

## MEMORIA

# USO DE LA TELEDETECCIÓN Y LOS SIG EN LA VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AGUA: APLICACIÓN AL MAR MENOR



**Titulación:** Grado en Ingeniería de Recursos Minerales y Energía

**Autor:** Manuel Mas Monsonis

**Director:** Manuel Alcaraz Aparicio

Cartagena, diciembre de 2017

### Agradecimientos:

En primer lugar, agradecer profundamente la dedicación e implicación de mi tutor D. Manuel Alcaraz, que con sus conocimientos y saber hacer, ha velado por la realización de este Trabajo Fin de Grado. No dudaría en volver a repetir el largo camino que hemos recorrido juntos para repetir este trabajo.

Al Dr. Javier Gilabert, cuya mediación con las instituciones públicas hizo posible la adquisición de los datos de concentración de clorofila imprescindibles para llevar a cabo este trabajo.

A mis padres, que aunque no siempre han compartido mis decisiones, siempre me han apoyado y con su consejo me guían por el mejor camino.

Y por último Marina y Patricia, sois probablemente las dos personas más importantes en mi vida y estoy seguro que sin vuestra alegría todo sería más difícil de realizar.

## **ÍNDICE**

### **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

- I.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA
- I.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO
- I.3. CONSECUCIÓN DE LOS OBJETIVOS
- I.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO FIN DE GRADO

### **CAPÍTULO II. TELEDETECCIÓN**

- II.1. INTRODUCCIÓN A LA TELEDETECCIÓN
- II.2. EVOLUCIÓN DE LA TELEDETECCIÓN
- II.3. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA TELEDETECCIÓN
  - II.3.1. El espectro electromagnético
  - II.3.2. La interacción atmosférica con la radiación electromagnética
- II.4. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE TELEDETECCIÓN
  - II.4.1. Interacción de la radiación solar con la cobertura terrestre
    - II.4.1.1. Distorsión de la firma espectral
    - II.4.1.2. Comportamiento espectral de las principales superficies.
  - II.4.2. Sistema sensor
    - II.4.2.1. Tipos de sensores
  - II.4.3. Las órbitas satelitales
- II.5. LOS PRINCIPALES PROGRAMAS DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL
  - II.5.1. Programa Copernicus
  - II.5.2. Programa Landsat
  - II.5.3. Programa Spot
  - II.5.4. Satélites comerciales
    - II.5.4.1. Ikonos

II.5.4.2. Quickbird

II.5.4.3. World-View

II.5.4.4. Pleiades

II.5.5. Satélites meteorológicos

II.5.5.1. Programa NOAA

II.5.5.2. Serie Meteosat

II.6. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA OBSERVACIÓN  
ESPACIAL FRENTE A LA FOTOGRAMETRÍA

II.7. PRINCIPALES APLICACIONES DE LA TELEDETECCIÓN

## **CAPÍTULO III. ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES**

III.1. TIPOS DE CORRECCIONES SOBRE LA IMAGEN

III.1.1. Distorsión radiométrica

III.1.2. Corrección radiométrica

III.1.2.1. Corrección radiométrica del bandeo, producida  
por desajustes en el calibrado de los detectores

III.1.2.2. Corrección de píxeles y líneas perdidas

III.1.2.3. Correcciones atmosféricas

III.1.3. Distorsión geométrica

III.1.4. Corrección geométrica

III.1.4.1. Corrección a partir de modelos orbitales

III.1.4.2. Corrección a partir de puntos de control

III.2. REALCES DE IMAGEN

III.2.1. Ajuste del contraste

III.2.2. Filtrado de la imagen

III.2.2.1. Filtro de paso bajo

III.2.2.2. Filtro de paso alto

III.2.3. Combinaciones de color

## **CAPÍTULO IV. EUTROFIZACIÓN DE UN MEDIO ACUÁTICO**

### IV.1. PROCESO DE EUTROFIZACIÓN Y PRINCIPALES CAUSAS

#### IV.1.1. Eutrofización de una masa de agua

### IV.2. CONSECUENCIAS DE LA EUTROFIZACIÓN

### IV.3. ESTABLECIMIENTO DE MEDIDAS PREVENTIVAS

### IV.4. LA TELEDETECCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA MONITORIZACIÓN DE PROCESOS DE EUTROFIZACIÓN

## **CAPÍTULO V. MATERIAL EMPLEADO**

### V.1. ADQUISIÓN DE LAS IMÁGENES SATÉLITE

#### V.1.1. Características generales de las imágenes

### V.2. OBTENCIÓN DE DATOS PUNTUALES

### V.3. SOFTWARE SNAP (Sentinel Application Platform)

### V.4. SOFTWARE ARCGIS

### V.5. PAQUETE R

## **CAPÍTULO VI. METODOLOGÍA.**

### VI.1. ZONA DE ESTUDIO

### VI.2. NIVELES DE PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES

#### VI.2.1. Nivel 0 de procesamiento

#### VI.2.2. Nivel 1 de procesamiento

##### VI.2.2.1. Nivel 1A de procesamiento

##### VI.2.2.2. Nivel 1B de procesamiento

##### VI.2.2.3. Nivel 1C de procesamiento

#### VI.2.3. Nivel 2A de procesamiento

##### VI.2.3.1. Eliminación de los cirrus

##### VI.2.3.2. Corrección de la dispersión provocada por aerosoles

### VI.2.3.3. Corrección de la dispersión provocada por el vapor

#### VI.3. HOMOGENIZACIÓN DE LAS BANDAS

#### VI.4. RECORTE DE LA ZONA DE ESTUDIO

#### VI.5. CÁLCULO DEL ÍNDICE MÁXIMO DE CLOROFILA (MCI)

##### VI.5.1. Principios físicos y algoritmo

##### VI.5.2. Ámbito de uso y consideraciones

##### VI.5.3. Uso del Índice Máximo de Clorofila al entorno del Mar Menor

##### VI.5.4. Interpretación del Índice Máximo de Clorofila

#### VI.6. TRANSFORMACIÓN DEL MCI A CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA CON EL EMPLEO DE LOS SIG.

## **CAPÍTULO VII. ANÁLISIS Y RESULTADOS.**

#### VII.1. CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

#### VII.2. EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE MÁXIMO DE CLOROFILA (MCI)

#### VII.3. RELACIÓN DEL MCI CON LOS DATOS OBTENIDOS SOBRE TERRENO

#### VII.4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

#### VII.5. ELABORACIÓN DE UNA RECTA DE REGRESIÓN PARA VALORES MEDIOS, APLICANDO BATIMETRÍA

## **CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES.**

## **CAPÍTULO IX. FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.**

## **CAPÍTULO X. ANEJOS.**

#### ANEJO I. PRE-PROCESADO ZONA DE ESTUDIO

#### ANEJO II. CÁLCULO MCI

#### ANEJO III. CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### I.1. Descripción del problema

Una de las aplicaciones más destacadas de la teledetección, de la que trata este proyecto, es la capacidad para distinguir y monitorizar procesos dinámicos que se producen en una zona concreta de la superficie terrestre a lo largo del tiempo.

Esto es posible puesto que la información que se recoge de la superficie es captada por un sensor situado a bordo de un satélite en órbita estable alrededor de la Tierra, obteniendo cada cierto periodo de tiempo, una imagen de la misma zona. De esta forma, comparando las imágenes, podemos analizar la evolución que ha sufrido el terreno, detectando los cambios producidos.

Debido a las innumerables aplicaciones que puede tener una sucesión de imágenes satélite de una zona a lo largo del tiempo, las diferentes agencias espaciales se afanan en poner en marcha y realizar programas de observación de la superficie terrestre. Desde el pionero LANDSAT puesto en marcha por la Nasa en 1972, pasando por el programa espacial francés denominado SPOT (1986), el indio IRS (1996) ... etc. Todos ellos con la intención de monitorizar los cambios que se producen en la tierra, desde el seguimiento meteorológico, la pérdida de hielo en los polos causado por el cambio climático, pasando por las mediciones de gases en la atmósfera... etc. Debido al amplio abanico de posibilidades de observación que se prestan, cada satélite se diseña y construye de acuerdo al fin al que va a ser destinado. Ejemplificando esta máxima, un satélite destinado a la observación meteorológica no va a requerir de una gran calidad de la imagen (resolución espacial) pero va a necesitar de una gran cadencia de imágenes (resolución temporal). Por el contrario, los satélites

implicados en el seguimiento de los efectos del cambio climático, necesitan una gran discriminación del espectro radiométrico (resolución radiométrica) para poder captar todo tipo de cambios en la vegetación, sin embargo, no requieren de una resolución temporal tan elevada como la que ofrecen los satélites meteorológicos.

Con el rápido avance de la tecnología y con la dinámica global de difusión del conocimiento, las diferentes agencias espaciales han facilitado el acceso a la información proporcionada por los satélites a través de servidores y portales web, dónde cualquier usuario interesado halla la posibilidad de descargar imágenes satélite para la monitorización de los recursos y la gestión del territorio. Tanto la calidad (resolución) como la disponibilidad de las imágenes ha mejorado enormemente desde sus orígenes, existiendo además programas dirigidos especialmente para el tratamiento de las imágenes como lo son ENVI y SNAP.

Finalmente, vista la aptitud de la teledetección como herramienta de monitorización de los cambios de la superficie terrestre a lo largo de una secuencia temporal y teniendo en cuenta la facilidad y accesibilidad que hay actualmente para disponer de imágenes satélite de calidad, en este estudio se decide aplicar la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) al control de masas de agua, concretamente la correspondiente al Mar Menor, afectada recientemente por un episodio de eutrofización que afecta la calidad de sus aguas.

## **I.2. Objetivos del Trabajo de Fin de Grado**

Situado en la comarca del Campo de Cartagena, el Mar Menor con sus 135km<sup>2</sup> se alza como la laguna salada más grande de toda Europa<sup>1</sup> Con forma semi-circular se encuentra separado del Mar Mediterráneo por un cordón de arena de unos 22km de longitud denominado como La Manga del Mar Menor. Se trata de un entorno singular en el que predominan los inviernos suaves y los veranos

---

<sup>1</sup> Fundación Aquae (2015). *Mar Menor, la laguna salada más grande de toda Europa.*



calurosos, siendo sus aguas cálidas cristalinas de poca profundidad, convirtiéndose en un enclave protegido para numerosas especies.

Debido a la benignidad del clima mediterráneo y la fertilidad de las tierras aledañas, en el entorno del Mar Menor se encuentran todo tipo de cultivos intensivos agrícolas<sup>2</sup>.

En la actualidad y provocado por la interconexión de los flujos de agua, (ya sea a través de medio acuífero o escorrentía superficial), se ha realizado un aporte de elementos químicos procedentes de los cultivos que aceleran la eutrofización del medio acuático. La actividad económica de la zona, dependiente casi exclusivamente del turismo de verano, añade presión medioambiental al ecosistema.

Con la combinación de los factores anteriores, se provoca un deterioro en la calidad del agua de la laguna, representado químicamente por el aumento de la concentración de elementos como el Nitrato, el Potasio, el Fósforo, el Magnesio y el Potasio, todos ellos nutrientes para la vida vegetal acuática.

La gran concentración de nutrientes en el agua, ha contribuido al reciente incremento de la concentración de fitoplancton, tornando las aguas cálidas cristalinas originales, en aguas verdosas y turbias de reducida visibilidad, provocando un cambio sustancial en las propiedades ópticas del agua detectables mediante teledetección<sup>3</sup>.

Los objetivos específicos de este proyecto son:

1. La monitorización del contenido de clorofila en las aguas del Mar Menor desde el año 2016 hasta el 2017 mediante la teledetección.
2. La correlación de los datos de clorofila obtenidos mediante mediciones físicas con los obtenidos en este estudio.
3. El establecimiento de un sistema de vigilancia ambiental. Mediante la sucesión de imágenes satélite de la zona y su posterior análisis,

---

<sup>2</sup> J.J. Durán. (2007). IGME. *Humedales del Mediterráneo español: modelos geológicos e hidrogeológicos*.

<sup>3</sup> Ryding, S y Rast, W. (1992). *El control de la eutrofización en lagos y pantanos*.

determinar parámetros que determinan la calidad del agua sin necesidad de desplazarse a la zona para realizar un análisis *in situ*.

Para la consecución de dichos objetivos específicos, ha sido necesaria la adquisición de nuevos conocimientos y el manejo de software específico. Estos objetivos más generales son:

- Adquirir y desarrollar conceptos sobre eutrofización de masas acuáticas.
- Conocer los fundamentos de la teledetección y los diferentes programas existentes con sus sensores y plataformas.
- Conocer y aplicar técnicas de tratamiento de imágenes satelitales.
- Aplicar un software de tratamiento de imágenes (SNAP).
- Interpretar y analizar la imagen obtenida después del tratamiento.

### **I.3. Consecución de los objetivos;**

Para alcanzar los objetivos planteados, se han identificado y descargado las imágenes satélite que más se adecuan a la finalidad del estudio, correspondiendo en este caso a las obtenidas en el periodo de un año por los sensores a bordo de la plataforma espacial Sentinel-2 proporcionadas por la ESA (European Spatial Agency) en su programa de vigilancia ambiental Copernicus.

Para el tratamiento y análisis geoespacial de todas ellas se ha utilizado el software específico SNAP (Sentinel Application Platform) desarrollado por la ESA como parte del programa Copernicus. Este Software es de libre acceso y constituye a día de hoy una de las herramientas más completas en el campo del análisis geoespacial.

Se ha obtenido acceso a los datos sobre la concentración de fitoplancton<sup>4</sup> proporcionados por la Consejería de Medio Ambiente de la Región de Murcia,

---

<sup>4</sup> Región de Murcia. (2017). *Servidor de datos científicos del Mar Menor*. Recuperado de <http://ocean.upct.es:8080/marmenor/>

consiguiendo de esta forma una fuente de datos fiables a tiempo real del estado biológico de la laguna, permitiendo en última instancia correlacionar mediante métodos estadísticos los datos obtenidos mediante teledetección.

Finalmente, el método operativo ha consistido en la corrección inicial de las imágenes satélite, el posterior recorte de la zona de interés, el análisis de la zona de estudio y finalmente la aplicación de métodos estadísticos para correlacionar la información obtenida mediante teledetección con la ofrecida por la Consejería de Medio Ambiente. Todo ello es especificado en el Capítulo VI dedicado al Método.

#### **I.4. Estructura del Trabajo Fin de Grado.**

El presente trabajo fin de grado se estructura de acuerdo a las siguientes secciones:

##### **Antecedentes:**

Se ha realizado una revisión bibliográfica de los elementos más importantes desarrollados, estableciendo las fuentes de conocimiento que albergan el presente estudio:

- Teledetección: Concepto, principios de la teledetección, fundamentos físicos y aplicaciones concretas. Mención de los programas de teledetección espacial más importantes hasta la fecha. Ventajas e inconvenientes respecto a otros sistemas de caracterización del territorio. **Capítulo II.**
- Análisis digital de imágenes: concepto. Requerimientos para un correcto análisis temporal, con especial enfoque a la metodología empleada en la corrección de las imágenes satélites. **Capítulo III.**
- Evolución de un medio acuático sometido a procesos de eutrofización. Caracterización de las consecuencias visibles y los principales efectos para el medio. Métodos de detección de estos procesos mediante la aplicación de la Teledetección. **Capítulo IV.**

### **Material empleado:**

En este apartado correspondiente al **Capítulo V**, se presenta el material empleado para la realización de este trabajo. También se mencionan los diferentes softwares utilizados. Entre ellos cabe destacar:

- Imágenes satélite provenientes de los satélites Sentinel-2A y Sentinel-2B, proporcionadas por la ESA de forma gratuita.
- Software de tratamiento de imágenes SNAP, apto para la corrección de imágenes satélite provenientes del programa Copernicus.
- Datos de los parámetros biológicos del Mar Menor a lo largo del último año, proporcionados por la Consejería de Medio Ambiente de la Región de Murcia. Al estar tomados por un organismo oficial, estos datos son representativos del estado biológico de la laguna.
- Sistema de Información Geográfica ArcGIS 10.5. Necesario para la comparación y presentación de las imágenes satélite.
- Software estadístico, paquete Rcommander. Permite la relación entre los datos obtenidos mediante teledetección y los ofrecidos por la Consejería de Medio Ambiente.

### **Metodología:**

En el **Capítulo VI** muestra la metodología empleada para la consecución de los objetivos. Para ello este capítulo se divide en los siguientes apartados:

- Descripción de la zona de estudio: Caracterización de la región de interés, representado su ubicación y definiendo las principales actividades socioeconómicas que ejercen presión sobre el medio acuático.
- Tratamiento de las imágenes: Corrección de las interacciones atmosféricas, homogenización de la resolución de las diferentes bandas espectrales, recorte de la zona de estudio, aplicación de máscaras sobre el terreno firme y finalmente cómputo del contenido de clorofila en la superficie del Mar Menor.

- **Correlación de datos:** Mediante el índice de clorofila obtenido en cada píxel tras el tratamiento de la imagen, junto con los datos de concentración de clorofila obtenidos en las estaciones de la Consejería de Medio Ambiente, se elabora una ecuación con la que relacionar la concentración de clorofila en el agua y el índice de clorofila obtenido tras el tratamiento.

### **Análisis y resultados:**

En el **Capítulo VII** se presentan los resultados obtenidos de la realización de este estudio, evaluando si es posible utilizar la teledetección como un método fiable para la determinación de clorofila en el agua y tratarse de un método extrapolable para la determinación la calidad del agua en otras zonas afectadas por la eutrofización.

### **Conclusiones y anejos:**

El **Capítulo VIII** muestra la evolución de la cantidad de clorofila detectada en el Mar Menor por el satélite Sentinel2, desde el mes de Junio de 2016 hasta Septiembre de 2017, pudiendo evaluar la calidad de las aguas.

# Capítulo II

## Teledetección

### II.1. Introducción a la teledetección.

La humanidad, por su esencia de ser, siempre ha sentido atracción por comprender e interpretar su entorno. Posiblemente esta curiosidad es la que ha permitido el enorme desarrollo de la teledetección hasta la actualidad.

En sus inicios, la teledetección consistía en elevar a un observador hasta el punto más alto, con la finalidad de aumentar su campo de visión e identificar cambios. Se equiparon aves con cámaras portátiles, para poder fotografiar con su vuelo la superficie terrestre y se optó por tomar fotografías desde globos aerostáticos desde una mayor altitud, abarcando el campo visual una mayor superficie de terreno. Avanzando en el transcurso del tiempo, se han equipado aviones y avionetas hasta llegar a la actualidad, cuando además de los aviones se emplean satélites situados en órbita planetaria<sup>5</sup>.

Todas estas técnicas por muy rudimentarias o avanzadas que parezcan tienen en común los siguientes puntos:

- Pretenden obtener información de los cuerpos situados en la superficie terrestre.
- Dicha información se obtiene sin entrar en contacto físico directo con los objetos.
- Una vez obtenida la imagen, esta es analizada e interpretada para detectar cambios y obtener el conocimiento deseado.

---

<sup>5</sup> Universidad Nacional a Distancia. (2008). *Evolución de las técnicas de teledetección*.

Con los apartados anteriores se puede introducir el concepto de teledetección espacial, definido por Chuvieco de la siguiente manera:

“La teledetección espacial es la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, suponiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar, de un haz energético artificial o por emisión propia<sup>6</sup>”. (Chuvieco, 2008).

A su vez, es preciso que la información recibida por el sensor sea almacenada y seguidamente transmitida a estaciones receptoras para que pueda ser interpretada. La gran cantidad de sensores y plataformas puestas en órbita proporcionan actualmente una gran fuente de datos y unido al avance de la tecnología empleada, están propiciando una nueva forma de estudiar la superficie terrestre.

Finalmente, la teledetección no solo engloba el proceso de adquisición de la información, sino también su posterior tratamiento, análisis e interpretación.

## **II.2. Evolución de la teledetección.**

El origen de la teledetección es de carácter militar, datando el principio de su uso a finales del S. XVIII. Por aquel entonces, el método de observación y recogida de la información constaba en elevar a un individuo en un globo aerostático para lograr fotografiar las posiciones de las tropas enemigas, así como realizar un seguimiento del material o analizar las vías de acceso de una zona en conflicto. El método dista mucho al que se usa actualmente, que consiste en equipar a satélites con sensores a bordo, pero el fundamento es el mismo: La observación y monitorización de la superficie terrestre, para la obtención de información<sup>7</sup>.

Al tratarse de una técnica aplicada, la teledetección está muy ligada a los avances tecnológicos de cada época de la historia, presentando un avance conjunto. El *Cuadro 1* representa los principales hitos de la teledetección.

---

<sup>6</sup> Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*.

<sup>7</sup> Ministerio de educación, cultura y deporte. (2006). *Historia de la teledetección*.



En 1858 Gaspar Félix toma desde un globo aerostático la primera fotografía aérea de una ciudad europea.



En 1888 Batut obtiene fotografías aéreas desde una cámara transportada por una cometa.



En 1903 se equipa a palomas con cámaras fotográficas. Con misión militar y de mensajería se crea el Bavarian Pigeon.



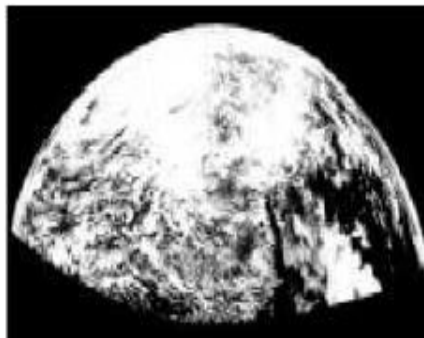
1908. Wilbur Wright toma la primera imagen aérea desde un aeroplano.



En 1929, **Goddard** instala una cámara en un cohete y toma una fotografía aérea de la ciudad de **Auburn** (Massachusetts).



Acabada la Guerra y aprovechando el material incautado a los Alemanes, los EEUU, desarrollan el cohete Viking en 1950 (imagen) que servirá de plataforma para sensores de teledetección.



1954. Primera imagen captada a bordo de un cohete Viking por una cámara fotográfica. Aunque no se distingue, la fotografía capta el estado de Arizona (EEUU).



Imagen de la tierra captada por una cámara fotográfica en 1955 a bordo de un cohete Viking.





**Cuadro 1.** Representación de los principales hitos y avances en la historia de la teledetección. Fuente: AulaSat

Debido a los avances tecnológicos el método utilizado en la teledetección es un concepto dinámico, pero coincidente en el objetivo primordial de observar la superficie. Como se deduce de las imágenes, existen tres instantes dónde los avances tecnológicos permiten que la teledetección se desarrolle hasta lo que conocemos hoy en día. El primero corresponde a la instalación de cámaras en cohetes no tripulados, seguido de la puesta en órbita de satélites artificiales que sirven de plataforma para los sensores y finalmente el paso de la era analógica a la digital, que permite simplificar el método de transmisión de la información captada por los sensores<sup>8</sup>.

En el Capítulo II, apartado 5, se muestran los diferentes programas espaciales de la comunidad internacional, tratando de mostrar la evolución de los sistemas a lo largo del tiempo.

<sup>8</sup> AulaSat.Wikispace. (2017). Breve historia de la teledetección.

### II.3. Fundamentos físicos de la teledetección.

La teledetección es una técnica que permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre. Para ello, es necesario que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción, distinguiéndolos dependiendo de la información que este les envía.

Imprescindiblemente cualquier sistema de teledetección tiene que contar con un sensor, una superficie observada y de un flujo energético entre ambos que los relacione y permita en última instancia la discriminación entre los diferentes tipos de superficie.

La forma con la que se consigue la interacción con la superficie depende de cada sensor, estableciéndose un flujo por

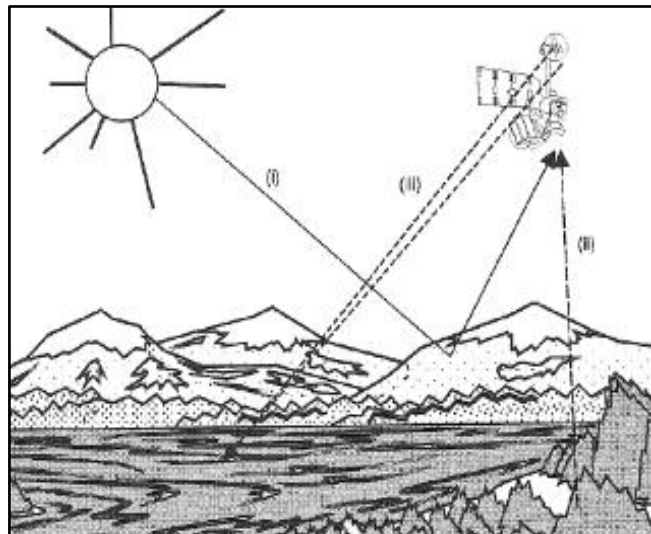


Figura 1. Formas de teledetección.  
(i)Reflexión (ii)Emisión (iii)Reflexión-Emisión Chuvieco 2008.

(i)**reflexión** cuando el sensor capta un flujo energético proveniente del Sol reflejado por la superficie terrestre; por (ii)**emisión** cuando un dispositivo situado en la superficie emite una señal al espacio y es captada por el sensor; finalmente (iii)**reflexión-emisión** cuando es el propio sensor quien emite y capta la onda una vez reflejada en el objeto que se pretende estudiar<sup>9</sup>. La Figura 1 representa gráficamente los conceptos introducidos hasta este punto.

En cualquiera de los tres casos definidos, el flujo energético constituye una forma de radiación electromagnética transmitida por radiación. Para poder entender completamente un sistema de teledetección, se detallan a continuación las dos

<sup>9</sup> Chuvieco, E. (2008). La observación de la Tierra desde el espacio. *Teledetección ambiental*.

teorías que tratan de explicar el comportamiento y las propiedades de la radiación electromagnética<sup>10</sup>.

**1º Teoría Ondulatoria:** Según la teoría ondulatoria, la radiación electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerza, uno eléctrico y otro magnético, definidos por la longitud de onda y su frecuencia.

**2º Teoría Cuántica:** Establece la radiación electromagnética como una sucesión de fotones con masa igual a 0. Esta teoría permite calcular la cantidad de energía contenida en un fotón siempre y cuando se conozca su frecuencia, correspondiendo una mayor energía a altas frecuencias y viceversa.

Aunque lo anteriormente expuesto corresponde al comportamiento ideal de un sistema de teledetección, en realidad existen interacciones entre el flujo energético por su paso a través de la atmósfera. La distorsión provocada, se rectifica mediante las correcciones; estando dirigidas a redefinir las **longitudes de onda** obtenidas por el sensor, procurando que cada elemento refleje sus longitudes de onda características, lo que se conoce como **firma espectral**<sup>11</sup>.

### **II.3.1. El espectro electromagnético.**

De acuerdo con la teoría cuántica, una menor longitud de onda conlleva un aumento de la energía contenida por la radiación electromagnética. La longitud de onda se relaciona con la frecuencia, siendo esta la inversa de la longitud de onda  $f=1/L$ . Siguiendo este principio, una onda de gran frecuencia tendrá consecuentemente una longitud de onda menor.

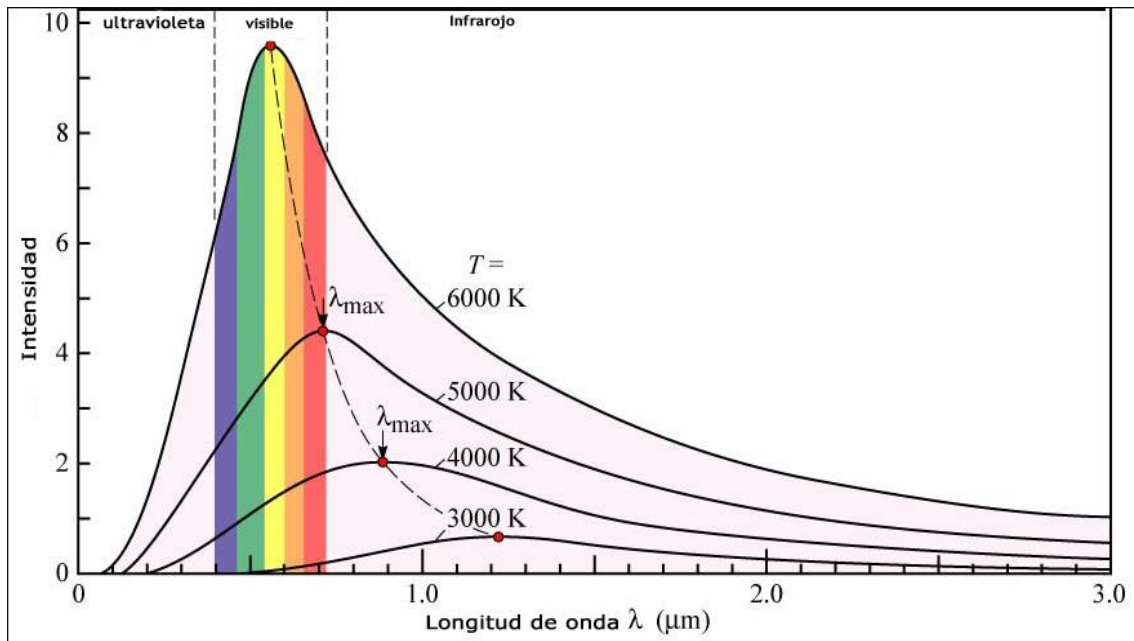
La radiación electromagnética ha sido previamente emitida por un cuerpo incandescente. Sus propiedades físicas dependen de la temperatura del cuerpo emisor, correspondiendo las altas temperaturas a grandes emisiones de energía

---

<sup>10</sup> Cintia Peri. (2008). *Descubrimiento de la radiación no térmica*.

<sup>11</sup> AulaSat.Wikispace. (2017). *La firma espectral*.

y elevadas frecuencias de onda<sup>12</sup>. En la *Figura 2*, se muestra la relación existente entre la temperatura del objeto emisor y la longitud de onda del máximo de radiación emitida:



*Figura 2. Relación de la temperatura con el máximo de radiación electromagnética emitida.  
Fuente: Dpto. Física Aplicada Universidad de Sevilla*

A modo de análisis, se determina que el máximo de radiación emitida por un cuerpo a la temperatura del Sol a unos 6000K, corresponde al espectro visible. Conforme disminuye la temperatura del cuerpo emisor, este máximo se desplaza hacia longitudes de ondas mayores, adentrándose en el infrarrojo. Con un aumento de la temperatura nos adentramos en espectro de los rayos ultravioleta. Finalmente, aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, actualmente se establecen una serie de bandas dónde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas dependiendo de su longitud de onda se denomina espectro electromagnético. Enfocados con el uso aplicado a la teledetección, conviene destacar cinco bandas espectrales, siendo estas las más comúnmente empleadas con la tecnología actual<sup>13</sup>.

**-Espectro Visible (VIS: 0,4 a 0,7μm):** Se denomina de esta forma porque es el único tipo de radiación electromagnética que consigue distinguir el

<sup>12</sup> Universidad de Sevilla. (2015). *Calor y Calorimetría*.

<sup>13</sup> Universidad de Murcia. (2015). *Fundamentos físicos de la teledetección*.

ojo humano. Dentro del espectro visible se observan tres bandas elementales; rojo (0.7 a 0.6  $\mu\text{m}$ ), verde (0.6 a 0.5  $\mu\text{m}$ ) y azul (0.5 a 0.4  $\mu\text{m}$ ). El espectro visible coincide con el máximo de radiación emitida por el Sol.

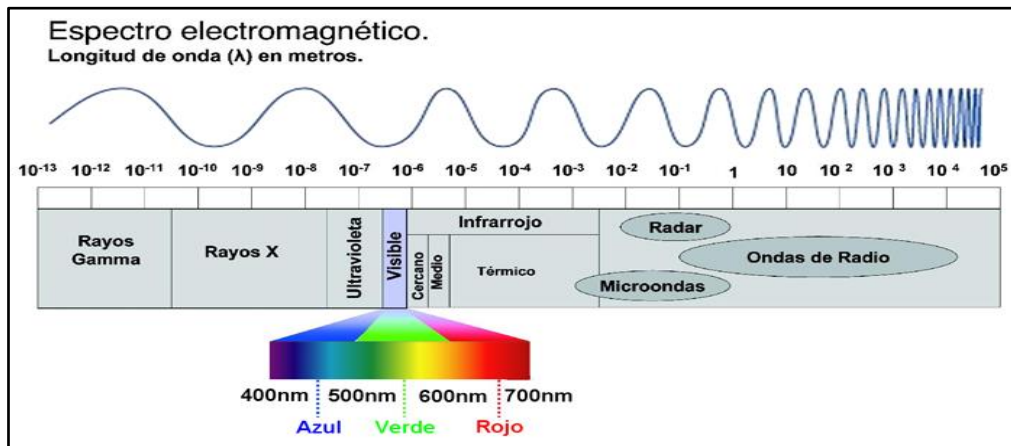
**-Infrarrojo cercano (NIR: 0.7 a 1.3  $\mu\text{m}$ ):** Resulta de especial importancia para discriminar masas vegetales, ya que coincide el NIR coincide con el máximo de reflexión de estas.

**-Infrarrojo medio (SWIR: 1.3 a 8  $\mu\text{m}$ ):** En esta región del espectro se entremezclan los procesos de reflexión solar en objetos y la emisión de energía electromagnética desde la superficie terrestre. Desde los 1.3  $\mu\text{m}$  hasta los 2.5  $\mu\text{m}$  resulta de utilidad para estimar la humedad contenida en los suelos. Desde los 2.5  $\mu\text{m}$  hasta los 8  $\mu\text{m}$  resulta el espectro idóneo para identificar y detectar incendios forestales además de procesos que alcanzan elevadas temperaturas en la superficie terrestre, como son las erupciones volcánicas.

**-Infrarrojo lejano o térmico (TIR: 8 a 14  $\mu\text{m}$ ):** En estas longitudes de onda se detecta con gran claridad el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

**-Micro-ondas (a partir de 1 mm):** Resulta de gran interés ya que es un tipo de energía muy transparente a la atmósfera terrestre. Este tipo de espectro se utiliza cuando es el propio sensor quien emite y recibe la radiación (radar) y según sea reflejada, se discrimina entre los diferentes objetos.

A modo de cuadro resumen y para una rápida situación del lector, en la *Figura 3* se encuentra detallado el espectro electromagnético.



*Figura 3. Espectro electromagnético. Fuente: Luz y pigmentos fotosintéticos. KhanAcademy.*

Finalmente, para que la radiación emitida o reflejada por la cubierta terrestre sea captada con las mínimas interferencias por el sensor situado en el espacio, se elige cuidadosamente el espectro electromagnético con el que trabajar. Esta elección es debido a la absorción de parte del espectro electromagnético por la atmósfera. Este comportamiento es conocido como ventanas atmosféricas.

### II.3.2. La interacción atmosférica con la radiación electromagnética.

Todos los objetos (independientemente de la radiación que emitan) son receptores de radiación emitida por otros cuerpos. Al incidir la radiación electromagnética sobre los objetos, esta puede seguir los siguientes tres caminos<sup>14,15</sup>:

1. **Reflejarse:** La radiación es reenviada de vuelta al espacio.
2. **Absorberse:** La radiación pasa a incrementar la energía interna del objeto.
3. **Transmitirse:** La radiación se transmite del objeto que la ha recibido a otro colindante.

De modo que la suma de los tres procesos Reflexión ( $\rho$ ), Absorción ( $\alpha$ ) y Transmisión ( $\tau$ ), suman el total de la energía recibida por el objeto. Por lo tanto,

<sup>14</sup> Chuvieco, E. (2008). La observación de la Tierra desde el espacio. *Teledetección ambiental*.

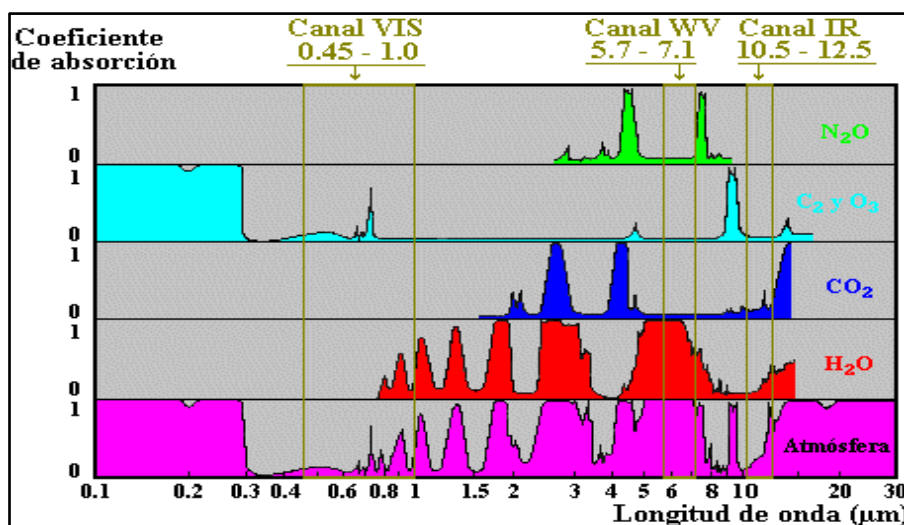
<sup>15</sup> Universidad de Murcia (2010). *Interacción de la radiación con los objetos*.

dependiendo del elemento incidente, este será más propenso a reflejar la energía que a absorberla y transmitirla o viceversa.

La atmósfera como medio físico compuesto principalmente por gases y aerosoles, es un factor importante a la hora de considerar los flujos de radiación entre el Sol, la superficie terrestre y los sensores situados a bordo de los satélites espaciales, siendo menester identificar los elementos atmosféricos que influyen en los fenómenos de absorción, los reflectivos y finalmente de transmisión.

**-Absortividad y transmisividad atmosférica:** La absorción de parte del espectro electromagnético está producido principalmente por los siguientes elementos<sup>16</sup>:

- Oxígeno (O<sub>2</sub>): Filtra las radiaciones ultravioletas por debajo de 0.1  $\mu\text{m}$  y pequeños sectores del infrarrojo térmico y las microondas.
- Ozono (O<sub>3</sub>): Elimina la energía ultravioleta inferior a 0.3  $\mu\text{m}$ .
- Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>): Absorbe el infrarrojo térmico (>15  $\mu\text{m}$ ) y el infrarrojo medio (longitudes de onda comprendidas entre 2.5 y 4.5  $\mu\text{m}$ ).
- Vapor de agua (H<sub>2</sub>O): Absorbe sobre todo las longitudes de onda entorno a los 6  $\mu\text{m}$ , aunque también afecta a las comprendidas entre 0.6 y 2  $\mu\text{m}$ .

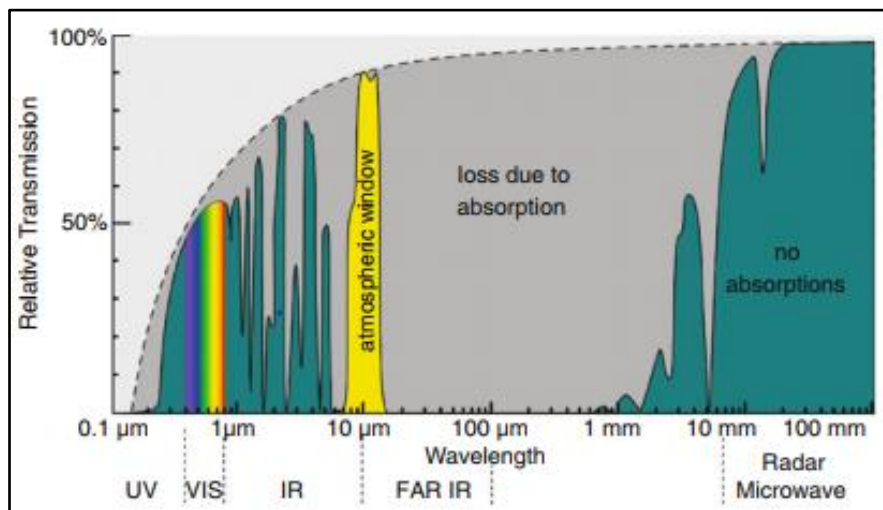


<sup>16</sup> Protección civil. (2008). *Comportamiento del Sistema Tierra-atmósfera frente a la radiación electromagnética*.

*Figura 4. Absorción electromagnética de los principales gases atmosféricos. Fuente: Protección civil. (2008). Comportamiento del Sistema Tierra-atmósfera frente a la radiación electromagnética.*

Como se observa en la *Figura 4*, debido a los gases presentes, la atmósfera muestra regiones del espectro dónde absorbe una gran cantidad de radiación electromagnética, impidiendo que esta incida sobre la superficie terrestre.

Para lograr observar la superficie terrestre con claridad empleando la teledetección, los sensores están diseñados para captar las fracciones del espectro dónde la atmósfera presenta una menor absorción y permite de esta forma una mejor transmisión de la energía. Las regiones del espectro dónde se produce una elevada transmisión de energía a través de la atmósfera se las denomina **ventanas atmosféricas**<sup>17</sup>. La *Figura 5* identifica las principales ventanas atmosféricas con su correspondiente ubicación en el espectro electromagnético:



*Figura 5. Transmisividad relativa de la Atmósfera Terrestre. Fuente: Wikipedia.*

Numéricamente, las ventanas atmosféricas expuestas se ajustan a los siguientes valores:

- Espectro visible e infrarrojo cercano: entre 0.3 y 1.35  $\mu\text{m}$ .
- Infrarrojo medio: de 1.5 a 1.8  $\mu\text{m}$ , de 2.0 a 2.9  $\mu\text{m}$  y de 4.5 a 5.5  $\mu\text{m}$ .

<sup>17</sup> Universidad de Murcia (2010). *Interacción de la radiación con los objetos*.



- Infrarrojo lejano: entre 8 y 14  $\mu\text{m}$ .
- Microondas: por encima de los 20  $\mu\text{m}$ .

Los sensores a bordo de las plataformas espaciales se diseñan de acuerdo a estas ventanas para disminuir las interferencias atmosféricas. En la actualidad, junto a las interferencias, las nubes constituyen una barrera importante en el campo de la observación terrestre, dado que absorben todo el espectro radiométrico impidiendo la transmisión de energía entre superficie y sensor.

Cómo proceso de transmisión de energía, la dispersión atmosférica está presente en cada una de las imágenes tomadas desde el espacio. La dispersión consiste en la descomposición del haz energético cuando este atraviesa un determinado elemento. Así pues, la adquisición de imágenes satélite se ve afectada por tres tipos de dispersión atmosférica<sup>18</sup>:

1. Dispersión de Rayleigh: Se manifiesta cuando la dispersión afecta a longitudes de onda menores que el diámetro de la partícula que lo provoca. Esta dispersión es responsable del color del cielo.
2. Dispersión de Mie: Los elementos causantes de este fenómeno son los aerosoles y las nubes suspendidas gracias al movimiento vertical de la masa de aire de la Tierra. Estos agentes son de un mayor tamaño que la longitud de onda que los atraviesa, produciendo la difusión de las partículas. A mayor tamaño de la partícula, mayor dispersión.
3. Dispersión no selectiva: Este tipo de dispersión ocurre cuando el tamaño de las partículas atravesadas por la radiación es mucho mayor que la longitud de onda de esta. Las partículas causantes de este tipo de dispersión suelen ser partículas de polvo y gotas de agua en suspensión.

Conocer el comportamiento de la atmósfera resulta de especial importancia en campo de la teledetección. De esta forma, se es capaz de determinar las interacciones que produce sobre el flujo energético que viaja desde la superficie terrestre al sensor espacial.

---

<sup>18</sup> Santiago Ormeño Villajos. (2006). Universidad Politécnica de Madrid, *Teledetección fundamental*.

## II.4. Componentes de un sistema de teledetección.

Se ha introducido anteriormente el concepto de teledetección como la ciencia aplicada que permite obtener información de la superficie terrestre sin entrar en contacto directo con los objetos observados. Para cumplir con la definición, es menester un conjunto de elementos que posibiliten la captación de información terrestre por parte del sensor, para posteriormente transmitirla, almacenarla de manera comprensible y finalmente ser interpretada por un usuario final. Este conjunto de elementos son los constituyentes de un Sistema de Teledetección.

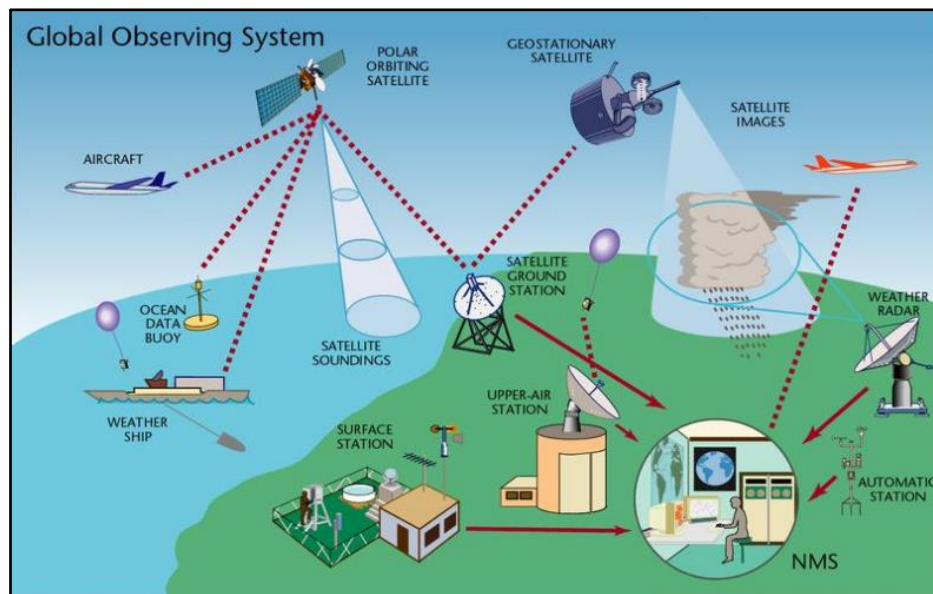


Figura 6. Interacción entre los diferentes componentes de un sistema de teledetección. Fuente: World Meteorological Organization.

Tal y como reza Chuvieco en su obra *Teledetección Ambiental* (2008), un sistema de teledetección espacial incluye como mínimo seis elementos que interactúan entre sí para dar lugar al conjunto de la Teledetección<sup>19</sup>:

1. **Fuente de energía:** Expuesta como fuente de energía electromagnética dependiente de la temperatura, supone el origen de la radiación electromagnética que detecta el sensor. Puede tratarse del mismo sensor que emite y capta la energía (teledetección activa) o de una fuente de energía externa al sensor, correspondiéndose este modelo a la teledetección pasiva.

<sup>19</sup> Chuvieco, E. (2008). La observación de la Tierra desde el espacio. *Teledetección ambiental*.

2. **Cubierta terrestre:** Formada por los distintos elementos situados sobre la corteza terrestre, distinguiéndose principalmente masas de agua, materia vegetal y suelo desnudo... etc. Que con sus propiedades físicas características reflejan de manera determinada la radiación.
3. **Sistema sensor:** Compuesto por el propio sensor y la plataforma que lo alberga. Capta la energía reflejada por la cubierta terrestre.
4. **Sistema de recepción de la información:** Situado en la superficie terrestre, recibe la información transmitida por el sensor y la almacena para ser posteriormente distribuida entre usuarios.
5. **Intérprete:** Convierte la información obtenida en datos de interés, con la finalidad de facilitar a un usuario final el empleo de dicha información.
6. **Usuario final:** Encargado de escrutar la información obtenida y dictaminar unas determinadas consecuencias a raíz de su estudio.

#### **II.4.1. Interacción de la radiación solar con la cobertura terrestre<sup>20</sup>.**

La principal fuente de energía de nuestro planeta proviene del Sol. Conocer la interacción de su energía con la atmósfera y los diferentes elementos que constituyen la superficie terrestre se antoja fundamental para lograr discriminar todo tipo de elemento evitando equivocaciones. Cada elemento, respondiendo a su composición química, reflejará, transmitirá y absorberá la energía solar de una manera única. Este fenómeno se conoce como **firma espectral**, existiendo en la actualidad bancos de firmas espectrales dónde se relaciona cada firma con el determinado elemento en cuestión, facilitando de gran manera la labor del intérprete.

##### **II.4.1.1. Distorsión de la firma espectral<sup>21</sup>.**

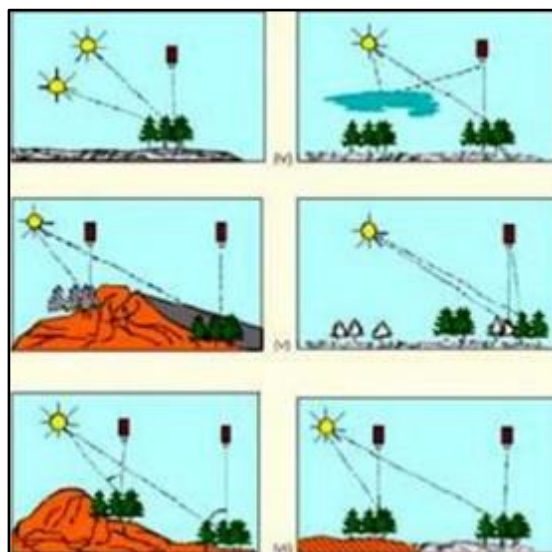
Aunque cada elemento tenga una firma espectral única, hay factores que alteran el comportamiento espectral teórico esperado. Los 5 factores más relevantes que contribuyen a las distorsiones espectrales son los siguientes:

---

<sup>20</sup> Universidad de Murcia (2010). *Interacción de la radiación con los objetos*.

<sup>21</sup> Chuvieco, E. (2008). La observación de la Tierra desde el espacio. *Teledetección ambiental*.

1. Ángulos de iluminación y observación: Varían con la latitud, fecha y hora del lugar a observar. Las sombras de los objetos entre ellos, dificultan la interpretación de la imagen. Por este motivo, se debe efectuar la adquisición de la imagen en el punto álgido solar.
2. Elevaciones o depresiones en el relieve: Los accidentes geográficos introducen variación respecto a la radiación recibida, provocando la distorsión de los datos.
3. Variaciones atmosféricas. Al tratarse de un fenómeno dinámico, la nubosidad puede aparecer el día de la toma de datos, impidiendo una correcta visualización de la superficie terrestre.
4. Variación medioambiental de cubierta: Aun tratándose de la misma especie vegetal, dependiendo de la madurez del ejemplar, se reflejará una firma espectral característica. Se propicia de este modo a clasificar en especies distintas dependiendo de la madurez, causando errores de clasificación.
5. Sustrato litológico. Factor especialmente importante cuando la cubierta vegetal es escasa. En esos casos, el sustrato es la parte más representativa en la imagen, teniendo que corregir sus efectos en caso de querer calcular índices de crecimiento y desarrollo vegetal.



**Figura 7.** Representación de los factores que alteran las firmas espectrales. La observación de la Tierra desde el espacio. **Fuente: Chuvieco (2008) Teledetección ambiental.**

Sin embargo, los 5 factores afectan de una forma más modesta al infrarrojo térmico. Se debe principalmente al origen de la radiación correspondiente a este espectro, proveniente de la superficie terrestre, de procesos generadores de elevadas temperaturas.

La región del infrarrojo térmico es prácticamente transparente a la atmósfera, al igual que sucede con la región de las micro-ondas. Esta última es utilizada comúnmente por los radares, es decir, por la teledetección activa.

#### **II.4.1.2. Comportamiento espectral de las principales superficies terrestres<sup>22</sup>.**

Cada tipo de superficie interactúa con la radiación de manera diferente, absorbiendo unas longitudes de onda concretas y reflejando otras en unas proporciones determinadas. Es lo que se conoce como firma espectral, y para su determinación se utilizan los siguientes métodos:

- Medición directa con un radiómetro.
- Extracción de la firma desde una biblioteca puesta a punto por alguna organización.
- Simularla mediante modelos físicos.
- Extraerla de una imagen que contenga su firma espectral.

A continuación, se presenta un resumen del comportamiento espectral de los elementos más comunes sobre la superficie terrestre, tratándose de vegetación, agua y tierra.

#### **-Comportamiento espectral de la vegetación<sup>23</sup>:**

La caracterización de las masas vegetales ha resultado de gran interés por la comunidad internacional, ya que entre otras muchas funciones permite distinguir el crecimiento y la salud de las especies vegetales. Para lograr una buena caracterización se han analizado los siguientes tres factores:

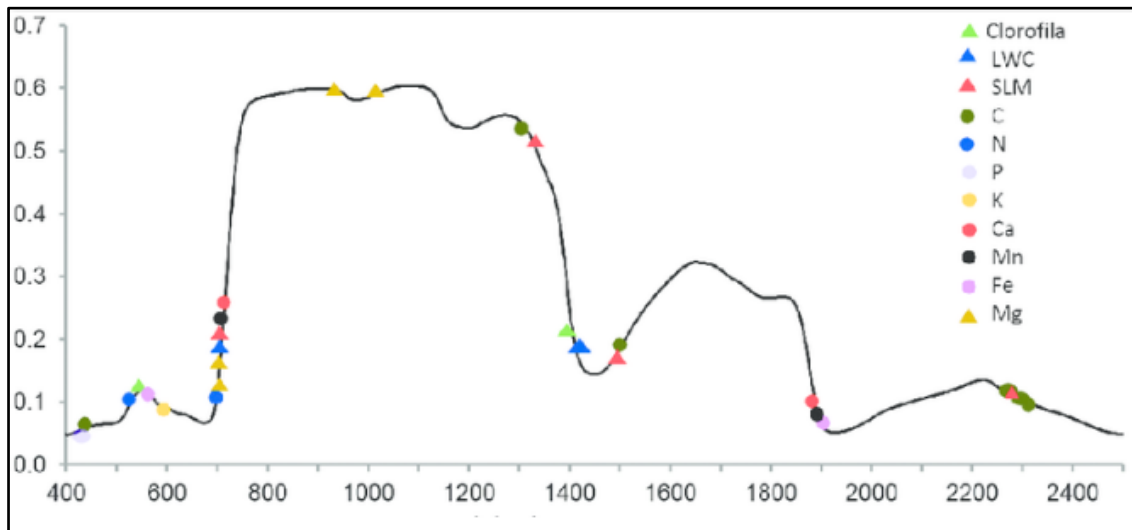
---

<sup>22</sup> Javier Martínez Vega y M. Pilar Martín Isabel. (2010). *Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente*. Madrid: Red Nacional de Teledetección Ambiental.

<sup>23</sup> González-Cascón, Pacheco Labrador, J. Martín. (2016). *Evolución del comportamiento espectral y la composición química en el dosel arbóreo de una dehesa*.

1. Factores relacionados con la reflectividad de la hoja. Destacan los pigmentos foliares, su estructura y el contenido de agua.
2. Estudio de las características geométricas de la planta, principalmente su área foliar, la geometría de sus hojas, la visibilidad de las ramas...
3. Características comentadas anteriormente, como son la orientación, la pendiente, la reflectividad del suelo, agrupación de especies vegetales... etc.

La *Figura 8* representa los elementos implicados en la reflectividad de la hoja, observándose un pico de reflectividad en el visible causado por la clorofila y una elevada reflectividad en el infrarrojo cercano.



*Figura 8.* Comportamiento espectral de las hojas junto los elementos causantes. Fuente: Leonardo Arenque (2011). Caracterización de firma espectral a partir de sensores remotos.

La baja reflectividad del espectro visible por parte de la vegetación corresponde a la absorción realizada por los pigmentos de la hoja. El color verde intenso característico de la vegetación sana guarda una estrecha relación con el contenido en clorofila de la misma, debido que presenta una transmisividad más elevada en el entorno de los 55  $\mu\text{m}$ .

Cuando la vegetación está enferma o estresada, se produce una disminución de la concentración de clorofila en la hoja, aumentando por contrapartida la de carotenos. Estos presentan una mayor transmisividad alrededor de los 65  $\mu\text{m}$  lo que confiere a la hoja de un color rojizo-amarillento.

En las longitudes de onda correspondientes al infrarrojo cercano (SWIR), la vegetación absorbe poca energía, permitiendo una elevada transmisión/reflexión. La elevada reflexión de la vegetación en el SWIR permite una fácil identificación de las masas vegetales en esta región del espectro.

Finalmente, a causa del contenido de agua en la hoja, la transmisividad vuelve a descender en el infrarrojo medio y lejano.

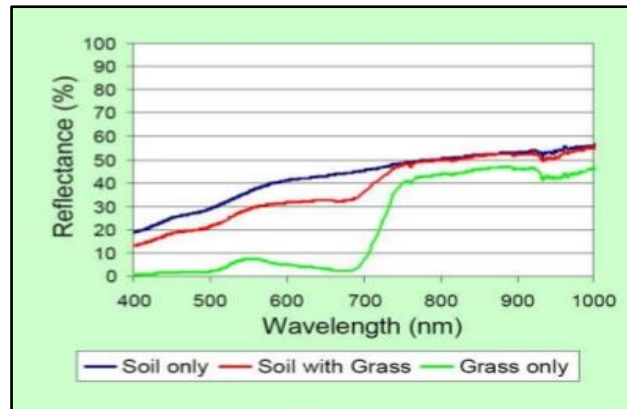
#### -Comportamiento espectral de los suelos:

Debido a la dificultad de observar un suelo completamente desnudo sin cubierta vegetal, no resulta una tarea sencilla obtener información de los sustratos a partir de técnicas de teledetección espacial. Sin embargo, mediante técnicas indirectas como el estudio de la coloración de la vegetación en el sustrato a estudiar, permiten al intérprete identificar las características del suelo. Esta labor se conoce como geobotánica.

Cuando se encuentran suelos desnudos, su comportamiento espectral es más uniforme que el de la vegetación, mostrando una curva espectral más plana. Existen principalmente tres factores que influyen sobre el comportamiento espectral de los suelos; ordenados en importancia son los siguientes:

1. Química del suelo. Se trata del factor predominante a la hora de proveer de color al suelo. Así pues, se puede distinguir por coloración la presencia de minerales ferruginosos.
2. Características físicas. Dependiendo del contenido de finos en el suelo, así como su plasticidad, este tendrá una mayor o menor reflectancia.
3. Contenido de humedad. Este parámetro está directamente relacionado con el anterior.

En la *Figura 9*, se muestra la reflectancia de un suelo dependiendo de la proporción de cubierta existente.



*Figura 9.* Comportamiento espectral de diferentes tipos de suelo. En azul, suelo desnudo, en rojo suelo con hierba y en verde suelo cubierto completamente de hierba.

#### -Comportamiento espectral del agua<sup>24</sup>.

El agua como elemento, absorbe o transmite prácticamente toda la radiación que recibe, aumentando su capacidad de absorción conforme aumenta la longitud de onda. Así pues, la mayor reflectividad del agua se produce entorno al azul 0.4  $\mu\text{m}$ , volviéndose prácticamente nula en el infrarrojo y mayores longitudes de onda.

La variabilidad del agua es más fácilmente detectable en longitudes de onda corta. Como se estudiará más adelante, la profundidad del agua influye directamente en el aporte de reflectividad derivado de los materiales de los fondos, aumentando la reflectividad en aguas poco profundas.

Respecto a la composición del agua y la detección de materiales en suspensión, diversos estudios han ratificado la posibilidad de emplear sensores especiales para cartografiar el contenido de clorofila en el agua, (*Domínguez, 2003*). Estos estudios señalan que, con un aumento de la concentración de clorofila, aumenta la reflectividad del agua en el verde y disminuye en el azul, estableciendo una correlación de signo negativo entre ambas componentes. Este descubrimiento ha facilitado la localización de concentraciones de algas a poca profundidad, además de estudiar y seguir los procesos de eutrofización en embalses y lagunas.

<sup>24</sup> J. A. Domínguez, C. Marcos. (2003). *Estudio de aguas continentales mediante teledetección.*



## II4.2. Sistema sensor<sup>25,26</sup>.

Compuesto por el propio sensor y la plataforma que lo alberga, es el encargado de captar información de la superficie terrestre y codificarla, de forma que esta pueda ser posteriormente transmitida. La **resolución** de un sensor consiste en la capacidad de este para poder discriminar y obtener información con gran detalle de la superficie terrestre. La resolución de los sensores depende de la capacidad tecnológica del momento, encontrándose actualmente satélites con elevada resolución.

Para entender completamente el concepto de resolución, no vale en pensar simplemente en una mejor definición de la imagen, sino que también cuentan otros factores como son el tiempo que tarda el sensor en volver a tomar una imagen de la misma zona, si este es capaz de tomar la misma imagen desde diferentes ángulos o la capacidad del sensor para discriminar entre las diferentes bandas del espectro electromagnético. Los ejemplos expuestos anteriormente hacen referencia a los cinco tipos de resolución de un sensor, conociéndose como **espacial, temporal, angular, radiométrica** y **espectral** respectivamente.

Que un sensor tenga un mejor tipo de resolución que otro, dependerá única y exclusivamente al uso destinado. De esta forma, los satélites meteorológicos necesitarán una gran resolución temporal y sin embargo no les será imprescindible tener una buena resolución radiométrica.

Finalmente, se presenta un breve resumen de los cinco tipos de resolución.

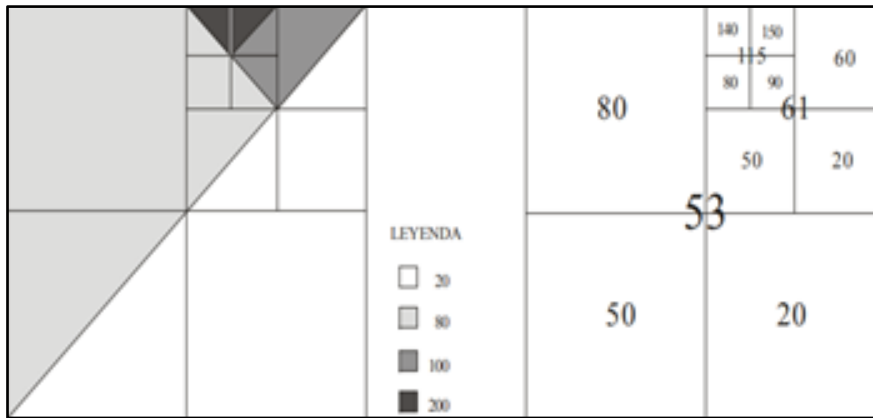
1. *Resolución espacial*: Designa el objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. El modo de adquisición de los datos de un sistema de teledetección considera una malla cuadrada imaginaria que se superpone a la superficie terrestre. Cada celda se conoce como píxel. El mínimo tamaño de la celda que podemos discriminar es lo que se conoce como resolución espacial. A mayor tamaño de celda, menor resolución y viceversa. Es por ello, que la resolución espacial tiene un papel protagonista en la interpretación de la imagen marcando el nivel de detalle que esta ofrece.

---

<sup>25</sup> Chuvieco, E. (2008). La observación de la Tierra desde el espacio. *Teledetección ambiental*.

<sup>26</sup> AulaSat.Wikispace. (2017). *Los sistemas de teledetección*.

La *Figura 10* representa el mayor poder de discriminación debido al aumento de la resolución espacial.



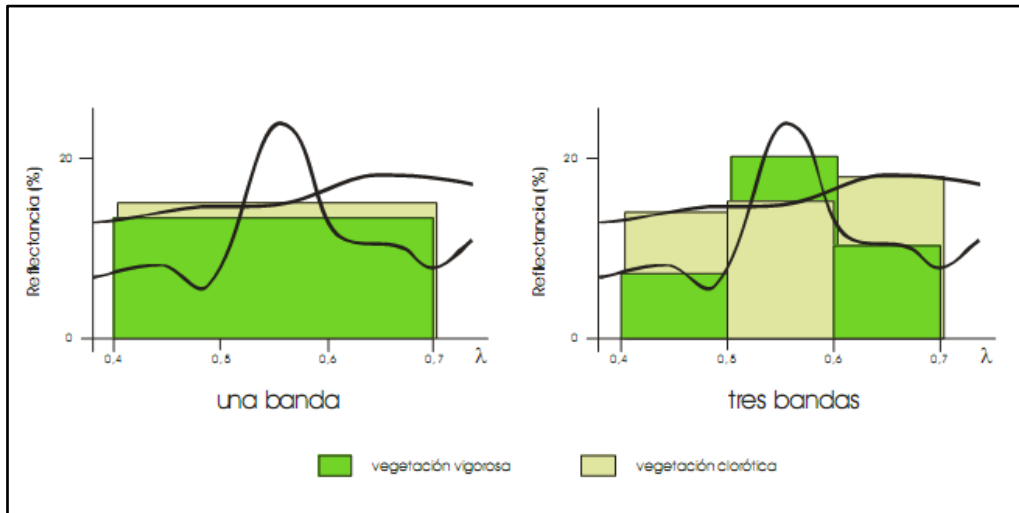
**Figura 10.** Al aumentar la resolución espacial, el nivel digital del píxel resulta más cercano a la realidad. **Fuente: Chuvieco (2008) *Teledetección ambiental*.**

Atendiendo a la definición, solamente serán identificables aquellos elementos que superen el tamaño de varios píxeles de la imagen. Un píxel mixto está definido por la señal en proporción que emiten las cubiertas que lo representan. En consecuencia, la señal recibida no se asemeja a ninguna de ellas, dificultando enormemente su correcta identificación.

Sin embargo, se ha demostrado en estudios, que una mejor resolución espacial en zonas urbanas, aumenta la dificultad de la clasificación de los píxeles debido a la variedad de objetos diferentes que abundan en terreno urbano.

**2. Resolución espectral:** Consiste en el número de canales espectrales que es capaz de captar un sensor. Con la diferenciación de bandas espectrales, se cuenta con información de la cubierta en las diferentes bandas del espectro. A la vez, conviene que dichas bandas sean lo suficientemente estrechas, con el objetivo de recoger la señal de regiones coherentes del espectro. Bandas muy amplias suponen un valor promedio, que puede dificultar la diferenciación de los diferentes elementos observados.

Este efecto se representa en la *Figura 11*, observándose que con una banda se obtiene un valor promedio de reflectancia. Sin embargo, con tres bandas correctamente definidas, se logra diferenciar entre las distintas respuestas reflectivas.



**Figura 11.** Representación de la resolución espectral. A la izquierda con una sola banda, la reflectancia es el promedio, presentado la vegetación sana y la enferma el mismo comportamiento. Con tres bandas se logran discriminar entre ambos tipos de vegetación. Fuente: Guilliana Mendoza. (2016). *Percepción remota o telederección*.

Respecto a los sensores espaciales actuales, la menor resolución espectral es encontrada en los sistemas radar y en los equipos fotográficos. El primero funciona a través de un único canal, mientras que la fotografía ofrece principalmente imágenes a color y pancromáticas, todas ellas ocupando normalmente una banda y en el caso de las pancromáticas el infrarrojo cercano. Entre los equipos con una mayor resolución espectral, se encuentran los sensores hiperespectrales, que llegan a contar con 256 canales con un ancho de banda muy estrecho, ideales para poder clasificar de manera muy precisa distintos elementos por su comportamiento espectral.

**3. Resolución radiométrica:** Hace mención a la sensibilidad del sensor, es decir, su capacidad para detectar variaciones en la radiación espectral que recibe. Para los equipos digitales, la imagen se codifica en formato binario, por lo que la resolución radiométrica corresponde al rango posible de valores que puede adoptar un píxel. Al tratarse de codificación digital, la resolución se expresa en número de bits, pudiendo adoptar cada píxel

un número comprendido entre el 0 y dos elevado al número de bits. Para realizar una clasificación visual, un sensor equipado con 16 bits de profundidad, es más que suficiente, ya que permite discernir más de 4096 tonalidades cerca del límite de la capacidad visual humana.

*4. Resolución temporal:* Se trata del periodo de tiempo que transcurre entre la toma de dos imágenes de la misma zona por el mismo sensor. La resolución temporal está en función de las características temporales de la plataforma que lo transporta. El término resolución temporal efectiva se acuña para describir el intervalo de tiempo entre dos imágenes que observan la misma parte de la superficie terrestre, ya que en imágenes intermedias puede haber impedimentos técnicos o atmosféricos que impidan visualizar la superficie. Es por ello que la resolución efectiva siempre será igual o menor a la resolución temporal programada.

La resolución temporal depende del objetivo de la misión. Así las misiones meteorológicas captan una imagen cada pocos minutos y los satélites de recursos naturales lo hacen semanal o incluso mensualmente.

*5. Resolución angular:* Se trata de un término referido a la capacidad del sensor para recoger información de la zona desde diferentes ángulos. Al lograr observar una misma zona desde diferentes posiciones los intérpretes son capaces de caracterizarla con una mayor precisión.

Como se puede intuir, los diferentes tipos de resolución están íntimamente relacionados. Cuando se aumenta la resolución espacial, normalmente es en detrimento de la resolución espectral. Se produce por la imposibilidad de aumentar todas las resoluciones al máximo tecnológico disponible en el momento del lanzamiento, dado que el volumen de datos a transmitir desde el espacio hasta la superficie sería de tal magnitud que hace inviable tal hazaña; conllevando aumento del precio de la información, haciéndola disponible para menos público. Puesto que las resoluciones están relacionadas entre sí, cada sistema de teledetección ofrece unas características particulares de acuerdo a los fines por los cuales se diseña.

#### II.4.2.1. Tipos de sensores<sup>27,28,29,30</sup>.

En la actualidad se identifican dos tipos de sensores dependiendo de la forma en la que captan la información de la superficie terrestre. Por una parte, se encuentran los denominados sensores pasivos, que captan la radiación electromagnética proveniente de la superficie terrestre. Por otra, existen los sensores activos, que permiten emitir ondas energéticas para captarlas una vez son reflejadas por la cubierta terrestre.

**Sensores pasivos:** Captan la energía electromagnética proveniente de la cubierta terrestre, ya sea producto de la reflexión de los rayos solares o emitida desde focos a elevada temperatura. Los sistemas fotográficos, los radiómetros multi e hiperespectrales y los espectrómetros de imagen son sensores pasivos. La principal ventaja de los sensores pasivos radica en la sensibilidad espectral, permitiendo la mayoría de ellos obtener simultáneamente información de las diferentes bandas espectrales, permitiendo discretizar el espectro.



Figura 12. Ilustración del funcionamiento de un sensor pasivo. Fuente @ESA.

<sup>27</sup> Herbert J. Kramer. (2016). *Observation of the Earth and its Environment: Survey of Missions and Sensors*. Ed. Springer Verlag

<sup>28</sup> Ministerio de educación, cultura y deporte. (2006). *Sensores de teledetección: los ojos de los satélites*.

<sup>29</sup> Chuvieco, E. (2008). La observación de la Tierra desde el espacio. *Teledetección ambiental*.

<sup>30</sup> European Space Agency. (2014). *Los Sensores*.

La realización de observaciones sobre diferentes zonas del espectro electromagnético, aporta una amplia información sobre el estado del medio ambiente. Por ejemplo, la radiación ultravioleta se utiliza para monitorizar los niveles de ozono en la atmósfera, el espectro visible y el infrarrojo cercano para discriminar el estado de las masas vegetales y el infrarrojo lejano o térmico para detectar focos de calor correspondientes a incendios forestales existentes sobre la superficie terrestre. Finalmente, se procede a nombrar brevemente los diferentes dispositivos que utilizan sensores pasivos.

-*Sistemas fotográficos*: Compuestos por cámaras analógicas y cámaras digitales, actualmente son los equipos que cuentan con una mejor resolución espacial. En contra partida, su uso se encuentra limitado a bordo de plataformas satelitales, empleándose especialmente a bordo de aeronaves.

- *Radiómetros de micro-ondas*: También conocidos con el nombre de sensores de antena, se caracterizan porque operan con longitudes de ondas muy largas, siendo prácticamente transparentes a la atmósfera, obteniendo una elevada transmisividad.

-*Sensores óptico-electrónicos*: Combinan una óptica similar a la fotográfica con un sistema de detección electrónico. Este hecho permite la instalación de estos sensores en plataformas orbitales, ya que permite realizar un envío de información continuo. Los máximos referentes de este tipo de sensores son los exploradores de barrido y los exploradores de empuje.

**Sensores activos:** La característica común que los relaciona es la capacidad que tienen para emitir un haz energético, que posteriormente captan tras su reflexión sobre la superficie que se pretende observar. La característica de la onda electromagnética reflejada corresponde con la reflectividad de la superficie estudiada. Esta tecnología se usa principalmente en los sistemas radar y lidar.

-*Sistemas radar*. Su funcionamiento se basa en emitir un impulso de radio (longitudes de onda comprendidas entre 0.1cm y 1m), que se refleja en el objetivo y es reflectado. A partir de las características de la onda de

reflexión se obtiene información del objeto. Actualmente tiene gran importancia en el ámbito del seguimiento meteorológico.

-*Lidar*. Se trata de otro tipo de sensor activo. Este emite pulsos de luz polarizada entre el violeta y el infrarrojo cercano. En función del tiempo y la intensidad de la señal reflejada, se obtienen datos de altura y distancia de los objetos. Actualmente se trata de una tecnología muy de voga que permite la realización de modelos digitales de elevación.

### II.4.3. Las órbitas satelitales<sup>31,32</sup>.

Para realizar observaciones de la Tierra desde el espacio, el sensor que capta las imágenes tiene que estar situado en una plataforma espacial. En lo que concierne a este estudio, que trata sobre la monitorización de masas de agua mediante teledetección espacial, se dedica este apartado para describir los diferentes tipos de órbitas que adopta un satélite alrededor de la Tierra y describir brevemente los fenómenos físicos que intervienen para que esta sea estable.

Si un satélite mantiene una órbita estable alrededor de la Tierra durante un largo periodo de tiempo, es debido a la anulación de fuerzas que actúan sobre él. Por una parte, la fuerza gravitatoria que atrae el satélite hacia la Tierra. Por otra, fuerza centrífuga provocada por la rotación del satélite alrededor de la Tierra. Al encontrarse rotando fuera de la atmósfera terrestre, no existe resistencia del aire, permitiendo que mantenga una velocidad constante.

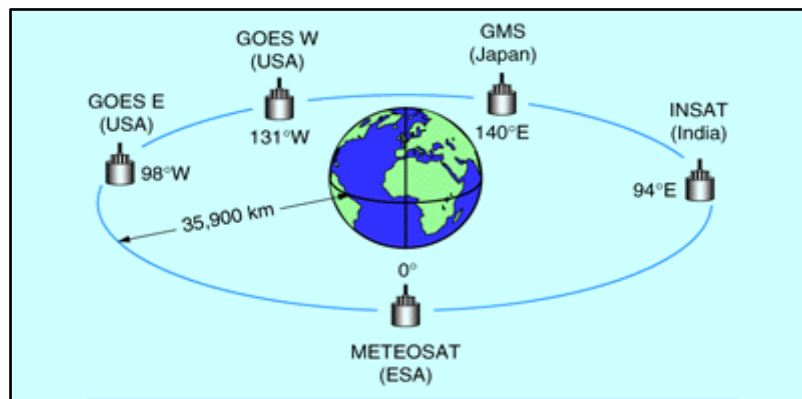
Siguiendo las pautas anteriores, se deduce que un satélite orbitando a una distancia cercana a la tierra se ve expuesto a una gran atracción gravitatoria y por lo tanto requerirá orbitar a una elevada velocidad para lograr contrarrestarla. Exactamente a una distancia de 36.000km, la combinación de la distancia con la velocidad, provocan que un satélite tarde exactamente 24h para realizar una órbita, es lo que se denomina **órbita geoestacionaria**.

---

<sup>31</sup> European Space Agency. (2014). *Las órbitas de los satélites*.

<sup>32</sup> Chuvieco, E. (2008). La observación de la Tierra desde el espacio. *Teledetección ambiental*.

-*Órbitas geoestacionarias:* Las órbitas geoestacionarias a 36.000km del ecuador son aquellas en que la velocidad orbital del satélite coincide con la velocidad de rotación de la Tierra, moviéndose solidariamente con ella. Este hecho proporciona la ventaja de que el satélite siempre ve la tierra desde la misma perspectiva, registrando la imagen de la misma superficie en breves intervalos de tiempo. Es particularmente útil para observar las condiciones meteorológicas. El mayor inconveniente radica en la lejanía del satélite respecto a la tierra, provocando una disminución de la resolución. Actualmente, existe una red de satélites meteorológicos geoestacionarios que permite seguir la evolución atmosférica de todo el mundo al mismo tiempo. La *Figura 13*, representa la posición de cada uno.



*Figura 13.* Red de satélites meteorológicos geoestacionarios. Fuente: @ESA. Las órbitas de los satélites.

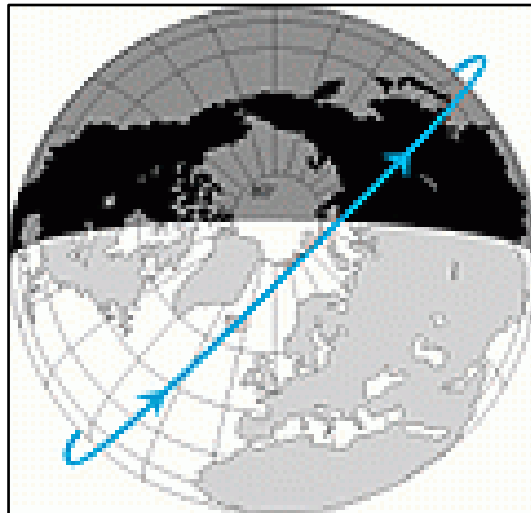
-*Órbitas heliosíncronas:* Muchos satélites que orbitan alrededor de la Tierra están equipados con sensores pasivos que requieren de la reflexión de la luz solar para su funcionamiento. Es por ello que sus órbitas se tienen que ajustar al día y la noche. Estos satélites mayormente aplicados en la monitorización de los recursos naturales, requieren que, para realizar una comparación efectiva, las imágenes se tomen bajo las mismas condiciones de luz. Esta condición obliga a tomar los registros a la misma hora local del día para que la altitud del Sol sobre el horizonte sea siempre la misma. Estos requisitos se cumplen al poner un satélite en una órbita polar.

Al girar el satélite en su órbita, la Tierra gira sobre su eje. Cada vez que el satélite completa una vuelta se escanea una nueva franja de la superficie



y pasado un cierto número de revoluciones, se ha escaneado toda la superficie terrestre.

Algunos satélites escanean una franja ancha cada vez y cubriendo la totalidad de la superficie terrestre en unas pocas vueltas. Por el contrario, los satélites de alta resolución solamente escanean finas tiras de superficie, tardando varios días en completar la cobertura de la Tierra. La *Figura 14* representa gráficamente una órbita polar.



*Figura 14. Representación de una órbita polar.  
Fuente: @ESA. Las órbitas de los satélites.*

## **II.5. Los principales programas de teledetección espacial<sup>33</sup>.**

Los satélites de observación terrestre se distinguen en función de la órbita que describen, la generación de los sensores, los diferentes tipos de resolución y de la amplitud del barrido de los sensores sobre la superficie. Todos los parámetros son definidos al principio de cualquier misión espacial, dependiendo de la aplicación a la que se va a destinar el satélite.

Actualmente, los principales programas de teledetección corresponden a inversión pública. Sin embargo, visto el enorme potencial de la teledetección, se han realizado inversiones privadas para la puesta en órbita de satélites comerciales. Se presenta un resumen las principales misiones espaciales realizadas a día de hoy.

<sup>33</sup> Herbert J. Kramer. (2016). *Observation of the Earth and its Environment: Survey of Missions and Sensors*. Ed. Springer Verlag.

### **II.5.1. Programa *Copernicus*<sup>34,35,36</sup>:**

El programa Copernicus, anteriormente llamado 'Global Monitoring for Environment and Security', es un proyecto dirigido conjuntamente por la Agencia Espacial Europea (ESA) encargada de poner en órbita y distribuir la información obtenida por los satélites juntamente con la Unión Europea, que a través de la Comisión de Medio ambiente lleva a cargo la iniciativa general del programa.

El programa Copernicus pretende convertirse en el más ambicioso y completo de todos los programas de observación terrestre puestos en marcha hasta la fecha. Su objetivo principal consiste en lograr una completa, continua y autónoma capacidad de observación terrestre para poder facilitar los resultados a la comunidad científica o cualquier tipo de persona interesada, convirtiéndose de esta manera en una fuente exacta, fiable y continua para el estudio del medio.

El programa pretende ser el referente mundial respecto a la gestión y conservación del medio ambiente, ayudando a comprender y mitigar los efectos del cambio climático para asegurar la seguridad civil. Para ello, se ponen en marcha 6 misiones Sentinel, cada una de ellas con un cometido en concreto. Las misiones Sentinel puestas en marcha hasta la fecha se adjuntan a continuación, junto unos cuadros resumen con las características más importantes de todas ellas.

#### **Sentinel-1:**

Es una misión satélite equipada de radar. Es capaz de proveer información de la superficie terrestre en todo tipo de condiciones meteorológicas, de noche o de día gracias al radar equipado. La constelación Sentinel-1 provee imágenes de una alta calidad, mejorada resolución espacial y cobertura mundial para dar soporte a operaciones en el ámbito de la monitorización marina, terrestre o coordinación de equipos de emergencia.

Con una resolución espacial de 20m, el satélite Sentinel-1 monitoriza toda la superficie terrestre, así como las zonas costeras y las principales rutas marinas mercantes europeas en intervalos regulares de tiempo. En un estado normal de

---

<sup>34</sup> European Space Agency. (2017). *El programa Copérnico*.

<sup>35</sup> European Commission. (2014). *Press Release: EP Adopts European Earth observation programme Copernicus*.

<sup>36</sup> Copernicus, Europe's eyes on Earth. (2017). *Copernicus in brief*.

operación, llega a captar un ancho de 250km de superficie por pasada. Juntamente con su pareja el Sentinel-1b, son capaces de ofrecer una resolución temporal de exactamente 6 días en el ecuador.



*Figura 15. Representación gráfica del satélite Sentinel-1.  
@ESA. (2017). El programa Copérnico.*

Entre las principales aplicaciones de la constelación Sentinel-1 destacan:

*-Monitorización marítima:* Control visual del deshielo de los casquetes polares debido al calentamiento global. Ubicación marítima de los buques mercantes/militares. Detección de vertidos de fuel al mar. Control de los vientos dominantes en una zona oceánica para trazar rutas marítimas más eficientes.

*-Control de la superficie terrestre:* Determinación de zonas arboladas, seguimiento de incendios y distribución de la biomasa alrededor del mundo. Seguimiento de los cultivos, para poder observar su crecimiento y estimar la producción para abastecer a la población. Mapas de cambio urbano.

*- Control de emergencias:* Con la misión Sentinel-1 se pueden identificar y prevenir situaciones de emergencia tales como erupciones volcánicas, terremotos e inundaciones.

### **Misión Sentinel-2<sup>37,38,39</sup>**

Desarrollada por la ESA, la misión pretende desarrollar observaciones de la superficie terrestre para monitorizar la vegetación, el suelo y la cobertura de agua en la superficie y zonas costeras. La misión está compuesta por dos satélites idénticos. El Sentinel-2a (lanzado en junio de 2015) y el Sentinel-2b (lanzado en marzo 2017). Cada satélite tiene una resolución temporal de 10 días, combinándolos, la misión ha logrado una resolución temporal de 5 días, en contra de los 16 días que ofrece la misión Landsat 7 y los 26 del programa SPOT. La elevada resolución temporal en comparación de los demás programas permite obtener una visión global sin nubes cada 15 o 30 días.

Los satélites de la misión Sentinel-2, están dotados con el sensor MSI (Multispectral Instrument) compuesto por 13 bandas espectrales. Resulta de capital importancia nombrar y localizar las diferentes bandas, así como determinar su resolución espacial y amplitud en el espectro electromagnético. Siendo capaces de discriminarlas para seleccionar aquellas que resulten más interesantes para la realización de este trabajo.

- *Bandas de 10m de resolución espacial:* azul-B2 (490nm); verde-B3 (560nm); rojo-B4 (665nm); infrarrojo cercano-B8 (842nm).
- *Bandas de resolución espacial igual a 20m:* B5 (705nm), B6 (740nm), B7 (783nm), B8a (865nm), B11 (1610nm) y B12 (2190nm).
- *Bandas con 60m de resolución espacial:* B1 (443 nm), B9 (940 nm) y B10 (1375 nm).

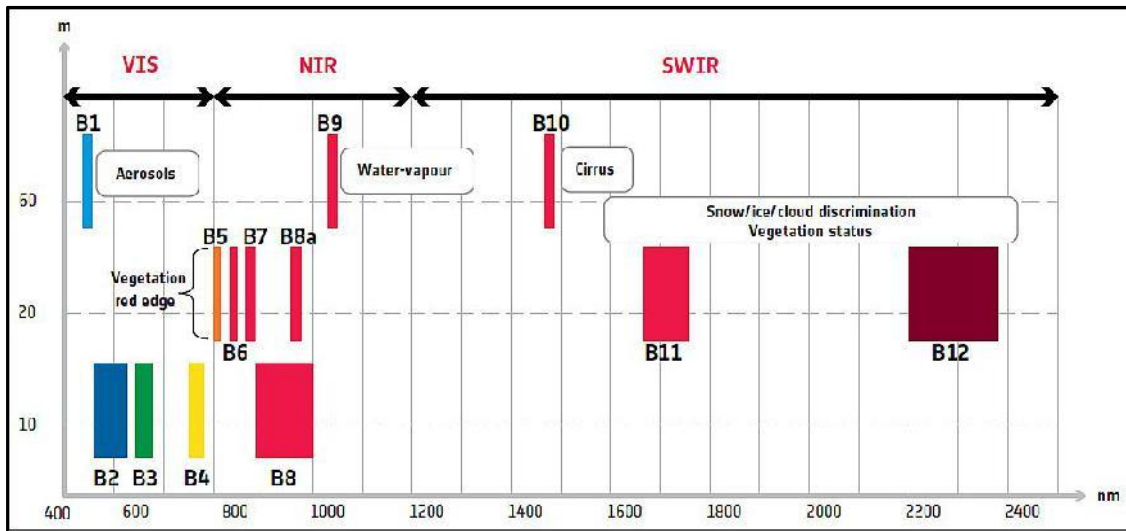
---

<sup>37</sup> Satellite Imaging Corporation. (2016). *Sentinel-2A Satellite Sensor*.

<sup>38</sup> Earth Observation Portal. (2016). *Copernicus: Sentinel-2. The Optical Imaging Mission for Land Services*

<sup>39</sup> European Space Agency. (2017). *Sentinel-2MSI Technical Guide*.

La *Figura 16* muestra gráficamente la distribución y amplitud de las 13 bandas del sensor MSI en el espectro electromagnético.



*Figura 16.* Localización de las 13 bandas del sensor MSI en el espectro electromagnético. Fuente: European Space Agency. (2017). Sentinel-2MSI Technical Guide

La ESA ha fijado la monitorización de la superficie terrestre, el servicio de gestión de emergencias y la integridad territorial como los objetivos fundamentales de la constelación Sentinel-2.

*-Monitorización de superficie terrestre:* Los satélites Sentinel-2 proveen información geográfica de la cubierta terrestre y de sus variables, como el estado de la vegetación o el seguimiento del ciclo del agua. Esta información sirve de apoyo a una gran variedad de aplicaciones, tales como la planificación del territorio, el control de bosques, la distribución del agua, agricultura... etc.

*-Servicio de gestión de emergencias:* A través del programa Copernicus EMS, se provee a todos los agentes involucrados en la gestión de desastre naturales, emergencias civiles y humanitarias, de información geoespacial precisa proporcionada por el sensor del satélite.

*-Seguridad territorial:* Permite aplicar el programa especial al servicio de la vigilancia de la seguridad territorial. De esta forma se puede alertar a los servicios del orden del traspaso de fronteras, la invasión marítima o dar soporte táctico a misiones de la UE en el extranjero.

### **Misión Sentinel-3<sup>40</sup>:**

La misión es de índole europea, programada para realizar observaciones terrestres para dar soporte del programa GMES, en aplicaciones oceánicas, terrestres, atmosféricas, de emergencia o de seguridad.

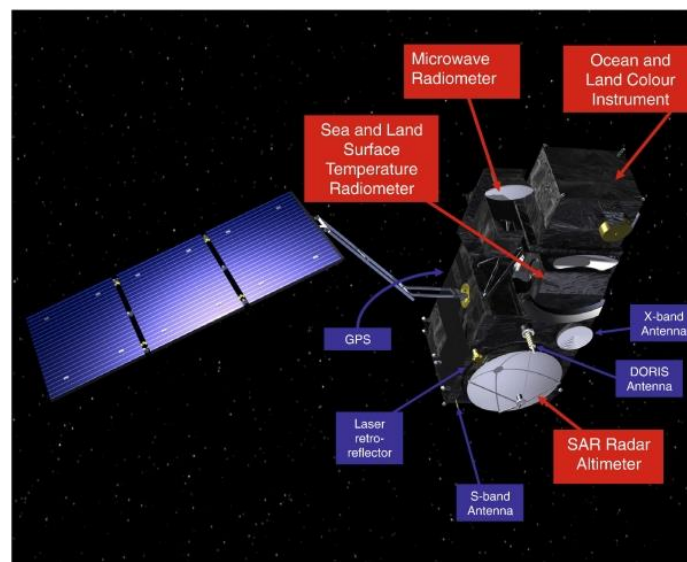
El objetivo principal del Sentinel-3 es obtener topografía de la superficie de los océanos, medir la temperatura superficial terrestre y oceánica además de obtener imágenes del color de la superficie con gran precisión. Con estas mediciones se pretende dar apoyo a los investigadores dedicados al cambio climático. Esta misión es una continuación de las misiones SPOT y ENVISAT, pero con una mejora en los sensores utilizados. El satélite lleva instalados 4 sensores a bordo para cumplir con los objetivos fijados. La representación gráfica de los sensores se encuentra en la *Figura 17*.

-OLCI: Ocean and Land Colour Instrument.

-SLSTR: Sea and Land Surface Instrument

-SRAL: SAR Radar Altimeter

-MWR: Microwave Radiometer.



*Figura 17. Representación de los sensores instalados en el Sentinel-3.  
Fuente: European Space Agency. (2017). Sentinel-3 Technical Guide*

<sup>40</sup> European Space Agency. (2017). *Introducing Sentinel-3*

Finalmente se presentan los usos para los que está siendo utilizado este satélite:

1. *Predicciones oceánicas:* Al ser capaz de determinar parámetros oceánicos importantes como la temperatura, se mejora la predicción meteorológica, permitiendo avisar con antelación de huracanes, inundaciones, tormentas... etc.
2. *Seguridad marítima:* Se monitorizan las condiciones oceánicas para la seguridad de los navíos, así como los derrames de fuel.
3. *Monitorización de zonas costeras:* Observación de las características de las aguas costeras para dar soporte a los especialistas medioambientales, permitiendo el seguimiento de procesos como los algal blooms, de los que trata este estudio.
4. *Seguimiento de los bloques de hielo oceánicos:* Controlando los periodos de hielos y deshielos de los casquetes polares, se mejora la seguridad naval, además se ayuda a comprender la bioquímica oceánica.
5. *Servicios atmosféricos:* Obtiene información sobre la temperatura de los océanos y la velocidad del viento para ser utilizada en modelos atmosféricos.

#### **Misión Sentinel-5 precursor<sup>41</sup>:**

La misión Sentinel-5 precursor, forma parte de una iniciativa entre la ESA y el gobierno de los Países Bajos, consistente en la puesta en órbita de un satélite que lleva a bordo el (TROPOMI) TROPOspheric Monitoring Instrument. Este sensor está programado para realizar observaciones en el espectro ultra-violeta (UV), el visible (VIS), el infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo medio (SWIR). Todo ello con el objetivo principal de realizar mediciones atmosféricas en relación a la calidad del aire, los efectos del cambio climático, así como la concentración de ozono y radiación ultravioleta. La resolución temporal de este satélite es de 16 días, realizando una órbita heliocéntrica a una altura de 824km.

---

<sup>41</sup> European Space Agency. (2017). *Sentinel-5P*

Como el objetivo de esta misión no son datos con detalle de la superficie terrestre, sino la observación atmosférica global, el área de barrido es de 2600km.

Como resumen de todo el programa Copernicus y su futura constelación de satélites Sentinel, en la *Tabla 1* se presenta un resumen con las principales características:

<b>Misión Copérnico</b>	<b>Lanzamiento</b>	<b>Sensores a bordo</b>	<b>Objetivo</b>
<b>Sentinel-1</b>	2014	C-SAR	Continuidad de registros del programa ENVISAT para la vigilancia de tierras y océanos
<b>Sentinel-2</b>	2014	MSI (Sensor multiespectral)	Obtención de información en alta resolución de toda la superficie terrestre, complementado al programa Landsat y SPOT
<b>Sentinel-3</b>	2016	OLCI (Visible), SLSTR (Radiómetro de temperatura en superficie oceánica), SRAL (Altimetro) y MRW (Radiómetro de Micro-Ondas).	Observación precisa del nivel del agua y la superficie emergida terrestre.
<b>Sentinel-4</b>	2019	UVN(Ultravioleta, Visible e Infrarrojo Cercano).	Monitorización de la calidad del aire, contenido en ozono, radiación solar y control climático
<b>Sentinel-5</b>	2020	UVNS(Ultravioleta, Visible, Infrarrojo Cercano y Lejano).	Medición de la composición atmosférica, nubes y aerosoles para aplicaciones climáticas
<b>Sentinel-5 (Precursor)</b>	2016	TROPOMI (Instrumento de medidas troposféricas)	Medición de la composición atmosférica, nubes y aerosoles para aplicaciones climáticas
<b>Sentinel-6</b>	Sin fecha		Mediciones altimétricas de precisión.

*Tabla 1. Principales características de los satélites pertenecientes al programa Copernicus. Elaboración propia.*



## II.5.2 Programa Landsat<sup>42,43</sup>:

Antes de 1972, la idea de utilizar datos provenientes de satélites para la vigilancia terrestre, la cartografía o la exploración era un acto visionario. La necesidad de conseguir estos objetivos es lo que da origen al programa Landsat, constituido en la actualidad por una serie de 7 misiones que están o han estado en órbita, todos ellos gestionados conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos.

El programa Landsat ha producido un cambio en la forma en la que entendemos el planeta Tierra. Esta serie de datos que se inició en 1972 es la más larga de la historia, contando actualmente con más de dos millones de imágenes de media resolución.

El programa se encuentra actualmente en su octava versión, la denominada: 'Landsat Data Continuity Mission' (LDCM) puesta en órbita el año 2013. Se trata del octavo satélite de observación de la serie Landsat que continuará el legado de las misiones anteriores. Aunque esta misión no estaba inicialmente prevista, se puso en marcha debido a un fallo crítico del Landsat-7 que lo dejó prácticamente inservible. La Figura 18 muestra el cronograma de las diferentes misiones Landsat.

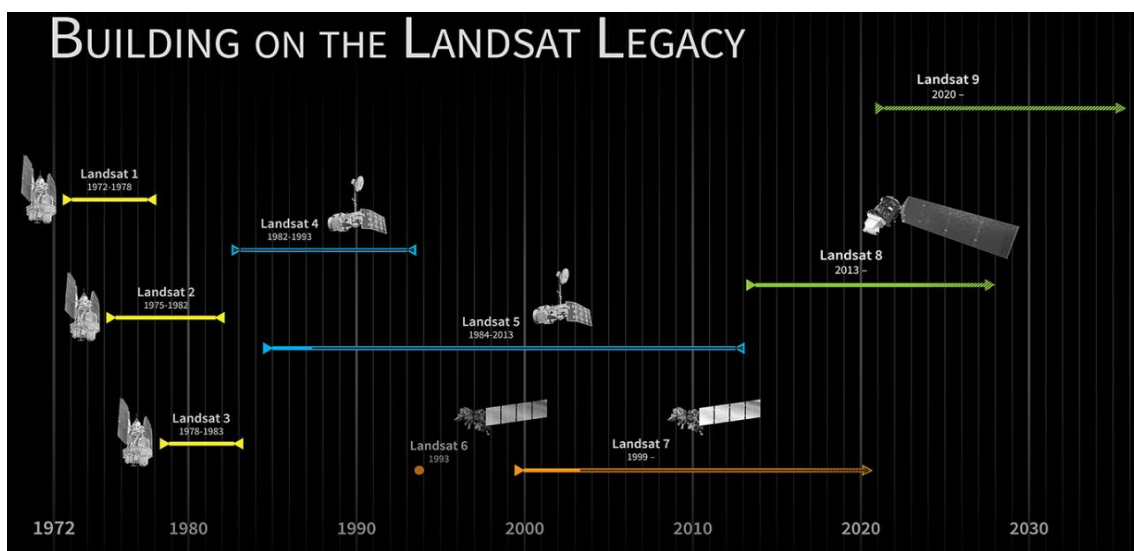


Figura 18. Cronograma del Programa Landsat. Fuente NASA.

<sup>42</sup> NASA. (2017). *Landsat 9*.

<sup>43</sup> Aeroterra. (2017). *Evolución del programa Landsat*.

Después de 45 años desde el lanzamiento del primer satélite, el programa Landsat fue pionero en ofrecer imágenes satélite corregidas tanto geométrica como radiométricamente de forma totalmente gratuita, sirviendo de precursor al programa Europeo Copérnico.

En la actualidad, se ha transferido de nuevo el control del programa al gobierno de los Estados Unidos, siendo el USGS (*United States Geological Survey*) el encargado del archivo y distribución de los datos, en colaboración con la NASA, que se encarga del desarrollo de los satélites y sensores y de la NOAA, responsable de la operación del satélite y del sistema terrestre.

El futuro del Programa Landsat radica actualmente en el nuevo Landsat 9, prevista su puesta en órbita para el año 2020. Este satélite continuará la misión de observación y monitorización terrestre de sus antecesores, pero contando con una mayor resolución.

### II.5.3. Programa Spot<sup>44,45</sup>:

Como ampliación del programa Landsat, se desarrolló por parte del gobierno de Francia, junto con la colaboración de Bélgica y Suecia, el programa SPOT (System Probatoire d'Observation de la Terre). El primer satélite de la serie fue lanzado el 22 de febrero de 1986 y el último el 30 de junio de 2014.

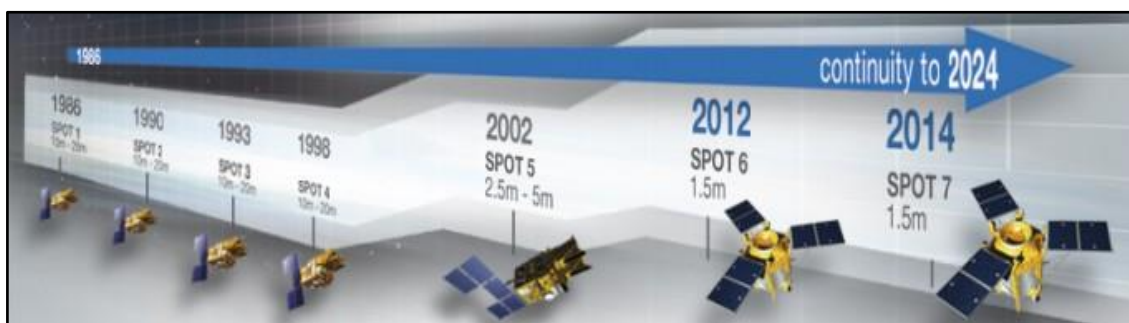


Figura 19. Familia de satélites SPOT. Cortesía de Airbus.

En la actualidad el programa se encuentra en la 5ª generación de satélites SPOT, correspondiendo al SPOT 6 y el SPOT 7. Estos cuentan con una resolución espacial de 1'5m en pancromático y espectro visible para disminuir hasta los 6m con el sensor multiespectral.

<sup>44</sup> Airbus, Defence and Space. (2017). *25 años de los satélites Spot*.

<sup>45</sup> Astrium an Airbus Company, (2016). Características técnicas.

Los nuevos satélites, además de contar con las ventajas tecnológicas actuales, cuentan con los atributos que hicieron famosos a los anteriores SPOT, caracterizados por su capacidad de mantener la órbita para obtener imágenes consecutivas de un lugar concreto y la posibilidad de giro del sensor, permitiendo variar su ángulo para obtener imágenes más precisas, disminuyendo las interferencias por pendientes y sombras.

Estas características los hacen ideales para el seguimiento de la evolución de la vegetación, la realización de mapas cartográficos a escala 1:25.000 y de representaciones 3d fuera de ámbitos urbanos, dónde no se requiere una gran exactitud.

La *Tabla 2* muestra las características principales de las misiones SPOT.

Satélite	Bandas Espectrales	Resolución Espacial	Resolución Espectral
<b>Spot 6 y 7</b>	P:pancromático	1'5m	0,45 - 0,74 $\mu\text{m}$
	B1:Azul		0,45 - 0,52 $\mu\text{m}$
	B2:Verde		0,53 - 0,59 $\mu\text{m}$
	B3:Rojo		0,62 - 0,69 $\mu\text{m}$
	B4: Infrarrojo Cercano	6m	0,78 - 0,89 $\mu\text{m}$
<b>Spot 5</b>	P:pancromático	2'5m o 5m	0,48 - 0,71 $\mu\text{m}$
	B1:Azul	10m	0,50 - 0,59 $\mu\text{m}$
	B2:Verde		0,61 - 0,68 $\mu\text{m}$
	B3:Rojo		0,78 - 0,89 $\mu\text{m}$
	B4: Infrarrojo Cercano	20m	1,58 - 1,75 $\mu\text{m}$
<b>Spot 4</b>	P:pancromático	10m	0,48 - 0,71 $\mu\text{m}$
	B1:Azul	20m	0,50 - 0,59 $\mu\text{m}$
	B2:Verde		0,61 - 0,68 $\mu\text{m}$
	B3:Rojo		0,78 - 0,89 $\mu\text{m}$
	B4: Infrarrojo Cercano		1,58 - 1,75 $\mu\text{m}$
<b>Spot 1,2 y 3</b>	P:pancromático	10m	0,51 - 0,73 $\mu\text{m}$
	B1:Azul	20m	0,50 - 0,59 $\mu\text{m}$
	B2:Verde		0,61 - 0,68 $\mu\text{m}$
	B3:Rojo		0,78 - 0,89 $\mu\text{m}$

*Tabla 2. Familia de satélites SPOT. Elaboración propia, cortesía de Airbus.*

#### II.5.4. Satélites comerciales<sup>46</sup>:

Este término designa una generación de satélites promovidos por consorcios privados, que pretenden impulsar la comercialización de imágenes satélite de muy alta resolución, introduciendo la teledetección a mercados hasta hace pocos años reservados a la fotografía aérea. (Chuvienco 2008).

Se trata de un negocio con un crecimiento próximo al 20% interanual en el cual los principales avances en esta tecnología corresponden a empresas Norte Americanas, que a través de sus portales, comercializan las imágenes satélite con una resolución espacial inferior a 0,5m. Se presenta a continuación un listado de los satélites comerciales más importantes hasta la fecha.

##### II.5.4.1. Ikonos<sup>47</sup>:

El satélite Ikonos se lanzó el 24 de septiembre de 1999 desde California (Estados Unidos). Los sensores pancromáticos y multiespectrales con los que está equipado son capaces de identificar objetos situados en la superficie terrestre de menos de un metro cuadrado.

Operado por la compañía *Digital Globe*, el sensor a bordo del satélite cuenta con una banda pancromática (0,45-0,90  $\mu\text{m}$ ) y resolución espacial de 1metro. Con 4m de resolución espacial se encuentran las tres bandas del espectro visible, azul (0,45-0,50  $\mu\text{m}$ ), verde (0,52-0,60  $\mu\text{m}$ ) y rojo (0,63-0,69  $\mu\text{m}$ ) junto con un canal de infrarrojo cercano (0,76-0,90  $\mu\text{m}$ ) que permite la monitorización del crecimiento de los cultivos.



Figura 20. Imagen de la ciudad de Barcelona 2003. (Satellite Image Corporation)

<sup>46</sup> Chuvienco, E. (2008). La observación de la Tierra desde el espacio. *Teledetección ambiental*.

<sup>47</sup> European Space Agency. (2017). *Ikonos*.

Entre otras características técnicas de importancia, la resolución temporal del satélite es de 3 días dependiendo de la latitud. La altura orbital del satélite está fijada en 681km. Cada imagen captada por el satélite Ikonos representa una superficie de 11x11km, dotada con una resolución radiométrica de 11bits, que permite una discriminación de tonalidades suficiente.

Aunque el satélite sigue operativo en órbita, debido a irregularidades en la precisión del satélite, la empresa ya no suministra más imágenes procedentes del Ikonos.

#### **II.5.4.2. Quickbird<sup>48</sup>:**

Se trata de un satélite comercial perteneciente a la compañía DigitalGlobe. Con su puesta en órbita en octubre de 2001, se convirtió en el satélite comercial de mayor resolución hasta la fecha. Actualmente y debido al avance tecnológico existen satélites con una mayor resolución.

El Quickbird está equipado con visión pancromática (450-900 nm) con una resolución espacial de 61cm. En las bandas multiespectrales (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano), la resolución disminuye hasta los 2,5m. El uso de las imágenes captadas por Quickbird son destinadas principalmente para aplicaciones de cartografía, urbanismo e investigación.

El 27 de enero de 2015, después de verificar que el satélite no captaba las imágenes con la calidad requerida por la empresa, fue sacado de su órbita causando su desintegración en la atmosfera. En su caída y tan solo a unos 300km del suelo, el satélite tomó su última imagen con una resolución de tan sólo 41cm.

#### **II.5.4.3. WorldView<sup>49,50</sup>:**

WorldView 1 y 2 son satélites ópticos de muy alta resolución pertenecientes a la compañía *DigitalGlobe*.

El primero de ellos, el WorldView-1, se lanzó el 18 de septiembre de 2007 esperándose un periodo operativo mínimo 11 años, hasta 2018. Describe una

---

<sup>48</sup> Satellite Imaging Corporation. (2017). *Quickbird Satellite Sensor*

<sup>49</sup> Satellite Imaging Corporation. (2017). *WorldView-3/4 Satellite Sensor*

<sup>50</sup> Digital Globe. (2017). *The largest constellation in the industry.*

órbita heliosíncrona a 496km de altitud con un periodo orbital de 94,6 minutos. Su resolución temporal es 1,7 días y está equipado de un sensor pancromático para la captación de imágenes. Este sensor es capaz de captar la superficie terrestre con una resolución de 0,5 metros, con un ancho de franja de 17,6 km.

La Tabla 3 muestra las características técnicas más importantes del satélite.

### Características del WorldView-1

Resolución espectral (nm)	Resolución espacial (m)	Ancho de exploración (km)	Resolución temporal (días)	Órbita	Periodo operación previsto
400-900 (pancromático)	0,50 en nadir, 0,59 no nadir	17,6km en nadir	1,7 días	496 km heliosíncrona	2007-2018

*Tabla 3. Características técnicas del satélite WorldView-1. Cortesía de Digital Globe*

Lanzado el 8 de octubre de 2009, el WorldView-2 se convierte en el satélite complemento al WorldView-1. El satélite se encuentra equipado con un sensor multiespectral, enfocado a la monitorización de la vegetación en la superficie terrestre. Con una resolución de 0,5 metros en la banda pancromática y de 1,85 metros en las 8 bandas que componen el sensor multiespectral, se trata de los satélites con mayor resolución en órbita actualmente destinado para fines civiles.

Al igual que su hermano, la resolución temporal data de 1,7 días y se encuentra orbitando a 496km de forma heliosíncrona. Las principales novedades de este satélite radican en sus bandas, contando con las 4 bandas típicas de los satélites multiespectrales siendo estas: azul, verde, rojo e infrarrojo cercano y cuatro bandas extra, explicadas a continuación:

- *Costera (400-450nm)*: Aprovechando la ventana atmosférica en esta región del espectro, esta banda se utiliza para la identificación y análisis de vegetación. También se emplea en estudios de batimetría ya que puede penetrar unos metros en el agua. Usos marginales de la misma radican en estudios de la dispersión atmosférica.

- *Amarilla (585-625nm)*: Su principal aplicación atañe directamente a la visualización de las imágenes, ya que permite una mejor visualización y distinción de las masas vegetales.
- *Límite Rojo (705-745nm)*: Al estar próximo al infrarrojo cercano, esta banda es utilizada para monitorear el estado vegetativo de las especies vegetales, ayudando a la identificación de ejemplares enfermos o sometidos a estrés hídrico.
- *Infrarrojo medio (860-1040 nm)*: Solapada a la región del infrarrojo cercano, esta nueva banda está destinada a la observación vegetal al tener una menor distorsión atmosférica.

Establecidos y analizados los diferentes usos de las bandas electromagnéticas en el WorldView-2, se puede determinar que el satélite está plenamente destinado al estudio de los recursos naturales, los procesos vegetativos y la concentración de agua que contienen las especies vegetales.

Actualmente el programa WorldView continúa con el lanzamiento del WorldView-3 el 13 de agosto de 2014 y el WorldView-4, lanzado al espacio el 11 de noviembre de 2016, teniendo ambos las mismas especificaciones técnicas. Al contar con dos satélites gemelos orbitando, el programa WorldView aumenta la resolución temporal al doble.

La resolución espacial de estos satélites es de 0,32m en la banda pancromática, de 1,24m respecto a las bandas multiespectrales y de 3,7m en el infrarrojo cercano. La Figura 21 muestra las resoluciones radiométricas de las bandas.

Dadas las elevadas resoluciones proporcionadas por los satélites WorldView-3 y WorldView-4, su principal campo de aplicación radica en la defensa nacional y en aplicaciones militares. No obstante, cuando el coste de adquisición no es un problema, sus imágenes también son empleadas para la exploración minera, la detección de depósitos petrolíferos, la clasificación del terreno, monitorización de especies vegetales, seguimientos de desastres naturales... etc.

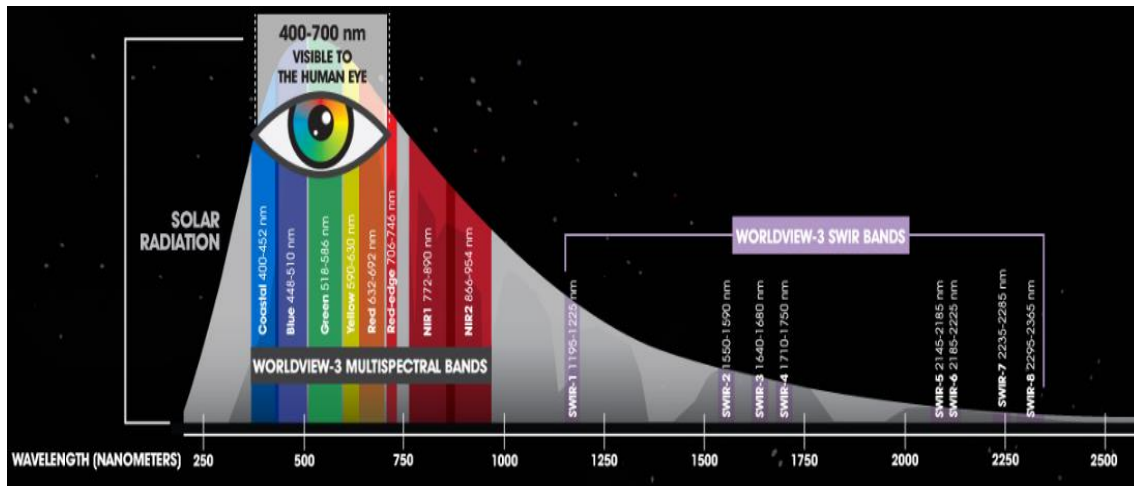


Figura 21. Resolución radiométrica de los satélites WorldView-3 y WorldView-4. Cortesía de Satellite Imaging.

#### II.5.4.4. Constelación Pleiades<sup>51,52</sup>:

Pleiades se trata de una constelación de satélites de muy alta resolución óptica, destinada a la observación de la superficie terrestre desarrollada por el CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) con un doble uso: militar y civil.

La puesta en órbita del primer satélite tuvo lugar un diciembre de 2011, mientras que el lanzamiento del Pleiades-1b se realizó justo un año después.

En la actualidad se cuenta con dos satélites con la misma órbita e idénticos sensores para lograr una resolución temporal de 1 día. Las imágenes obtenidas por los Pleiades, son distribuidas por Spot Image, al igual que las obtenidas de los satélites Spot 6 y 7. De hecho, el programa Pleiades complementa al Spot, que con una constelación de cuatro satélites, cuenta con una resolución temporal de 12h. La principal bondad de los Pleiades es la capacidad que tienen los satélites para adquirir pares de imágenes estereoscópicas para capturar y representar elementos 3D, permitiendo generar modelos digitales de elevación.

Respecto a las características técnicas de la constelación, los satélites ofrecen una resolución espacial de 0,5m en la banda pancromática y de 2 metros en las bandas multiespectrales (4 bandas en el espectro visible e infrarrojo cercano). El ancho de barrido es de 20km, con una órbita casi circular heliosíncrona, a una altura de 694km.

<sup>51</sup> T. Fernández de Sevilla. (2015). *La constelación de satélites Pleiades*.

<sup>52</sup> Airbus, Defence and Space. (2017). *Pleiades - Imágenes satelitales de Muy Alta resolución*



En la Tabla 4, se representan las principales características técnicas de los satélites Pleiades.

**Características de los satélites Pleiades:**

Modo	Canal	Banda Espectral
Multiespectral	1 (azul)	430-550 nm
	2 (verde)	490-610 nm
	3 (rojo)	600-720 nm
	4 (infrarrojo cercano)	750-950 nm
Pancromático	P (pancromático)	480-830 nm

*Tabla 4. Bandas espectrales de la constelación Pleiades. Fragmento de Info terra.*

Entre las principales aplicaciones a las que está destinado el programa, destaca el obtener cartografía 3D a gran escala gracias a la capacidad estereoscópica del satélite, para posteriormente generar modelos de elevación de alta densidad y precisión. Los modelos pueden ser aplicados para la generación de cartografía básica a escala 1:50.000 o en proyectos específicos de ingeniería civil en cualquier parte de la tierra.

Adicionalmente, siguiendo procedimientos rigurosos de orientación y generación de ortoimágenes, es posible abarcar grandes extensiones de terreno y emplear los datos obtenidos para aplicaciones más exigentes como puede ser el PNOA (resolución espacial de 50cm). Por lo tanto, los satélites Pleiades están especialmente dedicados a la representación del territorio.

**II.5.5. Satélites meteorológicos<sup>53,54</sup>:**

Dirigidos a la monitorización atmosférica, los satélites meteorológicos se desarrollan a partir de 1960, con el lanzamiento del satélite Tiros-1. Aunque estuvo pocos días en órbita y apenas captó un millar de imágenes, sentó las bases para las siguientes misiones meteorológicas.

Con la excepción del NOAA y Nimbus, la mayor parte de los satélites meteorológicos orbitan en modo geoestacionario, estando diseñados para

<sup>53</sup> Chuvieco, E. (2008). La observación de la Tierra desde el espacio. *Teledetección ambiental*.

<sup>54</sup> Ministerio de educación, cultura y deporte. (2006). *Satélites meteorológicos*.

realizar el seguimiento de fenómenos meteorológicos que abarcan grandes extensiones de superficie.

Este es el caso de los satélites Meteosat, una constelación de 5 satélites idénticos dispuestos en anillo alrededor del ecuador. Son capaces de captar y transmitir una nueva imagen global cada 30min independientemente de las condiciones meteorológicas. Los 5 satélites que componen la serie Meteosat son los siguientes:

- Meteosat desarrollado por la Agencia Espacial Europea.
- GMS puesto en órbita por el gobierno de Japón.
- INSAT de iniciativa india.
- Los satélites GOES E y GOES W por iniciativa del gobierno de los Estados Unidos.

Debido la importancia de los satélites meteorológicos en la actualidad, se presenta un breve resumen de los dos programas más significativos a nivel mundial.

#### **II.5.5.1. Programa NOAA:**

La National Oceanographic and Atmospheric Administration de los Estados Unidos puso en órbita al primero de la serie de satélites NOAA en 1970. Los satélites del programa se caracterizan por seguir órbitas heliosíncronas (a diferencia de la mayoría de satélites meteorológicos que son geoestacionarias), a una altura de 850km sobre la Tierra. Al seguir una órbita heliosíncrona, los satélites NOAA son capaces de captar la totalidad de la superficie terrestre en un período de 24h.

Los NOAA que siguen en órbita, están equipados con sensores avanzados de muy alta resolución radiométrica los AVHRR, provistos de 5 canales. El sensor proporciona imágenes con una resolución espacial de 1,1km y una resolución radiométrica de 10 bit.

El AVHRR es un explorador de barrido de banda ancha, que permite con sus 5 canales (azul, verde, rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo lejano) confeccionar mapas de vegetación y monitorizar el desarrollo de nubes. Además, capta otros parámetros ambientales como la temperatura y la humedad del terreno.

**Parámetros del sensor AVHRR:**

Sensor AVHRR			
Canal	Resolución espacial	Resolución espectral	Uso de la banda
1	1,09km	580-680nm	Mapeo de nubosidad y superficie terrestre
2	1,09km	725-1000nm.	Paso de agua a tierra firme.
3A	1,09km	1580-1640nm	Detección de nieve y hielo.
3B	1,09km	3550-3930nm	Mapeo nocturno de la nubosidad, temperatura del océano.
4	1,09km	10300-11300nm	Mapeo nocturno de la nubosidad, temperatura del océano.
6	1,09km	11500-12500nm	Temperatura de la superficie de los océanos.

*Tabla 5. Información del sensor AVHRR. Fuente NOAA.*

**II.5.5.2. Serie Meteosat:**

Compuesta de 7 misiones desde 1977 hasta 1997, la serie Meteosat ha sido referente mundial en cuanto a observación atmosférica se refiere. Estos satélites producen cada media hora imágenes actualizadas de las condiciones meteorológicas globales, exceptuando las regiones polares.

El Meteosat gira alrededor de su eje a un ritmo de 100 revoluciones por minuto, trazando una órbita geoestacionaria. En cada giro, escanea una franja de 5km de ancho de este a oeste. Con cada franja, el espejo del escáner se ajusta para que una nueva franja pueda ser captada por el sensor. El escaneo se realiza en tres canales: visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico.

Aunque los satélite Meteosat sentaron la base para la colaboración entre países en materia de control ambiental y atmosférico, actualmente el programa original se encuentra desfasado, denominándose la evolución del programa como Meteosat de segunda generación.

-Meteosat de segunda generación<sup>55</sup>:

Esta nueva misión, continuación de la misión original, está compuesta por dos satélites idénticos, que ofrecen información meteorológica detallada de Europa, África y partes del océano Atlántico e Indico cada 15 minutos. La existencia de 2 satélites idénticos es simplemente por razones de seguridad, ya que caso de fallo en uno de ellos el otro puede proseguir con la toma de datos. Actualmente no se concibe un periodo de tiempo sin la obtención de imágenes meteorológicas.

El primer Meteosat de segunda generación (MSG-1) fue puesto en órbita el 28 de agosto de 2002, seguido por su hermano gemelo el (MSG-2) lanzado el 5 de julio de 2012. La última puesta en órbita de un satélite Meteosat data de 15 de julio de 2015 permaneciendo estacionario en órbita terrestre hasta que decida activarse en caso de fallo de alguno de sus hermanos.

Los Meteosats de segunda generación están equipados con tecnología puntera en cuanto a seguimiento atmosférico se refiere, llevando a bordo el sensor SEVIRI, un sensor multispectral que proporciona información a través de sus 12 bandas. A bordo también viaja el sensor ERB (Earth's Radiation Budget), encargado de monitorizar la radiación emitida desde la Tierra, siendo esta la suma de la energía reflejada proveniente del Sol y la energía propia emitida por la Tierra. El ERB permite identificar las nubes con gran crecimiento y que dan lugar a fuertes tormentas.

La nueva generación de Meteosat ha obtenido información clave para la mejora de las predicciones meteorológicas y consecuentemente su aplicación en el campo de la hidrología, la agricultura o el medio ambiente.



Figura 22. Imagen tomada por el satélite Meteosat. @ESA

---

<sup>55</sup> European Space Agency. (2017). *Meteosat de Segunda Generación*.

## **II.6. Ventajas e inconvenientes de la observación espacial respecto la fotogrametría<sup>56,57</sup>.**

La teledetección desde satélite cuenta con numerosas aplicaciones, gracias a las ventajas que ofrece frente a otros medios de observación más convencionales, como la fotografía aérea o los trabajos de campo, aunque más que sustituirlos los complementa adecuadamente. (Chuvienco, 2008).

Entre las ventajas más importantes de la teledetección por satélite, destacamos las siguientes:

### 1. Cobertura global y exhaustiva de la superficie terrestre.

La teledetección es una técnica que permite la obtención de imágenes de una misma zona en diferentes periodos de tiempo. Las imágenes, al estar captadas desde la misma altura e idéntico sensor permiten crear unas condiciones idóneas para realizar una comparación entre ellas y finalmente identificar y evaluar los cambios que se han sucedido en la región.

Puesto que no requieren interacción física con el medio a estudiar, son ideales para tomar datos de zonas con difícil acceso, así como el estudio de territorio hostil sin necesidad de invadir su espacio aéreo.

### 2. Perspectiva panorámica.

Al encontrarse orbitando a una elevada altura, los satélites son capaces de captar en cada barrido grandes extensiones de terreno, del orden de los 30000km<sup>2</sup> o superiores, permitiendo no solamente observar una pequeña fracción de territorio, sino evaluarlo al completo. Esta función es especialmente útil para detectar accidentes geográficos además de evaluar y realizar un seguimiento de la cobertura nubosa.

---

<sup>56</sup> Chuvienco, E. (2008). La observación de la Tierra desde el espacio. *Teledetección ambiental*.

<sup>57</sup> I. Otero; A. Ezquerro; R. Rodríguez-Solano; L. Martín. (2012). *Fotogrametría*.

### 3. Observación multiescala no destructiva.

Los actuales sistemas de teledetección proporcionan un amplio abanico de resoluciones, desde centímetros hasta kilómetros, determinando el uso al que van a ser destinados.

Resultan útiles tanto para la medición de rendimientos de cultivo como para seguimientos atmosféricos. Además, permiten obtener información del entorno sin alterarlo, lo que presenta una gran ventaja respecto a los métodos convencionales.

### 4. Información sobre regiones no visibles del espectro.

Los satélites actuales están equipados con sensores capaces de discriminar entre las diferentes frecuencias de la radiación electromagnética, constituyendo las bandas de observación.

Como cada elemento de la superficie terrestre refleja de una forma característica la energía electromagnética (firma espectral), el hecho que el sensor identifique más allá del espectro visible y el infrarrojo cercano, permite una mayor discriminación de elementos, así como un mayor conocimiento de su estado.

Las bandas que captan longitudes de onda mayores a la del infrarrojo cercano son útiles para determinar la temperatura de los océanos, ver las corrientes marítimas y detectar focos de calor provenientes de la superficie terrestre.

### 5. Cobertura repetitiva.

Al mantener los satélites una órbita estable alrededor de la Tierra, permiten observar una misma zona en condiciones comparables de observación, cumpliendo los requerimientos necesarios para realizar un análisis multitemporal de la zona de estudio. Esto convierte a la teledetección en una técnica ideal para monitorizar procesos ambientales de desertización, evolución de la deforestación y evolución de la vegetación en medios acuáticos.

## 6. Formato digital.

Respecto al inicio de la teledetección espacial cuando los datos se obtenían de manera analógica, representa una revolución a la hora de transmitir la información, permitiendo obtener de forma instantánea la información desde el espacio hasta superficie terrestre si se cuenta con una antena receptora.

El formato digital permite analizar las imágenes mediante ordenadores e integrarla en sistemas de información geográfica que lo complementan. Destaca su uso en el campo del análisis 3D, dónde una imagen se puede visualizar desde diferentes puntos de vista para detectar con mayor precisión y rapidez variaciones en la cubierta terrestre.

A la vista de los seis apartados anteriores, se establece la teledetección espacial como una técnica no sustituyente a otras como la fotometría, sino complementaria a esta debido a las limitaciones que aún posee actualmente.

La mayor resolución de la fotometría frente a la observación espacial, la hace más apta en la realización de estudios específicos dónde se requiere detalle y gran exactitud. Al instalar cámaras multispectrales en aviones, se logra analizar toda la amplitud del espectro al igual que los sensores instalados a bordo de satélites.

Otro punto dónde puede resultar más ventajosa la fotometría reside en la capacidad de programar la adquisición de imágenes en condiciones climáticas favorables, cuando la cobertura nubosa no es un impedimento.

En contrapartida, el encargo de un vuelo fotométrico resulta una opción sujeta a costo. Sin embargo, la mayoría de satélites de teledetección con una resolución aceptable no lo es. Este fenómeno se agrava cuando se requiere realizar un estudio multitemporal de una zona en concreto, requiriendo de varios vuelos para obtener las imágenes en fechas definidas.

## II.7. Principales aplicaciones de la teledetección<sup>58,59</sup>.

En este apartado no se pretende numerar todas las aplicaciones de la teledetección, ya que son innumerables, sino que se pretende nombrar aquellas, que por su relevancia y amplitud de uso constituyen las más importantes a día de hoy. Entre los tópicos establecidos por la Agencia Espacial Europea, destacan la agricultura, el ciclo del agua, la atmosfera, el seguimiento de hielos... etc. Todos ellos para entender y estudiar el mundo cambiante del que formamos parte: La Tierra.

- **Estudios agrarios.** Alrededor del 37% de la superficie terrestre está empleada hoy en día en usos agrícolas, correspondiendo un 11% a cultivos y el porcentaje restante a pastos. Con más de 7 billones de personas que alimentar, las demandas puestas sobre la agricultura son cada vez mayores, más teniendo en cuenta que las tierras de cultivo actuales están sometidas a sequías, erosión del suelo y pérdida de nutrientes. (ESA AGENCY 2013).

En la actualidad, las imágenes satelitales están siendo combinadas con programas de información geográfica (SIG) para realizar estudios agrícolas, estando el principal uso dedicado al monitoreo del estado de los cultivos. Desde la producción esperada hasta el estado de salud vegetal, pasando por el estado de madurez, determinando con celeridad si se va a dar alguna situación de escasez alimentaria.

Dependiendo del tipo de cultivo, el análisis de las imágenes tomadas por satélite, puede determinar el empleo de fertilizante más adecuado e indicar los requerimientos hídricos del cultivo, estableciendo un nuevo concepto de cultivo, más ecológico y responsable medioambientalmente.

---

<sup>58</sup> Ministerio de educación, cultura y deporte. (2006). *Aplicaciones de la Teledetección*.

<sup>59</sup> Copernicus, Europe's eyes on Earth. (2017). *Copernicus In Brief*.





*Figura 23. Imagen ASTER tomada el 2002 sobre la frontera de EEUU con México. Fuente RTNA.*

Finalmente, el análisis de imágenes satélite mediante GIS es aplicable a la monitorización del estado de masas forestales, responsables de la captación del dióxido de carbono.

- **Visión global atmosférica.** La atmosfera proporciona a la humanidad el aire que respira y protege a la vida de las radiaciones nocivas provenientes del espacio. Desafortunadamente, a causa de las actividades llevadas a cabo por el ser humano, la composición atmosférica está cambiando, aumentando de forma preocupante los niveles de dióxido de carbono, nitrógeno, metano y diferentes tipos de aerosoles. El cambio en la composición es el causante principal del Efecto Invernadero, la aparición de lluvia ácida, la destrucción de la capa de ozono y otros que afectan directamente a la salud de las personas.

Los sensores situados a bordo de satélites son capaces de percibir cambios minúsculos en la composición atmosférica del orden de partes por billón (ppb), ayudando a diseñar mapas en tres dimensiones que permiten una fácil interpretación del estado atmosférico.

- **Estudios geológicos.** La vigilancia espacial demuestra que el suelo terrestre no es tan sólido como parece. La corteza terrestre está

continuamente en movimiento, debido a una lenta pero continua deriva continental que ocasionalmente se manifiesta en forma de volcanes y terremotos.

La observación de la Tierra desde centenares de kilómetros de distancia, ha permitido detectar a una escala de sub-centímetros, la variación de altitud de grandes extensiones de terreno, que de otro modo no habrían sido detectadas.

Mediante la combinación de múltiples imágenes con la misma localización se detectan las minúsculas variaciones del terreno que han ocurrido entre ellas. Además, la observación espacial es un método muy fiable para la detección de volcanes activos que se creían extintos. En el campo de los estudios geológicos, la teledetección también se emplea en la búsqueda de recursos minerales, comparando e identificando características del tipo de yacimiento que se quiere encontrar.

- **Ciclo del agua.** Actualmente, uno de los principios a la hora de buscar vida en un planeta es encontrar agua, ya que toda la vida depende de ella. Es encontrada de diversas formas, ya sea en ríos o lagos, albergando una gran biodiversidad y representando una enorme dependencia de los poblados situados a sus orillas. Por estos motivos, las masas de agua tienen que requerir un exhaustivo estudio para caracterizar y salvaguardar sus propiedades e impedir procesos y vertidos que pongan en problemas su sostenibilidad.

Las masas acuáticas son monitorizadas desde el espacio, mediante altímetros para determinar su nivel o bien a través de instrumentos ópticos, tales como los espectrómetros. Estos últimos son capaces de determinar cambios en la calidad del agua, aplicando algoritmos a la coloración que ofrece para descifrar los contaminantes que hay en ella, determinar los sedimentos en suspensión y la concentración de fitoplancton. Los sensores a bordo de los satélites son capaces de obtener información sobre la humedad del suelo. La humedad del terreno, es un factor fundamental para alertar de riesgos de sequía, siendo muy importante para realizar predicciones meteorológicas de una zona.

- **Variación de la superficie terrestre.** La superficie terrestre representa el terreno más variado de todo el sistema solar, siendo transformado gradualmente por agentes geológicos, actividad biológica e interacción atmosférica. Actualmente, la evolución continúa ayudada por la humanidad: los desiertos avanzan, los bosques retroceden y las ciudades se expanden.

Los instrumentos a bordo de los satélites permiten hacer una clasificación de la superficie terrestre para identificar sus cambios. La teledetección se muestra como una herramienta útil para monitorizar signos de erosión o identificar diferentes tipos de albedo que logran distinguir las litologías terrestres. Mediante el empleo de altímetros, se realizan mapas tridimensionales que permiten representar la superficie terrestre y elaborar mapas cartográficos.

- **Visión de costas y océanos.** El agua cubre el 70% de la superficie terrestre. Los océanos son la máquina del clima tal y como se entiende a día de hoy, captando aproximadamente la mitad de la energía solar y distribuyéndola hacia los polos mediante corrientes y vientos marinos.

El agua de los océanos proporciona gran parte del oxígeno mundial, liberando el fitoplancton que en él reside más del 50% del oxígeno producido, aunque únicamente represente el 1% del peso de la biomasa en la tierra. Los océanos están actuando como 'sumideros' de dióxido de carbono, atrapándolo y fijándolo entre sus aguas, impidiendo de esta forma un calentamiento mayor de la tierra.

Por su parte, el 60% de la humanidad vive a menos de 60km de mares u océanos, que proporcionan comida y recursos económicos facilitando los transportes de mercancías mediante buques mercantes.

La visión de los mares y océanos mediante satélite, permite aumentar la seguridad y diseñar rutas más eficientes a favor de las corrientes para el transporte marítimo, así como determinar patrones habituales de vientos. Además, los sensores multiespectrales como el MERIS a bordo del Envisat, son capaces de distinguir el fitoplancton y los niveles de

contaminación con una mínima variación de color; mientras que el AATRS determina la evolución del nivel mar y establece la temperatura de la superficie marina.

La *Figura 24* muestra la variación de coloración del Mar Negro, afectado por la eutrofización de sus aguas en contraste a las del Mar Mediterráneo.



*Figura 24. Imagen SEaWIF adquirida el 13 de junio del 2000.  
Fuente: Teledetección y Medio Ambiente.*

- **Seguimiento de hielo y nieve.** Una décima parte de la superficie terrestre está permanentemente cubierta por el hielo o glaciares, pero el dominio de la criósfera -superficie terrestre capaz de albergar hielos o nieves cuasi permanentes- se extiende tres veces más.

La criósfera es un importante regulador térmico global, su elevado albedo permite disipar la energía proveniente del Sol fuera de la atmósfera y su presencia influye en los vientos y corrientes marinas. Recientes estudios demuestran que la criósfera es especialmente sensible a los efectos del calentamiento global.

Los satélites dotados con equipos radar puestos en órbita alrededor de la tierra, permiten una identificación y posterior cuantificación de la superficie cubierta por los hielos, determinando la variación de espesor del mismo.

- **Desastres naturales.** Con los satélites, se trata de determinar si el número de desastres naturales está en aumento o si la humanidad, interconectada entre ella y viviendo en mayores concentraciones está siendo más vulnerable a los mismos fenómenos.

Actualmente, los satélites destinados a la teledetección, se han erigido como una fuente de información rápida, precisa y veraz para los equipos de emergencia que trabajan sobre el terreno en ayuda de los damnificados por un desastre natural.

La información correspondiente a desastres naturales ha sido compartida de manera solidaria durante años, pero en el 2000, tuvo lugar un acuerdo entre las principales agencias espaciales para dar prioridad de observación a las zonas afectadas por algún tipo de desastre natural, poniendo a disposición de los servicios de emergencia toda la información disponible del desastre proveniente de los diferentes satélites.

Fruto de la colaboración, nace la posibilidad de recopilar información de distintas plataformas y sensores, empleándose los de baja y media resolución para evaluar globalmente los impactos y los de alta resolución para determinar el daño causado sobre los edificios e infraestructuras.

# Capítulo III

## Análisis digital de imágenes

En una imagen digital, el territorio observado se divide en una serie de parcelas, habitualmente cuadradas, que corresponden al área instantánea observada en cada momento por el sensor. Estas parcelas constituyen la unidad mínima de información de la imagen y se denominan píxeles. En otras palabras, podemos identificar el píxel como cada uno de los pequeños cuadrados que forman una imagen, visibles cuando esta se amplia. El valor número que codifica cada píxel se denomina nivel digital (ND). (Chuvienco, 2008).

En este apartado dedicado al análisis digital de imágenes, se evalúan las principales operaciones que afectan al nivel digital del píxel, siendo el caso de las correcciones y los diferentes realces existentes, para discriminar visualmente de una forma más sencilla aquellas partes de una imagen que más nos interesan.

### III.1. Tipos de correcciones sobre la imagen<sup>60.61</sup>.

Con este nombre se indican aquellos procesos que tienden a eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, ya sea en su localización o radiometría de los píxeles que la componen. Estas operaciones tienden a disponer los datos en la forma más cercana posible a una adquisición idónea. (Chuvienco, 2008).

Las correcciones están dirigidas a realizar una homogenización de la imagen y disminuir o eliminar las interferencias producidas por un funcionamiento anormal del sensor. Las fuentes más habituales de error en una imagen corresponden a:

- Los producidos por los sensores.
- Los producidos por la interferencia atmosférica.
- Los producidos por el terreno.

---

<sup>60</sup> Chuvienco, E. (2008). La observación de la Tierra desde el espacio. *Teledetección ambiental*.

<sup>61</sup> Juan Gregorio Rejas. (2008). *Tratamiento digital previo de las imágenes*.

Los errores de adquisición corresponden al tipo radiométrico cuando afectan al nivel digital (ND) de la imagen, siendo causados principalmente por la instrumentación utilizada y la interferencia atmosférica.

Se clasifican como errores geométricos aquellos que afectan a la medida de la imagen, siendo producidos por la curvatura terrestre o por el desplazamiento descontrolado de la órbita de la plataforma en la que se hospeda el sensor.

A continuación, se exponen las principales distorsiones que afectan la calidad de las imágenes y sus agentes causantes, que obligan al empleo de las correcciones anteriormente mencionadas.

### **III.1.1. Distorsión radiométrica<sup>62</sup>.**

Es causada por aquellos procesos que alteran la medida de los valores de brillo que se representan en el píxel. La distorsión radiométrica puede afectar a cada banda de los sensores multiespectrales, causando que cada una de ellas refleje un valor que no corresponde con la realidad.

También puede manifestarse únicamente en el valor de un píxel singular, propiciando que este sea posteriormente corregido con el valor de sus vecinos.

Ambos tipos de errores son resultado de la combinación o implicación de la instrumentación del satélite, las distorsiones que presentan la atmósfera o de la reflectancia del elemento captado. En la actualidad se distinguen principalmente dos fuentes de distorsiones radiométricas:

#### 1. Efecto atmosférico en la radiación.

Las interacciones de la radiación solar directa y de la radiación reflejada por la superficie con los componentes atmosféricos, interfieren en el proceso de captación del sensor.

Las nubes, los gases atmosféricos y los aerosoles son los encargados de dispersar y absorber la luz solar, modulando en última instancia la radiación reflejada por el objeto observado por el sensor, bien impidiendo directamente su

---

<sup>62</sup> Universidad de Murcia. (2012). *Correcciones a las imágenes satélite*.

visión o aumentado o disminuyendo su reflectancia. El efecto atmosférico puede afectar las siguientes variables:

- La longitud de onda de la radiación captada por el sensor.
- La reflectividad de la superficie terrestre y su variabilidad.
- Los campos de aplicación de la teledetección.
- Las características del sensor a utilizar.

La atmosfera es un medio en constante cambio, siendo necesario adaptar las operaciones de corrección pertinentes a cada situación. De este modo se asegura la comparación efectiva de dos imágenes de la misma zona y distinta fecha con total garantía.

### 2. Distorsiones radiométricas provocadas por el sensor.

El sensor es el principal causante de las distorsiones radiométricas por banda de imagen o entre bandas. Al ser causados por el sensor, este tipo de errores se los clasifica como sistemáticos, ya que se corrigen mediante la calibración del instrumento. Cada imagen satélite ofrece los parámetros de offset, de manera que el operario es capaz de determinar y corregir este tipo de error.

### **III.1.2. Corrección radiométrica<sup>63</sup>.**

En diferencia con la corrección geométrica, en donde todas las fuentes de error son rectificadas conjuntamente, los procesos de corrección radiométrica tienen que ser específicos para el tipo de distorsión que los ha provocado. Así pues se distinguen las siguientes técnicas de corrección, cada una de ellas destinadas a un error en concreto:

---

<sup>63</sup> Juan Gregorio Rejas. (2008). *Tratamiento digital previo de las imágenes*.



### III.1.2.1. Corrección radiométrica del bandeo, producida por desajustes en el calibrado de los detectores:

Se consigue eliminar este efecto desplazando los histogramas parciales de la imagen, de forma que obtengamos el mismo promedio y desviación típica una vez aplicada la corrección.

La fórmula de la corrección corresponde con la siguiente expresión, (Ec.1):

$$ND'_{i,j} = akND_{i,j} + bk$$

Dónde  $ND'_{i,j}$  es el nivel digital ya corregido.

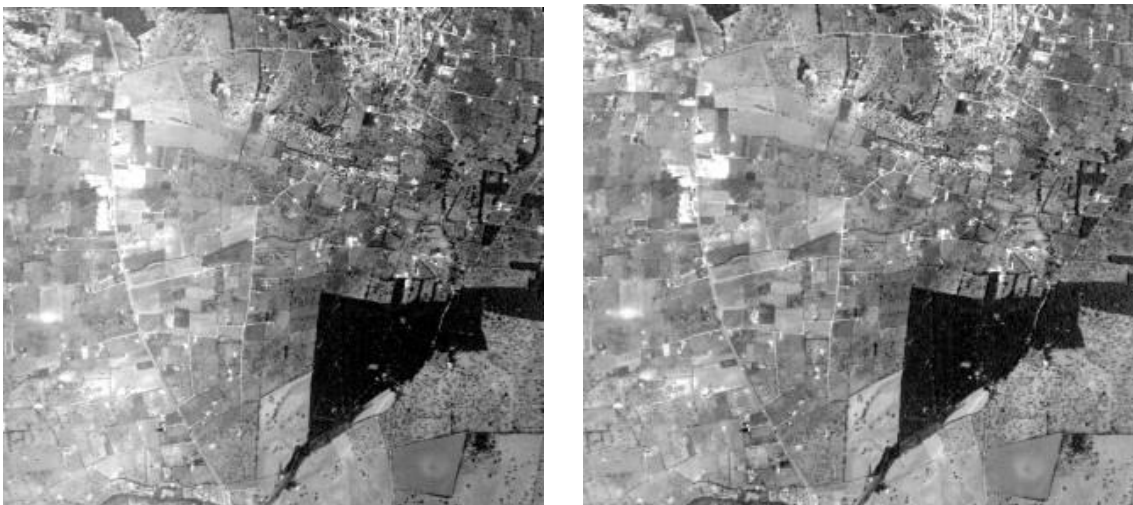
$ND_{i,j}$  corresponde al nivel digital a corregir.

$Bk$  y  $ak$  son los coeficientes utilizados para el ajuste.

### III.1.2.2. Corrección de píxeles y líneas perdidas:

Se realiza cuando, por un funcionamiento anormal del sensor, este no logra transmitir el nivel digital a un píxel o grupo de ellos. Para solucionar el problema existen las siguientes soluciones:

- Asignar el ND del píxel vecino de las líneas continuas a este.
- Calcular el valor promedio de los píxeles vecinos y asignar el valor al píxel que falta.
- Asignar el ND de una banda correlacionada con la defectuosa.



*Figura 25. Comparativa entre dos imágenes de la misma zona. La imagen situada a la izquierda no presenta corrección radiométrica. La de la derecha es el resultado una vez aplicada la corrección. Fuente: EOI*

### III.1.2.3. Correcciones atmosféricas<sup>64</sup>.

Para utilizar la información radiométrica de las imágenes, es necesario convertir la reflectividad aparente (TOA) a reflectividad de la superficie terrestre. El proceso necesario para esa conversión se llama corrección atmosférica.

La influencia atmosférica no afecta por igual a los dos componentes del cálculo de la reflectividad. El flujo de energía ascendente es distinto al descendente, dado que el espesor atmosférico que atraviesan es distinto.

Además, se tiene que considerar la radiación solar directa y la difusa procedente de objetos vecinos. En definitiva, la reflectividad que capta el sensor no es igual a la emitida por la superficie.

(Gilabert, 1994)<sup>65</sup>, propone la siguiente ecuación para determinar correctamente la radiación reflejada por la superficie, no la influida por la atmosférica. (Ec.2)

$$L_{sen,k} = L_{su,k} \tau_{k,o} + L_{a,k}$$

Dónde  $L_{su,k}$  es la radiancia emitida por la superficie.

$\tau_{k,o}$  se trata de la transmisividad de la atmosfera para el flujo ascendente.

$L_{a,k}$  es la radiancia aportada por la dispersión atmosférica.

Para lograr la reflectividad real de la superficie terrestre, se necesita remover los efectos atmosféricos, suponiendo como demuestra la fórmula anterior propuesta por Gilabert, estimar la transmisividad, la radiancia difusa y la absorción atmosférica.

Para lograr realizar una corrección con precisión, es necesario tener datos precisos sobre las condiciones atmosféricas exactas a la hora de la toma de la imagen. Además, el efecto atmosférico no es proporcional en todo el ancho de la imagen, sino que depende de cada zona, pudiendo afectar de una manera más intensa a unas zonas que otras. Es por ello, que en la actualidad las

---

<sup>64</sup> E. Castillo, R. Pereda, J. De Luis Ruiz y M. Sánchez. (2009). *La corrección atmosférica en la teledetección aerotransportada*.

<sup>65</sup> A. A. Gilabert, C. Conese, F. Maselli. (1994). *An atmospheric correction method for automatic retrieval of Surface reflectance*.

correcciones atmosféricas se abordan siguiendo los siguientes procedimientos (King, 1999; Robin, 1998; Sobrino, 2000)<sup>66</sup>:

1. Realización de mediciones in situ con un radiómetro.

Sabiendo la fecha y hora a la que el sensor va a captar la imagen de la zona de estudio, se despliega en la zona un radiómetro que permite determinar entre otros parámetros, la radiación solar incidente o la reflectividad del terreno. Se trata del método más preciso conocido para realizar correcciones atmosféricas, pero en contraste resalta la elevada dificultad técnica de llevarlo a cabo correctamente.

2. A partir de la adquisición de imágenes por parte de otros sensores.

En la actualidad, dada la gran variedad de satélites de teledetección puestos en órbita y la diversidad de procesos que monitorizan, se puede utilizar un determinado satélite para la captación de imágenes, cuyo interés radique en la superficie terrestre con el apoyo de otro atmosférico. El sensor atmosférico permite obtener información sobre el estado de la atmósfera sobre la zona en la que el primer satélite capta la imagen.

3. A partir de modelos físicos de transferencia radiativa.

Gracias a ellos se deduce la reflectancia de un terreno a partir de la señal obtenida y la caracterización atmosférica. Para este fin existen softwares comerciales como es el 6S. (Vermonte, 1995).

4. A partir de datos presentes en la propia imagen.

Constituye uno de los métodos más sencillos de aplicar y de mayor interés, ya que no requiere de información externa.

De los cuatro métodos existentes para realizar correcciones atmosféricas, el método 3 y el método 4 son los más extendidos en la actualidad. Dada la extensión del uso, se cree conveniente profundizar en ellos.

---

<sup>66</sup> E. Chuvieco. (2002). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing*.

- A partir de datos presentes en la misma imagen<sup>67</sup>.

La propuesta inicial de los métodos basados en el objeto oscuro, fue propuesta inicialmente por Chavez 1975, y posteriormente mejorada en 1988 y 1996. El método consiste en la aplicación de una operación sencilla, que actúa aminorando el efecto atmosférico.

Las áreas cubiertas con materiales de elevada absortividad (agua y zonas de umbría) presentan una reflectividad muy baja y por lo tanto deben representarse en la imagen con un ND igual o próximo a cero.

Sin embargo, esta máxima no suele ocurrir en la realidad, debido precisamente a los fenómenos de dispersión. La dispersión atmosférica proporciona valores superiores a cero, mayores cuanto menor longitud de onda, debido a la dispersión de Rayleigh y Mie.

Siguiendo las premisas anteriores, para corregir radiométricamente la imagen con valores procedentes de la misma imagen, se procede a restar al ND de los píxeles de la imagen de cada banda un ND mínimo, que se representa como la diferencia de ND en zonas de agua, cuya resta de como resultado cero. La ecuación propuesta tiene la siguiente forma (Ec.3):

$$ND_{i,j'} = ND_{i,j} - ND_{min}$$

Dónde  $ND_{i,j'}$  corresponde al nivel digital del píxel una vez corregido.

$ND_{i,j}$  se trata del valor original de ND captado por el sensor.

$ND_{min}$  corresponde a la diferencia de ND entre un cuerpo oscuro.

El método del objeto oscuro es de aplicación sencilla y es válido para estimar el espesor atmosférico de aerosoles. En contra, los errores pueden ser notables para valores de reflectividad altos (superiores al 15%), al no considerar las transmisividades del flujo incidente y el reflejado. Para evitar este problema, el autor del método ha propuesto que se complemente con estimaciones de la transmisividad atmosférica y/o apoyarse con modelos climáticos proporcionados por satélites meteorológicos.

---

<sup>67</sup> Santiago Ormeño. (2006). *Teledetección fundamental*.

-A partir de modelos físicos de transferencia radiativa<sup>68</sup>.

Gracias a estos modelos, se es capaz de deducir la reflectancia en el terreno a partir de la señal captada por el sensor, aplicando una caracterización atmosférica correspondiente a la zona y fecha en la que se capta la imagen.

Estos modelos pueden ser desarrollados y aplicados por un usuario en particular o bien se pueden utilizar softwares ya desarrollados dedicados a este fin.

Para realizar una estimación atmosférica correcta, el modelo requiere la radiancia captada por el sensor ubicado en la plataforma satelital, los datos de iluminación para la fecha en la que se capta la imagen además de la información atmosférica. Si se es capaz de definir estos parámetros con calidad y rigor, el software es capaz de:

- Simular la señal que recibe el sensor a bordo del satélite.
- Determinar la reflectividad del terreno para la radiancia registrada en el sensor.

La principal ventaja de estos modelos reside en que no requieren de medidas tomadas en campo, basándose en una recreación de las condiciones atmosféricas con el objeto de corregir el aporte extra de reflectancia que incide sobre el sensor. Los modelos físicos obtienen excelentes resultados en cuanto a corrección de la dispersión molecular y absorción atmosférica se refiere.

La dispersión producida por aerosoles es la variable que más afecta a las superficies oscuras, mientras la absorción atmosférica es la que más actúa sobre las claras (Fraser y Kaufman, 1985).

Visto el efecto de la dispersión y la absorción sobre la calidad de la imagen, se hace imprescindible conocer las características ópticas de la atmósfera. Para determinarlas, se adoptan modelos de simulación atmosférica, conocidos como Atmósferas Estándar (McClatchey, 1986) y se elaboran modelos que estiman la concentración de aerosoles.

---

<sup>68</sup> Juan Gregorio Rejas. (2008). *Tratamiento digital previo de las imágenes*.

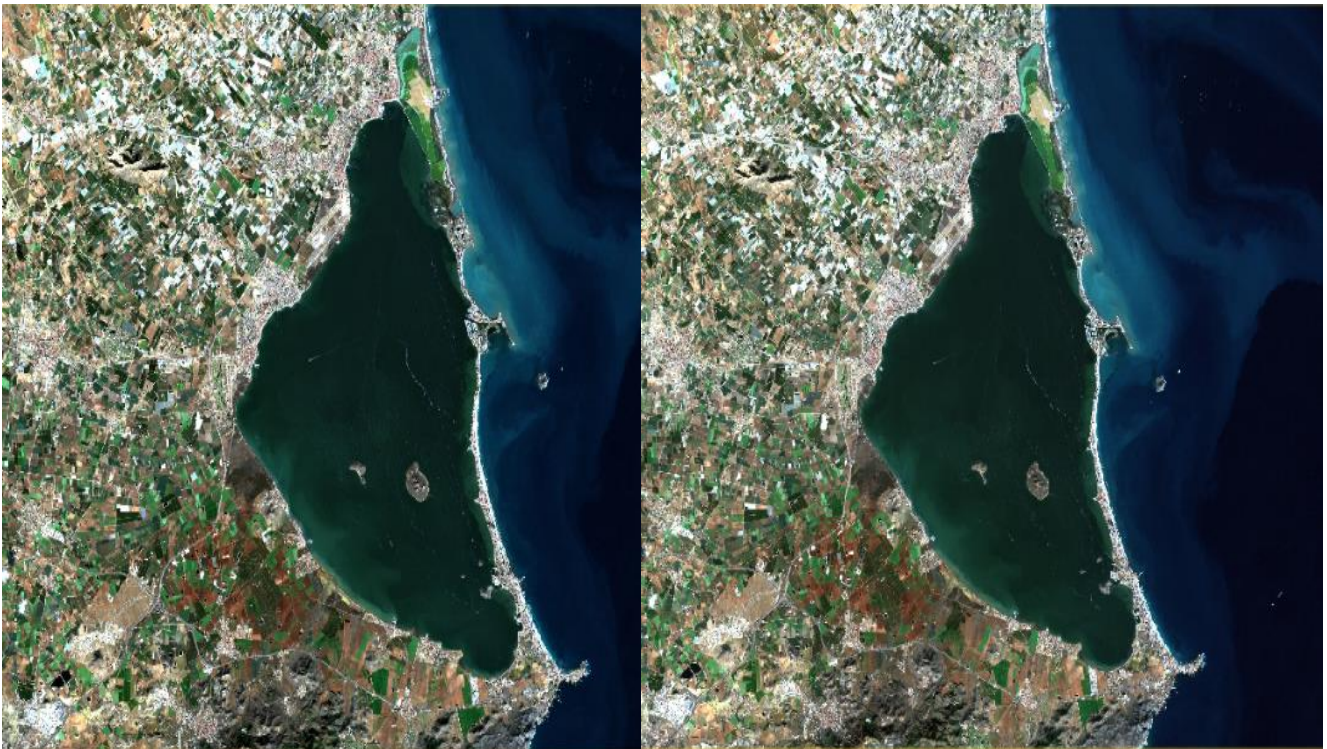
-Atmósferas estándar:

El modelo nace por la dificultad de conocer las características reales de la atmósfera, estableciendo un método con el que obtener datos precisos para realizar cálculos de transferencia radiativa. Para este fin, se diseñan una serie de modelos atmosféricos representativos de las diferentes condiciones atmosféricas, desde condiciones suaves a extremas que, sin reflejar las condiciones reales logran sin embargo una aproximación suficiente para ser utilizadas. Desde ese punto de vista, las atmósferas estándar pueden utilizarse como una primera aproximación cuando se trata de atmósferas claras sin apenas nubes. (McClatchey, 1986).

-Modelos de aerosoles:

Para mejorar la caracterización atmosférica, se realizan los modelos de aerosoles, sirviendo de complemento a las atmósferas estándar. Estos modelos cubren una gran variedad de condiciones, desde el nivel del mar hasta la mesosfera, proporcionando estimaciones de la transferencia radiativa.

La *Figura 26*, representa el efecto producido en los ND de la imagen al ser corregida atmosféricamente. La imagen corresponde al entorno del Mar Menor.



*Figura 26. A la izquierda, imagen corregida atmosféricamente. A la derecha, misma imagen sin corregir. Fuente propia.*

### III.1.3. Distorsión geométrica<sup>69</sup>.

Se trata de un error que se produce durante la adquisición de las imágenes y que posteriormente tiene que ser corregido. Las principales causas por las que se presenta la distorsión geométrica son el cabeceo (pitch), el alabeo (roll) y el giro lateral (yaw) provocadas por la trayectoria, altura y velocidad de la plataforma que alberga el sensor. A estas hay que añadir las causadas por el relieve y la forma terrestre.

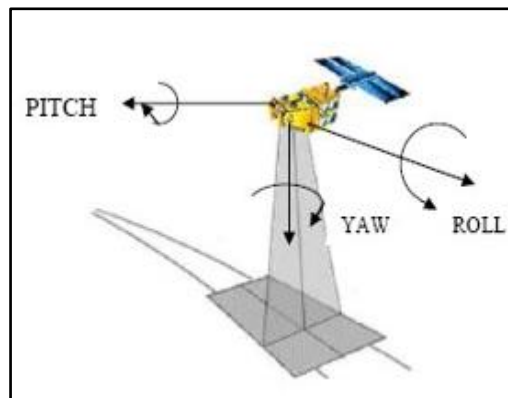


Figura 27. Causas de distorsión geométrica ocasionadas por la plataforma. Fuente: @Teledect.com

Los factores que ocasionan distorsiones geométricas son los siguientes:

- Rotación terrestre.
- Ancho de barrido de los sensores.
- Curvatura terrestre.
- Variaciones no controladas ni previstas de la plataforma que alberga el sensor.
- Efecto panorámico con la toma de imágenes.
- Relieve del terreno observado.

Todas estas fuentes de error pueden ser detectadas y revertidas conjuntamente. Con la aplicación de técnicas destinadas a la corrección geométrica se consiguen minimizar estos efectos.

<sup>69</sup> Universidad de Murcia. (2012). *Correcciones a las imágenes satélite*.

### III.1.4. Corrección geométrica<sup>70</sup>.

Las correcciones geométricas de la imagen incluyen cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles que la forman. Gracias a los avances en la tecnología, actualmente las imágenes se encuentran en formato digital, dónde aplicando una serie de fórmulas empíricas resulta de relativa facilidad realizar este tipo de correcciones. (Chuvienco, 2008).

La corrección geométrica puede abordarse de dos formas distintas. El primer método, denominado **corrección orbital** pretende modelar aquellas distorsiones geométricas conocidas, a partir de aplicar transformaciones inversas a las que realiza el sensor en el momento de la adquisición.

Para utilizar la corrección orbital, resulta primordial disponer de información detallada sobre la órbita de la plataforma que alberga el sensor. La aplicación correcciones orbitales resulta muy útil para corregir errores sistemáticos, como pueden ser la curvatura terrestre o la inclinación de la órbita de la plataforma.

El segundo método que se plantea para realizar correcciones geométricas, consiste en la aplicación de fórmulas empíricas sobre la imagen, resultado de establecer **puntos de control** definidos por el usuario dónde se conocen perfectamente sus coordenadas. Para que este tipo de corrección resulte representativa para toda la imagen, se debe elegir un número suficiente de puntos de control, que sean representativos de toda la imagen. El error geométrico es modulado automáticamente ya que las funciones de transformación abarcan la totalidad de la imagen.

#### III.1.4.1. Corrección a partir de modelos orbitales:

Este tipo de corrección es muy útil y adecuada para sensores de baja resolución o imágenes captadas sobre áreas marinas, dada la complejidad que resulta en estos entornos establecer puntos de control. Para ser aplicado adecuadamente, se requiere conocer la altitud de la órbita, que varía dependiendo de la zona dado que las órbitas siguen modelos elípticos, la velocidad a la que se mueve la plataforma, así como la velocidad de barrido del sensor. A partir de esta

---

<sup>70</sup> Chuvienco, E. (2008). La observación de la Tierra desde el espacio. *Teledetección ambiental*.



información se es capaz de corregir las distorsiones sistemáticas causadas durante la adquisición, destacando las siguientes:

-Inclinación de la imagen:

Este efecto es notable en los sensores por barrido, debido que, durante el tiempo de adquisición de la imagen, la Tierra se halla rotando de oeste a este. El efecto produce que los puntos finales de adquisición hayan sido desplazados hacia el oeste. (Richards, 1998).

Para dotar a los píxeles originales de la corrección correspondiente, es necesario contemplar las velocidades del satélite, de la rotación terrestres y el área captada por el sensor.

-Distorsión panorámica:

Los sensores ópticos a bordo de plataformas de observación tienen la característica común, que las imágenes son captadas desde un único punto de observación, siendo los parámetros de adquisición sólo exactos en la vertical del mismo. Este hecho produce que la visión lateral de la escena sea objeto de alteraciones geométricas, reconociéndose comúnmente:

- La superficie representada por píxel en la escena, es mayor a medida que el punto observado se aleja del nadir, pero se sigue representando sobre el mismo tamaño de píxel. Se traduce en una disminución de la resolución espacial en zonas alejadas del nadir.
- La forma del píxel se distorsiona, asemejándose a la de un trapecio isósceles.
- A medida que la observación se aleja del nadir, se advierte que la distancia entre el centro de los píxeles vecinos aumenta.

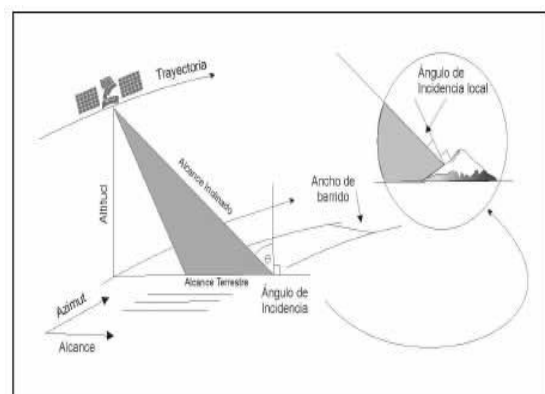


Figura 28. Representación del efecto panorámico.  
Fuente: Scielo.org

Las distorsiones panorámicas aparecen generalmente cuando la dirección en la que apunta el sensor se aleja del nadir, ya sea por tener una gran cobertura visual o bien ser una imagen tomada con un gran ángulo de alabeo.

Por suerte, las distorsiones panorámicas son fácilmente corregidas mediante la aplicación de las siguientes fórmulas empíricas (Ec. 4).

$$p' = \frac{p}{\cos^2 * \gamma}$$

Dónde la variable **p** representa tamaño de píxel tomado en el nadir.

**P'** muestra la longitud de lado del píxel tomado en el borde de la imagen.

**γ** es el ángulo existente entre la vertical y la localización del píxel.

Mientras que en la toma de imágenes desde plataformas aéreas como drones o aeroplanos no hace falta tener en consideración el efecto de la curvatura terrestre por considerarse la Tierra como una superficie plana, en el caso de la observación espacial sí que se hace necesario debido a la lejanía del objeto observado, viéndose obligado a tener en cuenta el efecto de la curvatura terrestre. Para realizar dicha corrección se utiliza normalmente la ecuación planteada por (Richards, 1993). (Ec. 5).

$$p_c = \frac{\beta(h + r_e(1 - \cos\varphi))}{\cos\gamma * \cos(\gamma + \varphi)}$$

Dónde **p<sub>c</sub>** indica el tamaño de píxel corregido por el efecto de la curvatura.

**β** es el ángulo de la visión instantánea.

**h** la altura a la que se halla el sensor.

**R<sub>e</sub>** el radio de la Tierra.

**γ** se trata del ángulo de barrido.

**φ** se trata del ángulo formado por el centro del píxel observado con el centro de la Tierra.

Con la aplicación de la ecuación se obtiene una corrección aceptable para aplicaciones globales y usos dónde no se requiera un gran nivel de detalle y precisión. Sin embargo, para realizar análisis multitemporales con detalle, esta expresión no válida, debido a la falta de detalle.

En los análisis multitemporales, resulta imprescindible haber realizado una corrección geométrica de elevada precisión ya que se requiere que las imágenes se refieran exactamente a una misma zona. Pequeños desplazamientos entre los píxeles de las imágenes acarrearán identificar cambios ficticios que en realidad no se han producido.

#### **III.1.4.2. Corrección a partir de puntos de control<sup>71</sup>:**

Este método consiste en aplicar parámetros de transformación a partir de puntos de control, es decir, puntos que conocemos sus coordenadas exactas sobre el terreno y que se identifican sobre la imagen. Para la aplicación de la corrección geométrica mediante puntos de control se siguen las siguientes pautas:

- Localización de puntos comunes a la imagen y al mapa.
- Cálculo de las funciones de transformación entre las coordenadas obtenidas por el objetivo y las tomadas por referencia.
- Transferencia de los ND originales a la nueva posición asignada.

Se define como punto de control aquellos lugares que sirven como nexo de unión entre la imagen captada por el sensor y el sistema de coordenadas al cual se quiere transmitir a la imagen. Estos puntos son utilizados por los algoritmos para realizar la corrección geométrica y por lo tanto tienen importancia capital en el resultado obtenido.

La inexactitud en la localización de estos puntos, así como una distribución muy localizada, acarrea inevitablemente una estimación inadecuada y por lo tanto una corrección geométrica errónea.

---

<sup>71</sup> Gregorio Ambrosio, Javier González, Vicente Arévalo. (2002). *Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la detección de cambios en una serie temporal*.

En definitiva, el establecimiento de estos puntos resulta la parte más importante del proceso, definiendo posteriormente la calidad de los resultados. Para realizar correcciones geométricas utilizando puntos de control se tienen en cuenta los siguientes puntos:

- Número de puntos de control requeridos:

Actualmente no existe un número de puntos de control definidos, sino que este apartado depende exclusivamente de la experiencia y pericia del analista. En terrenos abruptos dónde se abarque una gran área de extensión se necesitarán más de los 3 puntos mínimos que son necesarios para terrenos llanos de poca extensión. A mayor número de puntos de control introducidos, mejor será la corrección geométrica realizada.

- Localización de los puntos de control:

Preferentemente, los puntos serán fácilmente identificables por el observador. A ser posible, los puntos de control deben tratarse de objetos realizados por la humanidad que no presenten dinamismo alguno, de manera que al comparar entre la serie de imágenes temporales siempre este presente el mismo objeto en la misma posición.

- Distribución de los puntos:

Respecto a la distribución, es conveniente que estos se distribuyan uniformemente por toda la imagen, evitando crear zonas donde exista una mayor densidad de puntos que en el resto. La mal distribución de los puntos por la imagen provoca una alteración en las ecuaciones, dando mayor relevancia a las zonas con mayor densidad que al resto de la imagen.

La distribución de los puntos es especialmente importante para las imágenes dónde aparezcan importantes variaciones del relieve, siendo recomendado la utilización de un modelo digital de elevaciones para complementarlo. (Palà y Pons, 1995)<sup>72</sup>.

---

<sup>72</sup> Palà y Pons. (1995). *Incorporation of relief into geometric corrections based on polynomials*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing

### III.2. Realces de la imagen<sup>73</sup>.

Una de las principales técnicas que componen el procesamiento digital de imágenes es la del realce. Esta técnica comprende un conjunto de operaciones que permiten mejorar la calidad de la imagen, realzando las características, brillos o contrastes reduciendo su ruido. (B. Aldalur y M. Santamaría, 2007).

Para realizar un realce, como en otras operaciones de procesamiento, se requiere de una imagen de entrada (input) tomada directamente desde el sensor orbital, que será transformada por algoritmos para producir un output. Las operaciones que componen la técnica de realce pueden dividirse en dos tipos:

- Operaciones de procesamiento píxel a píxel.
- Operaciones de procesamiento por grupos de píxel.

Las operaciones píxel a píxel, tienden a mejorar el contraste tonal de la imagen, es decir, aumentar la diferencia entre los valores más oscuros y los más claros visualizados en el monitor. Para ello se alteran los niveles digitales de los píxeles que componen la imagen mediante la aplicación de ecuaciones matemáticas. El valor resultante de las transformaciones es aplicado a la imagen de salida en la misma posición que ocupaba en el original. Las operaciones de procesamiento píxel a píxel toman el valor individual de cada píxel, sin dejar que los píxeles vecinos influyan en el cómputo. Las operaciones de procesamiento por grupos de píxel mejoran el contraste espacial de la imagen, modificando el nivel digital de un solo píxel y el de sus vecinos, tratando que se asemejen. El procedimiento trata de suavizar o reforzar los valores de brillo de tal forma que cada píxel de la imagen se asemeje o se diferencia más de los píxeles que lo rodean. (Richards, 1995)<sup>74</sup>.

Las combinaciones de bandas o falso color, permiten identificar los elementos de interés por parte del intérprete sin alterar el valor digital de los píxeles de la imagen. La técnica se utiliza en imágenes captadas por sensores

---

<sup>73</sup> B. Aldalur y M. Santamaría. (2002). Realce de Imágenes: filtrado espacial. *Revista de Teledetección*, 17, 31-42.

<sup>74</sup> Richards. (1995). *Remote Sensing digital image analysis*. Ed. Springer Verlag

multiespectrales y consiste en escoger la combinación de bandas que serán establecidas en los canales visibles (rojo, verde y azul) del proyector.

### III.2.1. Ajuste del contraste<sup>75,76</sup>.

Los procesos de ajuste de contraste tienden a adaptar la resolución radiométrica de la imagen a la capacidad que tiene el monitor para su visualización.

Se habla de **compresión del contraste**, cuando la profundidad de la imagen es mayor que la capacidad que tiene el ordenador para representar las diferentes tonalidades. (Chuvienco, 2008).

La compresión del contraste ha sido el método más utilizado en las primeras etapas de la teledetección digital espacial, siendo referente debido a la incapacidad gráfica del ordenador para representar las diferentes tonalidades. Debido al avance de la informática, este tipo de problemas no se presentan a día de hoy. En caso contrario, se denomina **expansión del contraste** cuando el rango de ND de una imagen es menor que el nivel de visualización que ofrece el ordenador, tratando esta técnica de resolver los desajustes que se producen.

Normalmente, los sensores actuales codifican la señal en un rango de 256 niveles que coincide con los NV de los sistemas de visualización. Como ambos valores son coincidentes, en teoría no es necesario aplicar ningún ajuste de contraste. Sin embargo, con una profundidad de 256 niveles, el ojo humano no es capaz de distinguir todo el abanico de tonalidades, siendo necesario aplicar técnicas de expansión del contraste; de tal forma que ayuden a discriminar los diferentes objetos que se encuentran en ellas.

Para realizar una expansión del contraste, se crean las llamadas tablas de referencia del color. Las tablas de referencia son una matriz numérica que engloba todos los ND de la imagen para transformarlos mediante diferentes algoritmos.

Realizar una comparativa entre las diferentes técnicas, se han utilizado imágenes satelitales tratadas por la Escuela de Organización Industrial (EOI):

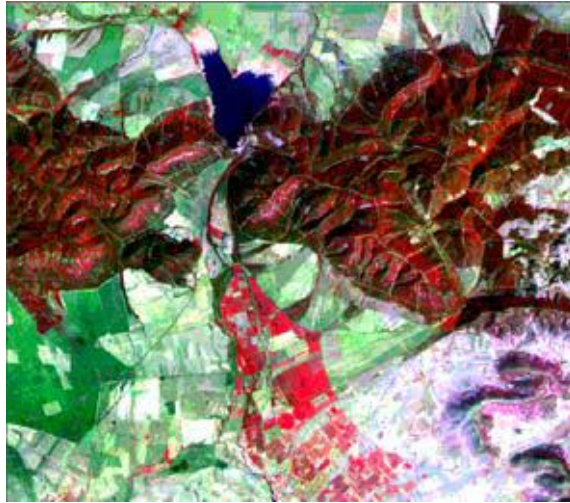
---

<sup>75</sup> Chuvienco, E. (2008). La observación de la Tierra desde el espacio. *Teledetección ambiental*.

<sup>76</sup> Juan Gregorio Rejas. (2008). *Tratamiento digital previo de las imágenes*.

### 1. Expansión lineal:

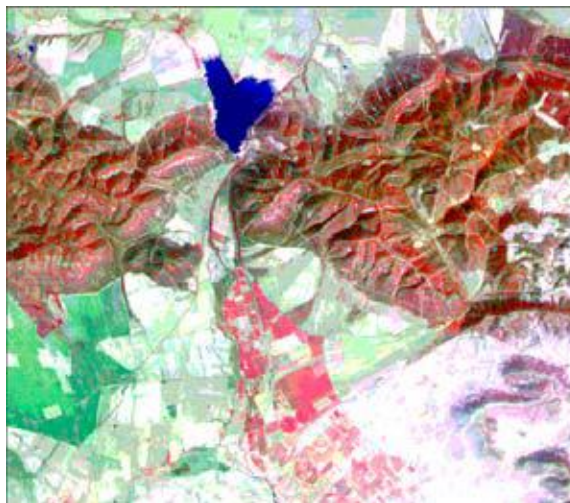
Se diseña una tabla de referencia del color dónde el ND mínimo se asocia al nivel de visualización 0, y el máximo ND al máximo nivel de visualización. Los valores de ND de los píxeles que quedan entre estos dos extremos son transformados y distribuidos mediante la aplicación de una ecuación lineal. El resultado de este procedimiento es una imagen más nítida y mejor contrastada.



*Figura 29. Imagen captada por el satélite Landsat 5 correspondiente al parque de Cabañeros. Fuente: EOI*

### 2. Expansión cuadrática:

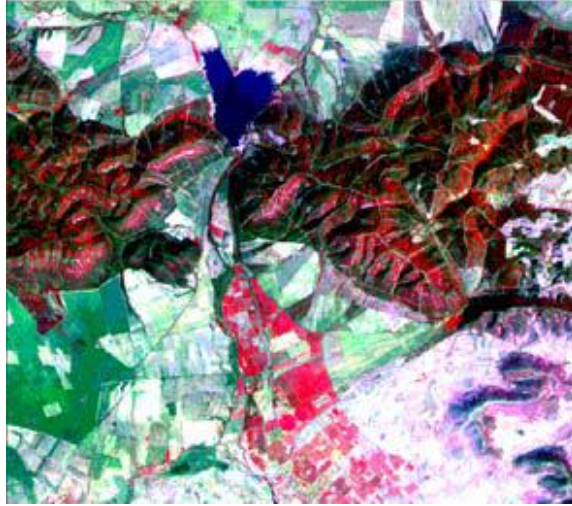
Sigue el mismo procedimiento que la expansión lineal, con la diferencia que en vez de distribuir los valores de ND mediante la aplicación de una ecuación lineal, se aplican utilizando una expresión cuadrática. El resultado es un sesgo de la imagen hacía los NV de mayor claridad, aumentando el brillo de la misma.



*Figura 30. Imagen captada por el satélite Landsat 5 correspondiente al parque de Cabañeros. Fuente: EOI*

### 3. Ecuilización del histograma:

Distribuye los ND de la imagen de acuerdo no solo a su distribución sino también por su valor. El resultado es la generación de una tabla dónde los ND distan poco de los NV representados.



*Figura 31. Imagen captada por el satélite Landsat 5 correspondiente al parque de Cabañeros. Fuente: EOI*

### **III.2.2. Filtrado de la imagen<sup>77,78</sup>.**

Al igual que en las técnicas fotográficas convencionales, un filtro se aplica en el análisis digital para aislar componentes que de interés.

En el apartado anterior se han visto las técnicas de ajuste del contraste, que trataban de realzar las características de interés de la imagen a partir de distribuir los ND en los NV que proporciona el ordenador. Sin embargo, los filtros digitales, transforman los ND originales, favoreciendo que los píxeles se asemejen o contrasten con los de su alrededor. Para realizar el filtrado de una imagen, en la actualidad se disponen de filtros de paso bajo o paso alto.

---

<sup>77</sup> B. Aldalur y M. Santamaría. (2002). Realce de Imágenes: filtrado espacial. *Revista de Teledetección*, 17.

<sup>78</sup> Asociación española de teledetección. (2005). *Filtrado espacial*.



### III.2.2.1. Filtro de paso bajo.

Tienen por objeto suavizar los contrastes espaciales presentes en una imagen. Un filtro espacial de paso bajo, tiene por efecto dejar pasar o mantener intocables los componentes de baja frecuencia espacial de una imagen. Son los componentes de alta frecuencia los que están atenuados en el output.

Como consecuencia, suavizan los contrastes espaciales de la imagen, asemejando el ND de cada píxel al de su vecino, reduciendo la variabilidad de la escena. En términos visuales, una imagen filtrada ofrece perfiles menos nítidos y más difuminados.

Los filtros de paso bajo se utilizan para restaurar los errores aleatorios que se presentan en los niveles digitales de la imagen, fruto de distorsiones en el momento de adquisición o de errores en durante la transmisión de datos. Así mismo, se utiliza para reducir la variabilidad espacial, para lograr posteriormente una mejor clasificación de la imagen. (Cushnie y Atkinson, 1985)<sup>79</sup>.

En los filtros de paso bajo, los ND digitales de la imagen se distribuyen en matrices 3x3. Una vez construida la matriz, se utilizan técnicas estadísticas para dotar a los píxeles de nuevos valores digitales. Una de estas técnicas consiste en asignar el mismo ND a toda la matriz, correspondiendo este valor a la media aritmética de los píxeles originales, es el conocido como **filtro medio**.

Otras técnicas proponen aplicar sobre el output, la mediana de los valores de cada matriz o ponderar de forma distinta los valores que ocupan la posición central de la matriz. Estas técnicas persiguen evitar una pérdida excesiva del detalle, tal y como se produce con la aplicación de un filtro medio.

### III.2.2.2. Filtro de paso alto.

Este tipo de filtros pretende aislar los componentes que reflejan una alta frecuencia espectral en la imagen. Tiene un efecto opuesto al filtro de paso bajo, ya que acentúa los componentes de alta frecuencia espacial mientras deja sin tocar los de baja frecuencia. Con la aplicación de este tipo de filtros, se consigue remarcar digitalmente los contrastes entre píxeles vecinos, enfatizando los

---

<sup>79</sup> Cushnie y Atkinson. (1985). *Effect of spatial filtering on scene noise and boundary*.

rasgos lineales presentes en la imagen, correspondiéndose a los ocasionados por carreteras, accidentes geológicos, parcelas... etc.

Varios métodos son capaces de conseguir este objetivo, siendo el más sencillo la resta a los ND de la imagen original los ND producidos por la aplicación anterior de un filtro de paso bajo, dando como resultado un realce de aquellos píxeles de mayor intensidad. (Chuvienco, 2008).

El procedimiento sigue la ecuación (Ec. 6):

$$ND'_{i,j} = ND_{i,j} + (ND_{i,j} - ND_{L,i,j})$$

- Dónde  $ND'_{i,j}$  corresponde a los ND de la imagen tras aplicar el filtro.
- $ND_{i,j}$  se trata de los ND de la imagen original obtenidos por el sensor.
- Y finalmente  $ND_{L,i,j}$  son los valores de ND de la misma imagen una vez aplicado un filtro de paso bajo.

Al igual que sucede con los filtros de paso bajo, es muy usual el uso de matrices que sirven como plantilla para calcular las tablas de valores resultantes. En este caso, las matrices disponen los valores de tal manera que una vez son aplicadas, se produce un mayor contraste entre el píxel central y los del alrededor, consiguiendo realzar el contenido. Son los denominados filtros Sobel.

Finalmente, como conclusión al capítulo de los filtros, es necesario nombrar los filtros direccionales. Estos filtros realzan los elementos localizados en alguna dirección particular de la imagen. Por ejemplo, al seleccionar la dirección oeste en este tipo de filtros, aparecerán remarcadas todas aquellas estructuras lineales (accidentes geológicos, carreteras, vías... etc.) que avancen en esa dirección.

### III.2.3. Combinaciones de color<sup>80</sup>.

En la actualidad, las combinaciones de color constituyen una de las técnicas más sencillas de aplicar para el usuario que ofrecen una gran variedad de realces, permitiendo destacar visualmente aquellos objetos que resultan de interés.

---

<sup>80</sup> GIS & BEERS. (2017). *Combinaciones RGB de imágenes satélite Landsat y Sentinel*.

La técnica nace a partir de la puesta en órbita de sensores multiespectrales, capaces de captar la superficie terrestre en función del espectro de emisión. Con la combinación de las diferentes bandas provistas, los usuarios son capaces de detectar y distinguir con facilidad elementos como la vegetación, los usos del suelo o las masas de agua.

Las imágenes captadas por sensores multiespectrales pueden ser representadas visualmente en un monitor en escala de grises, o por el contrario, coloreadas según el modelo de color RGB (red, green, blue), considerados como los colores primarios. El modelo RGB expone, que, con la combinación de los tres colores primarios, se obtiene todo el abanico de colores existentes, consiguiendo representar por pantalla todas las tonalidades presentes en la imagen.

La combinación de las bandas provistas por el sensor sobre los tres canales de visualización, dará como resultado la visualización de una imagen a color natural. Todas las demás combinaciones de bandas sobre canales serán llamadas como imagen a falso color.

Para realizar combinaciones de color que realcen los elementos deseados, se necesita conocer el rango de trabajo en el que operan las bandas del sensor multiespectral del satélite seleccionado y el comportamiento reflectivo de los elementos objeto del estudio.

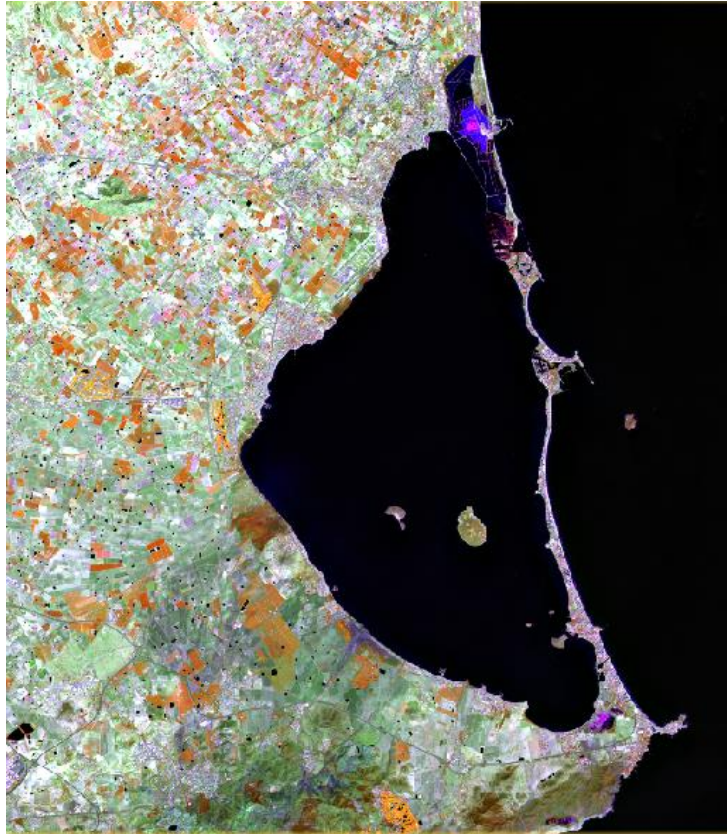
Conociendo los datos del sensor equipado en el Sentinel-2 y con la ayuda de la librería de firmas espectrales realizada por el CSIC (<http://www.investigacion.cchs.csic.es/espectroradiometria/category/web-links/librer%C3%AD-espectrales>) se proponen las siguientes combinaciones de color.

- Color natural: Fruto de representar las bandas correspondientes al rojo, verde y azul en sus correspondientes canales (4, 3, 2).



*Figura 32. Representación en color natural del Mar Menor y su entorno.  
Imagen captada el 13-sep-2017 por el satélite Sentinel-2.*

- Falso color: La disposición de las bandas multispectrales (8, 11, 4), en los canales rojo, verde y azul respectivamente, permite una discriminación rápida de los cuerpos de agua, independientemente de su tamaño.



*Figura 33. Representación falso color del Mar Menor y su entorno. Imagen captada el 13-sep-2017 por la plataforma Sentinel-2.*

De esta forma, existen infinidad de combinaciones dando como resultado diferentes visualizaciones que ayudarán al intérprete a identificar los elementos buscados. Otras composiciones que pueden resultar interesantes con el satélite Sentinel-2 responden al siguiente patrón:

- Índice de penetración atmosférica (12,11, 8A): Resalta aquellas zonas donde la radiación atmosférica se refleja con mayor intensidad. Útil para determinar zonas con elevados albedos.
- Infrarrojo (8, 4, 3): Esta composición de falso color se utiliza para determinar zonas cubiertas de vegetación, siendo estas representadas con tonalidad roja. A mayor intensidad de coloración más vigorosa y frondosa es la vegetación de la zona.

# Capítulo IV

## Eutrofización de un medio acuático

### IV.1. Proceso de eutrofización y principales causas.

En este capítulo se pretenden dar a conocer nociones sobre los procesos de eutrofización, en que consiste el proceso, sus principales causas, su alcance global y las principales consecuencias sobre la vida en un medio acuático. El Capítulo III concluye con escrito sobre la aportación de la teledetección a la detección y monitorización de procesos de eutrofización de aguas.

#### IV.1.1. Eutrofización de una masa acuática<sup>81,82</sup>.

En líneas generales, un sistema acuático en función de los niveles de nutrientes puede clasificarse como:

- Oligotrófico, cuando se trata de un medio pobre en nutrientes.
- Eutrófico al tratarse de un medio con un elevado contenido de nutrientes.
- Mesotrófico, se trata de un estado intermedio entre Oligotrófico y Eutrófico.

Si bien la eutrofización se trata de un lento proceso natural producido por el aporte de sedimentos y nutrientes a una cuenca receptora, el uso de fertilizantes, detergentes y el vertido de materia orgánica son aceleradores del proceso. Este fenómeno se determina como eutrofización antropológica.

---

<sup>81</sup> Alvarez Cobelas, M., P. Muñoz Ruiz y A. Rubio Olmo. 1991. **La eutrofización de las aguas continentales españolas**. 339 páginas.

<sup>82</sup> Ambientum, (2008). *Eutrofización de aguas*.

Atendiendo al apartado anterior, se define como eutrofización aquel proceso natural y/o antropogénico consistente en el enriquecimiento de las aguas con nutrientes, a un ritmo tal que no puede ser compensado por la mineralización total, produciendo por un exceso de materia orgánica un agotamiento del oxígeno en disolución.

En consonancia con la definición de eutrofización, cuando una masa de agua es pobre en nutrientes (oligotrófica), sus aguas son muy transparentes, permitiendo una buena penetración de la radiación solar, posibilitando el crecimiento de algas y la coexistencia de una gran variedad de seres vivos, pero en poca cantidad (Álvarez Cobelas, 1991). Las plantas y animales que habitan en los ecosistemas oligotróficos, son característicos de aguas bien oxigenadas, resultando su presencia como un bioindicador de la buena calidad de las aguas.

Con el incremento de la concentración de elementos nutritivos en las aguas, se propicia un aumento de la actividad fotosintética, representada superficialmente por algas y fitoplancton. El incremento de la vegetación en superficie provoca un aumento de la turbidez del agua, impidiendo que la radiación solar alcance las especies vegetales situadas en el fondo.

El rápido incremento de la concentración de materia vegetal, unida al aumento de turbidez, crean condiciones anóxicas que provocan la muerte por asfixia de numerosas especies animales y vegetales. Una vez pasado el episodio de eutrofización, numerosas especies vegetales y animales han padecido, dando como resultado un descenso de la biodiversidad inicial del agua.

En contraste al estado eutrófico, los cuerpos de agua oligotróficos poseen bajas concentraciones de nutrientes y una mayor diversidad, tanto de especies vegetales como animales. Además, poseen una buena calidad del agua que la hace más apta para el uso y consumo humano.

Los principales factores que inciden en la eutrofización de un medio, son los siguientes<sup>83</sup>:

- Clima: Las temperaturas cálidas favorecen el proceso.

---

<sup>83</sup> Ryding, S y Rast, W. (1992). *El control de la eutrofización en lagos y pantanos*. Ediciones Pirámide, Madrid

- Profundidad: A menor profundidad del medio acuático mayor facilidad para desarrollar procesos de eutrofización.
- Características del aérea de drenaje: Zonas con poca cubierta vegetal sujetas a precipitaciones intensas, favorece el arrastre de nutrientes y por tanto el proceso de eutrofización.
- Geología: En zonas eminentemente sedimentarias, el aporte de fosforo es mayor que en otro tipo de terrenos. Por su parte, los suelos arcillosos al presentar una baja capacidad drenante, favorecen la formación de escorrentías.

El proceso de eutrofización no depende únicamente de las condiciones del medio natural. La acción antrópica incide en el desarrollo del medio. Las actividades humanas que pueden afectar tanto en velocidad como en intensidad el proceso de aporte de nutrientes al mar menor se encuentran descritas a continuación:

1. La contaminación atmosférica: Los óxidos de nitrógeno y azufre reaccionan con el agua atmosférica formando nitratos y sulfatos. Una vez se depositan por precipitación en los suelos, son capaces de formar sales solubles que son arrastradas por escorrentía hasta su deposición en la cuenca receptora.
2. Contaminación agropecuaria: Especialmente intensa al tratarse de una de las principales zonas de producción de frutas y hortalizas. Los fertilizantes empleados en exceso se depositan en el suelo y se infiltran hasta las masas de agua subterráneas. La industria ganadera genera purines que al igual que los fertilizantes aporta grandes cantidades de fósforo y nitrógeno.
3. Desaparición de la cubierta arbolea: Debido a la intensa actividad minera desarrollada en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión durante los S.XIX y S.XX, se utilizó la leña como fuente de energía, desprovoyendo el suelo de vegetación que lo sujete. Debido a la aridez del clima, la Sierra cuenta actualmente con poca vegetación arbórea, facilitando la erosión del suelo y permitiendo un mayor arrastre de nutrientes a la laguna.



4. Contaminación urbana: A pesar de contar con una extensa red de aguas residuales para captar efluentes y canalizarlos hasta centros de depuración, se estima que actualmente las depuradoras solamente son capaces de captar el 60% del fósforo que reciben. En este sentido, el mayor problema radica en el auge turístico de la zona en periodo estival.

#### **IV.1.2. Consecuencias de la eutrofización<sup>84,85,86</sup>.**

A grandes rasgos, la eutrofización produce un aumento de la biomasa y un empobrecimiento de la biodiversidad, disminuyendo la variedad de seres vivos presentes en el medio, pero aumentando la población de los que sobreviven.

Entre las poblaciones que más aumentan se encuentra la de fitoplancton, que en determinadas ocasiones produce un crecimiento descontrolado dando lugar a una explosión de algas o *bloom algae* (Tarczynska, 2001).

La afección de las masas de agua dulce por este proceso, es una problemática que afecta la calidad del agua a nivel global. (Hosper, 1997).

El fitoplancton prolifera incrementando la turbidez del agua y reduciendo su transparencia. Consecuentemente se reduce la penetración de luz solar hasta el fondo del ecosistema acuático, impidiendo o dificultando la fotosíntesis a esos niveles reduciendo la producción de oxígeno.

Las aguas con este tipo de brotes, normalmente presentan una distribución desigual en la concentración de oxígeno, encontrándose en abundancia en las zonas próximas a la superficie y de forma muy reducida o incluso nula en zonas profundas. Es en estas zonas más alejadas de la superficie, donde las algas mueren debido a la falta de radiación solar, siendo descompuestas por microorganismos anaerobios. En su descomposición, estos microorganismos consumen el poco oxígeno restante, dando como resultado un fondo completamente anóxico, donde es imposible la supervivencia de peces y algas, debido a la inexistencia de oxígeno.

---

<sup>84</sup> Néstor Mazzeo. (2003). *Eutrofización: Causas, consecuencias y manejo*.

<sup>85</sup> Tarczynska, (2001). *Toxic cyanobacterial blooms in a drinking water reservoir.- causes, consequences and management*.

<sup>86</sup> Hosper. (1997). *Effects of biomanipulation in the large and shallow lake Wolderwiger- The Netherlands*.

El proceso anteriormente descrito ha ocurrido de manera repetida en el Mar Menor durante los 2 últimos años, provocando una gran pérdida de biodiversidad, sobre todo en cuanto a extensión de praderas marinas se refiere.

La *Figura 34* representa una comparativa entre los años 2014 y 2016 de la distribución de praderas marinas en el Mar Menor. En el 2016 se observa que gran parte del Mar Menor se encuentra ocupado por sedimento sin vegetación.

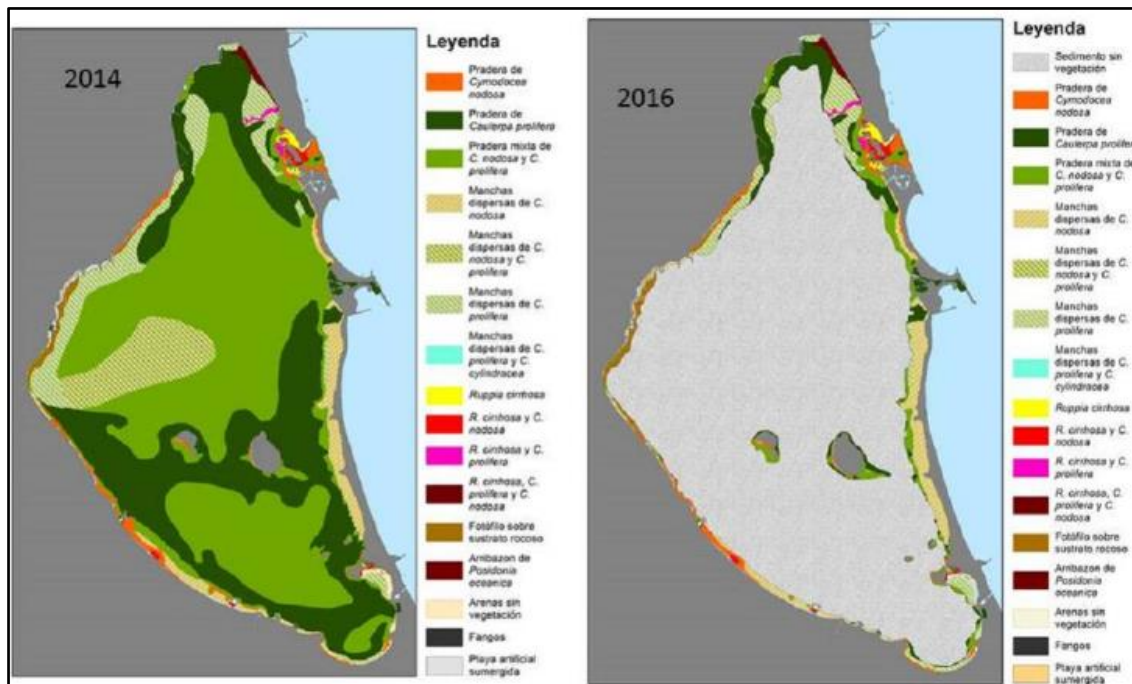


Figura 34. Evolución de la extensión de las praderas marinas en el Mar Menor. Fuente *el País*, 29nov 2016.

Asimismo, el enriquecimiento en nutrientes de las masas de agua, imposibilita la presencia de especies que, tradicionalmente, habitaban los ecosistemas antes de la perturbación de las características físico-químicas. Otro problema asociado a casos de eutrofización, es la disminución de profundidad en zonas someras, dónde es especialmente intensa la sedimentación de materia orgánica.

Ocasionalmente en mar abierto, cuando una explosión de algas es especialmente virulenta, se puede constituir lo que se denomina como mareas rojas o 'red tides'. Las red tides representan una expansión exponencial de la población de fitoplancton.

En la actualidad, para determinar el estado de eutrofización de una masa acuática, existen una serie de variables cuantificables, siendo representativo el contenido de clorofila-a para determinar la cantidad de fitoplancton.

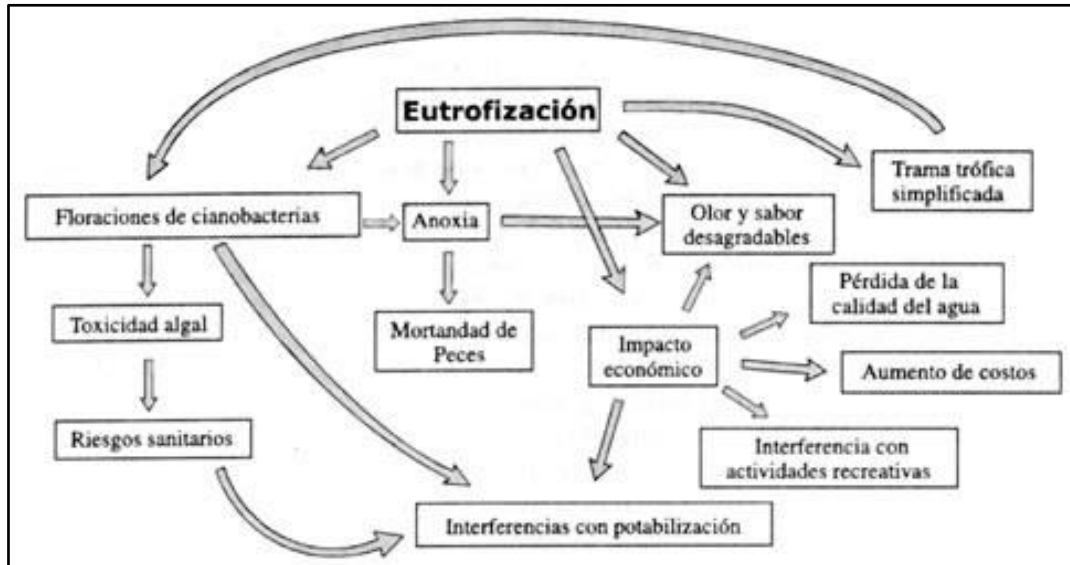


Figura 35. Cuadro resumen de los efectos de la eutrofización en una masa acuática. Fuente: Néstor Mazzeo. (2003). Eutrofización: Causas, consecuencias y manejo

#### IV.1.3. Establecimiento de medidas preventivas<sup>87</sup>.

Al tratarse de un problema de elevada complejidad en el que intervienen infinidad de factores, no existe una única solución para solucionar el problema, es más, aunque se adopten medidas en contra de la eutrofización, no se podrá asegurar que se reproduzcan nuevos episodios de proliferación de algas, aunque si se producen serán de una menor intensidad. Es por ello que se deben de adoptar una serie de medidas preventivas, destinadas a disminuir el aporte excesivo de nutrientes a las aguas.

Las medidas planteadas, tienen que estar focalizadas principalmente en la reducción de vertidos contaminantes que contengan altas concentraciones de fosfatos y nitratos, además de invertir en programas de educación y concienciación ambiental.

Finalmente, se ofrece un breve listado con las medidas más comúnmente adoptadas para combatir la eutrofización:

<sup>87</sup> Libro electrónico. (2008). Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. *Eutrofización*.

1. Reducción del uso de detergentes o empleo de detergentes sin fosfatos.
2. Prácticas agrícolas más ecológicas, de forma que se elimine el uso excesivo de fertilizantes que posteriormente puedan ser arrastrados por el agua.
3. Introducción de buenas prácticas en las explotaciones agrarias, para reducir la erosión de las tierras, evitando o disminuyendo el transporte de sedimentos hasta la cuenca receptora.
4. Mejora de las infraestructuras actuales. En concreto aquellas destinadas a la eficiencia de las plantas depuradoras respecto a la captación y eliminación de fosfatos y nitratos del agua. Construcción de tanques de tormenta que permitan absorber crecidas en caso de avenidas o eventual sobrecarga del sistema.

Las técnicas descritas radican especialmente en el establecimiento de un modelo agrícola más responsable con el medio ambiente y la promoción de programas destinados a concienciar a la ciudadanía.

#### **IV.1.4. La teledetección como herramienta para la monitorización de procesos de eutrofización<sup>88,89</sup>.**

Se trata del ámbito de aplicación de este trabajo fin de grado. Para llegar a este punto, se ha creído necesario la explicación de los fundamentos de la teledetección espacial, además de un breve resumen de las características principales observadas en un proceso de eutrofización. En este apartado se pretenden introducir nociones con las que detectar procesos de eutrofización mediante técnicas de teledetección.

---

<sup>88</sup> C. Doña, V. Caselles, J.M. Sánchez, A. Ferri y A. Camacho. (2011). Herramienta para el estudio del estado de Eutrofización de masas de agua continentales. *Revista de Teledetección*, 46, 40-50.

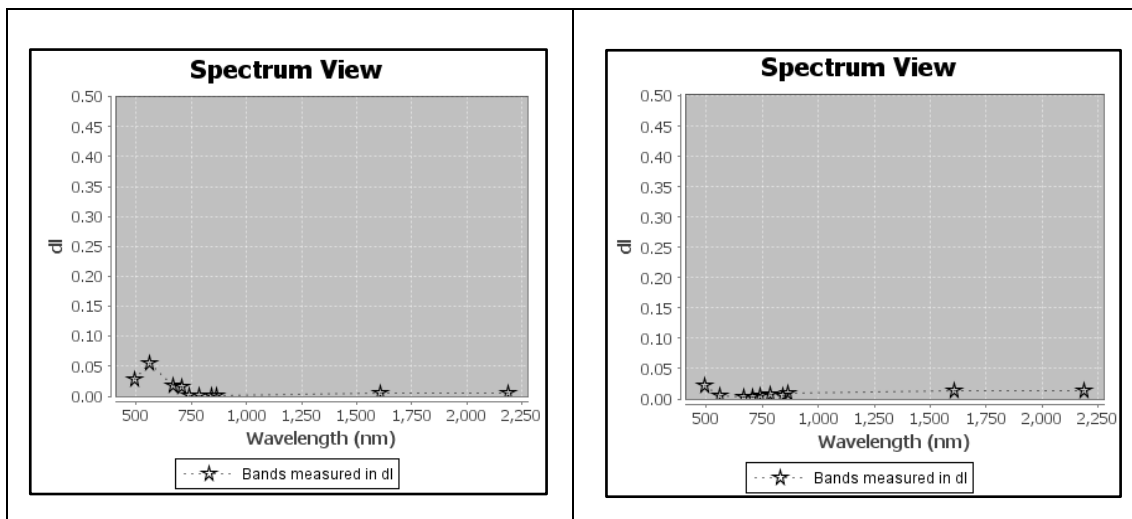
<sup>89</sup> Stephanie C.J. Palmer, Peter D. Hunter, Thomas Lankester, Steven Hubbard, Evangelos Spyrakos, Andrew N. Tyler, Matyas Presing, Hajnalka Horvath, Alistair Lamb, Heiko Balzter, Viktor R. Toth. (2015). Validation of Envisat MERIS algorithms for chlorophyll retrieval in a large, turbid and optically-complex shallow lake. *Remote sensing of environment*, 157, 158-169

La teledetección como técnica no invasiva, identifica los objetos mediante su reflectancia o nivel de radiación que reflejan al espacio, siendo esta captada por los sensores a bordo de los satélites. Como se ha detallado en el capítulo anterior, cada elemento tiene su propia firma espectral, o manera en la que refleja la energía electromagnética. En el caso particular del agua, esta tiende a absorber y transmitir la gran mayoría de radiación incidente, dando como resultado una reflexión al espacio casi nula.

Este hecho confiere al agua una característica espectral única siendo fácilmente identificable al presentarse de color negro o azul oscuro.

Por el contrario, en presencia de turbidez o alta concentración de especies vegetales, la respuesta espectral del agua se ve alterada, aumentando la reflectividad en el verde por la presencia de clorofila.

La *Figura 36* representa la respuesta espectral del agua del Mar Menor en comparación con la del Mar Mediterráneo. Entre ambas se pueden observar diferencias de absorción significativas en la banda perteneciente al color verde, fruto de la reflectividad provocada por el contenido de clorofila en el agua.



*Figura 36.* A la izquierda, visión espectral del agua del Mar Menor afectada por eutrofización. A la derecha, visión espectral de las aguas del Mediterráneo. Se puede observar un aumento de la reflectividad alrededor de los 600nm.

Como se representa en la *Figura 36*, cuando existe turbidez o presencia de abundante de organismos fotosintéticos, la respuesta espectral obtenida por el sensor difiere a la del agua clara.

Teniendo en cuenta estas características y con el objeto de monitorizar y detectar aumentos en la concentración de fitoplancton, han monitorizado mediante teledetección las aguas del Mar Menor. Concretamente durante el periodo comprendido desde junio de 2016 hasta septiembre de 2017, seleccionando imágenes con la menor nubosidad posible, tratando de dar respuesta a la gestión de las aguas del Mar Menor.

En este sentido, se aplica la teledetección como complemento al seguimiento del estado biológico del Mar Menor por parte de la administración pública a través de los puntos de control. Para alcanzar el objetivo, se necesita de cobertura regional, resoluciones espaciales moderadas, un sensor multiespectral y una cadencia elevada en la obtención de imágenes. Estas características están sobradamente representadas por los satélites Sentinel-2, siendo capaces de obtener imágenes multiespectrales de la zona de estudio con una resolución temporal de 10 días.

Una vez obtenidas las imágenes, estas son tratadas digitalmente realizando una serie de correcciones (explicadas en el Capítulo III) para obtener resultados con la mínima distorsión que permitan realizar un seguimiento efectivo del estado biológico del Mar Menor.



*Figura 37. Tonalidad del agua del Mar Menor en Mayo de 2016. Fuente: La Verdad.*

Actualmente, uno de los métodos utilizados para estimar el grado de eutrofización de las aguas, consiste en determinar el contenido de clorofila-a que

estas albergan. Según su concentración, se determina si estos sobrepasan los valores máximos permitidos por la UE en la directiva Marco del Agua.

En el Mar Menor, este sistema está siendo empleado para realizar medidas puntuales de la concentración de clorofila-a por el Servicio de Pesca de la Región de Murcia. Los resultados obtenidos, son posteriormente compartidos con los ciudadanos a través del portal <http://canalmarmenor.es/>.

Para desarrollar el trabajo, el tener acceso a una base de datos de índole científica, fiable y de precisa, permite realizar una comparación entre la estimación de clorofila realizada mediante teledetección y los datos obtenidos sobre el terreno por organismos oficiales. Así se establece una relación entre ellos y se valora finalmente si se puede aplicar la teledetección de una manera fiable en el entorno del Mar Menor.

La clorofila es fácilmente detectable mediante teledetección debido a su comportamiento característico frente a la luz, ya que absorbe la radiación en las longitudes de onda correspondientes al azul y rojo del espectro electromagnético. Su determinación consiste en uno de los índices clave para la monitorización de la población de algas y se trata de un indicador de la salud del sistema acuático. La determinación de la concentración de clorofila es utilizada en la mayoría de estudios sobre monitorización mediante teledetección de medios acuáticos. (M.L. Serrano, 2003).

La concentración de este parámetro en  $\text{mg/m}^3$  es determinado mediante la aplicación de una fórmula previamente ajustada sobre el nivel digital, después de aplicar un índice normalizado para el cálculo de la concentración de clorofila.

Este apartado se explicará detalladamente en el Capítulo VI, dedicado al método operativo.

Finalmente, se procede a sintetizar los conceptos expuestos anteriormente para una mayor comprensión.

- Las imágenes tomadas por la pareja de satélites Sentinel-2, permiten detectar y realizar un seguimiento del aumento de clorofila-a en las aguas, siendo este el parámetro utilizado actualmente para la determinación de la concentración de fitoplancton.

- Mediante la aplicación de un índice normalizado (MCI) sobre las imágenes satélite ya corregidas y tratadas, se es capaz de estimar la concentración de clorofila en  $\text{mg}/\text{m}^3$ .
- Al tener acceso a datos científicos, fiables y de calidad de las concentraciones de clorofila en lugares puntuales del Mar Menor provistos por el Servicio de Pesca de la Región de Murcia, se puede realizar una comparación entre los datos estimados mediante la aplicación de la teledetección y los obtenidos por organismos oficiales.
- Las imágenes satelitales, tienen visión global de la zona y pueden detectar zonas localizadas dónde se esté produciendo un aumento en la concentración de clorofila, sirviendo de complemento a las mediciones puntuales.
- Al utilizarse imágenes obtenidas en plataformas gratuitas al igual que el software utilizado, la teledetección se erige como un método rápido y de bajo coste, con el que detectar variaciones en la composición de las masas de agua. En este orden, La *Figura 38* muestra la capacidad del satélite Sentinel-2 para captar variaciones en la coloración de las aguas.



*Figura 38. Imagen del Mar Menor, dónde se diferencia el color de sus aguas con las del Mar Mediterráneo. Captada el 13-sep-2017 por el sensor MSI de Sentinel-2.*



# Capítulo V

## Material empleado

Debido a la escala de este trabajo fin de grado, se requiere de imágenes cuya cobertura espacial sea lo suficientemente amplia para abarcar el Mar Menor y sus alrededores; pero a la vez con una resolución temporal, espacial y radiométrica suficiente para realizar un seguimiento efectivo de la evolución biológica que ha sufrido el Mar Menor en el último año.

La decisión en decantarse por el satélite Sentinel-2 fue inmediata, ya que se trata de una plataforma englobada en el programa Copernicus, desarrollado por la ESA conjuntamente con la Unión Europea. Se trata junto con la constelación de satélites que pretende lanzar al espacio el programa, uno de los más ambiciosos si no el más, de todos los programas dedicados a la observación terrestre<sup>90</sup>.

El satélite Sentinel-2 a través de su sensor multiespectral (MSI), ofrece una resolución espacial de 10m en las bandas visibles, y no es superior a 60m en las bandas más alejadas. Además, está provisto con 12 bandas, algunas de ellas destinadas a fines concretos como es el caso de la 8A destinada a evaluar la salud de los cultivos.

La resolución temporal del satélite de 10 días, pero esta se ve reducida a 5 con la información captada por su hermano gemelo el Sentinel-2b.

---

<sup>90</sup> European Commission. (2014). *Press Release: EP Adopts European earth observation programme Copernicus.*

Resolución Espectral				Resolución Espacial	Resolución Radiométrica
	Centro de banda (nm)	Amplitud de banda (nm)	Región Espectro	Metros	Bits
Banda 1	443	20	Visible	60	12
Banda 2	490	65	Visible	10	12
Banda 3	560	35	Visible	10	12
Banda 4	665	30	Visible	10	12
Banda 5	705	15	Infrarrojo Cercano	20	12
Banda 6	740	15	Infrarrojo Cercano	20	12
Banda 7	783	20	Infrarrojo Cercano	20	12
Banda 8	842	115	Infrarrojo Cercano	10	12
Banda 8A	865	20	Infrarrojo Cercano	20	12
Banda 9	945	20	Infrarrojo Medio	60	12
Banda 10	1375	30	Infrarrojo Medio	60	12
Banda 11	1610	90	Infrarrojo Lejano	20	12
Banda 12	2190	180	Infrarrojo Lejano	20	12

*Tabla 6. Principales características del sensor MSI. Fuente @ESA*

Como parte del programa espacial de la Unión Europea, la información captada por la constelación de satélites Sentinel, es distribuida gratuitamente a través del portal <https://scihub.copernicus.eu/>, dónde el único requisito para acceder a la información es darse de alta en el sistema.

Las imágenes pueden ser tratadas específicamente por el software SNAP, desarrollado también por la ESA en colaboración con distintos gobiernos integrantes de la Unión Europea, destinado principalmente al tratamiento de productos obtenidos por la familia Sentinel.

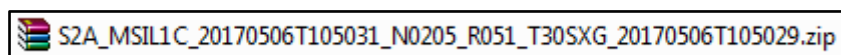
Debido a que las resoluciones proporcionadas por los satélites Sentinel-2 cubren las necesidades de este proyecto, la información es gratuita de acceso libre, se proporciona por parte de la ESA un software específico para el tratamiento de las imágenes Sentinel y a vistas que se trata de un proyecto joven y de futuro, se decide utilizar las imágenes provistas por este satélite.

### **V.1. Adquisición de las imágenes satélite.**

Las imágenes se han obtenido a través del portal Copernicus Open Access Hub, que con su interfaz de fácil utilización, permite seleccionar la región de interés que se pretende estudiar para posteriormente ordenar las imágenes por fecha de captación, data de publicación en el portal o por porcentaje de cobertura nubosa. Adicionalmente se pueden seleccionar las imágenes tomadas en un periodo de tiempo especificado. También ofrece la posibilidad de seleccionar la misión de la cual queremos obtener las imágenes y la plataforma que transporta el sensor (en nuestro caso Sentinel-2a o Sentinel-2b).

Una vez seleccionada la misión espacial, la plataforma que transporta el sensor, la región de interés e introducido el periodo de tiempo que queremos evaluar, el portal nos ofrece una pre-visualización de las imágenes que cumplen con los requisitos establecidos por el usuario. Para adquirir la imagen, solamente queda seleccionarla definitivamente y comenzar la descarga. Las imágenes se descargan en formato .zip.

Una vez completada la descarga, se encuentra un fichero del siguiente estilo:



*Figura 40. Fichero de descarga. Fuente propia.*

Se trata de un fichero con nombre estandarizado. Este formato entra en vigor a partir del 6 de diciembre de 2016 (aunque imágenes tomadas anteriormente ya lo siguen) y se crea con la finalidad de informar al usuario de una forma veraz y continua, sin superar los 256 caracteres que imponen los sistemas Windows para

los nombres de archivos, creando de esta forma una nomenclatura que espera perdurar durante años.

En este apartado se identifican por pasos el formato aplicado a la nomenclatura de la imagen, para posteriormente interpretar la información que el título de la imagen ofrece al usuario<sup>91</sup>. (Fuente ESA, 2017).

- En primer lugar, todas las imágenes procedentes de las plataformas Sentinel-2 siguen el siguiente formato:

MMM\_MSIL1C\_YYYYMMDDHHMMSS\_Nxxyy\_ROOO\_Txxxxx\_<Product  
Discriminator>.SAFE

Dónde el componente **YYYYMMDDHHMMSS** adquiere la mayor importancia, indicando el año, el mes, la hora, el minuto y el segundo en que la imagen fue captada. Los otros componentes del nombre, de importancia relativa, adquieren los siguientes significados:

**-MMM:** se trata del nombre de la misión, ya sea Sentinel-2a/2b.

**-MSIL1C:** denota el nivel de procesamiento del producto.

**-YYYYMMDDHHMMSS:** Se trata de la fecha en que la imagen fue captada.

**-Nxxyy:** Nombra el procesamiento con el que ha sido tratada la imagen.

**-ROOO:** Número de órbita relativa.

**-Txxxxx:** Cuadrícula dónde se halla la imagen.

**-SAFE:** Formato que adquiere el producto. (Standard Archive Format for Europe).

Con el sistema de nomenclatura expuesto de las imágenes satélites utilizadas, como finalización de este apartado, se presenta en la *Tabla 7* un listado con todas las imágenes descargadas, procesadas y utilizadas para la elaboración de este estudio, todas ellas provenientes de la plataforma Sentinel-2A.

---

<sup>91</sup> European Space Agency. (2017). *Naming Convention*.

Nº Imagen	Fecha Adquisición	Nº Imagen	Fecha Adquisición
1	10/06/2016	18	15/02/2017
2	20/06/2016	19	07/03/2017
3	10/07/2016	20	27/03/2017
4	30/07/2016	21	06/04/2017
5	09/08/2016	22	26/04/2017
6	19/08/2016	23	06/05/2017
7	29/08/2016	24	16/05/2017
8	18/09/2016	25	26/05/2017
9	28/09/2016	26	25/06/2017
10	08/10/2016	27	05/07/2017
11	28/10/2016	28	25/07/2017
12	08/11/2016	29	04/08/2017
13	17/11/2016	30	14/08/2017
14	07/12/2016	31	24/08/2017
15	27/12/2016	32	13/09/2017
16	16/01/2017	33	23/09/2017
17	05/02/2017		

*Tabla 7. Número de imágenes y correspondiente fecha de captación utilizadas para la realización de este trabajo.*

El seguimiento realizado en este estudio a la calidad de las aguas del Mar Menor, ha implicado la descarga de 33 imágenes satélite, provenientes de la plataforma Sentinel-2A.

Se ha tratado de obtener por los menos, 2 imágenes pertenecientes a cada mes, desde Junio de 2016 hasta Septiembre de 2017, intentando además elegir aquellas que están provistas de una menor cobertura nubosa. Con el fin de poder realizar un análisis multitemporal, después de haber sido descargadas, las imágenes han sido sometidas a corrección atmosférica para reducir al mínimo posible las interferencias radiométricas producidas por la atmósfera y a corrección geométrica. De este apartado se hablará más detalladamente en el **Capítulo VI** dedicado a la metodología empleada.

A lo largo del periodo de observación de duración superior al año, este trabajo se ha encontrado con dificultades que han afectado al desarrollo del mismo, derivadas por problemas en la adquisición de imágenes por parte del sensor MSI a bordo de la plataforma Sentinel-2A.

Los problemas han sido causados por un defecto en la caracterización espectral de las bandas B1 y B2, que ha derivado en fallos de medidas sobre la superficie terrestre. Este defecto, a fecha de realización de este trabajo, se encuentra bajo estudio por parte de los organismos Europeos implicados en el programa espacial Copernicus<sup>92</sup>.

Por parte de la Agencia Espacial Europea (ESA), mediante la nota de prensa titulada **Sentinel-2 Spectral Response Functions (S2-SRF)** con fecha de Mayo de 2017, anuncia que se está desarrollando un software que permite la corrección de este defecto de adquisición, estimando que se encontrará completamente operativo a finales del año 2017. También se indica, que al tratarse de un problema que afecta a todas las imágenes por igual captadas por el satélite Sentinel-2A se pueden realizar análisis multitemporales entre ellas, sin que los resultados se vean especialmente distorsionados.

Más información sobre este problema se puede encontrar en el portal de la ESA dedicado al sensor del MSI en el apartado de *Document Library*. Se adjunta a continuación la dirección del portal: <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>.

### **V.1.1. Características generales de las imágenes.**

Para finalizar el apartado dedicado a la adquisición de imágenes satélites, conviene identificar parámetros como el tamaño de escena, peso de la imagen y sistema de geográfico de referencia del que vienen provistas.

Entre las características principales de la imagen descargada, destaca su formato. La ESA, como método de clasificación de las imágenes obtenidas las ordena de acuerdo a un código pre-establecido conforme a su nivel de procesamiento.

---

<sup>92</sup> European Space Agency. (2017). *Sentinel-2 Spectral Response Functions (S2-SRF)*.

Las imágenes se encuentran en un nivel 0, antes de ser transmitidas desde la plataforma satélite a las estaciones receptoras en la Tierra. Se encuentran en el máximo nivel 2, cuando a las imágenes se les ha aplicado la corrección atmosférica y la geométrica. Así pues, en este estudio se han obtenido imágenes de primer nivel de procesamiento que posteriormente han recibido un tratamiento digital para llegar al segundo nivel<sup>93</sup>.

La *Tabla 8*, presenta un cuadro resumen facilitado por la ESA, dónde se explican las características principales de los productos más utilizados.

Nombre	Descripción	Producción y distribución	Volumen del archivo
<b>Nivel-1B</b>	Radiación y geometría captada por el sensor.	Generación sistemática a partir de productos 1A. No se distribuye en la actualidad.	27MB (25x23km <sup>2</sup> ) de extensión.
<b>Nivel-1C</b>	Reflectividad con distorsiones atmosféricas y corrección geométrica realizada.	Generación después de la aplicación de correcciones geométricas sobre productos 1B. Distribución automática.	500MB (100x100km <sup>2</sup> ) de extensión.
<b>Nivel-2A</b>	Correcciones sobre la reflectividad y la geometría realizadas.	Generación por usuario particular a partir de la utilización de la caja de herramientas S2TBX.	600MB (100x100km <sup>2</sup> ) de extensión.

*Tabla 8. Resumen de los principales niveles de procesamiento. Fuente: Sentinel-2 User Handbook.*

Una vez la escena ha sido procesada hasta el nivel 1-C, esta se dividirá en imágenes de 100km<sup>2</sup> de extensión proyectadas en sistema de coordenadas UTM/WGS84. El sistema de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) divide la superficie de la Tierra en 60 zonas, cada una de ellas de 8° de latitud y 6° de longitud.

<sup>93</sup> European Space Agency. (2017). *Sentinel-2 MSI Technical Guide*.

La aplicación de este procedimiento da como resultado imágenes de unos 500MB de tamaño. En caso de que el usuario esté interesado en el estudio de una aérea mayor, al tener todas ellas el mismo formato, pueden ser fácilmente unidas.

## V.2. Obtención de datos puntuales.

Debido la necesidad de comparar los resultados obtenidos a través del procesamiento de imágenes espaciales, para la realización de este proyecto se requiere una base de datos fiable y científica que proporcione información sobre la calidad de las aguas del Mar Menor.

Este objetivo se ha conseguido gracias a la colaboración del investigador de la UPCT D. Javier Gilabert, que gracias a su intervención ha proporcionado acceso al *Servidor de Datos Científicos del Mar Menor*.

El servidor se engloba dentro del dominio *Canal Mar Menor* <http://canalmarmenor.es/> fruto de la colaboración entre las instituciones de la Región de Murcia con centros universitarios (UPCT y UMU) y del apoyo internacional brindado por la Unión Europea.

El cometido esencial de esta página es transmitir a la ciudadanía noticias veraces sobre el estado biológico del Mar Menor, evitando percepciones individualistas que puedan crear falsas alarmas. La *Figura 41* muestra el interfaz del *Servidor de Datos Científicos del Mar Menor*.



*Figura 41.* Interfaz del Servidor de Datos Científicos del Mar Menor. Fuente propia.



En concreto, el Servidor de Datos Científicos del Mar Menor, presentado por el investigador de la UPCT D. Javier Gilabert el pasado mes de Julio, permite la consulta pública por parte de cualquier ciudadano de mapas que ofrecen diferentes variables que indican el estado del agua. Concretamente se ofrecen datos de transparencia, clorofila-a, oxígeno disuelto en agua, irradiancia, salinidad, temperatura y turbidez. Además, el servidor cumple con estándares internacionales de calidad, estando los datos obtenidos sometidos a un análisis previo a su publicación por parte de los investigadores involucrados<sup>94</sup>.

### **V.3. Software SNAP (Sentinel Application Platform)<sup>95</sup>.**

SNAP es un software de procesamiento y análisis de imágenes geoespaciales desarrollado por la Agencia Espacial Europea. Se trata de una aplicación creada especialmente para analizar las imágenes provistas por el programa Copernicus, encontrándose actualmente en continuo desarrollo.

Mediante la descarga de las llamadas 'tool boxes' o cajas de herramientas, se es capaz de proveer al programa de comandos precisos, dedicados exclusivamente al tratamiento de imágenes captadas por la constelación Sentinel.

El programa es capaz de analizar imágenes provenientes de otras plataformas espaciales, como las provenientes de los satélites Landsat, Spot, Terra, Modis... entre muchos otros. Debido al abanico de posibilidades que ofrece y tratándose de un proyecto joven e innovador de desarrollo libre, hace pensar que en pocos años el software Sentinel Application Platform se convertirá en un referente mundial en cuanto a software libre de procesamiento y análisis de imágenes geoespaciales se refiere.

Entre sus principales características resalta su interfaz comunicativa e interactiva, que proviene al nuevo usuario de un manual de instrucciones (help contents) de las herramientas que tiene integradas. La integración de los módulos de herramientas en el paquete básico de SNAP, permite a cada usuario

---

<sup>94</sup> Región de Murcia. (2017). *Servidor de datos científicos del Mar Menor*.

<sup>95</sup> European Space Agency. (2017). *Science toolbox exploitation platform*.

personalizar el programa, integrando herramientas especialmente diseñadas para cada misión Sentinel.

Las cajas de herramientas están diseñadas para albergar nuevas funcionalidades desarrolladas por la comunidad científica. Desde la ESA, se afirma que este nuevo método de procesamiento de las imágenes sirve como referente a las nuevas generaciones que tengan pensado dedicarse al análisis de las imágenes del programa Copernicus.

Actualmente se encuentran desarrolladas y en funcionamiento aquellas cajas de herramientas en las que la plataforma Sentinel se encuentra operativa, a saber: Sentinel-1 toolbox (S1TBX), Sentinel-2 toolbox (S2TBX) y Sentinel-3 toolbox (S3TBX).

Como en este trabajo se han utilizado imágenes procedentes del Satélite Sentinel-2, se cree necesario ampliar la información sobre la caja de herramientas utilizada<sup>96</sup>.

-Sentinel-2 toolbox (S2TBX):

Consiste en un conjunto de aplicaciones que permiten la visualización, análisis y procesamiento de imágenes captadas por el sensor MSI a bordo de la plataforma espacial Sentinel-2.

Como caja de herramienta dedicada a los sensores multiespectrales, también admite información de los satélites (*MERIS & AATSR*) pertenecientes a la ESA, como de compañías externas, como es el caso de *RapidEye*, *SPOT*, *MODIS (Aqua and Terra)*, *Landsat (TM)*, *ALOS (AVNIR & PRISM)* entre otros.

Las diversas herramientas que se plantean, juntamente a su integración en el entorno SNAP a través del uso de *JAVA* o *PYTHON*, hacen de la S2TBX una herramienta de fácil uso y gran potencia de procesamiento para el tratamiento de imágenes multiespectrales.

---

<sup>96</sup> European Space Agency. (2017). *Sentinel-2 MSI Technical Guide*.

Otra de las grandes ventajas del programa SNAP, recae en la facilidad de integración que poseen sus productos en programas dedicados a los sistemas de información geográfica, produciendo rasters y vectores que pueden ser utilizados en presentaciones o integrados. Finalmente, la *Tabla 9* presenta las funcionalidades más destacadas de SNAP.

Pretratamiento de imagen	Herramientas de análisis de datos	Herramientas de análisis radiométrico.
Corrección atmosférica y geométrica a partir de la S2TBX.	Creación de histogramas con medias, percentiles, max/min y desviación std.	Clasificación de imágenes a partir de métodos clasificados o no.
Identificación de Regiones de Interés.	Creación de estadísticas geoespaciales, a partir de regiones de interés.	Librería espectral.
Creación de regiones, vectores o puntos de interés.	Elaboración de ecuaciones para la estimación de parámetros a partir de ND.	Cálculo de índices de vegetación, agua o terreno.
Homogenización de las bandas, adoptando todas las mismas resoluciones espaciales (Resample).	Operaciones matemáticas entre bandas espectrales.	Herramienta para la corrección atmosférica y geométrica (Sen2cor).
Recorte de la imagen.	Aplicación de algoritmos propios para la distinción de áreas de interés.	Algoritmos propios, capaces de calcular elementos de interés.
Visualización selectiva de las bandas, en los canales deseados.	Información de las bandas espectrales y de la imagen en conjunto.	

*Tabla 9. Principales funcionalidades de Sentinel Application Platform. Fuente propia.*

#### V.4. Software ArcGIS<sup>97</sup>.

ArcGIS es el nombre de un conjunto de productos software que permiten recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Producido y comercializado por ESRI, se trata de la plataforma líder

<sup>97</sup> Arcgis Web, 2017.

mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica, ya sea desde equipos de escritorios o smartphones.

La aplicación de escritorio que se utiliza en este trabajo, está compuesta por los módulos *ArcReader*, *ArcMap*, *ArcCatalog*, *ArcToolbox*, *ArcScene* y *ArcGlobe*, todos ellos en forma de módulos independientes conectados entre sí, que proporcionan al usuario las herramientas necesarias para la realización o visualización de cualquier tipo de información geográfica.

Concretamente, en este trabajo se utiliza la aplicación ArcGIS para la visualización y selección de los datos obtenidos a través de la plataforma Canal Mar Menor, el cálculo final de la concentración de la clorofila en  $\text{mg/m}^3$  de agua, así como la visualización de imágenes satélite.

Finalmente, para la realización de este trabajo se ha utilizado la versión ArcGIS 10.5 con la licencia Pro, habilitando de este modo todas las funcionalidades disponibles que tiene el software hasta la fecha.

## **V.5. Paquete R<sup>98</sup>.**

R provee un sistema para el análisis de información cuando se utiliza conjuntamente con el paquete R-Commander. Básicamente, R provee el código que lleva a cabo el análisis y R-Commander proporciona la interfaz para que los usuarios puedan introducir los comandos. (Chapman & Hall/CRC Press, 2017)

R-Commander permite a sus usuarios realizar análisis estadísticos de manera gratuita y ser integrado en Linux, Mac y Windows.

Para la realización de este trabajo fin de grado, r ha sido empleado para llevar a cabo análisis de regresión, dispersión de los datos y proponer funciones que establecen una relación entre los datos obtenidos del Mar Menor y los estimados mediante teledetección.

---

<sup>98</sup> R-commander.com

# Capítulo VI

## Método operativo

En este capítulo se procede a exponer los métodos empleados durante la realización de este trabajo para finalmente presentar los resultados y las conclusiones.

El establecimiento de un método operativo que por una parte permita la comparación de las imágenes satélite con garantías y que por otra sea capaz de sortear las dificultades detectadas en el sensor MSI del satélite Sentinel-2A, ha hecho que esta se convierta en una de las tareas más laboriosas sino la más a la hora de realizar este trabajo.

A pesar de los contratiempos, en los siguientes apartados se presenta la metodología aplicada organizada por orden temporal, explicando los componentes utilizados y el motivo de su uso.

### VI.1. Zona de estudio.

Situado en la Región de Murcia, con sus 180km<sup>2</sup> de superficie el Mar Menor, es la laguna salada más grande de Europa. Se encuentra separado del Mar Mediterráneo por una franja de arena de unos 22km de longitud, de amplitud variable que es conocida como La Manga del Mar Menor<sup>99,100</sup>.

El Mar Menor tal y como se conoce en la actualidad, tiene su origen en el Mioceno (20ma), debido al choque y plegamiento de la placa continental Africana con la EuroAsiática.

---

<sup>99</sup> Región de Murcia Digital. (2017). *El origen del Mar Menor*.

<sup>100</sup> Wikipedia La enciclopedia libre. (2016). *El Mar Menor*.

Con el choque se desencadena un intenso episodio de vulcanismo sobre la región, acompañado por la aparición de rocas metamórficas producidas por la fricción entre placas. Durante este periodo, florecen las denominadas como Islas Mayores (Isla Perdiguera, Isla Mayor e Isla del Ciervo) como las menores (Isla Redonda e Isla del Sujeto) todas ellas de origen volcánico. Además, se crean cañones submarinos que causantes de la acumulación de sedimentos, que protegidos de los temporales por la Isla Grosa, finalmente conformarán a lo largo del tiempo la Manga del Mar Menor.

Actualmente, el Mar Menor baña las costas de los municipios de Cartagena, San Javier, Los Alcázares y San Pedro del Pinatar. La historia y el clima de la zona erigen al Mar Menor como referente vacacional, que en los últimos años ha visto aumentada la presión ambiental sobre la zona. Esta presión causada principalmente por las malas técnicas agrícolas, la presión turística y urbanística ve reflejado su impacto en una aceleración del proceso de eutrofización sobre la laguna, especialmente reflejado en un episodio de floración algal en Mayo de 2016.

Vista la importancia que tiene el Mar Menor para la Región y sus habitantes y con el objeto de establecer una metodología que ayude a complementar los servicios establecidos para la monitorización del estado del Mar Menor, se decide utilizar esta zona para la aplicación de los sistemas de teledetección.

## **VI.2. Niveles de procesamiento de las imágenes<sup>101,102</sup>.**

Como se ha comentado en el Capítulo V, la plataforma de descarga de imágenes satélite provenientes del Sentinel-2A proporciona imágenes de un área de 100x100km<sup>2</sup>, georreferenciadas en el sistema de coordenadas cartográficas WGS84 con un nivel de procesamiento 1-C<sup>103</sup>.

En este apartado se pretende dar una visión global del significado de los niveles de procesamiento de una imagen y mostrar los pasos realizados para pasar del

---

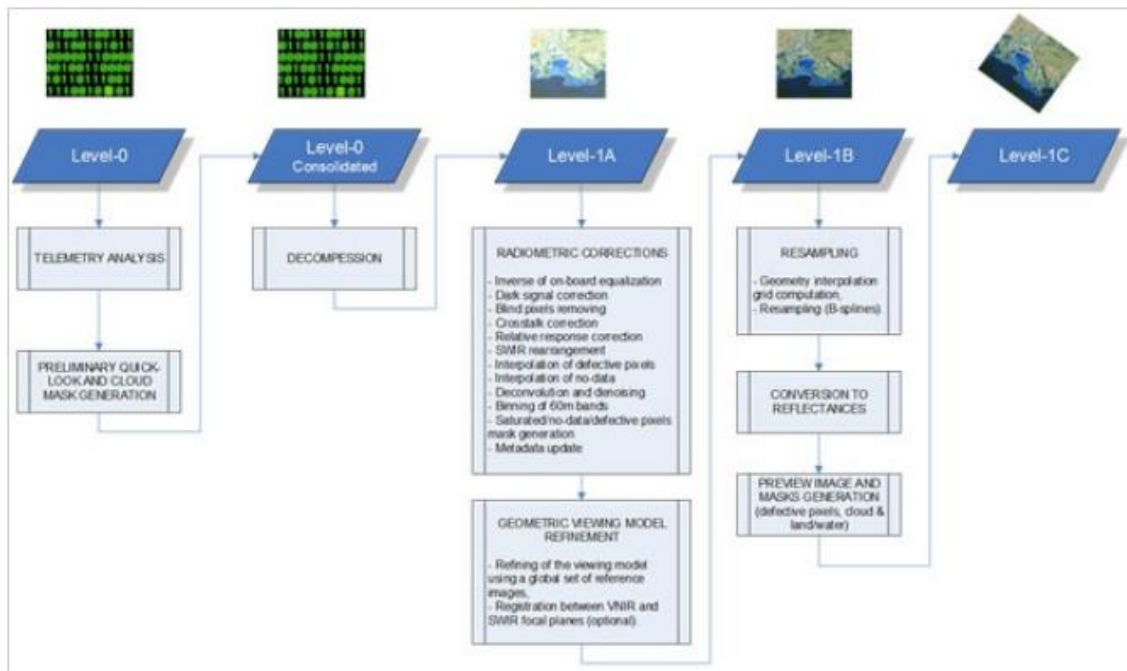
<sup>101</sup> European Space Agency. (2017). *Processing Levels*.

<sup>102</sup> European Space Agency. (2017). *Sentinel-2 MSI Technical Guide*.

<sup>103</sup> European Space Agency. (2016). *Revisit and coverage*.

nivel 1C provisto por el por la plataforma Open Access Hub hasta el 2A necesario para realizar análisis multitemporales.

Así pues, los niveles de procesamiento se conciben como una nomenclatura adoptada por la ESA con el objetivo de estandarizar e informar al usuario del tratamiento que ha recibido previamente esa imagen. La *Figura 42* representa las operaciones realizadas para alcanzar un nivel de procesamiento superior.



*Figura 42.* Procesos ejecutados para la obtención de los diferentes niveles de procesamiento.  
Fuente: <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels>

Por lo tanto y según el nivel de tratamiento digital, se establece un rango creciente, partiendo desde el nivel 0 (cuando la imagen ha sido captada por el sensor y se encuentra representada en forma de bits que darán lugar a la codificación informática) hasta el nivel 2, considerándose este como el nivel máximo de procesado, dando lugar a una imagen georreferenciada y corregida radiométricamente.

De esta forma, una imagen que se encuentra en el nivel 1 puede avanzar hasta el nivel 2 de procesamiento, pero resulta imposible pasar de un nivel de procesamiento superior a otro inferior, debido que la aplicación de algoritmos para dar lugar a las correcciones pertinentes transformada la información original y la hace irrecuperable.

### **VI.2.1. Nivel 0 de procesamiento.**

Este nivel de procesamiento está realizado por las estaciones receptoras terrestres con la información emitida por el sensor MSI. En este nivel de procesamiento, se produce el almacenamiento de la información prevista del sensor. Para ello, antes de ser guardada, se realizan las siguientes operaciones. (ESA, 2017).

- Análisis de la telemetría del sensor para detectar funcionamientos anormales.
- Datación de la información.
- Extracción de la imagen en baja resolución, para realizar una comprobación visual.
- Comprobación de los archivos auxiliares adjuntos a la imagen principal. De esta forma se determina que no hay valores anormales en la radiación detectada.

Una vez aplicados y superados estos pasos, la imagen está lista para el proceso de descompresión, que la llevará al Nivel 1A de procesamiento.

### **VI.2.2. Nivel 1 de procesamiento.**

Dentro de esta categoría se inscriben las imágenes creadas a partir de la descompresión de productos de nivel 0. Así mismo, según los algoritmos aplicados, dentro de este nivel se distinguen Nivel 1A, 1B y 1C respectivamente.

#### **VI.2.2.1. Nivel 1A de procesamiento.**

Resultado de la descompresión de la información enviada por el sensor. En este estado de procesamiento las bandas espectrales son visibles en su resolución siendo capaces de realizar combinaciones entre ellas y visualizar la imagen.

Sin embargo, a este tipo de producto no se le ha aplicado ningún tipo de corrección radiométrica ni geométrica, pudiendo existir en la imagen píxeles a los que no se les asigna su correspondiente ND. La imagen tampoco consta de un sistema de referencia geométrico.



### **VI.2.2.2. Nivel 1B de procesamiento.**

Como características principales resalta que este tipo de producto presenta una primera corrección radiométrica, dónde se restauran los píxeles o líneas perdidas, pero no se ejecuta ningún tipo de corrección geométrica, adjuntando únicamente varios puntos de control. Este nivel de procesamiento es producido al aplicar las siguientes correcciones sobre un producto con forma 1A. (Fuente: ESA, *MSI Technical Guide*).

1. Corrección radiométrica incluyendo:
  - Asignación de ND a los píxeles que no poseen.
  - Identificación de ND que sobresale de la media.
  - Eliminación del ruido en las bandas de elevada resolución espacial.
2. Se adjunta a la imagen una rejilla geográfica con un sistema de referencia geográfico definido.
3. Para aumentar la calidad del método, se establecen puntos de control en la imagen con sus coordenadas definidas.
4. Finalmente, la imagen es comprimida y está lista para pasar al siguiente nivel de procesamiento.

### **VI.2.2.3. Nivel 1C de procesamiento.**

Se trata del nivel de procesamiento en el cual se obtienen las imágenes en el portal Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>); por lo tanto, resulta imprescindible conocer sus características.

Este nivel de procesamiento incluye una profundización de las correcciones radiométricas previamente aplicadas en el nivel 1B, así como correcciones geométricas consistentes en la ortorrectificación (eliminación de las distorsiones geométricas) y el establecimiento de un sistema de referencia global con precisión inferior al píxel.

Para lograr estos objetivos, al nivel 1B de procesamiento se han aplicado los siguientes procedimientos:

1. Unión y cómputo de la rejilla geométrica. Con ello se establece una relación entre la geometría dispuesta por el sensor y la geometría real de la superficie terrestre, procediendo de este modo a la ortorrectificación de la imagen.
2. Unión de cada banda espectral con la geometría de la ortoimagen calculada en el primer punto.
3. Cálculo de máscaras. Las máscaras de nubosidad, agua y terreno son generadas en este apartado.
4. Compresión de la imagen para dar lugar al nivel de procesamiento 1C.

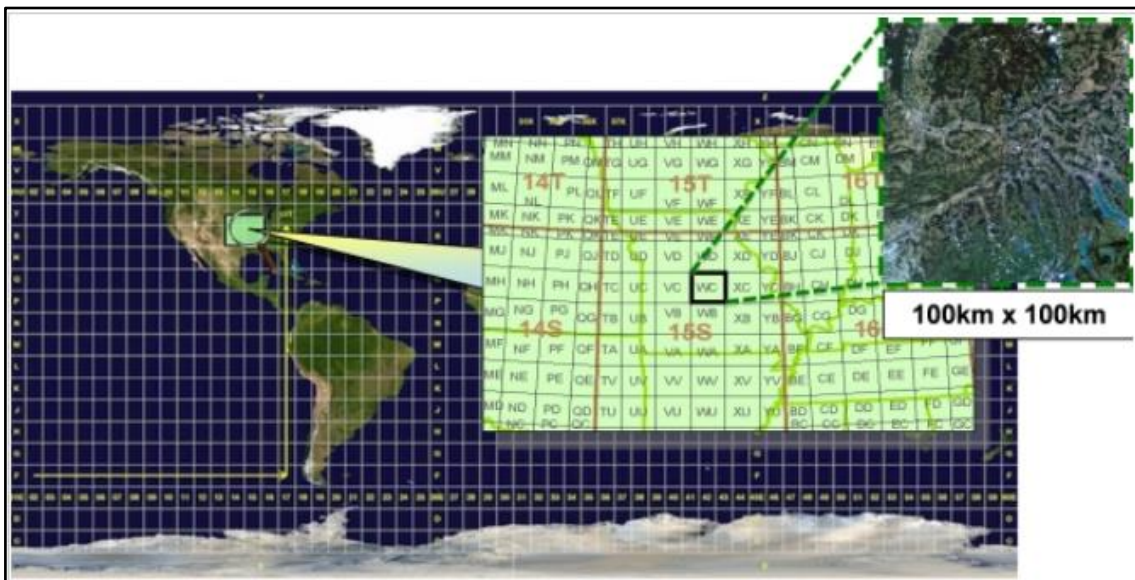


Figura 43. Tamaño de imagen del Nivel 1C de Procesamiento. Fuente @Esa Sentinel2MSI Product Types.

### VI.2.3. Nivel 2A de procesamiento.

Se trata del nivel de procesamiento utilizado para el análisis multitemporal de las imágenes. En este nivel se produce al incluir una clasificación de escenas y aplicar una corrección atmosférica sobre los productos de nivel 1C ortorrectificados. El resultado de este procedimiento es un producto ortorrectificado, con un sistema de referencia definido que muestra la reflectancia a nivel de la superficie terrestre corrigiendo las interferencias atmosféricas.

Como el Nivel 2A presenta los valores de radiación superficiales (BOA), se trata del nivel de procesamiento demandado para poder comparar con garantías

diferentes imágenes, al tratarse de un nivel que corrige las interferencias atmosféricas y las geométricas, proporcionando una base sólida para el análisis multitemporal. Desgraciadamente, este nivel de procesamiento no está disponible en la web de descargas, sino que solamente se encuentra disponible el 1C, siendo necesario la aplicación de comandos por parte del usuario para obtener el nivel de procesamiento 2A. Para lograr este cometido, es necesario la descarga de la caja de herramientas S2TBX que se encuentra en el directorio <http://step.esa.int/main/download/> y una vez instalada dirigirse dentro del programa SNAP a las siguientes pestañas:

*Optical* → *Thematic Land Processing* → *Sen2Cor*

Sen2Cor es la aplicación dentro del programa SNAP que permite convertir los productos Nivel 1C a Nivel 2A. Para ello la técnica empleada en esta aplicación se basa en la combinación de 4 algoritmos diferentes que permiten realizar una corrección atmosférica de precisión.

#### **VI.2.3.1. Eliminación de los cirrus<sup>104</sup>.**

El primer algoritmo aplicado tiene como objetivo la eliminación de los cirrus. Este tipo de nubosidad es detectada alrededor de los 1380nm del espectro electromagnético y constituye uno de los inconvenientes más importantes a la hora de ejecutar una corrección atmosférica de calidad. El método consiste en la detectar este tipo de nubosidad en el infrarrojo cercano para así proceder a su eliminación. Para ello se aplica la ecuación 7. (Ec. 7):

$$p^*(\gamma) = p_c(\gamma) + T_c(\gamma) * p_v(\gamma)$$

Dónde  $p^*(\gamma)$  denota la reflectividad en altura.

$(\gamma)$  es centro del ancho del canal de observación.

$p_c(\gamma)$  Se trata de la reflectividad provocada por cirrus.

La transmisión dentro de los cirrus se denomina como  $T_c(\gamma)$ .

$p_v(\gamma)$  Se trata de la reflectividad terrestre sin interferencia de cirrus.

---

<sup>104</sup> Rudolf Richter, Xingjuan Wang, Martin BachMann. (2011). *Correction of cirrus effects in Sentinel-2 type of imagery*. Wessling, Germany: ReSe Applications.

Despejando la fórmula anterior, se obtiene la primera ecuación utilizada por el procesador Sen2Cor para la corrección atmosférica. (Richter, R., Wang, X., Bachmann, M., and Schlaepfer, 2010).

### VI.2.3.2. Corrección de la dispersión provocada por aerosoles<sup>105</sup>.

La eliminación de la dispersión óptica producida por los aerosoles (AOT) en sus siglas en inglés, provee una mayor transparencia en la visualización a través de la atmósfera.

La corrección de este efecto se realiza con la aplicación del algoritmo llamado *Dense Dark Vegetation* o (DDV) que utiliza la banda 12 perteneciente al infrarrojo lejano (SWIR) y correlaciona su reflectancia con las bandas 4 (rojo) y la 2 (azul), de la siguiente manera: (X. Q. Zhang a, L. P. Yang b, Y. Yamaguchi; 2010). (Ec.8).

$$p'_R = p_{2.1}/2 \quad y \quad p'_b = p_{2.1}/4$$

Dónde  $p'_R$  se corresponde a la reflectancia de la banda perteneciente al rojo (B4).  $p'_b$  se trata de la reflectancia de la banda centrada en el azul (B2). Finalmente  $p_{2.1}$  representa la longitud de onda perteneciente al SWIR (B12).

Para que aplicar el algoritmo, la imagen que se quiere tratar necesita de áreas dónde se conozca su reflectividad. Como se ha comentado en apartados anteriores, las zonas con presencia de agua tienen una reflectancia que se puede considerar nula.

Son estos cuerpos acuosos los que el algoritmo considera para identificar y cuantificar la existencia de aerosoles que se han interpuesto entre el sensor y la superficie a observar en el momento que se toma la imagen.

---

<sup>105</sup> X.Q. Zhang, L. P. Yang, Y. Yamaguchi. (2010). *Retrieval of Aerosol Optical Depth Over Urban Areas Using Terra/Modis Data*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Volume XXXVIII. Kyoto, Japan.

Como resultado de este procedimiento la imagen queda corregida radiométricamente de los efectos producidos por los cirrus y SNAP crea una máscara con el nombre *cirrus\_clouds* para que el usuario pueda utilizarla.

### VI.2.3.3. Corrección de la dispersión provocada por el vapor de agua<sup>106</sup>.

La eliminación de la columna de vapor de agua está realizada por el algoritmo *Atmospheric Pre-Corrected Differential Absorption* (APDA). (D.Schläpfer, (1998). (Ec.9)

$$R_{APDA} = \frac{L_m - L_{atm}}{LIR([Y_R], [L_R - L_{atm}])}$$

Dónde  $L_m$  corresponde a la media de la reflectancia del canal.

$L_{atm}$  representa a la media de la reflectividad atmosférica.

$LIR$  se trata de la regresión lineal entre las bandas de comparación.

Este algoritmo se aplica a las bandas B8a y B9 del Sentinel-2. La banda B8a es el canal de referencia para la ventana atmosférica. Por su lado, la banda B9 sirve como medida para observar la absorción atmosférica.

Finalmente, el contenido de vapor de agua en columna atmosférica, es resultado de considerar la reflectancia de la superficie terrestre en el canal de medida (B9) igual que para el canal de referencia (B8a).

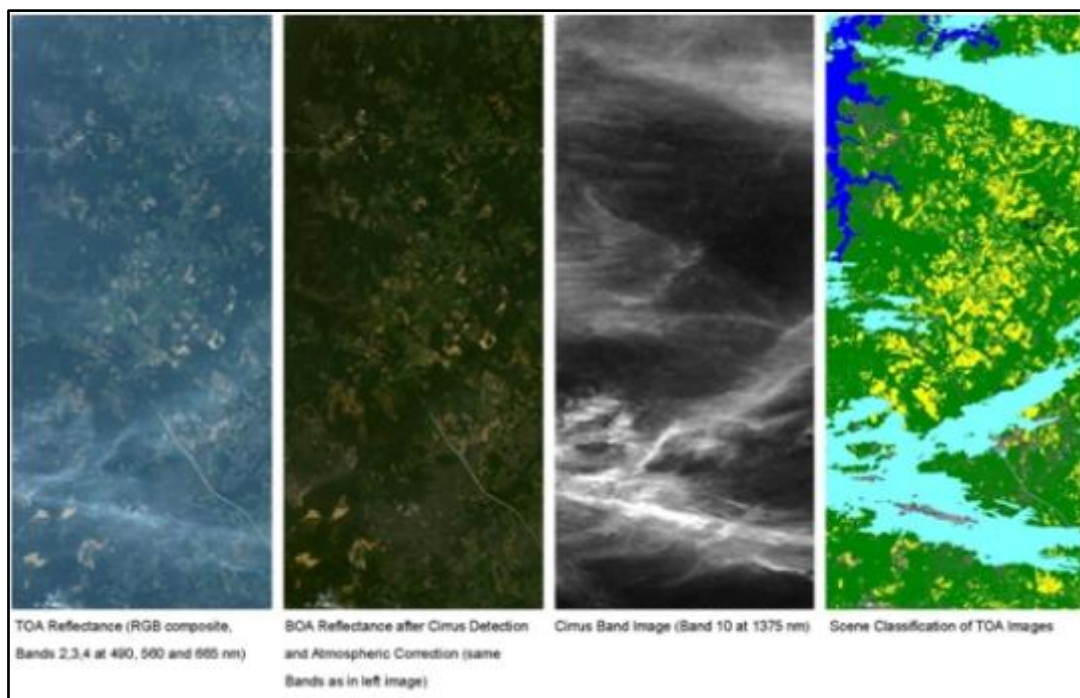
La aplicación Sen2Cor es una herramienta de fácil aplicación sobre la imagen de nivel de procesamiento 1C. Su uso permite crear un producto con un nivel de procesamiento superior (2A) que, a través de la aplicación de los algoritmos expuestos anteriormente, producen una completa corrección atmosférica y radiométrica sobre una imagen ya corregida geométricamente.

---

<sup>106</sup> Daniel Schläpfer, Christoph C. Bore, Johannes Keller and Klaus Ittekk. (1995). *Atmospheric Pre-corrected Differential Absorption Techniques To Retrieve Columnar Water Vapor: Application to Aviris 91/95 Data*.

Fruto de la utilización de los algoritmos se obtienen unos subproductos denominados como máscaras, creadas automáticamente y que pueden servir al usuario como regiones de interés (ROI) o simplemente para realizar una evaluación de las mismas. El ejemplo de uso de los subproductos se muestra gráficamente con la *Figura 44*.

Así pues, nos encontramos ante una herramienta potente y versátil, aplicada en todas las imágenes utilizadas en este proyecto.



*Figura 44.* La imagen muestra de derecha a izquierda (1) la visión de la imagen con Nivel 1C; (2) la misma imagen corregida por Sen2Cor; (3) la banda de cirrus aislada y creada como máscara; (4) clasificación de la imagen. Fuente: <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-2>

### VI.3. Homogenización de bandas.

El sensor MSI a bordo de los satélites Sentinel-2, es capaz de captar la radiación electromagnética en 13 bandas distintas, desde el azul hasta el infrarrojo lejano, siendo estas de diferentes resoluciones espaciales. En concreto, 4 bandas tienen una resolución espacial de 10m, 3 la tienen de 60m y el resto de bandas tienen una resolución espacial de 20m.

Vista la diversidad de resoluciones que es capaz de captar el sensor, para proseguir con el análisis de la imagen se hace necesario homogeneizar banda hasta la resolución deseada.

Para realizar una homogenización de las bandas hay que dirigirse al siguiente directorio dentro de SNAP:

*Raster* → *Geometric Operations* → *Resampling*

La función *Resampling* es un algoritmo que permite otorgar a las bandas que se seleccionen, la resolución geométrica que se desee, ya sea 10m, 20m o 60m.

Cuando se desea pasar una banda de una resolución espacial inferior (60m o 20m) a una superior, el algoritmo divide los píxeles iniciales hasta que los lados de los nuevos píxeles creados son de 10x10m. Una vez llegada a esta resolución, se procede a asignarles el mismo nivel digital ND que tenían al principio. Es decir, la imagen contiene la misma información que al principio.

Sin embargo, cuando se desea pasar de una resolución mayor a otra inferior, por ejemplo, de 10m o 20m a 60m de resolución, la función *Resampling* aumenta el tamaño de píxel de 10m de lado a 60m de lado y el nivel digital ND de este último es determinado por la media del nivel digital contenido en cada píxel de resolución de 10m de lado. Así pues, se produce una pérdida de información en la imagen y detalle, pero que puede resultar de utilidad facilitando los cálculos cuando no se requiere precisión.

#### **VI.4. Recorte de la zona de estudio.**

Cuando se aplica el Sen2Cor a la imagen de Nivel 1C, obtenemos un producto de dimensiones 100x100km<sup>2</sup> que resulta excesivamente grande para realizar un análisis multitemporal de la zona del Mar Menor, que únicamente ocupa unos 180km<sup>2</sup> de superficie. Es por ese motivo, que se hace necesario un recorte de la zona de interés, facilitando el uso de la imagen y aumentando la velocidad de los cálculos posteriores. Para realizar el recorte, se hace zoom sobre la zona de interés y posteriormente se da clic derecho en el ratón. Posteriormente, el

programa SNAP muestra un cuadro de dialogo en el cual se selecciona la opción *Spatial Subset of View*.



*Figura 45. Recorte de la zona de estudio. Fuente propia.*

## **VI.5. Cálculo del índice máximo de clorofila (MCI)<sup>107</sup>.**

La determinación de la concentración de clorofila es uno de los índices clave a la hora de establecer el nivel de eutrofización de las aguas. En general, el índice de clorofila se establece como medida del fitoplancton y las algas que habitan el agua y que realizan actividad fotosintética.

Los cambios del color en las aguas captados por los satélites de teledetección pueden ser estudiados y analizados de forma que se establezca una relación entre imágenes tomadas en diferentes fechas, observando la evolución de las aguas y determinando de una manera cuantitativa mediante análisis estadísticos, la cantidad estimada de clorofila que poseen las aguas.

Como objetivo de este trabajo, dedicado a la vigilancia de la calidad del agua aplicando la teledetección, se decide utilizar el *Índice Máximo de Clorofila (MCI)*, tratándose de un algoritmo de reciente aplicación con idéntico funcionamiento al

---

<sup>107</sup> Delegido J., Tenjo C., Ruiz-Verdú A., Peña R., Moreno J. (2014). Modelo empírico para la determinación de clorofila-a en aguas continentales a partir de los futuros Sentinel-2 y 3. Validación con imágenes HICO. *Revista de teledetección*, 41, 37-47.



(*FLH*) *Fluorescence Line Height*, desarrollado por la NASA para su uso con productos procedentes del satélite MERIS.

#### **VI.5.1. Principios físicos y algoritmo<sup>108, 109</sup>.**

El *Maximum Chlorophyll Index (MCI)* basa su funcionamiento en la reflectividad de los pigmentos de clorofila en torno los 685nm, longitud de onda correspondiente en el espectro electromagnético a la coloración verde. Esta afirmación fue demostrada en 1977 por Neville and Gower pero no fue hasta 1990 que la técnica se extrapoló para ser utilizada en observaciones de la superficie terrestre mediante el uso de avionetas (Gower and Borstad, 1990).

Así pues, al conocerse la firma espectral producida por el agua, consistente en una absorción casi total de la radiación electromagnética y el comportamiento espectral de la clorofila, caracterizado por un aumento de reflectividad en torno los 685nm, se dedujo que un incremento de la reflectividad sobre los 685nm en una masa de agua era debido al contenido de esta en material fotosintético (Fisher and Kronfeld, 1990).

La determinación de la materia fotosintética mediante la aplicación de este método, da resultados efectivos en un rango de concentraciones de 1mg/m<sup>3</sup> y 20mg/m<sup>3</sup> de clorofila en solución acuosa. La concentración obtenida por la aplicación de este método es muy dependiente del estado atmosférico, siendo muy deseable que la imagen sea captada sin nubosidad o en su defecto se apliquen máscaras para impedir la interferencia de sombras o nubosidad. Así pues, aprovechando la reflectividad de la clorofila, se detecta la presencia de las especies vegetales siendo las más representativas en las masas de agua el fitoplancton y las algas.

Para la aplicación de este método en los productos obtenidos por el satélite Sentinel-2, el algoritmo del Índice Máximo de Clorofila, determina el aumento de reflectancia en la banda correspondiente al rojo (B4, 665nm) respecto a la reflectancia normal característica del agua clara, sin presencia de

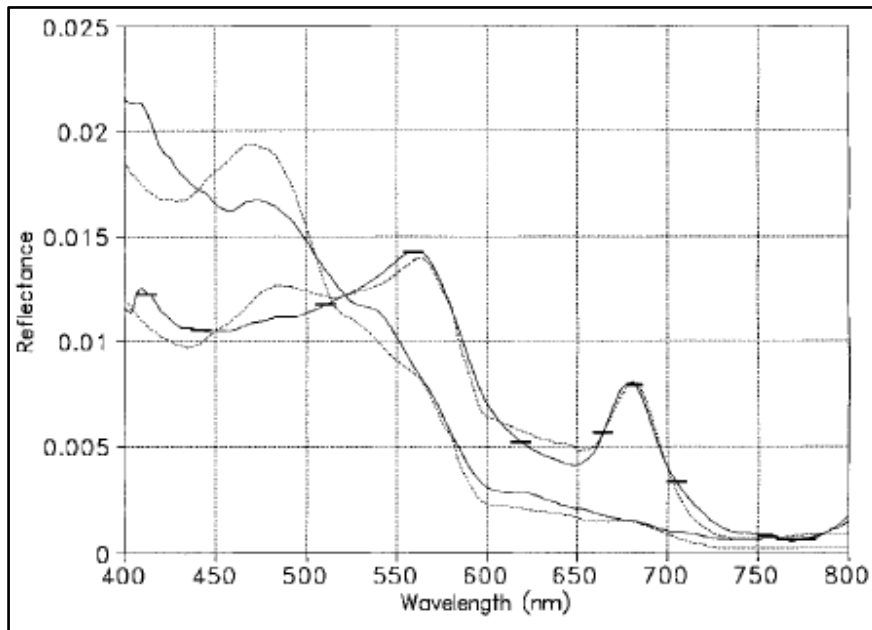
---

<sup>108</sup> European Spatial Agency. (2017). BEAM Data Processors – Algorithm Specification FLH/MCI

<sup>109</sup> J.F.R. Gower, R. Doerffer, G. A. Borstad. (1990). *Interpretation of the 685nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of fluorescence, absorption and scattering, and its observation by MERIS.*

microorganismos ni turbidez. El algoritmo encargado de simular la reflectancia del agua clara se le denomina 'baseline' o línea de base.

Así pues, se combinan las bandas B4 (665nm) correspondiente al rojo y las bandas B5 (705nm) y B6 (740nm) correspondientes al aumento de reflectividad de las especies vegetales en el infrarrojo cercano. La *Figura 46* muestra gráficamente el funcionamiento del algoritmo.



*Figura 46. Visión espectral del comportamiento de la clorofila diluida en un medio acuoso respecto al agua pura. Como se puede observar se distingue un aumento de la reflectancia centrado en los 685nm. Fuente: Kent University.*

Sintetizando, para el cálculo del MCI se necesita una banda de referencia, obtenida de evaluar el comportamiento espectral del agua pura. Además, se tiene que establecer la altura del 'pico' de reflectancia en el espectro infrarrojo.

Finalmente se exponen las ecuaciones aplicadas para la determinación del índice de clorofila:

#### Cálculo del MCI:

La ecuación desarrollada por Gower, data de 2003 y es pionera en determinar un índice de clorofila que permita correlacionarse con los datos obtenidos *in situ*.

La ecuación responde a la siguiente forma: (Ec. 10)

$$\text{Altura del pico} = L_2 - L_1 - (L_3 - L_1) * \frac{(\gamma_2 - \gamma_1)}{(\gamma_3 - \gamma_1)}$$

Dónde los subíndices 1 y 3 hacen referencia a los canales B4 y B6.

El subíndice 2, hace referencia al pico de reflectancia en el canal B5.

Sin embargo, debido al avance de las investigaciones en la aplicación la ecuación anterior para la determinación de concentraciones de clorofila en medios acuosos, la ecuación empleada en SNAP difiere ligeramente de la anterior. La utilización del índice de clorofila se restringe a situaciones de poca nubosidad y de gran transparencia atmosférica, ya que es muy sensible al estado atmosférico.

Así pues, los desarrolladores de SNAP para incluir la ecuación, han introducido un factor adicional a la fórmula original para corregir la influencia producida por las nubes. Se concibe una fórmula mejorada que permite obtener resultados menos dependientes del estado atmosférico.

La fórmula aplicada por el equipo de desarrolladores de SNAP sigue la siguiente distribución (Ec. 11):

$$MCI = L_2 - k * (L_1 + (L_3 - L_1) * \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_3 - \gamma_1})$$

Dónde los subíndices 1 y 3 hacen referencia a los canales B4 y B6.

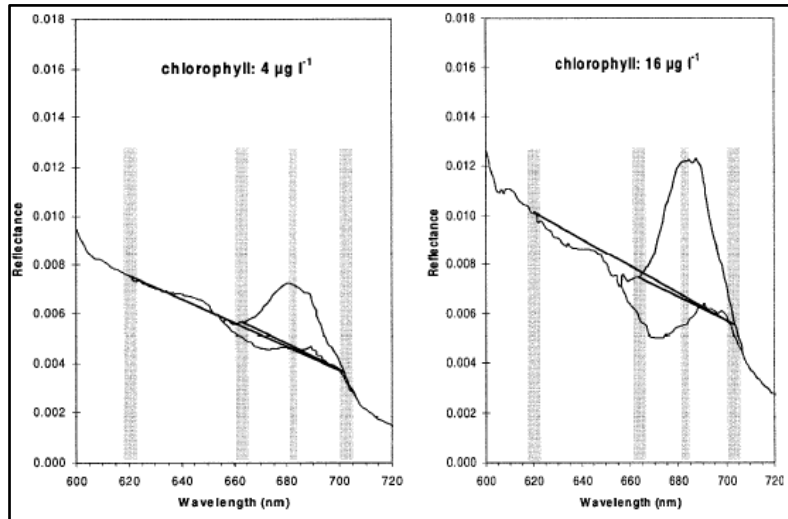
El subíndice 2, hace referencia al pico de reflectancia en el canal B5.

Y la letra k, se trata de un valor variable a introducir por el usuario.

### **VI.5.2. Ámbito de uso y consideraciones.**

El máximo índice de clorofila está testado y tiene eficacia comprobada en entre 1mg/m<sup>3</sup> y los 20mg/m<sup>3</sup> de concentración de clorofila en el agua observada. A partir de estos valores, la ecuación pierde eficacia y por tanto la correlación del índice disminuye.

A parte de los rangos de concentración de clorofila, el índice es muy sensible a las variaciones en las condiciones atmosféricas, siendo muy recomendable que la adquisición y posterior análisis multitemporal de las imágenes se haya realizado con semejantes condiciones atmosféricas o en su defecto, con la aplicación de máscaras que eviten la interferencia de nubes y sus respectivas sombras.



**Figura 47.** Aumento de la reflectancia centrada en la longitud de banda 665nm. A mayor concentración de clorofila, mayor altura del salto.  
 Fuente: *Internal Journal of Remote Sensing, 2003.*

Para la obtención de resultados precisos sobre el contenido de clorofila en el agua, el autor sugiere que se aplique una batimetría sobre la zona de estudio, excluyendo aquellas zonas en las que la profundidad sea menor a 5m; ya que las algas situadas hasta esa profundidad interfieren en los niveles medidos del índice. El índice está adaptado y mejorado en su integración a SNAP, permitiendo un seguimiento de floraciones intensas de algas y la observación de la evolución de la calidad de las aguas.

En conclusión, la parte del espectro electromagnético correspondiente al rojo e infrarrojo cercano del agua, proporciona información sobre la diversidad de bioelementos presentes en ella, que con la aplicación del satélite Sentinel-2A y su sensor multiespectral de 13 canales, supone una revolución en la monitorización de cuerpos de agua en zonas costera o lagunas interiores.

Aunque se presente una elevada variabilidad en la banda correspondiente al rojo dependiente a la concentración de clorofila, toda esta variabilidad no es solamente representada por esta, sino que influyen elementos como el fitoplancton, las cianobacterias e incluso la vegetación del fondo marino. Así pues, aunque se trate de un algoritmo que dependa mucho de las condiciones atmosféricas, se espera que una incorrecta corrección de esta no influya en sobremanera en el cálculo del índice, ya que este se centra en un ancho de banda relativamente pequeño. (Gower, 2003).

### **VI.5.3. Aplicación del Índice Máximo de Clorofila al entorno del Mar Menor.**

Una vez analizado y comprendido el funcionamiento del Índice Máximo de Clorofila, puede ser aplicado en los pertinentes estudios.

Primeramente, se visualiza en SNAP el recorte de la zona de estudio que se creó en el paso anterior. Esto aumentará la velocidad de cómputo del ordenador al tener que procesar un número menor de píxeles.

A continuación, se sigue la ruta:

*Optical→Thematic Water Processing→S2\_MCI\_Processor*

Al seguir la dirección anterior, el programa mostrará una ventana de diálogo, en la cual el usuario es el encargado de seleccionar el nivel de procesamiento del producto al que le quiere calcular el MCI, así como las otras variables vistas en la fórmula anterior.

Finalmente, y como último paso, se selecciona la máscara, es decir, la zona dónde se va a computar el MCI. Para ello, nos servimos de los subproductos ofrecidos por el nivel de procesamiento 2A, encontrando entre ellos la máscara llamada *sc/\_water*.

Esta máscara se obtiene después del procesamiento de productos de nivel 1C, y muestra en pantalla todas aquellas zonas en las que se detecta agua, siempre que esta no esté cubierta de nubes o por sus sombras.

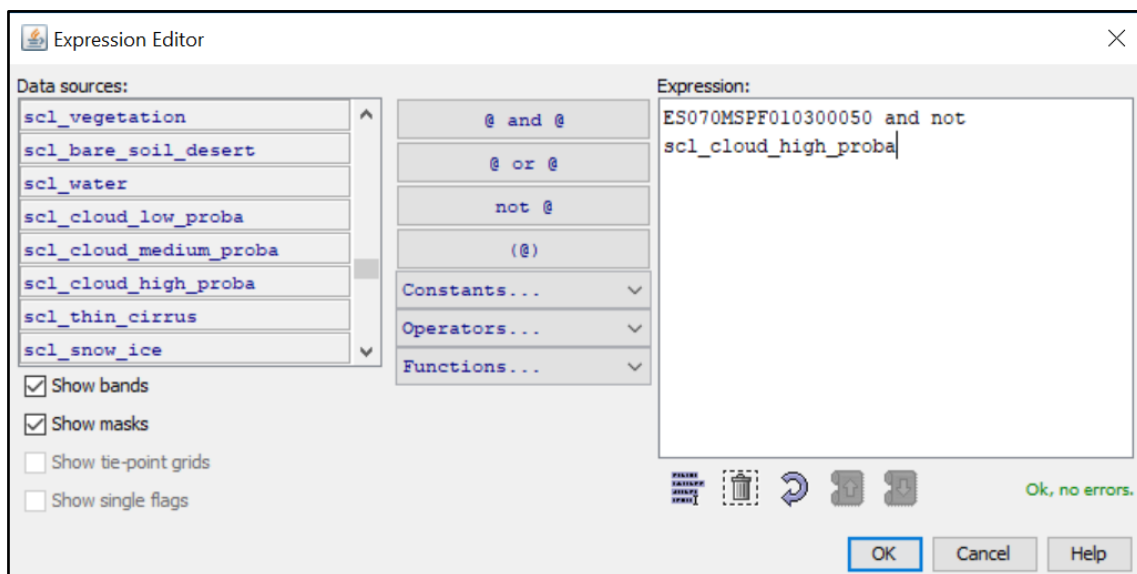
Sin embargo, y debido al funcionamiento irregular que ha presentado el sensor a bordo del Sentinel-2A, durante el periodo de tiempo que abarca este análisis multitemporal, en bastantes imágenes, la máscara *sc/\_water* no se ha generado correctamente.

Este contratiempo se ha mitigado mediante la introducción de una nueva máscara que abarca la totalidad del Mar Menor. Para ello, se ha procedido a descargar un archivo Esri Shape File (shp.), desde el portal de la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) e introducirlo posteriormente en el programa SNAP, siguiendo esta ruta:

*Vector→Import→EsriShapefile*

Se puede editar la transparencia y el tamaño de la capa importada mediante el comando *Mask\_Manager*. Permite una visualización en pantalla de todas las máscaras adjuntadas al archivo.

Una vez aplicada la zona de interés, es necesario suprimir de ella todas las interferencias causadas por la nubosidad y sus sombras. Esto se consigue mediante la realización de consultas SQL, que se encuentran en el apartado dedicado a la edición de la máscara. La *Figura 48* muestra la realización de las consultas SQL realizadas para la realización de este trabajo.



*Figura 48. Ejemplo de edición de la expresión de la máscara. En ella se eliminan todas las interferencias causadas por las nubes. Fuente Propia.*

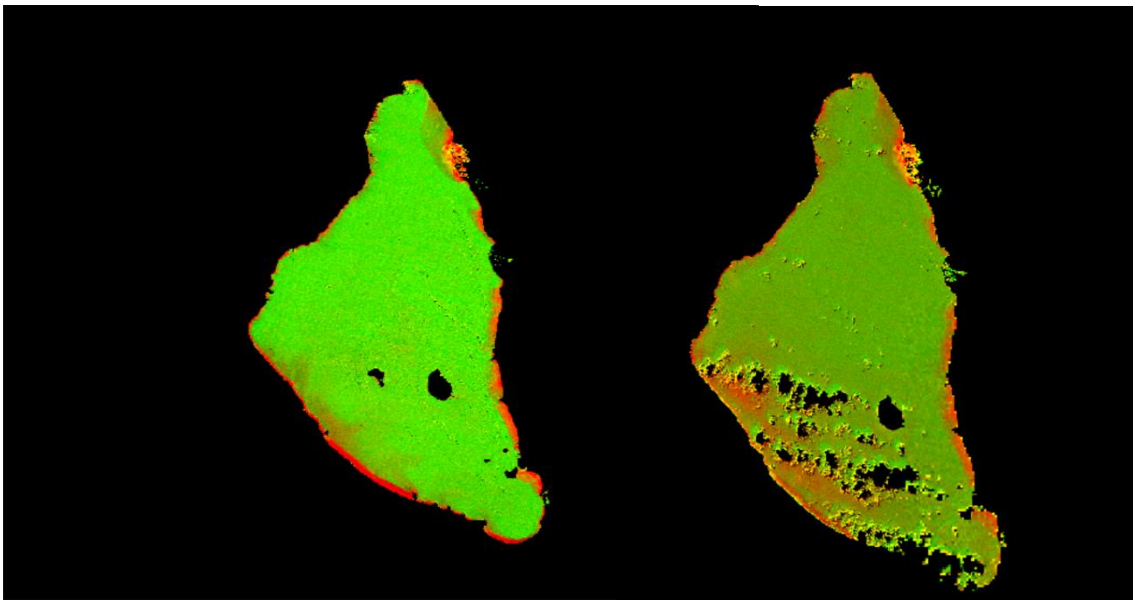
#### VI.5.4. Interpretación del resultado.

Como resultado de la aplicación del procedimiento, se obtiene un output dónde cada píxel contiene un valor correspondiente al máximo índice de clorofila. La combinación RGB de la banda de referencia creada con la correspondiente al MCI, nos proporciona una visión global del estado del Mar Menor. Las tonalidades rojizas representan valores elevados de clorofila y por lo tanto mayor presencia de algas y/o fitoplancton.

Se puede apreciar que este índice funciona correctamente ya que las zonas costeras de reducida profundidad son las que mayor contenido en clorofila presentan. Esto es debido a las interferencias producidas por las algas situadas en aguas de poca profundidad.

Además, debido a la aplicación de las máscaras y las consultas SQL, se consigue eliminar en gran manera las interferencias producidas por las nubes. Como en los lugares cubiertos por la nubosidad no se ha podido ver la superficie del agua y se las ha excluido del cómputo del índice, esas zonas están representadas a igual que las zonas de tierra firme, con el color negro y el valor NaN (Not a Number).

La *Figura 49* representa una comparativa visual entre una imagen sin nubosidad con fecha 07/12/2016 (izquierda) y otra con presencia de ella, con fecha 08/10/2016. En ambas se distinguen las tonalidades rojizas provocadas por la concentración de clorofila. La mayor intensidad de coloración corresponde a zonas costeras, dónde el sensor capta las algas en el fondo marino.



*Figura 49. Comparativa visual entre una imagen sin nubosidad con fecha 07/12/2016 (izquierda) y otra con presencia de ella, con fecha 08/10/2016. Fuente Propia.*

Por lo tanto, aplicando los conocimientos adquiridos en la bibliografía, observamos que se producen interferencias en el índice, causadas por la reflectancia de las algas situadas a poca profundidad. Además, se distinguen en ambas imágenes zonas de color rojizo que indican mayores concentraciones de clorofila. Así pues, todo hace pensar que el índice ha sido aplicado correctamente y que los resultados obtenidos a primera vista con su aplicación son satisfactorios.

#### **VI.6. Transformación del MCI a concentración de clorofila con el uso de los Sistemas de Información Geográfica.**

Como se comentaba anteriormente, el MCI se trata de un indicador de la concentración de clorofila en el agua y no proporciona una concentración cuantificable de la misma. Para lograr estimar la concentración de clorofila, se puede recurrir a dos opciones:

- Utilización de una recta de regresión obtenida a partir de bibliografía.
- Elaboración propia de una recta de regresión a partir de datos georreferenciados medidos sobre el terreno el día que el sensor capta la imagen.

En la elaboración de este trabajo fin de grado, se ha propuesto inicialmente la realización de este apartado a partir de una recta de regresión obtenida mediante el estudio de bibliografía, al no disponer a primera instancia de información sobre el terreno de calidad. Finalmente, se obtuvo acceso a dicha información por lo que a continuación se plantean las dos alternativas posibles:

##### -Opción 1.

Al no disponer de datos sobre el terreno sobre los que comparar los resultados, se decide realizar una búsqueda intensiva de ecuaciones que relacionen el Índice Máximo de Clorofila con la concentración en  $\text{mg}/\text{m}^3$  de clorofila en la masa de agua. Al tratarse de un índice de aplicación reciente a Sentinel-2, las fuentes de información que ofrecen una relación entre ambos son escasas.



Finalmente, se encuentra una fórmula desarrollada por la universidad de Wisconsin (Canadá) donde se establece una relación entre el índice y la concentración de clorofila. Según los datos proporcionados por la misma, la bondad de ajuste es buena, con un  $R^2=0,72$ . La ecuación obtenida tiene la siguiente forma. Ec. 12:

$$Clh = 1457 * MCI + 2.895$$

Dónde **Clh** hace referencia al contenido de clorofila del agua en mg/m<sup>3</sup>.

Y **MCI** se corresponde al valor asignado a cada píxel por el índice.

Una vez establecida la relación entre la concentración de clorofila y el índice de clorofila, se hace necesario la intervención de los SIG en el proceso. Con la aplicación del software ArcGIS, se transforma el valor de MCI de cada píxel a contenido de clorofila en mg/m<sup>3</sup> utilizando la herramienta **Raster Calculator**.

La herramienta forma parte de ArcToolbox, y permite realizar operaciones matemáticas sobre los valores de píxel del ráster de entrada.

El resultado de su aplicación, es un output con el mismo número de píxeles que el inicial, pero de diferente valor. El valor de los píxeles habrá variado de acorde a la expresión matemática introducida.

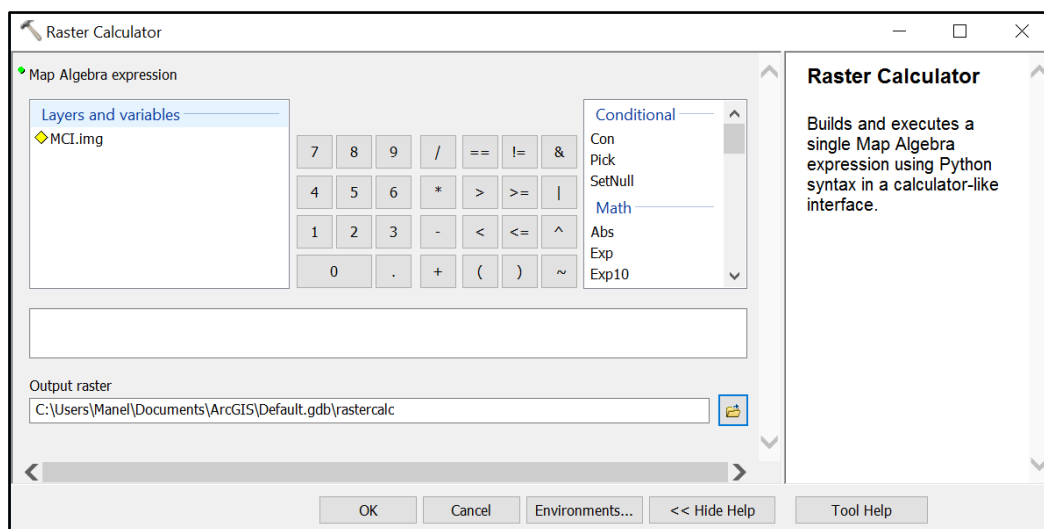


Figura 50. Cuadro diálogo al ejecutar Raster Calculator. Fuente: Propia.

### -Opción 2.

El cálculo de la concentración de clorofila mediante la opción 2, consiste en correlacionar los valores obtenidos sobre el terreno el mismo día que el sensor capta la imagen. Para aplicar este método con garantía, el primer requisito es obtener una fuente de datos de calidad para que puedan ser correlacionados con el Máximo Índice de Clorofila (MCI).

En este trabajo, se ha logrado acceso a la base de datos puntuales del Canal Mar Menor, y mediante el empleo de métodos estadísticos se ha logrado obtener una relación de ambos indicadores. Para lograr el objetivo, se ha procedido a evaluar de manera global y puntual el estado biológico del mar menor.

#### 1. Evaluación global del contenido de clorofila en el Mar Menor:

De aplicación más rápida y directa, se ha procedido a descargar los datos de concentración media de clorofila proporcionados por Canal Mar Menor. Estos datos ofrecen una estimación media de la concentración de clorofila en  $\text{mg/m}^3$  en formato Excel desde finales del mes de Marzo 2017 y están disponibles para el conjunto de la ciudadanía siguiendo el enlace: <http://ocean.upct.es:8080/marmenor/#>.

Una vez descargados los datos, y para poder realizar la correlación correspondiente, se procede a calcular el Máximo Índice de Clorofila (MCI) medio de las imágenes satélite correspondientes al rango de observación ofrecido por el Canal Mar Menor. Así pues, las imágenes utilizadas han sido las siguientes:

Nº de Imagen	Fecha Adquisición	Nº de Imagen	Fecha Adquisición
1	07/03/2017	9	25/06/2017
2	27/03/2017	10	05/07/2017
3	06/04/2017	11	25/07/2017
4	26/04/2017	12	04/08/2017
5	06/05/2017	13	14/08/2017
6	16/05/2017	14	24/08/2017
7	05/06/2017	15	13/09/2017
8	15/06/2017	16	23/09/2017

*Tabla 10. Listado de imágenes utilizadas para la evaluación global del contenido de clorofila. Fuente propia.*

Para el valor medio del Máximo Índice de Clorofila, es necesario dirigirse al programa SNAP y desde allí abrir los diferentes índices de clorofila. Una vez son mostrados por pantalla, se sigue la siguiente ruta:

*Analysis → Statics*

Con la imagen seleccionada, esta ruta permite obtener gran parte de los parámetros estadísticos de la imagen. Entre ellos se encuentran la media y la mediana, así como los cuartiles, los máximos y mínimos y la desviación media. Para calcular los datos estadísticos de la zona de interés se añade una ROI (Region of Interest), que abarca únicamente la extensión de las aguas del Mar Menor.

Los datos estadísticos son calculados y exportados a formato Excel para realizar una comparación global numérica de la evolución del estado biológico del Mar Menor.

## 2. Evaluación puntual del contenido de clorofila en el Mar Menor:

De aplicación más costosa y laboriosa que el anterior procedimiento, este método persigue calcular de manera puntual la relación entre la concentración de clorofila proporcionada por el Canal Mar Menor en sus estaciones de muestreo, con el valor del Índice Máximo de Clorofila obtenido por teledetección.

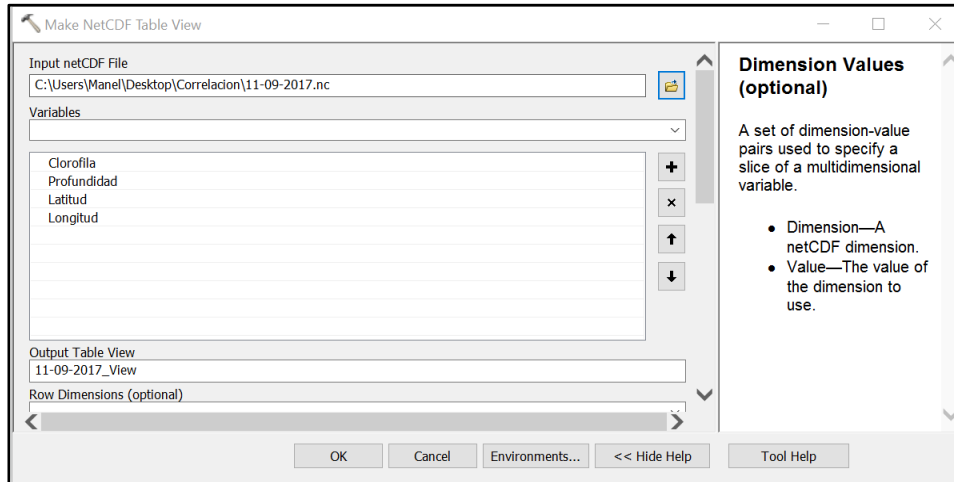
Para ello, se descargan los datos puntuales que se encuentran en pestaña *L1* dentro de la página web Canal Mar Menor. A diferencia de los datos generalistas anteriores ofrecidos por el portal, estos requieren de identificación no estando disponibles para la mayoría de la población.

Siendo el objeto de este trabajo puramente académico, se pudo conseguir acceso gracias a la mediación de D. Javier Gilabert, responsable investigador de la UPCT involucrado en la gestión del contenido en dicho portal.

Para preservar la calidad de la información, los datos son proporcionados en formato nc. de uso extendido para la comunidad científica.

Para proceder a su lectura, no sirven lectores normales de datos como el paquete Office, sino que se requiere de software de programación como es el caso de Matlab. Para la realización de este trabajo, se ha procedido a abrir este tipo de formato mediante ArcGis, demostrando una vez más la potencia del programa y su versatilidad.

Para tal cometido, se ha utilizado la herramienta ***Make netCDF Table*** que establece un cuadro diálogo con el usuario. Por suerte, con esta herramienta se pueden elegir los campos y el orden que tendrán en la tabla creada para posteriormente ser filtrados. La *Figura 51* representa las variables seleccionadas para la realización de este trabajo.



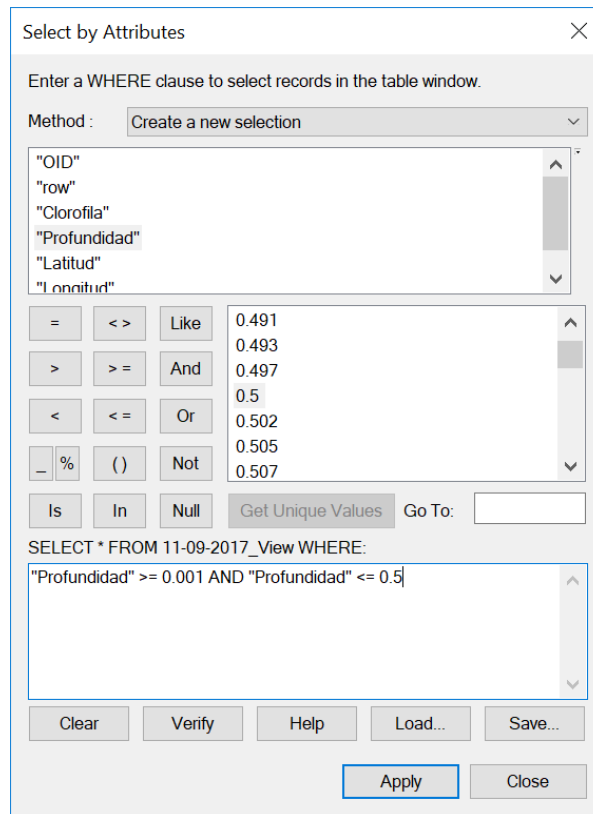
*Figura 51. Variables seleccionadas para la realización de este estudio. Fuente Propia.*

Con la creación de la tabla de datos con las variables seleccionadas, se observa que el rango de valores tomados alcanza los 6 metros de profundidad. A esa profundidad, debido a la turbidez y absorción del agua de la radiación electromagnética, la teledetección se ve limitada a una observación de la capa más superficial del agua.

Puesto que los datos de gran profundidad no son representables con el empleo de la teledetección, se hace necesario un filtrado de datos para que los contenidos de clorofila tomados a grandes profundidades no interfieran con la concentración de clorofila tomada en superficie.

Para lograr este objetivo y delimitar los datos proporcionados, se realizan consultas SQL. Esta consulta está definida en este estudio por el especial interés en seleccionar la capa más superficial de agua.

La *Figura 52* muestra la consulta realizada en este trabajo. Como se observa los valores seleccionados son aquellos que han sido tomados desde el nivel de la superficie hasta los 0,5m de profundidad.



**Figura 52.** Consulta SQL aplicada. *Fuente Propia.*

Los datos obtenidos en la consulta, son a continuación exportados formato txt., estando las columnas de los registros separadas mediante punto y coma. Una vez en formato txt. se copian los registros en formato Excel, desde el cual se crea un base de datos utilizando Access.

La base de datos creada con los datos seleccionados, es abierta en el programa ArcGIS, siendo exportada a continuación a formato *shape (shp)*.

El anterior método operativo ha sido aplicado para seleccionar los datos que son de interés para la realización de este trabajo y finalmente obtener una shapefile que permita ser importada al programa SNAP para realizar en un estudio de regresión.

Adicionalmente, una vez importada la *shapefile* se muestra por pantalla la ubicación de los puntos de medición. Las medidas son tomadas en diez puntos en aguas del Mar Menor y en un punto en aguas del Mar Mediterráneo. La *Tabla 11* muestra la ubicación de los puntos de muestreo.

	Latitud	Longitud
<b>Punto 1</b>	37°48'42	0°47'04
<b>Punto 2</b>	37°45'38	0°48'28
<b>Punto 3</b>	37°45'42	0°47'01
<b>Punto 4</b>	37°44'54	0°44'59
<b>Punto 5</b>	37°42'37	0°46'42
<b>Punto 6</b>	37°43'05	0°50'23
<b>Punto 7</b>	37°41'40	0°48'37
<b>Punto 8</b>	37°40'01	0°48'34
<b>Punto 9</b>	37°39'35	0°46'55
<b>Punto 10</b>	37°39'06	0°43'44
<b>Punto 11</b>	37°41'14	0°47'02

*Tabla 11. Coordenadas en WGS84 de los puntos de muestreo. Fuente Propia.*



*Figura 53. Localización de los puntos de muestreo. Fuente Propia.*

# Capítulo VII

## Análisis y resultados

En este apartado se pretenden mostrar y discutir los resultados obtenidos al seguir los procedimientos descritos anteriormente. En primer lugar, se muestran los resultados al ejecutar Sen2Cor en cuanto a la corrección atmosférica se refiere. Seguidamente se presenta una serie numérica que muestra la evolución del Índice Máximo de Clorofila en el Mar Menor desde el mes de Junio 2016 hasta Septiembre 2017. Para poder realizar una comparativa visual de la zona y no solamente una comparación global numérica. En el anejo se presentan las imágenes obtenidas al realizar este proceso.

A continuación, se presentan las relaciones existentes entre los datos puntuales y el Índice Máximo de Clorofila obtenido mediante teledetección, así como una comparativa de los valores de clorofila obtenidos mediante teledetección y los obtenidos mediante mediciones puntuales.

Para terminar, el capítulo dedicado a análisis y resultados, se hará una breve conclusión, explicando el porqué de los resultados obtenidos.

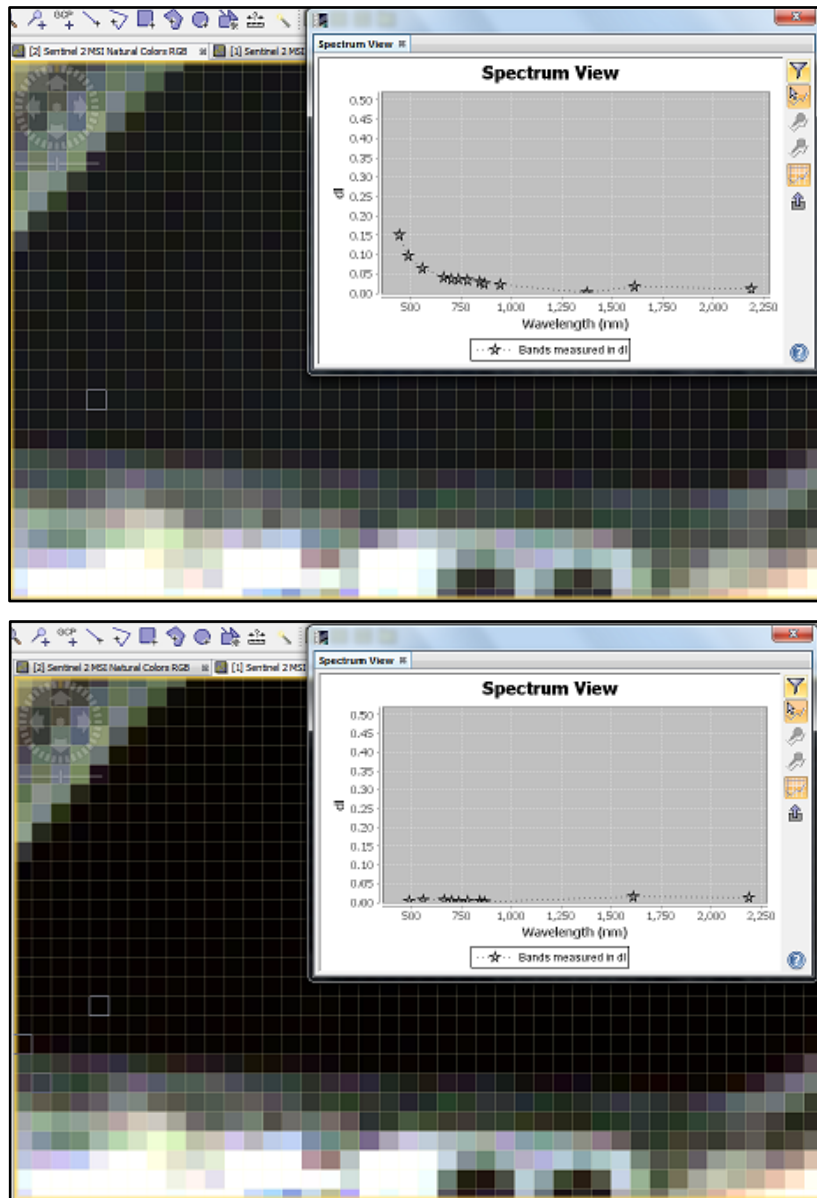
### VII.1. Corrección atmosférica.

Para el cálculo del Índice Máximo de Clorofila (MCI) resulta esencial que previamente se haya realizado una corrección atmosférica de calidad, ya que este índice es bastante sensible al efecto de los cirrus. Además, la nubosidad y las sombras tienen que ser eliminadas para no interferir en el cálculo.

Para comprobar que se han realizado correctamente las correcciones atmosféricas pertinentes y se han eliminado las distorsiones provocadas por nubes y aerosoles, se selecciona un píxel de una imagen sin corregir y seguidamente se compara su espectro con el mismo píxel de la misma imagen una vez corregida atmosféricamente.



La *Figura 54* muestra la comparativa entre ambos espectros, observándose una disminución de la reflectividad en las longitudes de onda corta al corregir atmosféricamente la imagen. Los altos valores de reflectividad en ondas cortas, son causados principalmente por cirrus y aerosoles.



*Figura 54. Espectro radiométrico del mismo píxel previa y post corrección atmosférica. Imagen tomada el 07/12/2016. Fuente propia.*

Para comprobar el efecto de la corrección atmosférica sobre la imagen y determinar que ha sido efectivo, se ha visualizado la misma imagen antes y después de ser aplicado el Sen2Cor. Para resaltar el resultado y mostrar la claridad con que se observa la imagen, se ha seleccionado el mismo píxel en

ambas, perteneciente a una balsa de riego situada en las inmediaciones del Mar Menor. Se ha seleccionado un píxel que representa agua porque el agua tiene un comportamiento absorbente de la radiación, reflejando muy poca.

En la primera imagen, no corregida atmosféricamente, se puede observar como el espectro visible mostrado tiene una alta reflectividad en las bandas cortas. Este efecto es producido por distorsión atmosférica. Sin embargo, en la imagen de la derecha corregida atmosféricamente no se aprecia ese aumento de reflectividad en las primeras bandas, asemejándose su espectro visible a los observados en bibliografía.

Como se ha demostrado, se concluye que las correcciones atmosféricas realizadas sobre la imagen han sido de utilidad y eficacia.

## **VII.2. Evolución del Índice Máximo de Clorofila (MCI).**

Se trata de uno de los principales objetivos de este estudio. Para ello, una vez corregidas atmosféricamente, homogeneizadas las bandas y recortada la imagen original se realiza el cálculo del mencionado índice.

Dada la imposibilidad de mostrar visualmente todas las imágenes necesarias para la realización de este apartado, para realizar una comparación visual de la evolución de los niveles de clorofila en el Mar Menor se ha optado por adjuntar en el anejo las imágenes tratadas de las que consta el presente estudio.

Para el cálculo numérico de la evolución del índice de clorofila, se ha optado por determinar la concentración media obtenida mediante teledetección. Tal y como se ha comentado en el Capítulo VI dedicado al método operativo, para el cálculo medio del índice se han eliminado las interferencias provocadas por las nubes y se ha establecido como zona de interés la perteneciente al Mar Menor, sin incluir ninguna zona colindante.

La *Tabla 12* indica la media del Índice Máximo de Clorofila y la fecha a partir de la cual ha sido obtenido. Con los datos obtenidos se ha construido el *Gráfico 1* que permite de forma visual analizar la evolución del estado biológico del Mar Menor a lo largo del periodo de observación.

Fecha	Índice de clorofila medio	Fecha	Índice de clorofila medio
20/06/2016	0,0074	27/03/2017	0,001
10/07/2016	0,0074	06/04/2017	0,0016
30/07/2016	0,0058	26/04/2017	0,0011
09/08/2016	0,004	06/05/2017	0,0025
29/08/2016	0,006	16/05/2017	0,002
08/09/2016	0,0052	26/05/2017	0,0033
28/09/2016	0,0077	05/06/2017	0,0037
08/10/2016	0,0056	15/06/2017	0,0033
28/10/2016	0,0041	25/06/2017	0,0014
08/11/2016	0,0045	05/07/2017	0,0045
17/11/2016	0,0041	25/07/2017	0,0035
07/12/2016	0,003	04/08/2017	0,0033
27/12/2016	0,0032	14/08/2017	0,0052
16/01/2017	0,0073	24/08/2017	0,0048
05/02/2017	0,0057	13/09/2017	0,0023
15/02/2017	0,0028	23/09/2017	0,0033
07/03/2017	0,000378		

Tabla 12. Valores de MCI correspondientes a la fecha de adquisición de la imagen. Fuente Propia.

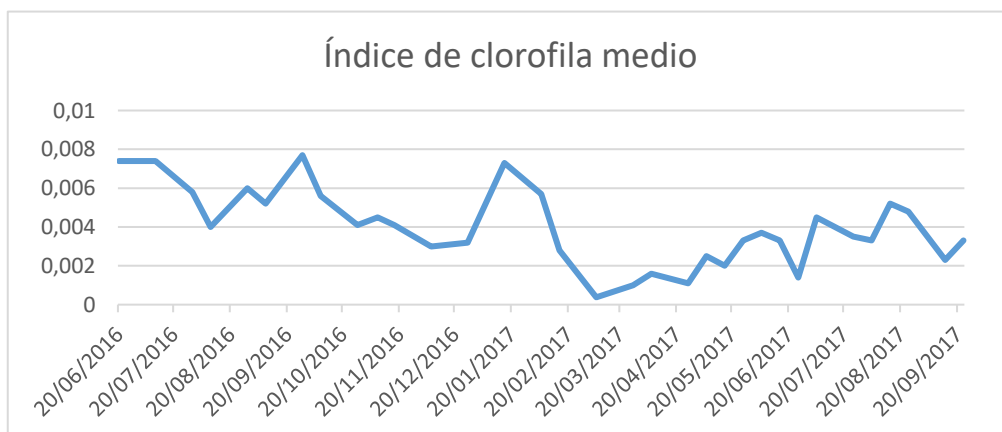


Gráfico 1. Datos medios del Máximo Índice de Clorofila en el Mar Menor. Fuente propia.

Ajustándonos al valor medio del Índice de Clorofila calculado durante la serie histórica, observamos que los mayores valores y en teoría mayor concentración de clorofila en el agua, se encuentran entorno a Septiembre del año 2016 y a principios de año 2017.

Es a partir del mes de Febrero de 2017 cuando se observa una drástica caída en los valores del índice, alcanzándose el mínimo absoluto a principios del mes de Marzo. Por lo tanto, del análisis del *Gráfico 1* podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Desde el mes de Junio de 2016 hasta finales del mes de Septiembre del mismo año, se mantienen valores altos en el índice de clorofila, obteniéndose el máximo absoluto de la serie en el mes de Septiembre. Esto significa a priori una mayor concentración de algas y/o fitoplancton y una peor calidad de las aguas.
- Pasado el mes de Septiembre, se produce un descenso continuo del valor del índice, hasta finales del mes de Diciembre de 2016, cuando se produce un repunte en la actividad fotosintética según los resultados aportados por el índice.
- Después del repunte, el valor del índice cae bruscamente hasta situarse en el mínimo de la serie a principios del mes de Marzo. Según bibliografía, un menor valor del índice indica agua de mayor calidad, sin apenas presencia de fitoplancton y de gran transparencia.
- Finalmente, a partir del mínimo absoluto, se produce un aumento gradual de los valores del índice, con algún altibajo, pero con tendencia ascendente hasta el fin de la serie. Esto se traduce en un empeoramiento progresivo de la calidad de las aguas y un aumento de la presencia de organismos fotosintéticos.

### VII.3. Relación del MCI con los datos obtenidos sobre el terreno.

Otro de los objetivos perseguidos en este estudio es el de establecer una relación sólida entre el Índice Máximo de Clorofila y la concentración de clorofila medida real existente en el Mar Menor. De esta forma, se pretende determinar la cantidad de clorofila en  $\text{mg}/\text{m}^3$  sin necesidad de desplazarse a la zona, intentando establecer esta técnica como una ampliación a las tareas de vigilancia ambiental que se ejecutan en el Mar Menor.

En este trabajo se ha realizado una estimación de los niveles de clorofila existentes en el agua creando una recta de regresión a partir de los datos puntuales proporcionados por Canal Mar Menor, y por otra parte se ha utilizado una fórmula de bibliografía desarrollada por la universidad de Wisconsin directamente sobre el índice de clorofila medio.

Se presentan a continuación los resultados de ambos procedimientos:

#### 1. Mediante la elaboración propia de una recta de regresión.

Se formula una ecuación que permite estimar el contenido de clorofila por píxel. Para ello, representamos la localización de los datos puntuales en la imagen y seleccionamos el valor del Índice de Clorofila en el píxel que contiene el punto.

Punto de Medición	MCI	Clorofila ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	Latitud	Longitud
1	-0,00052	1,44956876	37°48'42	0°47'04
2	0,00069	1,23504	37°45'38	0°48'28
3	-0,00052	1,32215454	37°45'42	0°47'01
4	-0,00052	1,01246	37°44'54	0°44'59
5	0,0038	4,20759993	37°42'37	0°46'42
6	0,0049	1,33796503	37°43'05	0°50'23
7	-0,00049	3,59967276	37°41'40	0°48'37
8	0,00406	1,34044999	37°40'01	0°48'34
9	0,00074	2,99454284	37°39'35	0°46'55
10	-0,00042	4,90750001	37°39'06	0°43'44
11	-0,00593	4,96720589	37°41'14	0°47'02

**Tabla 13.** Valores de MCI y Clorofila correspondientes en los puntos de medición. Fecha imagen 11/09/2017  
Fuente Propia.

Realizando este procedimiento, el programa SNAP determina que la relación existente entre las dos variables sigue una relación lineal con una bondad de ajuste de 0,1.

Este resultado significa que se puede calcular el 10% de la variabilidad, y que se trata de un ajuste muy malo. Visto el resultado, se concluye que no se ha podido establecer una relación entre el MCI y el contenido de clorofila de forma puntual.

Entre los motivos más probables de no haber logrado una buena correlación, destaca un filtrado incorrecto de los datos suministrados por Canal Mar Menor. El análisis se realizó con datos obtenidos entre la superficie y los 0,5 metros de profundidad, pero la teledetección es capaz de alcanzar los 5m de profundidad en aguas claras. (Gower, 2003).

Como las aguas de Mar Menor distan de ser transparentes, se propone para futuros estudios, ponderar los datos de tal forma, que los niveles de clorofila obtenidos en superficie representen mayormente a la imagen, pero sin olvidar los datos obtenidos a mayor profundidad, disminuyendo la importancia de los datos conforme se aumenta la profundidad.

## 2. Elaboración de una recta de regresión para valores medios.

Al disponer de los valores medios medidos en el Mar Menor proporcionados por la plataforma Canal Mar Menor, se decide calcular los valores medios de MCI de cada mes, pudiendo de esta forma establecer una relación entre ellos.

La serie mensual empieza el primer mes que el Canal Mar Menor ofrece datos, viéndose limitada la profundidad de este estudio:

MES	CLH(mg/m <sup>3</sup> )	MCI
<b>MARZO</b>	0,05988	0,00068
<b>ABRIL</b>	2,02703	0,00135
<b>MAYO</b>	2,30101	0,00260
<b>JUNIO</b>	1,59737	0,00280
<b>JULIO</b>	2,10215	0,00400
<b>AGOSTO</b>	5,47295	0,00443

*Tabla 14. Datos mensuales de la concentración media de clorofila y el Índice Máximo de Clorofila. Fuente propia.*

Con los datos expuestos anteriormente, realizamos un ajuste mediante regresión lineal, de esta forma se determina la relación existente entre ambas variables, si es que la hay. Para llevar a cabo el ajuste y no realizarlo de forma manual, se requiere el uso del software *r-commander*. La *Figura 55* representa la salida por pantalla una vez realizado el ajuste.

```

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -0.2472     1.1282  -0.219  0.8373
MCI           948.5266    381.3651   2.487  0.0677 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

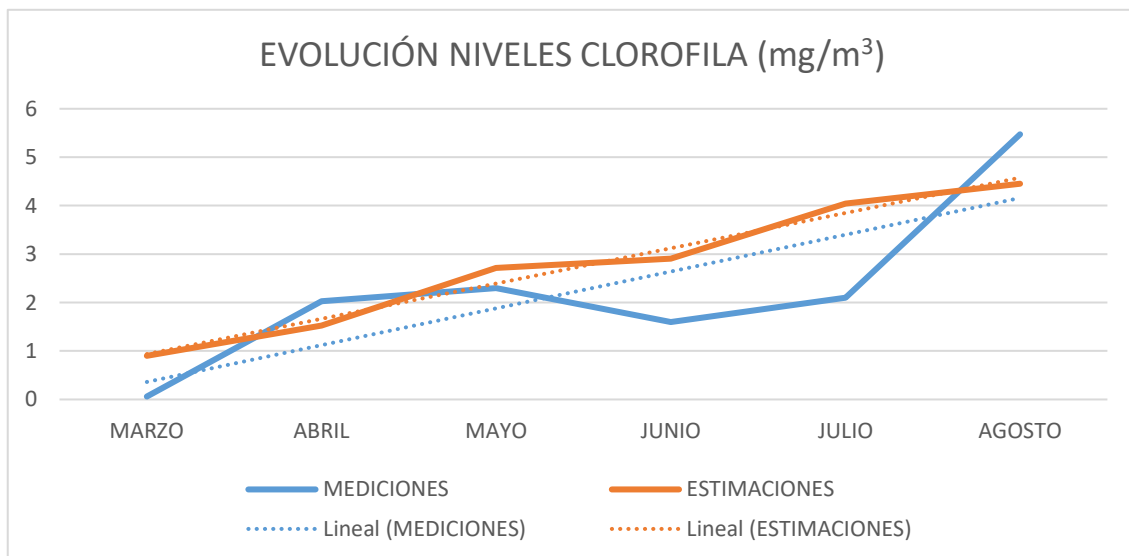
Residual standard error: 1.241 on 4 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6073, Adjusted R-squared:  0.5091
    
```

*Figura 55.* Salida por pantalla de los resultados obtenidos al realizar la regresión lineal. Fuente Propia.

Para realizar la regresión lineal, la variable explicada ha sido el contenido en clorofila ofrecido por Canal Mar Menor y la explicativa los valores medios del Índice Máximo de Clorofila. De esta manera, la ecuación lineal propuesta por *r-commander* queda explicada de la siguiente forma: (Ec.13).

$$Clh = 948,5266 MCI - 0,2472$$

La bondad de ajuste, referida a la medida que explica la variabilidad de las variables, tiene un valor de 0,6073 (**R<sup>2</sup>=0.6073**). Se trata de un ajuste malo, que permite únicamente mostrar tendencias de los niveles de clorofila a partir de la variación del MCI, sin ser capaz de calcular exactamente el valor de clorofila real.



*Gráfico 2.* Comparativa entre valores estimados mediante teledetección y los valores proporcionados por Canal Mar Menor. Fuente Propia.

### 3. Aplicación de la recta de regresión propuesta por la universidad de Wisconsin.

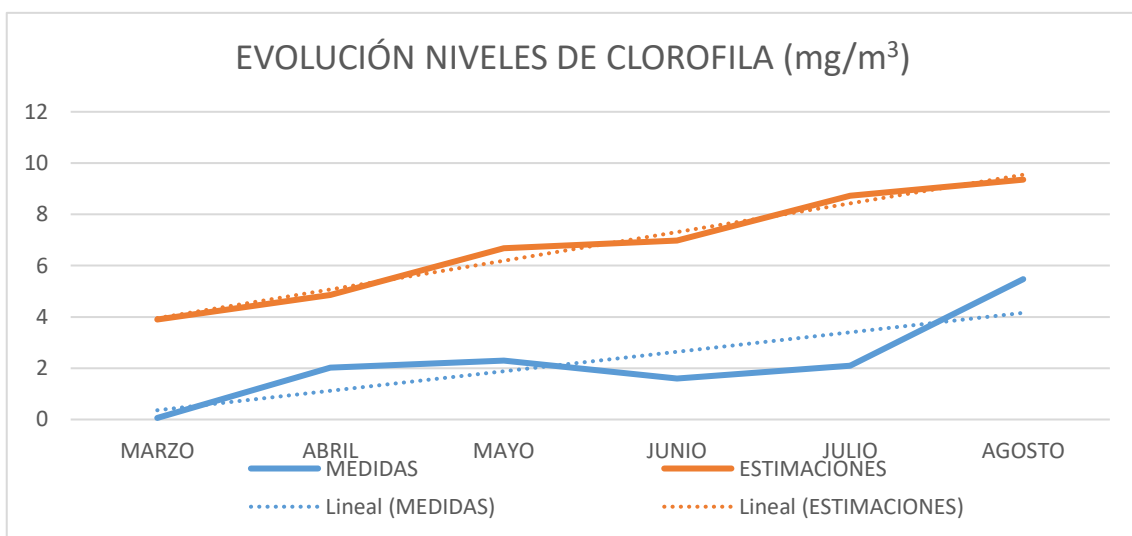
Este método consiste en aplicar sobre los valores medios del Índice Máximo de Clorofila la ecuación desarrollada por la universidad de Wisconsin que relaciona la cantidad de clorofila en el agua con el MCI. Es menos laborioso que los métodos anteriores y debido al avance en las técnicas de teledetección, existen fórmulas más precisas, que son extrapolables a un entorno determinado.

Así pues, con una bondad de ajuste de  $R^2=0.72$  según bibliografía, se trata de un ajuste que explica en gran medida la variabilidad de las variables y permite calcular en la cantidad de clorofila en el agua a partir del Índice de Clorofila. La ecuación se presenta como una forma rápida y eficaz de cálculo de concentraciones de clorofila. (Ec. 14).

$$Clh = 1457MCI + 2,895$$

Sin embargo, al aplicar la ecuación, los resultados obtenidos difieren de los esperados. Es por ello, que se decide hacer una correlación mediante **r-commander** de las concentraciones de clorofila obtenidas en campo y las estimadas con la ecuación ofrecida por la universidad de Wisconsin, para determinar de esta manera la correlación existente entre ambos.

Sorprendentemente, la bondad de ajuste es prácticamente idéntica a la calculada con la elaboración propia de la recta de regresión.



**Gráfico 3.** Comparativa entre valores estimados mediante teledetección y las mediciones obtenidas de Canal Mar Menor. Fuente Propia.



Como se puede observar en el Gráfico 3, aunque la bondad de ajuste sea idéntica a la ecuación calculada anteriormente, las líneas que representan las medidas reales y las estimadas presentan una mayor desviación que con la ecuación planteada en este estudio.

#### **VII.4. Discusión de los resultados.**

Mediante la realización de este estudio, se ha intentado mediante tres métodos distintos relacionar el Índice Máximo de Clorofila (MCI) con los datos de concentración de clorofila obtenidos sobre el terreno por organismos oficiales.

Fruto de ello, en este trabajo se puede descartar completamente el primer método utilizando, siendo imposible poder establecer una ecuación que ofrezca un buen ajuste. Este hecho puede estar motivado por las siguientes causas:

- Imposibilidad de obtener datos puntuales con la misma fecha de adquisición del satélite. Los datos obtenidos para realizar la regresión lineal datan de un día anterior a la adquisición de la imagen por parte del satélite. Además, durante la serie observada ningún día coincide con la fecha de adquisición.
- Mal filtrado de datos. Se han utilizado las mediciones de clorofila correspondientes a una profundidad comprendida entre la superficie del agua y medio metro de profundidad sin tenerse en cuenta la presencia de valores anómalos que alteran la medición. Además, se han eliminado los datos pertenecientes a profundidades donde la radiación es capaz de penetrar. Se propone para futuros trabajos, el establecimiento de un sistema ponderado que represente con una importancia descendiente los datos obtenidos a mayores profundidades hasta los 5 metros.
- Relación inexistente del Índice Máximo de Clorofila con la concentración de clorofila. Se trata de un escenario posible, por la bondad de ajuste obtenida en la regresión lineal. Sin embargo, esta opción queda completamente descartada ya que el MCI se trata de un índice desarrollado exclusivamente para la detección de organismos fotosintéticos en medios acuáticos.

Sin embargo, con la realización de medidas medias mensuales, si se ha logrado obtener una bondad de ajuste baja, pero aceptable, que permite que las estimaciones de clorofila no difieran en gran medida de las obtenidas en las mediciones. Aun así, existen varios factores que son importante remarcar:

- La disponibilidad de información sobre el estado del Mar Menor está disponible desde finales de Marzo del año 2017. Este hecho imposibilita establecer una serie de mayor duración temporal que permita establecer con mayor claridad las relaciones existentes entre las variables.
- Al realizar una medición media del Índice Máximo de Clorofila en la totalidad de la superficie del Mar Menor, permite que los errores puntuales en la adquisición de la imagen por parte del sensor sean compensados por el resto de valores.
- Como se plantea en bibliografía, las praderas oceánicas situadas a una profundidad inferior a 5m, pueden ser detectadas por los satélites de teledetección. Para evitar este hecho, es recomendable utilizar una batimetría para analizar únicamente aquellas zonas donde la profundidad del agua sea superior a los 5m, para evitar cualquier tipo de interferencia con la vegetación del fondo.

#### **VII.5. Elaboración de una recta de regresión para valores medios, aplicando batimetría.**

Como la falta de batimetría se encuentra entre las causas probables de falta de relación entre el MCI y los niveles de clorofila aportados por Canal Mar Menor, en este apartado se evalúa la mejora de la correlación existente entre ambas variables al aplicar una batimetría.

En concreto, se decide seleccionar aquellas zonas con una profundidad mayor de 2m, evaluando que, debido a la turbidez de las aguas del Mar Menor, la luz solar no es capaz de penetrar más allá de los 2m de profundidad.

Siguiendo la misma metodología que la aplicada en la Elaboración de una recta de regresión para valores medios, se obtienen los siguientes resultados.

Mes	Indice de clorofila medio (MCI)	Clorofila mg/m <sup>3</sup>
Marzo	0,0004355	0,059881579
Abril	0,0006425	2,027034275
Mayo	0,001472333	2,301011165
Junio	0,001626667	1,597366969
Julio	0,00305	2,10215494
Agosto	0,003633333	5,472950816
Septiembre	0,0021	5,722714424

Tabla 15. Datos mensuales de la concentración media de clorofila y el Índice Máximo de Clorofila, aplicando batimetría. Fuente propia.

Al realizar la correlación entre los valores de clorofila medios calculados por el Mar Menor y el Máximo índice de clorofila obtenido mediante la aplicación de batimetría, se propone la siguiente ecuación: (Ec. 15).

$$Clh = 1097'3310 + 0'2738$$

La bondad de ajuste de la ecuación es  $R^2 = 0'6343$  lo que permite predecir la cantidad de clorofila existente en el Mar Menor aplicando la teledetección en más del 63% de las ocasiones.

Se registra un ligero aumento de la bondad de ajuste aplicando batimetría que sin aplicarla. Se demuestra, que las interferencias producidas por las algas situadas en el fondo marino, resultan un factor a tener en cuenta para estudios de esta índole.

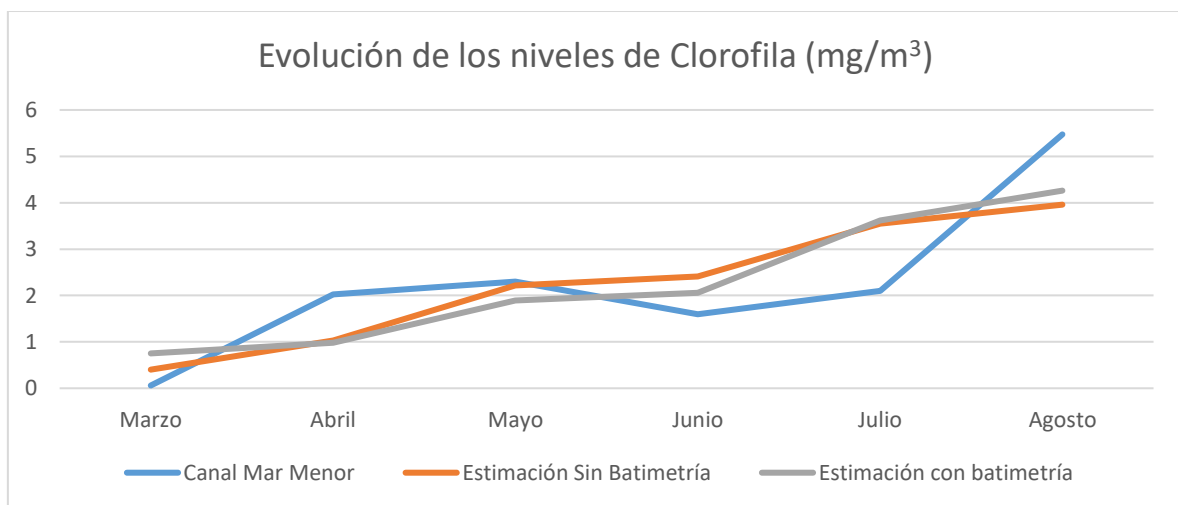


Gráfico 4 Comparativa entre valores de clorofila estimados mediante teledetección con y sin batimetría y los datos aportados por Canal Mar Menor. Fuente Propia.

# Capítulo VIII

## Conclusiones

Desde sus orígenes, la Teledetección se ha mostrado como una herramienta de gran utilidad apta para infinidad de aplicaciones que, con los avances tecnológicos, se ha convertido en una herramienta de gran precisión al alcance de muchos.

Impulsada ya sea por iniciativa privada o por programas públicos, la teledetección aplicada al estudio del medio está llamada a convertirse en una de las técnicas de referencia mundial en cuanto a la caracterización y monitorización de la Tierra se refiere, debido especialmente al tamaño de imagen que ofrece, así como la mejora constante en las resoluciones provistas. En la actualidad, existe un amplio abanico de satélites dedicados a la teledetección, por lo que resulta prácticamente imposible no encontrar un satélite que se ajuste a las necesidades del proyecto a realizar.

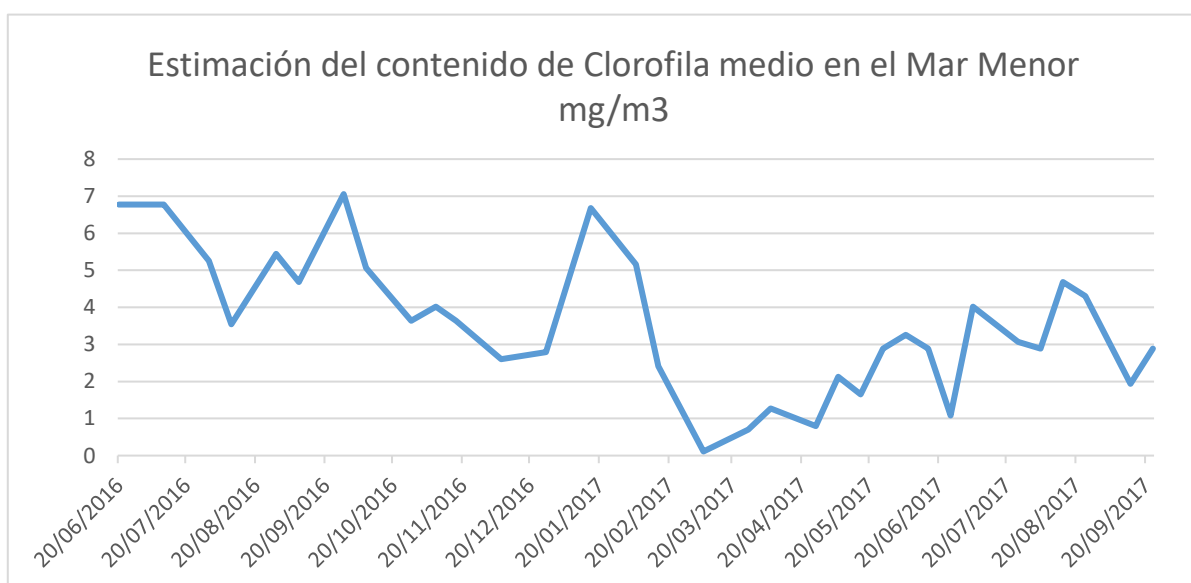
Así pues, en un mundo en evolución debido a las presiones antropogénicas sobre el medio ambiente, la teledetección se erige como un método fiable, preciso y de calidad para la monitorización de fenómenos extremos.

Para la realización de este proyecto se ha optado por la utilización de imágenes proporcionadas por la plataforma espacial Sentinel-2A. Esta plataforma ha sido elegida porque su misión dentro del programa Copernicus, es la de realizar la monitorización ambiental de la Tierra en cualquier tipo de superficie.

Para ello, el Sentinel-2A está dotado con 12 bandas repartidas a lo largo del espectro electromagnético, entre las que destacan las correspondientes al espectro visible, con resoluciones espaciales de 10m; suficientes para la realización de este trabajo.

Para el tratamiento de las imágenes, se utiliza presenta el software SNAP, de libre desarrollo, creado por la ESA para ser utilizado con los satélites de la familia Sentinel.

En relación a la consecución de los objetivos fijados al comienzo de este trabajo, se ha realizado satisfactoriamente una monitorización mediante teledetección del contenido de clorofila en las aguas del Mar Menor desde el mes de Junio de 2016 hasta el mes de Septiembre de 2017. El *Gráfico 5* muestra la evolución del valor medio mensual del contenido de clorofila en  $\text{mg/m}^3$



**Gráfico 5.** Estimación del contenido de Clorofila medio mensual en el Mar Menor mediante el empleo de la teledetección. Fuente Propia.

Para la realización del *Gráfico 5*, se han tratado digitalmente cuando ha sido posible, al menos 2 imágenes mensualmente, eligiendo aquellas con menores interferencias nubosas. Para un mayor detalle, en el Anexo se adjunta gráficamente la evolución de los contenidos de clorofila en el Mar Menor, siendo identificables y cuantificables aquellas zonas más afectadas por la proliferación de organismos fotosintéticos superficiales.

Con los datos a los que se ha tenido acceso para la realización de este trabajo, proporcionados por la Consejería de Medio Ambiente de la Región de Murcia, se ha logrado relacionar el índice de clorofila obtenido mediante el empleo de la teledetección con la concentración de clorofila existente en las aguas del Mar Menor. La relación obtenida entre ambas variables sigue la (Ec. 16).

$$Clh = 948,5266 MCI - 0,2472$$

La ecuación propuesta en este trabajo, sigue un modelo lineal con una bondad de ajuste de  $R^2=0.6053$ , que, si bien no se trata de un ajuste bueno, es capaz de mostrar la tendencia del contenido de clorofila en el conjunto del Mar Menor.

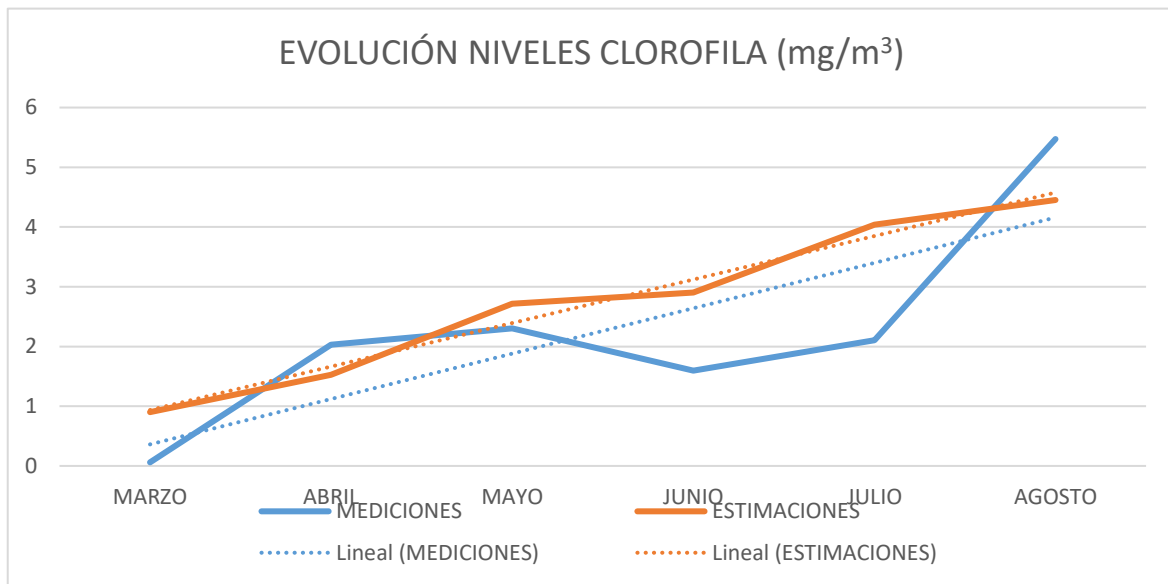


Gráfico 6. Tendencia del contenido de clorofila en el Mar Menor. Fuente Propia.

Para mejorar la bondad de ajuste obtenida, se aplica una batimetría sobre el Mar Menor con la finalidad de eliminar las interferencias causadas por las algas en regiones de reducida profundidad. Como resultado, se obtiene una nueva ecuación, válida para profundidades superiores a 2m con una bondad de ajuste de  $R^2=0.6343$ , lo que significa una leve mejora respecto a la ecuación 16.

La nueva ecuación tiene la siguiente forma: (Ec. 17).

$$Clh = 1097'3310 + 0'2738$$

Respecto al seguimiento y caracterización de la calidad del agua, la eficacia de la teledetección está plenamente probada, siendo capaz de detectar la presencia de microorganismos fotosintéticos y de materiales en suspensión entre otros. La principal limitación de la teledetección en este tipo de aplicación reside en la necesidad de adquirir información *in situ* de las características del agua en la fecha exacta en que el satélite capta la información. De esta manera, se puede realizar una correlación estadística entre los datos obtenidos sobre el terreno con la aplicación de la teledetección, resultando un estudio de regresión que estime globalmente las concentraciones de clorofila en la masa de agua estudiada y la bondad de la estimación.

En cuanto los resultados, queda patente la capacidad de este método para el seguimiento e identificación de floraciones masivas de algas, aunque los resultados obtenidos no se ajustan completamente a los adquiridos sobre el terreno por las administraciones públicas. Este motivo puede ser debido al mal funcionamiento detectado por la ESA del sensor MSI, debido a la juventud del proyecto; a las interferencias provocadas por las algas situadas a una profundidad menor de 5m o a la combinación de todas ellas. Así pues, se recomienda que, para futuros estudios, se empleen imágenes satelitales que correspondan en fecha y hora con la fecha de adquisición de datos sobre el terreno, aumentar el número de puntos medidos y emplear batimetrías con la finalidad de eliminar interferencias producidas por algas en zonas de reducida profundidad.

Finalmente, la realización de este Trabajo Fin de Grado, ha establecido una metodología reproducible, capaz de determinar la tendencia de la concentración de clorofila en las aguas del Mar Menor e identificar de forma visual, aquellas zonas con una peor calidad del agua. La prolongación indefinida de este método, constituiría una herramienta de apoyo sobre los datos obtenidos en el terreno, estableciendo un sistema de monitorización más completo y eficaz del estado de las aguas del Mar Menor.

## Capítulo IX. Bibliografía.

- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel Ciencia.
- Julio Martin Edrosa. (2011). *Aplicación de la teledetección para el monitoreo de eventos hídricos superficiales mediante imágenes cosmo sky med*.
- P.W. Webley and I.M. Watson. (2017). *The Role of Geospatial Technologies in Communicating a More Effective Hazard Assessment: Application of Remote Sensing Data*.
- González-Cascón, R. Pacheco-Labrador, J. Martín. (2016). *Evolución del comportamiento espectral y la composición química en el dosel arbóreo de una dehesa*.
- Herbert J. Kramer. (2016). *Observation of the Earth and its Environment: Survey of Missions and Sensors*. Ed. Springer Verlag.
- Francisco Eugenio González, Javier Marcello Ruiz, Ferran Marqués Acosta. (2016). *Manual de teledetección espacial*. Ed. Telecan.
- Javier Martínez Vega y M. Pilar Martín Isabel. (2010). *Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente*. Madrid: Red Nacional de Teledetección Ambiental.
- C. De La Hoz y C. Gotilla. (2009). Modelo para la predicción de parámetros de calidad del agua del lago de valencia utilizando imágenes de satélite. *Congreso de la asociación española de teledetección*.
- B. Aldalur y M. Santamaría. (2002). Realce de Imágenes: filtrado espacial. *Revista de Teledetección*, 17, 31-42.
- Rudolf Richter, Xingjuan Wang, Martin BachMann. (2011). *Correction of cirrus effects in Sentinel-2 type of imagery*. Wessling, Germany: ReSe Applications.
- X.Q. Zhang, L. P. Yang, Y. Yamaguchi. (2010). *Retrieval of Aerosol Optical Depth Over Urban Areas Using Terra/Modis Data*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Volume XXXVIII. Kyoto, Japan.
- Daniel Schlitpferl, Christoph C. Bore, Johannes Keller and Klaus Itteen. (1995). *Atmospheric Pre-corrected Differential Absorption Techniques To Retrieve Columnar Water Vapor: Application to Aviris 91/95 Data*.



- Stephanie C.J. Palmer, Peter D. Hunter, Thomas Lankester, Steven Hubbard, Evangelos Spyrakos, Andrew N. Tyler, Matyas Presing, Hajnalka Horvath, Alistair Lamb, Heiko Balzter, Viktor R. Toth. (2015). Validation of Envisat MERIS algorithms for chlorophyll retrieval in a large, turbid and optically-complex shallow lake. *Remote sensing of environment*, 157, 158-169
- C. Doña, V. Caselles, J.M. Sánchez, A. Ferri y A. Camacho. (2011). Herramienta para el estudio del estado de Eutrofización de masas de agua continentales. *Revista de Teledetección*, 46, 40-50.
- Delegido J., Tenjo C., Ruiz-Verdú A., Peña R., Moreno J. (2014). Modelo empírico para la determinación de clorofila-a en aguas continentales a partir de los futuros Sentinel-2 y 3. Validación con imágenes HICO. *Revista de teledetección*, 41, 37-47.
- Junta de Andalucía, Portal Medio Ambiente. (2003). *Cálculo de Clorofila-a (Clha)*.
- María Pilar García Rodríguez, Juan José Sanz Donarte, Eugenia Pérez González, Ángel Navarro Madrid. (2010). *Guía Práctica de Teledetección y Fotointerpretación*. Madrid.
- Julio Martínez Muñoz, Alejandro Díaz Ponce. (2005). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. México.
- Mario Fernando Monterroso Tobar. (2010). *Guía Práctica: Clasificación de Imágenes Satelitales*.
- Caren Binding. (2012). *Monitoring Algal Blooms using the MERIS Maximum Chlorophyll Index*.
- Arnold Dekker. (2012). *Earth Observation for aquatic ecosystems*.
- Quian Shen, Junsheng Li, Fangfan Zhang, Xu Sun, Jun Li, Wei Li, Biang Zhang. (2015). Classification of several Optically complex Waters in China Using in situ Remote Sensing Reflectance. *Journal of Remote Sensing*, 7, 14731-14756.
- Ricardo Letelier, Mark Abbott, Jasmine Nahorniak. (2014). *Fluorescence Line Height (FLH)*.
- Ryding, S y Rast, W. (1992). *El control de la eutrofización en lagos y pantanos*. Ediciones Pirámide, Madrid.
- Santiago Ormeño Villajos. (2006). Universidad Politécnica de Madrid, *Teledetección fundamental*.
- T. Fernández de Sevilla. (2015). *La constelación de satélites Pleiades*. Ed. Infoterra.

- I. Otero; A. Ezquerro; R. Rodríguez-Solano; L. Martín. (2012). *Fotogrametría*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Alvarez Cobelas, M., P. Muñoz Ruiz y A. Rubio Olmo. 1991. **La eutrofización de las aguas continentales españolas**. 339 páginas
- Tarczynska, (2001). *Toxic cyanobacterial blooms in a drinking water reservoir. - causes, consequences and management*.
- Hoesper. (1997). *Effects of biomanipulation in the large and shallow lake Wolderwige- The Netherlands*.
- E. Castillo, R. Pereda, J. De Luis Ruiz y M. Sánchez. (2009). *La corrección atmosférica en la teledetección aerotransportada*.
- A. A. Gilabert, C. Conese, F. Maselli. (1994). *An atmospheric correction method for automatic retrieval of Surface reflectance*.
- Santiago Ormeño. (2006). *Teledetección fundamental*.
- Gregorio Ambrosio, Javier González, Vicente Arévalo. (2002). *Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la detección de cambios en una serie temporal*.
- Richards. (1995). *Remote Sensing digital image analysis*. Ed. Springer Verlag
- J.F.R. Gower, R. Doerffer, G. A. Borstad. (1990). *Interpretation of the 685nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of fluorescence, absorption and scattering, and its observation by MERIS*.

### **Referencias Online:**

- Candan Eylül Kilsedar. (2016). *Sentinel Application Platform (SNAP) Basics*. Recuperado de <http://geomobile.com.polimi.it/website/presentations/SNAP.pdf>
- Ministerio de educación, cultura y deporte. (2006). *Sistemas de Información Geográfica y Teledetección*. Recuperado de [http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad2/td\\_sig.htm](http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad2/td_sig.htm)
- Universidad Nacional a Distancia. (2008). *Evolución de las técnicas de teledetección*. Recuperado de <http://ocw.innova.uned.es/ocwuniversia/tecnologias-del-medio-ambiente/curso-basico-de-teledeteccion/curso/material/historia-de-la-teledeteccion.pdf>
- Ministerio de educación, cultura y deporte. (2006). *Historia de la teledetección*. Recuperado de [http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/histo\\_td.htm](http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/histo_td.htm)

- Cintia Peri. (2008) *Descubrimiento de la radiación no térmica*. Recuperado de <http://www.iar.unlp.edu.ar/divulgacion/art-difu-21.htm>
- Servei Meteorològic de Catalunya. (2017). *Satèl·lits meteorològics*. Recuperado de <http://www.meteolot.com/satel-lits-meteorologics.html>
- AulaSat.Wikispaces. (2017). *Los sistemas de teledetección*. Recuperado de <http://aulasat.wikispaces.com/Los+Sistemas+de+Teledetecci%C3%B3n>
- AulaSat.Wikispaces. (2017). *La firma espectral*. Recuperado de <http://aulasat.wikispaces.com/La+firma+espectral>
- Andrea Drozd. (2013). *Introducción a la teledetección*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/andreadrozd/introduccion-a-la-teledeteccion>
- Dpto Ingeniería Cartográfica universidad de Jaén, Prof. Carlos Pinilla Ruiz. (2010). *Lección de teledetección*. Recuperado de: <http://www.ujaen.es/huesped/pidoceps/tel/archivos/7.pdf>
- Ministerio de educación, cultura y deporte. (2006). *Sensores de teledetección: los ojos de los satélites*. Recuperado de <http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad3/sensores.htm>
- European Space Agency. (2014). *Los sensores*. Recuperado de [http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_ES/SEM36X3FEXF\\_0.html](http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEM36X3FEXF_0.html)
- European Space Agency. (2014). *Satélites de observación terrestre: introducción*. Recuperado de [http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_ES/SEMJC07SXIG\\_0.html](http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMJC07SXIG_0.html)
- European Space Agency. (2014). *Las órbitas de los satélites*. Recuperado de [http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_ES/SEMXM3E3GXF\\_0.html](http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMXM3E3GXF_0.html)
- European Space Agency. (2017). *El programa Copérnico*. Recuperado de [http://www.esa.int/esl/ESA\\_in\\_your\\_country/Spain/El\\_programa\\_Copernico](http://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/El_programa_Copernico)
- European Commission. (2014). *Press Release: EP Adopts European earth observation programme Copernicus*. Recuperado de [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-14-257\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-257_en.htm)
- Earth Observation Portal. (2016). *Copernicus: Sentinel-2. The Optical Imaging Mission for Land Services*. Recuperado de <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-2#footback1%29>
- Satellite Imaging Coporation. (2016). *Sentinel-2A Satellite Sensor*. Recuperado de <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/sentinel-2a/>

- Copernicus, Europe's eyes on Earth. (2017). *Copernicus In Brief*. Recuperado de <http://copernicus.eu/main/copernicus-brief>
- European Space Agency. (2017). *Processing Levels*. Recuperado de <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2017). *Advanced Very High Resolution Radiometer-AVHRR*. Recuperado de <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>
- European Space Agency. (2017). *Earth Topics*. Recuperado de <https://earth.esa.int/web/quest/earth-topics>
- Wolfgang Volkheimer, Laura Scafati, Daniel L. Melendi. (2012). *Breve enciclopedia del ambiente*. Recuperado de <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/Eutrofizac.htm>
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Junta de Andalucía. (2012). *Concentración de Clorofila-a*. Recuperado de [http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/menuitem.aedc2250f6db83cf8ca78ca731525ea0/?vgnnextoid=2707445e93bb6310VgnVCM1000001325e50aRCRD&lr=lang\\_es](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/menuitem.aedc2250f6db83cf8ca78ca731525ea0/?vgnnextoid=2707445e93bb6310VgnVCM1000001325e50aRCRD&lr=lang_es)
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Junta de Andalucía. (2012). *Seguimiento de la calidad de aguas embalsadas*. Recuperado de <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam/menuitem.aedc2250f6db83cf8ca78ca731525ea0/?vgnnextoid=d1669650f0456310VgnVCM1000001325e50aRCRD>
- GIS & BEERS. (2017). *Combinaciones RGB de imágenes satélite Landsat y Sentinel*. Recuperado de <http://www.qisandbeers.com/combinacion-de-imagenes-satelite-landsat-sentinel-rgb/>
- European Space Agency. (2017). *Naming Convention*. Recuperado de <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/naming-convention>
- European Space Agency. (2017). *Sentinel-2 Spectral Response Functions (S2-SRF)*. Recuperado de [https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/document-library/-/asset\\_publisher/Wk0TKajilSaR/content/sentinel-2a-spectral-responses?redirect=https%3A%2F%2Fearth.esa.int%2Fweb%2Fsentinel%2Fuser-guides%2Fsentinel-2-msi%2Fdocument-library%3Fp\\_p\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_Wk0TKajilSaR%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_state%3Dnormal%26p\\_p\\_mode%3Dview%26p\\_p\\_col\\_id%3Dcolumn-1%26p\\_p\\_col\\_count%3D1](https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/document-library/-/asset_publisher/Wk0TKajilSaR/content/sentinel-2a-spectral-responses?redirect=https%3A%2F%2Fearth.esa.int%2Fweb%2Fsentinel%2Fuser-guides%2Fsentinel-2-msi%2Fdocument-library%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_Wk0TKajilSaR%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-1%26p_p_col_count%3D1)

- European Space Agency. (2016). *Revisit and coverage*. Recuperado de <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/revisit-coverage>
- European Space Agency. (2017). *Sentinel-2 MSI Technical Guide*. Recuperado de <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi>
- Wikipedia La enciclopedia libre. (2016). *El Mar Menor*. Recuperado de [https://es.wikipedia.org/wiki/Mar\\_Menor](https://es.wikipedia.org/wiki/Mar_Menor)
- Región de Murcia. (2017). *Servidor de datos científicos del Mar Menor*. Recuperado de <http://ocean.upct.es:8080/marmenor/>
- Universidad de Sevilla. (2015). *Calor y Calorimetría*. Recuperado de [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Calor\\_y\\_calorimetr%C3%ADa](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Calor_y_calorimetr%C3%ADa)
- World Meteorological Organization. (2017). *Global Observing System*. Recuperado de <http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/GOS.html>
- NASA. (2017). *Landsat 9*. Recuperado de <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-9/>
- European Space Agency. (2017). *Ikonos*. Recuperado de [http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_ES/SEM776E3GXF\\_0.html](http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEM776E3GXF_0.html)
- Satellite Imaging Corporation. (2017). *Quickbird Satellite Sensor*. Recuperado de <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/quickbird/>
- Digital Globe. (2017). *The largest constellation in the industry*. Recuperado de <https://www.digitalglobe.com/about/our-constellation>
- Airbus, Defence and Space. (2017). *Pleiades - Imágenes satelitales de Muy Alta resolución*. Recuperado de <http://www.infoterra.es/datos-satelite-pleiades>
- Ministerio de educación, cultura y deporte. (2006). *Satélites meteorológicos*. Recuperado de [http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad3/sat\\_mete.htm](http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad3/sat_mete.htm)
- Libro electrónico. (2008). *Ciencias de la Tierra y del medio Ambiente*. <http://www4.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/00General/IndiceGral.html>
- Región de Murcia Digital. (2017). *El origen del Mar Menor*. Recuperado de [http://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,365&r=ReP-28636-DETALLE\\_REPORTAJESABUELO](http://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,365&r=ReP-28636-DETALLE_REPORTAJESABUELO)