

**Universidad Pública de Navarra  
ESCUELA TECNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

**Nafarroako Unibertsitate Publikoa  
NEKAZARITZAKO INGENIARIEN  
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKOA**

**CUANTIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE *BRACHYPODIUM PINNATUM* EN PASTOS  
MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES MULTITEMPORALES**

Autor:

Amaia Etayo Martínez

Directores:

Dra. Rosa María Canals Tresserras

Dr. Jesús Álvarez Mozos.

# ÍNDICE

ANTECEDENTES.....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
Expansión de <i>Brachypodium pinnatum</i> en el Pirineo occidental .....	3
Usos aplicados de la teledetección en pastos .....	4
Espectro de la vegetación.....	6
OBJETIVOS .....	8
MATERIAL Y MÉTODOS .....	9
Área de estudio.....	9
Elección de los satélites.....	10
Materiales.....	10
Métodos.....	11
Corrección geométrica. ....	11
Corrección radiométrica y atmosférica .....	12
Corrección topográfica.....	13
Cálculo del índice de separabilidad.....	14
RESULTADOS.....	15
Representación gráfica .....	15
Deimos 1 .....	16
Landsat-5.....	19
Índice de separabilidad.....	31
Deimos-1 .....	31
Landsat-5.....	36
DISCUSIÓN .....	38
CONCLUSIONES .....	43
BIBLIOGRAFÍA.....	44
Artículos.....	44
Páginas Web.....	45

## **ANTECEDENTES**

Las invasiones de plantas alóctonas o la difusión descontrolada de especies autóctonas suponen una gran amenaza para la persistencia de los ecosistemas naturales. Estos dos procesos pueden poner en entredicho la perpetuación del bioma. La extensión de este tipo de plantas modifica las condiciones naturales del entorno provocando cambios en la sucesión.

*Brachypodium pinnatum* es una gramínea autóctona europea constituyente habitual de pastos espontáneos polífitos. Cambios en el entorno (quemadas controladas, abonado excesivo, pastoreo relajado o ausencia de pastoreo...) pueden provocar la expansión de esta herbácea en detrimento de la calidad del pasto y de la diversidad vegetal. Se trata de una planta que embastece rápidamente lo que trae consigo el rechazo por parte del ganado debido a su baja palatabilidad.

La expansión de esta especie en el Valle de Aezkoa es ya conocida pero es necesaria su cuantificación. La teledetección es una técnica que proporciona información sobre el estado y condiciones del pasto a media y gran escala. Esto puede permitir cuantificar la expansión de esta gramínea y con ello proponer medidas para poder frenar su avance.

## INTRODUCCIÓN

### **Expansión de *Brachypodium pinnatum* en el Pirineo occidental**

En los distintos ecosistemas mundiales existe un fenómeno de gran importancia, la invasión de los hábitats, un fenómeno con graves consecuencias. La invasión está determinada por tres factores: el número de propágulos, las características de la especie y la susceptibilidad del medio a ser invadido por la especie. Además depende de factores como el clima de la región y la competitividad de las especies de la zona. También puede verse afectada por la presencia de herbívoros, patógenos, mutualistas, etc. (Davis et al, 2000). Otros trabajos explican que la invasión es un proceso rápido, en el que la especie invasora se extiende por el territorio consiguiendo una abundancia elevada, con lo que puede ser difícil o casi imposible frenar o disminuir esta invasión (Müllerová et al, 2013).

En el Pirineo occidental navarro se ha manifestado un proceso de disminución de la superficie de suelo dedicada al pasto semi-natural, debido el abandono de las prácticas tradicionales de manejo las cuales evitan el avance de la sucesión natural dando lugar a masas arbustivas o forestales.(Canals et al, 2014).

Unido a la expansión de masas arbustivas y forestales existe en el área de estudio un problema de degradación, de pérdida de diversidad y funcionalidad. Esto es debido a la rápida expansión de una gramínea nativa denominada *Brachypodium pinnatum* (L) Beauv (Figura 1), (Canals et al, 2014) comúnmente denominada lastón o alka. La cual generalmente se encuentran formando mosaico con otras especies de matorral o de helechos. La distribución de esta especie es muy amplia ya que puede desarrollarse en todo tipo de pendientes y de orientaciones y además en un gran rango de altitud (800 – 1200m). (Ferrer y Canals, 2008).

Esta especie puede formar parte de pastos de baja calidad, caracterizados y dominados por plantas herbáceas que dan lugar a una gran cantidad de biomasa poco aprovechable por el ganado. *B. pinnatum* es una especie que embastece muy rápido y por lo tanto es poco palatable para el ganado (Ferrer y Canals 2008). A medida que la especie va colonizando el territorio, va disminuyendo la diversidad del lugar (Canals et al, 2014) lo cual puede desembocar en el abandono del pastoreo en determinadas áreas en detrimento de la comunidad.



Figura 1, *Brachypodium pinnatum* (L) Beauv. Fuente: Gobierno de Navarra; [www.cfnavarra.es](http://www.cfnavarra.es)

En otros estudios también se ha visto la expansión de esta planta en pastos mediterráneos del centro de Italia, en los Apeninos y en pastos de suelos calizos en el centro y norte Europeo (Canals et al, 2014).

### **Usos aplicados de la teledetección en pastos**

La teledetección se define como la adquisición de información relativa a un objeto, a través de instrumentos que se encuentran alejados de éste. (Fuente: [www.deimos-imaging.com](http://www.deimos-imaging.com)). Esta ciencia permite identificar los materiales presentes en la superficie de la tierra a partir de la radiación electromagnética que procede de ésta. Dicha radiación puede ser emitida por la propia superficie terrestre y la reflejada de la energía que proviene del sol (Gilabert et al, 1997).

Desde el inicio de la teledetección se han estado buscando aplicaciones potenciales en distintos campos de conocimiento. Hoy en día se encuentran disponibles una amplia gama de sensores y plataformas que brindan un gran número de funciones, por ello se puede considerar la teledetección como una herramienta para determinar el manejo de los pastos (Hunt et al, 2003). Existen distintos ejemplos de aplicaciones entre las que destacan: la evaluación de la biomasa y el índice de área foliar, la monitorización de la vegetación en función de su dinámica temporal o sus cambios fenológicos, la clasificación de las comunidades de plantas, el cálculo de la cobertura vegetal, la estimación de la calidad de pasto para los herbívoros, la monitorización de la productividad primaria, la distinción de zonas herbáceas de otras zonas que no lo son, la evaluación del estado de manejo en los pastos, la cuantificación de las intensidades de pastoreo y muchas más (Karnieli, et al, 2013).

La degradación de la vegetación se manifiesta no sólo por la pérdida de biomasa, sino por la invasión o el aumento de especies no deseadas. Estas pueden aumentar su producción de

biomasa en detrimento de la diversidad del ecosistema, consiguiendo así la degradación de estos terrenos. La degradación también puede ocurrir por la sustitución de especies palatables por especies no palatables que el ganado no consuma (Karnieli, et al, 2013).



Figura 2. Pasto degradado por expansión de especies no deseadas. (Autor: Dias-filho Fuente: Wikimedia-Commons, con licencia Attribution-Share Alike 3.0 Unported )

Los pastos de alta montaña pueden ser terrenos extensos y/o poco accesibles por lo que determinar la distribución, la extensión o las características de la vegetación puede ser complicado. Por otro lado el lanzamiento de una plataforma al espacio y su mantenimiento puede ser costoso, pero la superficie terrestre dedicada a pasto es elevada (aproximadamente el 26% de la superficie de la tierra según la FAO en 2006) por lo que en general el coste por unidad de superficie es bajo en comparación con otros métodos. Además la teledetección permite medir áreas muy extensas no solamente muestras individuales que se asumen como zonas representativas del lugar. Las asignaciones de parcelas individuales se pueden realizar en áreas más o menos representativas por lo que los errores de muestreo en este caso pueden ser grandes (Hunt et al, 2003).

Como ya se ha mencionado la extensión de determinadas especies vegetales puede traer consigo la degradación y la pérdida de diversidad en los pastos, por lo tanto es necesaria una estimación de la extensión de este tipo de plantas para evaluar el daño o el impacto ecológico que realizan. Las técnicas de teledetección permiten adquirir datos de forma rápida y con costes más bajos que los estudios realizados sobre el terreno. Se pueden utilizar fotografías aéreas, videografía aérea, imágenes digitales y datos de satélite para determinar la extensión de determinadas especies. Así estas observaciones permiten controlar los cambios que tienen lugar

en los pastos, desarrollar estrategias para su control y evaluar las medidas de control que se hayan propuesto para evitar la extensión de estas poblaciones (Hunt et al, 2003).

Las investigaciones realizadas en este campo se basan generalmente en describir la reflectancia característica de las plantas en las distintas bandas del espectro electromagnético utilizando imágenes de satélite para su detección. Para conseguir distinguir este tipo de poblaciones es necesario la utilización de imágenes adquiridas en fechas en las que las plantas se encuentren en un estado fenológico adecuado, generalmente en la época de floración (Hunt et al, 2003) . La mejor estrategia es buscar el momento óptimo en el estado fenológico y las características estructurales de la especie sometida a estudio (Müllerová et al 2013).

Un enfoque multitemporal se basa en el uso de mediciones multiespectrales repetidas, adquiridas a lo largo de la época de crecimiento, en las fechas donde se pueden observar cambios en la reflectividad, debidos a cambios en la fenología vegetal. Esto presenta la desventaja de que requiere la compra y/o el procesamiento de un gran número de imágenes. Estas imágenes a su vez deben estar lo suficientemente claras o libres de nubes, lo cual puede ser un problema en determinados momentos del año o determinadas áreas. (Svoray et al 2013)

La identificación de especies invasivas es algo más complejo que la identificación de las formaciones vegetales naturales (Svoray et al 2013). Conocer la dinámica de invasión de las especies permite evaluar que hábitats son más susceptibles de ser invadidos que otros. Gracias a esto una vez que se conoce el foco de invasión se puede conseguir elaborar una rápida respuesta para frenar o disminuir el avance de la invasión. Con estas técnicas de teledetección se puede conseguir una detección temprana de la invasión, la identificación del foco de invasión permitiendo su erradicación en las primeras etapas de expansión y también permite un monitoreo regular de la zona invadida, permitiendo así comprobar si las técnicas de manejo que se implementan son las correctas (Müllerová et al, 2013).

## **Espectro de la vegetación**

La radiación solar incide sobre un material y una parte de la energía es reflejada y el resto se propaga por el interior de este. La radiación reflejada permite determinar la reflectividad espectral del propio material, la cual está íntimamente ligada a la naturaleza del material, lo que posibilita el reconocimiento de distintos materiales en teledetección (Gilabert et al, 1997).

En el espectro de la vegetación sana la reflectividad pasa de un valor mínimo relativo en el rojo (500-600 nm), lo que corresponde con la banda de absorción de energía de la clorofila, a un máximo en el infrarrojo cercano (700-1300 nm), correspondiente a las dispersiones de radiación que tienen lugar en el interior del vegetal. En cambio en la banda del verde (600-700

nm), la radiación se refleja con una fuerza mayor que en la banda del rojo dando el color verde característico de la vegetación (Paz et al, 2005). El suelo en cambio presenta al igual que la vegetación un aumento del rojo al infrarrojo cercano, aunque en este caso es menos acusado (Gilabert et al, 1997). Así la teledetección permite discriminar los distintos materiales del suelo e incluso el estado fenológico de algunas especies vegetales, mediante la medición de su reflectividad.

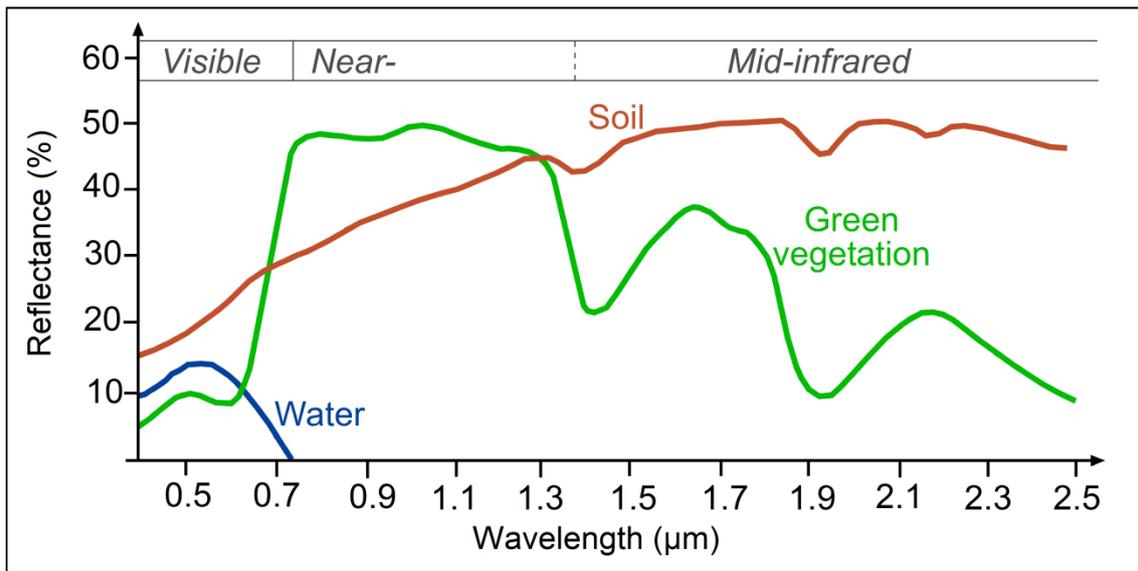


Figura 3. Reflectividad de la vegetación, suelo y agua en distintas longitudes de onda. (Fuente: [www.seos-project.eu](http://www.seos-project.eu))

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es poner en práctica una metodología de detección a distancia en una escala multitemporal de un año. Esto permite la identificación y cuantificación de los patrones de expansión de *Brachypodium pinnatum* en el Pirineo occidental. Los objetivos detallados son:

Analizar la firma espectral de *Brachypodium pinnatum* en tres bandas (verde, rojo e infrarrojo cercano) de imágenes obtenidas de los sensores Deimos 1 y Landsat-5 y comparar la reflectancia de esta planta con el resto de especies que coexisten en Monte Aezkoa en una escala multitemporal

Medir la separabilidad de *B. pinnatum* y el resto de las especies en las tres bandas a lo largo del año 2011.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Área de estudio

El área de estudio se sitúa en el Valle de Aezkoa, en el Pirineo occidental navarro. El clima se caracteriza por inviernos largos y fríos, con presencia de nieve durante gran parte de la estación. Los veranos son templados, en ocasiones presentan bancos de nieblas motivados por la altitud del lugar y la fuerte influencia del océano atlántico (Canals et al., 2014). En cuanto al relieve la zona se encuentra entre los picos Mendiziar (1319 m) y Menditxipi (1375 m). Atendiendo a la hidrología el principal curso fluvial es el río Irati, afluente del río Aragón ambos pertenecientes a la vertiente mediterránea, aunque también existen afluentes que riegan la zona norte los cuales desembocan en el Mar Cantábrico (Ferrer y Canals 2008).

En concreto el estudio se ha llevado a cabo en los comunales del valle de Aezkoa: Abodi (237 ha), Nabala (340 ha), Puertos Grandes (1692 ha) y Sarriozar (218 ha) (Ferrer y Canals 2008). Su localización viene representada en la siguiente imagen.

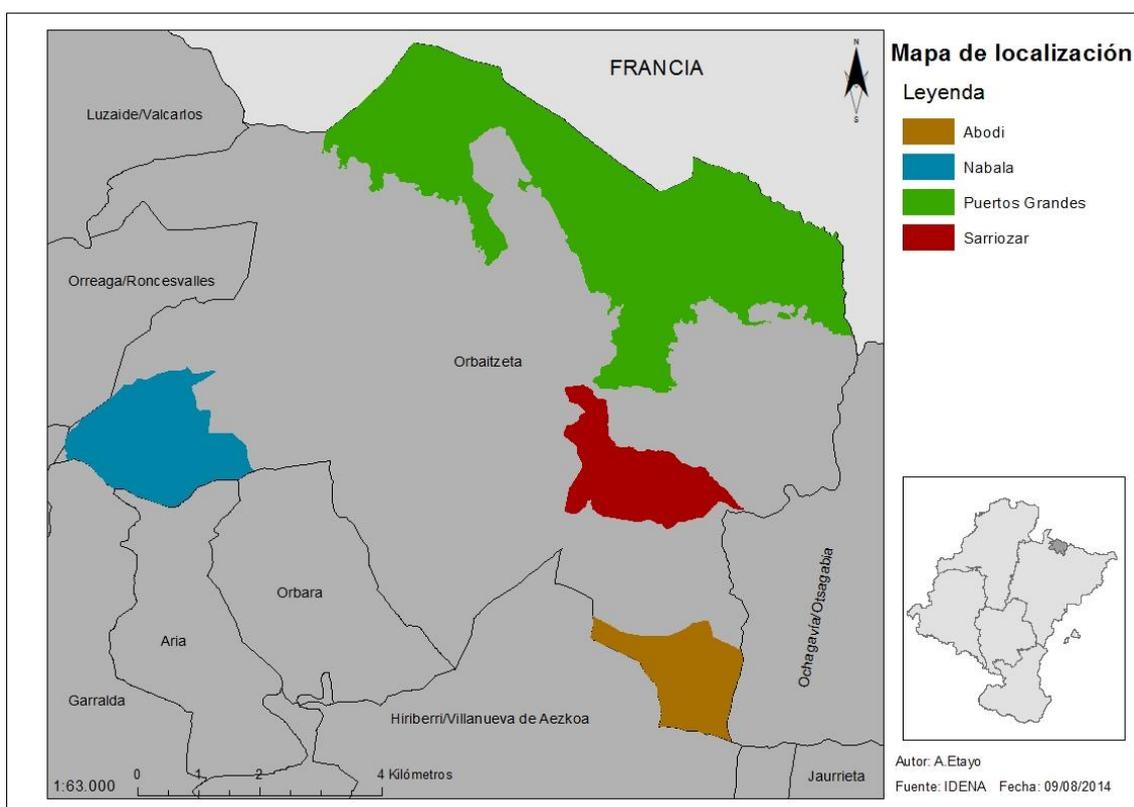


Figura 4. Mapa de localización del área de estudio.

El paisaje puede definirse como un mosaico de masas boscosas, zonas de matorral y extensiones de pasto seminatural. Las masas boscosas están formadas por ejemplares de haya y las zonas de matorral por *Ulex galii* Planch, *Genista occidentalis* (Rouy) o incluso ejemplares del género *Rubus* Coste. Las zonas de pasto se componen principalmente por vegetación

dominante como: *Festuca gr rubra* L., *Agrostis capylaris* L., *Brachypodium pinnatum* (L) Beauv., *Cynosurus cristatus* L., *Danthonia decumbens* (L) DC. y *Avenula sulcata* (Gay ex Boiss.) Dumort. A lo largo de este mosaico también se pueden encontrar manchas de especies perennes entre las que se incluyen: *Achillea millefolium* L., *Potentilla erecta* (L) Rauschel o *Potentilla montana* Brot. Destaca también la presencia de algunas leguminosas como: *Trifolium repens* L. y *Lotus corniculatus* L. (Canals et al., 2014).

## **Elección de los satélites**

Hoy en día en el espacio existen gran número de satélites orbitando alrededor de la tierra. Cada uno presenta ciertas características propias que le hacen propicio para llevar a cabo una determinada tarea. Por un lado existen satélites con una alta resolución espacial que toman imágenes con un tamaño de píxel muy reducido, lo que proporciona una gran información acerca de la cubierta vegetal. En cambio este tipo de satélites sacrifica la resolución espacial y generalmente las imágenes que obtienen son anuales o se toman entre periodos de tiempo muy largos. En este grupo destaca el satélite SPOT5, con una resolución espacial de 2.5 metros en la banda del pancromático y de 10 metros en las bandas multiespectrales aunque sus coberturas terrestres son anuales.

Por el contrario existen otros satélites de baja resolución espacial que proporcionan imágenes en periodos de tiempo más cortos, de días, horas o incluso minutos. En cambio sacrifican la resolución espacial, proporcionando imágenes con un tamaño de pixel de mayor tamaño que los anteriores. Este tipo de satélites suele utilizarse para estudiar los fenómenos meteorológicos como es el caso de Meteosat que proporciona información del continente Europeo cada 30 minutos.

Por último existen satélites con una resolución espacial y temporal media proporcionan imágenes con un tamaño de pixel entre 20 y 40 metros, sin sacrificar la resolución temporal ya que esta se sitúa entre 15 y 30 días. Destacan los satélites del programa Landsat y el satélite español Deimos, ver tabla 1, Las imágenes que proporcionan estos satélites son las que se han utilizado para realizar este trabajo. Se buscaba evaluar la vía multitemporal y para ello eran necesarias imágenes con una resolución temporal media, que proporcionasen información acerca de los cambios que ocurren en la cubierta vegetal a lo largo del año.

## **Materiales**

Para la realización de este trabajo se utilizaron imágenes provenientes de los satélites Landsat 5 y Deimos-1, Las primeras se obtuvieron de U.S. Geological Survey y las segundas del Instituto Geográfico Nacional. Las imágenes seleccionadas fueron del año 2011, ya que era el año que tenía un mayor número de imágenes disponibles sin nubes ni nieblas. Ambos satélites presentan características similares que se muestran a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 1. Tabla resumen de las características de los satélites Landsat 5 y Deimos-1,

	Landsat 5	Deimos
Altitud (km)	705	663
Resolución espacial (m)	25	22
Resolución temporal (días)	16	15
Espectro ( $\mu\text{m}$ ):		
Banda 1	0,452-0,518	0.52 – 0.60
Banda 2	0,528-0,609	0.63 – 0.69
Banda 3	0,626-0,693	0.77 – 0.90
Banda 4	0,776-0,904	-
Banda 5	1,567-1,784	-
Banda 6	10,45-12,42	-
Banda 7	2,097-2,349	-

Puede verse como las tres primeras bandas de Deimos-1 coinciden con las bandas 2, 3 y 4 de Landsat 5, por lo que son estas bandas las que se utilizaran en la obtención de datos, tras el procesamiento de las imágenes.

Además se utilizó una imagen Aster obtenida en el año 2007 con una resolución espacial de 30 metros y reprocesada a 5 m adquirida al USGS, que se utilizó para realizar la corrección geométrica de las imágenes Landsat. Además también fue necesario un modelo de elevación digital (DEM) que presenta una resolución espacial de 5 metros y se obtuvo del Instituto Geográfico Nacional. Este DEM se utilizó para realizar la corrección topográfica.

Previamente a este trabajo se determinaron 19 categorías de vegetación distintas que se obtuvieron mediante inventario florístico realizado en campo. Estas categorías se utilizaron para determinar los valores de reflectividad de cada imagen para cada categoría. (Ferrer y Canals 2008)

Para el procesamiento de imágenes se utilizó el software Envi 5.0, La elaboración de algunos mapas se realizó con ArcGIS 10.2.1, Las gráficas y los cálculos de separabilidad se realizaron con Microsoft Excel 2010,

## **Métodos.**

### **Corrección geométrica.**

Una imagen con una corrección geométrica (o georreferenciada) es aquella en la que a cada pixel se le asigna unas coordenadas cartográficas permitiendo superponerla con otra cartografía y consiguiendo eliminar sus eventuales distorsiones geométricas. Para llevar a cabo esta corrección se selecciona una imagen previamente georreferenciada, en este caso una imagen Aster y se colocan una serie de puntos de control en lugares concretos (GCPs). Estos puntos de control se distribuyen también en la imagen a corregir en los mismos lugares. En este

trabajo definieron 10 puntos de control con un error (RMS) nunca superior a 0,5 píxeles. La realización de la georreferenciación se llevó a cabo mediante el método de interpolación de convolución cúbica.

La corrección geométrica se realizó solamente en las imágenes Landsat ya que las imágenes obtenidas del satélite Deimos se encontraban ortorrectificadas mediante convolución cúbica y con un error RMS inferior a 10 metros (producto L1T).

### **Corrección radiométrica y atmosférica**

Para utilizar la información de la imagen es necesario transformar sus valores de Niveles Digitales a una magnitud con significado físico como es la reflectividad de la superficie terrestre. Ésta representa la proporción de radiación solar que una determinada cubierta del terreno refleja en cada banda del espectro y se relaciona con características biofísicas de la misma, como su contenido en pigmentos o su estado hídrico. Para obtener la reflectancia es necesario previamente calcular la radiancia (Hantson, S., E. Chuvieco, et al., 2011). Para ello, tanto para las imágenes Landsat como Deimos, se utilizan los parámetros que aparecen en los metadatos. Una vez realizada esta operación se procedió a realizar la corrección atmosférica. En este trabajo se ha optado por el modelo del objeto oscuro, un modelo sencillo que corrige la señal que proviene del sensor de la influencia y de la distorsión causada por la atmósfera (Hantson, S., E. Chuvieco, et al., 2011). El modelo consiste en sustraer a la radiancia de cada píxel su valor mínimo en la imagen, normalmente correspondiente a zonas sombrías o masas de agua, cuya radiancia proviene únicamente de procesos de difusión atmosféricos. Este cálculo se incorpora en la ecuación de obtención de la reflectancia de la siguiente forma:

$$\rho = \frac{\pi * [L - L_a] * d^2}{\cos\theta * E_0 * \tau_1 * \tau_2}$$

Siendo  $\rho$  la reflectividad,  $E_0$  la irradiancia exoatmosférica solar medida en  $W/m^2\mu m$ ;  $\tau_1$  es el coeficiente de transmisión atmosférica en el camino Sol- Tierra y  $\tau_2$  el coeficiente de transmisión atmosférica en el camino Tierra- sensor. Como se ha mencionado,  $L_a$  es la radiancia recibida por el sensor en zonas donde sólo hay contribución atmosférica, en este caso se tomaron los valores mínimos del histograma de la imagen que corresponden a zonas del pantano de Irabia.  $L$  es la radiancia del píxel a corregir,  $\theta$  el ángulo cenital solar y  $d$  la distancia entre la Tierra y el sol en unidades astronómicas en el momento de adquisición de la imagen (Hantson et al, 2011).

Los valores de irradiancia exoatmosférica y los coeficientes de transmisión varían de un satélite a otro, se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 2. Valores de irradiancia exoatmosférica y coeficientes de transmisión para los dos satélites. (Gyanesh, et al, 2009)

	Banda Verde	Banda Rojo	Banda NIR
ESUN W/m <sup>2</sup> μm			
Landsat 5	1796	1536	1031
Deimos -1	1811	1531	1036
τ <sub>1</sub>			
Landsat 5	0,78	0,85	0,91
Deimos -1		-	
τ <sub>2</sub>			
Landsat 5		1	
Deimos -1		-	

### Corrección topográfica.

En zonas con un relieve muy acusado es necesario llevar a cabo este tipo de corrección para evitar la distorsión causada por las variaciones en el ángulo de incidencia solar en zonas con distintas pendientes y orientaciones. Para ello se debe tener en cuenta el ángulo de incidencia solar y el ángulo de observación del sensor. En función de la incidencia solar áreas similares (con los mismos usos del suelo) pueden presentar valores de reflectancia diferentes. Esto es más marcado en zonas de solana que reciben una mayor radiación solar y con ello es devuelta una mayor radiación al sensor que en zonas de umbría (Chuvieco y Hantson, 2010).

Para llevar a cabo esta corrección se utiliza el modelo de elevación digital (DEM) y el ángulo cenital y azimutal del sol en el momento de adquisición de la imagen (incluidos en los metadatos). Con ello se calcula el ángulo de incidencia solar para cada pixel que compone la imagen. Posteriormente se aplica el método empírico-estadístico, descrito por el algoritmo (Teillet et al, 1982) :

$$\rho_{\lambda,h,i} = \rho_{\lambda,i} \cos \gamma_i m_\lambda - b_\lambda + \bar{\rho}_{\lambda,i}$$

Siendo:

$\rho_{\lambda,h,i}$  La reflectividad de un pixel en terreno horizontal.

$\rho_{\lambda,i}$  Reflectividad de un pixel en terreno en pendiente.

$\bar{\rho}_{\lambda,i}$  Reflectividad promedio de todos los  $\rho_{\lambda,i}$

$\gamma_i$  Ángulo de incidencia en un pixel i

$b_\lambda$  La ordenada en el origen de la regresión lineal entre  $\gamma_i$  y  $\rho_{\lambda,i}$

$m_\lambda$  La pendiente de la regresión lineal entre  $\gamma_i$  y  $\rho_{\lambda,i}$

### **Cálculo del índice de separabilidad.**

A partir de las distintas categorías definidas a partir de los inventarios florísticos realizados en campo se calcularon los valores de reflectividad correspondientes a cada imagen. Posteriormente se calculó el índice de separabilidad entre las cubiertas de *Brachypodium pinnatum* y cada una de las categorías. Con esto se buscó conocer cuantitativamente la similitud entre las cubiertas de *Brachypodium pinnatum* y cada categoría en cada fecha y banda espectral. Este cálculo se llevó a cabo en cada una de las bandas, verde, rojo e infrarrojo cercano. El índice viene determinado por la fórmula:

$$d = \frac{|\bar{X}_b - \bar{X}_i|}{\sigma_b + \sigma_i}$$

Siendo:

$d$  Distancia o separabilidad entre *Brachypodium pinnatum* y la categoría  $i$

$\bar{X}_b$  Promedio de la cubierta de *Brachypodium pinnatum*

$\bar{X}_i$  Promedio de la categoría  $i$

$\sigma_b$  Desviación estándar de la cubierta de *Brachypodium pinnatum*

$\sigma_i$  Desviación estándar de la categoría  $i$

## RESULTADOS

### Representación gráfica

En los siguientes gráficos se han representado los datos obtenidos en cada una de las categorías vegetales utilizadas en este estudio. Se ha hecho para cada una de las imágenes de los dos satélites, Deimos y Landsat. En la siguiente tabla se recogen las abreviaturas utilizadas y se describen cada una de las categorías:

Tabla 3. Descripción de las distintas categorías utilizadas.

A.c	Pasto de <i>Agrostis curtisii</i>
Arg	Argomal ( <i>Ulex sp</i> )
B.p	Plantación de <i>Brachypodium pinnatum</i>
B.s	Bojeral ( <i>Buxus sempervirens</i> )
C.m	Espinar ( <i>Crataegus monogyna</i> )
C.s	Retamar ( <i>Cytisus scoparius</i> )
F.o	Pasto de <i>Festuca ovina gr.</i>
F.o y A.c	Pasto de <i>Festuca rubra</i> y <i>Agrostis capylaris</i>
F.s	Hayedo ( <i>Fagus sylvatica</i> )
G.o	Matorral de otavera ( <i>Genista occidentalis</i> )
Imp	Improductivo, afloramientos rocosos
Jn	Enebral ( <i>Juniperus communis</i> )
P	Prados y praderas
P.a	Pasto de <i>Poa annua</i>
PLk	Plantación de pino alerce ( <i>Larix kaempferi</i> )
Ppa	Plantación de abeto rojo ( <i>Picea abies</i> )
PPs	Plantación de pino royo ( <i>Pinus sylvestris</i> )
Pte	Helechal ( <i>Pteridium aquilinum</i> )

Todas las categorías se han agrupado en cuatro grupos o conjuntos: forestales, arbustivas, herbáceas y otros. Todos los gráficos representan los valores promedio de reflectividad para cada una de las bandas, verde, rojo e infrarrojo cercano.

En las imágenes del satélite Deimos las imágenes utilizadas son de las fechas: 6 de abril, 17 de mayo, 11 de agosto, 6 de septiembre, 1 de noviembre y 24 de noviembre.

**Deimos 1**  
06-04-2011

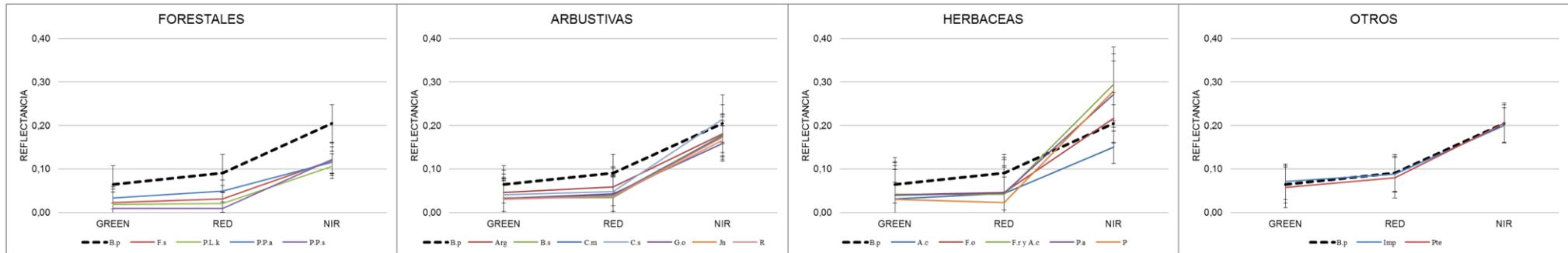


Gráfico 1. Reflectancia en las bandas del verde, rojo e infrarrojo cercano de la especie de *B. pinnatum* y las cuatro categorías estudiadas en Monte Aezkoa el 6 de abril.

17-05-2011

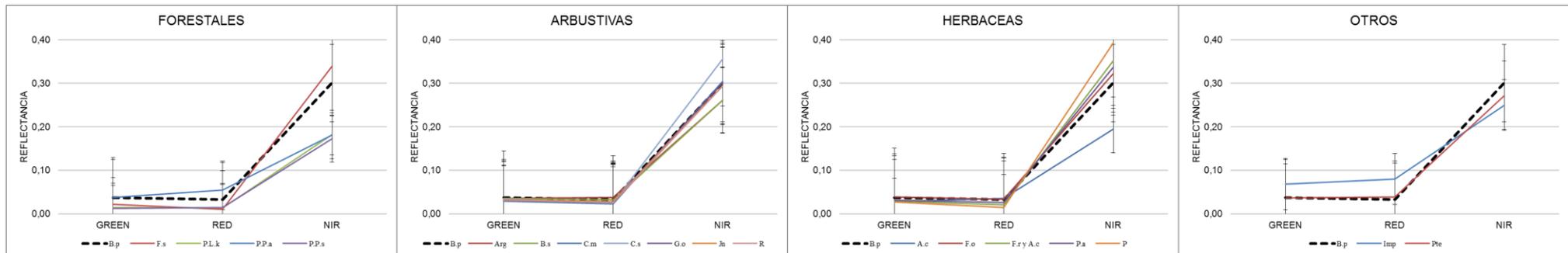


Gráfico 2. Reflectancia en las bandas del verde, rojo e infrarrojo cercano de la especie de *B. pinnatum* y las cuatro categorías estudiadas en Monte Aezkoa el 17 de mayo.

11-08-2011

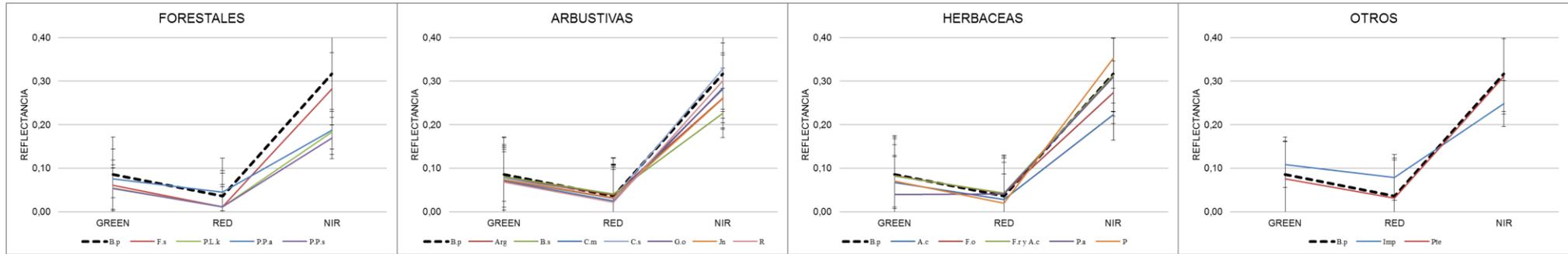


Gráfico 3. Reflectancia en las bandas del verde, rojo e infrarrojo cercano de la especie de *B. pinnatum* y las cuatro categorías estudiadas en Monte Aezkoa el 11 de agosto.

06-09-2011

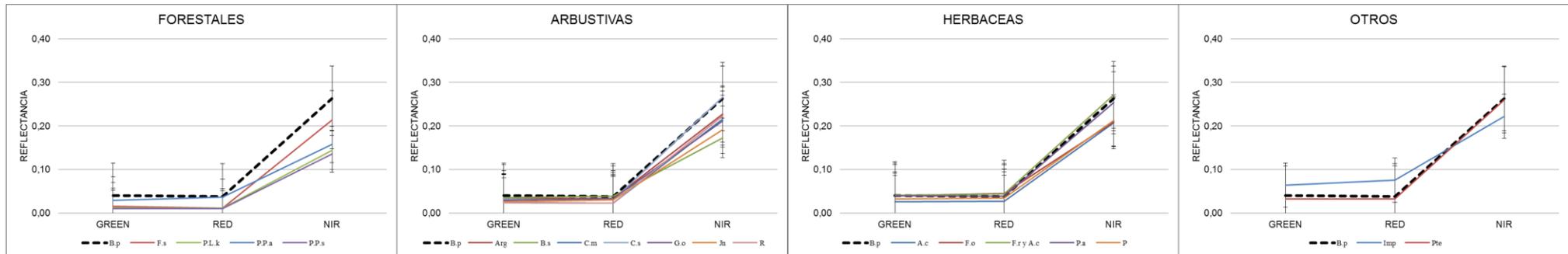


Gráfico 4. Reflectancia en las bandas del verde, rojo e infrarrojo cercano de la especie de *B. pinnatum* y las cuatro categorías estudiadas en Monte Aezkoa el 6 de septiembre.

01-11-2011

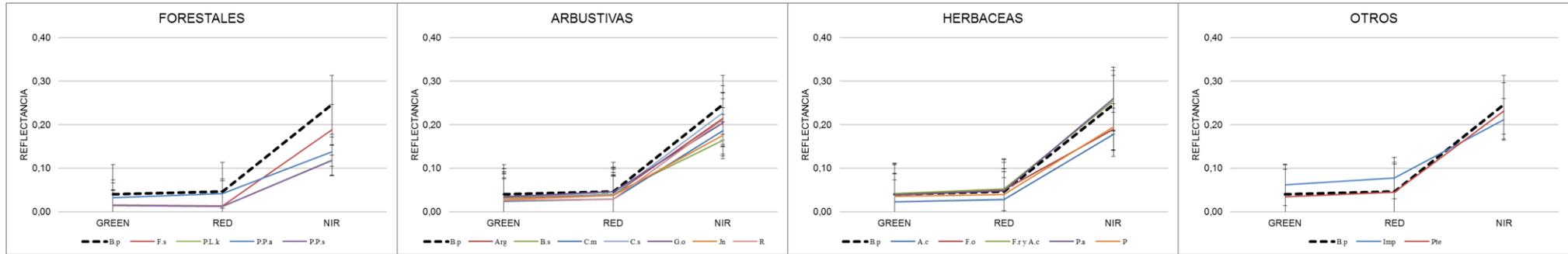


Gráfico 5. Reflectancia en las bandas del verde, rojo e infrarrojo cercano de la especie de *B. pinnatum* y las cuatro categorías estudiadas en Monte Aezkoa el 1 de noviembre.

24-11-2011

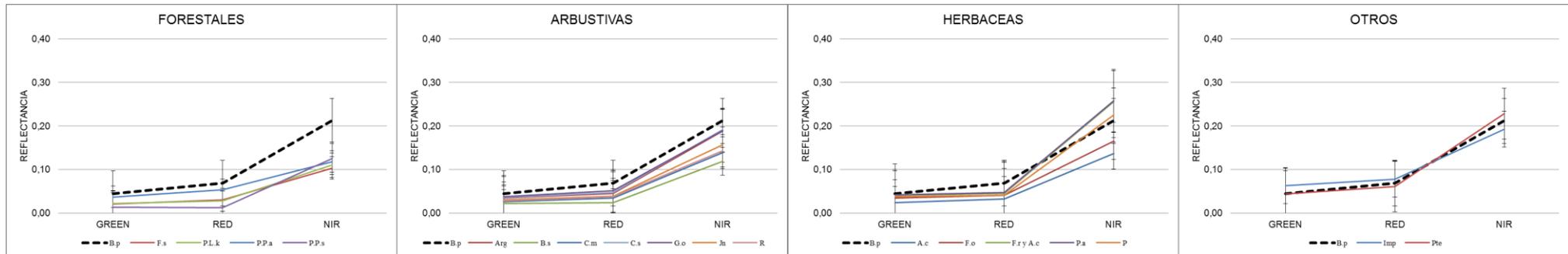


Gráfico 6. Reflectancia en las bandas del verde, rojo e infrarrojo cercano de la especie de *B. pinnatum* y las cuatro categorías estudiadas en Monte Aezkoa el 24 de noviembre.

Landsat-5  
19-06-2011

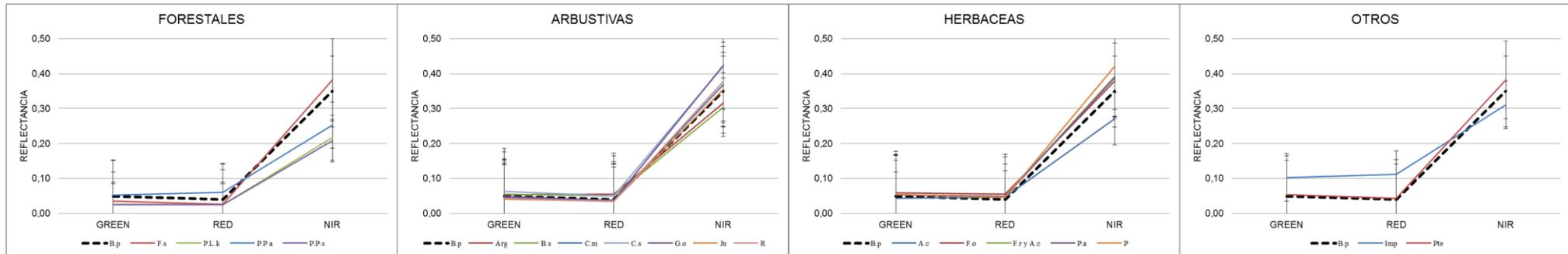


Gráfico 7. Reflectancia en las bandas del verde, rojo e infrarrojo cercano de la especie de *B. pinnatum* y las cuatro categorías estudiadas en Monte Aezkoa el 19 de junio.

05-07-2011

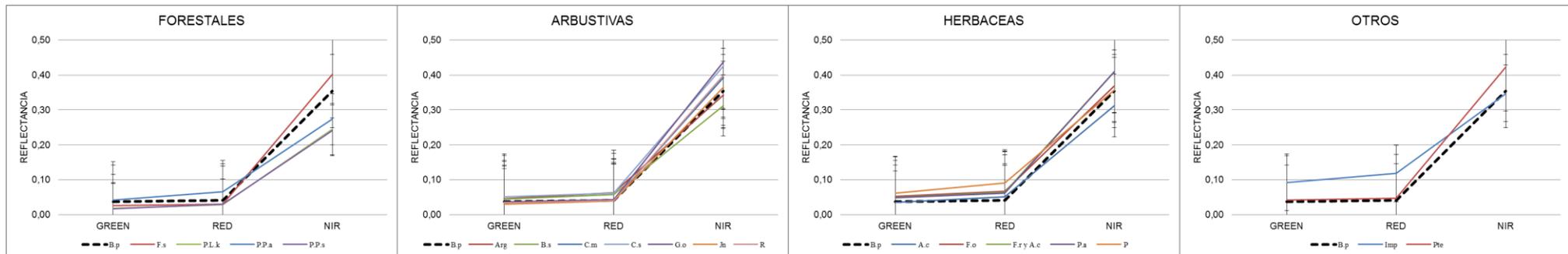


Gráfico 8. Reflectancia en las bandas del verde, rojo e infrarrojo cercano de la especie de *B. pinnatum* y las cuatro categorías estudiadas en Monte Aezkoa el 5 de julio.

07-09-2011

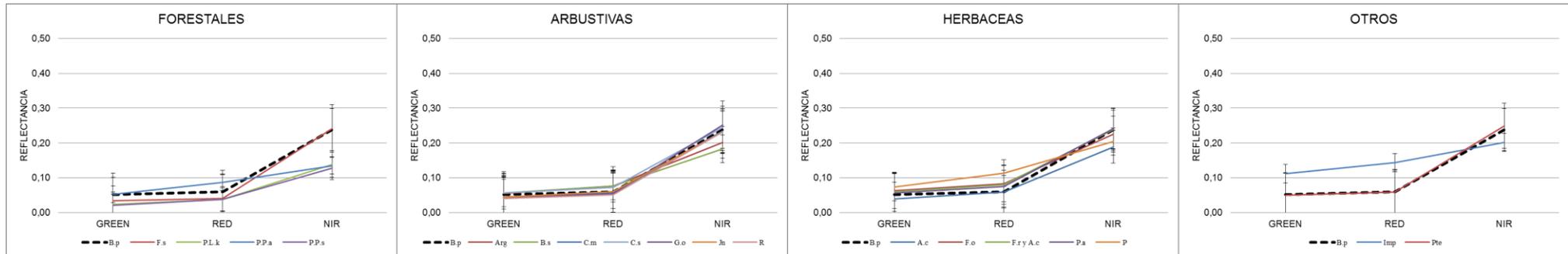


Gráfico 9. Reflectancia en las bandas del verde, rojo e infrarrojo cercano de la especie de *B. pinnatum* y las cuatro categorías estudiadas en Monte Aezkoa el 7 de septiembre.

23-09-2011

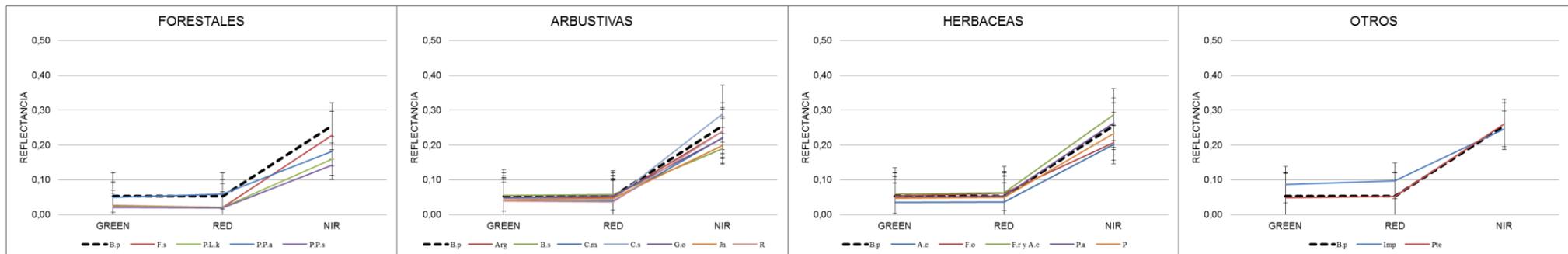


Gráfico 10. Reflectancia en las bandas del verde, rojo e infrarrojo cercano de la especie de *B. pinnatum* y las cuatro categorías estudiadas en Monte Aezkoa el 23 de septiembre.

6 de Abril.

En la imagen del 6 de abril puede verse como los valores de reflectividad de *Brachypodium pinnatum* son superiores en todas las bandas a los valores de reflectividad de cualquier planta forestal estudiada. Todas las categorías muestran la misma tendencia, valores bajos en el verde, algo más elevados en el rojo y superiores en el infrarrojo cercano.

Destaca la categoría de plantación de *Picea abies* que presenta valores de reflectancia en el rojo de 0,05. Mientras que el resto de categorías presentan valores de alrededor de 0,03 en el rojo. Los valores en el infrarrojo cercano son de aproximadamente 0,12.

En esta fecha la cubierta del lastón se diferencia claramente del resto de especies forestales, presentando, como ya se ha mencionado, valores superiores en todas las bandas.

En el conjunto de arbustivas ocurre al igual que en la grupo de forestales. La reflectividad del *B. pinnatum* es superior en todas las bandas. Presentan valores promedio de reflectancia en torno a 0,04 para la banda del verde y del rojo y valores cerca de 0,18 en la banda del infrarrojo cercano. Destaca el retamal que muestra el máximo valor en el infrarrojo de todo el conjunto de arbustivas, 0,21,

En el caso de las herbáceas se observa que todas las categorías tienen valores de reflectancia en la banda del verde y del rojo por debajo de los valores del lastón. Esto se debe a que tiene lugar una mayor absorción en el verde y en el rojo.

Destaca la banda del infrarrojo cercano, por un lado se ven valores de reflectancia inferiores al valor de *B. pinnatum* en el caso de *Agrostis curtisii* y *Festuca ovina*. Por otro lado se observan valores superiores en esta banda en las categorías formadas por *Poa annua*, Prados y praderas y *Festuca rubra* y *Agrostis capylaris*.

En el último conjunto los valores de reflectividad para cada categoría son similares a los de *B. pinnatum*. Hay que mencionar que el helechal crece junto a plantas de *B. pinnatum* en la zona en la que se obtuvieron los datos de la categoría de helechal. En la fecha de obtención de la imagen (6 de abril) la masa de helechos no ha comenzado a desarrollarse y lo que crece en esas áreas son poblaciones de *Brachypodium pinnatum*, por ello presenta una signatura espectral similar.

17 de Mayo

En esta imagen se puede ver como el salto en los valores de reflectancia de la banda del rojo a la del infrarrojo cercano es mayor. Pueden verse diferencias entre las cubiertas de *Brachypodium pinnatum* en la banda del verde, del rojo y del infrarrojo cercano para las

categorías de hayedo, plantación de alerce y plantación de pino silvestre. En el caso de plantación de abeto rojo las diferencias se observan solamente en la banda del rojo y del infrarrojo cercano. La banda del verde presenta el mismo valor que *B. pinnatum* por lo que su discriminación no puede realizarse en esta banda.

En cuanto al conjunto de arbustivas las diferencias entre *B. pinnatum* y las distintas categorías son mínimas. Pueden discriminarse las categorías de *Ulex sp*, *Buxus sempervirens* y *Cytisus scoparius* en la banda del infrarrojo cercano. El resto de categorías presentan una signatura espectral muy similar al lastón por lo que su diferenciación es nula en este momento.

En el grupo de herbáceas las diferenciaciones solo se pueden llevar a cabo en la banda del infrarrojo cercano. Se observan valores por encima de *Brachypodium pinnatum* (0,30) para las categorías de prados y praderas (0,39), pastizal de *Festuca rubra* y *Agrostis capillaris* (0,35), pastizal de *Poa annua* (0,34) y de *Festuca ovina* (0,32). El único valor que se sitúa por debajo de *B. pinnatum* es la categoría de *Agrostis curtisii* (0,19).

En el cuarto conjunto la categoría de improductivo se distingue claramente de *B. pinnatum* en todas las bandas. La categoría de helechal (*Pteridium aquilinum*) se discrimina en la banda del infrarrojo cercano, por lo que este momento sería una buena fecha para diferenciar esta especie de helecho del *B. pinnatum*.

11 de Agosto

En este momento se puede ver la signatura espectral típica de la vegetación, con un pequeño pico en el verde, valores inferiores para la banda del rojo y el máximo pico de reflectividad en la banda del infrarrojo cercano. Destaca el salto que se produce en las bandas del rojo al infrarrojo que en este momento es máximo.

En el conjunto de cubiertas forestales se puede distinguir claramente el lastón de la cubierta del resto de plantas. Esta herbácea presenta valores de reflectancia superiores en las bandas del verde y del rojo en torno a 0,09 y 0,04 respectivamente. Mientras que el resto de categorías forestales presentan valores alrededor de 0,06 para la banda del verde y de 0,01 para la banda del rojo. Destaca la plantación de abeto rojo con valores de reflectancia de 0,08 en el verde y 0,05 en el rojo. En la banda del infrarrojo todas las categorías se ven valores medios de aproximadamente 0,18, excepto el hayedo que presenta valores superiores de 0,28.

En el conjunto de arbustivas la diferenciación del lastón de cada una de las categorías descritas se hace más complicada ya que observan valores de reflectividad similares para todas las bandas. En la banda del verde y del rojo los valores son prácticamente iguales, mientras que se pueden ver algunas pequeñas diferencias en la banda del infrarrojo cercano.

Destaca el bojeral con el mínimo valor de reflectividad en el infrarrojo cercano, lo que indica que su actividad vegetal se encuentra por debajo de la de *Brachypodium pinnatum*

En el caso de las herbáceas se observa como los valores de reflectividad en el verde y en el rojo son prácticamente similares a excepción de los pastos de *Poa annua* que presentan valores algo inferiores en la banda del verde. Las máximas diferencias para algunas categorías se observan en la banda del infrarrojo cercano. Se puede ver como *Agrostis curtisii* se caracteriza por tener los mínimos valores de reflectividad en el infrarrojo cercano, lo cual se ha visto en los resultados de las imágenes anteriores. Esto se puede deber a que esta especie presente en general una reflectancia menor para la banda del infrarrojo cercano. Esta menor reflectancia en el infrarrojo permite su diferenciación de *Brachypodium pinnatum*.

En cuanto al cuarto conjunto no se observan diferencias ente *Brachypodium pinnatum* y *Pteridium aquilinum* por lo que su diferenciación en este momento se hace muy complicada. En cambio las zonas de improductivo presentan un menor salto en cuanto a valores de reflectividad de la banda del rojo a la del infrarrojo lo que permite su correcta diferenciación del lastón.

Cabe destacar que en el mes de agosto los valores de reflectividad son máximos, lo que indica que la vegetación se encuentra en un momento de máxima actividad y crecimiento.

6 de Septiembre

En el conjunto de forestales puede verse claramente como la vegetación va disminuyendo su actividad, en comparación con la imagen anterior. Ya no aparece la signatura típica de la vegetación, se observa como los valores de reflectancia han disminuido en la banda del verde, lo cual se puede deber a que la vegetación comienza a perder la tonalidad de sus hojas ya que la entrada el otoño se encuentra próxima.

Los valores en el infrarrojo cercano pasan de 0,18 a valores de 0,14 aproximadamente. Destaca, como en otras imágenes, el hayedo que sigue mostrando valores en el infrarrojo superiores, de 0,21, Esto puede indicar que el hayedo tiene una actividad vegetal superior al resto de categorías del grupo de forestales, ya que se han observado valores superiores al resto de categorías en el resto de imágenes.

En comparación con la cubierta de *B. pinnatum*, en esta fecha se diferencia claramente el hayedo en el salto del rojo al infrarrojo, ya que el lastón presenta valores de reflectancia superiores en torno a 0,26.

En cuanto al conjunto de arbustivas *B. pinnatum* es más difícil de diferenciar que en el caso de las especies forestales ya que los valores de reflectancia en el verde y en el rojo son muy similares para todas las categorías. En el infrarrojo se observa alguna diferencia entre el lastón y

especies como *Ulex sp.*, *Buxus sempervirens*, *Crataegus monogyna*, *Genista occidentalis*, *Juniperus communis* y *Rubus sp.* Con valores de reflectancia que van desde 0,17 del bojeral hasta 0,23 del argomal, mientras que el *B. pinnatum* muestra valores de reflectancia de 0,26. Estos pequeños cambios en los valores del infrarrojo pueden permitir diferenciar estas especies arbustivas del lastón. Cabe mencionar el caso de *Cytisus scoparius*, que presenta valores de reflectancia de 0,27, lo cual imposibilita su diferenciación del lastón.

Estos valores, al igual que en la categoría de forestales, dejan ver como la actividad de la vegetación ha disminuido, en comparación con la imagen anterior del 11 de agosto.

En el caso del conjunto de herbáceas ocurre como en el conjunto anterior, la diferenciación entre *B. pinnatum* y el resto de especies solo puede realizarse en la banda del infrarrojo cercano. Todas las categorías poseen valores de reflectancia similares en las bandas del verde y del rojo.

Por lo tanto atendiendo a los resultados obtenidos en la banda del infrarrojo cercano especies como *Agrostis curtisii*, *Festuca ovina* y la categoría de prados y praderas se diferencian en esta banda del lastón. Tienen valores de reflectancia de alrededor de 0,21, mientras que *B. pinnatum* tiene valores en torno a 0,26. En cambio categorías como pastizal de *Poa annua* o de *Festuca rubra* y *Agrostis capillaris* poseen valores de reflectancia similares a *B. pinnatum*, lo cual complica su diferenciación en esta fecha.

El último conjunto es el formado por *Pteridium aquilinum* y la categoría de improductivo o afloramientos rocosos. Se ve como la categoría de improductivo puede diferenciarse del lastón en todas las bandas. Posee valores superiores a *Brachypodium pinnatum* en las bandas del verde y del rojo e inferiores en la banda del infrarrojo cercano. En cambio la masa helechal muestra una signatura espectral similar al lastón lo cual hace muy difícil su diferenciación en esta época del año.

1 de Noviembre

En el conjunto de cubiertas forestales se puede ver cómo han disminuido los valores de reflectancia en las bandas del verde y del rojo, presentando valores inferiores a los de las cubiertas de *B. pinnatum*, por lo que podrían diferenciarse todas las especies excepto *Picea abies*. Se puede apreciar también como el salto de valores de reflectancia entre el rojo y el infrarrojo cercano es cada vez menor.

En el grupo de arbustivas las distintas categorías muestran valores de reflectancia similares para las bandas del verde y del rojo lo que hace difícil su diferenciación del *B. pinnatum*. En cambio en la banda del infrarrojo se pueden ver distintos valores para cada

categoría, siendo los más bajos los valores de *Buxus sempervirens*, *Juniperus communis* y *Crataegus monogyna*. Este grupo de cubiertas presentan valores de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano de alrededor de 0,18, frente a valores de 0,25 propios de *B. pinnatum* en este momento del año. Esto hace que las cubiertas arbustivas se puedan diferenciar en este momento del año de los lastonares.

En cambio las categorías de *Ulex sp*, *Cytisus scoparius*, *Genista occidentalis* y *Rubus sp* poseen valores de reflectancia superiores y más próximos al valor de *Brachypodium pinnatum*, por lo que su diferenciación en esta época del año se complica.

En el caso del conjunto de herbáceas ocurre en esta fecha algo similar a lo que ocurría el nueve de septiembre. Todas las categorías, excepto *Agrostis curtisii*, tienen valores similares en las bandas el verde y del rojo. En cambio en el infrarrojo cercano los valores son más variables por lo que en algunas categorías se pueden diferenciar de *Brachypodium pinnatum*. El grupo formado por *Agrostis curtisi*, *Festuca ovina* y la categoría de prados y praderas, al igual que en la imagen anterior poseen valores en la banda del infrarrojo cercano en torno a 0,19. Mientras que *B. pinnatum* muestra un valor promedio en esta banda de 0,25, lo que hace que se puedan diferenciar entre sí estas categorías.

En cambio el grupo formado por pastos de *Festuca rubra* y *Agrostis capillaris* presenta valores de reflectancia para la banda del infrarrojo muy similares a los que rinde el *B. pinnatum* por lo que su diferenciación, al igual que en la imagen anterior es muy complicada.

En el último conjunto tampoco puede diferenciarse del lastón del helecho, ambas especies tienen la misma signatura espectral. En cambio la categoría de improductivo puede diferenciarse fácilmente ya que posee valores de reflectancia superiores en la banda del verde y del rojo y algo inferiores en la del infrarrojo cercano, por lo que puede distinguirse en cualquiera de las bandas.

24 de Noviembre

En este momento del año las cubiertas forestales se diferencian claramente de *Brachypodium pinnatum* en la banda del infrarrojo cercano. Presentan valores en torno a 0,02, excepto *Picea abies* que tiene un valor de reflectancia superior de 0,04. En la banda del rojo los valores de reflectancia oscilan entre 0,01 el más bajo correspondiente a *Pinus sylvestris* y 0,05 correspondiente a *Picea abies*. En la banda del infrarrojo cercano las categorías de forestales no pueden distinguirse fácilmente entre sí, debido a que tiene valores similares alrededor de 0,11, pero sí pueden diferenciarse claramente del lastón que posee un valor de reflectancia promedio de 0,21,

En el caso del conjunto de arbustivas muestran diferencias con el lastón en la banda del rojo y del infrarrojo cercano mientras que en la banda del verde poseen valores similares. En la banda del rojo los valores oscilan entre los 0,02 de *Buxus sempervirens* y los 0,05 de *Cytisus scoparius* y *Genista occidentalis*, mientras que *Brachypodium pinnatum* tiene un valor algo superior de 0,07. En la banda del infrarrojo los valores van desde el 0,12 de *Buxus sempervirens* a 0,19 de *Ulex sp*, *Genista occidentalis* y *Cytisus scoparius*, mientras que el lastón posee valores de 0,21, Estos últimos son los que mayor dificultad presentan a la hora de diferenciarlos de *Brachypodium pinnatum*.

Atendiendo a las plantas herbáceas ocurre lo mismo que con las arbustivas, la diferenciación de *Brachypodium pinnatum* se puede llevar a cabo en la banda del rojo y del infrarrojo cercano. En la banda del verde el máximo valor corresponde con *Brachypodium pinnatum* (0,07), situando al resto de herbáceas por debajo y permitiendo su diferenciación en esta banda. El valor mínimo es el de *Agrostis curtisii* (0,03) y el máximo el de *Poa annua* (0,05). En la banda el infrarrojo cercano todas las especies, excepto la categoría de prados y praderas, muestran valores de reflectancia distintos al lastón. Destaca como en otras imágenes que el grupo formado por *Agrostis curtisii* y *Festuca ovina* posee valores por debajo de *B. pinnatum*, mientras que el grupo formado por pastos de *Festuca rubra* y *Agrostis capillaris* posee valores por encima de *B. pinnatum*.

En el último conjunto se observa una pequeña diferencia de valores de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano en las categorías de *Pteridium aquilinum* y *B. pinnatum* lo que puede permitir su diferenciación. En el caso del improductivo la diferenciación en esta época se hace algo más complicada que en fechas anteriores pero puede llevarse a cabo en la banda del verde.

Una vez descritos los resultados de las imágenes del satélite Deimos-1 se relizará la descripción de los resultados del satélite Landsat 5, cuyas fechas son: 19 de junio, 5 de julio, 7 de septiembre y 23 de septiembre.

Como se ha descrito en material y métodos las bandas 2, 3 y 4 del satélite Landsat-5 coinciden con las bandas 1 2 y 3 del satélite Deimos-1 correspondientes a las bandas del verde, rojo e infrarrojo cercano. El rango de valores de longitud de onda que toman en cada una de las bandas estos dos satélites no son exactamente similares, por lo que los valores de Landsat- 5 son en promedio algo superiores a los observados para Deimos-1, A continuación se describirán los resultados para las imágenes del satélite Landsat-5.

19 de Junio.

En esta fecha en algunas categorías comienza a verse el espectro típico de la vegetación, con valores de reflectancia en la banda del verde superiores a los de la banda del rojo y valores máximos para la banda del infrarrojo cercano.

En el conjunto de frondosas todas las categorías presentan valores de reflectancia similares a los de *Brachypodium pinnatum* en las bandas del verde y del rojo, por lo que no pueden diferenciarse correctamente entre ellas. En cambio en la banda del infrarrojo cercano se observan disimilitudes muy marcadas. Todas las categorías, excepto el hayedo, pueden diferenciarse del lastón. El hayedo presenta en esta época una signatura espectral similar al *Brachypodium*.

En el caso de las arbustivas, su diferenciación del lastón se hace más complicada que en el grupo de forestales. Es en la banda del infrarrojo cercano donde se pueden diferenciar algunas categorías como *Buxus sepervirens* o *Ulex sp*, con valores de 0,30 y 0,32 respectivamente, ambos situados por debajo de los valores de reflectancia del lastón (0,35); o categorías como *Cytisus scoparius* o *Genista occidentalis* con valores de 0,42 situados por encima.

Atendiendo al conjunto de herbáceas las diferencias de reflectancia entre las distintas categorías en las bandas del verde y del rojo son mínimas. En cambio en la banda del infrarrojo cercano puede verse como *Agrostis curtisii* (0,32) puede diferenciarse de *Brachypodium pinnatum* (0,35). La categoría de prados y praderas también se sitúa por encima del lastón, con un valor promedio de 0,42, lo que permite su diferenciación del lastón.

En el caso del último conjunto la categoría de improductivo se diferencia claramente de *B. pinnatum* con valores superiores en las bandas del verde y del rojo y valores inferiores para la banda del infrarrojo cercano. Es en este momento del año en el que puede diferenciarse la categoría de *Pteridium aquilinum* del lastón, ya que posee valores de reflectancia superiores en la banda del infrarrojo cercano, 0,38 frente a 0,35 para el lastón.

5 de Julio.

En este momento del año puede verse como el salto entre el rojo y el infrarrojo cercano es máximo para todos los conjuntos excepto el de herbáceas que se mantiene similar a la imagen anterior.

En este momento el conjunto de forestales se diferencia claramente de *Brachypodium pinnatum* en la banda del infrarrojo cercano. Todas las categorías excepto el hayedo presentan valores de reflectancia por debajo del valor del lastón (0,35). El haya posee el valor máximo, por encima de *B.pinnatum*, de todo el conjunto.

En el caso del conjunto de arbustivas en esta época del año se pueden distinguir más categorías del lastón que en la imagen anterior. La categoría de *Buxus sempervirens* tiene los valores mínimos del conjunto (0,31). Por encima de los valores de reflectancia de *B. pinnatum* se observan los valores de *Crataegus monogyna* y *Rubus sp* (0,40) y de *Cytisus scoparius* y *Genista occidentalis* (0,44). Las categorías que no se pueden discriminar del lastón son las de *Agrostis curtisii* y *Juniperus communis*.

En el caso de las herbáceas algunas categorías pueden diferenciarse en la banda del rojo y otras en cambio en la del infrarrojo cercano. La categoría de prados y praderas se diferencia del lastón en la banda del rojo pero no en la del infrarrojo cercano. En cambio pastos de *Poa annua* y *Festuca rubra* y *Agrostis capillaris* se diferencian en la banda del infrarrojo cercano, presentando valores superiores a las cubiertas de *Brachypodium pinnatum*. Destaca también en esta banda *Agrostis curtisii* que posee el menor valor de reflectancia permitiendo así su diferenciación con el *B. pinnatum*.

En cuanto al último conjunto la categoría de improductivo se diferencia claramente de *B. pinnatum* en las bandas del verde y del rojo. Destaca que en esta fecha también se puede discriminar las masas de helechal en la banda del infrarrojo cercano, con valores superiores al lastón, 0,42 frente a 0,35.

7 de Septiembre

En los resultados de esta imagen se puede ver como los valores de reflectancia han disminuido en comparación con los de la imagen anterior del 8 de agosto.

En cuanto al conjunto de forestales, las máximas diferencias entre cada una de las categorías y *Brachypodium pinnatum* tienen lugar en la banda del infrarrojo. Destacan la categoría de plantación de *Picea abies* con valores de reflectividad más elevados que *B. pinnatum* en la banda del rojo y la categoría de hayedo, cuya discriminación podría realizarse en la banda del verde.

En la banda del infrarrojo cercano todas las categorías excepto la del hayedo presentan valores distintos a *B. pinnatum*, por lo que su diferenciación en este momento del año podría llevarse a cabo en esta banda. Poseen valores en torno a 0,13 mientras que *B. pinnatum* presenta valores de reflectancia en este momento de 0,24.

En cuanto al conjunto de arbustivas los valores de reflectancia son muy similares en todas las bandas. Destacan las categorías de *Ulex sp* y *Buxus sempervirens* con valores en la banda del infrarrojo cercano por debajo de *B. pinnatum* lo que permitiría su diferenciación. El

resto de categorías, en cambio, presentan valores muy similares al lastón por lo que su discriminación en este momento del año es complicada.

En el grupo de herbáceas ocurre algo muy similar a lo que ocurre en el conjunto de arbustivas, algunas categorías no pueden diferenciarse del lastón debido a que poseen valores de reflectancia muy similares a *B.pinnatum* en todas las bandas. Destaca la categoría de *Agrostis curtisii* y la de prados y praderas. La primera permite una diferenciación de *B. pinnatum* en la banda del infrarrojo cercano ya que presenta valores de reflectancia de alrededor de 0,24 mientras que *B. pinnatum* posee valores de 0,24. La categoría de prados y praderas se diferencia del lastón en la banda del rojo, ya que posee valores de reflectancia superiores 0,11 frente a 0,06.

En el caso del cuarto conjunto la categoría de improductivo, al igual que en las imágenes anteriores, se diferencia claramente de *Brachypodium pinnatum* debido a que presenta valores de reflectancia superiores en la banda del verde y del rojo e inferiores en la del infrarrojo cercano. En cambio la categoría de *Pteridium aquilinum* posee una signatura espectral similar a *B. pinnatum* imposibilitando así su discriminación.

23 de septiembre.

En estos resultados se puede observar como el salto entre la banda del rojo y del infrarrojo comienza a ser cada vez menor.

En el conjunto de frondosas todas las categorías, excepto *Picea abies*, se pueden distinguir del lastón en la banda del verde y del rojo. Presentan valores de reflectancia más bajos que *B. pinnatum*, alrededor de 0,02, frente a 0,05 que presenta el lastón. En la banda del infrarrojo todas las categorías se pueden distinguir entre sí y de *B. pinnatum*, ya que presentan valores por debajo de este.

En cuanto al conjunto de arbustivas las únicas diferencias que pueden observarse son en la banda del infrarrojo cercano. Todas las categorías excepto *Cytisus scoparius* poseen valores de reflectancia por debajo del valor del lastón, lo que permite su diferenciación. Son las categorías de *Rubus sp* y de *Ulex sp* las que presentan valores más próximos al *B. pinnatum*, por lo que su diferenciación puede ser algo más complicada.

En el conjunto de herbáceas es la categoría de *Agrostis curtisii* la que presenta los valores más lejanos de *B. pinnatum*. El resto de categorías poseen valores de reflectancia similares al lastón en las bandas del verde y del rojo por lo que su diferenciación se deberá llevar a cabo en la banda del infrarrojo cercano. En esta banda las categorías de prados y praderas y pastizal de *Festuca ovina* de poseen valores por debajo de los del lastón, mientras

que pastizal de *Festuca rubra* y *Agrostis capillaris* se sitúa por encima. La categoría de *Poa annua* es la más complicada de discriminar debido a que presenta valores similares a *B. pinnatum*.

En el último conjunto la categoría de improductivo se diferencia al igual que la imagen anterior en la banda del verde y del rojo. En cambio el helechal posee en este momento una signatura espectral similar a *B. pinnatum* por lo que su discriminación es muy complicada.

## Índice de separabilidad

Las tablas siguientes representan el índice de separabilidad para cada categoría en cada una de las bandas y cada una de las fechas, para los dos satélites Deimos 1 y Landsat-5. En líneas generales se puede ver como los índices de separabilidad son máximos entre el grupo de forestales y *Brachypodium pinnatum* y mínimos en la categoría de helechal. También se observa que las diferencias entre todas las categorías y *B. pinnatum* son más acusadas al inicio del estudio de las imágenes (abril) que al final (noviembre).

A continuación se detallarán los resultados obtenidos al calcular el índice de separabilidad diferenciando entre los distintos satélites (Deimos o Landsat), las distintas categorías (forestales, arbustivas, herbáceas y otros) y las distintas bandas (verde, rojo e infrarrojo cercano).

### Deimos-1

La categoría de forestales presenta las mayores diferencias con *B.pinnatum* en la banda del verde, donde se observan los valores máximos para el índice de separabilidad. En todas las categorías existe la misma tendencia, el mes de abril presentan una separabilidad muy alta que va descendiendo medida que va avanzando el tiempo hasta el mes de agosto. Es en agosto donde se observa como los valores de este índice vuelven a aumentar excepto en la categoría de *Picea abies*. A partir de este mes el valor del índice va disminuyendo lentamente hasta el mes de noviembre.

La categoría de *Pinus sylvestris* es la que presenta una diferencia mayor con *B. pinnatum* seguida de *Larix sp* y *Fagus sylvatica*. Destaca en este conjunto la categoría de *Picea abies* la cual presenta mayores similitudes (menor índice de separabilidad) con *Brachypodium pinnatum* que el resto de categorías.

En la banda del rojo las diferencias entre *Brachypodium* y el resto de categorías son menores. Presentan la misma tendencia que para la banda del verde es decir, los valores son bajos en el mes de abril y van creciendo hasta el mes de agosto, a partir de aquí comienzan a disminuir en los meses siguientes.

En la banda del infrarrojo cercano los valores promedio más elevados del índice son para la categoría de *Larix sp*, seguido de *Pinus sylvestris*, *Picea abies* y *Fagus sylvatica*. La categoría de *Fagus sylvatica* presenta valores del índice de separabilidad elevados al inicio del estudio.

Tabla 4. Índice de separabilidad para las bandas del verde rojo e infrarrojo cercano, de las distintas imágenes tomadas con el satélite Deimos 1 a lo largo del año 2011.

DEIMOS 1	GREEN						RED						NIR					
	6-abr.	17-may.	11-ago.	6-sep.	1-nov.	24-nov.	6-abr.	17-may.	11-ago.	6-sep.	1-nov.	24-nov.	6-abr.	17-may.	11-ago.	6-sep.	1-nov.	24-nov.
F.s	5,42	3,58	7,08	4,88	4,97	2,46	4,95	4,90	6,89	5,64	6,10	2,50	5,02	0,86	0,79	3,18	1,16	2,34
P.L.k	7,15	6,08	9,07	8,78	7,92	2,40	7,21	4,00	7,10	8,78	7,62	2,79	9,01	5,03	7,40	2,05	5,75	2,64
P.P.a	1,69	0,06	0,58	0,70	0,50	0,37	1,46	0,74	0,32	0,12	0,18	0,47	4,37	3,37	4,01	1,98	2,92	1,86
P.P.s	10,51	7,42	11,04	7,09	6,53	3,53	10,56	3,60	8,28	6,42	6,73	4,08	3,96	5,57	9,80	3,11	5,20	1,72
Arg	3,36	0,51	2,30	1,91	1,99	1,23	3,84	0,88	0,66	1,62	1,68	2,00	1,38	2,74	3,86	2,51	1,38	0,57
B.s	2,94	0,18	0,59	0,53	0,87	1,53	3,80	0,00	0,39	0,04	0,47	2,32	0,75	0,89	3,59	3,03	2,81	1,61
C.m	4,43	1,33	2,73	2,20	2,82	1,82	4,93	1,30	1,63	1,85	2,07	2,22	0,75	0,18	1,40	0,31	2,15	1,58
C.s	2,17	0,31	1,17	1,02	0,51	0,74	1,98	0,93	0,43	0,74	0,44	1,04	0,22	1,82	0,21	1,93	0,29	0,39
G.o	4,40	1,32	3,02	2,42	1,54	0,73	4,89	0,73	1,02	0,99	0,01	1,19	1,22	0,04	1,65	1,34	1,45	0,55
Jn	4,17	0,87	1,68	0,25	1,26	1,17	4,96	0,52	0,40	0,02	0,58	1,80	0,87	0,27	3,18	0,05	2,35	0,87
R	4,26	1,03	3,74	2,64	2,49	1,44	4,74	0,77	2,23	2,15	1,85	1,84	1,82	0,28	0,74	1,76	1,21	1,36
A.c	3,18	1,94	4,36	3,08	3,78	2,45	3,28	0,43	1,42	2,46	2,74	2,71	1,62	3,54	4,07	1,44	2,42	1,88
F.o	2,01	0,21	0,34	0,05	0,12	0,70	2,77	0,04	0,38	0,51	0,25	1,58	0,39	0,64	2,58	0,28	1,67	0,75
F.r y A.c	3,42	2,59	0,43	0,23	0,19	0,30	4,58	2,40	0,53	0,78	0,60	0,31	4,73	2,96	0,11	6,44	0,22	0,35
P.a	2,89	1,08	11,18	0,01	0,25	0,27	3,46	0,79	0,97	0,10	0,16	1,21	2,06	1,48	0,36	6,48	0,33	0,61
P	5,59	2,14	3,28	1,37	0,60	0,55	6,28	3,58	2,12	0,46	0,44	1,63	2,38	3,86	0,82	0,08	2,37	0,22
Imp	0,61	2,73	2,38	2,68	2,30	0,91	0,11	2,75	2,90	3,25	2,30	0,35	0,22	2,02	3,74	1,92	1,08	0,30
Pte	0,30	0,06	1,89	0,94	0,93	0,06	0,32	0,70	0,63	0,83	0,18	0,37	0,03	1,01	0,14	1,27	0,33	0,28

Tabla 5. Índice de separabilidad para las bandas del verde rojo e infrarrojo cercano, de las distintas imágenes tomadas con el satélite Landsat-5 a lo largo del año 2011.

LANDSAT-5	GREEN				RED				NIR			
	19-jun.	5-jul.	7-sep.	23-sep.	19-jun.	5-jul.	7-sep.	23-sep.	19-jun.	5-jul.	7-sep.	23-sep.
F.s	2,46	1,85	2,75	2,42	2,62	2,52	3,29	2,78	0,53	0,67	0,09	0,28
P.L.k	5,30	3,95	5,35	2,68	3,41	3,31	4,63	2,69	5,51	3,41	5,42	1,24
P.P.a	0,12	0,19	0,03	0,14	0,53	0,67	0,60	0,16	1,38	1,27	2,82	0,81
P.P.s	5,69	4,02	4,04	2,89	3,92	2,96	2,60	2,97	3,78	3,65	5,13	1,72
Arg	1,10	1,74	0,57	0,39	2,82	3,95	2,54	0,33	0,95	0,33	1,77	0,25
B.s	0,43	0,54	0,29	0,11	0,86	1,35	1,03	0,18	0,99	1,07	2,39	0,96
C.m	0,34	0,26	0,91	0,86	0,10	0,02	0,37	0,82	0,51	0,75	0,15	0,52
C.s	0,92	0,95	0,29	0,39	0,61	0,86	0,44	0,49	0,75	0,51	0,09	0,35
G.o	0,06	0,11	1,36	0,37	0,50	0,24	0,99	0,09	1,53	1,31	0,37	0,56
Jn	1,11	0,97	0,48	0,60	0,68	0,30	0,01	0,28	0,16	0,18	0,18	0,95
R	0,85	0,59	1,81	1,09	0,71	0,22	1,26	1,06	0,83	1,10	0,20	0,22
A.c	1,24	0,55	1,53	1,78	0,81	1,13	0,06	1,46	1,15	0,60	1,33	0,88
F.o	1,12	1,09	0,95	0,03	1,39	1,64	1,72	0,37	1,00	0,46	0,63	0,77
F.o y A.c	1,05	1,10	0,51	0,45	1,58	1,64	1,01	0,58	1,53	1,41	0,00	0,42
P.a	0,60	1,63	0,57	0,17	1,35	2,76	1,92	0,03	1,36	1,41	0,14	0,11
P	0,60	1,02	0,81	0,34	0,71	1,16	1,05	0,15	0,94	0,06	0,92	0,35
Imp	2,62	3,10	2,69	1,77	2,93	3,54	3,08	1,88	1,07	0,15	1,35	0,11
Pte	0,57	0,44	0,22	0,30	0,44	0,52	0,07	0,01	0,69	0,94	0,25	0,08

Leyenda	
	0-1 Separabilidad baja
	1-3,5 Separabilidad media
	3,5 a 5 Separabilidad alta
	> 5 Separabilidad muy alta

Tras alcanzar el mes de mayo y agosto los valores se mantienen entre 0,80 y 0,9, lo que indica que la reflectancia medida en ese momento es similar a la medida en *B. pinnatum*. Esta misma categoría presenta un pico en septiembre, donde las diferencias entre la reflectividad de las dos categorías es más acusada y continua disminuyendo en el mes de noviembre.

En la categoría de *Larix sp* se observa como los valores para el índice de separabilidad son más elevados, presentando dos picos en los meses de abril y agosto. En mayo y noviembre se mantienen elevados en torno a 5 y en el mes de septiembre y finales de noviembre muestran valores mínimos, por lo que la mayor similitud entre estas dos cubiertas es en estas dos fechas.

En cuanto a la categoría de *Picea abies* se observan dos valores medios en abril y agosto en torno a 4, mientras que en el resto de fechas se mantienen bajos, lo que indica que esta categoría en ese momento presenta una reflectancia parecida a la de *B. pinnatum*.

Por último en el caso de *Pinus sylvestris* se observan valores del índice de separabilidad elevados en los meses de mayo, agosto y noviembre, al igual que ocurre con *Larix sp* y valores bajos para los meses de septiembre y noviembre.

En el caso del conjunto de arbustivas los valores del índice de separabilidad se mantienen bajos en las tres bandas con algunas excepciones en alguna categoría y/o fecha concreta en las que se observan valores medios, pero nunca valores altos. Esto indica que estas especies presentan una reflectancia parecida a la que presenta *B.pinnatum*.

En la banda del verde se puede ver como todas las categorías presentan por lo general índices bajos a excepción del mes de abril. En las categorías de *Crataegus monogyna*, *Genista occidentalis*, *Juniperus communis* y *Rubus sp* se pueden ver valores del índice altos en el mes de abril. Destaca la categoría de *Rubus sp* con un índice alto en el mes de agosto aunque supera el límite de 3,5 en 0,24 puntos.

En la banda del rojo ocurre al igual que en la del verde, se ven valores del índice de separabilidad bajos, como norma general. Es en la fecha del mes de abril donde los valores del índice son algo más elevados para todas las categorías excepto *Cytisus scoparius*. Esto determina que la discriminación de las categorías que forman el grupo de arbustivas no puede realizarse en la banda del rojo ya que las diferencias que presenta este grupo con *B.pinnatum* son bajas.

En cuanto a la banda del infrarrojo los valores en este índice se mantienen bajos a lo largo de la época de estudio. A excepción del 11 de agosto donde las categorías de *Ulex sp* y *Buxus sempervirens* presentan valores altos de 3,86 y 3,59 respectivamente.

Como se ha observado en la representación gráfica en el apartado anterior la categoría de arbustivas no presentaba grandes diferencias en cuanto a signatura espectral con *Brachypodium pinnatum*, pero se ha visto que es en la banda del infrarrojo cercano en la que mejor se puede realizar la discriminación entre estas plantas.

En cuanto al grupo de herbáceas los valores del índice de separabilidad se encuentran bajos por norma general entre 0 y 1, con algunas excepciones en algunos grupos y en algunas fechas.

En la banda del verde los valores más bajos se observan en los meses de septiembre y noviembre para la mayoría de las categorías a excepción de *Agrostis curtisii*. Se puede ver en las fechas de mayo a septiembre como cada vez son más las categorías que presentan índices bajos. En mayo se encuentra *Festuca ovina*, en agosto se mantiene la anterior y se incluye *Festuca rubra* y *Agrostis capillaris* y ya en septiembre pueden ver las categorías anteriores y *Poa annua*. Es en este momento donde las disimilitudes entre *B. pinnatum* y estas categorías son mínimas. Destaca la categoría de prados y praderas que en esta banda son las que poseen mayores índices de separabilidad en las distintas fechas. Para *Agrostis curtisii* la fecha en la que mayor diferencia presenta con *B. pinnatum* es en agosto y noviembre mientras que para *Poa annua* es en abril. Destaca también el caso de *Poa annua* con un índice de separabilidad muy elevado en la fecha del mes de agosto.

En cuanto a la banda del rojo los valores se mantienen bajos, más bajos si cabe que para la banda del verde, por lo que la discriminación en esta banda es casi nula. Se podría intentar realizar en el mes de abril y el mes de noviembre donde los valores del índice de separabilidad son medios y en algunos casos altos (la categoría de *Festuca rubra* y *Agrostis capillaris* y de prados y praderas). En esta banda también destaca *Agrostis curtisii* con valores del índice medios en todas las fechas a excepción de mayo, por lo que se podría determinar que es la cubierta herbácea que mayor diferencia posee con las de *B. pinnatum*.

En la banda del infrarrojo cercano los valores del índice de separabilidad son algo más elevados de lo que son en la banda del rojo, por lo que esta banda podría ser óptima para llevar a cabo la discriminación con *B. pinnatum*. Puede verse como *Agrostis curtisii* posee valores medios y altos a lo largo del tiempo en el que se han tomado las imágenes, se trata así de la comunidad herbácea que mayores disimilitudes presenta con *B. pinnatum* en todas las bandas estudiadas.

La cubierta de *Festuca ovina* es, por el contrario, la herbácea que mayor similitud presenta con *B. pinnatum* en todas las bandas. En el caso de las categorías de *Festuca rubra* y *Agrostis capillaris* y *Poa annua* se pueden ver valores altos en la fecha del 6 de septiembre. En

cambio la categoría de prados y praderas muestra valores bajos durante todo el estudio excepto en el mes de mayo. Esta planta junto con *Festuca ovina*, es la que mayor similitud presenta con *B.pinnatum*.

El cuarto conjunto es el formado por la categoría de improductivo y de helechal. En la banda del verde y rojo la categoría de improductivo presenta valores del índice de separabilidad medios en todas las fechas excepto en abril y finales de noviembre. En la banda del infrarrojo las diferencias con *B.pinnatum* son más acusadas en los meses de agosto, septiembre e inicios de noviembre.

La categoría de helechal, de todas las estudiadas, es la que mayor similitud presenta con *B. pinnatum*. Posee valores bajos en todas las fechas para las bandas del verde y del rojo. Es en la banda del infrarrojo en el mes de septiembre donde aparece un valor medio por lo que serán este mes y esta banda los óptimos para llevar a cabo la discriminación entre estas dos categorías.

### **Landsat-5**

En el caso de las imágenes obtenidas del satélite Landsat-5, los valores del índice de separabilidad son más bajos que los obtenidos para Deimos-1, No obstante la tendencia observada en las imágenes obtenidas de Deimos es similar a la que puede verse en Landsat.

En este caso el conjunto de frondosas es como en Deimos el que mayor diferencias presenta con *B. pinnatum*. Las mayores diferencias se observan en la banda del infrarrojo cercano por lo que la discriminación entre estas cubiertas se podrá llevar a cabo en ella.

En la banda del verde y del rojo es la categoría de *Picea abies* la que menores disimilitudes presenta con *B. pinnatum*, al igual que lo observado para las imágenes Deimos. Destaca la categoría de *Fagus sylvatica* que en la categoría del infrarrojo cercano presenta valores bajos. En cambio en Deimos presentaba valores bajos para los meses de mayo y agosto, lo cual se corresponde con que presente valores bajos en los meses de junio y julio en Landsat. En cambio en el mes de septiembre en la imagen Deimos presenta valores medios mientras que en la Landsat presenta los valores más bajos.

En cuanto al conjunto de arbustivas los valores del índice de separabilidad por lo general se mantienen bajos en todas las fechas y en todas las bandas, al igual que ocurría por norma general en las imágenes Deimos. Destaca el caso de *Ulex sp* que es la categoría que presenta valores más altos para este índice en las bandas del verde y del rojo al igual que en las imágenes Deimos. En cambio la categoría de *Crataegus monogyna* presentaba valores medios en para estas dos bandas en las imágenes Deimos y en las Landsat los valores son algo más bajos por lo que entran en la categoría de separabilidad baja. De esta forma serán las imágenes Deimos las óptimas para discriminar el *B. pinnatum* de esta categoría arbustiva.

En el conjunto de herbáceas los valores de este índice para las imágenes Landsat se mantienen relativamente bajos para todas las bandas, al igual que ocurría en Deimos. Las mayores diferencias para todas las categorías son en los meses de junio y julio. Mientras que en septiembre los valores del índice son algo más bajos por lo que la discriminación entre estas categorías y *B. pinnatum* es más complicada.

En cuanto al último conjunto formado por la categoría de improductivo y helechal se observa como la primera presenta diferencias marcadas en todas las fechas y todas las bandas con *B. pinnatum*, por lo que su diferenciación puede realizarse correctamente. Por el contrario la categoría de *Pteridium aquilinum* posee valores del índice bajos. Es en la banda del infrarrojo donde los valores pueden ser algo más altos, por lo que la discriminación entre estas dos categorías pese a ser complicada, se llevará a cabo en esta banda.

## DISCUSIÓN

En general, tanto con los resultados obtenidos representando gráficamente las reflectancias como con los resultados obtenidos del índice de separabilidad es posible distinguir las comunidades de *B. pinnatum* del resto de cubiertas estudiadas.

La interacción entre la radiación incidente y los elementos propios de la vegetación se describen mediante la absorción, la reflexión y la transmisión. La reflectancia de la vegetación depende de las propiedades radiactivas de las hojas, de otros elementos no fotosintéticos que forman parte de la vegetación y de su organización espacial (Homolová et al, 2013). Las bandas estudiadas comprenden el visible (banda del verde y del rojo) y el infrarrojo cercano. La vegetación posee ciertos rasgos y características que hacen que presente una respuesta propia en cada una de estas bandas. Destacan los componentes de la hoja como la celulosa de las paredes celulares, el contenido de agua y de solutos, los espacios intercelulares y los pigmentos. Estos pigmentos, que generalmente se encuentran en los cloroplastos, son clorofilas (65%), carotenos (6%), y xantofilas. Generalmente todos los pigmentos absorben en la región del azul, mientras que solamente la clorofila lo hace en la banda del rojo, mientras que en la banda del verde la absorción es menor, permitiendo que los vegetales tengan este color característico (Gates et al, 1965). En el caso del infrarrojo cercano la reflectividad de las hojas varía en función de su estructura celular (González y Calera, 2000; Paz et al, 2005).

El conjunto de las forestales es el grupo en el que se han observado las mayores diferencias con *B. pinnatum*. Las máximas diferencias se han visto en todas las bandas en el mes de agosto y generalmente los valores de reflectancia obtenidos se encuentran por debajo de *B. pinnatum*. Destaca el salto entre el rojo y el infrarrojo en la cubierta de *B. pinnatum* superior al existente en las cubiertas forestales, lo cual puede indicar un mayor vigor de la herbácea frente al grupo de forestales. Aunque cabe destacar que se está comparando una cubierta arbórea con una cubierta herbácea, cuyos modos de crecimiento son completamente distintos, por lo que su comportamiento espectral también puede serlo.

En el grupo de forestales cabe mencionar también que la arquitectura de la hoja es muy importante a la hora de valorar la reflectancia de unos árboles u otros (ver figura 5). Muchas coníferas a diferencia de las frondosas presentan las hojas en forma de acículas, cuya geometría cilíndrica hace que el ángulo de incidencia cambie, lo que puede disminuir la superficie efectiva de absorción de la hoja (Ollinger, 2011). Esto puede explicar que en la categoría de forestales las coníferas (*Pinus sylvestris* y *Picea abies*) presenten en algunos momentos, reflectancias mayores y más próximas al espectro de *B. pinnatum*.

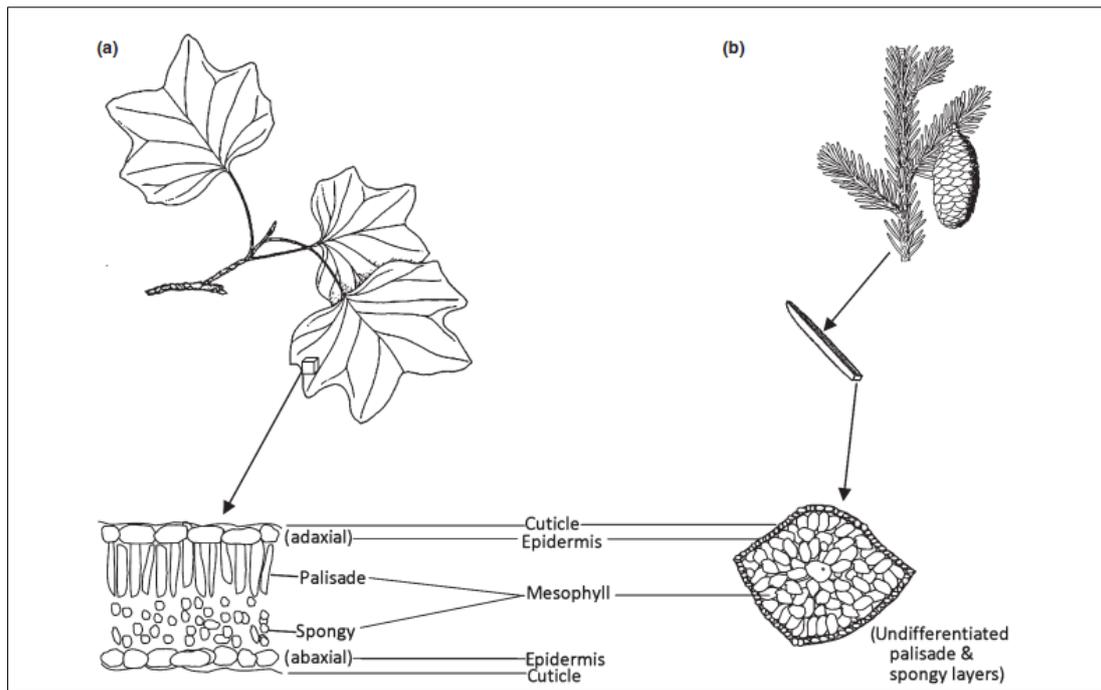


Figura 5. Representación esquemática de dos tipos de hojas con estructura laminar (a) y acicular (b). Fuente: (Ollinger, 2011)

En el caso de la categoría de arbustivas se observan valores de reflectancia entre la banda del rojo y del infrarrojo más altos para *B. pinnatum* en el mes de abril que para estas otras categorías, lo que sugiere una mayor actividad de las cubiertas de lastón. Estas diferencias en las bandas del rojo y del verde desaparecen en el resto de meses a excepción de noviembre, por lo que las diferencias en este conjunto de plantas se deben determinar en la banda del infrarrojo cercano.

Entre el grupo de arbustivas destacan las categorías de *Buxus sempervirens* y *Juniperus communis*, las cuales muestran los valores más bajos en la banda del infrarrojo cercano, y la categoría de *Cytisus scoparius* que presenta los valores de reflectancia más altos en esta misma banda.

Se observa a lo largo del tiempo como va disminuyendo tanto en arbustivas como en herbáceas los valores de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano. Esto puede deberse a la forma y tamaño de las células del mesófilo. En el momento en que se inicia el ciclo vegetativo las plantas presentan hojas jóvenes con un parénquima primario esponjoso, con gran número de espacios intercelulares. Este hecho favorece el mecanismo de la reflexión, por ello los valores de reflectancia en el NIR son elevados al inicio del estudio. A medida que la hoja madura, las células aumentan su tamaño y comienzan a agolparse, reduciendo así la reflectancia (Gates et al, 1965)

En el caso del grupo de herbáceas cada una de las categorías se comporta de forma diferente a lo largo del tiempo pero en todas ellas la discriminación con *B. pinnatum* se debe realizar en el infrarrojo cercano. Debido a que todas presentan una signatura espectral característica se describirán por separado.

En el caso de pasto de *Agrostis curtisii* y *Festuca ovina* los valores de reflectancia no superan los de *B. pinnatum* en ningún momento. En el caso de *A. curtisii* esto puede deberse a que se trata de una especie de hoja estrecha, glauca, con coloraciones verde azuladas mientras que *B. pinnatum* es una planta de hoja más ancha con coloraciones verde claro por ello su reflectancia puede ser diferente (herbarivirtual.uib.es). En el caso de *Festuca ovina*, los valores de reflectancia se pueden ver alterados debido a que crece sobre afloramientos calizos, en zonas donde existe una cubierta vegetal poco densa y con una elevada presencia de afloramientos rocosos (Ferrer y Canals, 2008). Esto puede interferir a la hora de evaluar la reflectancia de esta especie.

La categoría de pastos de *Festuca rubra* y *Agrostis capillaris* y la categoría de *Poa annua*, presentan por lo general valores de reflectancia superiores a los de *B. pinnatum*. Son pastos que no presentan una parada vegetativa estival, por lo que su producción se mantiene elevada desde primavera hasta otoño (Ferrer & Canals, 2008), lo cual corresponde con los niveles elevados de reflectancia que presenta en la banda del infrarrojo cercano. Además son pastos de buena calidad y se pueden pastar de forma regular por lo que la acumulación de necromasa es baja o nula. En cambio los pastos de *B. pinnatum* son de calidad media-baja para el ganado, con una eficiencia de pastoreo baja, por lo que frecuentemente se puede acumular necromasa en el suelo, disminuyendo así la reflectancia general de esta categoría. Al final del ciclo se produce una disminución de la actividad fotosintética lo que trae consigo una menor absorción de los pigmentos clorofílicos (González et al, 1999), generando una disminución de la reflectividad en ese momento.

Por último la categoría de prados y praderas presenta los valores más elevados de todo el conjunto en la banda del infrarrojo hasta septiembre, donde caen a los niveles de *Agrostis curtisii* y *Festuca ovina*. Esto es debido a que es la categoría más productiva de la zona, son pastos de buena calidad y productividad constante, que embastecen en menor proporción con la llegada del verano debido a que son pastados y/o segados, y cuya época de máximo crecimiento tiene lugar desde primavera hasta finales del verano (Ferrer y Canals, 2008). Lo cual se corresponde con la caída de valores de reflectancia en la banda del infrarrojo en los meses de septiembre y noviembre.

En cuanto al último conjunto la categoría de improductivo se diferencia claramente del *B. pinnatum* debido a que es una zona de afloramientos rocosos en la que apenas existe

vegetación por lo que la signatura espectral es completamente diferente. La categoría de helechal constituida por *Pteridium aquilinum*, es la que mayores similitudes presenta con *B. pinnatum*, esto es debido a que con frecuencia crecen en las mismas zonas. Por ello existen momentos al inicio de la primavera en los que las frondes de helecho no han comenzado a desarrollarse y el espectro que se obtiene es el del lastón que crece en el lugar.

El lastón presenta un crecimiento distinto al helecho, este comienza a desarrollar sus frondes en el mes de junio mientras que *B. pinnatum* inicia su crecimiento antes. En teoría el momento óptimo para discriminar el lastón del helecho sería el otoño, los meses de octubre y noviembre. Esto es debido a que es la época del año donde mayores diferencias físicas presentan estas dos comunidades, las frondes del helecho adquieren coloraciones rojizas mientras que el lastón posee coloraciones en tonos ocre y marrón. Las mayores diferencias se han observado con el satélite Landsat en los meses de junio y julio. Estas imágenes Landsat sufrieron un mayor tratamiento previo que las Deimos, por lo que estas diferencias que se observan en los meses de verano pueden estar artefactadas ya que no es el resultado esperado debido a que en esos meses el lastón y el helecho presentan coloraciones muy similares, por lo que las diferencias entre ellos tendrían que ser mínimas.

Cabe destacar que en estudios anteriores (Giang, 2013) tampoco se observaron diferencias entre el lastón y el helecho en las bandas del visible y del infrarrojo cercano de una imagen Aster tomada en mayo. Aunque por otro lado sí se pudieron discriminar estas dos categorías en las bandas del infrarrojo medio de esta misma imagen Aster. Por lo tanto para estudios futuros para diferenciar estas dos categorías sería necesario tener en cuenta estas bandas del infrarrojo medio.

Para finalizar ambos satélites tanto Landsat como Deimos han proporcionado resultados muy similares. A la hora de decantarse por uno u otro para realizar estudios de este tipo se deben tener en cuenta varias singularidades de cada uno de ellos. En el caso de Landsat el tratamiento de imágenes es más laborioso ya que las imágenes obtenidas se encuentran georreferenciadas pero esta corrección no es precisa en el área de estudio, lo cual puede deberse a la altitud de la zona. Por lo tanto estas imágenes deben sufrir un mayor tratamiento inicial lo que puede influir a la hora de obtener los resultados. Además el programa Envi no reconoce las imágenes como imágenes Landsat por lo que el tratamiento inicial se debe realizar aplicando los algoritmos directamente (ver material y métodos), siendo esto una tarea muy costosa. Para futuros tratamientos de imagen Landsat se podría utilizar el programa Erdas. Por el contrario las imágenes Landsat poseen 7 bandas, en este trabajo se han estudiado las tres bandas del visible y una del infrarrojo cercano pero también sería interesante utilizar las bandas del infrarrojo medio para discriminar ciertas categorías como es el caso del helecho o algunas herbáceas.

Las imágenes Deimos en cambio se han obtenido ya georreferenciadas con un procesamiento óptimo para la zona de estudio por lo que no ha sido necesario llevar a cabo esta tarea, pudiendo conseguir así una menor influencia en los resultados obtenidos y también destinando un menor tiempo a realizar esta corrección. En cambio las imágenes de este satélite poseen tres bandas, dos en el visible y una banda en el infrarrojo cercano. Para discriminar algunas categorías puede no ser suficiente este tipo de bandas y sería interesante disponer de una banda en el infrarrojo cercano.

## CONCLUSIONES

1 Todas las categorías que se estudiaron en este trabajo se pueden distinguir de las cubiertas de *Brachypodium pinnatum* en algún momento y una banda concreta a lo largo del año. Las categorías de forestales y arbustivas presentan diferencias máximas en el mes de abril y al final de la estación en noviembre. En el grupo de herbáceas esta diferencia es máxima en el mes de abril, aunque también se pueden discriminar la mayor parte de las categorías en la banda del infrarrojo en todo el periodo de tiempo. La categoría de improductivo se diferencia claramente en cualquier momento. Para futuros estudios en esta zona no será necesario llevar a cabo un trabajo cronológico debido a que ya se conocen los meses exactos donde se observan las mayores diferencias entre categorías.

2 La categoría de *Pteridium aquilinum* es la que peor se diferencia de *B.pinnatum*. La mayor discriminación se ha visto con las imágenes de Landsat-5 en los meses de junio y julio, lo cual puede deberse al tratamiento previo que sufrieron las imágenes y no a cambios de reflectancia en la cubierta vegetal. Para futuros estudios sería necesario incluir otras bandas como las del infrarrojo medio para afinar la discriminación de este tipo de vegetal.

3 La mayor parte de las categorías presentan diferencias significativas con *B.pinnatum* en la banda del infrarrojo cercano en algún momento del año, por lo tanto para posteriores trabajos será necesario incluir el estudio de esta banda.

4 Los satélites Deimos-1 y Landsat-5 presentan características similares pero no exactas por lo que los resultados obtenidos pueden variar. A la hora de realizar la elección de un satélite u otro se debe tener en cuenta que Deimos proporciona imágenes ortorrectificadas de forma correcta, mientras que las imágenes Landsat deben corregirse, lo cual puede resultar costoso tanto en tiempo como en dinero. En cambio el satélite Deimos proporciona información acerca de tres bandas, verde, rojo e infrarrojo cercano lo cual puede ser insuficiente para determinar diferencias entre ciertas categorías como son el caso del helecho y del lastón. Landsat por otro lado presenta las bandas del infrarrojo medio e incluye una banda en el térmico, lo cual proporciona un mayor abanico de datos de la cubierta vegetal y las discriminaciones pueden ser más acertadas.

Para finalizar hay que destacar que el uso de la teledetección para llevar a cabo este tipo de trabajo es algo novedoso y rentable en áreas extensas de difícil accesibilidad. Por otro lado presenta limitaciones en zonas de alta montaña a la hora de la obtención de imágenes como son la nieve, la niebla y las nubes. Además siempre debe ir acompañado de un trabajo de campo previo para conocer el lugar de forma concreta.

## BIBLIOGRAFÍA

### Artículos

- Canals, R.-M., Pedro, J., Rupérez, E., & San-Emeterio, L. (2014). Nutrient pulses after prescribed winter fires and preferential patterns of N uptake may contribute to the expansion of *Brachypodium pinnatum* (L.) Beauv. in highland grasslands. *Applied Vegetation Science*, 17, 419-428.
- Chuvieco, E., & Hantson, S. (2010). Plan Nacional de Teledetección de Media Resolución. Procesamiento estándar de imágenes Landsat. Documento técnico de algoritmos a aplicar. Versión 1, *Ministerio de Fomento, Gobierno de España*.
- Davis, M. A., Philip Grime, J., & Thompson, K. (2000). Fluctuating resources in plant communities: a general theory of invasibility. *Journal of ecology*, 88, 528-534.
- Ferrer, V. y Canals, R.M. 2008. Proyecto de ordenación de los recursos pasícolas forestales del Monte Aezkoa no 1 del C.U.P Documento inédito. Gobierno de Navarra. Pamplona.
- Gates, D. M., Keegan, H. J., Schleter, C., & Widner, V. R. (1965). Spectral properties of plants. *Applied optics*, 4(1), 11-20,
- Gilabert, M. A., Gonzalez-Piqueras, J., & García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, 8, 10,
- González-Ochoa, A. I., & Calera Belmonte, A. (2000). Evolución de la respuesta espectral e índices de vegetación en masas de Pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill). En la zona oriental de Castilla la Mancha. *Cuadernos de la sociedad española de Ciencias Forestales*, 10, 91-96.
- González, A. I., Calera, A., & Quintanilla, A. Separabilidad y evolución multitemporal de la respuesta espectral e índices de vegetación en masas forestales mediterráneas. *TELEDETECCIÓN. Avances y aplicaciones. VIII Congreso Nacional de Teledetección, 1999*, 84-87.
- Hantson, S., Chuvieco, E., Pons, X., Domingo, C., Cea, C., Moré, G., Tejeiro, J. A. (2011). Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección. *Revista de Teledetección*, 36, 51-61,
- Homolová, L., Malenovský, Z., Clevers, J. G. P. W., García-Santos, G., & Schaepman, M. E. (2013). Review of optical-based remote sensing for plant trait mapping. *Ecological Complexity*, 15, 1-16. doi: 10.1016/j.ecocom.2013.06.003
- Hunt, Raymond, E., Jr., J. H. Everitt, J. C. Ritchie, M. Susan Moran, D. Terrance Booth, G. L. Anderson, P. E. Clark and M. S. Seyfried (2003). "Applications and Research Using Remote Sensing for Rangeland Management." *Photogrammetric Engineering & Remote sensing* 69(6): 675-693.

- Karnieli, A., Bayarjargal, Y., Bayasgalan, M., Mandakh, B., Dugarjav, C., Burgheimer, J., Gunin, P. D. (2013). Do vegetation indices provide a reliable indication of vegetation degradation? A case study in the Mongolian pastures. *International Journal of Remote Sensing*, 34(17), 6243-6262. doi: 10.1080/01431161,2013.793865
- Müllerová, J., Pergl, J., & Pyšek, P. (2013). Remote sensing as a tool for monitoring plant invasions: Testing the effects of data resolution and image classification approach on the detection of a model plant species *Heracleum mantegazzianum* (giant hogweed). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 25, 55-65. doi: 10.1016/j.jag.2013.03.004
- Ollinger, S. V. (2011). Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. *New Phytol*, 189(2), 375-394. doi: 10.1111/j.1469-8137.2010.03536.x
- Paz-Pellat, F., Palacios-Vélez, E., Mejía-Sáenz, E., Martínez-Menes, E., & Palacios-Sánchez, L. A. (2005). Analisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *ENSAYO en agrociencia*, 39, 293-301,
- Svoray, T., Perevolotsky, A., & Atkinson, P. M. (2013). Ecological sustainability in rangelands: the contribution of remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 34(17), 6216-6242. doi: 10.1080/01431161,2013.793867
- Teillet, P. M., Guindon, B., & Goodenough, D. G. (1982). On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8(2), 85-106.
- Giang Tuan Linh. Trabajo de fin de master *Remote sensing for establishing the quantitative expansion of brachypodium pinnatum in commons of western pyrenees*. Universidad de Navarra: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Pamplona, 2013

## **Páginas Web**

[www.bioxeo.com/curioso/diaano.htm](http://www.bioxeo.com/curioso/diaano.htm)

[www.cfnavarra.es/agricultura/informacion\\_agraria/MapaCultivos/htm/sp\\_brachypodium\\_pinnatum.htm](http://www.cfnavarra.es/agricultura/informacion_agraria/MapaCultivos/htm/sp_brachypodium_pinnatum.htm)

[www.deimos-imaging.com/extcat2/](http://www.deimos-imaging.com/extcat2/)

[www.deimos-imaging.com/tecnologia/nociones-teledeteccion](http://www.deimos-imaging.com/tecnologia/nociones-teledeteccion)

[www.exelisvis.com/Learn/Resources/Tutorials.aspx](http://www.exelisvis.com/Learn/Resources/Tutorials.aspx)

[www.glovis.usgs.gov/](http://www.glovis.usgs.gov/)

[www.herbarivirtual.uib.es/cas-med/especie/4246.html](http://www.herbarivirtual.uib.es/cas-med/especie/4246.html)

[www.seos-project.eu/modules/classification/classification-c00-p05.html](http://www.seos-project.eu/modules/classification/classification-c00-p05.html)

[www.ujaen.es/huesped/pidoceps/telav/fundespec/reflectancia\\_vegetal.htm](http://www.ujaen.es/huesped/pidoceps/telav/fundespec/reflectancia_vegetal.htm)

[www.web2.0calc.es/](http://www.web2.0calc.es/)

