

Análisis multiespectral de imágenes satelitales para monitoreo de contaminantes en agua en el norte de Veracruz y sur de Tamaulipas

RESUMEN: El presente trabajo examina la viabilidad de emplear imágenes satelitales multiespectrales, con el objetivo de analizar la detección de contaminantes en cuerpos de agua en contextos de conservación y medio ambiente.

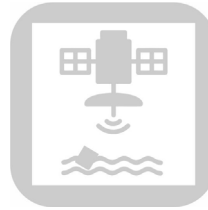
La evaluación de las aplicaciones de estas imágenes se realizó a través de diversos recursos académicos, como artículos científicos, tesis, libros y resúmenes de congresos. En este proceso, se identificaron diversas aplicaciones relacionadas con el análisis de cobertura terrestre y cuerpos de agua utilizando imágenes satelitales.

En las aplicaciones ambientales, se encontraron estudios con temáticas, como la cobertura forestal, la expansión urbana, índices de vegetación, cambios en la cobertura vegetal, deforestación, distribución espacial del agua, monitoreo de cuerpos de agua, dinámica de lagunas y parámetros de calidad del agua.

Se concluye que los principios físicos de la percepción remota para la obtención de metadatos proporcionan una base teórica sólida para comprender el funcionamiento de los sensores satelitales y la generación de información útil, como imágenes con una resolución aceptable y aplicables a estudios de amplias áreas territoriales.

Por tanto, es crucial comprender las ventajas de estas tecnologías para planificar investigaciones que utilicen esta información, con el propósito de contribuir a la protección y conservación de áreas afectadas tanto por factores naturales como antropogénicos (Veneros et al., 2020).

PALABRAS CLAVE: imágenes multiespectrales, Landsat 8, teledetección, calidad del agua.



Colaboración

Edwin Daniel Méndez Cruz; Gabriel Grosskelwing Núñez; Saúl Santiago Cruz; Claudia Itzel Vázquez Moreno, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior Mianzta; Miguel Ángel López Ramírez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Martínez de la Torre

Fecha de recepción: 15 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 14 de octubre de 2024

ABSTRACT: This paper examines the feasibility of using multispectral satellite images, with the aim of analyzing the detection of pollutants in water bodies in conservation and environmental contexts.

The evaluation of the applications of these images was carried out through various academic resources, such as scientific articles, theses, books and conference abstracts. In this process, several applications related to the analysis of land cover and water bodies using satellite images were identified.

In the environmental applications, studies were found with topics such as forest cover, urban expansion, vegetation indices, changes in vegetation cover, deforestation, spatial distribution of water, monitoring of water bodies, dynamics of lagoons and water quality parameters.

It is concluded that the physical principles of remote sensing for obtaining metadata provide a solid theoretical basis for understanding the operation of satellite sensors and the generation of useful information, such as images with an acceptable resolution, applicable to studies of large territorial areas.

Therefore, it is crucial to understand the advantages of these technologies in order to plan research using this information, with the purpose of contributing to the protection and conservation of areas affected by both natural and anthropogenic factors (Veneros et al., 2020).

KEYWORDS: multispectral imaging, Landsat 8, remote sensing, water quality.

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos vitales para la vida en la Tierra, indispensable para los ecosistemas, la agricultura, la industria y el consumo humano. Sin embargo, la contaminación de cuerpos de agua, como ríos, lagos, acuíferos y océanos, ha emergido como una de las problemáticas ambientales más graves de nuestro tiempo. La presencia de contaminantes en el agua desde sustancias químicas tóxicas hasta residuos plásticos y patógenos afecta no solo la salud humana, sino también la biodiversidad y el equilibrio ecológico.

Hoy en día la toma de muestras de cuerpos de agua es una tarea fundamental para el monitoreo ambiental, la investigación científica y la gestión de los recursos hídricos. Este proceso está asociado con una serie de dificultades técnicas y costos elevados que deben ser considerados para llevar a cabo análisis efectivos y representativos.

La localización geográfica de los cuerpos de agua puede complicar significativamente la extracción de muestras. Los lagos, ríos y océanos de difícil acceso, especialmente aquellos situados en zonas remotas o de topografía accidentada, requieren equipos especializados, transporte adecuado, y, en algunos casos, personal capacitado para operar en entornos extremos. Todo esto incrementa los costos logísticos, no solo para el desplazamiento, sino también para el mantenimiento del equipo y la seguridad de los operadores. Para abordar esta problemática, es crucial preservar dichos ecosistemas como lo señala el autor Montiel González et al., (2017) ya que desempeñan un papel fundamental en la captura, conservación, purificación y reposición del agua.

El conocimiento generado a través de la tecnología satelital multiespectral ha transformado significativamente la forma en que se monitorea y se analiza la calidad del agua para continuar con la conservación de los ecosistemas y mejorar la calidad de vida humana, tal como lo indican los autores Montaña Roldan et al., (2023).

La revisión de diversos autores sobre el tema planteado es fundamental para el desarrollo de esta investigación, ya que permite comparar y analizar los procedimientos en el uso de bandas multiespectrales para la detección de contaminantes en agua, lo que da paso al desarrollo de la metodología planteada para la selección, tratamiento y obtención de los datos.

MATERIALES Y MÉTODOS

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada se utilizaron alrededor de diez metodologías y aplicaciones correspondientes a marco teórico de referencia y estado del arte para el análisis de coberturas territoriales en especial cuerpos de agua empleando imágenes satelitales multiespectrales y algoritmos que permitieron el análisis ambiental de grandes áreas, entre los que

destacan cobertura boscosa, índices de coberturas pétreas, distribución espacial del agua, dinámica lagunar, parámetros de calidad del agua entre otros.

En el particular caso del estado del arte los autores se relacionan entre si debido a que en todos los casos analizados utilizan datos proporcionados por constelaciones donde se encuentran los denominados LANDSAT 8 y SENTINEL satélites con tecnología de punta cada uno dentro de su respectiva orbita, actualmente en funcionamiento y que coadyuvan a los SIG (Sistemas de Información Geográfica) y la Percepción Remota (teledetección) ambas disciplinas necesarias, fundamentales para los resultados de sus respectivos estudios.

En la Figura 1 muestra las etapas que se siguieron para el desarrollo del presente artículo de análisis.

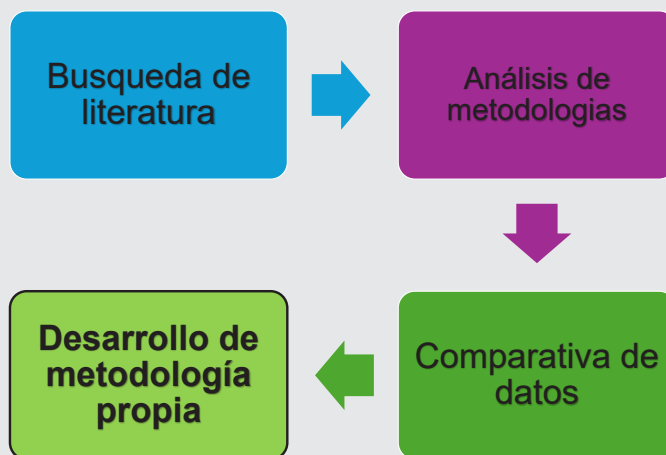


Figura 1. Metodología general de revisión de literatura. Fuente: Elaboración propia.

Fundamentos teóricos de teledetección

La teledetección es “La ciencia y el arte de obtener información sobre un objeto, área o fenómeno mediante el análisis de datos adquiridos por un dispositivo que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno investigado (Lillesand et al., 2004).

La teledetección engloba un conjunto de técnicas que permiten adquirir información sobre un objeto específico en la superficie terrestre desde una gran distancia, superando las limitaciones de la visión humana.

Un sistema de teledetección incluye los siguientes elementos mostrados en la Figura 2: (Chuvieco, 2008).

- **Fuente de Energía:** Es originado de la radiación electromagnética que el sensor va a captar. Puede tratarse de una fuente pasiva como la luz solar o activa.
- **Cubierta terrestre:** Son los rasgos naturales o realizados por el hombre (vegetación, suelo, rocas, construcción, etc.) que refleja la señal hacia el sensor.

- **Sistema sensor:** Compuesto por el sensor propiamente dicho (cámaras, radar, etc.) y la plataforma que lo alberga (satélite, avión, globo).
- **Sistema de recepción-comercialización:** Es el que recibe la información del sistema sensor, la guarda en formato apropiado y la distribuye a los usuarios.
- **Interprete:** quien convierte los datos en información temática de interés (agricultura, forestal, geografía, catastro, medio ambiente, militar, etc.) mediante procedimientos digitales.
- **Usuario final:** Es el beneficiario final.

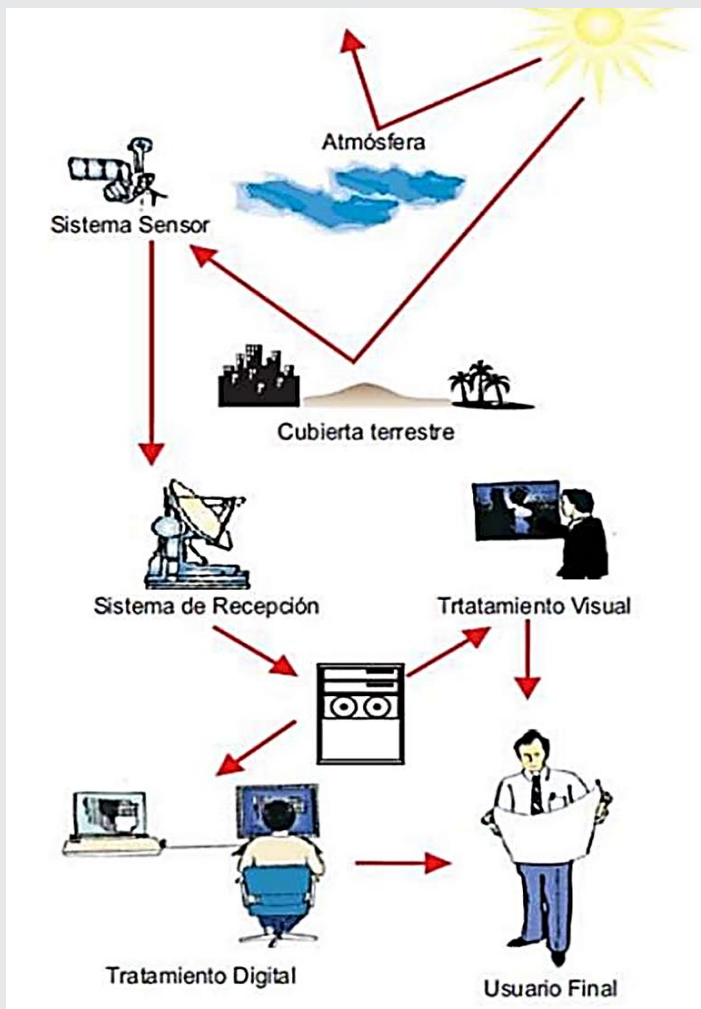


Figura 2. Los componentes de un sistema de Teledetección. Fuente: (Chuvienco, 2008).

Clasificación de sensores satelitales

Por lo general, la teledetección es la medición de la energía que se emanó de la superficie de la Tierra. Si la fuente de la energía medida es el sol, entonces se llama la teledetección pasiva, y el resultado de esta medición puede ser una imagen digital.

Si la energía medida no es emitida por el Sol, pero desde la plataforma de sensor, entonces se define como la teledetección activa, tales como sensores de radar que funcionan en el rango de microondas (Richards & Jia, 2006).

Sensores Satelitales: Pasivos

- Los sensores remotos pasivos miden energía radiante reflejada o emitida por el sistema Tierra-atmósfera o cambios en la gravedad de la Tierra (Figura 3).
- La energía radiante se convierte en cantidades biofísicas como temperatura, precipitación y humedad del suelo.

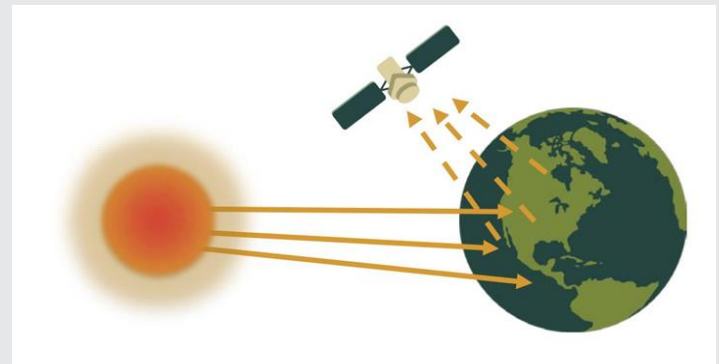


Figura 3. Sensores pasivos. Fuente: (NASA ARSET, 2023).

Sensores Satelitales: Activos

- Los sensores activos proporcionan su propia fuente de energía para la iluminación (Figura 4).
- La mayoría de los sensores activos opera en la región de las microondas en el espectro electromagnético, lo que permite penetrar la atmósfera bajo la mayoría de las condiciones y se pueden usar de día o de noche.
- Tienen una variedad de aplicaciones relacionadas con la meteorología y la observación de la superficie y atmósfera de la Tierra.

El espectro electromagnético

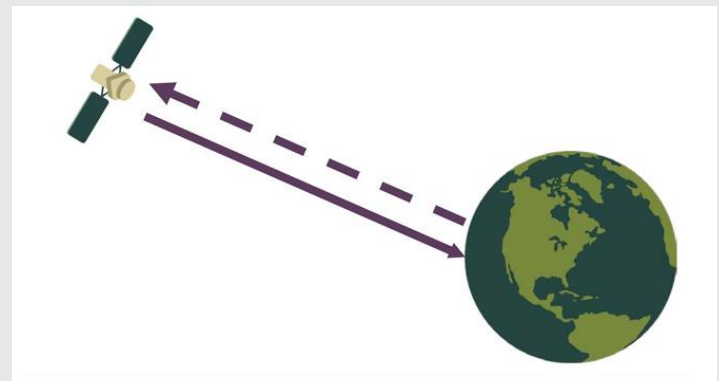


Figura 4. Sensores activos. Fuente: (NASA ARSET, 2023)

En la Figura 5 que antecede se representa el espectro electromagnético que es “el sistema que clasifica, de acuerdo con la longitud de onda, toda la energía (de corto cósmica a largo radio) que se mueve, armónicamente, a la velocidad constante de la luz”(NASA ARSET, 2023).

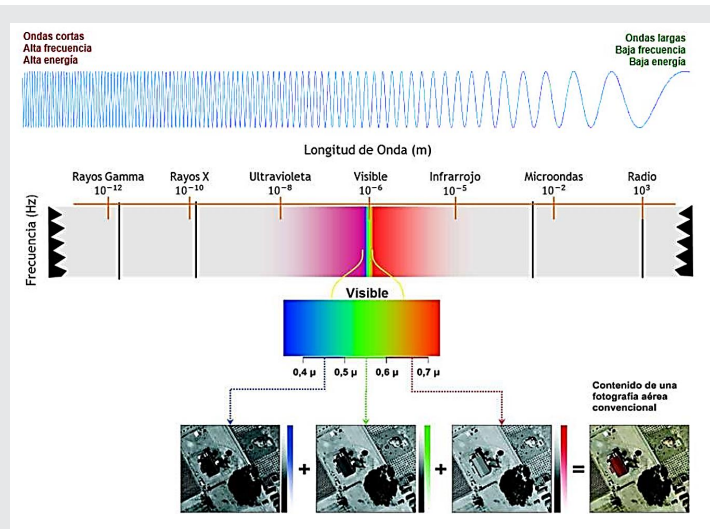


Figura 5 Espectro electromagnético.

Fuente: Bravo Morales, 2017; Pinilla, 2020

Regiones espectrales utilizadas para la observación remota de la tierra.

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

En la tabla 1 se pueden clasificar las características del espectro electromagnético

Imágenes multiespectrales e hiperespectrales

El desarrollo de la tecnología espectroscópica en la década de 1980 llevó a la creación de dispositivos conocidos como hiperespectrales, que combinan capacidades de formación de imágenes con espectroscopia. Este término se originó en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA en California, EE. UU., donde se diseñó un instrumento hiperespectral llamado Espectrómetro de Imágenes Aéreas/Infrarrojas en el Aire (AVIRIS por sus siglas en inglés). Las imágenes hiperespectrales son capturadas por sensores espectrales (activos y pasivos) que miden la reflectancia, permitiendo obtener firmas espectrales más detalladas y continuas que requieren funciones continuas y derivables.

Estas imágenes permiten detectar sutiles diferencias y características en la superficie, especialmente en lo que respecta a la vegetación, cuerpos de agua, el suelo y las rocas. La principal diferencia entre una imagen multiespectral y una hiperespectral radica en el número y ancho de las bandas disponibles (Ibarrola Ulzurrun et al., 2017).

Tabla 1: Características de la región espectral.

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

Fuente: (Bravo Morales, 2017).

Por su parte las imágenes multiespectrales analizadas en el presente estudio se obtienen de los satélites en órbita ya mencionados que permiten medir la reflectancia de hasta 11 bandas que llevan asociados varios valores numéricos a cada píxel, tantos como el sensor sea capaz de detectar, en la Figura 6 se puede representar como las bandas son como capas apilables para obtener la multiespectral.

Satélites LANDSAT

La constelación de satélites LANDSAT (LAND=tierra y SAT=satélite), que inicialmente se llamaron ERTS (Earth Resources Technology Satellites), fue la primera misión de los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. La forman 8 satélites de los cuales sólo se encuentran activos el 5 y el 8. Su mantenimiento y operación está a cargo de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). Los satélites LANDSAT llevan a bordo diferentes instrumentos. Su evolución buscó siempre captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle, de ahí las mejoras radiométricas, geométricas y

espaciales que se incorporaron a los sensores pasivos; el primero, conocido como Multispectral Scanner Sensor (MSS), seguido de Thematic Mapper (TM) que tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor y por último, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que entre sus mejoras técnicas destaca una banda espectral (pancromática) con resolución de 15 metros. Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 a 11 bandas espectrales actualmente, que al combinarse producen una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. Dependiendo del satélite y el sensor se incluye un canal pancromático y/o uno térmico; asimismo las resoluciones espaciales varían de 15, 30, 60 y 120m (Berdugo Muñoz & Reales López, 2016).

La investigación de cuerpos de agua se ha vuelto crucial, dado que el monitoreo del agua desempeña una función fundamental en la administración de los recursos hídricos.

Los autores Kamel et al., (2016) en Egipto aunque propiamente no se enfocaron en cuerpos de agua sin embargo utilizaron imágenes multispectrales obtenidas del satélite Landsat 7 para la búsqueda de zonas de formaciones rocosas de acuerdo a su pigmento natural derivado de la detección de los sensores del satélite, a su vez han utilizado combinaciones mediante colorimetría derivada de patrones rocosos mediante la combinación de bandas con la finalidad de localizar un valor de color específico para mapear cierto tipo de material pétreo.

Dentro de sus resultados se pueden apreciar que mediante las herramientas informáticas de los SIG combinaron con ratios las bandas 5/1, 3/2 y 7/2 mediante el procesamiento RGB respectivamente encuentran cierta colorimetría para identificar claramente el tipo de roca específico y de esa manera diferenciarlo en la imagen multispectral como lo muestra la Figura 7.

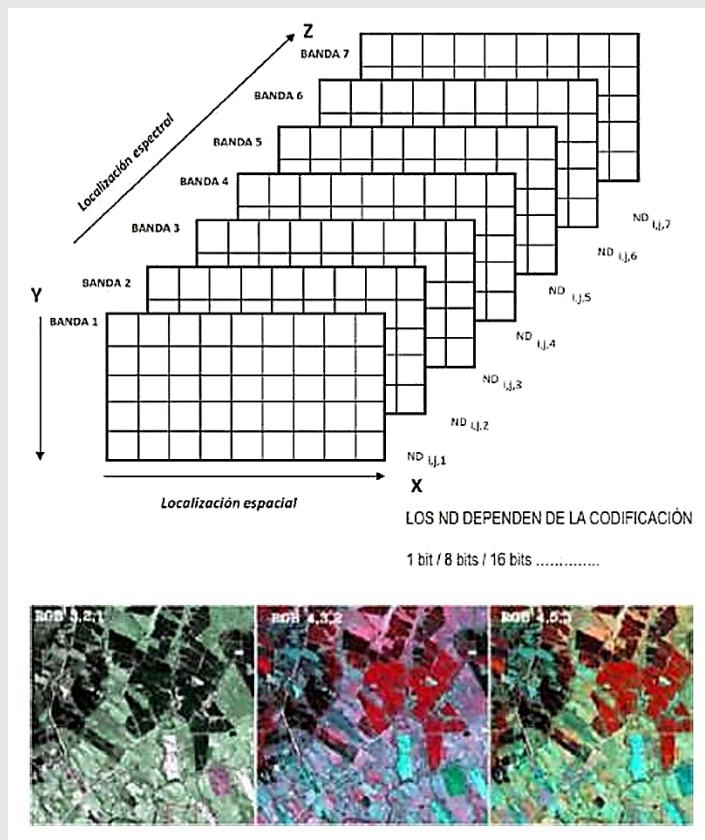


Figura 6. Estructura de imagen multispectral. Fuente: (Bravo Morales, 2017).

Uso y aplicación de imágenes satelitales en estudios territoriales

Los lagos, ríos y embalses, tanto de agua dulce como salada, ocupan solo una fracción mínima de la superficie terrestre, pero desempeñan un papel vital en los ecosistemas y en la vida humana. La distribución y los cambios en el agua tienen repercusiones significativas en aspectos económicos, ambientales y sociales (Feng et al., 2015) emplearon datos satelitales de alta resolución (Landsat) para estudiar los cuerpos de agua continentales en el año 2000, analizando índices multispectrales relacionados con el agua, la vegetación y las características del terreno.

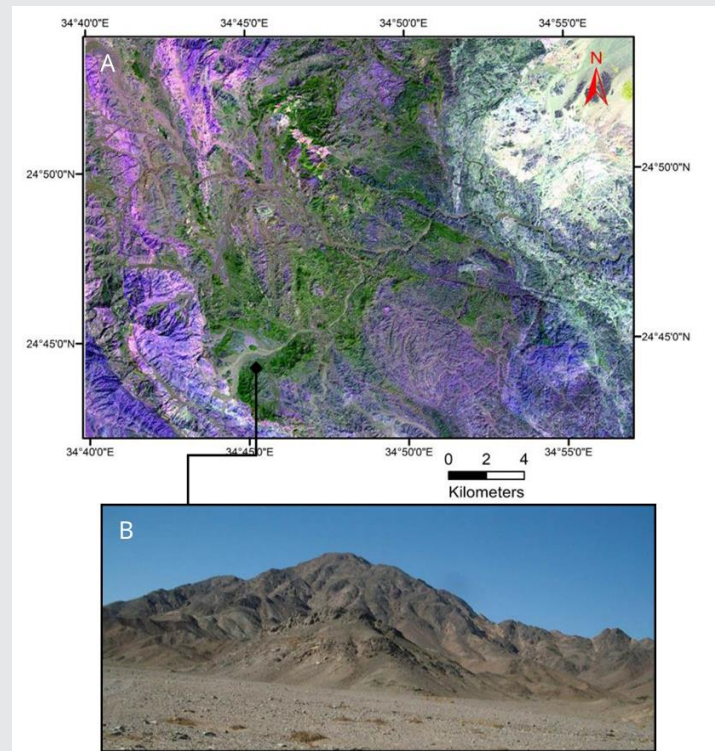


Figura 7. Imagen multispectral de resultados obtenidos. Fuente: (Kamel et al., 2016).

Se han realizado, también investigaciones como la de Beiranvand & Hashim, (2015) donde utilizaron imágenes satelitales landsat 8 para observar zonas de alteración hidrotermal en áreas de estudio de Irán como se puede apreciar en las imágenes dicha zona de estudio se compone de varios tipos de formaciones rocosas Eoceno, roca volcánica, roca granitoide sub-volcanica, etc.

Y lo que han hecho es buscar cuales pueden ser los anchos de banda del Landast 8 adecuados para ciertos minerales en específico, así como las combinaciones de estas bandas para materiales pétreos como, por ejemplo: Calcita, Alunita, muscovita, etc. Finalmente, en sus conclusiones determinan que los mejores anchos de banda que pueden utilizar son con las combinaciones en ratios de 4/2, 6/7 y 10 procesamiento RGB como lo muestra el siguiente mapa de la Figura 8

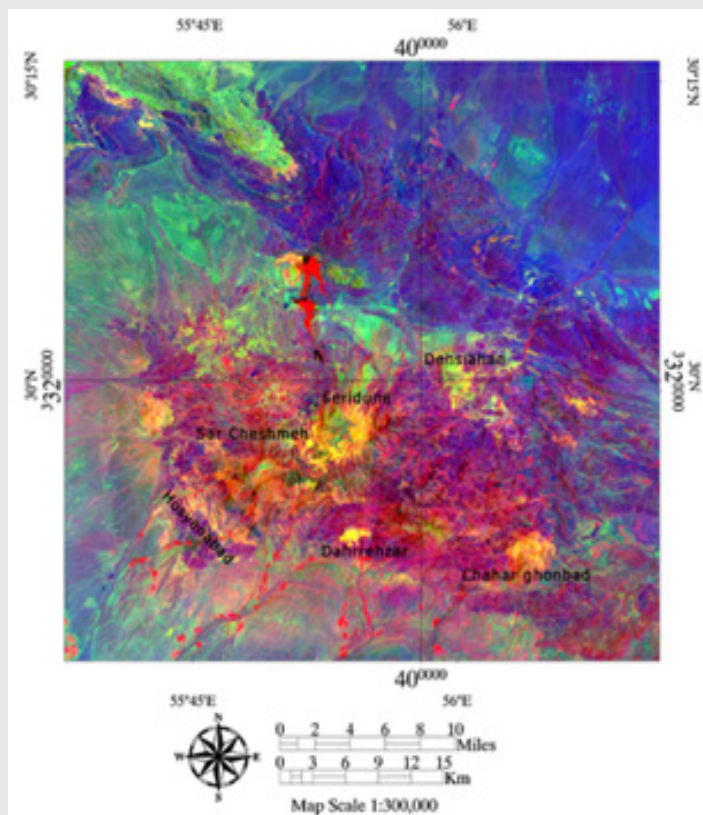


Figura 8. Imagen multispectral con ratios 4/2, 6/7 y 10. Fuente: (Beiranvand & Hashim, 2015).

En México Amado Alvarez et al., (2019), con el análisis de parámetros de contaminantes en agua como el OD, PH, Turbidez, etc. In situ, y mediante los datos y la información espectral de imágenes del satélite Landsat 5 se evaluaron 30 modelos de regresión lineal de los cuales, la turbidez obtuvo el mejor ajuste. Las regiones del espectro 0,52 - 0,6 μm y 0,63 - 0,69 μm , aportados por la variable predictora, se mostraron como los rangos de mayor correlación con los valores de turbidez. Como resultados se determinó que: mediante las bandas 2/3 pudieron obtener el modelo predictivo de la Turbidez mediante la información espectral, como aproximación más fiable de la estimación del estado del agua en los embalses estudiados.

La representación espacial de la turbidez difiere del resto de embalses, mostrando valores en los que se observa una mayor turbidez en la parte de entrada al embalse mostrado en la Figura 9.

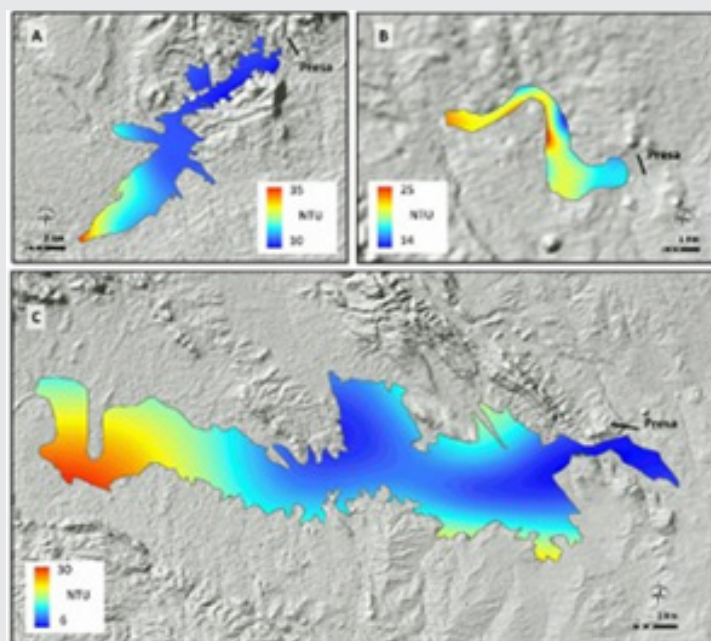


Figura 9. Análisis de distribución espacial de la turbidez del agua. Turbidez (NTU) del agua en los tres embalses obtenida del modelo predictivo del cociente de las bandas 2/3: A) Presa las Vírgenes; B) Lago Colina C) Presa Boquilla. Fuente: (Amado Alvarez et al., 2019).

En Chile, (Briceño et al., 2018) emplearon teledetección mediante imágenes satelitales del sensor OLI de Landsat 8 para investigar la distribución espacial y la evolución de los parámetros de calidad del agua en el lago Vichuquén durante el año 2016. Realizaron muestreos de campo, mediciones en el sitio, análisis de laboratorio y procesamiento de imágenes satelitales. Sus hallazgos revelaron la variabilidad espacial de los parámetros de calidad del agua, así como su conexión con el incremento de la eutrofización del lago, atribuible a factores estacionales y a diversos usos del suelo, como la reforestación con pino y eucalipto, actividades agrícolas y zonas urbanas adyacentes.

Por su parte en las costas del Perú (Rosales Malpartida & Apaza Mamani, 2022) analizaron la contaminación por el derrame de petróleo del buque de bandera italiana Mare Doricum, propiedad de Repsol.

El estudio tuvo por objetivo detectar el área del derrame utilizando el sensor multispectral Landsat 8. Para detectar con mayor precisión, se realizaron diversos preprocesamientos a la imagen satelital Landsat 8 como la conversión a reflectancia, normalización con el método Bandmax-min de la imagen de la zona afectada y finalmente se realizaron los métodos de análisis de componentes principales (ACP) y la Fracción de Mínimo Ruido (MNF por sus siglas en inglés). Todos los resultados fueron analizados mediante la programación del software libre R, dichos resultados experimentales indicaron claramente que el método MNF es el más adecuado para detectar el derrame de petróleo con

mayor precisión a través de imágenes multispectrales, los resultados obtenidos se muestran en la imagen 10 encerradas se visualizan las manchas de contaminación.

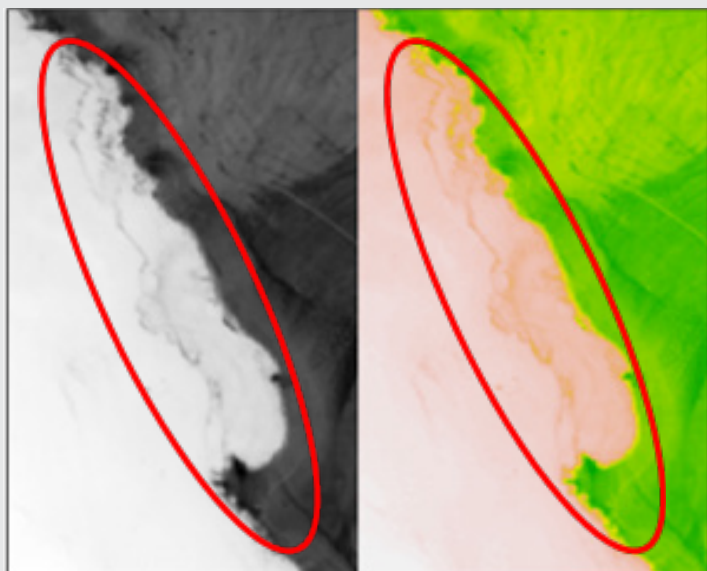


Figura 10. Imagen multispectral con la visualización del derrame de petróleo en R con el primer valor propio del método MNF: (a) con la función imagen y el parámetro col = gray((0:256)/256), (b) con la función imagen y el parámetro col=terrain.colors(100) (Rosales Malpartida & Apaza Mamani, 2022).

RESULTADOS

Obtención y procesamiento imágenes satelitales multispectrales

A partir del análisis bibliográfico llevado en el presente estudio, se identificaron las principales metodologías empleadas en el campo de la tecnología satelital para monitoreo de áreas específicas en su mayoría de índole ambiental. Este análisis permitió identificar los enfoques más comunes y las líneas de investigación actuales donde se emplean imágenes satelitales multispectrales para obtener información de manera remota. Se observó además que, existe un área de oportunidad dentro del campo de la teledetección ya que puede aplicarse a una infinidad de temas, casos de estudio y problemáticas similares en todo el planeta.

De esta manera, la construcción de una metodología propia fundamentada en el análisis bibliográfico no solo responde a las necesidades un caso de estudio específico, sino que también propone un marco de trabajo innovador a seguir que definitivamente será replicado y ajustado en estudios futuros.

La metodología que a continuación se presenta ejemplifica la obtención, tratamiento y análisis de datos espectrales satelitales mediante la Figura 11.



Figura 11. Metodología de procesamiento de imágenes multispectrales.

Fuente: Elaboración propia.

Paso 1:

Para la obtención de las imágenes se delimita la zona de estudio conocida como una formación de varios cuerpos de agua en el norte de Veracruz y sur de Tamaulipas, colindantes con la ciudad de Tampico la cual se determina en el servidor antes mencionado USGS como lo muestra la Figura 12.

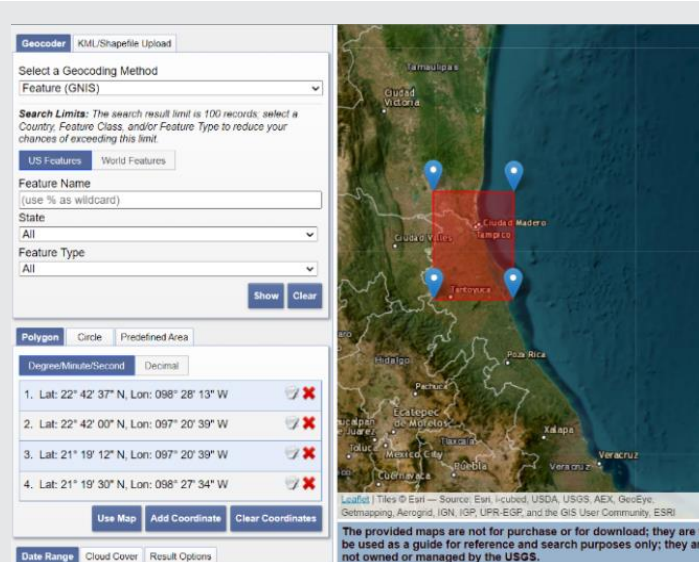


Figura 12. Imagen indicando la zona de estudio al norte de Veracruz y sur de Tamaulipas (USGS ESRI, 2024).

Del mismo modo se obtiene una descarga a partir del sector determinado para generar las imágenes espectrales individuales por número de banda teniendo en total 11 imágenes a utilizar, se observan las capas en la Figura 13.

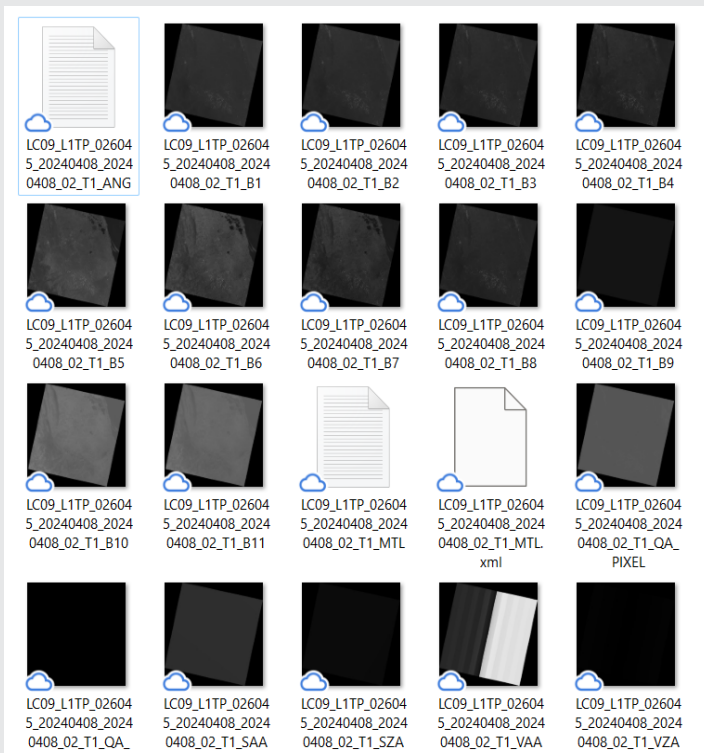


Figura 13. Carpeta con las imágenes espectrales por número de banda.
Fuente: Elaboración propia.

Paso 3:

Para realizar la composición del ráster virtual mediante el procesamiento de las bandas nos dirigimos al menú ráster de la interfaz de usuario del software QGis para posteriormente dentro de la opción parámetros añadiremos todas las bandas disponibles correspondientes a cada imagen que son 11 en total quedando como lo muestra la Figura 15.



Figura 15. Visualización de la composición ráster en QGis.
Fuente: Elaboración propia.

Paso 2:

Para el ingreso de los datos utilizaremos el software de uso libre QGis el cual nos permitirá ingresar las imágenes espectrales que posteriormente se convertirán en multiespectrales.

Con ayuda del administrador de fuentes de datos de la interfaz gráfica del software ingresaremos las imágenes obtenidas en el paso 1, las cuales se ingresarán en orden de número de banda de la 1 a la 11 quedando de la siguiente manera se muestra en la Figura 14.

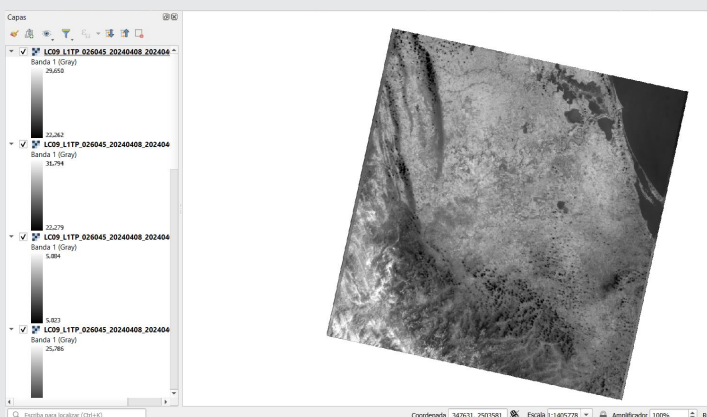


Figura 14. Inserción de las bandas en QGis.
Fuente: Elaboración propia.

Paso 4:

Con lo anterior podemos hacer combinaciones en las bandas espectrales, al resultado de esta acción se les denomina imágenes multiespectrales.

Para dicha acción se generan las que se deseen, en el particular estudio se tomaran tres combinaciones que nos sugiere la página oficial (USGS ESRI, 2024) primera, segunda y tercera combinación se aprecia en las Figuras 16, 17 y 18 respectivamente.

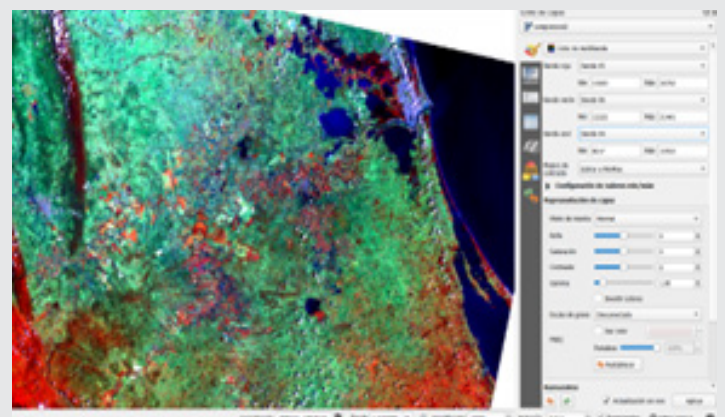


Figura 16. Bandas 5/6/4 valores multiespectrales de suelo y agua QGis.
Fuente: Elaboración propia.

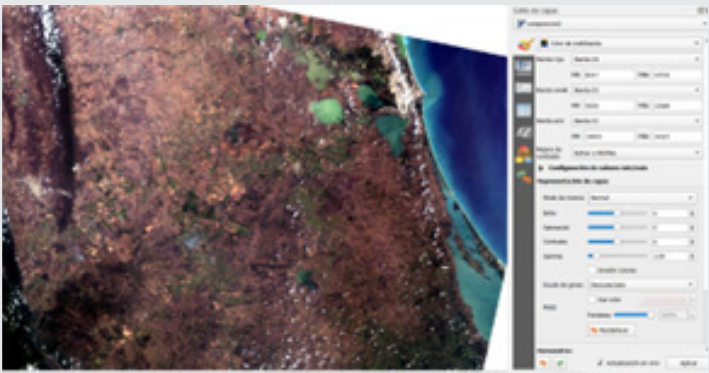


Figura 17. Bandas 4/3/2 valores multispectrales de color natural QGIS.

Fuente: Elaboración propia.

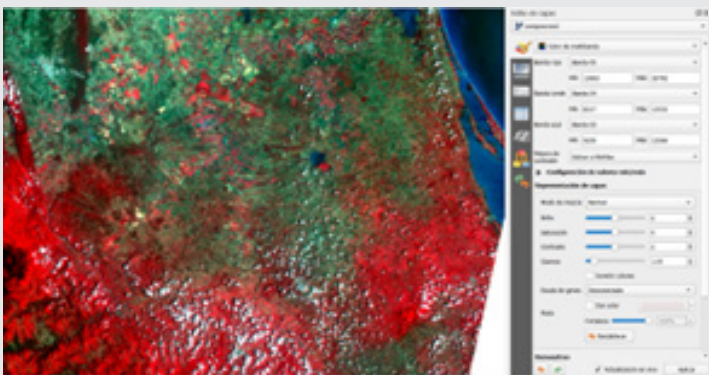


Figura 18. Bandas 5/4/3 valores multispectrales de infrarrojo y vegetación en QGIS.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

El análisis bibliográfico realizado sobre la detección de contaminantes mediante el uso de imágenes satelitales multispectrales ha demostrado el potencial de la teledetección como una herramienta eficaz para monitorear y gestionar problemas ambientales a gran escala. Los estudios revisados destacan que las imágenes satelitales ofrecen una visión global y continua, permitiendo la identificación de patrones de contaminación en cuerpos de agua, suelo, cobertura vegetal, entre otros, con un nivel de detalle cada vez mayor gracias a los avances tecnológicos. Esto ha mejorado significativamente la precisión en la detección de sustancias contaminantes como metales pesados, sedimentos en suspensión, químicos peligrosos, entre otros.

Sin embargo, la revisión también ha revelado limitaciones en la aplicabilidad de la teledetección en ciertos escenarios. Las variaciones en las condiciones atmosféricas, la complejidad de algunos ecosistemas y las interferencias de factores como la vegetación o la nubosidad pueden afectar la precisión de los datos obtenidos. A pesar de los avances tecnológicos, existe una necesidad de desarrollar metodologías más robustas que combinen datos multispectrales con otros enfoques complementarios, como modelos predictivos o

datos in situ, para reducir los márgenes de error y mejorar la interpretación de los resultados.

En conclusión, la teledetección con imágenes satelitales multispectrales ofrece un camino prometedor para la detección de contaminantes, pero se requiere más investigación para optimizar su uso en diversas condiciones ambientales y geográficas. La integración de nuevas tecnologías y enfoques híbridos podría aumentar la precisión y utilidad de esta herramienta en la gestión ambiental. A medida que continúan los avances en la tecnología satelital y el análisis de datos, se espera que el monitoreo de contaminantes mediante teledetección juegue un papel cada vez más central en las estrategias globales para la protección del medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

Amado Alvarez, J., Pérez Cutillas, P., Alatorre Cejudo, L. C., Ramírez Valle, O., Segovia Ortega, E. F., & Alarcon Cabañero, J. J. (2019). *Análisis multispectral para la estimación de la turbidez como indicador de la calidad del agua en embalses del estado de Chihuahua, México*. *Revista Geográfica de América Central*.

Beiranvand, A., & Hashim, M. (2015). *Mapeo de alteración hidrotermal a partir de datos de Landsat-8, Sar Distrito minero de cobre de Cheshmeh, sureste islámico República de Irán*. *Revista de La Universidad de Ciencias de Taibah*, 9, 155-166. <https://doi.org/10.1016/j.jtusc.2014.11.008>.

Berdugo Muñoz, A., & Reales López, G. (2016). *Análisis multispectral de imágenes satelitales para evaluar variaciones espacio temporales en la calidad del agua del embalse el Guájaro, Atlántico*.

Bravo Morales, N. F. (2017). *Teledetección Espacial LANDSAT, SENTINEL-2, ASTER L1T y MODIS. In Geomática ambiental (Vol. 1)*. https://sites.google.com/view/geomatica-ambiental-srl/%0Ahttps://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion_espacial_ArcGeek.pdf.

Briceño, I., Pérez, W., San Miguel, D., & Ramos, S. (2018). *Determinación de calidad de agua en el Lago Vichuquén, con imágenes de satélite Landsat 8, sensor OLI, año 2016, Chile*. *Revista de Teledetección*, 67-78.

Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental, la observación de la tierra desde el espacio*.

Feng, J., Saurabh Channan, S., & Townshend, J. (2015). *Conjunto de datos globales de masas de agua continentales de alta resolución (30 m) para el año 2000: primeros resultados de un algoritmo*.

de clasificación topográfica y espectral. *International Journal of Digital Earth*, 30 m. <https://doi.org/10.1080/17538947.2015.1026420>.

Ibarrola Ulzurrun, E., Gonzalo Martín, C., Marcello Ruiz, J., García Pedrero, Á., & Rodríguez Esparragón, D. (2017). Fusión de imágenes multiespectrales de alta resolución en ecosistemas costeros terrestres vulnerables. *Sensors*, 1–23. <https://doi.org/10.3390/s17020228>.

Kamel, M., Youssef, S., Hassan, M., & Bagash, F. (2016). Utilización de datos de ETM+ Landsat en el mapeo geológico del área de wadi Ghadir-Gabal Zabara , desierto central oriental , Egipto. *La Revista Egipcia de Teledetección y Espacio Ciencias*, 343–360. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.06.003>.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2004). *Remote Sensing and Image Interpretation*.

Montaño Roldan, V. L., Gonzales Vega, A. A., Ortiz Calcedo, P. L., & Álava Vélez, C. E. (2023). Cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en Perú. In *Engineering & Technology Studies* (Vol. 3, pp. 34–42).

Montiel González, I., Martínez Santiago, S., López Santos, A., & García Herrera, G. (2017). Impacto del cambio climático en la agricultura de secano de Aguascalientes, México para un futuro cercano (2015-2039). *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 16(1), 1–13. <https://doi.org/10.5154/r.rchsa.2017.01.001>.

NASA ARSET. (2023). *Fundamentos de la Teledetección (Percepción Remota)* (p. 39). https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2023-03/Fundamentals_of_RS_Span.pdf.

Pinilla, C. (2020). *Teledetección: teoría y aplicaciones*. *Teledetección: Teoría y Aplicaciones*, May, 1–224. https://www.researchgate.net/publication/341727281_teledeteccion_teor%C3%ADa_y_aplicaciones_carlos_pinilla.

Richards, J. A., & Jia, X. (2006). *Remote sensing digital image analysis: An introduction*. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*, February, 1–439. <https://doi.org/10.1007/3-540-29711-1>.

Rosales Malpartida, J. Y., & Apaza Mamani, H. A. (2022). Análisis de imágenes satelitales Landsat 8 por componentes principales y MNF para la detección de zonas del derrame de petróleo Repsol en la Costa Peruana. *Tecno Humanismo Revista Científica*, March. <https://doi.org/10.53673/data.v2i2.78>.

USGS ESRI. (2024). *Servicio Geológico de Estados Unidos*. <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López Morales, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Idesia (Arica)*, 38, 100–103. <https://www.scielo.cl/pdf/idesia/v38n4/0718-3429-idesia-38-04-99.pdf>.

