

ÍNDICE GENERAL

PREFACIO	11
PRÓLOGOS	13
Capítulo 1. MARCO TEÓRICO	19
1. Caracterización de tipos de agua	19
2. Limnología en España	29
3. Limnología en el siglo XXI	31
Capítulo 2. LIMNOLOGÍA MEDIANTE TELEDETECCIÓN	33
1. Propiedades ópticas inherentes (IOP)	34
2. Propiedades ópticas aparentes (AOP)	35
3. Relaciones entre IOP y AOP.	37
4. Constituyentes de las aguas naturales	40
5. Propiedades ópticas de las aguas naturales	43
6. Limnología mediante Teledetección	47
Capítulo 3. ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS DE CAMPO	61
1. Planificación	61
2. Toma de datos de campo	67
3. Análisis de pigmentos fotosintéticos	74
4. Concentración de sólidos en suspensión.	85

5. Fitoplancton.	85
6. Materia orgánica disuelta y coloidal	87
7. Sondas Multiparamétricas	87
 Capítulo 4. BEAM SOFTWARE LIBRE DE LA ESA	 91
1. Apertura y visualización de imágenes	95
2. Información sobre las imágenes	100
3. Análisis de la imagen	105
4. Descripción de las herramientas de BEAM.	120
 Capítulo 5. EL WATER PROCESSOR	 169
1. La Albufera de Valencia como lago eutrófico	170
2. El Water Processor de BEAM	173
 Capítulo 6. OBTENCIÓN DE ALGORITMOS DE CALIDAD DE AGUAS	 187
1. Obtención de algoritmos	188
2. Algoritmos usados en calidad de aguas	191
3. Algoritmo para sólidos en suspensión	199
4. Algoritmo para transparencia	201
5. Algoritmos en la Albufera de Valencia	203
 Capítulo 7. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS MASAS DE AGUA	 207
1. Las lagunas de gravera de la vega del Jarama	207
2. Material y Métodos	210
3. Resultados de la morfometría de las masas de agua.	220
4. Conclusiones	226

Capítulo 8. PRESENTE Y FUTURO EN ESPAÑA	229
1. Estudios actuales	230
2. Estudios futuros: nuevos sensores	238
3. Conclusión	243
 Apéndice A. CAMBIOS EN LAS HERRAMIENTAS DE BEAM/VISAT	 245
 Apéndice B. TABLA DE ACRÓNIMOS EMPLEADOS EN EL LIBRO	 253
 BIBLIOGRAFÍA	 261

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

La teledetección se ha utilizado en estudios relacionados con el agua, tanto desde la perspectiva de la hidrología como desde la perspectiva de la ecología. Ambas ciencias tienen en común el estudio de la calidad de las masas de agua, y la teledetección, aunque ya se está utilizando, no ha probado todavía todo su potencial. Cabe esperar que, poco a poco, se vaya desarrollando de tal forma que sea una herramienta común en la gestión de la calidad del agua.

Para llevar a cabo un estudio sobre la calidad del agua mediante teledetección debemos tener en cuenta las ventajas que esta técnica ofrece y todos los factores que intervienen en dicho proceso, como son los tipos de agua existentes en la Tierra, la interacción de la radiación solar con cada una de ellas, y los sensores y plataformas que se pueden utilizar.

1. CARACTERIZACIÓN DE TIPOS DE AGUA

Los tipos de agua vienen determinados por la concentración de los componentes que la conforman, así como por su localización.

1.1. Componentes del agua

Se pueden clasificar los componentes del agua según su procedencia y estado (Margalef, 1983):

- *Materia sin vida*, toda la materia inerte que se encuentra en el agua. Esta materia puede encontrarse en forma de:
 - *Sólidos en suspensión* (SS), esto es, toda materia que puede ser separada del agua mediante un proceso de filtrado, sea cual sea el tamaño de poro del filtro utilizado.
 - *Materia disuelta*, aquélla que no puede ser separada del agua mediante un proceso de filtración.

- *Materia con vida*, desde microorganismos, por ejemplo virus, bacterias o plancton, hasta vertebrados y plantas superiores.

Fitoplancton: Clorofila-a

El *plancton* es la fracción viva de la materia que se halla en suspensión en el seno de las aguas y que se mueve pasivamente debido al viento, a las olas o a las corrientes. A aquellos organismos fotosintéticos que son productores de materia orgánica en los medios acuáticos se los denomina *fitoplancton*; entre las aguas continentales se encuentran, habitualmente, en aguas estancadas, de lagos, estanques o pantanos (aguas leníticas) y en los tramos bajos de los grandes ríos.

El fitoplancton (algas y talofitas) y algunas bacterias constituyen el eslabón más bajo en la cadena alimenticia en el medio acuático porque convierten los nutrientes inorgánicos en materia orgánica susceptible de ser utilizada por otros seres vivos.

Entre los principales componentes del fitoplancton en agua dulce se encuentran coexistiendo poblaciones de distintos grupos distribuidos en nichos ecológicos según sus diferentes necesidades y tolerancia a los parámetros ambientales de tipo fisicoquímico. Podemos distinguir, entre los más comunes:

Cianobacterias. Es el único grupo de algas que tiene estructura celular procariota, carecen de núcleo y se reproducen por partición. La mayor parte de ellas se organizan formando estructuras filamentosas, pero un importante número de especies planctónicas son unicelulares, apareciendo en forma de colonia. Tanto individualmente como en colonias, presentan una envoltura gelatinosa muy variable e irregular, en tamaño y forma. Las filamentosas tienen una cubierta mucilaginoso y un tricoma formado por células alineadas dentro de la cubierta. Se reproducen por fragmentación de los tricomas o por células diferenciadas llamadas aquinetos. Existe también una diferenciación de ciertas células vegetales en heterocistes. Estas células carecen de ficobilinas, encargadas de absorber la luz, y parecen ser las encargadas de la fijación de nitrógeno.

Clorofíceas. Forman un grupo extremadamente grande y de gran diversidad morfológica, y su distribución está casi limitada a las aguas dulces. Son las más semejantes a las plantas superiores por la coloración y la presencia de los pigmentos asimiladores en los cloroplastos, la existencia de almidón como producto de la fotosíntesis y las paredes celulares formadas por celulosa y pectina. Comprenden todos los niveles de organización, desde tipos unicelulares flagelados a especies de estructura

Tabla 1.1. Pigmentos fotosintéticos identificativos de los diferentes tipos de algas (Jeffrey et al., 1997).

Pigmento	Grupo algal o proceso
Clorofilas	Clorofila-a
	Cla
	Clorofila-b
	Clb
	Familia de Clorofila-c
	Clc
Carotenoides	Aloxantina
	Fucoxantina
	Luteina
	Peridina
	Violaxantina
	Zeaxantina
Biliproteínas	Ficocianina
	Ficoeritrina

talosa.

Diatomeas. Son típicas de este grupo las paredes silíceas de las células. Son siempre unicelulares, aunque algunas especies forman colonias. La estructura de su pared celular es única en el reino vegetal. En ella se halla incluido ácido silícico, que les confiere gran dureza y resistencia, y rodea al protoplasto a modo de caja con tapa. Estas dos mitades reciben el nombre de frústulas. Las diatomeas se multiplican por bipartición, longitudinalmente, en un plano paralelo a las caras de las valvas.

Euglenofitas. Son algas con flagelos generalmente móviles, de una gran diversidad de tamaños (desde $5\mu\text{m}$, hasta más de $300\mu\text{m}$), y con pared celular proteica y estriada. Forman parte de este grupo organismos tanto heterótrofos o autótrofos, que incluso pueden fagocitar partículas sólidas (Ollrik, 1994). Entre las autótrofas, los pigmentos principales son la clorofila-a y clorofila-b. Necesitan vitamina B12 que obtienen aprovechando la actividad de algunas bacterias (González, 1998). Las euglenofitas ocupan gran diversidad de nichos ecológicos incluyendo aguas dulces, salobres y aguas ricas en materia orgánica.

Un carácter primario que diferencia los grupos de algas es la distribución de los pigmentos fotosintéticos y sus características pigmentarias —clorofilas, carotenoides, biliproteínas, ficobilinas, etc.— (tabla 1.1).

La *clorofila-a* es el pigmento fotosintético primario de todos los organismos fotosintetizadores que desprenden oxígeno y está presente en todas las algas, a excepción de algunas bacterias fotosintéticas. Sin duda, es el principal pigmento que desencadena el enriquecimiento de nutrientes en el medio acuático.

Materia orgánica

El carbono orgánico total (TOC, *total organic carbon*) es la medida de la cantidad de materia orgánica, disuelta y sin disolver, que se encuentra en el agua.

Casi todo el carbono orgánico de las aguas naturales se encuentra en forma de carbono orgánico disuelto (DOC, *dissolved organic carbon*) y carbono orgánico particulado muerto (POC, *particulate organic carbon*). La relación DOC a POC varía entre valores de 6 : 1 a 10 : 1 (Wetzel, 1981).

La materia orgánica disuelta que se encuentra en las aguas naturales puede ser clasificada según su estado de agregación en:

- Coloidal¹, denominada materia orgánica disuelta coloreada (CDOM, *colored/chromophoric dissolved organic matter*) o materia amarilla.
- No coloidal.

1.2. Aguas marinas

Las aguas oceánicas se clasifican en:

Tipo 1: son aquellas aguas en las cuales el fitoplancton y su material asociado (como pueden ser organismos heterótrofos, bacterias, etc., excepto la materia orgánica disuelta) son los únicos constituyentes (Morel y Prieur, 1977; Gordon y Morel,

¹ Se denominan coloides a las suspensiones de partículas con tamaños muy pequeños, que no son distinguibles mediante un microscopio óptico.

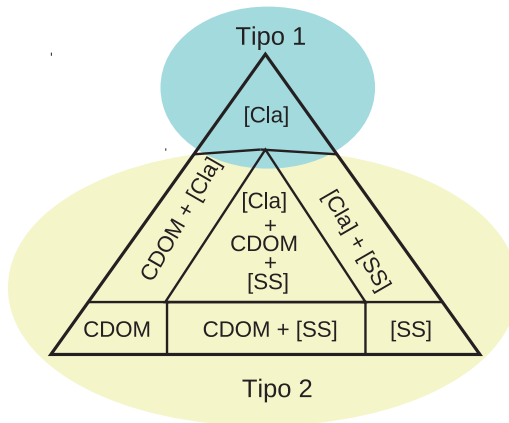


Figura 1.1. Diagrama de clasificación de aguas marinas (adaptado de Prieur y Sathyendranath, 1981).

1983). Este material se puede cuantificar mediante la determinación de un único pigmento: la *clorofila-a*. En este tipo de aguas la contribución de materia orgánica disuelta (toda la materia procedente de materiales biógenos y bacterias heterótrofas) es tan pequeña que se puede despreciar (Morel, 1988; Cole, 1988; Stramski y Kiefer, 1991; Morel y Ahn, 1991).

Tipo 2: son aquellas aguas que, además de fitoplancton, contienen concentraciones importantes de materia orgánica disuelta y materiales en suspensión. Este tipo de aguas corresponde a aguas costeras, en las cuales la interacción mar–tierra es muy importante.

La clasificación de las aguas marinas, conceptualmente, puede ser organizada mediante el diagrama de la figura 1.1 (Prieur y Sathyendranath, 1981).

1.3. Aguas epicontinentales

La clasificación de las aguas epicontinentales se fundamenta en el conocimiento del *estado eutrófico* de las aguas, concepto que ha sido y es estudiado en la actualidad con el fin de llegar a una homogeneidad en la clasificación de dichas aguas.

El enriquecimiento de nutrientes implica cambios en la composición química y en los organismos que contienen las masas de agua, por lo que es muy difícil separar el aumento de nutrientes de los cambios químicos, biológicos y físicos de las masas de

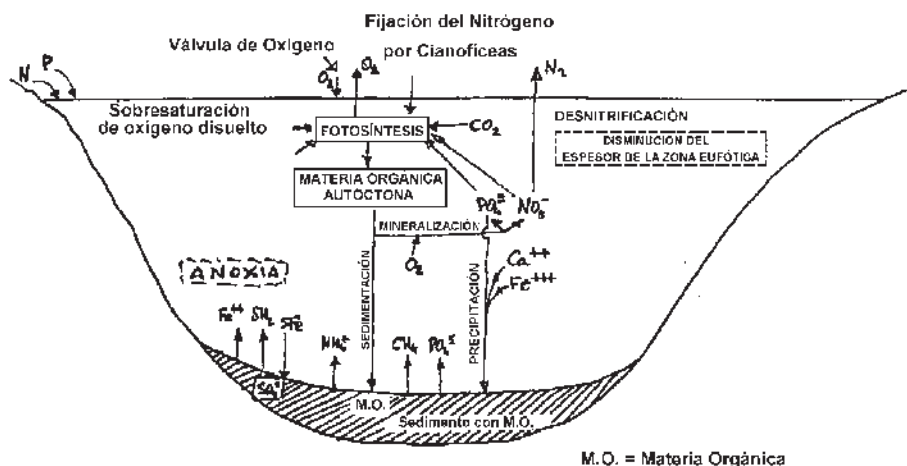


Figura 1.2. Mecanismos que intervienen en el proceso de eutrofización (imagen cortesía de José Luis Ortiz).

agua. Esta situación caracteriza a aguas con abundantes alimentos, etimológicamente llamadas *eutróficas* (términos de origen griego “*eu*” —bien— y “*trofe*” —alimentado).

La definición de aguas eutróficas ha sido un dilema a lo largo de la historia; se hacía énfasis en la causa del enriquecimiento o en las consecuencias de éste, o simultáneamente en la causa y el efecto. La primera definición limnológica de eutrofización la propuso Naumann en 1919 (basado en observaciones anteriores de Weber), atendiendo al aspecto cualitativo y a las distintas especies fitoplanctónicas en el agua. Actualmente se define la eutrofización por un aumento de los niveles nutricionales, especialmente con respecto al fósforo y al nitrógeno (Directiva europea sobre tratamiento de aguas residuales urbanas, 91/271/EEC).

A lo largo del siglo XX encontramos diferentes definiciones de eutrofización (tabla 1.2). Un análisis de las diferentes definiciones nos indica la existencia de un factor común en la mayoría de ellas: enriquecimiento o aumento de nutrientes. Para entender esta idea tenemos que conocer los mecanismos que intervienen en el proceso de la eutrofización (fig. 1.2).

La entrada de nutrientes (principalmente, nitrógeno y fósforo) y de materia orgánica en la zona en la cual la luz penetra lo suficiente como para que se produzca la fotosíntesis neta (*zona eufótica*), altera temporalmente las condiciones de equilibrio. La ruptura de este equilibrio produce un incremento de la producción primaria (producción de algas

Tabla 1.2. Definición de eutrofización (adaptada de Ortiz, 1992)

Autor	Definición de eutrofización	Fecha
Hasler	<i>Es el enriquecimiento del agua, intencionadamente o no.</i>	1947
Clarke	<i>Es el proceso por el que la cantidad de organismos y nutrientes en un lago, por ejemplo, aumenta frecuentemente a lo largo de un periodo de tiempo.</i>	1954
Ohle	<i>Es el enriquecimiento de nutrientes y el consiguiente aumento de la producción vegetal.</i>	1965
Vollenweider	<i>Es el enriquecimiento en nutrientes y el subsiguiente deterioro progresivo de la calidad de las aguas, principalmente en lagos, debido a la proliferación vegetal, con las repercusiones consiguientes en el metabolismo global de las aguas afectadas.</i>	1968
Simposio Eutrophication: Causes, Consequences and Correctives	<i>Se refiere a la adición natural o artificial de nutrientes a masas acuáticas y a los efectos de dicha adición</i>	1969
Milway	<i>Implica cambios correlacionales en la composición química del agua y en los organismos que la contienen; es difícil separar causa y efecto.</i>	1970
Margalev	<i>Es la fertilización paulatina de las aguas naturales, que van aumentando su producción en materia orgánica, con la consiguiente pérdida de calidad del agua.</i>	1976
Vallentyne	<i>Es la compleja secuencia de cambios iniciados por el enriquecimiento en nutrientes de las aguas naturales.</i>	1977

planctónicas), lo que implica un aumento en la turbidez y un cambio de color del agua hacia el verde. El aumento de fitoplancton conlleva un aumento de la actividad fotosintética, lo cual produce una liberación de oxígeno tan intensa que las capas superficiales de la masa de agua quedan sobresaturadas y, en consecuencia, el O₂ es liberado a la atmósfera. Simultáneamente con este proceso, se produce la respiración de la materia orgánica que consume oxígeno, parte del cual ha sido liberado a la atmósfera. La falta de oxígeno provoca la muerte de estos seres vivos, que se depositan en el sedimento,