

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Análisis de la clorofila *a* en el agua a partir de una imagen multiespectral Quickbird en la zona costera de Gandia.”

TRABAJO FINAL DE CARRERA

Autor/es:

Francisco Estruch Benito

Director/es:

Javier Estornell Cremades

Miguel Rodilla Alama

GANDIA, 2010

Índice

1. Introducción.....	4
1.1. Objetivos.....	4
1.2. Estructura de la memoria.....	5
2. Materiales y Métodos.....	6
2.1. Descripción de la zona de estudio.....	6
2.1.1. Localización geográfica.....	6
2.1.2. Climatología.....	7
2.1.3. Geología y geomorfología.....	8
2.1.4. Hidrología.....	9
2.1.5. Vegetación.....	10
2.2. Materiales.....	12
2.2.1. Imagen Quickbird.....	12
2.2.2. Medidas de campo.....	13
2.3. Metodología.....	16
2.3.1. Correcciones geométricas.....	16
2.3.2. Correcciones radiométricas.....	18
2.3.3. Extracción de variables explicativas para el cálculo de regresiones.....	19
2.3.4. Cálculo de modelos de regresión.....	20
2.3.5. Elaboración del mapa resultante.....	20
3. Resultados y discusión.....	21
3.1. Correcciones geométricas.....	21
3.2. Correcciones radiométricas.....	24
3.3. Variables explicativas para el estudio.....	25
3.3.1. Píxeles individuales.....	25
3.3.2. Vecindario de píxeles.....	26
3.3.3. Band Ratios.....	30
3.4. Cálculo de modelos de regresión.....	30
3.4.1. Píxeles individuales.....	30
3.4.2. Ventana 3x3.....	31
3.4.3. Ventana 5x5.....	33
3.5. Elección del mejor modelo.....	34
3.5.1. Comprobación del modelo.....	36
3.6. Mapa resultante.....	37

3.6.1.	Elaboración del mapa.....	37
3.6.2.	Discusión del mapa.....	49
4.	Conclusiones.....	41
5.	Aplicaciones.....	41
6.	Bibliografía.....	43
 <u>Anexos</u>		
I.	Teledetección.....	45
I.1.	Introducción histórica.....	45
I.2.	Componentes de un sistema de teledetección.....	45
I.3.	Principios físicos.....	46
I.4.	Signaturas espectrales.....	48
I.5.	La imagen multiespectral.....	49
I.6.	Resoluciones de los sensores.....	49
I.7.	Análisis de las imágenes.....	50
I.8.	Aplicaciones de la teledetección.....	50
II.	Clorofila.....	52
II.1.	Introducción.....	52
II.2.	Función de la clorofila.....	52
II.3.	Estructura de la clorofila.....	52
II.4.	Signatura espectral.....	53

1. Introducción

La teledetección tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales. Con esta información se pueden analizar grandes superficies de agua con unos tiempos y costes relativamente bajos. De esta manera supone una atractiva alternativa al estudio de los ecosistemas acuáticos, desde pequeños lagos hasta grandes masas de agua como mares u océanos. Permite la creación de modelos y servir de aplicación para otras disciplinas, como es el caso de las Ciencias Ambientales, ya que facilita una forma de respuesta ágil a la necesidad de gestionar un recurso tan valioso como el agua.

La concentración de clorofila a es uno de los parámetros más importantes en el estudio de las características y el estado del agua (Desortová, 2007). Se puede relacionar de forma significativa la concentración de clorofila a con el contenido de biomasa del agua.

La teledetección ha sido ampliamente utilizada con resultados satisfactorios en estudios con imágenes Landsat (Jinsang, 2004; Duan, 2007), mediante las que se ha demostrado las posibilidades del análisis de clorofila, pero existen pocos estudios que utilizan imágenes de elevada resolución espacial como es el caso de las imágenes Quickbird.

La calidad de la imagen obtenida del satélite Quickbird ofrece resultados de mayor precisión, permitiendo la localización más exacta de zonas o puntos de interés, a diferencia de lo que ocurre con imágenes de menor resolución. La zona de estudio requiere una imagen que ofrezca alta precisión ya que sus dimensiones son aproximadamente 10km de largo en la línea costera y 4'5km mar adentro.

1.1. Objetivos

Objetivo principal:

- Estudiar la relación existente entre la clorofila a del agua en la costa de Gandía y la contenida en los valores de reflectividad de los píxeles de una imagen de satélite Quickbird.

Objetivos secundarios:

- Detección de problemas medioambientales en la zona de estudio, tales como problemas de eutrofización.
- Evaluar las posibilidades de análisis sobre el medio que ofrecen las imágenes Quickbird, y sus limitaciones.
- Demostrar la utilidad de las técnicas de teledetección como complemento de otras disciplinas, especialmente en la extracción de información.

1.2. Estructura de la memoria

La memoria del presente trabajo se ha estructurado en diversos apartados:

- En primer lugar, un apartado con la introductorio y los objetivos que se quieren lograr mediante el trabajo.
- A continuación se encuentra el apartado de Materiales y Métodos, que incluye:
 - o Descripción de la zona de estudio
 - o Un capítulo descriptivo de los materiales que son empleados para la realización del trabajo.
 - o La metodología, que contiene los pasos que conducen al resultado final gracias a la aplicación de las técnicas sobre los materiales.
- El apartado de los resultados de la aplicación de la metodología, con discusiones del producto de cada uno de los pasos.
- Seguidamente las conclusiones finales en el que se valora la consecución o no de los objetivos propuestos en el primer apartado.
- Un apartado de aplicaciones del resultado final sobre diversos ámbitos de interés, tanto medioambiental como económico.
- El apartado que contiene la bibliografía empleada para la realización del trabajo.
- Finalmente se incluyen dos anexos que contienen información relativa a la Teledetección y la Clorofila.

2. Materiales y Métodos

2.1. Descripción de la zona de estudio

2.1.1. Localización geográfica

La zona de estudio se sitúa completamente dentro de la comarca de La Safor, comprendiendo la franja costera del municipio de Gandía, limitando justo al norte donde empieza el municipio de Xeraco, e incorporando una franja de la zona costera del municipio de Daimuz al sur (Figura 1).

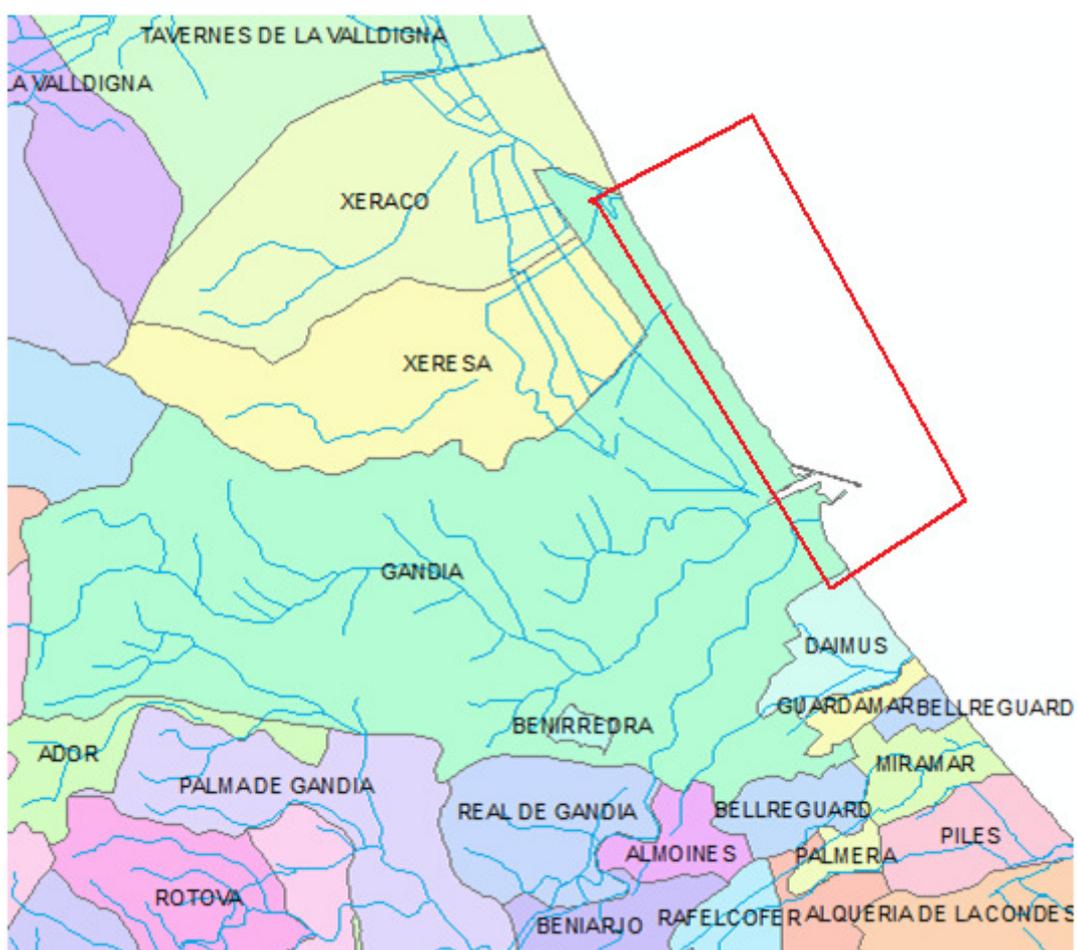


Figura 1: Localización geográfica de la zona de estudio

La comarca de La Safor se encuentra en el sureste de la provincia de Valencia. Está formada por 31 municipios cuya extensión total alcanza los 428 km². La población asciende a más de 132.000 habitantes, la mayoría localizados en el sector litoral.

Su entorno físico es abrupto e irregular. El sector montañoso en forma de herradura se orienta hacia el mar. En la zona norte están la Serra de les Agulles, en el oeste la Serra Grossa y la Serra de Ador, en el sur las sierras de Gallinera, Mostalla y Les Fontanelles y

en el sector central la Serra La Barcella y la Serra de Falconera. Estos últimos conforman espacios diferenciados en el centro, la denominada “l’Horta de Gandia”; territorio asentado en un amplio valle estructural con disposición suroeste-noreste, de unos 8x4 kilómetros, que contiene los conos aluviales de los ríos Serpis y Vaca, donde se han ido depositando sedimentos de origen fluvial que proceden de las montañas de alrededor. En el sector costero, se extiende un cordón litoral y una franja de marjales que procede de Cullera y se prolonga hasta Denia.

2.1.2. Climatología

En la franja litoral de la comarca, el régimen térmico está constituido por unas temperaturas medias del mes más frío superiores a 10°C y unas temperaturas estivales en torno a 24-25°C, influidas por el régimen de brisas que aportan aire fresco y húmedo del Mediterráneo ([registro meteorológico de la estación de Piles](#))([Tabla 1](#)).

Tabla 1: Tª media mensual registrada en la estación de Piles; series de datos 1961-1996.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
10.5	11.3	12.6	14.3	17.5	21.6	24.6	25.4	22.8	18.6	14.3	11.6	17.1

Las precipitaciones son especialmente abundantes en la comarca, siendo una de las más lluviosas de la Comunidad Valenciana. Toda la comarca registra lluvias anuales superiores a los 600-650mm, alcanzando los 800mm en las zonas más lluviosas ([Tabla 2](#)). La característica principal de estas precipitaciones es su torrencialidad. Este carácter torrencial se refleja en los datos de las máximas 24h, que registra valores muy elevados en relación con los resultados medios ([Tabla 3](#)).

Tabla 2: Precipitación media mensual (mm) registrada en la estación de Piles; series de datos 1969-1996

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
65	51	59	46	50	30	15	27	64	115	113	74	708

Tabla 3: Precipitación máxima en 24h (mm) registrada en la estación de Piles; series de datos 1969-1996.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Máx
25	24	29	21	26	20	12	18	36	56	53	29	98

Puesto que estas lluvias son fundamentalmente otoñales e invernales, la posibilidad de evapotranspiración es menor, por lo que los valores de evapotranspiración potencial se sitúan alrededor de 850-900mm/año, mientras que la evapotranspiración real

según el método de “Thorntwaite” es de 550mm/año, por lo que la diferencia con las precipitaciones es de unos 100-250mm/año.

2.1.3. Geología y geomorfología

2.1.3.1. Geología

La Safor es una comarca de transición entre los dos grandes dominios geológicos valencianos, el ibérico al norte y el bético al Sur ([Champetier, 1972](#)).

- Las sierras ibéricas septentrionales: Se reducen a tres estructuras con dirección NW-SE, el eje formado por las sierras de Corbera, Murta y les Agulles que se extiende entre Alzira y Tavernes de la Valldigna, el valle de la Barraca d’Aigües Vives y el eje montañoso de cumbres aplanadas que se extiende entre Carcaixent y Simat de la Valldigna. Están formadas por calizas y dolomías del Cretácico superior, plegadas en el eje Corbera-Agulles y casi tabulares en el eje montañoso más interior.

- Sector tabular intermedio: Este sector de transición está delimitado por la falla N de la fosa tectónica de la Valldigna, formada por el borde N de la Serra Grossa (hasta Xàtiva), y el eje de Keuper extrusivo de Barxeta. El segundo es el eje de Vernissa, continuación del borde montañoso meridional de la Vall d’Albaida. Entre estos dos ejes se extiende un sector geológico formado mayoritariamente por materiales carbonatados del Cretácico superior, dispuestos de modo tabular. Estos materiales están fracturados por fallas de dirección ibérica-bética, generando bloques elevados o hundidos que dan lugar a pequeños macizos o depresiones *intramontanas*. Entre los macizos más importantes está el Montduver y entre las depresiones, la más importante es la fosa tectónica de la Valldigna así como la de Marxuquera.

- Las sierras y valles béticos meridionales: Al sur del eje estructural del Vernissa se extiende un sector de sierras y valles de orientación bética en la cual se puede encontrar la Serra de Gallinera y Mostalla. Tectónicamente estas sierras son pliegues béticos bastante laxos con cabalgamientos hacia el norte y noroeste en su borde septentrional. Los materiales tienen edades que alcanzan desde el Jurásico hasta el Cretácico superior. Las litologías son más variadas que las de los sectores anteriores, aunque predominan los materiales carbonatados.

2.1.3.2. Geomorfología

Desde el punto de vista geomorfológico, en el área comprendida en el estudio se pueden diferenciar 4 zonas ([Proyecto Informativo de las obras de laminación y mejora del drenaje de la cuenca de la Rambla Gallinera, 2005](#)):

- Zona 1 (sierras): constituida por rocas calcáreas (calizas, dolomías y margas), pertenecientes al Jurásico-Cretácico, que se alinean según una dirección NE-SO. Presenta fuertes pendientes (13 a 30%) pero, en general, es bastante estable. El drenaje puede considerarse de bueno a aceptable.
- Zona 2 (glacis y pie de monte): constituida por gravas y bolos en matriz limo-arcillosa, pudiendo existir encostramientos calcáreos. La pendiente es suave y uniforme (5º), presentando abarrancamiento locales. Zona estable con buen drenaje.
- Zona 3 (llanura litoral): constituida por materiales aluviales depositados horizontalmente (gravas, arenas, limos y arcillas). Suelo vegetal arcilloso potente. Zona prácticamente plana con drenaje aceptable a malo. Estable.
- Zona 4 (cordón litoral de playas y dunas): material arenoso fino, mal graduado. Las dunas, de unos 2 – 3 m de altura, resaltan en una zona de morfología plana. El drenaje superficial puede considerarse bueno, siendo una zona estable.

2.1.4. Hidrología

En la comarca de La Safor, la hidrología se puede dividir en 2 clases:

2.1.4.1. Manantiales

Los grandes manantiales de La Safor suelen ser los puntos de descarga de los acuíferos con una fuerte componente cárstica, produciéndose al pie de los macizos calcáreos al ser los puntos topográficos más bajos. En este punto toma importancia el nivel impermeable de las margas y arcillas rojizas del Keuper. Este piso geológico es poco extrusivo en la comarca y cumple la función de dique o barrera.

En la mitad norte de la comarca destacan los manantiales de la Valldigna, y en especial la Font Gran de Simat. También son bastante caudalosos los del Clot de la Font o de l'Ombria y de la Font de Bolomor en Tavernes de la Valldigna. En la mitad sur el manantial más importante es el de la Font dels Setze Xorros en Villalonga, que es una

descarga de todo el macizo de l'Assafor y parte occidental de la Serra de Gallinera. Otra gran descarga es la que da origen al Riu Bullent.

2.1.4.2. Ríos

Los únicos ríos que tienen un caudal permanente en la comarca de La Safor son el Serpis y el Vernissa. Se trata de dos pequeños cursos fluviales mediterráneos. La cuenca del Serpis tiene unos 600 Km² y la del Vernissa sobre 150 Km².

El Serpis es el mayor río del norte de Alicante, debido a que ha logrado captar la cubeta miocena de Alcoy, en el interior del macizo, en competencia con el resto de ríos noralicantinos. Su régimen natural es de un río mediterráneo de régimen simple, con aguas altas en noviembre-diciembre y estiaje en julio y agosto. Su coeficiente de escorrentía mensual al final del verano es inferior a 0,4, su caudal absoluto en l'Orxa (1912-1953) es de unos 2,5 m³/seg, y su caudal específico es de 4,7 l/km²/seg. Las causas de estos elevados valores de caudal hay que buscarlas en la notable pluviosidad del macizo de Alcoy, su torrencialidad y el carácter impermeable de buena parte de la cuenca.

2.1.4.3. Otros aportes

Cabe destacar la aportación hídrica de otras fuentes tales como barrancos (Barranc de Beniopa) y acequias, los cuales son importantes por dos aspectos: en épocas de lluvias torrenciales sirven de puntos desagüe del agua excedente, y también son fuentes portadoras tanto de sedimentos como de componentes químicos, sobre todo las acequias que transcurren por los campos de cultivo y portan fertilizantes y derivados de los tratamientos agrarios, los cuales modifican las condiciones del ecosistema.

2.1.5. Vegetación

La situación geográfica que ocupa la comarca de La Safor unido a su orografía, clima, variaciones edafo-litológicas y la influencia del mar Mediterráneo hacen que este territorio pueda contener una gran variedad de ecosistemas vegetales.

La presencia en la zona de ecosistemas tan diferentes como el sistema dunar, el marjal, la zona montañosa o las zonas de cultivo, hacen de La Safor una comarca de suma importancia florística y vegetal.

Esta distribución de vegetación tan heterogénea depende de las condiciones ambientales, bióticas y abióticas que necesitan las especies vegetales para desarrollarse y así pues, estas variables ambientales son las que definen los diferentes ecosistemas naturales que se encuentran en la comarca, regulando estos la presencia de determinadas especies en ellos.

Por lo tanto, en función de factores como el tipo de suelo, relieve, clima, factor antrópico, etc se reparten una serie de comunidades vegetales que serían capaces de mantenerse siempre en equilibrio si no fuera por la intervención humana.

Para facilitar la comprensión de la distribución de los ecosistemas vegetales, se pueden utilizar distintas herramientas:

- Unidades biogeográficas:

Son las unidades de relación entre la vegetación y sus condiciones ecológicas, lo que conlleva a que se desarrolle una flora característica. Estas unidades se organizan de modo jerárquico: Reino, región, provincia, sector y subsector, así pues, la comarca de La Safor estaría incluida en la siguiente unidad biogeográfica:

“Región Mediterránea, Subregión Mediterránea Occidental, Superprovincia Mediterráneo-Iberolevatina, Provincia Valenciano-Catalano-Provenzal, Sector Setabense”.

- Pisos bioclimáticos:

Los pisos bioclimáticos relacionan lo biológico y lo climatológico, dividiéndose en territorios en cuyas áreas se caracterizan unas determinadas asociaciones vegetales.

En la comarca de La Safor se encuentra el Piso Termomediterráneo, un piso costero o de zonas de interior llanas caracterizado por la escasez de heladas y temperaturas medias elevadas. Tienen las siguientes características:

- Temperatura media anual: 17 a 19 °C
- Temperatura media de las mínimas del mes más frío: 5 a 10°C
- Temperatura media de las máximas del mes más frío: 14 a 18°C
- Índice de termicidad: 360 a 470

A partir de la precipitación media anual se determinan los diferentes tipos de vegetación en función de las unidades ombroclimáticas. La Safor posee un ombroclima Subhúmedo con una precipitación media anual de 600 a 1000 mm. También se podría matizar que en el período estival la humedad ambiental presente se correspondería más con el tipo climático Subtropical Subhúmedo.

2.2. Materiales

Para la realización del trabajo se utilizó 2 tipos de información: una imagen multiespectral Quickbird y datos tomados en una salida de campo. El procesamiento de los datos se realizó con las herramientas incluidas en el software SIG ArcGis 9.3, y los estadísticos con el Statgraphics.

2.2.1. Imagen Quickbird

Las imágenes tomadas con el satélite Quickbird son muy utilizadas en teledetección. El satélite posee dos sensores que pueden registrar imágenes multiespectrales y pancromáticas. Sus imágenes son de 16'5x16'5km cubriendo de este modo una superficie amplia. Con una imagen se podría cubrir el término municipal de Gandía. Puesto en órbita el 18 de octubre de 2001, se encuentra a 450km de altura y a 98º de inclinación sincronizada con el Sol, con un período de 93,4 minutos. Las resoluciones de estas imágenes se pueden encontrar en la [Tabla 4](#):

Tabla 4: Características del satélite Quickbird

Resolución Espacial	Pancromática: 60cm
	Multiespectral: 2'4m
Resolución Radiométrica	11 bits (2048 niveles digitales por píxel)
Resolución Espectral	Pancromática: Blanco y negro 445-900nm
	Multiespectral: 4 bandas
	·Azul 450-520nm (Agua)
	·Verde 520-600nm (Vegetación sana)
	·Rojo 630-690nm (Cubierta vegetal)
	·Infrarrojo Cercano 760-900nm (Contenido de biomasa)
Resolución Temporal	De 3 a 7 días

La imagen utilizada en este estudio es una escena tomada por el satélite Quickbird (**Figura 2**), en el sistema de referencia WGS84 y cuyas coordenadas UTM se recogen en la **Tabla 5**.

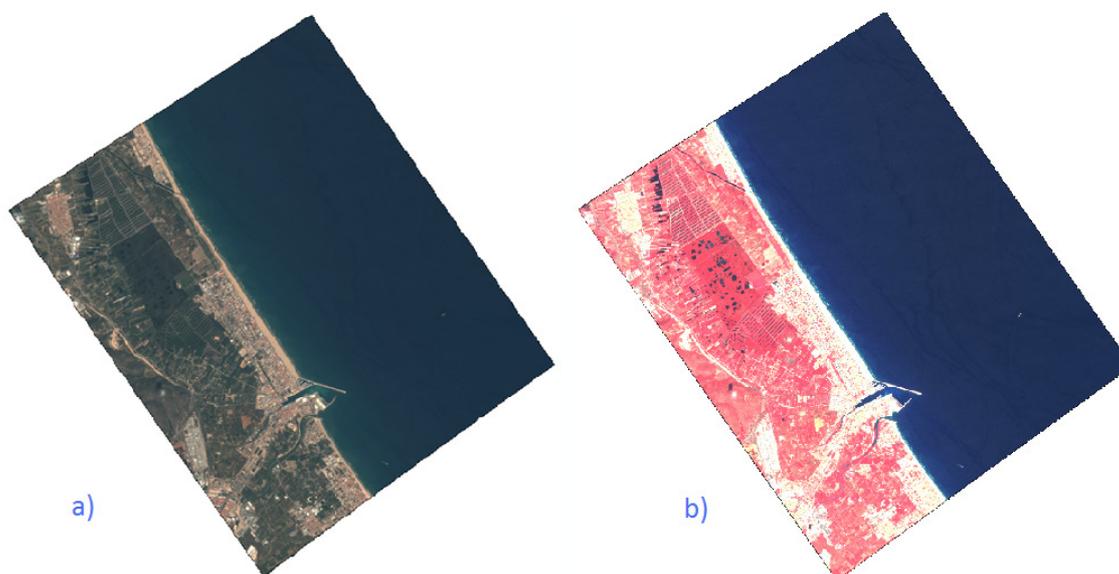


Figura 2: Imagen multiespectral Quickbird de la zona de estudio: a) color verdadero, b) falso color

Tabla 5: Coordenadas de la imagen

Grados Decimales		Proyección UTM	
Oeste	-0.230750	Izquierda	739955.362
Este	-0.086382	Derecha	752077.067640
Norte	39.074360	Arriba	4328764
Sur	38.957884	Abajo	4316201.0228

2.2.2. Medidas de campo

Como las variaciones de la concentración de clorofila en el tiempo son elevadas, fue importante adquirir la imagen sobre la que se iba a trabajar cercana lo más posible a la fecha de la toma de datos de campo. La salida de campo fue el día 16 de julio de 2009, el mismo día en que se registró la imagen.

El trabajo de campo consistió en la toma de 37 muestras de agua superficial para su posterior análisis en laboratorio, y mediante un GPS de precisión 3-5 metros, se midieron las coordenadas geográficas de dichos puntos. El tipo de muestreo seguido fue aleatorio estratificado, como se puede apreciar en la **Figura 3**, hay 5 líneas de muestreo paralelas a la costa. Este muestreo fue escogido debido a la naturaleza de la distribución de la clorofila, donde las zonas cercanas a la costa contienen mayor

concentración que las zonas alejadas. Los datos de la clorofila a se pueden observar en la **Tabla 6**.

Tabla 6: Datos finales extraídos de las medidas de campo

Punto	X UTM	Y UTM	Cloro. a (mg/m ³)
0	746857,7283	4319775,719	1,8
1	746163,1096	4321092,573	1,3
2	745347,827	4322351,697	1,2
3	744519,9532	4323613,968	1,6
4	743783,3659	4324819,579	2,5
5	747106,9781	4320267,67	4,3
6	747135,9684	4319615,388	3,1
7	747541,8332	4320006,757	1,7
8	744354	4324296	0,7
9	745116	4323064	0,8
10	745903,8791	4321818,653	0,9
11	744617	4325266	0,3
12	745407	4324144	0,6
13	746193,7825	4322920,286	0,7
14	746991,0168	4321630,216	0,5
15	745254	4324892	0,2
16	746058	4323701	0,2
17	746817,0747	4322456,441	0,4
18	747788,251	4320963,438	0,6
19	748107,1447	4320195,195	0,8
20	747621,637	4319025,272	2,6
21	748231,2307	4319400,88	1,6
22	745517	4325764	0,4
23	746681	4325736	0,4
24	747193	4326775	0,5
25	746229,5581	4324623,56	0,5
26	747899	4325709	0,4
27	747442	4324601	0,2
28	746950,2357	4323429,937	0,5
29	748550	4324573	0,2
30	748176	4323313	0,3
31	747772,2587	4322191,273	0,4
32	748620	4323424	0,6
33	749187	4321845	2,6
34	748650,5846	4320626,051	0,9
35	750337	4321665	0,9
36	749921	4320460	0,8

Se puede apreciar que la mayoría de valores son menores a 1 mg/m^3 . Sin embargo aparecen 5 puntos con valores más elevados.

La localización de estos puntos (**Figura 3**) desvela que todos (excepto el ID 33) se sitúan en la franja más cercana a la costa, en el caso del ID 5 se encuentra en las instalaciones del puerto de Gandía, el ID 4 corresponde a la desembocadura del río Vaca y los ID 6 y 20 a la del río Serpis, cuyos aportes pueden modificar las condiciones del medio.

Respecto al punto ID 5, el día en que se hizo la salida de campo (que coincide con la fecha de toma de la imagen, como se explicó anteriormente) se estaba realizando tareas de aporte de sedimentos en el puerto, lo que pudo modificar las condiciones de forma extraordinaria. Los otros puntos mencionados, además de sus posibles afecciones debido a las desembocaduras de los ríos Vaca y Serpis, la mayor cantidad de materia sólida suspendida en la zona costera y la poca profundidad pueden tener una gran influencia en estos valores.

Los puntos mencionados no fueron incorporados al análisis estadístico debido a la elevada posibilidad de que fueran una fuente de error.

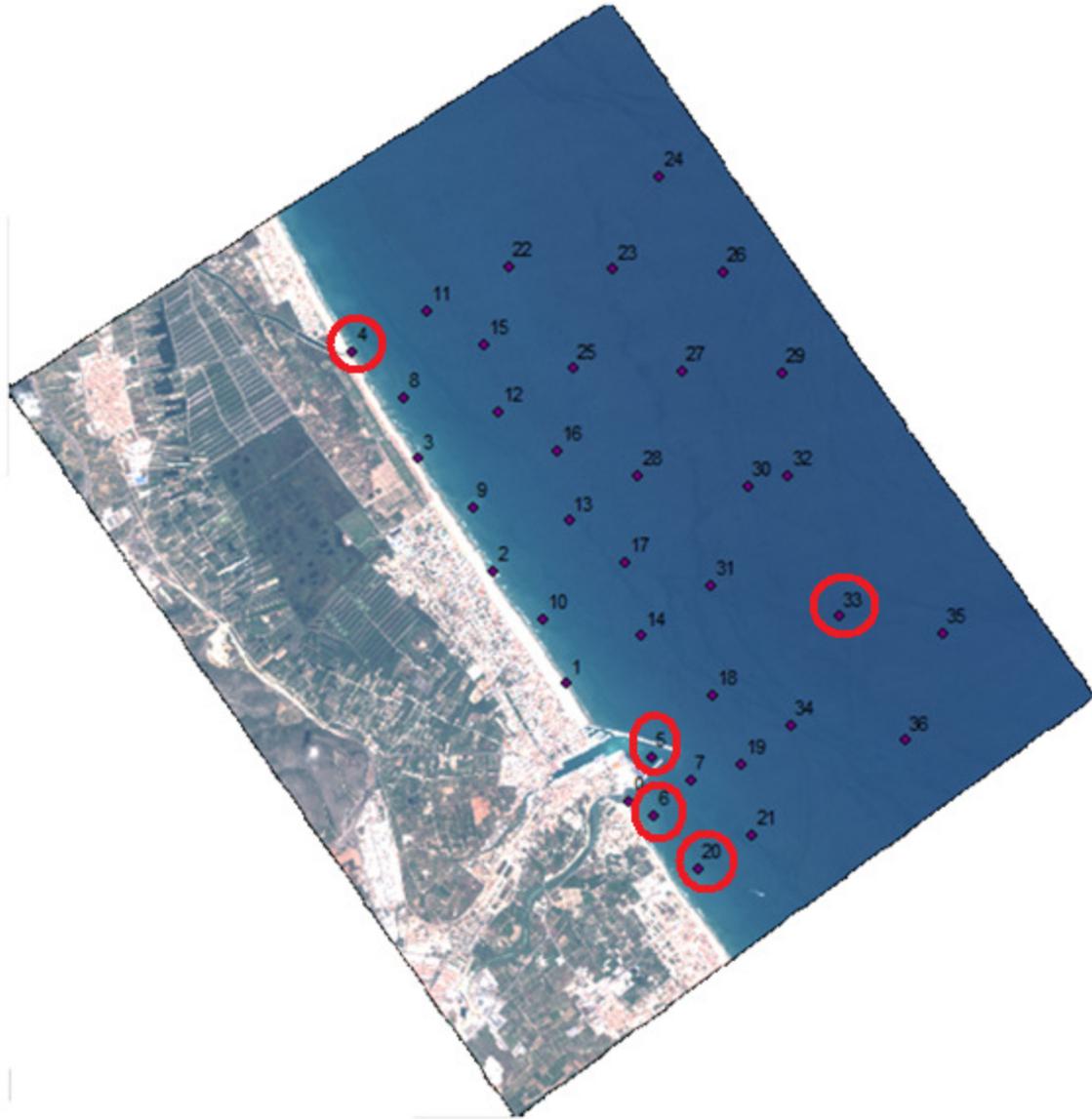


Figura 3: Localización de los puntos conflictivos

2.3. Metodología

2.3.1. Correcciones geométricas

El objetivo de la corrección geométrica fue mejorar la precisión geométrica. Es necesario que esta corrección se haga con gran precisión, ya que hay que relacionar las coordenadas de los puntos de campo con los píxeles de la imagen para realizar una superposición.

Este tipo de corrección no modifica el valor de los píxeles, sino que supone un cambio en su posición. Los pasos que se siguieron en la corrección geométrica fueron:

- Creación de un mosaico
- Rectificación
 - o Selección de puntos de control
 - o Cálculo de las funciones de transformación
 - o Remuestreo
- Comprobación de la corrección

Creación de un mosaico

La escena estaba compuesta de 3 imágenes correlacionadas espacialmente. Para trabajar de forma más ágil, se unieron creando un mosaico.

Rectificación

Las operaciones de rectificación consisten en utilizar otra imagen de referencia con un sistema de referencia determinado para ajustar espacialmente la imagen objetivo. La referencia puede ser un mapa, una ortofoto, etc. En el estudio se utilizó como referencia una ortofoto de la zona cuyo tamaño de píxel es de 0'5m asociada al sistema de referencia *European Datum 1950 Zone 30N*.

- Puntos de control y funciones de transformación:

Los puntos de control se crean relacionando elementos estables en ambas imágenes, por ejemplo cruces de carretera, rotondas, elementos singulares fácilmente identificables, etc; los elementos dinámicos como los relacionados con el agua (ríos, línea de costa) o elevados del suelo (tejados de edificios) no son válidos.

El método consiste en la transformación polinómica (normalmente de segundo grado), a través de las coordenadas (x,y) de los puntos de control, en un sistema geodésico y proyección cartográfica determinada, y de sus coordenadas homólogas en la imagen definidas por la fila y columna (u,v) (**Ecuación 1**):

$$\begin{aligned}
 u &= Q(x, y) = q_0 + q_1x + q_2y + q_3xy + q_4x^2 + q_5y^2 \\
 v &= R(x, y) = r_0 + r_1x + r_2y + r_3xy + r_4x^2 + r_5y^2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

En dichas ecuaciones, “u,v” son las coordenadas de la imagen a corregir y “x,y” las de la imagen de referencia.

Una vez se tienen definidos todos los puntos de control (**Ecuación 2**), se verificó la calidad del ajuste. Para ello, se tuvieron en cuenta los errores residuales de cada punto, y el error medio cuadrático (RMS) (**Ecuación 3**):

$$r(i) = \sqrt{[u_i - Q(x_i, y_i)]^2 + [v_i - R(x_i, y_i)]^2} \quad (2)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^r ([u_i - Q(x_i, y_i)]^2 + [v_i - R(x_i, y_i)]^2)}{r}} \quad (3)$$

- Remuestreo:

El método de remuestreo utilizado fue el del “vecino más próximo”. Mediante las funciones de transformación anteriores se crea una imagen nueva, compuesta por una malla de píxeles vacía pero correctamente posicionada. Con el método del “vecino más próximo”, se rellenan cada uno de los píxeles de esta malla con los valores del píxel más cercano al que tenían en la imagen sin corregir (**Jensen, 2005**). De esta forma, el resultado final consiste en la imagen correctamente posicionada, sin cambios en los valores originales de los píxeles.

2.3.2. Corrección radiométrica:

Las correcciones radiométricas, a diferencia de las geométricas, sí suponen una modificación del valor de los píxeles.

Como el objetivo de este trabajo es relacionar la clorofila *a* con variables físicas derivadas de la imagen Quickbird, se transformó los niveles digitales de cada banda a radiancias. Estas conversiones se realizaron utilizando las **ecuaciones 4 y 5** proporcionadas por la compañía Digital Globe.

$$L_{Pixel,Banda} = K * Q_{Pixel,Banda} \quad (4)$$

Donde $L_{(Pixel,Banda)}$ son los píxeles resultantes del primer paso de esta corrección radiométrica, producto de multiplicar los píxeles de la imagen $q_{(Pixel,Banda)}$ por un factor (K) que viene recogido en la ficha de información de la imagen, que es propio para cada banda.

El segundo paso en esta corrección radiométrica es la división de $L_{(Pixel,Banda)}$ por otro factor calculado por DigitalGlobe:

$$L_{\lambda_{Pixel,Banda}} = \frac{L_{Pixel,Banda}}{\Delta\lambda_{Banda}} \quad (5)$$

El factor $\Delta\lambda_{\text{Banda}}$ se trata del ancho de banda efectivo. Dichos valores son únicos para cada banda (**Tabla 7**), y fueron calculados de las curvas de respuesta de radiancia espectral relativa a cada banda QuickBird.

Tabla 7: Coeficientes de Ancho de banda efectivo para cada banda del satélite Quickbird

Banda Espectral	Ancho de banda efectivo
Azul	0,068
Verde	0,099
Rojo	0,071
Infrarrojo cercano	0,114

Los valores de radiancia fueron finalmente transformados en valores de reflectividad aparente mediante la **ecuación 6**, operación llevada a cabo mediante el software ENVI.

$$\rho^*k = \frac{D_{\pi}L_{sen,k}}{E_{0,k} \cos \theta_i} \quad (6)$$

Donde $L_{sen,k}$ es la radiancia espectral en la banda k ; $E_{0,k}$ es la irradiancia solar en el techo de la atmósfera (para esa banda del espectro) conocida a través de las tablas solares; ρ^*k es la reflectividad aparente de la cubierta de esa banda; θ_i es el ángulo cenital del flujo incidente formado por la vertical y los rayos solares; y D_{π} es el factor corrector de la distancia Tierra-Sol.

2.3.3. Extracción de variables explicativas para el cálculo de regresiones

La imagen corregida geoméricamente y transformada a valores de reflectividad se utilizó para extraer las variables explicativas utilizadas en el análisis estadístico. Dado que la precisión del GPS es similar o ligeramente inferior al tamaño de píxel de la imagen y el error producido por la deriva de la barca, se utilizaron tres conjuntos de datos para el cálculo de variables explicativas.

Píxeles individuales

Se obtiene el valor de reflectividad para cada banda a partir de las coordenadas de los puntos de muestreo.

Vecindario de píxeles

Cada dato estadístico se extrae de un conjunto de píxeles, mediante una o varias operaciones SIG. El uso de ventanas puede paliar errores de geolocalización causados al utilizar un solo píxel, debido a su medición desde un barco en movimiento (**Baban, 1997; Woodruff, 1999**), ya que el punto en el que se toma la muestra no está fijo, por lo tanto se introducen errores en el estudio.

- Ventana 3x3: El valor tomado es la media del píxel concreto junto a los 8 píxeles adyacentes (Figura 4).
- Ventana 5x5: Se toma también el siguiente conjunto de píxeles adyacentes, es decir, la media de 25.

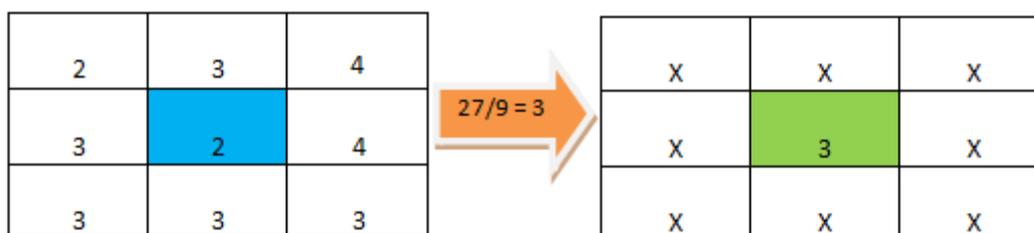


Figura 4: Ventana 3x3

Band Ratios

Los *Band Ratios* consisten en la creación de nuevas imágenes en las que los valores de los píxeles se obtienen a partir de operaciones entre los de varias bandas. Estudios anteriores demostraron la eficacia estas imágenes para medir la clorofila en agua mediante técnicas de teledetección, como el B4/B3 (Duan, 2007) que fue usado con éxito con datos del satélite Landsat. Una ventaja de utilizar *Band Ratios* sobre valores absolutos de reflectividad es que pueden corregir algunos errores geométricos y radiométricos (Pulliainen, 2001; Koponen, 2001, 2002).

2.3.4. Cálculo de modelos de regresión

Para analizar las relaciones entre la clorofila a y los valores de reflectividad se utilizaron regresiones simples y múltiples con el menor número de variables posibles, para permitir una mejor explicación física del modelo. Los pasos seguidos fueron:

- Regresión simple de valores de reflectividad
- Selección de variables significativas
- Búsqueda de modelos de 3, 4 y 5 variables
- Regresión múltiple de 3, 4 y 5 variables

Finalmente se eligió el modelo teniendo en cuenta la relación entre el valor de la R^2 y el número de variables y se elaboró un mapa resultante.

2.3.5. Elaboración del mapa resultante

Obtenido el algoritmo se procedió a elaborar el mapa, para ello se sucedieron diversas operaciones:

Reclasificación

Consiste en la modificación del valor digital de los píxeles, no de su localización espacial. Cada valor de la matriz se multiplica por un coeficiente y se obtiene una imagen resultante reclasificada.

Los coeficientes pueden ser definidos de forma manual, adecuándolos según los rangos de valores que interesen modificar de la imagen original.

Aplicación del modelo

El modelo final escogido se aplicó a la zona de estudio, obteniendo una imagen final que sirve de mapa temático a partir de las variables explicativas incluidas en el modelo (Ecuación 7):

$$\textit{Imagen Final} = A * (\textit{Variable}_x)^b + C * (\textit{Variable}_y)^d + \dots \quad (7)$$

3. Resultados y discusión

3.1. Correcciones geométricas

Creación de un mosaico

La información adquirida de DigitalGlobe consistía de 3 imágenes correlativas que había que unir previamente a su corrección geométrica (Figura 5).

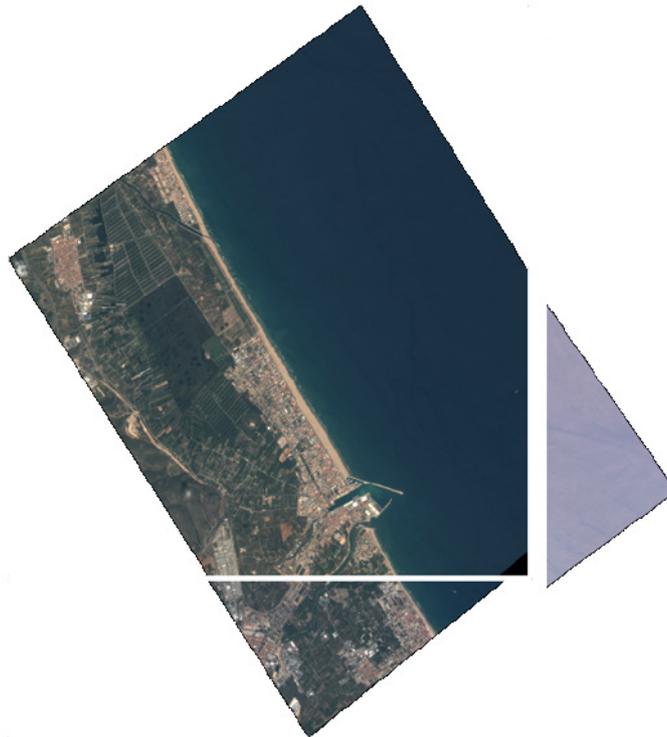


Figura 5: Creación del mosaico

No existía ningún solapamiento ni falta de información digital entre los bordes de las 3 imágenes que componían la escena, por tanto una simple operación de mosaico realizada con el software SIG permitió unir estas 3 imágenes una sola, que fue la base del trabajo posterior.

Rectificación

Para mejorar la precisión de la imagen Quickbird y dado que el sistema de referencia de los datos medidos en el campo (ED50) fue diferente al de la imagen (WGS84) se realizó esta operación. El sistema geográfico de los puntos de muestreo es el *European Datum 1950 UTM Zone 30N*, que es el que se le otorgó a la imagen. Como referencia se utilizó una ortofoto de la zona cuyo tamaño de píxel era 0'5m. Esta resolución permitió la definición de puntos de control sobre elementos identificables en ambas imágenes; evitando elementos variables como la línea del mar o cursos de agua, y elementos elevados como terrazas de edificios (Figura 6). Se identificaron 39 puntos de control en la zona próxima de la costa (Tabla 8) (Figura 7).

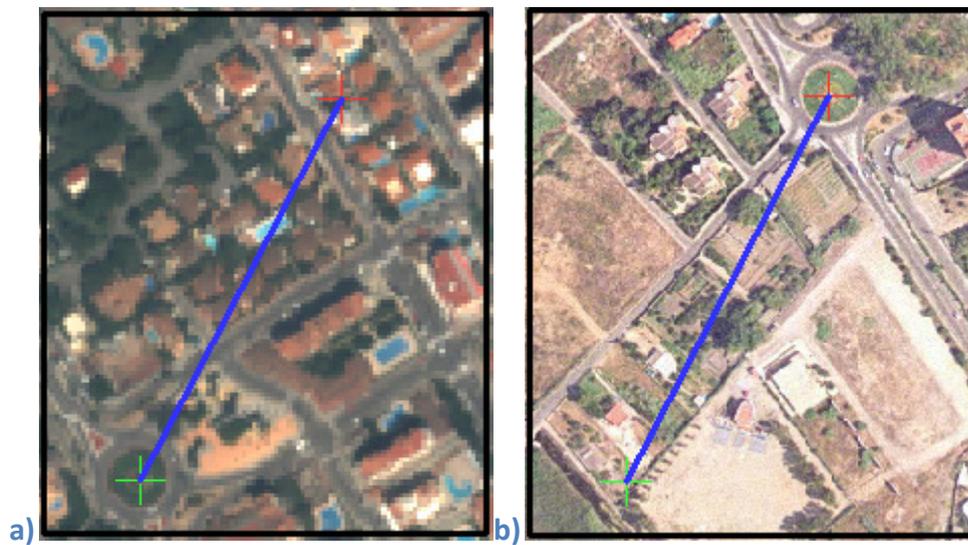


Figura 6: Ejemplo de Punto de Control: a) Imagen Quickbird, b) Ortofoto



Figura 7: Distribución de los Puntos de Control

Tabla 8: Puntos de control

Punto	X Referencia	Y Referencia	X Mapa	Y Mapa	Residual
1	745960,42	4320561,23	746070,91	4320768,08	0,44
2	744997,04	4319157,03	745109,11	4319364,88	1,03
3	743293,2	4321092,82	743403,87	432198,63	0,28
4	742860,22	4321519,97	742970,89	4321725,79	0,22
5	741258,39	4322486,01	741371	4322688,83	0,63
6	742466,55	4325694,06	742575,6	4325903,38	0,73
7	742723,26	4325994,8	742832,06	4326203,08	0,28
8	742886,3	4325706,61	742994,93	4325914,28	0,51
9	742929,91	4325620,59	743039,43	4325829,06	0,77
10	742990,6	4325493,91	743100,04	4325701,32	0,56
11	743187,4	4325063,31	743296,36	4325270,18	0,52
12	743533,08	4324484,4	743641,79	4324691,35	0,34
13	743666,43	4324118,73	743775,1	4324325,47	0,33
14	743852,24	4323835,65	743961,46	4324041,77	0,48
15	743995,33	4323614,76	744104,74	4323821,79	0,65
16	744150,18	7323288,32	744259,2	4323494,76	0,12
17	744459,4	4323008,58	744568,65	4323214,6	0,15
18	744587,21	4322638,92	744696,49	4322844,96	0,2
19	744955,52	4322035,92	745065,03	7322242,03	0,19
20	745096,55	4321663,99	745205,68	4321870,78	0,53
21	74326,52	4321448,64	745436,3	4321654,53	0,58
22	745537,33	4321169,8	745647,22	4321377,04	0,64
23	745816,22	4320898,6	745925,97	4321105,94	0,45
24	746374,35	4320289,77	746484,63	4320497,07	0,18
25	747097,78	4320025,12	747209,12	4320232,62	0,38
26	746786,86	4319233,97	746897,95	4319442,77	0,49
27	744484,25	4320610,8	744594,08	4320817,81	0,2
28	744019,42	4322209,38	744126,51	4322416,36	0,24
29	743286,18	4323545,6	743394,84	4323753,03	0,2
30	742256,53	4322816,26	742366,17	4323023,58	0,36
31	742438,9	4323553,18	742547,26	4323760,3	0,71
32	740826,15	4323632,47	740936,29	7323839,79	0,54
33	741060,98	4324589,12	741170,38	4324798,32	0,36
34	741999,45	4324455,3	742107,69	4324663,8	0,24
35	747693,22	4317772,98	747804,17	4317983,38	0,84
36	746100,85	43217533,83	7462316,55	4317743,89	0,76
37	745128,93	4317644,38	745241,09	4317851,6	0,49
38	743911,46	4319623	744023,01	4319828,48	0,52
39	745827,53	431854,01	745938,7	4318562,53	0,26
				RMS	0,49

La rectificación llevada a cabo fue de 2º Orden Polinomial, se obtuvo un error medio cuadrático (RMS) de 0'49 metros, y teniendo en cuenta la precisión del GPS (3 a 5 metros) y la resolución espacial de la imagen (2'4 metros), se consideró válido el ajuste.

3.2. Correcciones radiométricas

Estas operaciones consistieron en el cálculo de radiancias y reflectividades sobre las 4 bandas corregidas geométricamente en el paso anterior.

Los datos se introdujeron en el software ESRI, y de este modo se obtuvieron 4 nuevas imágenes (una para cada banda), las cuales estaban correctamente georreferenciadas y cuyos píxeles contenían valores de reflectividad (Figura 8).

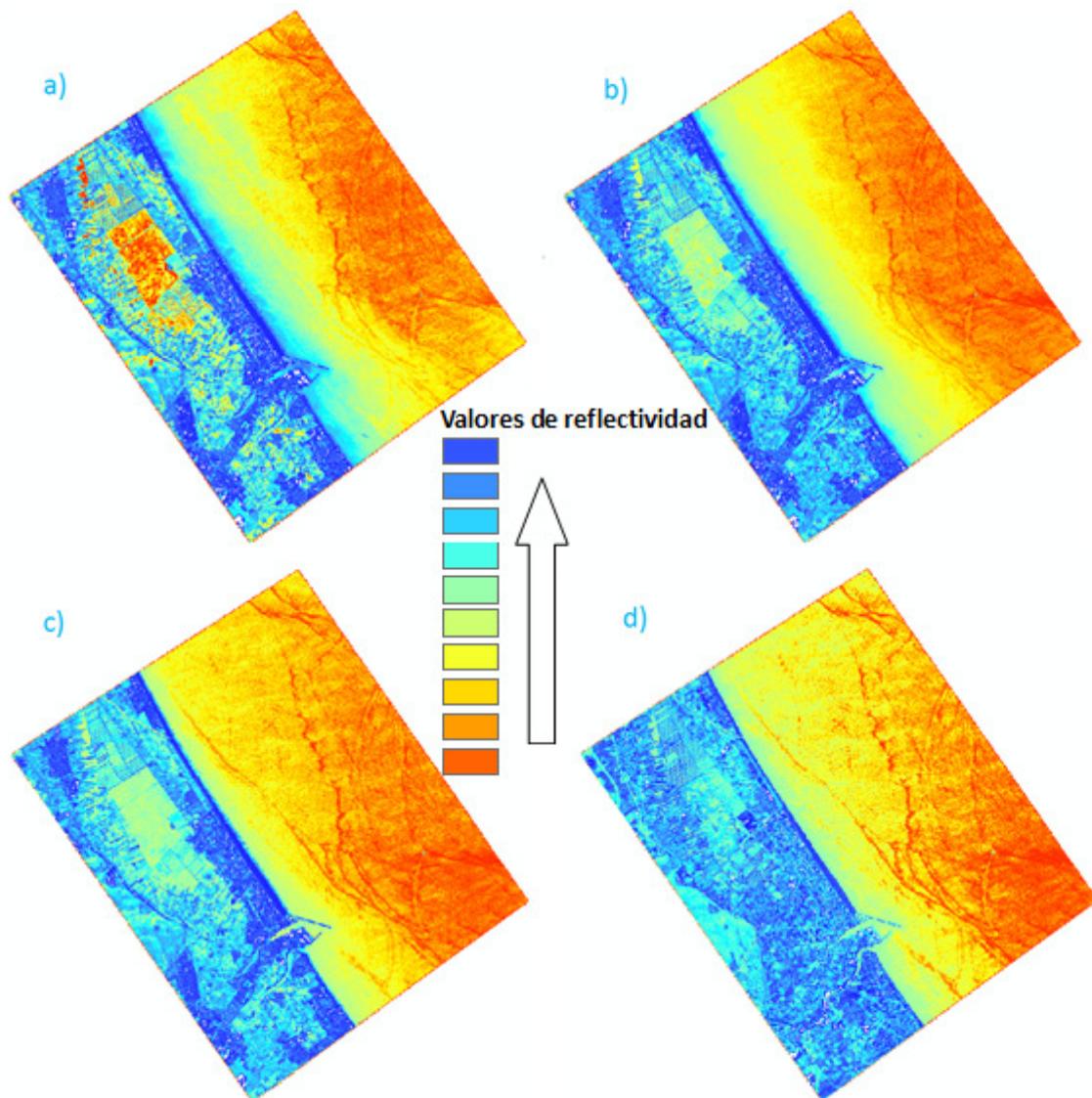


Figura 8: Imágenes de reflectividad de cada banda: a) Banda 1; b) Banda 2; c) Banda 3; d) Banda 4

Las imágenes son similares entre sí, muestran valores de reflectividad menores en agua que en tierra, sin embargo se pueden apreciar ciertos detalles como que la banda 1 encuentra más variabilidad en la línea costera (diferencia entre agua y tierra).

3.3. Variables explicativas para el cálculo de regresiones

3.3.1. Píxeles individuales

Valores de reflectividad

Con las imágenes resultantes se obtuvieron los valores de reflectividad de cada banda para cada punto de muestreo (Tabla 9):

Tabla 9: Valores de reflectividad correspondientes a los puntos de muestreo

Clorofila	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
1,8	1401	1238	916	604
1,3	1449	1391	1228	622
1,2	1406	1330	1040	514
1,6	1462	1360	1136	557
1,7	1172	890	468	317
0,7	1181	943	476	326
0,8	1293	1057	580	394
0,9	1263	1007	572	351
0,3	1142	776	420	343
0,6	1107	798	436	326
0,7	1142	798	440	321
0,5	1107	765	420	296
0,2	1111	765	456	296
0,2	1103	796	476	339
0,4	1107	759	428	313
0,6	1111	762	428	321
0,8	1124	763	432	317
1,6	1107	784	408	279
0,4	1081	751	412	283
0,4	1064	720	436	317
0,5	1055	695	432	304
0,5	1103	759	436	317
0,4	1038	676	396	283
0,2	1029	681	396	283
0,5	1077	723	436	326
0,2	1060	707	480	321
0,3	1064	701	416	296
0,4	1060	707	384	270
0,6	1029	681	392	283
0,9	1060	701	384	266
0,9	1068	690	384	261
0,8	1064	690	420	270
Media	1145	839,5	517,6	341,1
Desviación	124,3	209,7	224,4	94,9

Los valores recogidos en la tabla responden a la signatura espectral del agua (**Anexo I.1.4**), cuya reflectividad es máxima en la banda 1 y desciende de forma progresiva en las bandas 2, 3 y 4.

3.3.2. Vecindario de píxeles

El tamaño del píxel de las imágenes es de 2'4x2'4 metros, y la precisión dada por el GPS con el que se tomaron los datos de campo oscilaba entre 3 y 5 metros, de modo que existía una gran probabilidad de que los valores extraídos de un único píxel para cada punto de muestreo no fueran representativos de la localización exacta en la que se había tomado la muestra.

Tenido en cuenta este inconveniente, se plantearon variaciones en la extracción de los datos para el análisis estadístico.

Ventana 3x3

Se realizó una ventana de 3x3 píxeles, que consiste en crear una nueva imagen en la que los valores de los píxeles sean la media aritmética del mismo más los 8 píxeles que le rodean. Se crearon las 4 imágenes correspondientes a cada banda y se anotaron los nuevos valores (**Tabla 10**).

Tabla 10: Valores de reflectividad correspondientes a la Ventana 3x3

Clorofila	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
1,8	1399	1236	914	602
1,3	1449	1388	1227	619
1,2	1404	1313	1027	510
1,6	1464	1343	1098	563
1,7	1168	880	462	309
0,7	1183	949	477	328
0,8	1292	1060	580	396
0,9	1261	1008	550	368
0,3	1134	776	419	332
0,6	1107	788	436	305
0,7	1139	797	441	317
0,5	1107	768	419	295
0,2	1122	775	456	309
0,2	1097	775	460	325
0,4	1115	765	442	321
0,6	1110	758	427	317
0,8	1123	766	437	319
1,6	1121	791	418	290
0,4	1095	759	425	296
0,4	1064	718	430	310
0,5	1061	695	428	302
0,5	1115	768	445	310

0,4	1048	695	403	299
0,2	1037	690	410	294
0,5	1082	730	437	323
0,2	1059	703	442	311
0,3	1054	700	410	297
0,4	1053	698	388	270
0,6	1032	679	391	281
0,9	1061	704	386	274
0,9	1062	684	385	257
0,8	1068	699	416	275
Media	1146,4	839,3	515,2	341,4
Desviación	123,2	206,1	219,4	94,1

Como se puede observar, son valores muy parecidos a los obtenidos utilizando píxeles individuales, puesto que no existe una gran variación de la reflectividad en las zonas cercanas. Con este proceso se evitaron errores importantes como anotar valores de píxeles únicos que no se correspondían con la localización real, sin embargo no se corregían todos los errores de precisión que podían suceder.

Tomando dos puntos de muestreo se pueden observar dos casos extremos que ocurrieron en la aplicación de este método:

El punto de muestreo puede situarse de forma más o menos centrada dentro del píxel, como ocurre en el caso del punto ID 0 (Figura 9), de modo que si se realiza un área de influencia (buffer) de 3 metros (precisión del GPS) sobre el punto, su posible localización cae dentro de los límites de la ventana 3x3.

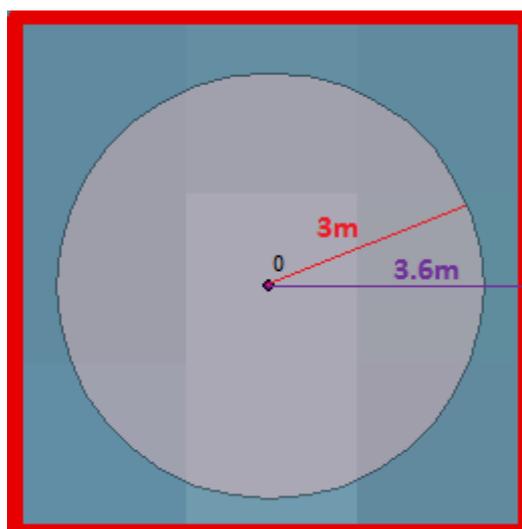


Figura 9: Ventana 3x3 y Buffer de 3 metros sobre el Punto ID 0

En este caso la distancia mínima que existe entre el centro del píxel y el borde externo de los píxeles adyacentes es de: $1'2m + 2'4m = 3'6m$; superior al buffer de 3 metros.

Sin embargo se encontraron casos como el del punto ID 6 (**Figura 10**) en el que la ubicación del punto de muestreo dentro del píxel fue algo menos centrada, se podría dar el caso que el valor real de clorofila excediera los límites de la ventana 3x3:

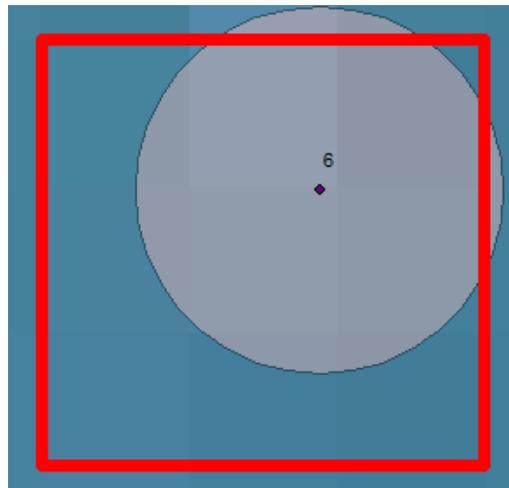


Figura 10: La ventana 3x3 no tiene la precisión del Buffer 3m

Se observó que este método a pesar de minimizar errores, podía no responder a la precisión del GPS. Para obtener otros resultados, se amplió la ventana a 5x5.

Ventana 5x5

Con este método se logró solventar problemas pero a costa de incluir gran cantidad de información innecesaria como se puede observar en el caso extremo del punto ID 6 (**Figura 11**) que muestra la ventana 5x5 sobre buffers de la precisión del GPS (3-5m):

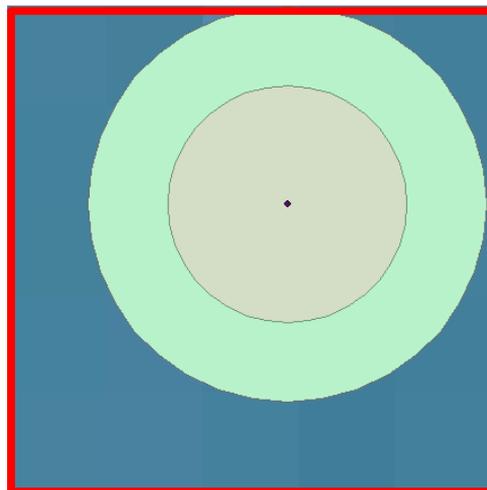


Figura 11: Ventana 5x5 sobre el Punto ID 6 y Buffers de 3-5m

Se puede apreciar en la **Figura 11** como hay varios píxeles que no tienen ninguna probabilidad de contener el punto, y aún así se incluyen en los cálculos, obteniendo así valores que no serían de buena precisión. No obstante, se decidió realizar el análisis estadístico utilizando estos datos (**Tabla 11**):

Tabla 11: Valores de reflectividad correspondientes a la Ventana 5x5

Clorofila	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
1,8	1315	1154	827	509
1,3	1448	1365	1176	581
1,2	1408	1304	1016	508
1,7	1171	877	461	309
0,7	1196	952	481	329
0,8	1280	1041	570	391
0,9	1259	1012	555	366
0,3	1107	769	420	305
0,6	1116	787	443	311
0,7	1140	800	443	328
0,5	1109	767	416	287
0,2	1112	777	441	308
0,2	1104	767	450	332
0,4	1112	767	451	328
0,6	1108	764	430	315
0,8	1111	775	443	319
1,6	1125	801	423	291
0,4	1088	747	416	293
0,4	1058	708	419	297
0,5	1043	691	409	281
0,5	1102	760	435	310
0,4	1057	703	412	306
0,2	1058	717	430	310
0,5	1067	716	414	301
0,2	1049	686	414	294
0,3	1044	692	404	291
0,4	1050	695	389	267
0,6	1035	678	394	271
0,9	1061	707	384	263
0,9	1048	676	377	248
0,8	1073	701	414	283
Media	1130,8	817,9	488,9	326,8
Desviación	105,7	178,9	182,7	74,8

Con esta ventana se logra homogeneizar los valores tal y como se observa en los valores de desviación, sin embargo es posible que en ciertos puntos el uso de esta ventana provoque el aporte de valores anómalos debido a la variabilidad de la reflectividad.

De este modo, se realizó el análisis con los valores de reflectividad de píxeles individuales, ventana 3x3 y ventana 5x5.

3.3.3. Band Ratios

A partir de cada una de las bandas, se calcularon las imágenes de los siguientes *Band Ratios* que fueron utilizados como variables independientes en los modelos (Tabla 12):

Tabla 12: Variables independientes utilizadas en los modelos

B1	B2	B3	B4
B4/B1	B4/B2	B4/B3	B3/B2
B3/B1	B2/B1	B1xB2	B1xB3
B1xB4	B2xB3	B2xB4	B3xB4
B1xB1	B2xB2	B3xB3	B4xB4

3.4. Cálculo de modelos de regresión

En este punto se disponían de los tres conjuntos de variables y de las medidas de concentración de clorofila obtenidas en la salida de campo. Estos datos se introdujeron en el software estadístico *Statgraphics* y se procedió a buscar el mejor modelo/relación entre ellos. El procedimiento seguido fue el siguiente:

- Analizar cada variable por sí sola
- Determinar variables relacionadas significativamente
- Realizar regresión múltiple para obtener modelos

3.4.1. Píxeles individuales

Se analizó cada variable de forma individual, y se escogieron las 15 mejores para buscar modelos (Tabla 13):

Tabla 13: Análisis estadístico de Píxeles Individuales

Variabes	R ²
B1	45,7
B1xB1	45,6
B1xB2	44,5
B2	44,4
B2xB2	43,2
B2/B1	42,7
B2xB4	40,0
B1xB4	38,5
B2xB3	37,5
B1xB3	37,3
B4xB4	35,8
B3xB4	35,5
B3	35,1

B4	33,8
B3xB3	33,2
B4/B3	29,8
B3/B1	29,7
B4/B1	20,5
B3/B2	13,6
B4/B2	2,8

Se realizaron regresiones múltiples seleccionándose los modelos con valores de R^2 más altos utilizando 5, 4, 3 y 2 variables (**Tabla 14**):

Tabla 14: Mejores modelos para Píxeles Individuales

Variabes	R²
B2xB2, B2xB4, B1xB3, B4xB4, B3	66,7
B1xB2, B4, B2xB4, B4xB4	65,3
B1xB1, B1xB4, B4xB4	62,7
B1xB4, B4	55,6

3.4.2. Ventana 3x3

Tras la aplicación de la ventana 3x3 se esperaba conseguir una mejora en los resultados del análisis, debido a que los datos sí habían cambiado ligeramente como se puede apreciar en la **Tabla 15**, lo que podría generar mejoras en la explicación de la variable clorofila a :

Tabla 15: Diferencia de Valores 3x3 respecto a Píxeles Individuales

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Valor Reflectividad medio	1145	840	518	341
Valor 3x3 medio	1146	839	515	341
Suma diferencias individuales	154	237	268	262
Diferencia promedio individual	4,162	6,405	7,243	7,081
% diferencia	0,3631	0,6827	1,2695	1,7576

Se analizó cada variable de forma individual, y se escogieron las 17 mejores (**Tabla 16**):

Tabla 16: Análisis estadístico de la Ventana 3x3

Variables	R ²
B1	46,1
B1xB1	45,9
B1xB2	44,5
B2	44,4
B2xB2	43,2
B2/B1	42,5
B2xB4	40,4
B1xB4	39,3
B1xB3	37,6
B2xB3	37,6
B4xB4	36,8
B3xB4	35,9
B3	35,6
B4	35,1
B4/B3	34,4
B3xB3	33,3
B3/B1	30,6
B4/B1	22,8
B3/B2	15,4
B4/B2	1,4

Se realizaron regresiones múltiples seleccionándose los modelos con valores de R² más altos utilizando 5, 4, 3 y 2 variables (**Tabla 17**):

Tabla 17: Mejores modelos para la Ventana 3x3

Variables	R ²
B2xB2, B2xB4, B1xB3, B4xB4, B3/B1	77,8
B1xB2, B2xB4, B4xB4, B4	71,6
B1xB1, B1xB4, B4xB4	67,8
B1xB4, B4	57,1

Se observa una gran mejora respecto a los resultados obtenidos con píxeles individuales.

3.4.3. Ventana 5x5

Al realizar el procedimiento de la Ventana 5x5 se observó un valor atípico que no aparecía con anterioridad, concretamente el punto ID 3 que al ampliar la ventana de 3x3 a 5x5 contenía algunos píxeles con elevados valores de reflectividad, tratándose de una ola marina. Para este análisis dicho punto fue eliminado.

También se realizó una comparativa entre los valores de reflectividad y los obtenidos al realizar la ventana 5x5 (**Tabla 18**):

Tabla 18: Diferencia de Valores Ventana 5x5 respecto a Píxeles Individuales

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Valor Reflectividad medio	1145	840	518	341
Valor 5x5 medio	1131	818	489	327
Suma diferencias individuales	534	615	656	640
Diferencia promedio individual	14,4	16,6	17,7	17,3
% diferencia	1,25	1,98	3,45	5,11
% diferencia sin el punto ID 3	0,89	1,48	2,9	4,18

Se analizó cada variable de forma individual, y se escogieron las 13 mejores (**Tabla 19**):

Tabla 19: Análisis estadístico de la Ventana 5x5

Variabes	R ²
B2/B1	36,5
B1	35,8
B2	35,7
B1xB1	34,9
B4/B3	34,9
B1xB2	34,5
B2xB2	33,7
B2xB4	29,7
B1xB4	27,8

B2xB3	27,5
B1xB3	27,1
B3	26,2
B4xB4	25,3
B3xB4	24,8
B4	24,0
B3xB3	22,9
B3/B1	22,6
B4/B1	12,3
B4/B2	8,8
B3/B2	7,4

Se realizaron regresiones múltiples seleccionándose los modelos con valores de R^2 más altos utilizando 5, 4, 3 y 2 variables (**Tabla 20**):

Tabla 20: Mejores modelos para la Ventana 5x5

Variables	R^2
B1xB1, B1xB4, B1xB3, B3, B4xB4	70
B2, B4/B3, B2xB4, B4xB4	64,1
B1, B1xB4, B4xB4	62,8
B2, B1xB4	41,9

Se puede observar que los resultados empeoran respecto a los obtenidos con la ventana 3x3.

3.5. Elección del mejor modelo

Realizados los análisis estadísticos sobre todos los tipos de información de que se disponía, se elaboró un cuadro resumen para decidir cuál sería el más idóneo para crear un mapa temático (**Tabla 21**), en él se recogen las R^2 de los modelos.

Tabla 21: Resumen de los mejores modelos encontrados

Píxeles Individuales	
5 variables	66,7
4 variables	65,4
3 variables	62,7
2 variables	55,6

Ventana 3x3	
5 variables	77,8
4 variables	71,6
3 variables	67,8
2 variables	57,1
Ventana 5x5	
5 variables	70
4 variables	64,1
3 variables	62,8
2 variables	41,9

Tal y como se puede observar, los datos que ofrecen los mejores ajustes para todos los casos son los obtenidos con el método Ventana 3x3, por tanto son los escogidos.

Sin embargo cabe recordar que la variable que se pretende relacionar con la concentración de clorofila es la reflectividad, una variable física, y que por tanto la ecuación ajustada ha de tener un sentido o explicación física.

Observando el modelo de 5 variables cuya fórmula es:

$$\text{Concentración de clorofila (mg/m}^3\text{)} = 4,48544 + 4484,73 \cdot B_2 \times B_2 - 23608,1 \cdot B_2 \times B_4 + 1344,45 \cdot B_1 \times B_3 - 17,6014 \cdot B_3 / B_1 + 27237,2 \cdot B_4 \times B_4$$

Dicho modelo contiene información de todas las bandas, existen problemas de correlación que afectan a su significado estadístico, además de carecer de una explicación física lógica a pesar de tener una $R^2 = 77,8$.

Atendiendo a este criterio, el modelo seleccionado finalmente fue el de 3 variables, que contiene información exclusivamente de la Banda 1 y la Banda 4:

$$\text{Concentración de clorofila (mg/m}^3\text{)} = -1,69996 + 990,717 \cdot B_1 \times B_1 - 4655,07 \cdot B_1 \times B_4 + 6363,27 \cdot B_4 \times B_4$$

Tal y como se explicó en los apartados introductorios, la Banda 1 está relacionada directamente con el agua, y la Banda 4 con el contenido de biomasa. Se puede realizar una explicación física del modelo, cuya $R^2 = 67,8$:

Banda 1: Variable B1xB1

La banda 1 muestra una mayor reflectividad y variabilidad en la zona de agua, proporcionando mayor cantidad de información relevante para el estudio.

Banda 4: Variable B4xB4

La clorofila *a* representa la mayor parte de la biomasa contenida en el agua costera de la zona de estudio, por tanto se pueden relacionar directamente ambos parámetros.

Band Ratio 1x4

De acuerdo con trabajos previos, las características de absorción y reflexión de la clorofila pueden ser estudiadas mejor cuando se incluye más de una banda en el

análisis (Dekker, 1991). De este modo es conveniente el uso de *Band Ratios* relacionados con estas características de la clorofila (Gin, 2002), en este estudio el *Band Ratio* 1x4 contiene la fuerte absorción en el azul (400-500nm) y el máximo de reflectividad en el infrarrojo cercano (700nm), como se puede observar en el Anexo II.4.

3.5.1. Comprobación del modelo

Se realizó una comprobación del modelo escogido, relacionando los datos de laboratorio con los datos resultantes de la aplicación del modelo (Tabla 22), para obtener el gráfico de la relación entre ambos datos (Figura 12). Los puntos no incluidos para obtener el modelo tampoco fueron incluidos en la comprobación.

Tabla 22: Relación entre los datos de laboratorio y datos obtenidos del modelo

Coeficiente de correlación	0,75
RMSE	0,25
Error Medio Absoluto (MAE)	0,20

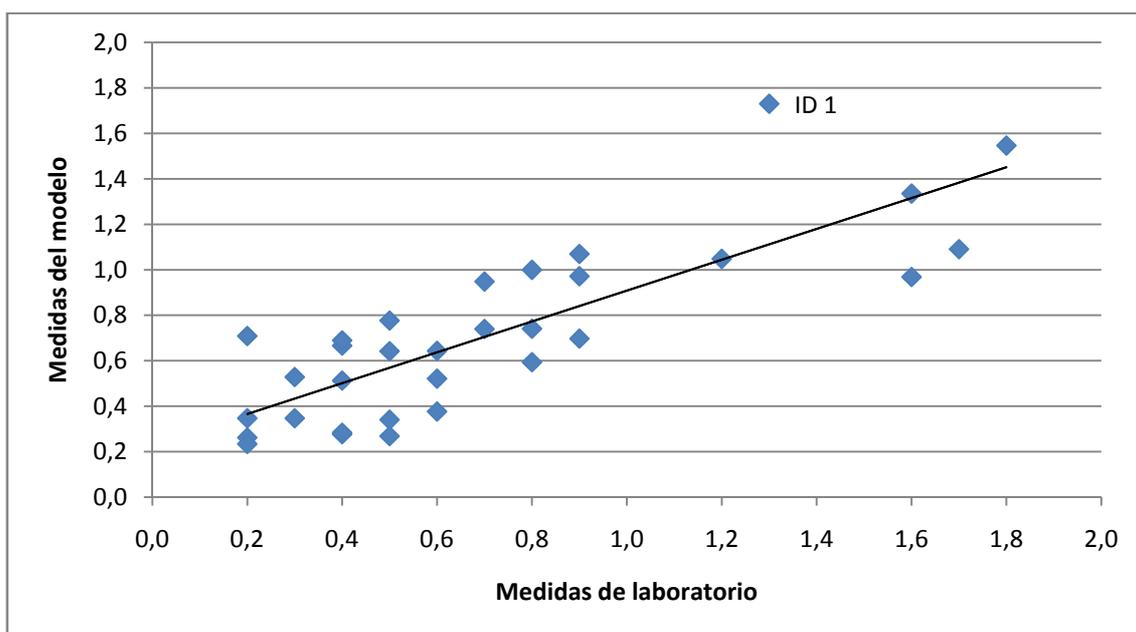


Figura 12: Relación entre los datos de laboratorio y datos del modelo

Los errores cometidos son admisibles atendiendo al RMSE (0'25 mg/m³), indicando una precisión adecuada ya que la zona de estudio, a diferencia de otros estudios (Duan, 2007), presenta una concentración relativamente baja de clorofila *a* por lo que su cuantificación es más complicada y requiere mucha precisión.

Respecto al gráfico, se observa una buena relación, el único punto que muestra mayor diferencia es el ID 1 situado en la zona de costa a la misma distancia de tierra que otros puntos que fueron desestimados para el estudio.

3.6. Mapa resultante

Con el modelo escogido, se creó un mapa temático de la zona de estudio, cuyos píxeles contenían valores de concentración de clorofila.

3.6.1. Elaboración del mapa resultante

Para tener una imagen más clara de la zona, se realizó una máscara que separaba la tierra del agua. Para ello se utilizó el histograma de la banda 4, en el que se detectó una frecuencia bimodal que indicaba la distinción de valores de reflectividad de tierra y de agua. Se pudo establecer un valor límite que suponía la distinción de estas 2 coberturas (**Figura 13**).

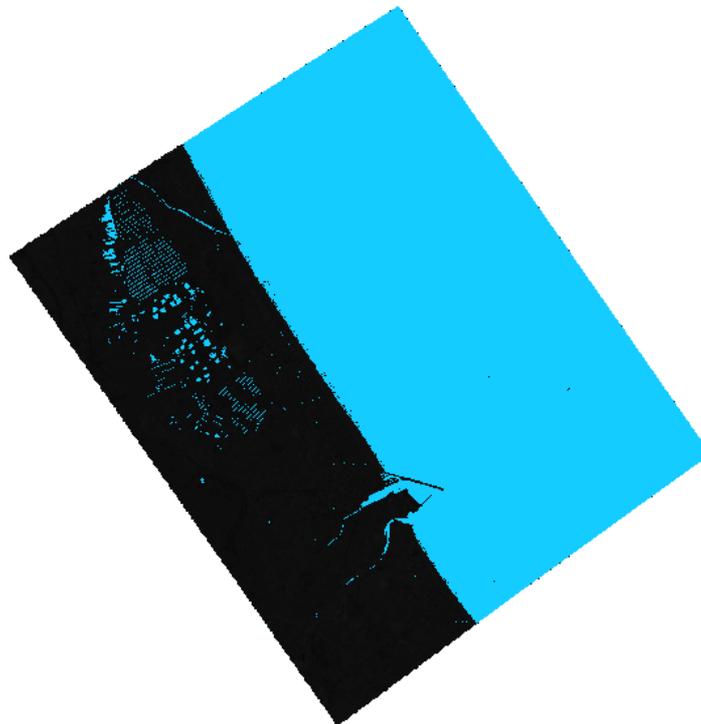
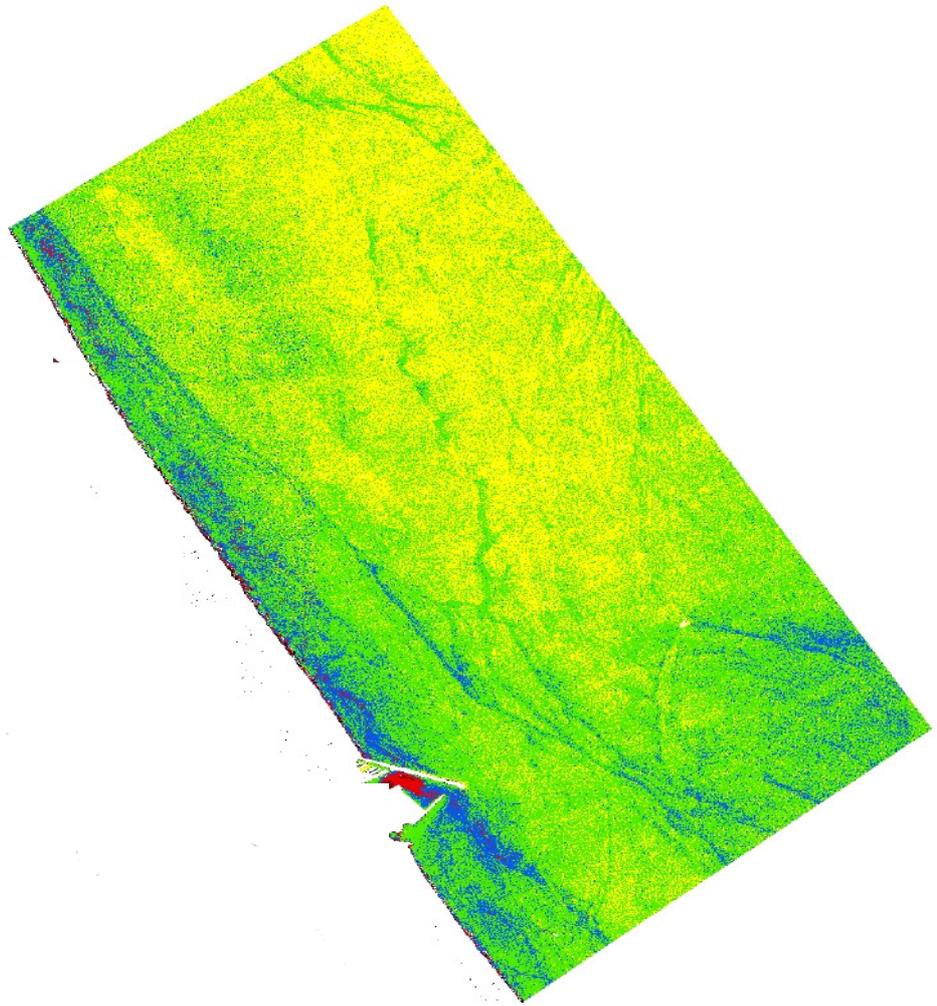


Figura 13: Máscara que distingue entre tierra y agua

Mapa Temático de la Concentración de Clorofila en la zona costera de La Safor



Concentración de Clorofila (mg/m³)



Escala



3.6.2. Discusión del mapa

Observando el mapa temático se pueden diferenciar varias zonas de interés, destacando que valores elevados de clorofila a no significan directamente problemas de eutrofia, depende de la zona y las afecciones locales de la misma.

Gradación natural por franjas:

A medida que aumenta la distancia de la orilla, la concentración de clorofila va disminuyendo. Esta gradación de los valores responde a una distribución normal de la clorofila, donde los mayores valores están cerca de la costa y los menores se encuentran aguas adentro. Esto es debido especialmente a los aportes de agua subterránea cargada de nutrientes que se produce en las zonas de *surf* y *swash*.

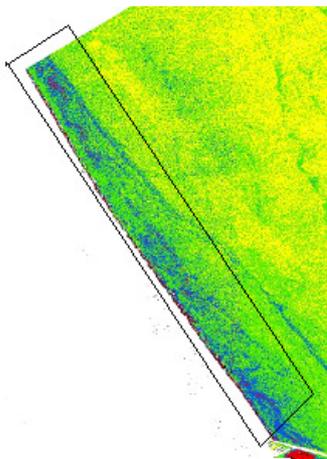


Figura 14: Línea de costa

Línea de costa (Figura 14)

La mayor cantidad de materia sólida en suspensión, la menor profundidad, la acumulación de materia orgánica debido al oleaje y el aporte realizado desde tierra son algunos de los motivos por los que en la línea costera la concentración de clorofila es más elevada que en las zonas más alejadas.

Zona alejada (Figura 15)

Se observa la disminución de la concentración de clorofila a medida que aumenta la distancia a la costa.

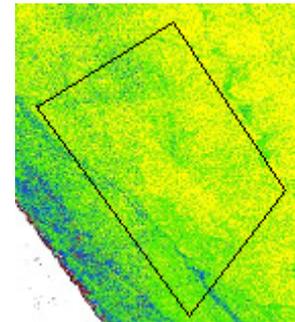


Figura 15: Zona alejada

Zona portuaria

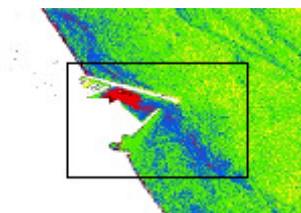


Figura 16: Zona portuaria

En esta zona existen 3 afecciones que contribuyen a la mayor concentración de clorofila a : en primer lugar los aportes del drenaje del marjal a través de tres acequias; en segundo lugar el confinamiento y la baja renovación de las aguas; y finalmente de forma puntual las tareas de aporte de materiales de la ampliación del muelle sur (Figura 16). La afección va más allá del interior del puerto; se observa una línea de propagación a través de la salida del mismo, mostrando que la zona de influencia de

las actividades portuarias es amplia y hay que tener en cuenta que las acciones llevadas a cabo dentro del puerto tienen su afección fuera del mismo.

Afección por el espigón del puerto

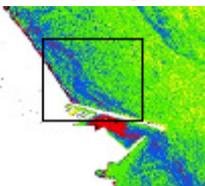


Figura 17: Afección por el espigón

Si bien se ha explicado la naturaleza de la alta concentración de clorofila en la línea de costa, el espigón del puerto provoca una acumulación no natural en su parte norte, aumentando de este modo la concentración de clorofila a de la zona (Figura 17).

Afección por la desembocadura del río Serpis

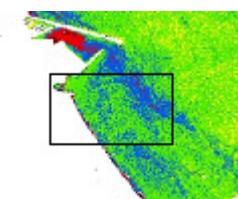


Figura 18: Afección por la desembocadura del río Serpis

El aporte de materia sólida en suspensión y de materia orgánica realizado por el río Serpis puede verse enmascarado por la mayor afección sobre la zona que realiza el puerto. Sin embargo, el efecto acumulatorio del espigón en la parte norte se debería notar de forma contraria en la parte sur (Figura 18), es decir, mucha menor acumulación. Sin embargo esta afección no aparece de forma clara, por lo que podría estar compensada debido al efecto de la desembocadura del río Serpis, que con su aporte compensa el defecto creado por el espigón.

Afección por la desembocadura del río Vaca

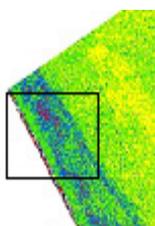


Figura 19: Desembocadura del río Vaca

La desembocadura del río Vaca (Figura 19) puede afectar del mismo modo al medio que la desembocadura del río Serpis. La diferencia es que sin el efecto del espigón, el aporte del río se suma al realizado por la acumulación en la línea costera, mostrando así una zona con mayor concentración de clorofila a de forma puntual.

Afección por un emisario submarino

En la parte este del mapa se observa, aguas adentro, una zona con mayor concentración de clorofila de la que debería haber de forma natural atendiendo al patrón de distribución normal de la clorofila a (Figura 20). Esto es debido a la afección producida por un emisario submarino, cuya liberación de materia orgánica al ecosistema modifica las condiciones, provocando que en una zona donde cabría esperar baja concentración haya niveles similares a los de la línea de costa.

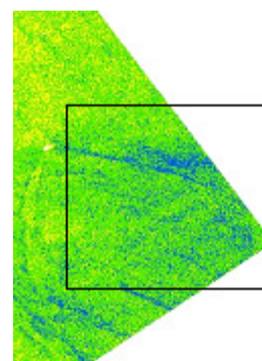


Figura 20: Afección por un emisario submarino

Como conclusión del mapa elaborado, se puede decir que los resultados mostrados pueden ser confirmados mediante patrones de distribución natural, y que las zonas que muestran valores diferentes pueden ser explicados debido a afecciones tanto naturales (desembocaduras de ríos, acumulación por el oleaje) o como consecuencia de acciones del hombre (puerto, espigón, dragado puntual, etc.).

4. Conclusiones

Objetivos conseguidos

El objetivo principal del estudio consistió en relacionar los valores de clorofila α medidos en el agua con la información espectral de una imagen Quickbird. El modelo elegido para ello fue el de 3 variables obtenidas a partir del método de la Ventana 3x3. Se obtuvo un coeficiente de regresión de 0'68 y las variables del modelo fueron tres Band Ratios ($B1^2$, $B4^2$, $B1xB4$). Estas variables fueron creadas a partir de los datos de la banda 1 (aporta información relacionada con el agua) y la banda 4 (relacionada con la cantidad de biomasa).

A partir de la creación del mapa temático se observaron problemas ambientales, tales como la elevada concentración localizada en la zona portuaria y el efecto del emisario submarino.

Cabe destacar la escala de precisión con la que se ha realizado el estudio, tanto precisión espacial (tamaño del píxel de 2'4m debido a la alta resolución espacial de la imagen Quickbird) como en la cuantificación de la clorofila. Otros estudios trabajan con rangos de concentración de clorofila del orden 10 veces mayores al del presente estudio (Duan, 2007; Sun, 2009; Xu, 2009), en el que se ha trabajado con precisiones del orden de 0'3mg/m³, que quizá con otro tipo de imagen no se hubiera podido conseguir.

En conclusión, con el presente estudio se ha aplicado la teledetección para relacionar valores de una imagen satélite con la concentración de clorofila α en el agua; método que puede responder a la creciente necesidad de establecer sistemas de monitoreo ambiental de bajo coste y alta efectividad, además de tener gran cobertura espacial.

5. Aplicaciones

El conocimiento de la concentración y distribución de clorofila α en el agua puede tener distintos tipos de aplicaciones:

Evaluación del estado del ecosistema

Mediante la elaboración de un mapa temático se consigue una evaluación rápida del estado general del ecosistema.

Detección de problemas ambientales puntuales

Conociendo la distribución natural de la clorofila se podrían detectar problemas ambientales puntuales, tales como vertidos ilegales, roturas en conductos que van por debajo del agua (emisarios submarinos, oleoductos, etc.).

Monitoreo ambiental

Si bien con una imagen se pueden detectar problemas, quizá las afecciones se producen de forma puntual debido a algún accidente portuario, o por ejemplo a causa de la torrencialidad de las precipitaciones se aporta mucho material por las desembocaduras de los ríos. Estos fenómenos, así como la evolución en la distribución de la clorofila superficial pueden ser estudiados mediante un sistema de monitoreo ambiental. Con la adquisición de una serie de imágenes se podría realizar el seguimiento en el comportamiento de la clorofila, obteniendo así un sistema de monitoreo ambiental de coste relativamente bajo y de rápida actuación.

Pesquero

La concentración de pigmentos de clorofila es comúnmente considerada como un índice de productividad biológica y en un ambiente oceánico, puede ser relacionado a la producción de peces. Concentraciones de clorofila superiores a 0,2 mg/m³ indican la presencia de suficiente vida planctónica para sustentar una pesquería comercial viable.

Debido a la relación que existe entre los volúmenes de concentración de clorofila en el mar y las zonas en donde habitan los peces, es posible generar un sistema de información que permita ubicar las zonas de habitabilidad de los peces, convirtiéndose esta técnica en una herramienta de trabajo para los pequeños y medianos sectores pesqueros, optimizando recursos y potenciando el sector pesquero artesanal (Godoy, 2005).

Prevención del fenómeno *Bloom*

El monitoreo de la clorofila junto al de la temperatura marina puede servir para la prevención del fenómeno conocido como *Bloom*, que consiste en un rápido crecimiento de las algas y puede provocar problemas ambientales al ecosistema.

Obras portuarias y costeras

Durante la realización de este tipo de obras se modifican las condiciones del ecosistema colindante. El conocimiento del estado en que se encuentra puede modificar los criterios de actuación de dichas obras.

6. Bibliografía

- [1] Adler-Golden S., Acharya K., Berk A., Matthew M., Gorodetzky D. (2005). *Remote Bathymetry of the Littoral Zone From AVIRIS, LASH, and QuickBird Imagery*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Volumen 43, Número 2, Febrero 2005.
- [2] Alexandridis T., Topaloglou C., Lazaridou E., Zalidis G. (2008). *The performance of satellite images in mapping aquacultures*. Ocean & Coastal Management 51 638–644p.
- [3] Baban, S.M.J. (1997). *Environmental monitoring of estuaries; estimating and mapping various environmental indicators in Breydon Water Estuary, U.K., using Landsat TM Imagery*. Estuarine, Coastal, and Shelf Science, 44, 589–598p.
- [4] Champetier, Y. (1972). *Le Prébétique et l'Ibérique côtiers dans le Sud de la Province de Valence et le Nord de la Province d'Alicante (Espagne)*. Tesis Univ. Nancy, Science de la Terre, número 24, 169 pp.
- [5] Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*. Ediciones RIALP. Madrid.
- [6] Dekker, A.G., Malthus, T.J. and Seyhan, E. (1991). *Quantitative modeling of inland water quality for high-resolution mss systems*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 29, 89–95p.
- [7] Desortová, B. (2007). *Relationship between Chlorophyll-a Concentration and Phytoplankton Biomass in Several Reservoirs in Czechoslovakia*. Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie, Volume 66 Issue 2, 153-169p.
- [8] Duan, H., Zhang, Y., Zhang, B., Song, K., Wang, Z. (2007). *Assessment of Chlorophyll-a Concentration and Trophic State for Lake Chagan Using Landsat TM and Field Spectral Data*. Environ Monit Assess, 129:295–308p.
- [9] Estornell, J. (2005). *Teledetección aplicada a las ciencias ambientales: prácticas de laboratorio* / Javier Estornell Cremades, Editorial UPV Universidad Politecnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría.
- [10] Gin, K.Y., Koh, S.T. and Chan, E.S. (2002). *Application of spectral signatures and colour ratios to estimate chlorophyll in Singapore's coastal waters*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 55, 719–728p.
- [11] Godoy, R. (2005). *Aplicación de la teledetección en el análisis de la concentración de clorofila en las costas de la cuarta región de Coquimbo*. Universidad de Santiago de Chile.
- [12] Jensen, J.R. (2005). *Introductory Digital Image Processing, a Remote Sensing Perspective*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.

- [13] Jinfang, D. (2004). *Investigation of chlorophyll-a and total suspended matter concentrations using Landsat ETM and field spectral measurement in Taihu Lake, China*. International Journal of Remote Sensing, 26:13, 2779-2795p.
- [14] Koponen, S., Pulliainen, J., Servomaa, H., Zhang, Y., Hallikainen, M., Kallio, K., et al. (2001). *Analysis on the feasibility of multisource remote sensing observations for chl-a monitoring in Finnish lakes*. Science of the Total Environment, 268, 95–106p.
- [15] Koponen, S., Pulliainen, J., Kallio, K., & Hallikainen, M. (2002). *Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data*. Remote Sensing Environment, 79, 51–59p.
- [16] Mishra D., Narumalani S., Rundquist D., Lawson M. (2006). *Benthic Habitat Mapping in Tropical Marine Environments Using QuickBird Multispectral Data*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1037-1048p.
- [17] Pérez, C. (2006). *Teledetección: Nociones y aplicaciones*. Universidad de Salamanca.
- [18] *Proyecto Informativo de las obras de laminación y mejora del drenaje de la cuenca de la Rambla Gallinera* (2005). Anejo nº 3: Geología, geotecnia y estudios de materiales.
- [19] Pulliainen, J., Kallio, K., Eloheimo, K., Koponen, S., Servomaa, H., Hannonen, T., et al. (2001). *A semi-operative approach to lake water quality retrieval from remote sensing data*. Science of the Total Environment, 268, 79–93p.
- [20] *Registro meteorológico estación de Piles*. Series de datos 1961-1996.
- [21] Rivas Martínez, S. (1987). *Mapa de series de vegetación de España 1: 400.000*. Editorial ICONA.
- [22] Sun, D. (2009). *A Unified Model for Remotely Estimating Chlorophyll a in Lake Taihu, China, Based on SVM and In Situ Hyperspectral Data*. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 47, NO. 8.
- [23] Woodruuf, D.L., Stumpf, R.P., Scope, J.A. and Paerl, H.W. (1999). *Remote estimation of water clarity in optically complex estuarine waters*. Remote Sensing of Environment, 68, 41–52p.
- [24] Xu, J. (2009). *Estimation of chlorophyll-a concentration using field spectral data: a case study in inland Case-II waters, North China*. Environ Monit Assess (2009) 158:105–116p.

I. Anexo I - Teledetección

I.1. Introducción

Por teledetección se entiende, de modo genérico, cualquier procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto directo con ella; una técnica que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales.

I.2. Componentes de un sistema de teledetección

El fundamento físico de la teledetección se basa en la interacción de la energía electromagnética con las cubiertas terrestres. Estas tienen un comportamiento reflectivo variable, condicionado tanto por factores externos (ambientales) como por sus propias características físicas y químicas en el momento de la toma de la imagen.

El sistema de teledetección está formado por los siguientes componentes (**Figura 21**):

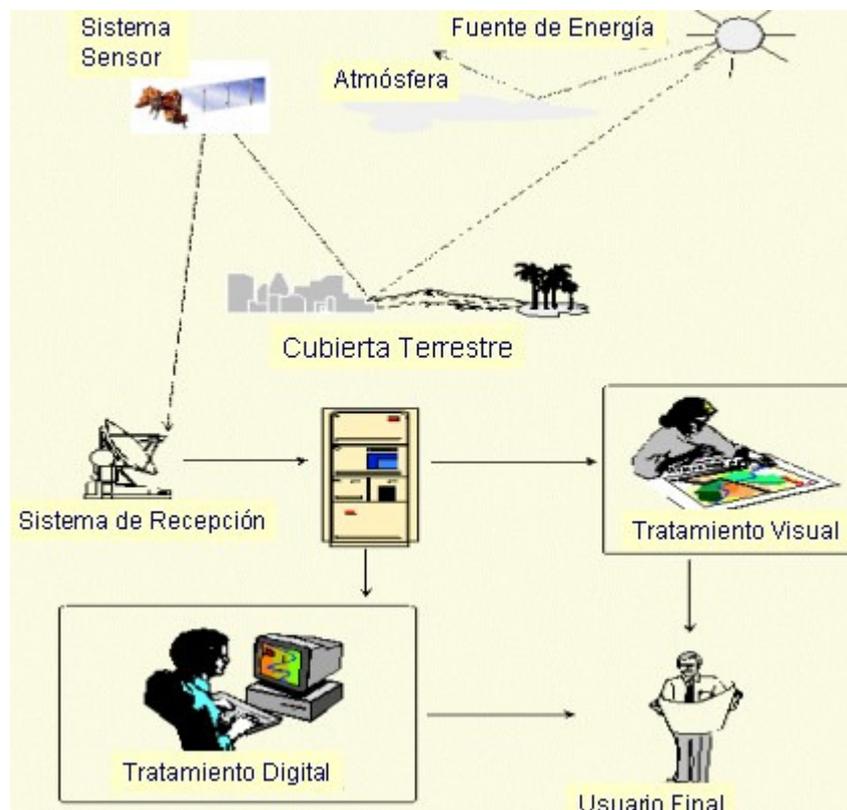


Figura 21: Componentes de un sistema de teledetección. Fuente: Chuvieco, 1996.

El primer componente es la fuente generadora de la energía electromagnética. La energía se refleja en las cubiertas y es recogida por los sensores. Dependiendo de si esta energía es emitida por una fuente externa (de forma habitual el sol), o si es emitida por el propio sensor, se distinguen dos tipos de teledetección (pasiva y activa).

La información recogida por los sensores es transmitida a la Tierra como señal digital, en forma de matriz numérica. En los sistemas de recepción se lleva a cabo un primer tratamiento de la imagen mediante el cual se depuran algunos errores de índole geométrico o radiométrico, antes de ser distribuida a los usuarios.

Finalmente, las imágenes en formato analógico o digital son analizadas por los usuarios. Estos análisis y tratamientos permiten obtener nueva información como mapas temáticos y datos estadísticos, etc.

I.3. Principios físicos

Los fundamentos de la teledetección se abordan desde el campo de la física, y concretamente, en los ámbitos de la óptica y la electrónica. La observación remota es posible gracias a la interacción entre un flujo de energía con las cubiertas terrestres. Dicho flujo es denominado energía electromagnética y ha sido explicada por dos teorías físicas:

- **Teoría ondulatoria:** La radiación electromagnética es un fenómeno de propagación en el que actúan dos campos perpendiculares: el magnético y el eléctrico.

Esta teoría se explica sobre la base de dos conceptos fundamentales que son la longitud de onda y la frecuencia (**Figura 22**).

La fórmula en la que se sustentan estas teorías es (**Ecuación 8**):

$$c = \lambda * F \quad (8)$$

Donde c es la velocidad de propagación de la luz (una constante), siendo λ y F longitud de onda y frecuencia respectivamente. De la fórmula se deduce que longitudes de onda pequeñas tendrán altas frecuencias y viceversa.

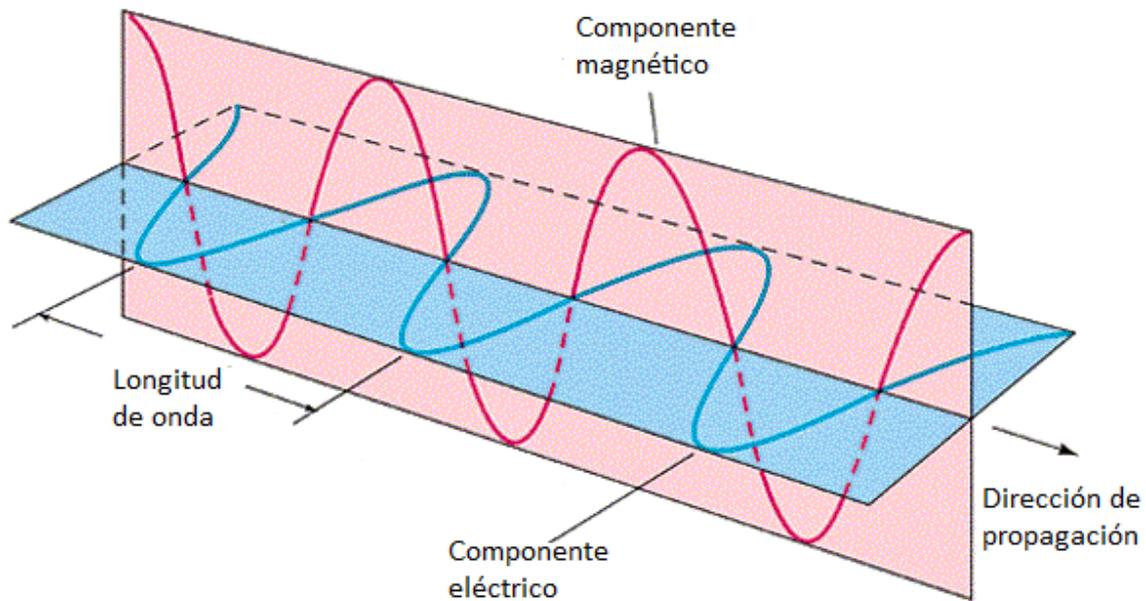


Figura 22: Propagación y componentes de la energía electromagnética.

- **Teoría cuántica:** Explica el fenómeno de la radiación electromagnética basándose en sus propiedades energéticas siendo la fórmula esencial (**Ecuación 9**):

$$Q = h * F \quad (9)$$

Donde Q es la cantidad de energía transportada por una onda, h es una constante (la constante de Planck) y F es la frecuencia.

Si se despeja F en la **Ecuación 4** y se sustituye en la **Ecuación 9**, se obtiene la expresión (**Ecuación 10**):

$$Q = h * \left(\frac{c}{\lambda}\right) \quad (10)$$

De esta última fórmula se deduce que a medida que se trabaje con longitudes de onda mayores, menor será su contenido energético, y por tanto será más difícil detectar estas radiaciones.

En el estado actual de desarrollo tecnológico los sensores espaciales utilizan un ámbito reducido de longitudes de onda que van desde el espectro visible (comprendido entre 0'4 y 0'7 micras), hasta el dominio del microondas (ondas de más de un milímetro), pasando, en un emplazamiento intermedio, por las regiones espectrales del infrarrojo cercano, medio y térmico (**Figura 23**).

La acción de determinados compuestos químicos localizados en la atmósfera, que causan un efecto absorbente en regiones concretas del espectro, limita también la captura de la radiación procedente de la Tierra.

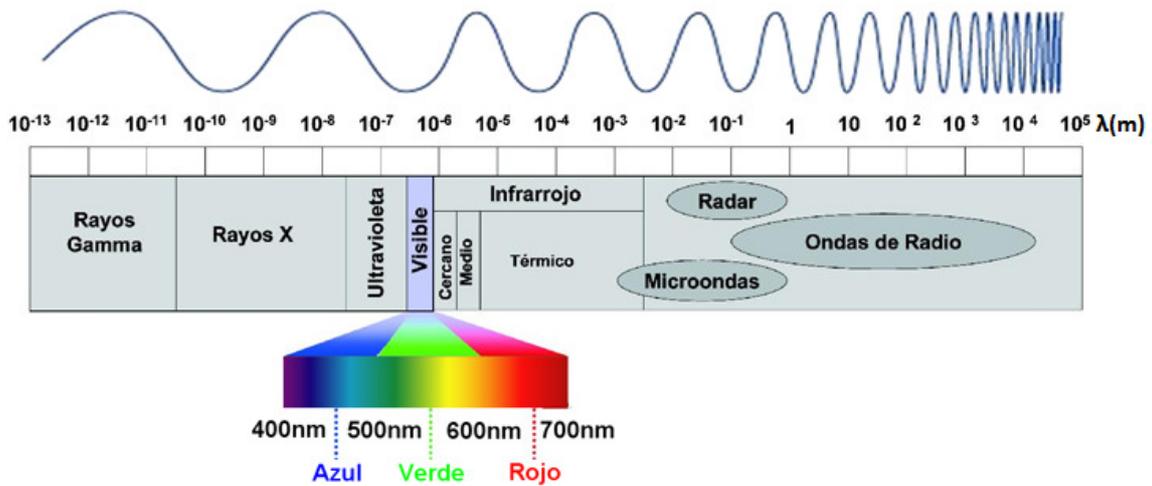


Figura 23: El espectro electromagnético

I.4. Signaturas espectrales

Si se representan en un gráfico la longitud de onda en el eje X y la reflectividad en el eje Y, se puede observar que cada cubierta terrestre muestra una curva característica en el gráfico. Dichas curvas se denominan signaturas espectrales, y personalizan en comportamiento espectral de unas cubiertas respecto a otras. Su distinto trazado permite distinguir entre varias cubiertas o varios estados diferentes de la misma cubierta (Figura 24).

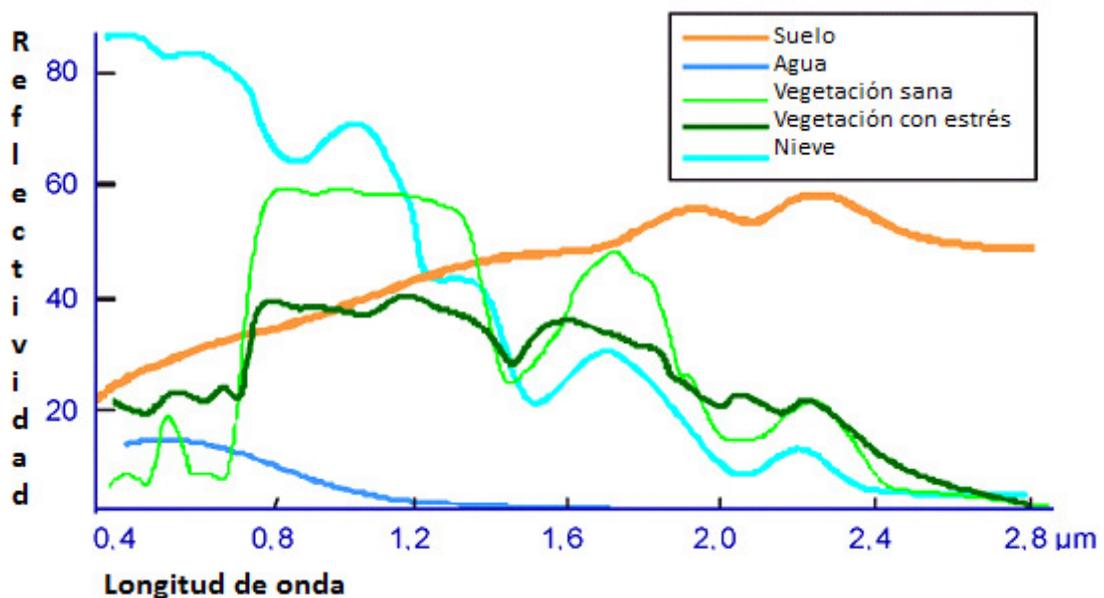


Figura 24: Signaturas espectrales

I.5. La imagen multiespectral

Se trata de la imagen resultante de la captura por el sensor de la radiancia procedente de la superficie terrestre, tras la transformación de estos niveles de radiancia en valores numéricos que se denominan valores digitales.

El valor del nivel digital correspondiente a un píxel será proporcional a la intensidad de radiancia procedente del terreno. Para ello se utilizan sistemas de conversión analógico-digital.

Este procedimiento se repite para cada una de las bandas, generándose una matriz tridimensional en la que el valor del nivel digital de cada píxel está ubicado en una fila, columna y banda determinada, generándose de este modo la imagen multiespectral.

El número de bandas varía considerablemente de unos sensores a otros, ajustándose al propósito para el cual fueron concebidos. De este modo existen sensores con pocas bandas como el SPOT o Quickbird (4 bandas), otros como Landsat tienen 7, llegando a unos sensores denominados hiperespectrales que pueden superar las 200 bandas.

I.6. Resoluciones de los sensores

Los sensores empleados en la teledetección cuentan con 4 tipos de resoluciones distintas, siendo éstas las que definen los rangos de precisión de los mismos, concepto muy importante para el análisis de las imágenes satelitales.

-Resolución espacial: Capacidad del sistema para distinguir objetos según su tamaño, y concretamente, se refiere al tamaño del píxel sobre el terreno.

Esta resolución juega un papel fundamental ya que condiciona la escala de trabajo y la fiabilidad de la interpretación; cuanto menor sea el tamaño del píxel, menor será la posibilidad de que contenga 2 cubiertas fronterizas. Sin embargo en algunos casos puede ser mejor contar con un tamaño de píxel mayor, ya que con ello se reduce la variabilidad de las categorías.

-Resolución radiométrica: Capacidad del sensor para discriminar niveles o intensidades de radiancia. La energía electromagnética recibida por el sensor, cuando se convierte a nivel digital, necesita un formato binario (número de bits) para codificarse.

A mayor número de bits reservados para almacenar el valor de la reflectividad de un píxel, mayor resolución radiométrica.

-Resolución espectral: Indica el número y la anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Cuanto mayor sea el número de bandas que proporcione, mayor será la resolución espectral.

Cuanto más estrechas sean estas bandas, más concretas serán las mediciones realizadas sobre regiones coherentes del espectro.

-Resolución temporal: Se trata del tiempo de paso del satélite sobre la vertical de un punto. Con esto se determina la periodicidad de adquisición de imágenes de una misma zona.

De este modo se puede cuantificar la capacidad del sistema sensor para registrar los cambios temporales acaecidos sobre una determinada cubierta, lo cual es de vital importancia en estudios evolutivos.

1.7. Análisis de las imágenes

El análisis de las imágenes procedentes del satélite puede realizarse de dos modos: mediante interpretación visual o mediante técnicas de tratamiento digital de información multispectral.

La interpretación visual pretende, sin intervención del ordenador, extraer información espacial a través del análisis de la imagen y sus cualidades (brillo, color, textura, forma, tamaño de los objetos que la componen). El tratamiento digital también se dirige a la extracción de información temática sobre el terreno, pero usando técnicas matemáticas y estadísticas implementadas mediante algoritmos en programas informáticos.

1.8. Aplicaciones de la teledetección

Las aplicaciones de la teledetección comprenden una gran variedad de disciplinas. Como herramienta de investigación, las imágenes espaciales han acreditado su valía para las siguientes aplicaciones:

- Análisis en tiempo real de masas nubosas
- Cartografía geológica
- Cartografía de la vegetación del suelo
- Cartografía térmica de la superficie del mar

- Control de la acumulación de nieve
- Control del movimiento de icebergs
- Estudios de erosión de playas y arenales
- Estimación de modelos de escorrentía y erosión
- Inventario de recursos para estudios de impacto ambiental
- Medidas de aguas superficiales y humedales
- Medidas de salinidad del agua
- Predicción de rendimientos de cultivos
- Etc.

II. Anexo II - Clorofila

II.1. Introducción

La clorofila es el pigmento fotorreceptor responsable de la primera etapa en la transformación de la energía de la luz solar en energía química, y consecuentemente la molécula responsable de la existencia de vida superior en la Tierra. Se encuentra en orgánulos específicos, los cloroplastos. Este estudio se centra en la clorofila contenida en el agua, concretamente en la clorofila *a* que es la mayoritaria.

II.2. Función

La función de las clorofilas es la absorción de energía luminosa en la variante de la fotosíntesis que se denomina fotosíntesis oxigénica.

El principal papel de las clorofilas en la fotosíntesis es la absorción de fotones de luz con la consiguiente excitación de un electrón. Ese electrón excitado cede su energía, volviendo al estado normal, a algún pigmento auxiliar (a veces otras clorofilas), donde se repite el fenómeno. Al final el electrón excitado facilita la reducción de una molécula, quedando así completada la conversión de una pequeña cantidad de energía luminosa en energía química, una de las funciones esenciales de la fotosíntesis.

II.3. Estructura

La estructura de la molécula de clorofila tiene dos partes: un anillo de porfirina sustituida (con pequeños grupos enlazados, sustituyentes) y una cadena larga llamada fitol ([Figura 25](#)).

El anillo de porfirina es un tetrapirrol, con cuatro anillos pentagonales de pirrol enlazados para formar un anillo mayor que es la porfirina. El fitol es una cadena hidrocarbonada con restos de metilo (-CH₃) a lo largo. Tiene, como todas las cadenas orgánicas basadas sólo en C e H, un carácter “hidrófobo”; es decir, que repele al agua. Sirve para anclar la molécula de clorofila en la estructura anfipática de los complejos moleculares en que residen las clorofilas.

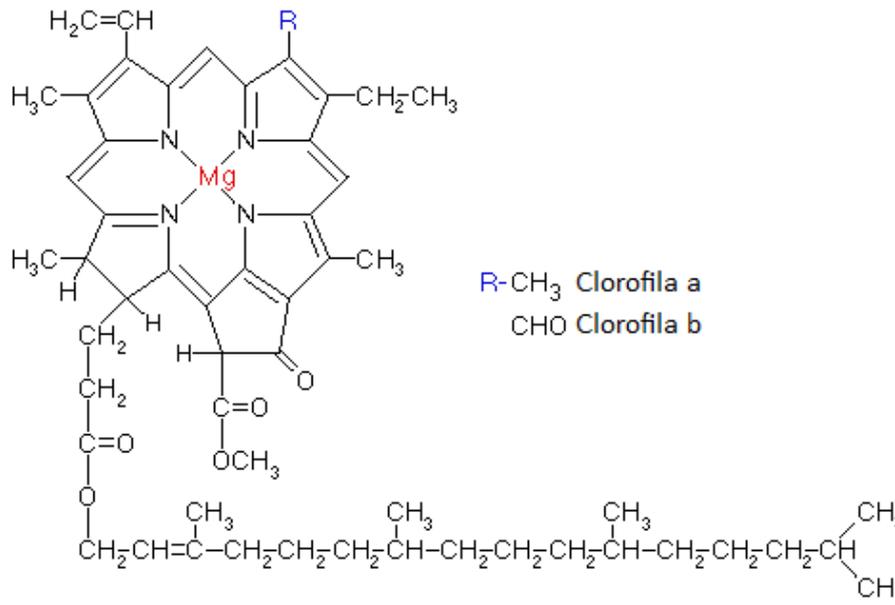


Figura 25: Estructura de la molécula de la clorofila

II.4. Signatura espectral

Las clorofilas tienen típicamente dos puntos de absorción en el espectro visible, uno en el entorno de la luz azul (400-500 nm de longitud de onda), y otro en el rojo (600-700 nm); sin embargo reflejan la parte media del espectro, la más nutrida y correspondiente al color verde (500-600 nm) (Figura 26). Esta es la razón por la que las clorofilas tienen color verde.

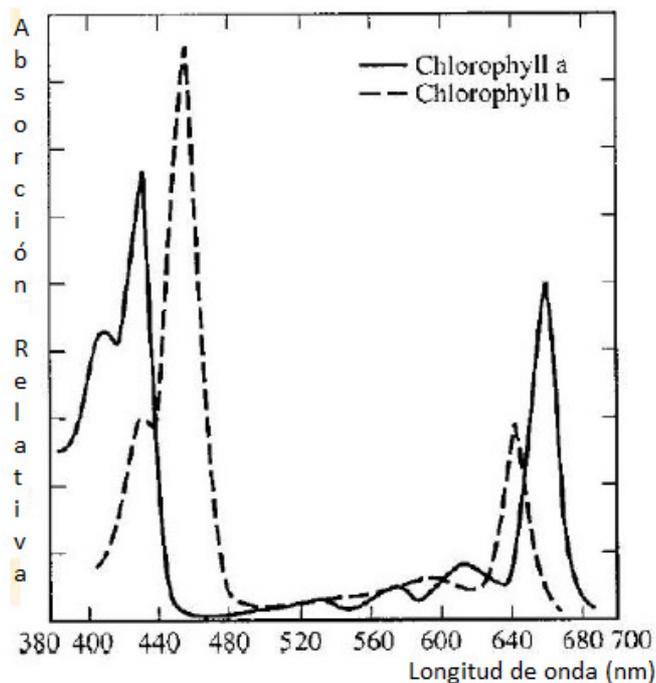


Figura 26: Espectro de absorción de la clorofila