

Programa de Doctorado Biología Marina y Acuicultura
Diploma de Estudios Avanzados
Bienio 2005-2007

**ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DEL USO DE IMÁGENES
DE SATÉLITE DE ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL
(SPOT) PARA LA CARTOGRAFÍA DE BOSQUES DE
LAMINARIALES DE LAS COSTAS DE GALICIA**



Gema Casal Pascual
Tutor: Juan Freire
Grupo de Recursos Marinos y Pesquerías
Universidade de A Coruña

Septiembre, 2007

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	2
1. IMPORTANCIA ECOLÓGICA DE LAS LAMINARIALES	2
2. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DE LAS LAMINARIALES	3
2.1 Distribución.....	3
2.2 Ciclo biológico	8
2.3. Composición bioquímica.....	9
3. DESAPARCIÓN DE LOS BOSQUES DE LAMINARIALES	11
4. TELEDETECCIÓN MEDIANTE SATÉLITES SPOT	13
OBJETIVOS	15
ÁREA DE ESTUDIO	16
MATERIAL E MÉTODOS	17
1. Ecuación del histograma	21
2. Clasificación no supervisada (Análisis CLUSTER)	26
3. Clasificación supervisada (Análisis de máxima probabilidad)	28
RESULTADOS	29
1.Ecuación del histograma	29
2.Clasificación no supervisada (Análisis CLUSTER)	32
3.Clasificación supervisada.....	33
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	35
BIBLIOGRAFÍA	38

INTRODUCCIÓN

El Orden *Laminariales* está constituido por un grupo de vegetales marinos, pertenecientes a la Clase *Phaeophyceae* (algas pardas), cuya característica más representativa es la presencia de una alternancia de generaciones heteromórfica, alcanzando el esporófito grandes dimensiones y formando agrupaciones de gran tamaño, por debajo del límite de bajamar, que se conocen como “bosques”. Este tipo de formaciones se consideran de gran importancia en la ecología intermareal e infralitoral.

Según Bárbara y Cremades (1993) las especies de este orden presentes en las costas gallegas son las siguientes:

Orden <i>Laminariales</i>	Familia <i>Chordaceae</i>	Género <i>Chorda</i>	<i>Chorda filum</i>
	Familia <i>Laminariaceae</i>	Género <i>Laminaria</i>	<i>Laminaria hyperborea</i> <i>Laminaria ochroleuca</i> <i>Laminaria saccharina</i>
	Familia <i>Phyllariaceae</i>	Género <i>Saccorhiza</i>	<i>Saccorhiza polyschides</i>

1. IMPORTANCIA ECOLÓGICA DE LAS LAMINARIALES

Los bosques de algas juegan un importante papel ecológico en muchos aspectos relacionados con el ambiente costero intermareal e infralitoral. Dichos bosques son de vital importancia para muchos organismos que los utilizan como hábitat (Pallas et al., 2006). En bosques mixtos de *Laminaria hyperborea* y *Laminaria digitata* se han identificado más de 150 especies de fauna y flora, incluyendo poliquetos, briozoos, crustáceos, moluscos, hidrozoos, tunicados, etc. (Schultze, 1990). Algunos autores han dado cifras superiores a las 1000 especies en bosques Laminariales en la costa del Reino Unido (Birkett, 1998). La comunidad epífita también puede llegar a ser muy rica, especialmente en los estipes. En *Laminaria hyperborea* se han encontrado más de 40 especies diferentes (Christie et al., 1998).

Además, los bosques de Laminariales son hábitats de importancia para la reproducción y el reclutamiento de juveniles de especies comerciales de peces como el bacalao (*Gadus morhua*), el abadejo (*Pollachius pollachius*) o el carbonero (*Pollachius virens*), u otras como *Apletodon microcephalus*, *Agonus caraphractus*... (Sjötun et al., 1993; Schultze, 1990; Borg et al., 1997 and Shaffer, 2003) y una importante zona de alimentación para algunas aves marinas como el cormorán moñudo (*Phalacrocorax aristotelis*) (Velando & Freire, 1999) o los eideres comunes (*Somateria mollissima*) (Fredriksen, 2003, Lorentsen et al., 2004).

Otro de los aspectos relevantes es su importante contribución a la producción primaria. Trabajos recientes han comprobado que algunos de estos bosques producen más de 4000 g C/m²·año, presentando más de un cuarto de esta producción en forma de carbono orgánico disuelto (Mohammed & Fredriksen, 2004).

Por otra parte, los bosques de Laminariales ayudan a estabilizar sedimentos, dado que absorben gran parte de la energía de las olas (Madsen et al., 2001), lo que les convierte en importantes protectores de la línea de costa, intervienen en el ciclo de nutrientes y son una fuente importante de material detrítico para las cadenas tróficas estuarinas (Dekker et al., 2005).

2. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DE LAS LAMINARIALES

Las algas Laminariales suelen vivir entre 1 y 20 años y asentarse en la zona mesolitoral e infralitoral. El tamaño de estas algas varía mucho, por ejemplo *Laminaria hyperborea* puede alcanzar hasta 5 m de longitud (Cabioc'h et al., 1995), *Laminaria digitata* alcanza los 4 m (Cabioc'h et al., 1995), mientras que *Saccorhiza polyschides* puede llegar a alcanzar hasta 10 m (Cabioc'h et al., 1995), lo que las convierte en los mayores vegetales marinos de Europa.

2.1 Distribución

Las algas Laminariales son características de aguas frías y templadas del Atlántico, aunque también pueden encontrarse en aguas más cálidas al sur de Europa, y en el Mediterráneo, si bien, es norma general que en estos lugares sean menos frecuentes

(OSPAR, 2000), ya que suelen preferir temperaturas de entre 10°C y 15°C (Davison, 1987).

La profundidad a la que pueden encontrarse estas algas varía mucho dependiendo de las características del medio, siendo uno de los factores más limitantes la penetración de la luz. Por ejemplo *Laminaria hyperborea* puede alcanzar hasta 30 m de profundidad (Gunnarsson, 1991), y en el estrecho de Mesina se ha encontrado *Laminaria ochroleuca* entre 45 y 85 m de profundidad (Cabioc'h et al., 1995). La máxima profundidad a la que se han observado algas de este grupo corresponde a *Laminaria rodriguezii*, especie endémica del Mediterráneo que suele encontrarse entre 80 y 150 m de profundidad (Cabioc'h et al., 1995).

En Galicia, según la información recogida en la “Guía de las Algas del litoral gallego” (Barbara & Cremades, 1993) y en estudios de distribución (Pérez-Ruzafa et al., 2003) podemos encontrar las siguientes especies dentro del Orden Laminariales:

Chorda filum (L.) Stackh. Esta especie presenta un talo que puede alcanzar hasta 5 m, de color pardo negruzco y consistencia cartilaginosa. El talo, fijado por un pequeño disco, es cilíndrico, no ramificado y de anchura constante en toda su longitud (3-5 mm), pero atenuado tanto en la base como en el ápice. En algunas épocas del año puede aparecer recubierta de numerosos pelos incoloros (Fig.1).

Aparece de abril a noviembre, en grupos de numerosos individuos fijados a conchas o pequeñas piedras, en el infralitoral de costas protegidas y arenosas.



Fig.1. *Chorda filum* (L.) Stackh *

Laminaria hyperborea (Gunner.) Foslie. Esta especie presenta un talo de hasta 2.5 m, de color pardo oscuro, fijado por rizoides soldados entre sí formando una base cónica de la que parte un grueso y rígido estipe cilíndrico. Éste tiene la superficie muy rugosa lo que permite la fijación de numerosos epífitos como: *Rhodymenia pseudopalmata*, *Gelidium sesquipedale*, *Palmaria palmata*, etc. El estipe se expande en su extremo superior en una ancha lámina coriácea de forma variada y más o menos profundamente dividida en numerosas y largas lacinias (Fig.2).

Se diferencia de *L. ochroleuca* por tener el estipe rugoso y ser de color más oscuro. *L. digitata*, de presencia dudosa en Galicia, se diferencia de las anteriores por tener el estipe lacio, flexible y de sección oval. *L. hyperborea* se distribuye el infralitoral de costas expuestas o semiexpuestas, formando extensos “bosques”.



Fig.2. *Laminaria hyperborea* (Gunner.) Foslie *ejemplares juveniles.

Laminaria ochroleuca Pylaie. El talo de esta especie llega a alcanzar hasta 2 m, éste presenta un color pardo amarillento, más claro en la unión de la lámina con el estipe. El estipe se encuentra fijado por rizoides soldados entre sí formando una base cónica de la que parte un grueso estipe cilíndrico, algo flexible y de superficie lisa (siempre sin epífitos). Este estipe se atenúa en su extremo superior que se expande bruscamente en

* http://www.sb-roscoff.fr/INVENTAIRES/InvAlgues/index.algues.php?action=intro_algues último acceso 30.08.2007

* http://www.sb-roscoff.fr/INVENTAIRES/InvAlgues/index.algues.php?action=intro_algues último acceso 30.08.2007

una ancha lámina coriácea de forma variada y más o menos profundamente dividida en numerosas lacinias (Fig.3).

L. ochroleuca se distribuye en el litoral inferior e infralitoral de costas expuestas o semiexpuestas, formando extensos “bosques”.



Fig.3. *Laminaria ochroleuca* Pylaie *

Laminaria saccharina (L.) Lamour. Esta especie posee un talo de hasta 2.5 m, de color pardo amarillento o verdoso. Se fija mediante finos rizoides de los que parte un corto y delgado estipe que se ensancha en una larga y estrecha lámina no dividida. La superficie de la lámina es ondulada, los márgenes rizados y la consistencia firme pero algo membranosa (Fig.4).

Esta especie se distribuye en el litoral inferior e infralitoral de costas protegidas más o menos arenosas. No suele formar bosques extensos, o de formarlos se suelen situar en extractos inferiores a otras algas como puede ser *L. hyperborea* o *L. ochroleuca*.

* http://www.sb-roscoff.fr/INVENTAIRES/InvAlgues/index.algues.php?action=intro_algues último acceso 30.08.2007



Fig.4. *Laminaria saccharina* (L.) Lamour *

Saccorhiza polyschides (Light.) Batters. El talo de esta especie llega a alcanzar hasta 2.5 m de longitud, presentando un color pardo amarillento y se encuentra fijada por un voluminoso “bulbo” hueco, con hapterios en su parte inferior y recubierto de papilas en su superficie. De este “bulbo” parte un estipe plano más o menos largo y fibroso, helicoidal y de margen ondulado en su base; que se ensancha en una gran lámina membranoso-coriácea, finamente punteada y dividida en numerosas lacinias (Fig.5).

Aparece de marzo a noviembre en el litoral inferior e infralitoral de costas expuestas o semiexpuestas, formando extensos “bosques”. Frecuentemente aparece arrojada en playas.

* http://www.sb-roscoff.fr/INVENTAIRES/InvAlgues/index.algues.php?action=intro_algues último acceso 30.08.2007



Fig.5. *Saccorhiza polyschides* (Light.) Batters*

2.2 Ciclo biológico

Es característica general de este grupo de algas la alternancia de generaciones heteromorfa con acusada preponderancia del esporófito diploide (Izco et al., 1997).

A continuación se describe el ciclo biológico del género *Laminaria* por incluir a las especies mayormente representadas dentro de este Orden (Fig.6). Estas especies poseen un ciclo biológico digenético heteromórfico. En los soros presentes en los esporófitos ($2n$) tiene lugar la meiosis dando lugar a meiosporas (n) (zoósporas en la Fig. 6) masculinas y femeninas. Éstas se desarrollan en gametófitos microscópicos haploides masculinos y femeninos respectivamente. El gametófito masculino madura desarrollando anteridos de los que se originan anterozoides flagelados que fecundan *in situ* a la oocélula. El cigoto se desarrolla y da lugar a un nuevo esporófito. Tanto el gametófito como el esporófito viven adheridos a una superficie, si bien, la diferencia de tamaño entre ambos es considerable por lo que la detección en imágenes satélite se basa exclusivamente en el esporófito.

* http://www.sb-roscoff.fr/INVENTAIRES/InvAlgues/index.algues.php?action=intro_algues último acceso 30.08.2007

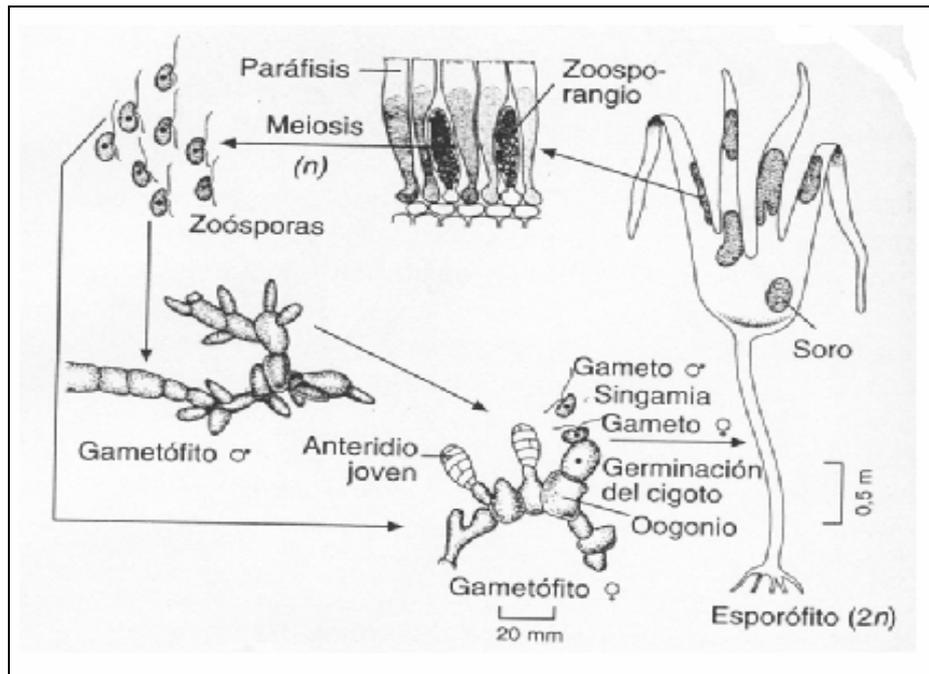


Fig. 6. Ciclo biológico de *L. hyperborea* (tomado de Izco et al., 1997)

2.3. Composición bioquímica

Este aspecto de las Laminariales es de especial importancia en este trabajo, ya que determinará la capacidad de los sensores de los satélites para detectarlas desde el espacio y las características del espectro de emisión que se recogerá en la imagen de satélite.

Los componentes bioquímicos característicos de estas algas son los siguientes (Izco et al., 1997):

- Pigmentos: clorofila a, c₁ y c₂, β-caroteno, fucoxantina y violoxantina.
- Pared celular: Celulosa y ácido alginico.
- Sustancias de reserva: Laminarina y manitol.

Debido a esta composición las algas pardas presentan, de manera general, una mayor absorción en las frecuencias correspondientes a los colores azul y rojo, y por tanto mayor reflectancia en las otras frecuencias del espectro (Fig.7), hecho a tener en cuenta a la hora de diferenciar los bosques de Laminariales de otras firmas espectrales.

Sin embargo, algo tan importante en este trabajo como el conocimiento del espectro de emisión y absorción de las algas Laminariales (su comportamiento a lo largo del espectro electromagnético) es difícil de precisar. Uno de los problemas más importantes es que no existen datos cuantitativos de su composición bioquímica dado que presenta una variación espacio-temporal particular de cada caso. De ahí, que muchos estudios hagan una valoración inicial mediante espectrorradiómetros (Clark et al., 2000; Kutser et al., 2003; Kutser et al., 2006; Vahtmäe et al., 2006) con el fin de conocer cual es el espectro de emisión a tiempo real, procedimiento que resultó imposible en nuestro caso dado la utilización de imágenes de archivo.

En comparación con las propiedades de reflectancia de las comunidades bentónicas de los arrecifes de coral (Hochberg & Atkinson, 2000, 2003; Karpouzli et al., 2004) y las comunidades de praderas marinas (Pascualini et al., 1997; Fyfe, 2003) la información detallada de las propiedades de reflectancia de las comunidades algales es todavía escasa (Kutser et al., 2006). Si bien, se han publicado algunas características espectrales de especies de algas concretas en estudios relacionados con comunidades presentes en arrecifes de coral y en casos de estudio específicos como el de Vahtmäe et al. (2006) en el Mar Báltico. Estos estudios previos nos aportan una visión general de la distribución del espectro electromagnético de las algas pardas, que pueden servirnos de orientación en este trabajo.

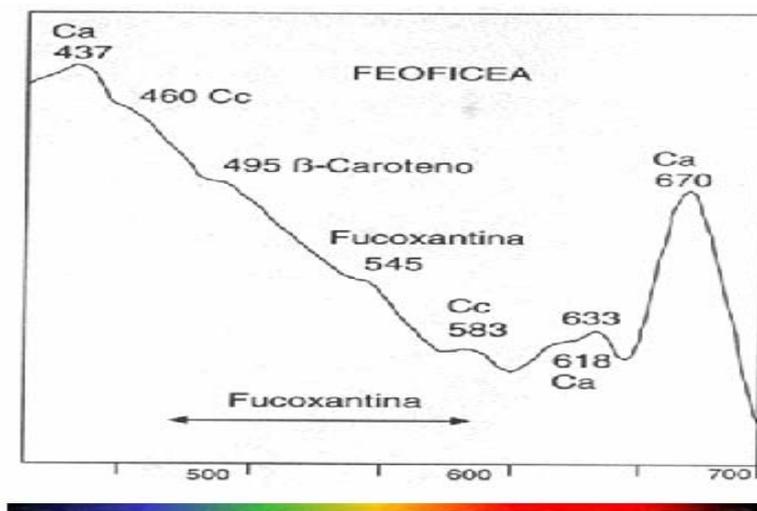


Fig.7. Espectro de absorción pigmentaria de las algas pardas. En el espectro se señalan los diferentes picos de absorción de los principales pigmentos aislados. Ca: clorofila a, Cc:clorofila c (Variación gráfico Izco et al.,1997).

3. DESAPARICIÓN DE LOS BOSQUES DE LAMINARIALES

Durante las últimas décadas, muchos ecosistemas costeros han experimentado un declive en la abundancia de las praderas de fanerógamas marinas, por ejemplo se ha documentado esta desaparición para zonas costeras de Estados Unidos, Europa y Australia (Giesen et al., 1990; Sigua et al., 2000) y lo mismo está ocurriendo con las algas, especialmente en los casos de bosques formados por diferentes especies de Laminariales. El caso más alarmante referente a estas últimas son los denominados “bosques fantasma” del Sur de California (Ed Parnell et al, 2004) grandes extensiones de algas que prácticamente han desaparecido. Además de este caso existen evidencias puntuales que demuestran la reducción de las comunidades formadas por estas algas. En las islas San Juan en el Estado de Washington se ha comprobado mediante experimentos de campo una disminución en bosques de *Laminaria bongardiana*, un alga nativa de esta costa, debido a la introducción de una especie alóctona como es *Sargassum muticum* (Britton-Simmons, 2004).

Considerando una escala global, en los pasados 100 años, tanto los ecosistemas terrestres como los acuáticos, han estado marcados por cambios en respuesta a un aumento de temperatura (Walter et al., 2002; Parmesan & Yohe, 2003) intensificándose este aumento en la última década del s. XX, por ejemplo la temperatura media anual del mar en el oeste del Canal de la Mancha ha sufrido un aumento de casi 1°C (Hawkins et al., 2003). Consecuencia de este aumento de temperatura es un cambio en la distribución de las especies marinas, dentro de las cuales se incluyen las Laminariales.

Widdowson (1971) observó que el alga parda *Alaria esculenta* (característica de aguas frías) desapareció de la costa de Plymouth durante un periodo de calentamiento entre 1950 y 1960.

Barry et al. (1995) denunció un incremento en el número de diferentes especies características de zonas más al sur y un decremento en especies características de la zona norte de Monterrey (California).

Si bien, la reducción de los bosques de Laminariales está constatada en algunos estudios de forma directa o indirecta, los diferentes autores tratan ahora de averiguar las causas que producen esta desaparición.

Algunos investigadores afirman que estos bosques pueden verse amenazados por otras Laminariales alóctonas introducidas para su explotación y comercialización, como *Undaria pinnatifida*, que pueden competir con las especies autóctonas (Floc'h J-Y. et al., 1996). Algunas especies de fucales invasoras, como *Sargassum muticum*, también compiten por el hábitat con las Laminariales (Viejo, 1997).

Por otra parte, estas especies son vulnerables a la contaminación. Algunos metales pesados pueden afectar al éxito reproductivo de las Laminariales (Chung and Brinkhuis, 1986), así como la turbidez del agua (Edwards, 1980).

De especial preocupación es el incremento de temperatura a causa del cambio climático, ya que podría alterar la distribución de Laminarias en aguas europeas y las especies más típicas de la zona meridional, como *Laminaria ochroleuca*, podrían ocupar el nicho de otras especies más septentrionales como *L. digitata* o *L. hyperborea* (Hiscock et al., 2004). De seguir este aumento de temperatura, es de esperar un desplazamiento hacia el norte de *L. digitata*, *L. hyperborea* y *L. saccharina* (Hiscock et al., 2004) y en el caso extremo de que la temperatura estival se incremente en 4°C, estas especies de *Laminaria* podrían desaparecer de las aguas de la Península Ibérica, costa atlántica de Francia, sur de Gran Bretaña e Irlanda, Mar del Norte y del Sur de Noruega (Hiscock et al., 2004).

Algunas de las comunidades de Laminariales también se han visto afectadas por los métodos de pesca, como en el caso de la pesca de arrastre de fondo (Christie et al., 1998).

Un caso particular a destacar es el que ocurre en el Atlántico Noroeste, donde uno de los principales causantes de la reducción de los bosques de algas es el consumo por parte de erizos (Steneck et al., 2002). La abundancia de algas se ve afectada por la predación de concentraciones elevadas de erizo (*Strongylocentrotus droebachiensis*). Cuando se incrementa la mortalidad de estas poblaciones de herbívoros, bien por la escasez de alimento, por la actividad de predadores o por la pesquería de esta especie, las algas vuelven a ser predominantes. De este modo, se han observado ciclos de estados alternativos en estos hábitats que oscilan entre bosques de algas y agregaciones de erizos desprovistas de vegetación.

En Galicia, también buceadores y pescadores han alertado de la disminución y posible desaparición en amplias áreas de estos bosques, especialmente de los existentes en el Sur de esta comunidad. Sin embargo, aún no existe ningún estudio que confirme esta desaparición ni de respuesta a sus posibles causas. Los estudios científicos suelen desarrollarse en escalas espaciales demasiado pequeñas por lo que, posiblemente, un proceso a gran escala de cambio de hábitat pueda pasar inicialmente desapercibido, de modo que las primeras alertas puedan provenir de otros colectivos que utilizan el medio marino y que desarrollan su actividad en escalas más amplias. De confirmarse este hecho estaríamos ante un grave problema, teniendo en cuenta la actividad pesquera en Galicia y la importancia de estos bosques en el ciclo de vida de las diferentes especies.

4. TELEDETECCIÓN MEDIANTE SATÉLITES SPOT

Para el conocimiento y la gestión de la zona litoral es indispensable hacer un seguimiento de las comunidades bentónicas. Los métodos tradicionales como son los estudios de campo, las observaciones de buceadores (Werdell and Roesler, 2003), análisis de laboratorio, etc. proporcionan gran precisión y una resolución elevada, sin embargo, su coste es muy alto y se ven limitados por el tiempo y el número de personas necesarias. Para solventar estos inconvenientes, en los últimos años muchos científicos combinan estos métodos con datos de detección remota.

La utilización de las imágenes de satélite ha supuesto un gran avance en el estudio del medio marino y ello se ve reflejado en la variedad de estudios en los que se aplican estas técnicas y en su aumento en los últimos años debido a la mejora en el tratamiento y procesado de las mismas. El empleo de imágenes de satélite permite cubrir áreas muy extensas, con alta periodicidad y obtener datos retrospectivamente, si bien, presenta una menor resolución espacial que los estudios de campo, hecho a tener en cuenta según el tipo de estudio que queramos realizar.

En cuanto a los estudios para la detección remota de bosques de algas, objetivo del presente trabajo, en trabajos anteriores se han combinado teledetección y métodos tradicionales con el fin de localizar y cartografiar bosques de algas, identificar y

diferenciar especies, monitorizar cambios y estimar biomasa (Simms and Dubois, 2001).

El cartografiado de tipos de sustrato del fondo marino se han realizado de forma exitosa en aguas claras, en aguas costeras poco profundas y en aguas de arrecife (Antee et al., 2000; Dekker et al., 2001,2005; Phinn et al., 2005, Kutser & Jupp, 2006). Sin embargo, las aguas turbias continúan siendo un reto para la utilización de estas técnicas (Phinn et al., 2005). Si bien, en los últimos años se han realizado estudios muy alentadores como los de Simms y Dubois (2001) que fueron capaces de diferenciar la presencia de algas Laminariales en este tipo de aguas hasta los 6 m de profundidad en la costa atlántica de Canadá.

Las imágenes de satélite utilizadas en este trabajo corresponden al satélite SPOT (Système Pour L'Observation de la Terre). Los satélites SPOT incorporan dos sensores de barrido (*pushroom*) de *High Resolution Visible* (HRV) que operan en modo multiespectral o pancromático. Las imágenes multiespectrales obtenidas por los sensores de este satélite poseen una resolución espacial de 20 m, mientras que las imágenes pancromáticas tienen una resolución de 10 m cubriendo todas las imágenes SPOT un área de 60 km de ancho. Además, el sensor SPOT puede ser orientado para captar rutas adyacentes, lo que le permite obtener 12 imágenes sucesivas de un mismo área durante un periodo orbital de 26 días (Eastman, 2003).

Para el presente trabajo se han empleado imágenes adquiridas con los sensores de los satélites SPOT 4 y SPOT 5. El SPOT 4, lanzado en 1998 ofrece las tres mismas bandas que el SPOT 1-3, más una banda infrarroja de onda corta. Las bandas corresponden a las siguientes longitudes de onda (Eastman, 2003):

- SPOT HRV-XS1 de 0.50 a 0.59 μm (verde)
- SPOT HRV-XS2 de 0.61 a 0.68 μm (rojo)
- SPOT HRV-XS3 de 0.79 a 0.89 μm (infrarrojo cercano)
- SPOT HRV-XS4 de 1.58 a 1.75 μm (infrarrojo térmico)
- PANCROMÁRICA de 0.51 a 0.73 μm

En cuanto al SPOT 5, éste fue lanzado en 2002 y los principales avances sobre el SPOT 4 incluyen: una resolución espacial más alta (5 m) para las bandas pancromáticas y las

imágenes multiespectrales en las tres bandas visibles y en el infrarrojo cercano, además de un instrumento dedicado a la adquisición de pares estereoscópicos a lo largo de la traza (Eastman, 2003).

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo consiste en desarrollar y contrastar una metodología que permita realizar el cartografiado de los bosques intermareales e infralitorales de Laminariales presentes en la costa gallega basándose en imágenes adquiridas con el satélite SPOT.

La metodología desarrollada en este trabajo puede aportar una nueva vía para la monitorización prospectiva y retrospectiva de estos hábitats que, además, es susceptible de ser mejorada y completada en el futuro al combinarse los datos procedentes de imágenes de satélite con observaciones directas simultáneas a la captura de las imágenes, que nos permitan una calibración fina del método desarrollado.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se situó el Seno de Corcubión. Esta zona se encuentra en el noroeste de la comunidad gallega, el límite norte está constituido por el Cabo Fisterra y en el límite sur se encuentra la ría de Muros e Noia (Fig.8).

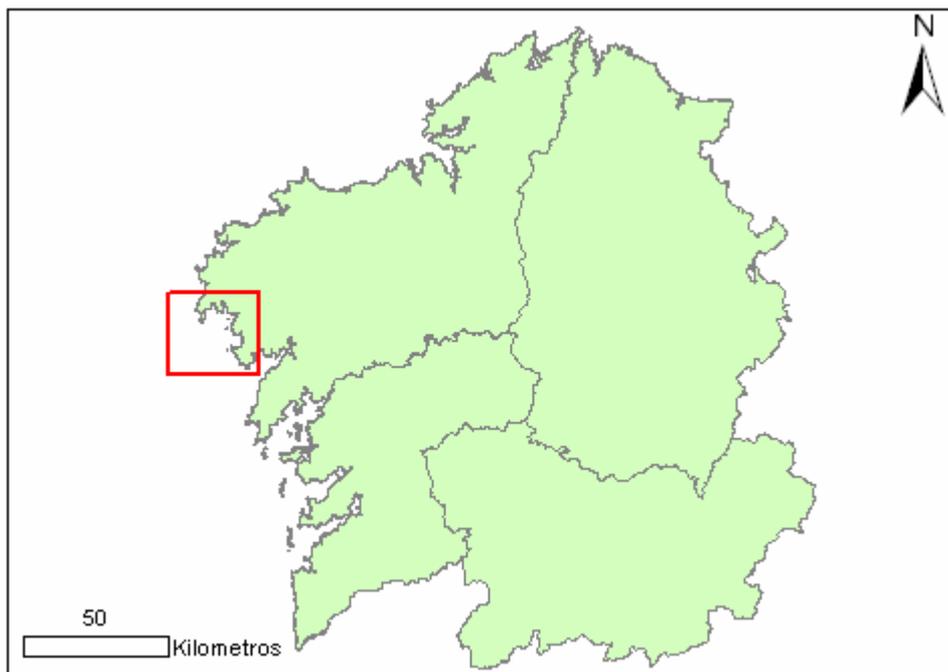


Fig.8. Mapa de Galicia donde se señala la zona de estudio

La elección de esta zona de estudio vino determinada por las óptimas características que presenta la imagen de satélite a utilizar, correspondiente al verano de 2006, en esta área y porque el Grupo Recursos Marinos y Pesquerías posee abundante información de la zona debido a que buena parte de su actividad científica se desarrolla en la misma.

El recorte de la imagen de satélite empleada en este trabajo comprende 113 km de costa. En este estudio se abarcó únicamente la zona comprendida entre la línea de costa y la isobata de 10 m. Se escogió esta isobata ya que, debido a las condiciones de turbidez de las aguas gallegas, se estimó que esta profundidad nominal representa el límite en el que cabe esperar una penetración eficiente de la luz hasta el fondo.

MATERIAL E MÉTODOS

Para el desarrollo de este trabajo se partió de cuatro fuentes de datos diferentes: información de pescadores y buceadores, ortofotos, cartografía realizada por al Consellería de Pesca, Marisqueo e Acuicultura (Catoira et al., 1993) e imágenes del satélite SPOT.

La información procedente de buceadores deportivos que realizan de forma frecuente inmersiones en la zona y de pescadores que suelen faenar en la misma se utilizó de modo complementario para contrastar los resultados obtenidos con el análisis de las imágenes de satélite, así como las ortofotos SIXPAC correspondientes a la zona de estudio, cedidas por el *Fondo Galego de Garantía Agraria*, FOGGA. Estas ortofotos fueron restituidas fotogramétricamente a partir de fotografías aéreas tomadas entre Agosto y Septiembre de 2002 y Junio, Julio, Agosto y Septiembre de 2003. La escala de los vuelos fue de 1:18000 y la resolución empleada en su escaneo fue de 14 μm . Las ortofotos finales están corregidas con un modelo digital del terreno de 5 m y presentan una resolución (tamaño de píxel) de 0.5 m.

En el año 1993, la Consellería de Pesca, Marisqueo e Acuicultura (Catoira et al., 1993) llevó a cabo un estudio cartográfico de las macroalgas en el litoral de Galicia mediante muestreos de campo y el uso de imágenes Landsat 5 TM, a pesar de que no se pudo constatar relación alguna entre la información aportada por las imágenes de satélite y las distribución de algas cartografiadas, sí aparecen en este estudio datos cartográficos procedentes del trabajo de campo.

La información procedente de estas fuentes se utilizó de modo orientativo con el fin de conocer la distribución general de los bosques de Laminariales presentes en la zona de estudio.

Las imágenes SPOT fueron adquiridas a través del programa OASIS (*Optimizing Access to SPOT Infrastructure for Science*), coordinado por el CNES francés (*Centre National d'Etudes Spatiales*) y financiado por la Comisión Europea. Este programa

proporciona gratuitamente imágenes SPOT a las comunidades científicas europeas bajo ciertas condiciones específicas ¹.

En un principio partimos de imágenes de satélite que comprenden varias zonas de la comunidad gallega, concretamente: Golfo Ártabro, Seno de Corcubión, Ría de Arousa e Illas Cíes correspondientes a verano e invierno de los años 2005 y 2006. Después de un análisis exploratorio de todas las imágenes, se decidió trabajar con la imagen correspondiente al Seno de Corcubión (verano de 2006) por presentar ésta unas condiciones más óptimas de trabajo, dado que carece de nubosidad y oleaje que dificulten su interpretación.

Las imágenes utilizadas en este trabajo son imágenes multiespectrales, con una resolución de 20 m de píxel e imágenes pancromáticas con resolución de 10 m de píxel, con menos del 25% de nubosidad y con un ángulo de captura de 20°W y 20°E. Las imágenes fueron adquiridas con un nivel de procesamiento 2A, en el que se rectifica la proyección cartográfica estándar (UTM WSG 84) sin utilización de puntos de apoyo, por lo que fue necesaria su georreferenciación con puntos de control utilizando como referencia las ortofotos de la zona citadas anteriormente.

El primer paso para llevar a cabo la georreferenciación es la elección de aproximadamente 50 puntos de control homólogos en la zona terrestre para la imagen a georreferenciar (imagen de satélite) y la imagen ya georreferenciada (en nuestro caso ortofotos). De cada uno de estos puntos es necesario tomar sus coordenadas de latitud y longitud (x e y , por estar ya proyectadas ambas imágenes). Para la toma de los puntos de control en la imagen de satélite se realizó previamente una composición con ambas imágenes (pancromática y multiespectral) con el fin de optimizar la visualización. Estos puntos fueron tomados en la imagen satélite con el programa Idrisi y en las ortofotos con el ArcGis 9.2.

Una vez obtenidos estos datos se creó en Idrisi un archivo de georreferenciación que permite al programa realizar la corrección de la imagen y calcular el error residual de

¹ <http://www.spotimage.fr/web/es/896-oasis.php> último acceso 7 de agosto de 2007.

cada punto, presentando al usuario un error conjunto que no debe superar el tamaño de píxel de las imágenes satélite utilizadas. Si este valor es superior debemos eliminar puntos de control, generalmente los que presenten un valor más elevado, con el fin de ajustar el error final, teniendo en cuenta que siempre se debe mantener un número mínimo de píxeles en función del grado del polinomio empleado para la corrección, en nuestro caso, no debía ser inferior a 30.

Cuanto mayor sea el área cubierta por una imagen satélite mayor variabilidad espectral observaremos en ella. Por esta razón siempre que se trabaje sobre la firma espectral de un elemento concreto conviene eliminar toda la variabilidad posible ajena a este elemento, que actuará como ruido. Para hacer esto, una vez georreferenciadas las imágenes fueron tratadas para eliminar la variabilidad espectral procedente de las zonas externas al área de estudio, la zona terrestre y el área que superase los 10 m de profundidad.

En primer lugar las imágenes fueron recortadas para abarcar únicamente el área de estudio (Fig.9).

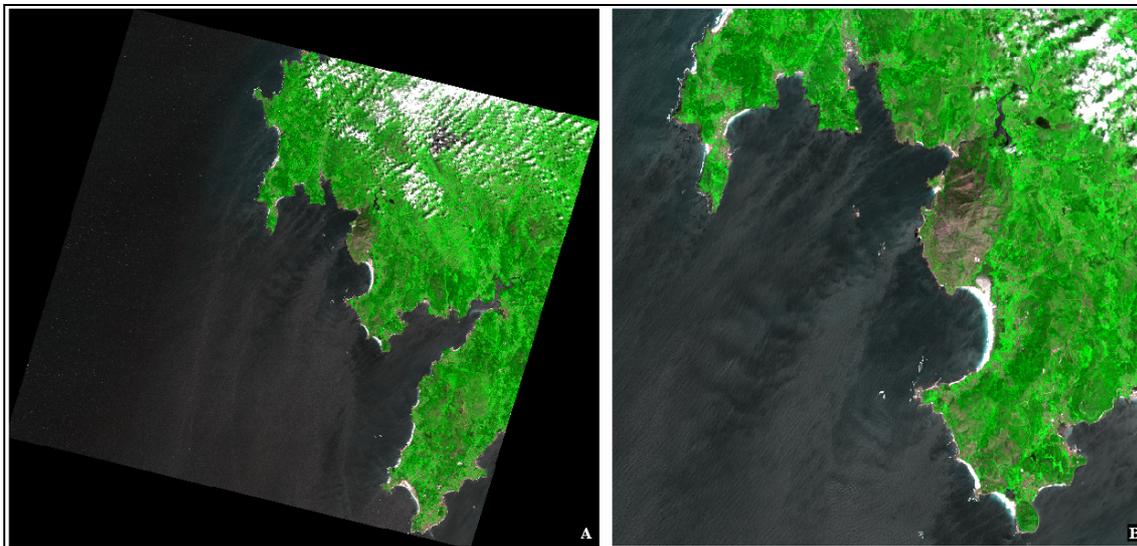


Fig.9. A) Imagen con el tamaño original. B) Imagen recortada (© CNES (2006), distribución Spot Image S. A.)

A continuación se procedió a la creación de una máscara con el fin de eliminar toda la variabilidad espectral que produce la zona terrestre. Para ello se utilizó el polígono de la costa gallega realizado en el trabajo de investigación tutelado “Desarrollo de la

infraestructura de datos básica de un sistema de información geográfica para las costas gallegas”. El polígono se importó al software Idrisi Kilimanjaro mediante el módulo del programa “*rastervector*” que crea la máscara ajustada al tamaño de la imagen de estudio. Una vez obtenida la máscara se procedió al enmascaramiento de cada una de las bandas (Fig.10). De entre las cuatro bandas multiespectrales que posee la imagen se decidió trabajar con las bandas XS1 (verde), XS2 (rojo) y XS3 (infrarrojo térmico) y obviar la banda XS4 (infrarrojo térmico), por coincidir estas tres con los picos de reflectancia más representativos de la firma espectral de las Laminariales y siguiendo así a otros autores como Augenstein et al.(1991). Chavaud et al. (2001) y Pascualini et al. (2005).

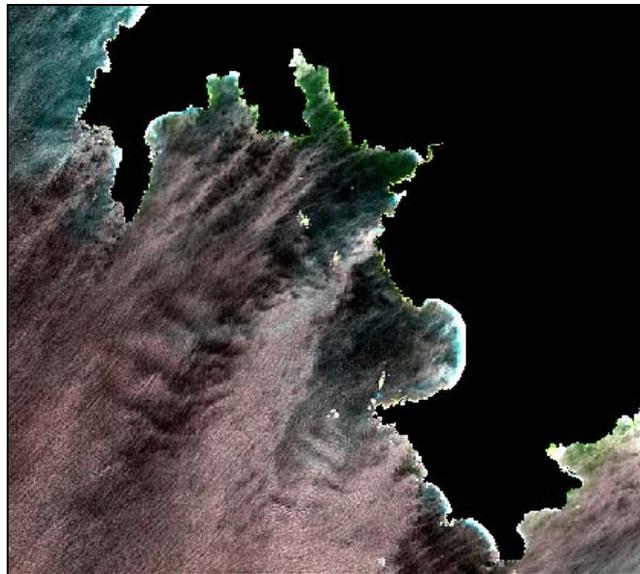


Fig.10.Zona del Seno de Corcubión con máscara de tierra. (© CNES (2006), distribución Spot Image S. A.)

Por último, se creó una máscara batimétrica con el fin de eliminar las zonas de agua de profundidad mayor a 10 m (en base a criterios de penetración de luz) empleando la isobata de esta profundidad (Fig11).

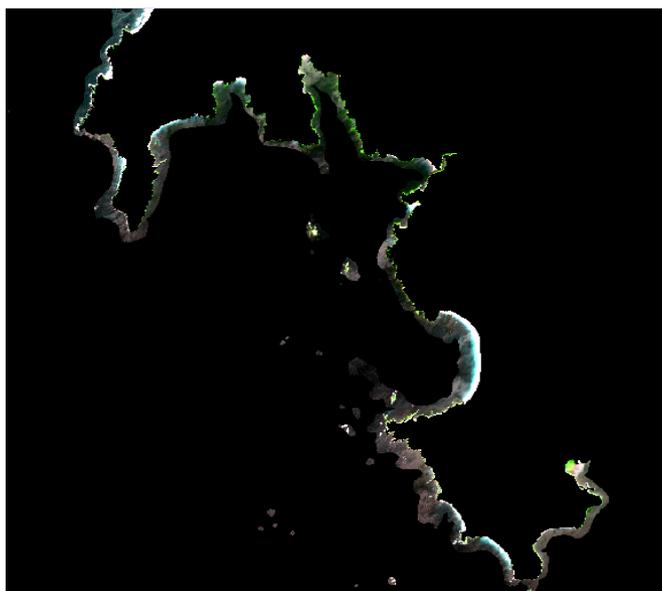


Fig.11. Zona del Seno de Corcubión con máscara batimétrica y de la zona terrestre. (© CNES (2006), distribución Spot Image S. A.)

Además de los tratamientos anteriores, si la imagen satélite presenta nubes, éstas deben ser también enmascaradas para evitar posibles interferencias. En ese caso la máscara se realiza con la banda correspondiente al infrarrojo térmico (XS4), donde la presencia de nubes se verá reflejada en zonas de temperatura más baja.

Una vez preparada la imagen, se procedió al tratamiento de la misma con el fin de cartografiar los bosques de Laminariales presentes en la zona. Para ello se siguieron tres métodos diferentes: ecualización del histograma, clasificación no supervisada y clasificación supervisada, con el objetivo de estudiar la viabilidad de cada uno de ellos en la cartografía de este tipo de bosques en aguas turbias.

1. Ecualización del histograma

Se aplicó a cada banda que compone la imagen una ecualización del histograma. La ecualización del histograma consiste de manera general en una expansión del mismo, dotándolo de mayor linealidad y haciendo que éste ocupe el ancho total del espectro².

² http://campusvirtual.uma.es/tdi/www_netscape/TEMAS/Tdi_30/index3.php último acceso 7 de agosto de 2007

Con este tratamiento se consigue que para cada banda todos los valores agrupados (representados como tonos similares en la imagen) se separen, mejorando la visualización de la imagen y al mismo tiempo al hacer que el histograma ocupe todo el rango de valores, aumenta la distancia entre el tono más claro y el más oscuro y por tanto aumenta también el contraste.

La ecualización del histograma se realizó mediante el software Idrisi Kilimanjaro utilizando el módulo STRECH. Una vez ecualizadas las bandas, se realizó una composición* de las mismas con el fin de optimizar la visualización de distintas coloraciones correspondientes a las diferentes cubiertas del fondo, de manera que podamos atribuirles a un tipo u otro de forma visual (Fig.12). Una vez se estableció el tipo de coloración que representa la presencia de Laminariales, se exportó la imagen al software ArcGis 9.2 donde fue creada una capa poligonal en la que se cartografiaron todas las zonas susceptibles de corresponder a bosques Laminariales.

Las coloraciones que se supone pertenecen a bosques de Laminariales se sitúan de forma aproximada con la información recopilada de observaciones directas de pescadores y buceadores y también con las agrupaciones observadas en las ortofotos (Fig.13), así como en la cartografía realizada por la Consellería de Pesca, Marisqueo e Acuicultura (Fig.14) (Catoira et al., 1993). Si bien es cierto que estas últimas fuentes no corresponden al mismo periodo que la imagen de satélite decidimos utilizarlas con el fin de complementar la ausencia de información procedente de observaciones directas en tiempo real con respecto a la imagen satélite.

* creación de una nueva imagen en color utilizando los valores de cada banda como valores de rojo, verde y azul.



Fig.12. Imagen satélite resultante de la ecualización del histograma. (© CNES (2006), distribución Spot Image S. A.)



Fig.13. Los bancos de arena cubiertos por agua aparecen en tonos azules, roca y arena emergida en colores claros próximos al blanco, los tonos marrones pueden presencia de algas.

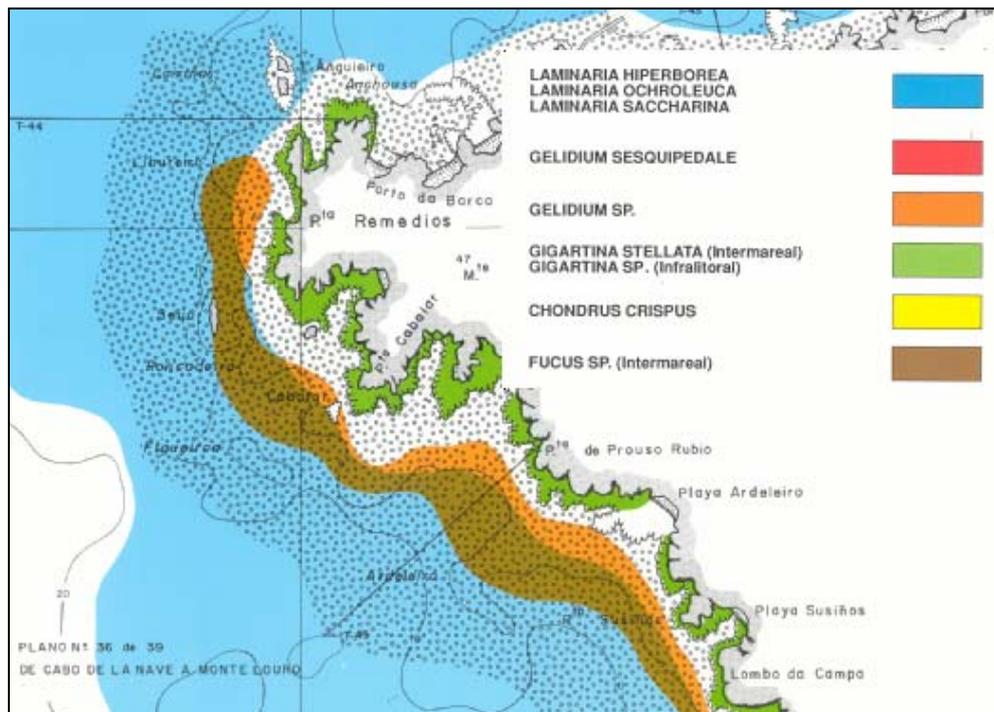


Fig14. Cartografía de macroalgas (Catoira et al., 1993)

Algunas zonas correspondientes a estas tipologías (roca, arena y algas) no quedan bien definidas, siendo la causa más probable la turbidez del agua en esas zonas. En estos casos de turbidez las bandas XS1 (verde) y XS2 (rojo) son útiles en la detección de algas en aguas próximas a la orilla y para resolver la confusión que provoca la banda XS3 (infrarrojo cercano) (Augenstein et al., 1991). Comparando las imágenes con presencia y ausencia de la banda XS3 (infrarrojo cercano) sensible a estas condiciones, se optimiza la visualización de la imagen.

En la siguiente figura (Fig.15) observamos una zona confusa en cuanto a la diferenciación de la cobertura bentónica que se sospecha se debe a la turbidez del agua. Al eliminar la banda XS3 (infrarrojo cercano) se pueden observar zonaciones más claras, y agrupaciones próximas a la costa de un color diferenciado que pueden representar la presencia de algas, coincidiendo con zonas de algas marcadas en la cartografía realizada por Catoira et al. (1993) (Fig.16) y con zonas de algas observables en las ortofotos (Fig.17). Sin embargo, esta afirmación tendría que ser precisada mediante observaciones *in situ* dado que podría tratarse de otras algas y no de Laminariales.

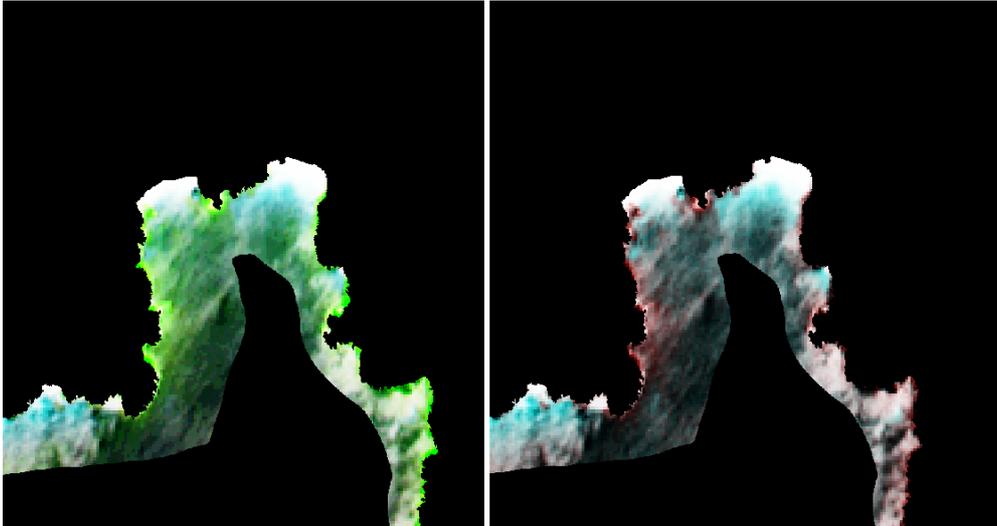


Fig.15. La imagen de la izquierda es el resultado de la composición de las tres bandas (XS1, XS2 y XS3) mientras que la imagen de la derecha carece de la banda XS3. En esta última imagen vemos zonas próximas a costa con mayor variabilidad de coloración. (© CNES (2006), distribución Spot Image S. A.)

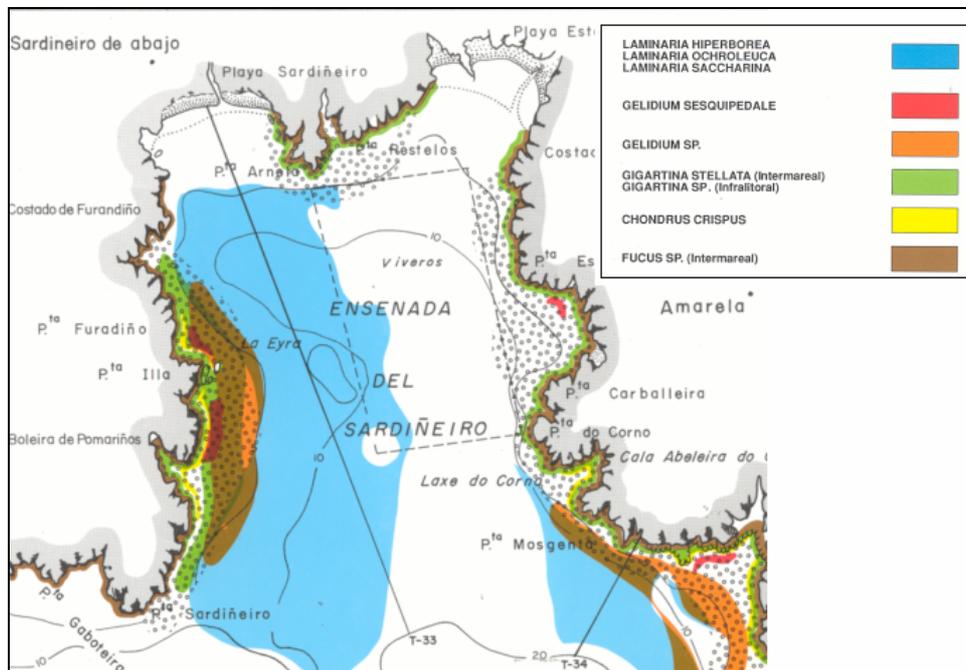


Fig.16. Cartografía Catoira et al., 1993



Fig.17.Ortofoto de la zona. Las flechas señalan zonas de presencia de algas que se pueden observar a simple vista en la ortofoto.

2. Clasificación no supervisada (Análisis CLUSTER)

Con el fin de realizar una agrupación automática de los píxeles en diferentes clases en función de su valor espectral, se optó por realizar una clasificación no supervisada. La clasificación no supervisada consiste en la clasificación de la imagen por métodos estadísticos, análisis CLUSTER, en los que se agrupan en conglomerados las distintas coberturas del terreno ³, en nuestro caso las situadas entre la zona terrestre y los 10 m de profundidad.

El módulo que activa la clasificación no supervisada en Idrisi es el “CLUSTER”. En este módulo se introducen las diferentes bandas de la imagen que quieren ser analizadas, en nuestro caso las bandas ya ecualizadas, y también se define el número de clases en las que se quiere agrupar los diferentes píxeles de la imagen.

³ <http://www.cartesia.org/data/apuntes/teledeteccion/clasificacion.pdf> último acceso 7 de agosto de 2007

La división de los conglomerados se realiza en función de los picos existentes en el histograma, generándose una clase por pico y dividiéndose las clases en el punto medio entre cada dos picos⁴.

Por defecto el software Idrisi Kilimanjaro crea una imagen maximizando el número de clases agrupadas según la similitud de sus patrones espectrales. Esta opción no suele aportar información muy útil, y por tanto se emplea sólo a modo de análisis exploratorio para observar la variabilidad y definir el número de clases óptimo para los análisis futuros. En nuestro caso debido a la alta variabilidad que presentó este análisis previo, se decidió realizar el análisis CLUSTER para 30, 20 y 10 grupos.

Los resultados de estos análisis se compararon inicialmente de forma visual con los polígonos cartografiados sobre la imagen ecualizada (Fig.18) y posteriormente se le aplicó un gráfico de frecuencias con el fin de establecer los grupos más representativos dentro de estos polígonos.

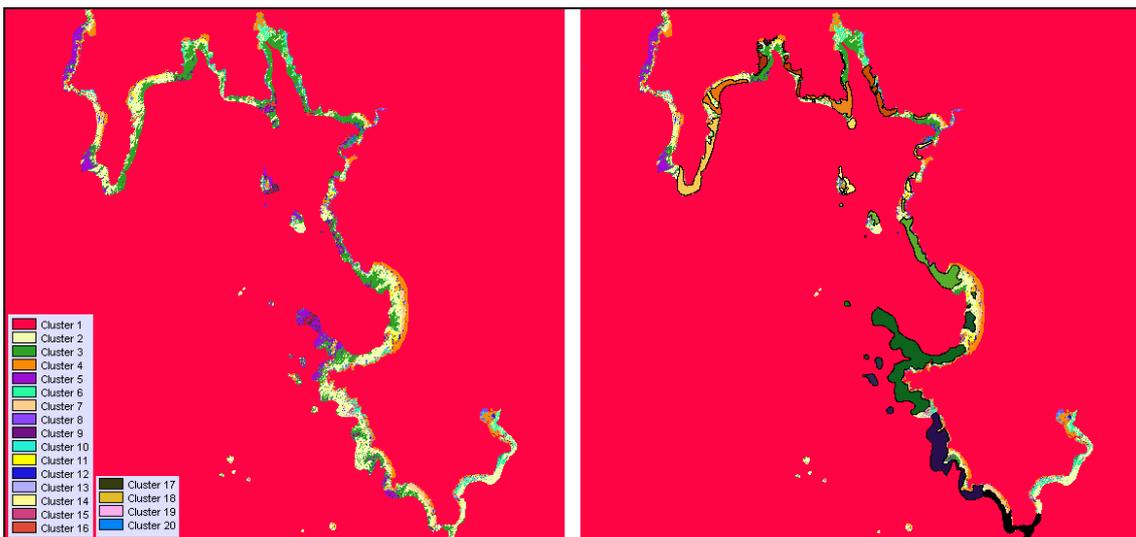


Fig.18. La imagen de la izquierda corresponde a la imagen clasificada en 20 grupos según la similitud de las firmas espectrales de cada píxel. La imagen de la derecha muestra los polígonos obtenidos de la delimitación de zonas, en la imagen ecualizada, correspondientes a la presencia de algas.

⁴ <http://www.cartesia.org/data/apuntes/teledeteccion/clasificacion.pdf> último acceso 7 de agosto de 2007

3. Clasificación supervisada (Análisis de máxima probabilidad)

Además de la clasificación anterior se realizó una clasificación supervisada. Para este tipo de clasificación es necesario conocer el área de estudio con el fin de delimitar zonas representativas de cada tipo de cobertura que permitan al programa caracterizar espectralmente cada tipología y agrupar el resto de píxeles en alguna de ellas. En nuestro caso se delimitaron cuatro tipologías en función de las coberturas bentónicas más representativas presentes en la zona:

- Máscara: corresponde tanto a la máscara terrestre como a la batimétrica, es decir, a zonas con ausencia de datos.
- Alga: corresponde a las zonas ocupadas por algas, tanto en estado puro como mezclado con otros sustratos como pueden ser arena, roca...
- Roca: corresponde a las zonas de rocosas tanto emergidas como sumergidas.
- Arena: corresponde a zonas arenosas tanto emergidas como pueden ser los arenales de playas como sumergidas.

Para cada una de estas tipologías fueron digitalizados polígonos “ejemplo” con el software ArcGis 9.2, utilizando de base las ortofotos (Fig.19).

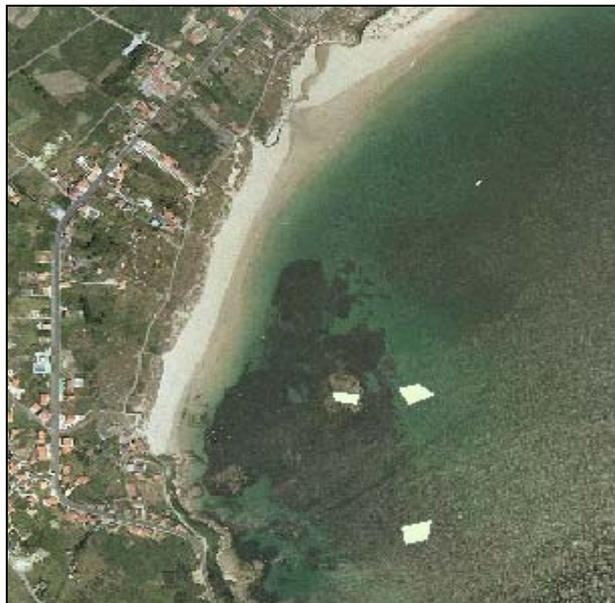


Fig.19. Algunos de los polígonos digitalizados para establecer una firma espectral característica de cada tipo de tipología.

Posteriormente estos polígonos se importaron al software Idrisi Kilimanjaro y se analizaron mediante el módulo MAKESIG con el fin de crear firmas espectrales para cada tipología. Una vez creadas estas firmas se analizaron las bandas ecualizadas de la imagen mediante el módulo MAXLIKE o de máxima probabilidad. Este clasificador utiliza un procedimiento bayesiano mediante el que agrupa los píxeles según su probabilidad de pertenencia a cada tipología establecida (Fig.20).

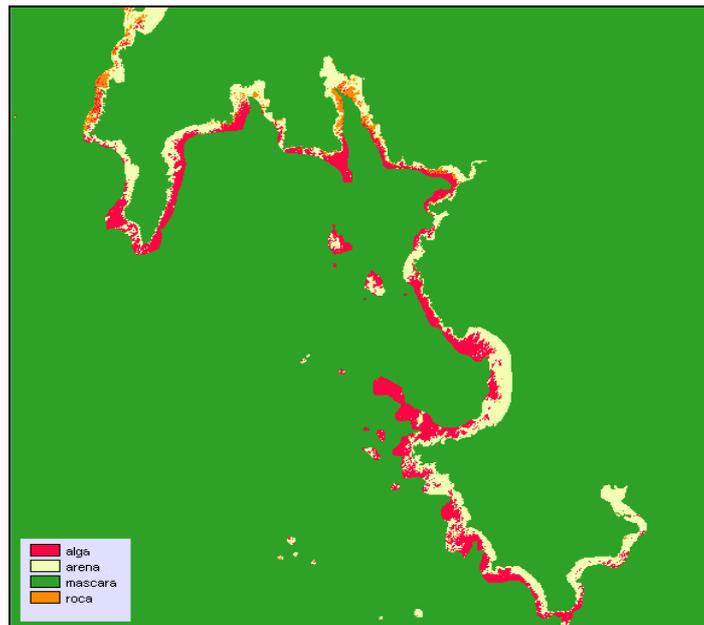


Fig.20. Imagen resultante de la clasificación supervisada

RESULTADOS

Atendiendo a los tres métodos utilizados los resultados fueron los siguientes:

1.Ecualización del histograma

Una vez ecualizado el histograma de la imagen previamente recortada y enmascarada, observamos diferentes coloraciones que hemos utilizado como indicadores de la existencia de diferentes tipos de hábitat bentónico. Las formaciones rocosas tanto emergidas, como pueden ser islas e islotes, como sumergidas, aparecen bien definidas al igual que las zonas arenosas desnudas. Además se observa otro tipo de coloración que puede interpretarse como bosques Laminariales (Fig.21) dado que su disposición suele coincidir con el hábitat característico de este tipo de algas y con la información

procedente de buceadores y pescadores, ortofotos y la cartografía realizada por Catoira et al. (1993) (Fig.22).



Fig.21. Los bancos de arena cubiertos por agua aparecen en tonos azules, roca y arena en colores claros próximos al blanco, también aparecen tonos marrones que pueden representar la presencia de bosques Laminariales.

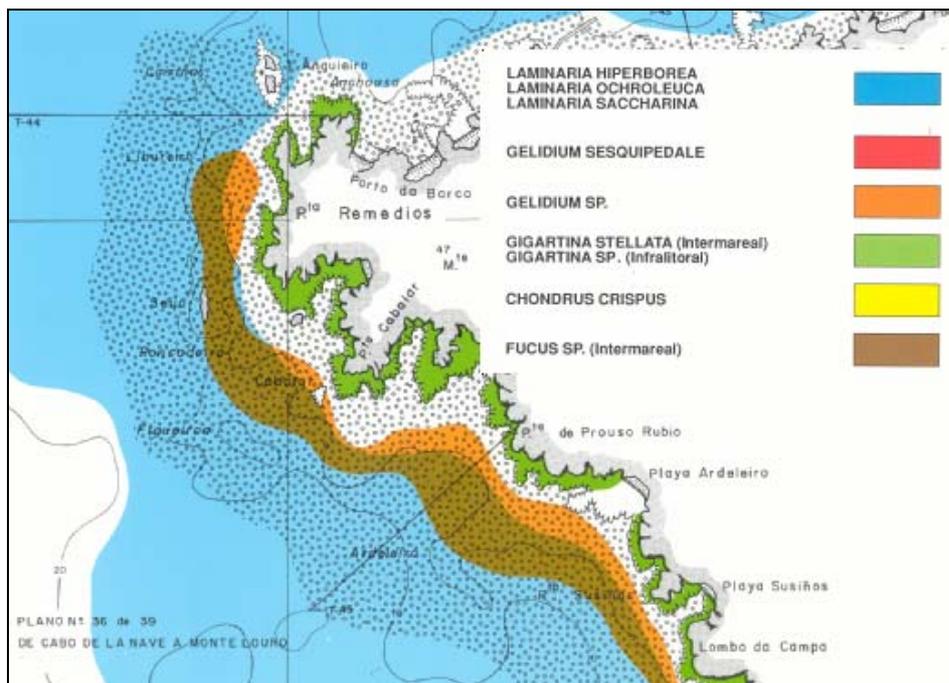


Fig.22. Cartografía de macroalgas (Catoira et al., 1993)

El inconveniente que presentan algunas zonas debido a la turbidez parece solucionarse mediante la eliminación de la banda XS3 correspondiente al infrarrojo cercano, aunque esta metodología debería ser precisada mediante observaciones *in situ*.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, y complementando la información visualizada con las fuentes anteriormente citadas se obtuvo una capa poligonal de 37 polígonos con una extensión total de 1684 ha (Fig.23). La disposición de los polígonos coincide de manera similar con las zonas de presencia de estas algas obtenidas en las fuentes anteriormente citadas.

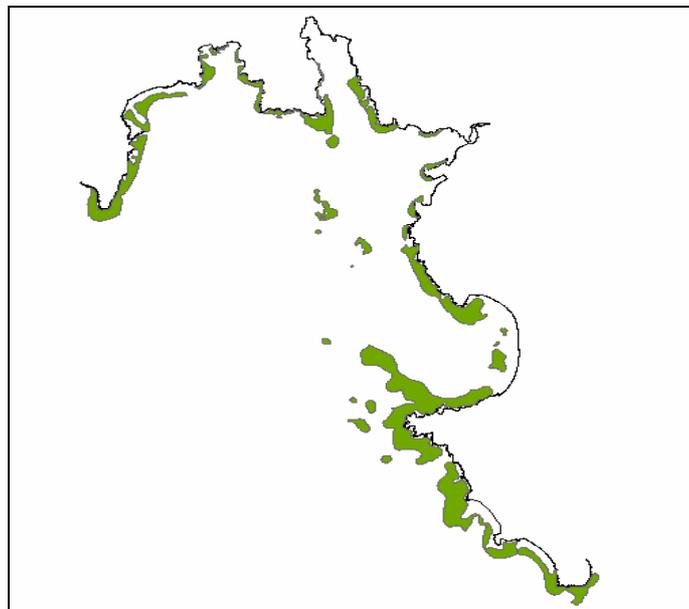


Fig.23. Polígonos que pueden representar la presencia de bosques de Laminariales

2. Clasificación no supervisada (Análisis CLUSTER)

La imagen resultante de la agrupación en 20 clusters se ajusta más a la información procedente de buceadores y pescadores, ortofotos y la cartografía de Catoira et al. (1993) que las de 10 y 30. Por esta razón, se decidió trabajar con la imagen en la que se agrupa la variabilidad de los píxeles en 20 grupos diferentes.

En esta clasificación parece observarse una concordancia elevada entre algunas clases y las zonas con presencia de algas delimitadas mediante polígonos con el método de ecualización del histograma, así como con las fuentes de información externa utilizadas. Para valorar la bondad de esta clasificación se superpusieron los polígonos cartografiados a partir de la imagen ecualizada y se analizaron los porcentajes de cada clase (procedente del análisis cluster) en estas áreas (Fig.24).

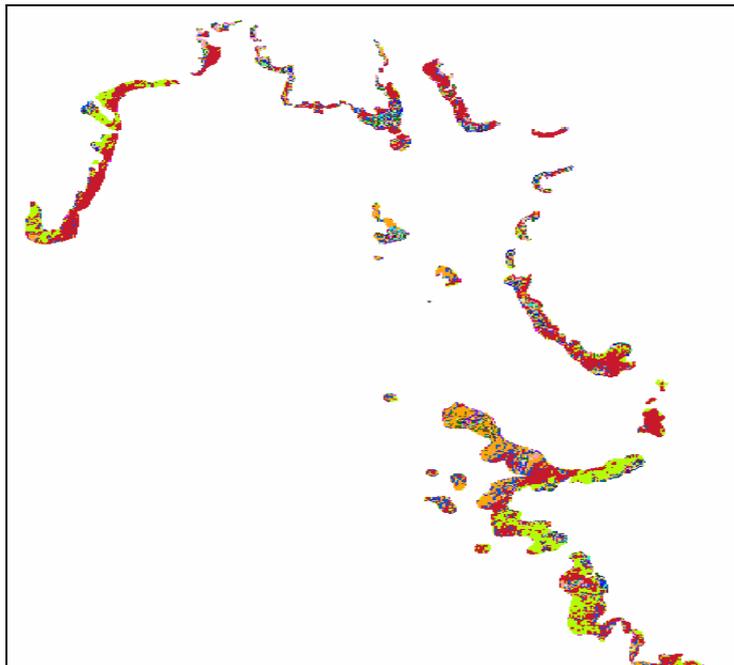


Fig.24. Imagen cluster recortada con los polígonos que representan la presencia de algas.

Realizando el histograma de estas áreas (Fig.25) se observó una clara dominancia de cuatro grupos respecto al resto. Los dos grupos con mayor presencia representan el 63% del total y los cuatro primeros representan el 83%.

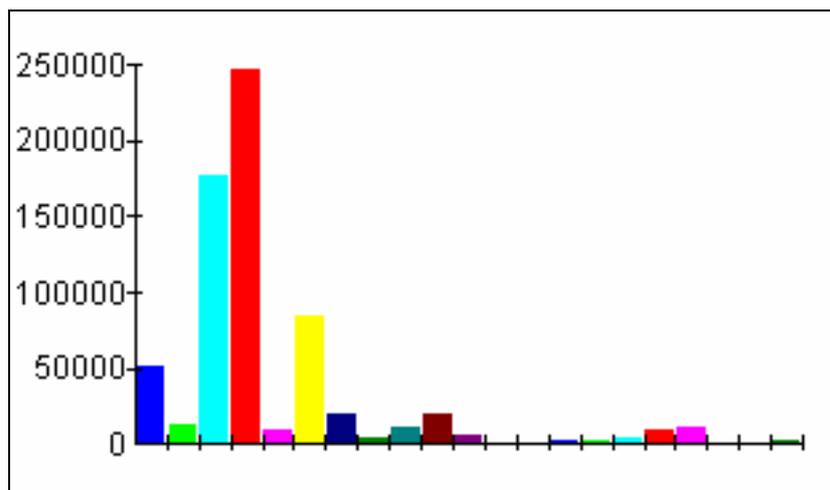


Fig.25. Representación de los grupos cluster que presentan los polígonos (Fig. 24) y su abundancia. En el eje Y se representa el número de píxeles y en el eje X el número de las 20 clases en diferentes colores.

Esto podría interpretarse como que estas clases representan los bosques de Laminariales, sin embargo, nos encontramos con incoherencias como la integración de zonas de roca y zonas de arena en el mismo grupo que deberían estudiarse más a fondo en futuros trabajos.

3. Clasificación supervisada

En la imagen resultante de la clasificación supervisada se observa una distribución de las diferentes tipologías (máscara, alga, arena y roca) bastante similar a la obtenida con los dos métodos anteriores (Fig.26). Parece que en ciertas zonas la distribución de la tipología alga que representa a los bosques Laminariales es coherente si la comparamos con otro tipo de fuentes como pueden ser observaciones directas, ortofotos o la cartografía realizada por Catoira et al.(1993) pero en las tipologías arena y roca el resultado no es del todo claro dado que su diferenciación no es siempre correcta.

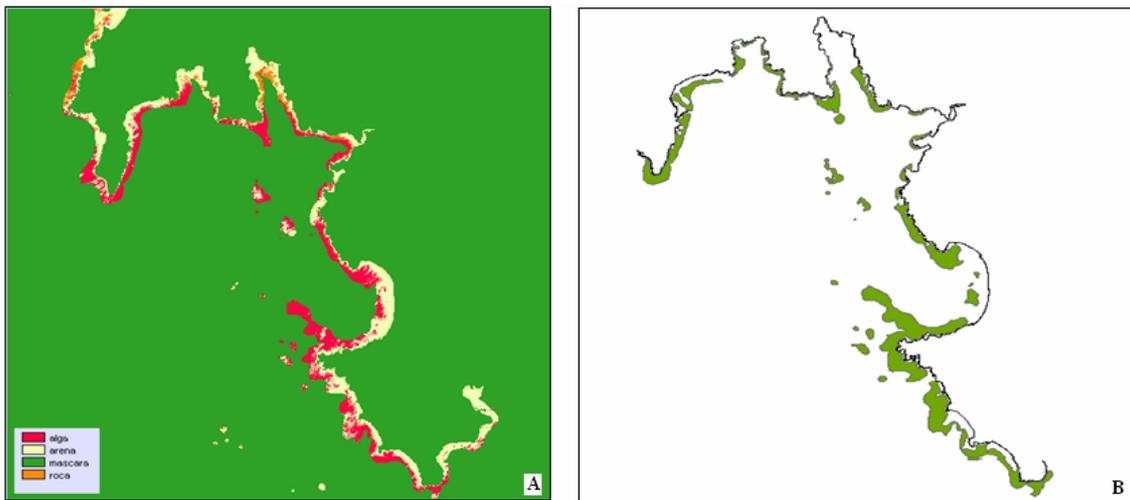


Fig.26 A) Imagen resultante de la clasificación supervisada en donde la presencia de algas se marca en color rojo. B) Polígonos que representan posibles bosques de Laminariales obtenidos siguiendo la coloración que suponemos delata la presencia de este tipo de algas en el método de la ecualización del histograma.

Con el fin de precisar los resultados obtenidos, se compararon los histogramas correspondientes a las firmas espectrales de cada tipología mediante el módulo SIGCOMP (Fig.27) y se observó entonces que las firmas espectrales de las tipologías arena y roca se solapan, siendo prácticamente iguales, de ahí que se clasifiquen zonas de roca como arena y viceversa, sin embargo, la tipología alga aparece un poco más diferenciada aunque comparte alrededor de 150 valores con las otras dos tipologías (arena y roca) de los 255 que presenta el histograma, hecho que no sería suficientemente diferenciador. Sin embargo, esta clasificación no se considera representativa bajo las condiciones en las que se llevó a cabo en este estudio, dado que se requiere de la delimitación precisa de zonas representativas de cada tipo de cobertura que se conseguirían mediante muestreos en la zona de estudio en tiempo real con la imagen satélite, hecho imposible de realizar en este trabajo dado que las imágenes de satélite corresponden a imágenes de archivo.

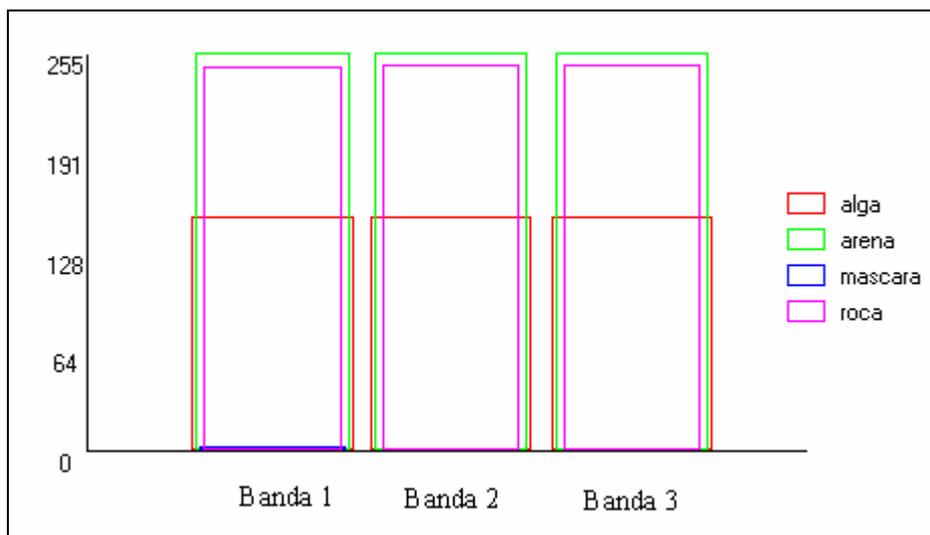


Fig.27. Comparación de las firmas espectrales de cada tipología. En el eje X se representan las bandas que componen la imagen y en el eje Y el valor de cada píxel.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo consistió en un acercamiento a la utilización de imágenes SPOT en la detección de algas Laminariales en el litoral gallego y la valoración de la viabilidad de métodos basados en el estudio de imágenes de satélite.

En principio las condiciones de turbidez de las aguas gallegas convierten sus costas en zonas poco adecuadas para la utilización de este tipo de técnicas aunque existen estudios recientes que han conseguido discriminar algas en este tipo de aguas como los realizados por Simms & Dubois (2001) y Kutser et al., (2006) entre otros.

En este trabajo, con el primer método empleado (ecualización del histograma) se consigue una visualización del fondo bastante eficiente hasta 10 m de profundidad una vez ecualizado el histograma y enmascaradas las zonas de tierra y batimetría correspondientes. Este resultado es bastante similar al alcanzado por Simm & Dubois (2001) que consiguieron detectar la presencia de *L. longicruris* entre 0 y 6 m de profundidad mediante el sensor HRV en aguas de la costa Atlántica de Canadá

En esta franja de profundidad (0-10 m) son fácilmente discernibles visualmente las zonas rocosas al igual que las zonas arenosas tanto emergidas como sumergidas

coincidiendo este resultado con el estudio realizado por Karpouzli et al. (2004) donde afirman que las algas poseen una reflectancia baja si la comparamos con los tipos de sedimento. Además, se observa otro tipo de sustrato que podría corresponderse con la presencia de Laminariales, debido a que su situación coincide de manera similar con datos aportados por buceadores y pescadores, con la comparación con ortofotos y con la cartografía realizada en el año 1993 por la Consellería de Pesca (Catoira et al., 1993). Además estas agrupaciones que se sospecha corresponden a la presencia de Laminariales son a simple vista más diferenciables en las bandas XS1 (verde:500-590 nm) y XS2 (rojo:610-680 nm) siendo esta última la que mejor marca dicha presencia. Esto último coincide con los picos de reflectancia representativos de algas pardas medidos en otros estudios donde se afirma que la característica predominante de la reflectancia de estas algas muestra dos máximos en los 600 y 650 nm (Karpouzli et al., 2004). Maritorea et al. (1994) y Andrefouet et al. (2001) también apoyaron valores máximos de reflectancia en las algas pardas *Sargassum* y *Turbinaria* en 600 y 650 nm.

Los resultados obtenidos empleando métodos automáticos (clasificación no supervisada) o semiautomáticos (clasificación supervisada) no han sido positivos. En el caso de la clasificación supervisada el grado de superposición de las firmas espectrales descarta los resultados alcanzados en este estudio, sin embargo, este método debería ser nuevamente calibrado mediante muestreos *in situ* en tiempo real con la imagen de satélite con el fin de establecer firmas espectrales representativas de cada tipo de cobertura.

Los resultados obtenidos con el análisis de cluster son más positivos que los anteriores, y muestran utilidad siempre que se complementen con clasificación visual (manual) y/o datos reales (*in situ*).

La cartografía de campos de Laminariales en las costas gallegas empleando imágenes satélite puede realizarse satisfactoriamente a través de la clasificación visual basada en la imagen ecualizada siempre que se cuente con datos reales (*in situ*). Para la optimización de este método (y la valoración minuciosa de la clasificación no supervisada) sería muy interesante contar con imágenes futuras que permitiesen un muestreo en la misma época que aportase datos reales.

La obtención simultánea de imágenes satélite e información *in situ* permitiría el cartografiado de los campos de Laminariales en las costas gallegas en el futuro y, por lo tanto, el estudio de su evolución.

BIBLIOGRAFÍA

Andréfouët, S., Muller-Karger, F. E., Hochberg E. J., Chuanmin, H., Carder, K. L. (2001). *Change detection in shallow coral reef environments using Landsat 7 ETM+ data*. Remote Sensing Environment, **78**:150-162.

Anstee, J., Dekker, A., Byrne, G., Daniel, P., Held, A. Miller, J. (2000). *Use of hyperspectral imaging for benthic species mapping in South Australian coastal waters*. In 10th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference, Adelaide, pp. 1051-1061.

Augenstein, E. W., Stow, D. A., Hope, A. S. (1991). *Evaluation of SPOT HRV-XS data for kelp resource inventories*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, **57**:501-509.

Bárbara, I. y Cremades, J. (1993). *Guía de las Algas del litoral gallego*. 2^a Ed. Ayuntamiento de A Coruña.

Barry, J. P., Baxter, C. H., Sagarin, R. D., Gilman, S. E. (1995). *Climate-related , long term faunal changes in a California rocky intertidal community*. Science, **267**:672-675.

Birkett D.A., Maggs C.A., Dring M.J. and Borden, P.J.S. (1998). *Infralittoral Reef Biotopes With Kelp Species. (Volume VII). An overview of dynamic and sensitivity characteristics for conservation management of marine SACs*. Scottish Association of Marine Science(UK Marine SACs Project). 174 pages.

Borg A., Pihl P. & Wennhage, H (1997). *Habitat choice by juvenile cod (Gadus morhua) on sandy soft bottoms with different vegetation types*. Helgolander Meeresuntersuchungen, **51**(2): 197-212

Britton-Simmons, K. V.(2004). *Direct and indirect effects of the introduced alga Sargassum muticum on benthic, subtidal communities of Washington State, USA*. Marine Ecology Progress Series, **277**:67-78.

Cabioc'h, J, J.Y. Cabioc'h, A. Le Toquin, C.-F. Boudouresuque, A. Meinesz & M. Verlaque (1995). *Guía de las algas de los mares de Europa: Atlántico y Mediterráneo*.

Catoira, J. L., Solórzano, F., Serrano, F., Carrascal, J. L., Veleiro, M. J., López, E., de Urrutia, J. M., Acuña, R., Durán, C., Alcalde, A., Fernández, M., Fransesch, O., González- Fernández, P., Fernández, P., Pérez, J. L. (1993). *Prospección, análisis y cartografía de microalgas y erizo de mar e el litoral de Galicia*. Consellería de Pesca. Dirección Xeral de Pesca, Marisqueo e Acuicultura

Chauvaud, S., Bouchon, C., Manière, R. (2001). *Cartographie des biocénoses marines de Guadeloupe à partir de dones SPOT (récifs coralliens, phanérogames marines, mangroves)*. Oceanologica Acta. Vol. 24. Supplement:3-16.

Christie, H., Fredriksen, S. and Rinde, E. (1998). *Regrowth of kelp and colonization of epiphyte and fauna community after kelp trawling at the coast of Norway*. Hydrobiologia, **375/376**,: 49-58.

Chung, I.K. & Brinkhuis B. H. (1986). *Cooper effects in early stages of the kelp, Laminaria saccharina*. Marine Pollution Bulletin [Mar. Pollut. Bull.], **17**, 5, 213-218.

Clark, C. D., Mumby, P. J., Chisholm, J. R. M., Andrefouert, S. (2000). *Spectral discrimination of coral mortality states following a severe bleaching event*. Int. J. Remote Sens., **21**:2321-2327.

Davison I.R. (1987). *Adaptation of photosynthesis in Laminaria saccharina (Phaeophyta) to changes in growth temperature*. Journal of Phycology, **23**, (2), 273-283.

Dekker, A. G., Brando, V. E. and Anstee, J. M. (2005). *Retrospective seagrass change detection in shallow coastal tidal Australian lake*. Remote Sensing Environment, **97**, 415-433.

Dekker, A. G., Brando, V. E., Anstee, J. M., Pinnel, N., Kutser, T., Hoogenboom, E. J., Petersw, S., Pasterkamp, R., Vos, R, Olbert, C., Malthus, T. J. M. (2001). *Imaging spectrometry of water*. In *Imaging Spectrometry: Basic Principles and Prospective Applications* (van der Meer, F. D. & de Jong, S. M. eds), pp. 307-359. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Eastman, J. R. (2003). *Idrisi Kilimanjaro Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes. Manual Versión. 14.00.*

Ed Parnell, P., Dayton, P. K., and Lennert-Cody, C. (2004). *The San Diego- La Jolla Ecological Reserve: Implications for de Design and Management of Marine Reserve. Ghost forest in the sea: The use of marine protected areas to restore biodiversity to kelp forest ecosystems in Southern California.* California Sea Grant College Program Research Completion Reports(University of California, San Diego)Paper Coastal 04/02.

Edwards, A. (1980). *Ecological Studies of the Kelp, Laminaria hyperborea, and its Associated Fauna in Southwest Ireland.* Ophelia ,**19** (1), 47-60.

Floc'h J-Y., Pajot R. & Mouret, V. (1996). *Undaria pinnatifida (Laminariales, Phaeophyta) 12 years after its introduction into the Atlantic Ocean.* Hydrobiology, **326-327**, (1), 217-222.

Fredriksen, S. (2003). *Food web studies in a Norwegian kelp forest based on stable isotope ($\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$) analysis.* Marine Ecology Progress Series, **260**: 71-81

Giesen, W., Van Katwije, M. and Den Hartoo, C. (1990). *Eelgrass condition and turbidity in the Dutch Wadden Sea.* Aquatic Botany, **37**, 71-85.

Gunnarsson, K. (1991). *Populations de Laminaria hyperborea et Laminaria digitata (Phéophycées) dans la baie de Breiðfjörur, Islande.* Rit. Fiskideildar., **12**: 1-48.

Hawkins, S. J., Southward, A. J., Genner, M. J.(2003). *Detection of environmental change in a marine ecosystems-evidence from the western English Channel.* Science of the Total Environment, **319**:245-256.

Hiscock K., Southward A. J., Tittley I. & Hawkins S. J. (2004). *Effects of changing temperature on benthic marine life in Britain and Ireland.* Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, **14**:333-362.

Izco, J., Barreno, E., Brugués, M., Costa, M., Devesa, J., Fernández., F., Gallardo, T., LLimona, X., Salvo., E., Talavera., S. y Valdés, B. (1997).*Botánica.* Ed. MacGraw-Hill-Interamericana de España, S. A. U. Madrid (España).

Karpouzli, E., Malthus, T. J., Place, C. J. (2004). *Hyperspectral discrimination of coral reef benthic communities in the western Caribbean*. Coral Reefs, **23**: 141-151.

Kutser, T. & Jupp, D. L. B. (2006). *On the possibility of mapping living corals to the species level based on their optical signatures*. Estuarine Coastal Shelf Sci., **69**: 607-614.

Kutser, T., Dekker, A. G., Skirving, W. (2003). *Modeling spectral discrimination of Great Barrier Reef benthic communities by remote sensing instruments*. Limnol. Oceanogr., **48**: 497-510.

Kutser, T., Vahtmäe, E. and Metsamaa, L. (2006). *Spectral library of macrolgae and benthic substrates in Estonian coastal waters*. Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol., **55** (4), 329-340.

Lorentsen S-H., Gremillet D. & Nymoen, G.H. (2004). *Annual variation in diet of breeding Great Cormorants: Does it reflect varying recruitment of Gadoids?*. Waterbirds, **27**: 161-169.

Madsen J. D., Cahmbers, P. A., James, W. F., Koch, E. W. and Westlake, D. F. (2001). *The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes*. Hydrobiologia, **444** (1-3), 71-84.

Maritorena, S., Morel, A., Gentili, B. (1994). *Diffuse-reflectance of oceanic shallow waters: influence of water depth and bottom albedo*. Limnol. Oceanogr. **39**:1689-1703.

Mohammed, A.I. and Fredriksen, S. (2004). *Production, respiration and exudation of dissolved organic matter by the kelp Laminaria hyperborea along the west coast of Norway*. J. Mar. Biol. Ass. U. K., **84**, 887-894.

OSPAR (2000). Quality Status Report 2000 for the North-East Atlantic. <http://www.ospar.org/eng/doc/pdfs/R4C5.pdf>

Pallas, A., García-Calvo, B., Corgos, A., Bernardez, C. and Freire, J. (2006). *Distribution and habitat use patterns of benthic decapod crustaceans in shallow waters: a comparative approach*. Marine Ecology Progress Series, **324**, 123-184.

Parmesan, C., Yohe, G. (2003). *A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems*. Nature, **412**:37-42

Pascualini, V., Pergent-Martini, C., Pergent, G., Agreil, M., Skoufas, G., Sourbes, L. and Tsirika, A. (2005). *Use of SPOT 5 for mapping sagrasses: An application to Posidonia oceanica*. Remote Sensing of Environment, **94**, 39-45.

Pérez-Ruzafa, I., Izquierdo, J. L., Araújo, R. Sousa-Pinto, I., Pereira, L. y Bárbara, I. (2003). *Mapas de distribución de las algas marinas de la Península Ibérica e Islas Baleares. XVII. Laminaria rodriguezii Bornet y adiciones a los mapas de L. hyperborea (Gunner.) Foslie, L. ochroleuca Bach. Pyl. y L. saccharina (L.) Lamour. (Laminariales, Fucophyceae)*. Botanica Complutensis, **27**, 155-164.

Phinn, S. R., Dekker, A. G., Brando, V. E., Roelfsema, C. M. (2005). *Mapping water quality and substrate cover in optically complex coastal and reef waters: an integrated approach*. Mar. Pollut. Bull., **51**:459-469.

Schultze, K., Janke, K., Krüß, A. and Weidemann, W. (1990). *The macrofauna and macroflora associated with Laminaria digitata and L. hyperborea at island of Helgoland (German Bight, North Sea)*. Helgoland Marine Research, **44** (1), 39-51.

Shaffer S. (2003). *Preferential use of nearshore kelp habitats by juvenile salmon and forage fish*. Proceedings of the Georgia Basin/Puget Sound Research Conference.

Sigua, G., Steward, S., and Tweedale, A.(2000). *Water quality monitoring and biological integrity assessment in the Indian River Lagoon, Florida: status, trend, and loadings (1988-1994)*. Environmental Management, **25**, 199-209.

Simms, É. L. and Dubois J.-M. M. (2001). *Satellite remote sensing of submerged kelp beds on the Atlantic coast of Canada*. Int. J. Remote Sensing Bol. **22**, (11), 2083-2094.

Sjøtun K., Fredriksen S., Lein T. E., Rueness J., & K. Sivertsen (1993). *Population studies of Laminaria hyperborea from its northern range of distribution in Norway*. Hydrobiologia, **260/261**:215-221

Steneck, R.S., Graham, M.H., Bourque, B.J., Corbett, D., Erlandson, J.M., Estes, J.A. and Tegner, M.J. (2002). *Kelp forest ecosystem: biodiversity, stability, resilience and future*. Environmental Conservation, **29**, 436-459.

Vahtmäe E., Kuster T., Martin G. Kotta J. (2006). *Feasibility of hyperspectral remote sensing for mapping macroalgal cover in turbid coastal waters- a Baltic Sea case study*. Remote Sensing of Environment **101**, 342-351.

Velando, A. y Freire, J. (1999). *Colonialidad y conservación de aves marinas: el caso del cormorán moñudo*. Etología. **7**, 55-62.

Viejo, R.M. (1997). *The effects of colonization by Sargassum muticum on tidepool macroalgal assemblages*. J. mar. biol. Ass. U.K., **77**: 325-340.

Walther, G-R, Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., Fromentin, J-M, Hoegh-Guldberg, O., Bairlein, F. (2002). *Ecological responses to recent climate change*. Nature, **416**:389-395.

Werdell, P. J. and Roesler, C. S. (2003). *Remote assessment of benthic substrate composition in shallow waters using multispectral reflectance*. Limnol. Oceanogr., **48**:557-567.