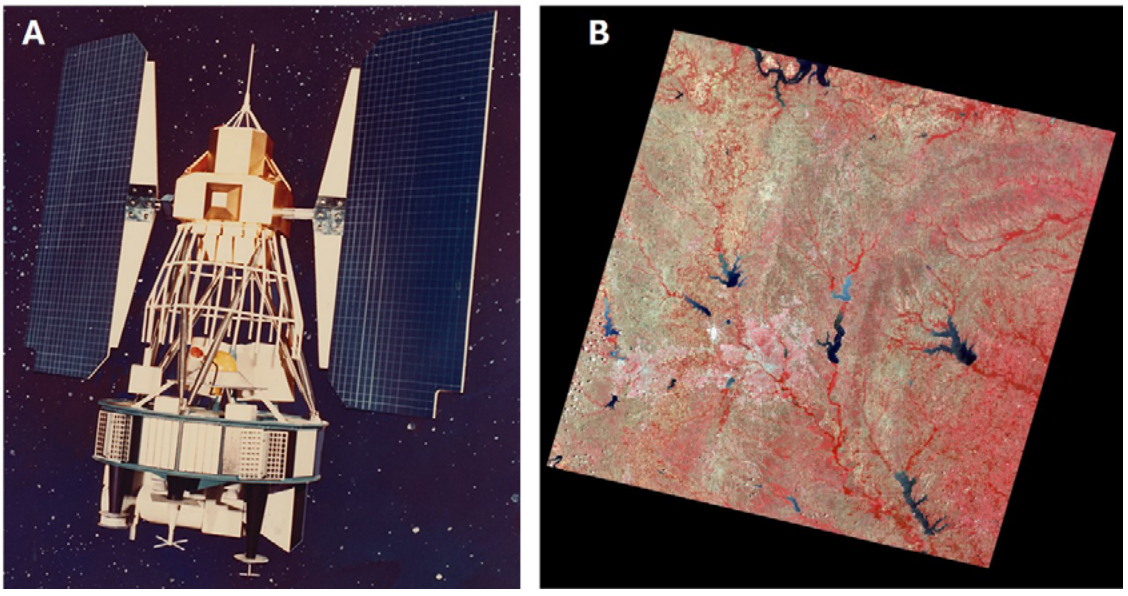

Figura 1.2. Landsat-1 (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/): A) Satélite; B) Primera imagen de Dallas-Fort Worth, Texas (1972) (https://www.usgs.gov/media/images/landsat-1-first-light-image-texas)

Desde 1972, la serie de satélites Landsat ha seguido operando con múltiples generaciones. Hasta la fecha, ha habido nueve satélites lanzados en el marco del programa Landsat. A lo largo de los años, se han desarrollado varias series de satélites Landsat, y aunque no todos los satélites han estado operativos durante el mismo tiempo, la numeración refleja el avance continuo del programa. Un resumen de las series de satélites Landsat es: Landsat 1 (lanzado en 1972) - Originalmente llamado "ERTS-1" (Earth Resources Technology Satellite); Landsat 2 (lanzado en 1975); Landsat 3 (lanzado en 1978); Landsat 4 (lanzado en 1982); Landsat 5 (lanzado en 1984), este satélite operó hasta 2013, siendo uno de los satélites más longevos del programa; Landsat 6 (lanzado en 1993), falló al entrar en órbita, por lo que nunca estuvo operativo, Landsat 7 (lanzado en 1999), aún en funcionamiento, aunque con limitaciones desde 2003 debido a fallos en sus sistemas; Landsat 8 (lanzado en 2013), operativo y en pleno funcionamiento; y Landsat 9 (lanzado en 2021), actualmente operativo.

Durante las décadas de 1970 y 1980, otros países también lanzaron satélites para observación de la Tierra. En esta etapa, la tecnología radar de apertura sintética (SAR) comenzó a desarrollarse, permitiendo observaciones de la superficie terrestre en condiciones de nubosidad o poca luz, lo que amplió considerablemente las aplicaciones de la teledetección.

1.2.5. Décadas de 1980 a 1990

El avance de las computadoras y el desarrollo de software especializado en procesamiento de imágenes durante las décadas de 1980 y 1990 permitió el análisis masivo de datos de teledetección. Este período estuvo marcado por la capacidad de procesar grandes volúmenes de información y generar mapas temáticos, lo que hizo que la teledetección fuera más accesible para investigadores y profesionales en diversos campos. El 24 de septiembre de 1999 fue lanzado con éxito IKONOS, el primer satélite de **muy alta resolución espacial** (Very High Resolution; VHR) capaz de captar imágenes pancromáticas de la tierra con un tamaño de píxel de 1 m, así como imagen multiespectrales con 4 m de resolución espacial.

1.2.6. Siglo XXI

El uso de **drones** y **vehículos aéreos no tripulados (UAVs)** ha democratizado la teledetección, permitiendo a agricultores y empresas obtener imágenes detalladas y específicas de sus campos a bajo costo. Esto ha favorecido el desarrollo de la **agricultura de precisión**, una de las aplicaciones más relevantes de la teledetección en el sector agrícola.

En las últimas dos décadas, la teledetección ha vivido una nueva transformación con el lanzamiento de satélites de VHR (como los satélites comerciales **WorldView-2** y **GeoEye-1**), que eran capaces de captar detalles extremadamente precisos de la superficie terrestre. Paralelamente, la serie de satélites **Sentinel-2**, cuyo primer elemento (Sentinel-2A fue lanzado en 2015 como parte del programa europeo Copernicus, proporcionan imágenes multiespectrales de alta resolución espacial y con un tiempo de revisita inferior a 10 días (alta resolución temporal), lo que facilita el monitoreo continuo de los ecosistemas terrestres y agrícolas. En la Figura 1.3. se muestra el Mosaico de la Península Ibérica y archipiélagos balear y canario a 10 metros de resolución de pixel. La imagen se generó a partir de datos Sentinel-2 corregidos atmosféricamente (L2A) del programa Copernicus. El

Mosaico Sentinel-2 está disponible en FTP (https://blogpnt.wordpress.com/2022/04/18/mosaico-sentinel-2-disponible-en-ftp-2/).

Figura 1.3. Mosaico nacional Sentinel-2 de España (https://datos.gob.es/es/catalogo/e00125901-spaignmosaicosentinel2)

En los últimos años, la teledetección ha evolucionado hacia el uso de **sensores hiperespectrales** y técnicas avanzadas como el **LiDAR** (Light Detection and Ranging) y el **RADAR de Apertura Sintética (SAR)** que permiten un análisis más detallado de la superficie terrestre y atmósfera.

La Figura 1.4 muestra el **Modelo Digital del Terreno (MDT) de 2 m de resolución** de Andalucía que se ha generado a partir de información de las nubes de puntos capturadas mediante vuelo con sensor LiDAR con una densidad media de 0,5 puntos/m^2 en el marco del proyecto PNOA LiDAR en 2014-2015. Las nubes de puntos, distribuidas en ficheros de 2x2 km de extensión, han sido procesadas, clasificadas, transformadas a altura ortométrica y coloreadas a partir de ortofotos del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) con tamaño de píxel de 50 cm. Posteriormente, se ha ampliado la extensión de los ficheros de nube de puntos mediante la obtención de un área de influencia de 100 m alrededor de cada fichero para evitar artefactos de borde en la generación del MDT.

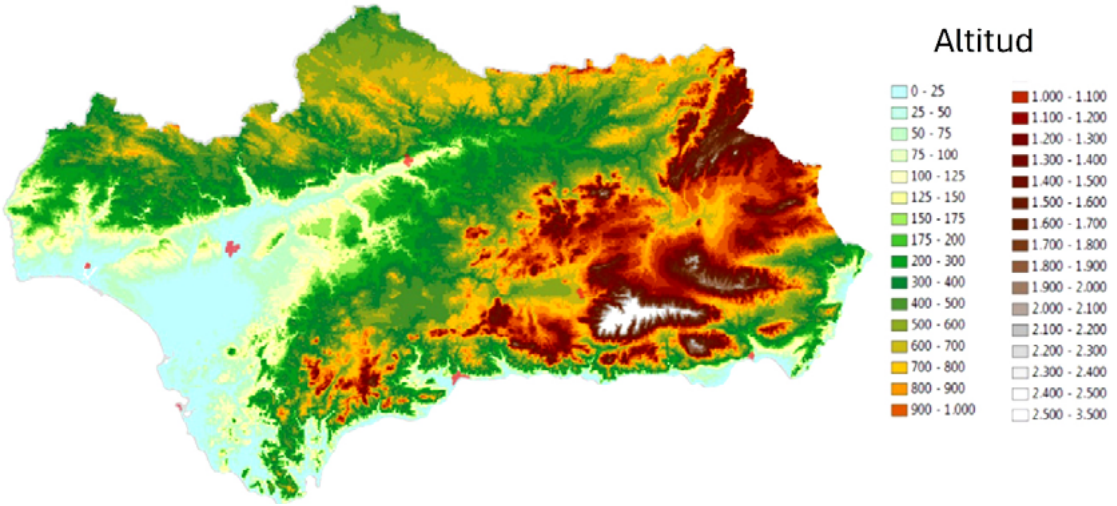

Figura 1.4. Mapa de Elevaciones del Terreno de Andalucía (MDE) (https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/landing-page-mapa/-/asset_publisher/wO880PprC6q7/content/mapa-de-elevaciones-del-terreno-de-andaluc-c3-ada-mde-/20151)

1.3. Diferencia entre la Teledetección y la Fotogrametría

La **teledetección** y la **fotogrametría** son dos disciplinas relacionadas con la obtención de información a distancia, pero tienen enfoques, técnicas y aplicaciones diferentes. A continuación, se destacan las principales diferencias entre ambas.

1.3.1. Definición y propósito principal

- **Teledetección**
  - Es una técnica utilizada para **obtener información de la superficie de la Tierra** sin contacto directo, mediante sensores que detectan la radiación electromagnética (luz visible, infrarrojo, microondas, etc.) reflejada o emitida por los objetos.
  - Su objetivo principal es el **análisis de fenómenos a gran escala**, como el monitoreo del cambio climático, vegetación, aguas, suelos, desastres naturales, etc.
  - Generalmente utiliza sensores montados en satélites, aviones o drones para capturar datos en diferentes bandas del espectro electromagnético.
- **Fotogrametría**
  - Es una técnica que utiliza fotografías para realizar **mediciones precisas** y obtener información geométrica de los objetos o terrenos observados, principalmente para crear mapas, modelos tridimensionales o reconstruir la topografía de un área.
  - El propósito central de la fotogrametría es **medir distancias, áreas, volúmenes y generar representaciones en 2D o 3D** de una superficie.
  - Se basa en el análisis de imágenes tomadas desde diferentes ángulos para calcular las dimensiones exactas de los objetos en el espacio.

1.3.2. Sensores y tipos de datos

- **Teledetección**
    - Utiliza **sensores pasivos** (que detectan radiación natural, como la solar) y **sensores activos** (como el radar, que emite y recibe señales electromagnéticas) para captar una amplia gama de información sobre la superficie terrestre en varias longitudes de onda.
    - Los datos obtenidos suelen ser **multiespectrales** o **hiperespectrales**, es decir, captan información en diferentes bandas del espectro electromagnético (luz visible, infrarrojo, etc.), lo que permite analizar características físicas y químicas de los objetos o áreas observadas.
- **Fotogrametría**
    - Se basa principalmente en **imágenes ópticas** obtenidas a través de cámaras fotográficas tradicionales, generalmente en el espectro visible.
    - Utiliza una serie de fotografías superpuestas (aéreas o terrestres) y las procesa para obtener **modelos precisos en 2D o 3D**, calculando distancias y ángulos entre puntos.

1.3.3. Método de análisis

- **Teledetección**
    - Los datos se procesan mediante técnicas que incluyen análisis espectral, clasificación de imágenes, índices de vegetación (como el NDVI, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), entre otros.
    - Está orientada al **análisis cualitativo y cuantitativo** de los recursos naturales y el medio ambiente. Su enfoque está más relacionado con la detección de patrones y la caracterización de la superficie terrestre.
- **Fotogrametría**
    - Utiliza principios de la **geometría** y la **trigonometría** para realizar cálculos precisos sobre distancias, áreas y volúmenes a partir de las imágenes obtenidas.
    - Los métodos principales incluyen la fotogrametría **estereoscópica** (usando dos o más imágenes para crear modelos tridimensionales) y la fotogrametría **digital**, que emplea algoritmos para medir y reconstruir objetos en 3D.

1.3.4. Aplicaciones

- **Teledetección**
    - Es ampliamente utilizada en la **monitorización ambiental**, como el seguimiento de la **deforestación**, **cambio climático**, **desastres naturales** (inundaciones, incendios), la **cartografía de suelos y vegetación**, la **gestión de recursos hídricos** y la **meteorología**.

- También tiene aplicaciones en **seguridad y defensa**, por ejemplo, para la detección de objetos o movimientos en áreas remotas.

- **Fotogrametría**

  - Se utiliza principalmente en **cartografía topográfica**, **ingeniería civil** (construcción de carreteras, presas), **arqueología** (reconstrucción de estructuras antiguas), **medición de edificios y terrenos**, y en la creación de **modelos digitales del terreno (DTM)** y **modelos tridimensionales** para planificación y diseño.
  - Es fundamental en proyectos donde se requiere precisión geométrica y representación visual detallada.

1.3.5. Escala y cobertura

- **Teledetección**

  - Suele abarcar grandes áreas o incluso todo el planeta, por lo que se emplea para proyectos a **escala global** o regional, como la observación de ecosistemas completos o cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo.

- **Fotogrametría**

  - Suele trabajar en áreas más limitadas y específicas, ya que se enfoca en la **precisión local** para proyectos que requieren detalle en la representación geométrica y medición de objetos o superficies en particular.

1.3.6. Resumen de las diferencias

La **teledetección** se centra más en el análisis remoto de fenómenos y patrones, mientras que la **fotogrametría** se especializa en la medición precisa y la reconstrucción geométrica de objetos y áreas (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Teledetección vs. Fotogrametría

Característica	Teledetección	Fotogrametría
Propósito	Monitorear y analizar fenómenos a gran escala	Realizar mediciones precisas y crear modelos 2D/3D
Sensores	Satélites, aviones, drones (sensores multiespectrales)	Cámaras fotográficas (espectro visible)
Datos	Espectrales (multiespectrales, hiperespectrales)	Imágenes ópticas
Método de análisis	Análisis espectral, clasificación de imágenes	Cálculos geométricos y tridimensionales
Escala	Grandes áreas (regional o global)	Áreas más localizadas
Aplicaciones	Cambio climático, recursos naturales, medio ambiente, agricultura	Cartografía, ingeniería, modelos digitales

1.4. Componentes del Sistema de Teledetección

Un sistema de teledetección se compone de varios elementos que trabajan en conjunto para obtener, procesar y analizar información de la superficie terrestre o de objetos desde una distancia. Los componentes de un sistema de teledetección trabajan en conjunto para permitir la adquisición, procesamiento e interpretación de datos sobre la superficie terrestre. Desde la energía utilizada para capturar la información hasta la plataforma que transporta los sensores, cada componente es esencial para garantizar la precisión y utilidad de los datos recolectados.

Los principales componentes de un sistema de teledetección son los siguientes.

1.4.1. Fuente de Energía (solar y artificial)

La teledetección se basa en la detección y análisis de la radiación electromagnética, que es emitida o reflejada por los objetos en la Tierra. Existen dos tipos principales de fuentes de energía en teledetección.

- Fuentes naturales (Teledetección pasiva): La radiación solar es la fuente de energía más común en los sistemas pasivos. Estos sistemas dependen de la luz del Sol para captar la radiación reflejada por los objetos en la Tierra. Los sensores pasivos, como los empleados en los satélites Landsat o Sentinel-2, son capaces de captar esta energía en diferentes rangos del espectro electromagnético.
- Fuentes artificiales (Teledetección activa): En este caso, el sistema emite su propia energía y mide la radiación que es reflejada de vuelta por los objetos. Un ejemplo típico es el radar, que utiliza ondas electromagnéticas para penetrar a través de nubes o condiciones de poca luz. Un sensor activo como el LiDAR o el Radar de Apertura Sintética (SAR) genera sus propias señales y mide el tiempo y la intensidad de la energía reflejada.

1.4.2. Interacción de la Radiación con la Atmósfera y Superficie Terrestre

Cuando la radiación electromagnética viaja desde la fuente (como el Sol) hacia la superficie terrestre, pasa a través de la atmósfera y luego interactúa con los diferentes elementos del terreno, como el suelo, la vegetación, el agua o las edificaciones. Esta interacción determina qué parte de la radiación es absorbida, reflejada o transmitida. La forma en que los objetos reflejan o emiten radiación en diferentes longitudes de onda depende de sus características físicas y químicas.

- Atmósfera: La atmósfera puede afectar a la radiación debido a fenómenos como la dispersión (desviación de las ondas electromagnéticas por partículas y gases) y la absorción (cuando ciertos gases absorben longitudes de onda específicas, como el vapor de agua o el dióxido de carbono). Para obtener datos precisos, es necesario aplicar correcciones atmosféricas que eliminen o minimicen estos efectos.
- Superficie terrestre: Cada tipo de superficie (vegetación, agua, suelo) tiene un comportamiento espectral particular, es decir, refleja la radiación de manera diferente en distintas longitudes de onda. Los sensores registran estas variaciones y las utilizan para identificar y clasificar diferentes tipos de superficies.

1.4.3. Sensores y Plataformas

Los sensores son los dispositivos encargados de captar la radiación electromagnética, mientras que las plataformas son los vehículos que transportan dichos sensores. Dependiendo de la aplicación, los sensores pueden ubicarse en diversas plataformas:

- Satélites: Son los más comunes para la teledetección a gran escala. Ofrecen una visión global y continua de la Tierra. Ejemplos de plataformas satelitales incluyen Landsat, Sentinel, y MODIS.
- Aeronaves: Los aviones y drones permiten obtener imágenes detalladas de áreas específicas. Se utilizan comúnmente en aplicaciones de teledetección a menor escala, como la agricultura de precisión o la gestión de recursos locales.
- Estaciones terrestres: En algunos casos, los sensores se colocan en estaciones fijas sobre el terreno, especialmente para aplicaciones meteorológicas o estudios locales muy específicos.

Los sensores pueden clasificarse en dos grandes categorías:

- Sensores pasivos: Captan la radiación natural reflejada o emitida por los objetos (como la luz solar reflejada por la superficie).
- Sensores activos: Emiten su propia energía y miden la radiación reflejada (como los sensores de radar o LiDAR).

Los sensores empleados desde satélites son fundamentales para captar la radiación reflejada o emitida por la Tierra en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético (Figura 1.5). Por ejemplo, el espectro visible por el ojo humano está entre los 400 y 700 nm (Figura 1.6).

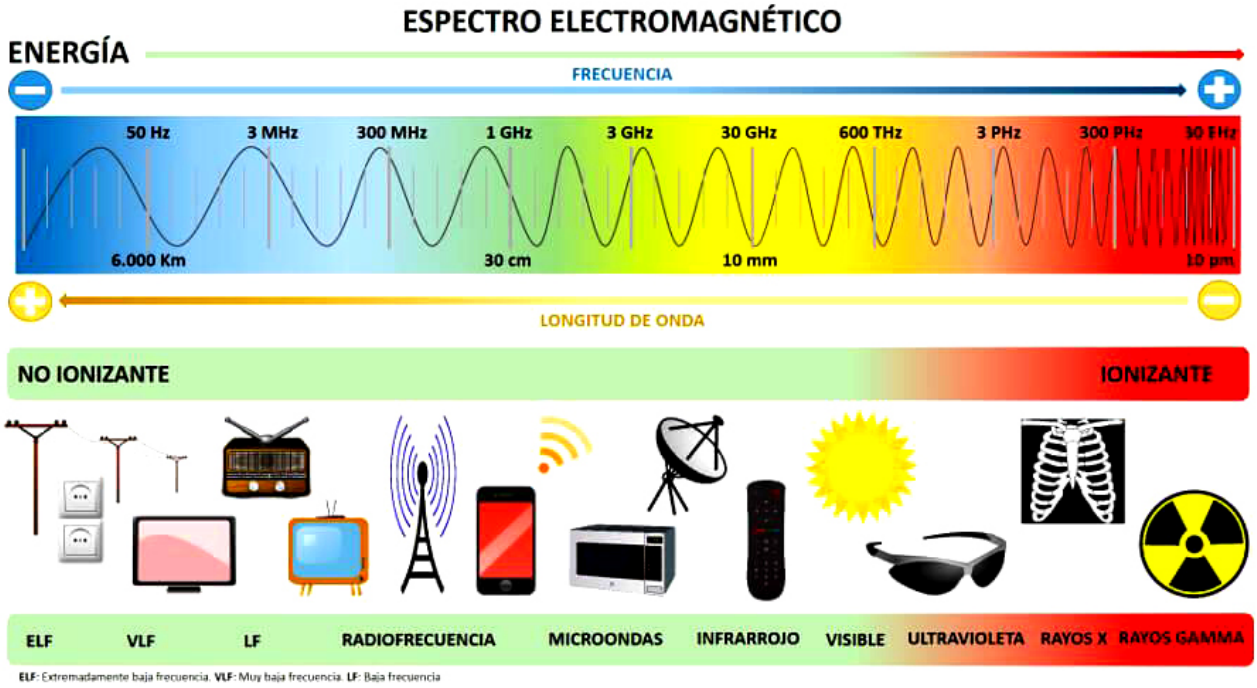

Figura 1.5. Espectro electromagnético (https://www.comunidad.madrid/servicios/salud/campos-electromagneticos)

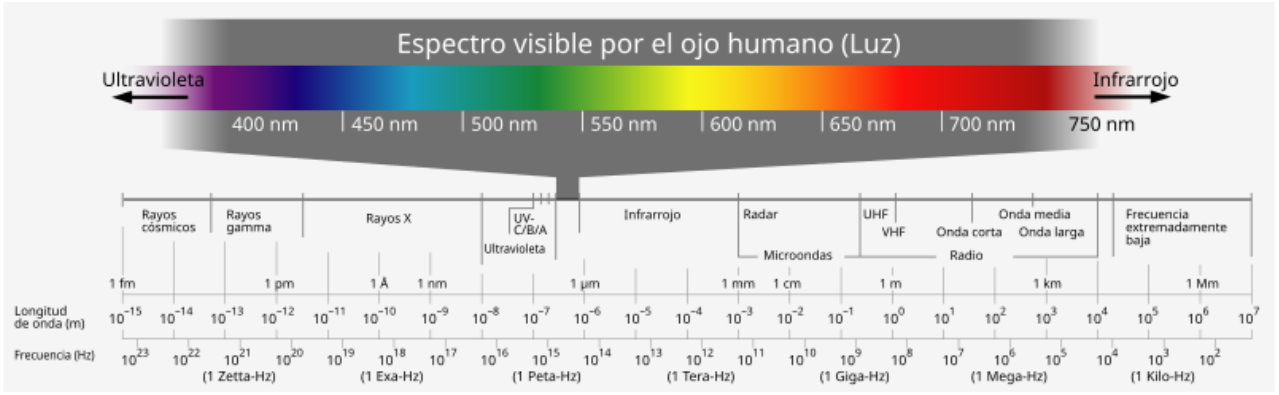

Figura 1.6. Espectro visible por el ojo humano (https://culturacientifica.com/2016/08/16/el-espectro-electromagnetico/).

Los sensores utilizados en teledetección cubren una amplia gama de aplicaciones, desde la medición de la temperatura terrestre hasta la monitorización de los océanos, glaciares, vegetación, humedad del suelo y desastres naturales. Cada tipo de sensor proporciona una visión complementaria de la Tierra, lo que permite un análisis integral del planeta en diferentes escalas y condiciones.

1.4.4. Transmisión, Recepción y Procesamiento de Datos

Una vez que el sensor captura los datos, estos deben ser transmitidos a una estación receptora en la Tierra. Desde allí, los datos son procesados y corregidos (radiométrica y atmosféricamente) para generar imágenes o mapas utilizables. Este procesamiento incluye:

- Corrección radiométrica: Ajusta los valores capturados por el sensor para compensar errores relacionados con el sistema de adquisición.
- Corrección atmosférica: Elimina o minimiza los efectos de la atmósfera que pueden distorsionar los datos capturados, asegurando que la radiación medida sea representativa de las características de la superficie terrestre.

1.4.5. Interpretación y Aplicación de los Datos

Finalmente, los datos procesados son analizados e interpretados para obtener información útil. Este proceso incluye la aplicación de algoritmos, técnicas de clasificación de imágenes, y la creación de modelos que transforman los datos en mapas o representaciones visuales.

La interpretación de los datos de teledetección es crucial para su aplicación en diversos campos, como la agricultura, la gestión de recursos naturales, la planificación urbana, y el monitoreo ambiental.

1.5. Autoevaluación

1. ¿Qué es la teledetección?

a) El uso de cámaras para capturar imágenes satelitales.

b) La técnica de medir o adquirir información de un objeto sin contacto físico.

c) Un sistema de comunicación por satélite.

d) El procesamiento de imágenes digitales en laboratorios.

2. ¿Cuál es una fuente de energía en la teledetección pasiva?

a) Un radar de microondas.

b) Radiación solar.

c) Un emisor de rayos láser.

d) Un escáner de rayos X.

3. ¿Qué determina cómo interactúa la radiación electromagnética con diferentes elementos de la superficie terrestre?

a) La dispersión de la radiación.

b) Las características físicas y químicas de los objetos.

c) La altura a la que se encuentra el objeto.

d) La velocidad a la que se desplaza la radiación.

4. ¿Cuál de las siguientes plataformas es un ejemplo de teledetección satelital?

a) Un dron.

b) Un avión comercial.

c) Landsat.

d) Un escáner manual de campo.

5. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones describe mejor un sensor activo en teledetección?

a) Un sensor que mide la radiación reflejada por los objetos de la Tierra.

b) Un sensor que depende de la radiación solar para capturar imágenes.

c) Un sensor que emite su propia energía y mide la radiación reflejada.

d) Un sensor que solo funciona de día.

6. ¿Qué ventaja tiene la teledetección en la agricultura?

a) Solo permite monitorear grandes extensiones de tierra.

b) No requiere procesamiento de datos.

d) Ayuda a detectar de manera temprana plagas y enfermedades en cultivos.

d) Solo se utiliza en la evaluación de suelos.

7. ¿Cuál de los siguientes índices se utiliza comúnmente para evaluar el vigor de la vegetación?

a) Índice de evaporación.

b) NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada).

c) Índice de productividad hídrica.

d) Índice de masa de tierra.

8. ¿Qué tipo de corrección es necesaria para eliminar los efectos de la atmósfera en los datos de teledetección?

a) Corrección topográfica.

b) Corrección atmosférica.

c) Corrección espectral.

d) Corrección de escala.

9. ¿Cuál de las siguientes longitudes de onda corresponde al espectro visible por el ojo humano?

a) Entre 300 y 500 nm.

b) Entre 400 y 700 nm.

c) Entre 700 y 900 nm.

d) Entre 200 y 400 nm.

10. ¿Qué plataforma sería más adecuada para estudios de agricultura de precisión a nivel local?

a) Un satélite Landsat.

b) Un dron con sensores multiespectrales.

c) Una estación meteorológica.

d) Un sensor hiperespectral en órbita geoestacionaria.

1.6. Solución de la autoevaluación

1. **¿Qué es la Teledetección?**

   Respuesta correcta: b) La técnica de medir o adquirir información de un objeto sin contacto físico.

2. **¿Cuál es una fuente de energía en la teledetección pasiva?**

   Respuesta correcta: b) Radiación solar.

3. **¿Qué determina cómo interactúa la radiación electromagnética con diferentes elementos de la superficie terrestre?**

   Respuesta correcta: b) Las características físicas y químicas de los objetos.

4. **¿Cuál de las siguientes plataformas es un ejemplo de teledetección satelital?**

   Respuesta correcta: c) Landsat.

5. **¿Cuál de las siguientes afirmaciones describe mejor un sensor activo en teledetección?**

   Respuesta correcta: c) Un sensor que emite su propia energía y mide la radiación reflejada.

6. **¿Qué ventaja tiene la teledetección en la agricultura?**

   Respuesta correcta: c) Ayuda a detectar de manera temprana plagas y enfermedades en cultivos.

7. **¿Cuál de los siguientes índices se utiliza comúnmente para evaluar el vigor de la vegetación?**

   Respuesta correcta: b) NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada).

8. **¿Qué tipo de corrección es necesaria para eliminar los efectos de la atmósfera en los datos de teledetección?**

   Respuesta correcta: b) Corrección atmosférica.

9. **¿Cuál de las siguientes longitudes de onda corresponde al espectro visible por el ojo humano?**

   Respuesta correcta: b) Entre 400 y 700 nm.

10. **¿Qué plataforma sería más adecuada para estudios de agricultura de precisión a nivel local?**

    Respuesta correcta: b) Un dron con sensores multiespectrales.

2. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA TELEDETECCIÓN

2.1. Introducción

Los **fundamentos físicos de la teledetección** se basan en la interacción de la **energía electromagnética** con la superficie terrestre y la atmósfera. La teledetección aprovecha las propiedades de la radiación electromagnética para obtener información a distancia de los objetos en la Tierra, ya que todo cuerpo emite, refleja o absorbe radiación en diferentes longitudes de onda.

La radiación electromagnética se comporta tanto como una onda, con propiedades como la **longitud de onda** y la **frecuencia**, como una partícula, en forma de fotones. El espectro electromagnético abarca desde longitudes de onda cortas, como los **rayos gamma**, hasta longitudes de onda largas, como las **ondas de radio**, pero en teledetección se emplean principalmente las regiones del **visible**, el **infrarrojo** y las **microondas**.

La cantidad y calidad de la energía captada por los sensores dependen de varios factores, como las propiedades de los objetos (su capacidad de reflejar o emitir radiación), el comportamiento de la atmósfera, y las características del sensor. La **interacción entre la radiación y los objetos** genera firmas espectrales que permiten identificar diferentes elementos en la superficie terrestre, como vegetación, agua o suelos. Estos principios físicos son clave para interpretar los datos y aplicarlos en diversos campos como la agricultura, la gestión de recursos naturales y el monitoreo ambiental.

2.2. Conceptos de Resolución en Teledetección

En teledetección, la **resolución** se refiere a la capacidad de un sensor para captar detalles específicos sobre la superficie terrestre. Existen diferentes tipos de resoluciones, cada una relacionada con un aspecto particular de la captura de datos, y todas ellas son fundamentales para determinar la calidad, precisión y utilidad de la información obtenida.

Cada tipo de resolución tiene un papel específico en la forma en que se capturan y procesan los datos, y su combinación determina la utilidad de las imágenes para diferentes aplicaciones. Según las necesidades del estudio, como el análisis de pequeños detalles o el monitoreo de cambios rápidos, se elegirá el sensor adecuado con las resoluciones más apropiadas

2.2.1. Resolución Espacial

La **resolución espacial** se refiere al tamaño del área de la superficie terrestre que cubre un píxel en una imagen de satélite. En otras palabras, es la medida de detalle que puede capturar un sensor. Cuanto más pequeña es el área representada por un píxel, mayor es la resolución espacial, lo que significa que el sensor puede detectar detalles más finos.

- **Muy Alta resolución espacial (VHR)**: Los satélites con alta resolución espacial, como **IKONOS, Deimos-2, QuickBird, GeoEye-1, WorldView-2** o **WorldView-3**, tienen píxeles que cubren áreas de entre **0,3 y 1 metros**. Estos sensores pueden capturar detalles precisos, como vehículos, edificios y pequeños cultivos, lo que los hace ideales para aplicaciones como la **planificación urbana** y el **monitoreo de infraestructuras**. En la Figura 2.1 se muestra un

detalle del puerto de Villaricos (Almería) tomado de una imagen del satélite GeoEye-1 el 29 de septiembre de 2010. La imagen pancromática tiene un tamaño de pixel de 0,5 m, la imagen multiespectral 2 m. Mediante la fusión de ambas imágenes podemos obtener una imagen que mantenga la precisión geométrica de la imagen pancromática y que contenga la riqueza espectral de la imagen multiespectral.

Pancromática, 0,5 m píxel | Multiespectral, 2 m píxel | Fusionada, 0,5 m píxel

Figura 2.1. Imágenes pancromática, multiespectral y fusionada del satélite GeoEye-1 tomadas el 29 de septiembre de 2010 sobre el Puerto de Villaricos (Almería).
Fuente: elaboración propia.

- **Alta resolución espacial**: Incluyen satélites que son capaces de captar imágenes con tamaños de píxeles entre **1 y 5 metros**, como SPOT-6 o Cartosat-1.
- **Media resolución espacial**: Imágenes de satélite con tamaños de pixel de entre **5 y 30 metros**. En esta categoría se encuentran las constelaciones de satélites más usados en agricultura y de acceso libre, como son Landsat y Sentinel-2. En la Figura 2.2 vemos la comparación entre una imagen Sentinel-2A (10 m) del 26 de diciembre de 2020 y una imagen de WorldView-3 fusionada (0,3 m) tomada el 25 de diciembre de 2020. Ambas imágenes se muestran en RGB sobre una extensión de 3 km x 3 km (arriba) y 750 m x 750 m (abajo). Están tomadas en una zona de invernaderos situada al suroeste de La Puebla de Vícar (Almería).

WorldView-3 fusionada (0,3 m)
3 km x3 km

Sentinel-2A (10 m)
3 km x3 km

WorldView-3 fusionada (0,3 m)
750 m x 750 m

Sentinel-2A (10 m)
750 m x 750 m

Figura 2.2. Imágenes RGB de WorldView-3 fusionada (0,3 m) y Sentinel-2A (10 m), tomadas el 25 y 26 de diciembre de 2020, respectivamente, sobre una zona de invernaderos cercana a La Puebla de Vícar (Almería). Fuente: elaboración propia.

- **Baja resolución espacial**: Sensores con baja resolución espacial, como los de los satélites **MODIS** o **AVHRR**, tienen píxeles que cubren áreas más grandes, como **250 a 1000 metros**. Estos sensores son adecuados para estudios de **gran escala**, como el monitoreo de **ecosistemas** o cambios climáticos.

2.2.2. Resolución Espectral

La **resolución espectral** hace referencia a la capacidad de un sensor para distinguir entre diferentes longitudes de onda en el espectro electromagnético. Cuantas más bandas espectrales pueda captar un sensor y más estrechas sean estas bandas, mayor será su resolución espectral.

- **Sensores multiespectrales**: Capturan datos en un número limitado de bandas espectrales, típicamente entre **3 y 10** bandas, como el satélite **Landsat**. Estas bandas incluyen el rango

visible, el infrarrojo cercano (NIR) y, en algunos casos, el infrarrojo de onda corta (SWIR), lo que es útil para identificar características generales de la vegetación, suelo, agua y plástico (muy importante en la agricultura de Almería).

- **Sensores hiperespectrales**: Capturan datos en cientos de bandas espectrales muy estrechas, como el sensor **Hyperion** en el satélite **EO-1**. Estos sensores pueden detectar diferencias muy sutiles entre tipos de materiales o la composición química de la vegetación y el suelo, lo que es ideal para estudios detallados de **geología**, **agricultura** y **monitoreo ambiental**.

La **resolución espectral** determina la precisión con la que se pueden distinguir los diferentes tipos de cobertura terrestre y materiales, siendo crucial para aplicaciones que requieren un análisis detallado del espectro de reflectancia.

2.2.3. Resolución Temporal

La **resolución temporal** se refiere a la frecuencia con la que un sensor puede observar el mismo punto de la superficie terrestre, es decir, el tiempo que transcurre entre dos imágenes consecutivas de la misma área.

- **Alta resolución temporal**: Sensores como los de **MODIS**, en los satélites Terra y Aqua, que proporcionan imágenes de la misma área cada 1 o 2 días, tienen alta resolución temporal. Son útiles para monitorear cambios rápidos como **incendios**, **inundaciones**, o el crecimiento de la vegetación durante la temporada de cultivo.
- **Baja resolución temporal**: Sensores como los de **Landsat**, que revisitan una misma área cada **16 días**, tienen baja resolución temporal. Aunque proporcionan imágenes más detalladas, no son tan adecuados para fenómenos que cambian rápidamente, pero son útiles para estudios de **cambio a largo plazo**, como la deforestación o el crecimiento urbano.

La **resolución temporal** es crítica para estudios que requieren monitoreo frecuente, como la **gestión agrícola** y la **detección de desastres naturales**.

2.2.4. Resolución Radiométrica

La **resolución radiométrica** se refiere a la capacidad de un sensor para distinguir pequeñas diferencias en la energía de la radiación reflejada o emitida por la superficie terrestre. Está relacionada con la **profundidad de bits** del sensor, que determina cuántos niveles de intensidad de radiación puede detectar. Es decir, cuanto mejor es la resolución radiométrica, más sensible es el sensor a las pequeñas diferencias de energía. La resolución radiométrica viene determinada por múltiples factores, entre los que destacan la saturación de la radiancia -lo más «brillante» que pueden medir los detectores- y el modo en que se cuantizan (convierten en un flujo de bits digitales) las mediciones de la radiancia.

- **Mayor resolución radiométrica**: Sensores con alta resolución radiométrica, como **12 o 16 bits**, pueden distinguir entre miles de niveles de intensidad de radiación (por ejemplo, un sensor de 12 bits puede distinguir **4096 niveles**). Esto permite captar diferencias sutiles en el brillo o

color de un objeto, lo cual es crucial para analizar detalles en áreas como la **vegetación**, donde los cambios en el vigor de las plantas pueden ser muy pequeños.

- **Menor resolución radiométrica**: Sensores con baja resolución radiométrica, como **8 bits**, solo pueden distinguir **256 niveles** de intensidad. Aunque pueden ser útiles para aplicaciones básicas, pierden detalle en situaciones donde se requiere un análisis más preciso.

La **resolución radiométrica** afecta la capacidad de los sensores para captar detalles finos de los cambios en la energía reflejada o emitida, lo que influye en la precisión de los análisis de teledetección, especialmente en estudios de vegetación y suelos.

Ejemplos:

- Sensor 14-bits, 16.384 niveles: Landsat OLI-2
- Sensor 12-bits, 4.096 niveles: Landsat OLI
- Sensor 10-bits, 1.024 niveles: AVHRR
- Sensor 8-bits, 256 niveles: Landsat TM
- Sensor 6-bits, 64 niveles: Landsat MSS

En la Figura 2.3. se observa la misma escena en Arabia Saudí con diferentes resoluciones radiométricas, donde se puede apreciar cómo la profundidad de bits puede traducirse en un refinado detalle de la imagen.

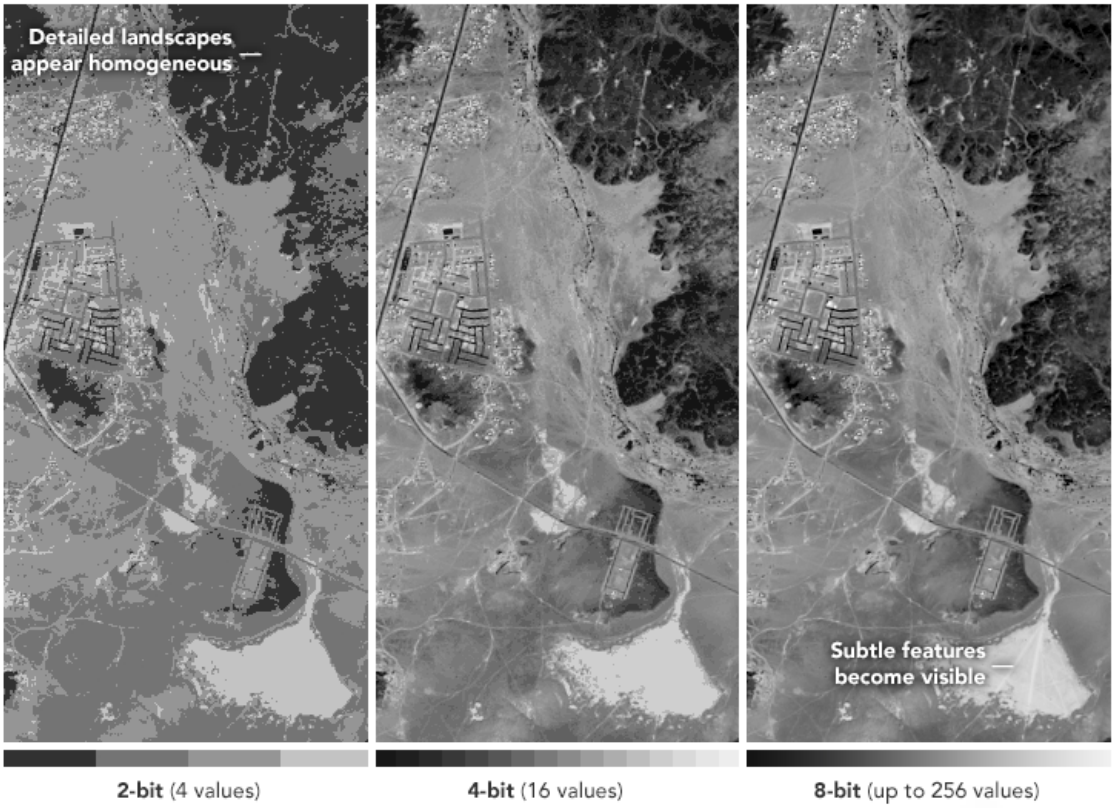

Figura 2.3. Ejemplo de escena en Arabia Saudí con diferentes resoluciones radiométricas (https://landsat.visibleearth.nasa.gov/view.php?id=91071).

2.3. El espectro electromagnético

El **espectro electromagnético** es el rango completo de todas las longitudes de onda de la radiación electromagnética, que varían desde ondas muy cortas, como los rayos gamma, hasta ondas largas, como las ondas de radio. En teledetección, se aprovechan varias partes del espectro para obtener información sobre los objetos y fenómenos en la superficie terrestre. Los sensores en los satélites y otras plataformas están diseñados para captar la radiación reflejada, absorbida o emitida por los objetos en diferentes rangos del espectro electromagnético.

Los principales rangos utilizados en teledetección son:

- Rango visible
- Infrarrojo cercano (NIR)
- Infrarrojo térmico
- Microondas

En la Figura 2.4 pueden verse las 8 bandas del satélite multiespectral WorldView-2. Nótese que la banda pancromática (PAN) corresponde a Blanco y Negro (B&W), en la figura está representada la Banda Panchromatic WV2 (450 a 800 nm). En la Tabla 2.1 se reflejan los valores exactos de estas bandas.

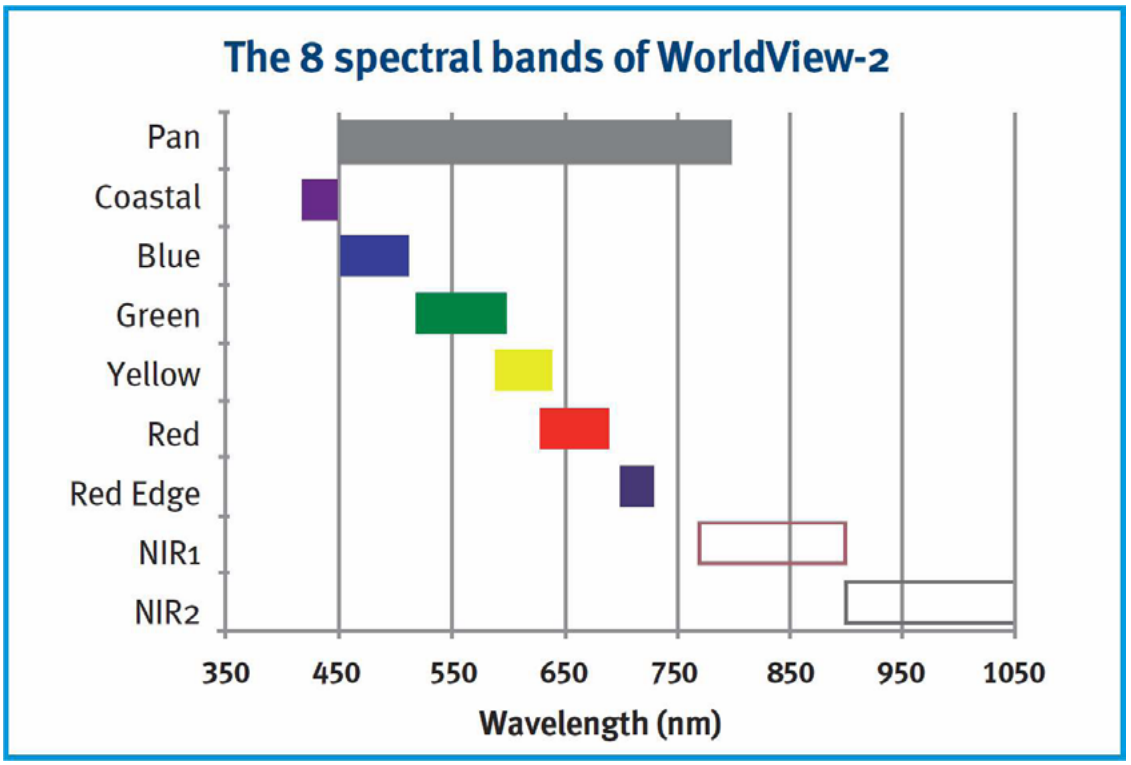

Figura 2.4. Bandas espectrales del satélite WorldView-2 (https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/worldview-2/).

Tabla 2.1. Bandas espectrales de WorldView-2

Banda	Nombre	Mínimo (nm)	Máximo (nm)	Resolución espacial (m)
MS1	Coastal	400	450	2
MS2	Blue	450	510	2
MS3	Green	510	580	2
MS4	Yellow	585	625	2
MS5	Red	630	690	2
MS6	Red Edge	705	745	2
MS7	NIR_1	770	895	2
MS8	NIR_2	860	1040	2
PAN	Pancromática	450	800	0,5

2.3.1. Rango Visible (0,4 – 0,7 µm)

El **rango visible** comprende las longitudes de onda que pueden ser percibidas por el ojo humano. Este rango se divide en tres bandas principales:

- **Azul** (0,4 – 0,5 µm)
- **Verde** (0,5 – 0,6 µm)
- **Rojo** (0,6 – 0,7 µm)

En teledetección, los sensores captan la radiación solar que es reflejada por los objetos en la superficie terrestre en estas longitudes de onda. Este rango es útil para generar imágenes en **color verdadero**, es decir, imágenes que representan los colores como los percibe el ojo humano. También es útil para aplicaciones como la identificación de cuerpos de agua, áreas urbanas, vegetación y suelos.

La vegetación sana, por ejemplo, refleja más radiación en la parte verde del espectro visible. Sin embargo, para detectar detalles más específicos sobre la salud de los cultivos, se suele recurrir a otras regiones del espectro, como el infrarrojo cercano.

En la Figura 2.5. se observa una comparativa de bandas espectrales de los satélites QuickBird, WorldView-1, y WorldView-2. Nótese que es visible esta entre los 400 y los 700 nm (0,4 – 0,7 µm).

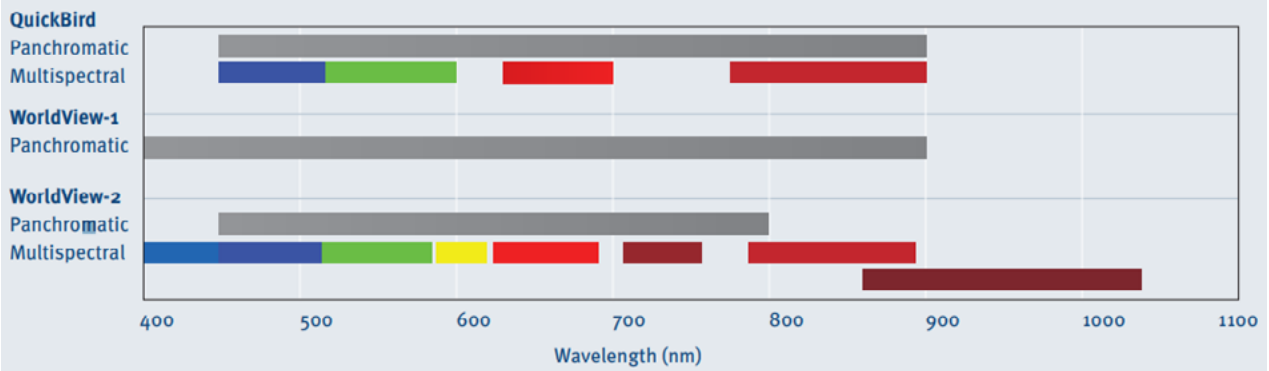

Figura 2.5. Comparativa de Bandas espectrales de los satélites QuickBird, WorldView-1, y WorldView-2 (https://earthzine.org/very-high-spatial-resolution-imagery-for-urban-applications/).

2.3.2. Infrarrojo Cercano (NIR) (0,7 – 1,3 µm)

El **infrarrojo cercano (NIR)** es una región clave del espectro electromagnético en teledetección. No es visible para el ojo humano, pero es ampliamente utilizado para estudiar la **vegetación** y el **agua**, ya que los diferentes materiales reflejan esta radiación de manera distinta. Las plantas sanas, por ejemplo, reflejan grandes cantidades de radiación en el NIR, lo que permite diferenciar entre vegetación sana y estresada.

En este sentido, el **índice de vegetación NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)** calcula la diferencia entre la radiación reflejada en el rojo y en el NIR, proporcionando una herramienta eficaz para monitorizar la **salud de los cultivos**, la **densidad de vegetación** y los cambios estacionales en la cobertura vegetal. La Figura 2.6 muestra el índice NDVI para una plantación de caña de azúcar en Mozambique con datos espectrales de imágenes de satélite de 4 bandas (R, G, B, NIR). Concretamente el índice NDVI es igual al valor de la banda NIR menos el valor de la banda R partido por la suma de dichos valores (NIR + R).

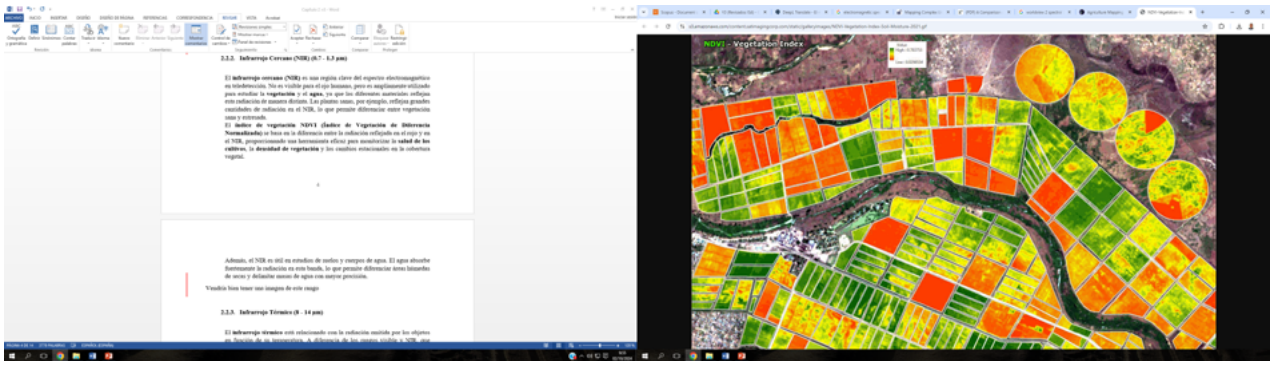

Figura 2.6. Imagen de WorldView-2 donde se ha determinado el índice NDVI a empleando la banda NIR como una de las bandas (https://www.satimagingcorp.com/applications/natural-resources/agriculture/).

Al usar los sensores multiespectrales bandas no visibles para el ojo humano (e.g., NIR) podemos responder a preguntas que no podrían ser resueltas sin esa información. Por ejemplo, en la Figura 2.7 se muestra una imagen del satélite GeoEye-1 fusionada (0,5 m) tomada en septiembre de 2010 que muestra el campo de fútbol de Garrucha (Almería). Si quisiéramos saber si ese campo deportivo es de césped natural o artificial usando una imagen con una composición de bandas es RGB, es decir,

lo que vería el ojo humano, (Figura 2.7A), sería prácticamente imposible. Sin embargo, empleando la banda NIR, y una composición en falso color (NIR, R, G), donde el color rojo muestra los valores de la banda NIR, que son muy elevados en vegetación activa (Figura 2.7B), podríamos deducir que el campo es de césped artificial, ya que, si fuese de hierba natural, el campo de juego se apreciaría en color rojo.

A B

Figura 2.7. Imagen fusionada de GeoEye-1 tomada en septiembre de 2010 sobre el campo de fútbol de Garrucha (Almería). A: Composición R, G, B. B: Composición NIR, R, G. Fuente: elaboración propia.

Además, el NIR es útil en estudios de suelos y cuerpos de agua. El agua absorbe fuertemente la radiación en esta banda, lo que permite diferenciar áreas húmedas de secas y delimitar masas de agua con mayor precisión. La Figura 2.8 muestra el índice NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada) para una plantación de caña de azúcar en Mozambique con datos espectrales de imágenes de satélite de 4 bandas (RGBN). El índice NDWI aplicado a detectar masas de agua es igual al valor de la banda G menos el NIR partido por la suma de ambas bandas (G + NIR).

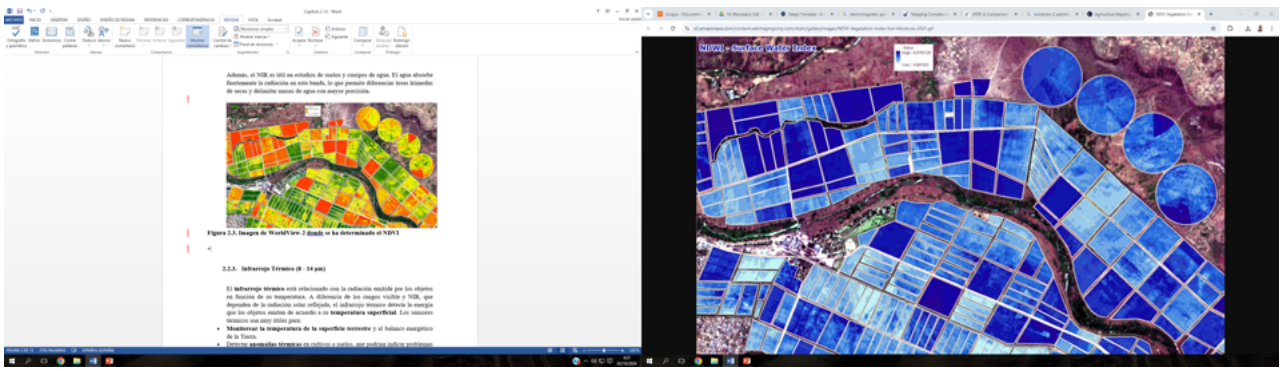

Figura 2.8. Imagen de WorldView-2 donde se ha determinado el índice NDWI a empleando la banda NIR como una de las bandas (https://www.satimagingcorp.com/applications/natural-resources/agriculture/).

2.3.3. Infrarrojo Térmico (8 - 14 µm)

El **infrarrojo térmico** está relacionado con la radiación emitida por los objetos en función de su temperatura. A diferencia de los rangos visible y NIR, que dependen de la radiación solar reflejada, el infrarrojo térmico detecta la energía que los objetos emiten de acuerdo a su **temperatura superficial**. Los sensores térmicos son muy útiles para:

- **Monitorear la temperatura de la superficie terrestre** y el balance energético de la Tierra.
- Detectar **anomalías térmicas** en cultivos o suelos, que podrían indicar problemas como estrés hídrico o deficiencias en el riego.
- Identificar zonas de **calor urbano** en ciudades (islas de calor). Véase la Figura 2.9 para Las Vegas (USA).
- Mapear áreas de **actividad volcánica** o incendios, ya que estos fenómenos elevan significativamente la temperatura en la superficie.

En el ámbito agrícola, el infrarrojo térmico se utiliza para evaluar las **necesidades de riego** y gestionar el agua, ya que las plantas que carecen de suficiente agua tienden a estar más calientes.

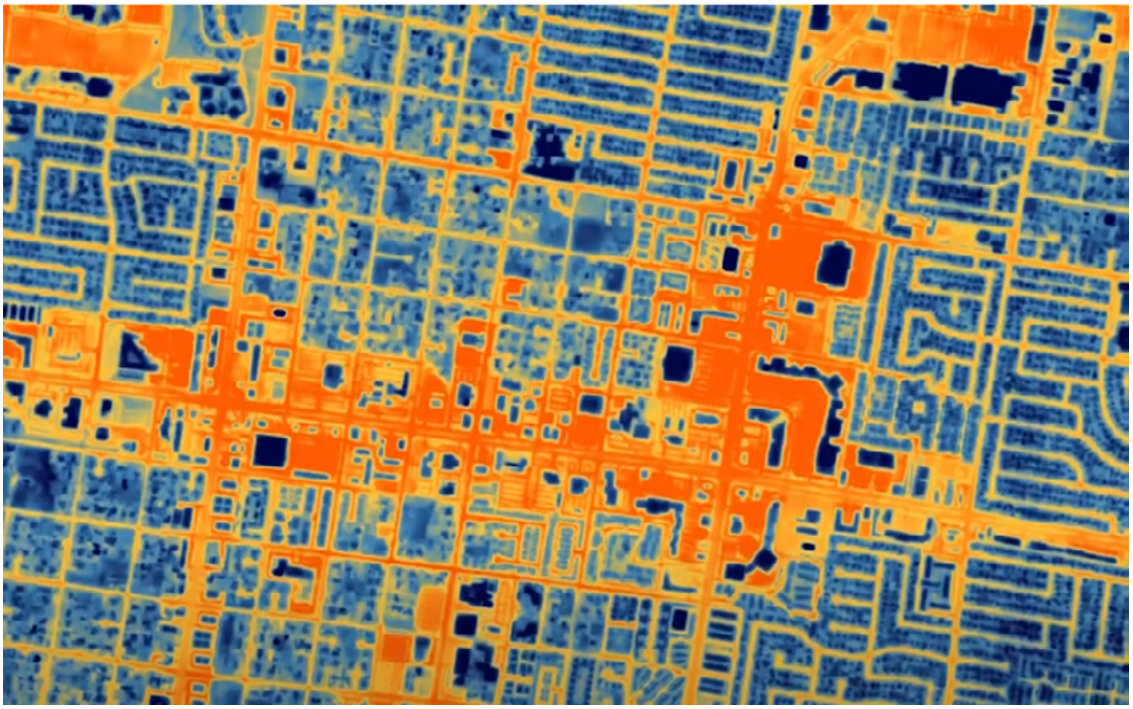

Figura 2.9. Imagen de Infrarrojo Térmico del satélite Hot Sat-1 sobre Las Vegas (USA) (https://www.satellitevu.com/)

2.3.4. Microondas (1 mm - 1 m)

Las **microondas** corresponden a las longitudes de onda más largas utilizadas en teledetección, y presentan una característica clave: **pueden penetrar nubes**, humo, y, en algunos casos, la vegetación y el suelo superficial. Por esta razón, los sensores de microondas son extremadamente útiles en condiciones climáticas adversas o en zonas que están constantemente nubladas.

En teledetección, las microondas se emplean en dos tipos de sistemas:

- **Sistemas activos:** Como el **Radar de Apertura Sintética (SAR)**, que emite microondas y mide el tiempo que tardan en regresar al sensor después de rebotar en la superficie terrestre. El SAR se utiliza en la agricultura para medir la **humedad del suelo** y monitorear **inundaciones** o **deforestación**. También es útil en áreas con poca visibilidad (debido a la niebla, lluvia o nubes) y para obtener información topográfica detallada.

- **Sistemas pasivos:** Detectan la radiación de microondas emitida por la Tierra, lo que permite realizar estudios de la **temperatura del suelo** y del océano, así como medir la cantidad de agua en la atmósfera o en el suelo.

2.4. Interacción de la radiación con el suelo, agua y vegetación

En teledetección, la radiación electromagnética que llega a la superficie terrestre interactúa de diversas maneras con los distintos elementos del paisaje, como el **suelo**, el **agua** y la **vegetación**. Estas interacciones dependen de las propiedades físicas y químicas de los objetos y se manifiestan en forma de **reflectancia**, **absorción** o **transmisión** de la radiación en diferentes longitudes de onda. Estas características de interacción forman las llamadas **firmas espectrales**, que permiten identificar y diferenciar objetos en la superficie terrestre.

2.4.1. Comportamiento Espectral de Diferentes Tipos de Suelos

El comportamiento espectral del suelo depende de factores como su **composición mineral**, **contenido de agua**, **materia orgánica** y **textura**. Los suelos reflejan la radiación de manera diferente en distintas partes del espectro electromagnético:

- **Suelo seco:** Tiene una alta reflectancia en el rango visible e infrarrojo cercano. La textura del suelo, su color y los minerales que contiene influencian su firma espectral. Los suelos claros tienden a reflejar más radiación que los suelos oscuros.
- **Suelo húmedo:** El agua en el suelo afecta fuertemente la reflectancia, especialmente en el infrarrojo cercano (NIR) y de onda corta (SWIR). Los suelos húmedos reflejan menos radiación en estas bandas que los suelos secos, ya que el agua absorbe una gran cantidad de radiación en el infrarrojo.
- **Suelos ricos en materia orgánica:** La materia orgánica oscurece el suelo y reduce su reflectancia en el espectro visible. Los suelos con alto contenido de materia orgánica tienen una reflectancia menor que los suelos más minerales.

La **humedad** y la **textura del suelo** son variables clave que afectan la interacción de la radiación con el suelo. En teledetección, los suelos húmedos y secos pueden diferenciarse fácilmente, lo que es útil para aplicaciones en **gestión del agua** y **agricultura de precisión**.

2.4.2. Respuesta Espectral de la Vegetación

La vegetación tiene una firma espectral única que varía dependiendo de su **salud**, **tipo de planta**, y **estructura**, lo que la convierte en uno de los principales objetos de estudio en teledetección. Su respuesta espectral se divide en tres regiones clave:

- **Rango visible (0,4 - 0,7 μm):**

  En esta región, la vegetación absorbe fuertemente la radiación en las bandas **azul** y **roja** debido a la presencia de **clorofila**, mientras que refleja más en el **verde**. Esta es la razón por la cual las plantas saludables se ven verdes a simple vista.

- **Infrarrojo cercano (NIR) (0,7 - 1,3 µm):**

  Las hojas de las plantas reflejan fuertemente la radiación en el NIR debido a la estructura interna de las hojas, lo que hace que esta banda sea fundamental para estimar la biomasa y la salud de la vegetación. Cuanto más sana está la planta, mayor es la cantidad de radiación NIR que refleja. La vegetación estresada o enferma refleja menos radiación en esta región.

- **Infrarrojo de onda corta (SWIR) (1,3 - 2,5 µm):**

  En esta región, la radiación es absorbida principalmente por el **contenido de agua** en las hojas. Las plantas que contienen más agua absorben más radiación, lo que permite usar esta región para monitorear el **estrés hídrico** en cultivos o plantas.

  Este comportamiento espectral de la vegetación es crucial para aplicaciones como la **agricultura de precisión**, el **monitoreo de ecosistemas**, y la **gestión forestal**, ya que permite detectar cambios en la salud de las plantas y en las condiciones del suelo de forma remota.

2.4.3. Índices de Reflectancia

Los **índices de reflectancia** son combinaciones matemáticas de los valores de reflectancia en diferentes bandas espectrales, diseñadas para resaltar ciertas características de los objetos o superficies. Estos índices permiten, por ejemplo, medir la **salud de la vegetación**, la **humedad del suelo** o la **calidad del agua**.

Algunos índices comunes en teledetección relacionados con cultivos, bosques y medio ambiente son:

- **NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada):**

  El **NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)** es uno de los índices más utilizados en teledetección para evaluar la **salud de la vegetación**. El NDVI se basa en la diferencia entre la radiación reflejada en la banda del **rojo (Red)** y la del **infrarrojo cercano (NIR)**, ya que las plantas sanas absorben fuertemente la luz roja para la fotosíntesis y reflejan gran parte de la radiación en el infrarrojo cercano. Los valores más bajos indican vegetación estresada o poca cobertura vegetal.

  Fórmula del NDVI:

  NDVI= (NIR−Rojo)/(NIR+Rojo)

  Donde:

  NIR: Reflectancia en la banda del **infrarrojo cercano** (aproximadamente entre 0,7 µm y 1,3 µm).

  Rojo: Reflectancia en la banda del **rojo** (aproximadamente entre 0,6 µm y 0,7 µm).

- **Índice de Humedad de Suelos (NDWI):**

  El NDWI (Normalized Difference Water Index), definido por McFeeters (1996), evalúa el contenido de agua en la vegetación y los suelos utilizando bandas del espectro infrarrojo cercano y del verde (Figura 2.8). Permite monitorear la humedad del suelo y evaluar el estado hídrico de las plantas.

  Estos índices son esenciales para **monitorear cultivos**, detectar **sequías** y gestionar los **recursos hídricos**.

  El NDWI original fue propuesto por Gao (1996) y se calcula utilizando las bandas del **infrarrojo cercano (NIR)** y el **infrarrojo de onda corta (SWIR)**, ya que estas bandas son sensibles al contenido de agua en las hojas y en la superficie terrestre.

  Fórmula del NDWI:

  NDWI= (NIR−SWIR) / (NIR+SWIR)

  Donde:

  NIR: Reflectancia en el **Infrarrojo Cercano** (aproximadamente entre 0,7 μm y 1,3 μm).

  SWIR: Reflectancia en el **Infrarrojo de Onda Corta** (aproximadamente entre 1,3 μm y 2,5 μm).

2.5. Autoevaluación

1. ¿Qué rango de longitudes de onda corresponde al rango visible en el espectro electromagnético?

a) 0,7 - 1,0 μm

b) 0,4 - 0,7 μm

c) 0,3 - 0,5 μm

d) 0,9 - 1,3 μm

2. ¿Cuál es la principal característica de la radiación reflejada en el infrarrojo cercano (NIR) por la vegetación sana?

a) La vegetación sana absorbe toda la radiación NIR

b) La vegetación sana refleja fuertemente la radiación NIR

c) La vegetación sana no interactúa con la radiación NIR

d) La vegetación sana refleja muy poco en el rango NIR

3. ¿En qué rango del espectro electromagnético se encuentra la radiación infrarroja térmica?

a) 0,3 - 0,5 μm

b) 0,7 - 1,3 μm

c) 8 - 14 μm

d) 1,3 - 2,5 μm

4. ¿Cuál es la principal aplicación de la banda de microondas en teledetección?

a) Estudio de la temperatura de la superficie terrestre

b) Monitoreo de la vegetación

c) Detección de la humedad del suelo y la observación de la precipitación no se menciona concretamente el tema de la precipitación en el tema

d) Monitoreo de la reflectancia del suelo

5. ¿Qué mide el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)?

a) La temperatura de la vegetación

b) El contenido de agua en el suelo

c) La salud y la cantidad de vegetación

d) La reflectancia del suelo seco

6. ¿Qué tipo de suelo tiene una mayor reflectancia en el espectro visible?

a) Suelo húmedo

b) Suelo con alto contenido de materia orgánica

c) Suelo seco

d) Suelo cubierto por vegetación

7. ¿Qué información proporciona la resolución espacial de un sensor?

a) La frecuencia con la que un sensor capta imágenes de una misma área

b) La cantidad de niveles de intensidad de radiación que puede detectar un sensor

c) El tamaño del área de la superficie terrestre cubierto por un píxel en una imagen

d) El número de bandas espectrales capturadas por el sensor

8. ¿Cómo se define la resolución espectral de un sensor?

a) La capacidad de detectar diferencias de brillo entre objetos

b) El número de bandas espectrales que puede captar un sensor

c) El intervalo de tiempo entre imágenes consecutivas de la misma área

d) El área cubierta por un píxel en una imagen

9. ¿Qué describe la resolución temporal en teledetección?

a) El número de niveles de intensidad que puede captar un sensor

b) La cantidad de detalles que puede distinguir un píxel en una imagen

c) La capacidad de un sensor para captar imágenes en diferentes bandas espectrales

d) La frecuencia con la que un sensor captura imágenes de una misma área

10. ¿Qué tipo de resolución permite distinguir más niveles de intensidad de radiación en teledetección?

a) Resolución espectral

b) Resolución espacial

c) Resolución temporal

d) Resolución radiométrica

2.6. Solución de la autoevaluación

1. **¿Qué rango de longitudes de onda corresponde al rango visible en el espectro electromagnético?**

   Respuesta correcta: b) 0,4 - 0,7 µm

2. **¿Cuál es la principal característica de la radiación reflejada en el infrarrojo cercano (NIR) por la vegetación sana?**

   Respuesta correcta: b) La vegetación sana refleja fuertemente la radiación NIR

3. **¿En qué rango del espectro electromagnético se encuentra la radiación térmica?**

   Respuesta correcta: c) 8 - 14 µm

4. **¿Cuál es la principal aplicación de la banda de microondas en teledetección?**

   Respuesta correcta: c) Detección de la humedad del suelo y la observación de la precipitación

5. **¿Qué mide el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)?**

   Respuesta correcta: c) La salud y la cantidad de vegetación

6. **¿Qué tipo de suelo tiene una mayor reflectancia en el espectro visible?**

   Respuesta correcta: c) Suelo seco

7. **¿Qué información proporciona la resolución espacial de un sensor?**

   Respuesta correcta: c) El tamaño del área de la superficie terrestre cubierto por un píxel en una imagen

8. **¿Cómo se define la resolución espectral de un sensor?**

   Respuesta correcta: b) El número de bandas espectrales que puede captar un sensor

9. **¿Qué describe la resolución temporal en teledetección?**

   Respuesta correcta: d) La frecuencia con la que un sensor captura imágenes de una misma área

10. **¿Qué tipo de resolución permite distinguir más niveles de intensidad de radiación en teledetección?**

    Respuesta correcta: d) Resolución radiométrica