



UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE LUGO

Grado en Ingeniería en Geomática y Topografía

ANÁLISIS DE SEPARABILIDAD ESPECTRAL DE ESPECIES DE MANGLAR EN EL GOLFO DE FONSECA APLICACIÓN A LA CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES LANDSAT

Marcos Rial Docampo

Tutores:

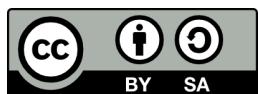
Eduardo Corbelle Rico

Rafael Enrique Corrales Andino

Análisis de separabilidad espectral de especies de manglar en el
Golfo de Fonseca
Aplicación a la clasificación de imágenes Landsat

Marcos Rial Docampo

26 de abril de 2015



Esta obra está sujeta a la licencia Reconocimiento-CompartirIgual 3.0 España de Creative Commons.

Para ver una copia de esta licencia, visite

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/es/> o envíe una carta a Creative Commons, 444 Castro Street, Suite 900, Mountain View, California, 94041, USA.

Aquí se colocan los agradecimientos.

Resumen/Abstract

Resumen

Abstract

Índice general

Resumen	V
Índice de Figuras	IX
Índice de Tablas	XI
Lista de Acrónimos	XIV
1. Introducción	1
1.1. Marco Global	1
1.2. Objetivos	5
1.2.1. Objetivo general	5
1.2.2. Objetivos específicos	5
1.3. Zona de estudio	6
1.4. Bases teóricas de teledetección	7
1.4.1. Fundamentos	7
1.4.2. Espectro Electro-magnético	8
1.4.3. Términos y Unidades	10
1.4.4. Firmas espectrales	12
1.4.5. Sensores	14
1.4.6. Resoluciones	16
1.4.7. Correcciones	19
1.4.8. Clasificación de imágenes	22
2. Material y métodos	25
2.1. Especies	25
2.2. Datos	25

2.3.	Software	26
2.3.1.	R	26
2.3.2.	GRASS GIS	27
2.3.3.	L ^A T _E X	27
2.4.	Técnicas de análisis espectral	28
2.4.1.	Índice de acuerdo espectral	28
2.4.2.	Continuum removal	28
2.4.3.	Clasificación angular	31
2.5.	Imágenes de satélite	32
2.5.1.	Landsat 8	32
2.5.2.	Obtención de las imágenes	32
2.5.3.	Tratamientos previos	35
2.6.	Estudio radiométrico	37
3.	Resultados	39
3.1.	Comprobación	39
3.2.	Primeras conclusiones	40
3.3.	Aplicación de los análisis	42
3.3.1.	Índice de Acuerdo Espectral	42
3.3.2.	Continuum Removal	46
3.3.3.	Clasificación angular	47
Bibliografía		52

Índice de figuras

1.1. Mangle	2
1.2. Distribución mundial de manglar	2
1.3. Estanques de cría de camarón	4
1.4. Salineras	4
1.5. Localización del Golfo de Fonseca	6
1.6. Modelo de elevación del Golfo de Fonseca	7
1.7. Elementos de teledetección	8
1.8. Espectro electro-magnético	9
1.9. Firma espectral	13
1.10. Biblioteca espectral SIGFIRM	13
2.1. Función de Índice de Acuerdo Espectral	29
2.2. Continuum Removal ejemplo	30
2.3. Función continuum removal	30
2.4. Función clasificación angular	31
2.5. Imágenes Landsat	34
2.6. Imágenes de calidad de Landsat	34
2.7. Dialogo del mosaicado	37
3.1. Firmas espectrales	41
3.2. Firmas espectrales de las tres especies	42
3.3. Firmas espectrales cortadas	43
3.4. Firmas espectrales cortadas de las tres especies	44
3.5. Gráficas de combinación binaria	45
3.6. Función modificada de CR	46
3.7. Gráfica de Continuum Removal	47

Índice de cuadros

1.1.	Bandas espectrales utilizadas en teledetección.	9
1.2.	Bandas en el sensor TM del proyecto Landsat.	15
1.3.	Bandas en el sensor ETM+ del proyecto Landsat.	15
1.4.	Bandas en el sensor OLI del proyecto Landsat 8.	16
1.5.	Resoluciones de varios sensores.	19
2.1.	Características de las imágenes Landsat	33
2.2.	Datos de la región establecida en GRASS	38
3.1.	Puntos de control	39
3.2.	Base de datos de puntos de control	40
3.3.	Valores de IAE	44
3.4.	Valores medios de la respuesta espectral	44
3.5.	Valores de Ángulo Espectral	47

Lista de Acrónimos

AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer.

CR: Continuum Removal.

CRAN: The Comprehensive R Archive Network.

EROS: Earth Resources Observation and Science Center.

ETM: Enhanced Thematic Mapper.

ETM+: Enhanced Thematic Mapper Plus.

GDAL: Geospatial Data Abstraction Library.

GeoTIFF: Geographic Tagged Image File Format.

GRASS: Geographic Resources Analysis Support System.

IFOV: Instantaneous Field of View.

IAE: Índice de Acuerdo Espectral.

IRC: Infrarrojo Cercano.

IRM: Infrarrojo Medio.

IRT: Infrarrojo Térmico.

ISF: Ingeniería Sin Fronteras.

JHU: Johns Hopkins University.

JPL: Jet Propulsion Laboratory.

L1T: Level 1 Terrain.

M: Microondas.

ND: Nivel Digital.

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index.

NIR: Near Infrared.

NV: Nivel Visual.

OLI: Operational Land Imager.

SIG: Sistema de Información Geográfica.

SIGFIRM: Sistema de Gestión de Firmas Espectrales Agrícolas.

SVN: Apache Subversion.

SWIR: Short Wave Infrared.

TFG: Trabajo Fin de Grado.

TIFF: Tagged Image File Format.

TIRS: Thermal Infrared Sensor.

TM: Thematic Mapper.

TOA: Top Of Atmosphere.

USC: Universidade de Santiago de Compostela.

USGS: United States Geological Survey.

UTM: Universal Transversal de Mercator.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Marco Global

Antes de comenzar conviene diferenciar los términos mangle y manglar. Comúnmente se conoce como mangle a la especie forestal (árbol o arbusto) que crece en el ecosistema del manglar o también llamados bosques de mangle (figura 1.1). Por lo tanto, en este documento se hablará de especies de mangle y se recurrirá al manglar o bosque de mangle para determinar la zona en la que viven estas especies.

Los manglares componen en la costa de centroamérica uno de los sistemas medioambientales más extensos y complejos del mundo. Situados en la zona intermareal próxima a las desembocaduras de los ríos o esteros, están compuestos por más de 80 especies diferentes de árboles y siendo hábitat de más de 2000 especies de animales, algunas de ellas migratorias.

La importancia ecológica y comercial de este sistema propio de zonas tropicales y subtropicales, como se muestra en la figura 1.2, es notable puesto que previenen la erosión de la línea de costa y sirven como sustento económico de la población en forma de producción de la industria pesquera y aporte de madera, leño y carbón ([Lara-Domínguez et al. , 1999](#)).

Centroamérica posee muchos kilómetros de costa en relación a su área territorial, con relaciones cercanas a que por cada kilómetro de costa existen 80km^2 de continente. Cerca del 70 % de su población vive a menos de 100 km de la costa. Estos datos representan, más si cabe, la importancia de estas zonas para la población y da una idea de su valor económico.

El manglar es un ecosistema delicado y dependiente de los procesos que ocurren fuera de sus fron-



Figura 1.1: Aspecto del mangle en un estero del Golfo de Fonseca. Fuente: Rafael Enrique Corrales.



Figura 1.2: Distribución mundial del manglar. Fuente: Wikimedia Commons.

teras, como pueden ser cambios en las escorrentías de los ríos que afectan a estas zonas, alteraciones en la calidad del agua ,por ejemplo provocadas por contaminantes arrastrados por la deriva, o porcentaje de salinidad de las aguas. Esto convierte a mareas, ríos y corrientes litorales como principales agentes alteradores del ecosistema manglar, pero también existe una componente humana importante que afecta directamente.

Los bosques de mangle de esta región están compuestos por bosque de mangle alto y bosque de mangle bajo. El bosque alto es el situado sobre la línea de costa y su altura varía entre los 5 y los 10 metros, mientras que el bosque bajo se sitúa contiguo al alto en zonas más cercanas a tierra. En el bosque de mangle alto conviven las especies *Rhizophora mangle* y *Laguncularia racemosa*. En el bosque de mangle bajo conviven mayormente las especies *Avicennia germinans* y *Conocarpus erectus*. Estas especies, excepto la última, serán descritas más adelante en el capítulo de Materiales y Métodos (2).

En cambio, el manglar es un ecosistema gravemente amenazado. Como se mencionaba, el impacto ambiental, directo e indirecto, no solo procede de la creación de infraestructuras, expansión urbana y desarrollo de industria petrolera sino también de la reconversión en zonas de cría de camarón (figura 1.3) o agricultura costera y salinas (figura 1.4 que deterioran la calidad del agua. Otras causas del deterioro a escala global de los manglares serían la escasa legislación de la propiedad de recursos naturales, los cambios de actividad de las comunidades costeras, las malas decisiones políticas, la ausencia de planes de desarrollo costero, la depreciación del valor ecológico, la explotación no sostenible, el desconocimiento de las consecuencias (Yáñez-Arancibia & Lara-Domínguez, 1994).

Una de las posibles soluciones que mitiguen estas causas es la de conocer mejor este ecosistema y su funcionamiento. Precisamente esta es una de las finalidades de este Trabajo Fin de Grado (TFG).

El empleo de sensores remotos para proyectos relacionados con el medioambiente y el entorno forestal es una realidad y se han utilizado mucho estas últimas décadas con unos buenos resultados. Como por ejemplo, Bodart *et al.* (2011) y Cajacuri (2011) realizan un estudio multitemporal de los cambios sufridos por las coberturas forestales, mientras que el estudio de Chen *et al.* (2013) se centra precisamente en analizar los cambios en el bosque de mangle hondureño apoyándose en imágenes Landsat. Lee & Yeh (2009) destacan la utilización de sensores remotos por la velocidad y precisión a la hora de recabar datos y comparan la utilización de diferentes sensores.



Figura 1.3: Estanques dedicados a la cría de camarón en el Golfo de Fonseca. Fuente: Rafael Corrales Andino.



Figura 1.4: Zona dedicada a la producción de sal. Fuente: Rafael Enrique Corrales.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general del trabajo es el de evaluar la posibilidad de emplear imágenes obtenidas con sensores remotos para diferenciar las distintas especies de mangle que se encuentran en el Golfo de Fonseca.

La hipótesis desde la que se parte es que la respuesta espectral de las diferentes especies de mangle sea lo suficientemente diferente para que este objetivo se cumpla. Esto conduce a la realización de unos objetivos específicos en los que se busca concretar más en el trabajo.

1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos serán el análisis de separabilidad espectral de las especies de mangle del Golfo de Fonseca y determinar la utilidad potencial del empleo de imágenes Landsat para diferenciar las especies analizadas.

Una vez realizado el análisis de especies se aplicarán los datos extraídos para realizar una clasificación supervisada de una imagen de la zona de estudio captada por el sensor Operational Land Imager (OLI) y obtenida del servicio de descargas de United States Geological Survey (USGS), la denominada Earth Resources Observation and Science Center (EROS), gracias a su herramienta Earth Explorer. De esta clasificación se sacarán distintas conclusiones, se analizará la superficie de cada especie de manglar y se verificarán los resultados.

Se parte de la hipótesis de que, dependiendo de los resultados del primer objetivo, sea posible aplicar la experiencia adquirida en el análisis de separabilidad para realizar una clasificación fiable de la zona.

A esto se le añade el propósito de que, a lo largo de todas las fases del presente trabajo, se estudiará el uso de software libre y las posibilidades que este presenta de cara a futuros proyectos. Estas fases son: redacción del documento, tratamiento, análisis y presentación de los datos así como el tratamiento y procesado de las imágenes. Se presentarán las virtudes y defectos de este tipo de software y se analizarán los problemas a medida que estos se van presentando.

Este trabajo tiene como referencia el proyecto de Ingeniería Sin Fronteras (ISF) en colaboración con la Universidade de Santiago de Compostela (USC) que tiene como título: “Investigación y sensibiliza-

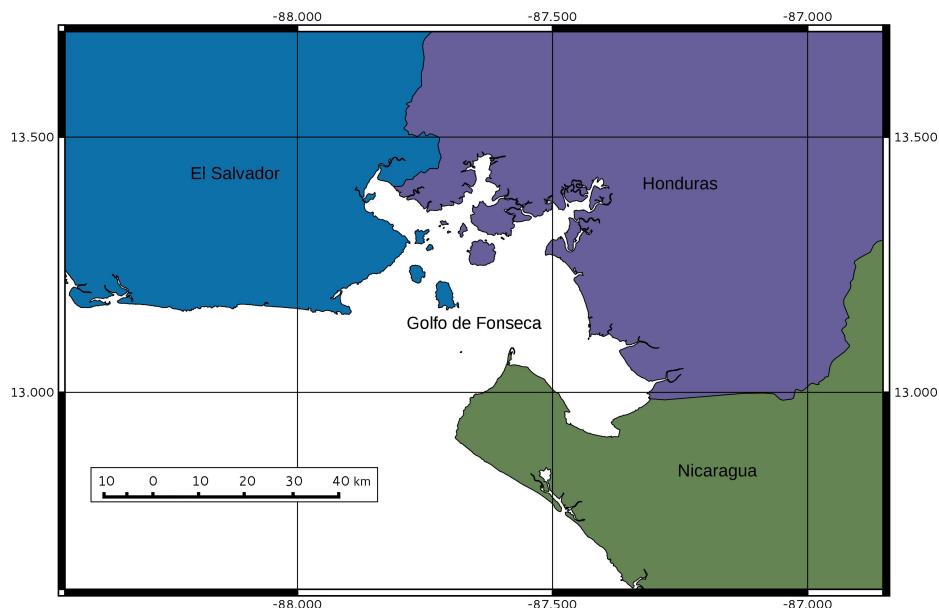


Figura 1.5: Localización del Golfo de Fonseca. Fuente: Elaboración propia. Datos: [Global Administrative Areas \(2012\)](#).

ción sobre la problemática de la actividad acuícola insostenible y promoción de alternativas artesanales basadas en la economía social: puentes entre Golfo de Fonseca y Galicia” ([LaboraTe, 2014](#)).

1.3. Zona de estudio

El área de estudio es el entrante natural del Golfo de Fonseca (figuras 1.5 y 1.6) que abarca la costa pacífica de El Salvador, Honduras y Nicaragua situado entre las latitudes 13,595824°N – 12,757449°N y las longitudes 87,994615°W – 87,115709°W.

De toda el área forestal de Honduras, que se sitúa en torno a las $54000000000km^2$, los manglares ocupan alrededor de un 1.0% ($515781800km^2$) ([CIPF, 2014](#)). La mayor parte de este porcentaje de manglar se localiza en la costa pacífica del país, en el Golfo de Fonseca, que posee gran riqueza y diversidad de recursos naturales que están amenazados por su sobreexplotación ([Jiménez, 1994](#)). Esto hace que figure en la lista Ramsar de humedales protegidos a escala mundial ([Ramsar, 2014](#)). En total cuenta con 409 km de costa abarcando una extensión de $547km^2$.

El Golfo de Fonseca, caracterizado por tener unas aguas poco profundas (oscilando entre los 30m y 10m de máxima y 0.5m de mínima), está formado por una serie de ecosistemas interrelacionados formados por estuarios interiores, manglares, costas continentales e insulares. Las cuencas del Río Goascorán y

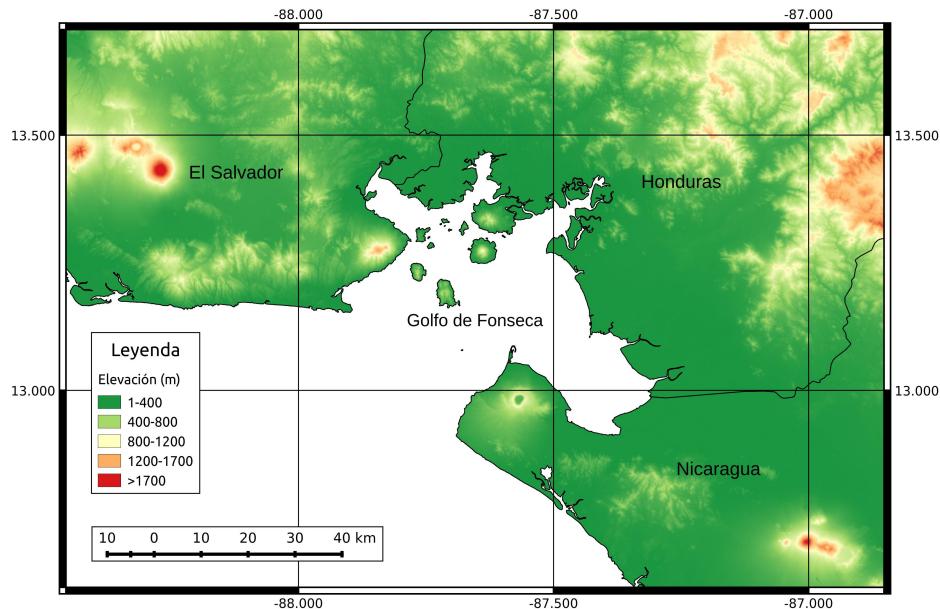


Figura 1.6: Modelo de elevación del Golfo de Fonseca. Fuente: Elaboración propia. Datos: [Jarvis et al. \(2008\)](#)

el Río Negro son transfronterizas; la primera es compartida por El Salvador y Honduras y la segunda por Honduras y Nicaragua. Es pues un espacio internacional con humedales compartidos, lo que le otorga una importancia mayor a la hora de ser gestionado.

Cabe destacar que en 1998 el huracán Mitch devastó una extensa superficie del ecosistema del Golfo de Fonseca causando incontables pérdidas humanas y económicas y cubriendo de lodo las zonas de manglar llegando a provocar un ligero cambio en la línea de costa debido a las crecidas de los ríos y a las amplias mareas. [CEPAL \(1999\)](#).

1.4. Bases teóricas de teledetección

1.4.1. Fundamentos

La teledetección es la técnica que nos permite obtener información de los objetos situados en la superficie de la Tierra realizando una observación remota ([Curran, 1989](#)) ([Chuvieco Salinero, 2002](#)) ([Schowengerdt, 2006](#)). Para que esta observación sea posible debe haber algún tipo de nexo entre el objeto y el sistema sensor u observador. De esta afirmación se extraen los tres elementos básicos de la teledetección: el objeto observado, el sensor y el flujo energético que los relaciona.

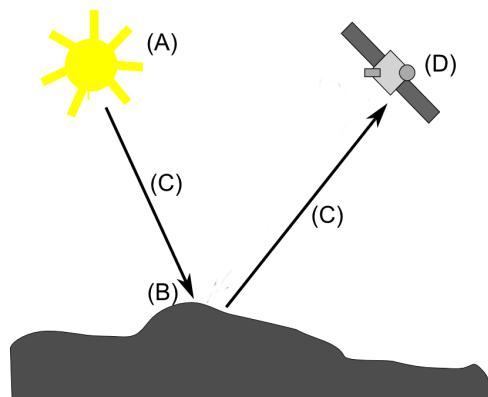


Figura 1.7: Elementos de teledetección. Fuente: [Olaya \(2010\)](#).

Hay tres formas de que un sensor pueda adquirir la información del objeto. Estas son: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión.

La primera forma deriva directamente de la reflexión solar (será la empleada en este TFG) como se muestra en la figura 1.7. El Sol (A) ilumina la superficie terrestre que refleja esa energía (C) en función del tipo de cubierta (B). El flujo reflejado es recogido por el sensor (D) que, de ser portado por un satélite, debe atravesar una capa de atmósfera que dispersa y absorbe parte de la señal. El flujo energético entre la cobertura y el sensor constituye una forma de radiación electro-magnética.

1.4.2. Espectro Electro-magnético

Podemos definir cualquier tipo de energía en función de su longitud de onda, de la que se establecen una serie de bandas en donde la radiación electro-magnética manifiesta un comportamiento similar. Esta organización en bandas se denomina espectro electro-magnético (figura 1.8). Esta comprende desde longitudes de onda corta, como los rayos gamma (γ) con menos de $10^{-11} m$, a longitudes de onda mayores de un metro como las ondas de radio.

En el cuadro 1.1 se destacan la serie bandas espetrales más empleadas en teledetección, siendo su denominación y ancho de banda el generalizado.

El espectro visible es la única radiación electromagnética perceptible por la vista. Como se muestra en el cuadro 1.1 esta banda se divide en otras tres elementales: azul, verde y rojo; en razón de los colores primarios que los ojos perciben a esas longitudes de onda.

En el caso de la banda infrarroja esta también se divide en tres bandas elementales: Infrarrojo Cercano

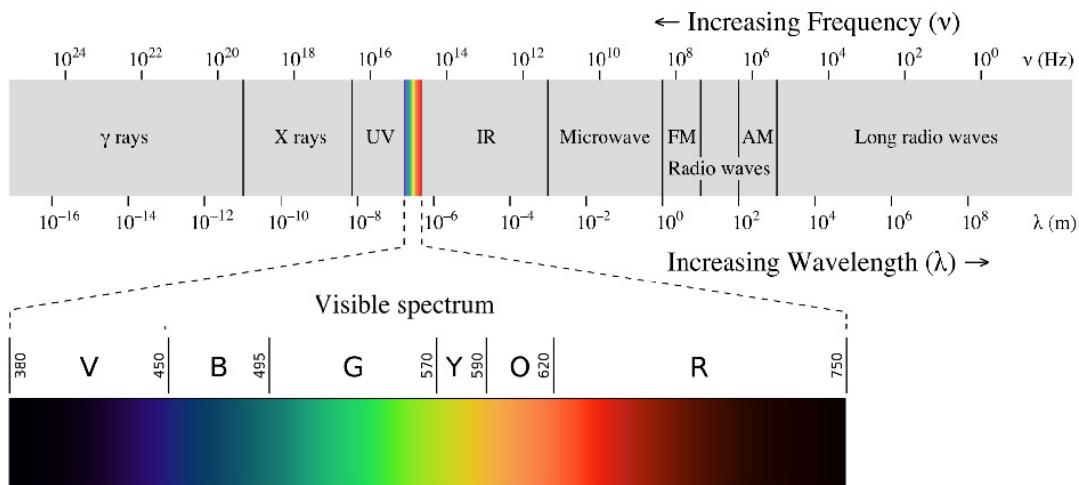


Figura 1.8: Espectro electro-magnético. Fuente: Wikimedia Commons.

Cuadro 1.1: Bandas espectrales utilizadas en teledetección.

Banda		L. de onda
Visible	Azul	$0,4 - 0,5\mu m$
	Verde	$0,5 - 0,6\mu m$
	Rojo	$0,6 - 0,7\mu m$
Infrarrojo	Cercano (IRC)	$0,7 - 1,2\mu m$
	Medio (IRM)	$1,2 - 8,0\mu m$
	Térmico (IRT)	$8,0 - 14,0\mu m$
Microondas (M)		$> 1mm$

(IRC), Infrarrojo Medio (IRM) e Infrarrojo Térmico (IRT). El IRC, o también denominado próximo, es de especial importancia puesto que es utilizado para detectar masas vegetales y concentraciones de humedad. En el IRM tenemos que diferenciar el Short Wave Infrared (SWIR) o infrarrojo de onda corta (situado entre 1.2 y $2.5\mu m$ resultando una banda indicada para estimar el contenido en humedad de la vegetación y los suelos) y el IRM propiamente dicho (situado entre 2.5 y $8\mu m$ siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura como incendios).

El IRT es el indicado para dimensionar las emisiones de temperatura de las cubiertas sobre la superficie terrestre. Es poco utilizado para otros fines.

Las Microondas (M) tienen interés por ser un tipo de energía capaz de penetrar la cubierta nubosa

pero no se tendrá en cuenta en este tipo de trabajos.

En capítulos sucesivos veremos que los valores de los intervalos de longitudes de onda de las bandas tomadas por los sensores satelitales son ligeramente diferentes a los mostrados en este capítulo.

1.4.3. Términos y Unidades

Como se indicó anteriormente, para que se pueda producir la observación remota es preciso que el sensor detecte un flujo energético proveniente de las cubiertas sobre la superficie terrestre. Este flujo energético tiene una intensidad determinada que proviene o está dirigida a una cubierta determinada con una dirección concreta. Se definen a continuación las magnitudes absolutas empleadas en teledetección.

- Energía radiante (Q). Indica el total de energía radiada en todas las direcciones. Es medida en Julios (J).
- Flujo radiante (ϕ). Es el total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de tiempo. Es medida en vatios (W). Se compone de flujo reflejado (ϕ_r), flujo absorbido (ϕ_a) y flujo transmitido (ϕ_t).
- Emitancia radiante (M). Es el total de energía radiada en todas las direcciones por superficie y por unidad de tiempo. Es medida en vatios por metro cuadrado (Wm^{-2}).
- Irradiancia (E). Es el total de energía radiada sobre una unidad de superficie y por unidad de tiempo. Es equivalente a la emitancia, excepto a que se refiere a la energía incidente y no a la emitida. Es medida en Wm^{-2} .
- Intensidad radiante (I). Es el total de energía radiada por unidad de tiempo y por ángulo sólido (Ω). Este ángulo es tridimensional y refiere a la sección completa de la energía transmitida (es medido en estéreo-radianes). La intensidad radiante se mide en vatios por estéreo-radian (Wsr^{-1}).
- Radiancia (L). Es el total de energía radiada en una determinada dirección por unidad de superficie y por ángulo sólido de medida. Es uno de los términos más importantes en teledetección porque es la magnitud que mide el sensor. Se cuantifica en vatio por metro cuadrado y estéreo-radián ($Wm^{-2}sr^{-1}$).
- Radiancia espectral (L_λ). Indica el total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por ángulo sólido de medida.

De igual forma se definen magnitudes relativas que son adimensionales:

- Emisividad (ϵ). Es la relación entre la emitancia de la superficie (M) y la emitancia de un emisor perfecto (cuerpo negro) a igual temperatura.
- Reflectividad (ρ). Es la relación entre el flujo reflejado y el incidente.
- Absortividad (α). Es la relación entre el flujo absorbido y el incidente.
- Transmisividad (τ). Relación entre el flujo transmitido y el incidente.

Debido a que la radiancia que capta un sensor depende de la que refleja la cubierta en la que incide, para detectar una cubierta por teledetección se precisa explicar como interactúa con la radiación solar incidente. El flujo incidente (ϕ_i), como ya se mencionó, se descompone en tres términos: flujo reflejado (ϕ_r), flujo absorbido (ϕ_a) y flujo transmitido (ϕ_t), es decir:

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t \quad (1.1)$$

que expresado en términos relativos:

$$\frac{\phi_i}{\phi_i} = \frac{\phi_r}{\phi_i} + \frac{\phi_a}{\phi_i} + \frac{\phi_t}{\phi_i} \quad (1.2)$$

lo que es igual a la suma de la reflectividad, absorbtividad y transmisividad ha de ser igual a uno:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad (1.3)$$

que variando según la longitud de onda (λ) bastaría con expresarlo de la siguiente manera:

$$1 = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda \quad (1.4)$$

La cantidad de flujo incidente que es reflejado, transmitido y absorbido dependen directamente de las características de la cubierta que se está observando y de la longitud de onda a la que se observa. Para conocer fielmente las características de una cubierta conviene observarla a distintas longitudes de onda, lo que permitirá diferenciarla de otras cubiertas susceptibles de ser espectralmente similares.

La variación de longitud de onda, por ejemplo en el espectro visible, se detecta fácilmente pues se ve afectado en nada menos que el color en el que observamos. Un objeto será rojo, verde o azul si refleja la energía de la banda del espectro correspondiente o si absorbe más intensamente la de las otras bandas.

El flujo de energía recibida por el sensor depende, además de la reflectividad de la cubierta, de las condiciones atmosféricas, el emplazamiento ambiental de la cubierta y la geometría de la observación. El sensor puede registrar distintos valores para el mismo tipo de cubierta dependiendo de la variación en

las condiciones de observación o iluminación. Hay que tener en cuenta que una cubierta vegetal presenta distintos estados biológicos a lo largo del año, lo que añade una componente temporal a la toma de datos. En resumen, los factores que afectan a las características espectrales de una cubierta son:

- Ángulos de iluminación y observación, que varían con la latitud, fecha del año y hora de la observación y la posición del sensor.
- Modificaciones que el relieve introduce en el ángulo de iluminación, como pueden ser la orientación de las laderas de una montaña o pendientes.
- Influencia de la atmósfera, absorción por nubes y dispersión selectiva en distintas longitudes de onda.
- Variaciones medioambientales en la cubierta: asociación con otras superficies, homogeneidad que presenta o estado fenológico entre otras.
- Sustrato edafológico o litológico, especialmente influyente cuando la cubierta observada presenta una densidad media.

1.4.4. Firmas espectrales

Las firmas o signaturas espectrales (figura 1.9), extraído del inglés *spectral signatures*, es la forma de reflejarse que tiene una cubierta a lo largo de distintas longitudes de onda y se utiliza para discriminar una cubierta de otra a partir de una observación remota. Son fundamentales para reconocer cubiertas de interés o extraer parámetros o características intrínsecas a dicha cubierta. La firma spectral se puede obtener de las siguientes fuentes:

- Medidas con un radiómetro.
- Bibliotecas espectrales.
- Simulaciones mediante modelos físicos.
- Imagen con la debida resolución espectral.

El medio más sencillo de disponer de firmas espectrales son las bibliotecas espectrales. Las bibliotecas espectrales son colecciones de firmas espectrales, tomadas en condiciones controladas por radiómetros en laboratorio, que sirven de referencia para conocer el comportamiento de una cubierta determinada ([Andino, 2011](#)).

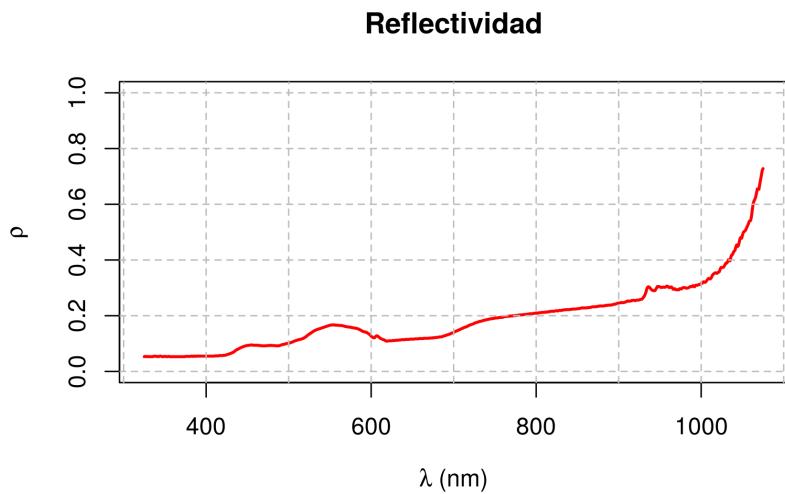


Figura 1.9: Firma espectral de una cubierta no identificada. Fuente: Elaboración propia.

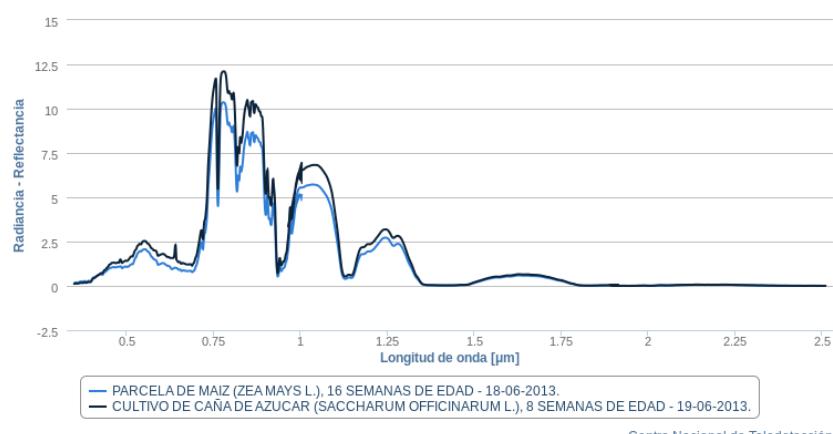


Figura 1.10: Biblioteca espectral de maíz y caña de azúcar. Fuente: SIGFIRM

Hay numerosos ejemplos de bibliotecas espectrales en Internet, como las del Sistema de Gestión de Firmas Espectrales Agrícolas (SIGFIRM) venezolano que recoge el comportamiento espectral de los cultivos en regiones agrícolas de Venezuela; o la ASTER spectral library de la NASA, que recoge datos de otras tres bibliotecas espectrales: las del Johns Hopkins University (JHU), Jet Propulsion Laboratory (JPL) y USGS registrando más de 2400 firmas de materiales como minerales, rocas, suelos y algunas cubiertas artificiales como lo son cemento, aluminio o papel.

1.4.5. Sensores

En el apartado de fundamentos (1.4.1) de este mismo capítulo se indicaba que el sistema sensor era una de los tres componentes principales de la teledetección.

La clasificación más común de los sensores es según la forma de recibir la energía de las cubiertas, dando lugar a:

- Pasivos, donde el sensor recibe la energía emitida por un agente exterior (e.g. el Sol).
- Activos, donde el sensor recibe un haz de energía emitido por él mismo.

Sensores pasivos

En una clasificación más detallada de los sensores pasivos estos se dividen en sensores fotográficos (cámaras analógicas), óptico-electrónicos (exploradores de barrido, de empuje y cámaras de vídeo) y de antena (radiómetros de microondas), en función del procedimiento que emplean para recibir la radiación procedente de los objetos.

Lo que concierne a este TFG son los sensores pasivos óptico-electrónicos ya que las cámaras analógicas eran más utilizadas en fotogrametría aérea y los radiómetros de microondas trabajan en frecuencias muy elevadas.

Los sensores óptico-electrónicos combinan una óptica similar a las cámaras analógicas con un sistema de detección electrónica permitiendo prescindir de un soporte sólido de grabación de imágenes. El sensor convierte la señal de radiancia proveniente del objeto en un valor digital. Los sensores exploradores de barrido, que son los más habituales, utilizan un espejo que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria.

Un ejemplo de sensor remoto pasivo de barrido es el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) montado sobre el satélite Landsat 7. Otro ejemplo de explorador de barrido son los sensores Thematic Mapper (TM) del Landsat 5, el OLI del Landsat 8 (de cuyas imágenes se hará uso en este TFG y se le dedicará un párrafo) o el Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) del NOAA. De los tres primeros se extraen los cuadros 1.2, 1.3 y 1.4.

Otro tipo de sensor pasivo son los exploradores de empuje. En estos se elimina el espejo oscilante, en cuyo lugar se disponen una serie de detectores que cubren todo el campo de visión del sensor que explo-

Cuadro 1.2: Bandas en el sensor TM del proyecto Landsat.

Bandas	Landsat 5		
	TM		
	Nombre	L. onda (μm)	Resolución (m)
1	B	0.45–0.52	30
2	G	0.52–0.60	30
3	R	0.63–0.69	30
4	NIR	0.76–0.90	30
5	NIR	1.55–1.75	30
6	TIR	10.40–12.50	120
7	MIR	2.08–2.35	30

Cuadro 1.3: Bandas en el sensor ETM+ del proyecto Landsat.

Bandas	Landsat 7		
	ETM+		
	Nombre	L. onda (μm)	Resolución (m)
1	B	0.45–0.52	30
2	G	0.52–0.60	30
3	R	0.63–0.69	30
4	NIR	0.77–0.90	30
5	NIR	1.55–1.75	30
6	TIR	10.40–12.50	60
7	MIR	2.08–2.35	30

Cuadro 1.4: Bandas en el sensor OLI del proyecto Landsat 8.

Bandas	Landsat 8		
	OLI		
	Nombre	L. onda (μm)	Resolución (m)
1	Coastal	0.43–0.45	30
2	B	0.45–0.51	30
3	G	0.53–0.59	30
4	R	0.64–0.67	30
5	NIR	0.85–0.88	30
6	SWIR	1.57–1.65	30
7	SWIR	2.11–2.29	30
9	Cirrus	1.36–1.38	30

ran, en cada momento, una línea completa desplazándose esta línea simultáneamente con la plataforma. Estos exploradores permiten aumentar la resolución espacial y agilizan la detección de datos al hacer la conversión radiancia a valor digital por línea y no por píxel como los anteriores.

Ejemplos de exploradores de empuje son los sensores HRV del SPOT, IKONOS o Quickbird.

1.4.6. Resoluciones

Se define la resolución del sistema sensor en teledetección como la capacidad para discriminar información de detalle en un objeto. Otra definición utilizada es la de valor mínimo determinado para alguna de las variables que definen a una imagen digital ([Chuvieco Salinero, 2002](#)).

El concepto de información de detalle de la primera definición comprende tanto al detalle espacial que ofrece el sensor como a número y anchura de bandas espectrales, a su carencia temporal y a la capacidad para distinguir variaciones en la energía que detecta. Esto significa que el concepto de resolución se basa en el conjunto de:

1. Resolución espacial.
2. Resolución espectral.
3. Resolución radiométrica.

4. Resolución temporal.

Resolución espacial

Designa el objeto más pequeño que es posible distinguir en la imagen digital. Se mide en milímetros sobre la imagen o metros sobre el terreno y depende de la longitud focal del sensor y altura sobre la superficie. En sensores óptico-electrónicos se utiliza el Instantaneous Field of View (IFOV), que se define como la sección angular que observa el sensor en un momento determinado.

$$d = 2h \tan(IFOV/2) \quad (1.5)$$

donde d es la distancia sobre el terreno que abarca con ese ángulo IFOV, y h la altura del sensor sobre el terreno. Esta mínima unidad de información en la imagen es la que se denomina píxel.

La resolución espacial de un sensor, como ya se ha mencionado, depende de varios factores, como la altura orbital, la longitud focal y el número de detectores. En los sensores de antena, la resolución espacial depende del tamaño de la misma, la altura de la plataforma y el ángulo de incidencia.

Dependiendo de la resolución espacial tenemos cuatro tipos de sensores:

1. De alta resolución. Con resoluciones próximas al metro de ancho.
2. De recursos naturales. Con resoluciones entre los 25 x 25m y 1000 x 1000m.
3. De baja resolución. Por lo general montados sobre satélites geoestacionarios y dedicados a ámbitos meteorológicos, cuentan con una resolución espacial que puede llegar a los 5 x 5km.

Resoluciónpectral

Designa el número y anchura de bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Es muy importante la capacidad del sensor para registrar simultáneamente el comportamiento de un mismo objeto en varias bandas del espectro. En definitiva, un sensor tendrá mayor resolución cuanto mayor número de bandas detecte, facilitando así la caracterizaciónpectral de las cubiertas.

Es evidente la importancia que tiene la elección del sensor en cuanto al número de bandas, ancho y longitud de las mismas dependiendo del objetivo del trabajo a realizar. Por ejemplo, para la detección de vegetación se hace más importante disponer de bandas del IRC e IRM más que del IRT, en cambio para detectar incendios sí es importante disponer de la banda del IRT.

Resolución radiométrica

Designa la sensibilidad del sensor o su capacidad para detectar las variaciones en la radiancia espectral. En los equipos digitales, como por ejemplo el sensor ETM+, la imagen es codificada en un formato binario, por lo que la resolución radiométrica se identifica con el rango posible de valores que almacena el sensor, medido como el número de bits que necesita cada valor numérico para almacenarse. El mencionado ETM+ ofrece una resolución de 8 bits, es decir, 256 niveles por píxel.

La importancia de este tipo de resolución se hace patente a la hora de interpretar las imágenes, sobre todo cuando esta interpretación es digital, ya que el ordenador aprovecha todo el rango de resolución.

Resolución temporal

Designa la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor, es decir, la periodicidad con la que adquiere imágenes de la misma zona de la superficie terrestre. Esto depende de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad e inclinación) y del diseño del sensor (del ángulo total de apertura). La resolución temporal dependerá también de las condiciones atmosféricas puesto que una amplia cobertura nubosa impedirá la observación y dilatará dicha temporalidad.

Las variaciones en la resolución temporal responden al objetivo para el que esté diseñado el sensor, pudiendo llegar a los 15 o 30 minutos de los satélites meteorológicos como Meteosat y hasta los 15 o 31 días de los satélites de recursos naturales como el Landsat o Spot.

Resolución angular

Designa la capacidad de un sensor de tomar instantáneas de una misma porción de terreno desde distintas órbitas. Esto se relaciona con la resolución temporal en que, tomando el supuesto de que en un momento dado la cobertura nubosa impide la observación, el sensor tome la imagen desde una órbita cercana en otro lapso de tiempo inclinándose para poder hacerla. Esta capacidad reduce el efecto de reflectividad bidireccional que presentan algunas cubiertas y los efectos de absorción y dispersión de la atmósfera.

En el cuadro 1.5 se comparan las diferentes resoluciones de los principales sensores para fines medioambientales que hay actualmente en órbita.

Cuadro 1.5: Resoluciones de varios sensores.

	Landsat 8 OLI	QuickBird	Spot 6	IKONOS
R. Espacial MS (m)	30–60	2.44–2.88	6	3.2–4
R. Espectral (nm)	450–12500	450–900	455–890	445–853
R. Radiométrica (bits)	8	11	12	11
R. Temporal (días)	16	1–3	1–3	3

1.4.7. Correcciones

Como se exponía anteriormente la imagen digital tomada por el sistema sensor se compone de una malla de píxeles que toman un valor numérico concreto obtenido a partir de la radiancia observada. Ese valor numérico que codifica cada píxel es el llamado Nivel digital (ND). La propiedad más ventajosa de esos ND es que pueden traducirse a color o niveles de gris, por ejemplo mediante el uso de un monitor, dependiendo, la intensidad, del ND. A partir del ND visualizado se pueden hacer operaciones de realce que no modificarán su valor pero sí harán que se vea con diferente intensidad. A este nuevo valor se le llamará Nivel visual (NV). El ND, en cambio, es utilizado para operaciones de interpretación digital, especialmente cuando estas se relacionan con parámetros como la reflectividad o la temperatura.

La mejor forma de ver una imagen es como si fuera un sistema de tres dimensiones, donde las dos primeras dimensiones corresponden a la posición geográfica de la imagen y la tercera corresponde al ND.

Las correcciones propiamente dichas son aquellos procesos con los que se eliminan anomalías detectadas en la imagen, tanto de localización como en la radiometría de los píxeles. La finalidad de estos procesos es la de disponer los datos de la forma más cercana a lo que sería una adquisición idónea (e.g. posición geográfica correcta). Es posible que la corrección más importante sea la geográfica, pues aporta validez cartográfica a los resultados y permite la conexión con otros datos geográficos en un Sistema de Información Geográfico (SIG).

Las principales fuentes de error que provocan la necesidad de realizar correcciones son:

- Distorsiones originadas por la plataforma. El alabeo, el cabeceo o el giro lateral son movimientos que modifican la altitud de órbita del satélite, la velocidad o la orientación, lo que se traduce en

problemas en la adquisición de las imágenes. Problemas como lo son cambios en la escala de adquisición o distorsiones en la geometría.

- Distorsiones provocadas por la rotación terrestre. En algunos sensores la toma de la imagen supera los 20 segundos, tiempo en el que la Tierra se desplaza en rotación unos 6 kilómetros.
- Distorsiones provocadas por el sensor. Distorsiones debidas al tipo de sensor (1.4.5) relacionadas con el ángulo de barrido o el campo de visión global, provocando distorsiones cuanto más alejados están los píxeles del nadir.
- Distorsiones provocadas por la atmósfera. Los elementos de la atmósfera, como ya se comentó en la sección de fundamentos 1.4.1, causan una modificación en la obtención de la señal original de la superficie terrestre. El efecto más importante es la dispersión, que implica un aumento de la señal recibida por el sensor.

La última de las distorsiones, la atmosférica, resulta importante de corregir para generar índices espectrales.

Correcciones radiométricas

Las correcciones radiométricas son aquellas técnicas que modifican los ND originales con el objetivo de acercar su valor al que sería obtenido bajo condiciones ideales. Son correcciones radiométricas:

- Restauración de líneas o píxeles perdidos. La imagen presenta líneas blancas o negras píxeles de aspecto contrastado al resto. Es una corrección aproximada, puesto que no se pueden poner píxeles de valor correcto donde no hay información.
- Corrección del bandeadío de la imagen. Es especialmente perceptible en zonas de agua y problemático en los exploradores de empuje (1.4.5). Es un defecto periódico.
- Cálculo de reflectividades. Es una corrección muy importante para el análisis e interpretación de imágenes, pues como se decía anteriormente, es preferible trabajar con términos físicos que con ND. Particularmente es importante a la hora de comparar datos con otros obtenidos con radiómetros de campo (uno de los objetivos de este TFG).
- Cálculo de temperaturas.
- Detección de nubes.

Correcciones geométricas

Este tipo de correcciones incluyen los cambios en la posición que los píxeles ocupan en la imagen digital. Son correcciones basadas en funciones numéricas que se aplican sobre la geometría de la imagen y la modifican ([1.6](#)).

$$f(c') = f_1(c, l); f(x, y)f(l') = f_2(c, l); f(x, y) \quad (1.6)$$

Las coordenadas columna y línea (c' y l') de la imagen corregida son función de las coordenadas columna y línea de la imagen de entrada (c y l) o de las coordenadas del mapa al que se pretende superponer la imagen (x e y). Se trata de encontrar una relación que convierta los ND de la imagen a su posición cartográfica en la proyección requerida (en este caso a la Universal Transversa de Mercator (UTM)). Esto permite, entre otras cosas, hacer un mosaico con más imágenes para ampliar la cobertura de la imagen.

Hay dos procedimientos de corrección geométrica que se pueden aplicar a una imagen que se enumeran a continuación:

1. Corrección a partir de modelos orbitales. Corrige los errores provocados por fuentes conocidas a partir de aplicar transformaciones inversas a las que realiza el sensor en el momento de la adquisición de los datos. Se necesita conocer con precisión las características orbitales de la plataforma y las especificaciones del sensor. Se corrigen de esta forma los errores sistemáticos
2. Corrección a partir de puntos de control. Modela el error geométrico a partir de puntos de control repartidos a lo largo de la zona de la imagen. Estos puntos son de coordenadas conocidas y se asume que sean lo suficientemente representativos de las deformaciones de la imagen.

El primero de los procedimientos es especialmente indicado para aquellas imágenes en las que no se pueden reconocer puntos de control, como imágenes marinas o con una amplia cobertura nubosa o bien sean imágenes con una resolución espacial en la que no se puedan establecer puntos de control con garantías. Por esta última razón es el tipo de corrección geométrica indicada para sensores de muy baja resolución espacial como los de plataforma de órbita geoestacionaria.

El método de corrección a partir de puntos de control requiere de la intervención humana, lo que resulta tedioso en comparación con el primer método. En cambio ofrece mayor precisión en la corrección

dependiendo, evidentemente, de la medida en que en la imagen se puedan detectar los puntos de control establecidos.

1.4.8. Clasificación de imágenes

La clasificación es el último paso en el análisis de imágenes digitales mediante teledetección (se beneficia de los procesos de correcciones, realces y fusiones de imágenes) y de ella derivan los productos cartográficos finales en forma de mapas temáticos. El ND pasa de reflejar el nivel de reflectancia a tener un valor categórico concreto que puede etiquetarse con un tipo concreto de superficie. Se genera así cartografía temática y facilita el trato estadístico de la información.

Hay numerosos métodos de clasificación que se desgranarán más adelante y que deben cumplir los siguientes requisitos:

- Fiabilidad.
- Reproducible por otros con las mismas variables de entrada.
- Robustez. No debe ser sensible a pequeños cambios en las condiciones de entrada.
- Exhaustividad.
- Objetividad. No debe estar marcado por las decisiones del intérprete.

Uno de los problemas más comunes en la clasificación es la posible similitud entre dos o más cubiertas, que provoca que estas no se definan correctamente. Esto se podría solucionar ampliando la resolución espacial o aplicando la variable temporal a las imágenes (muy apto para discriminar masas vegetales debido a la evolución estacional). También se podría acudir a información auxiliar como topografía del terreno o tipos de suelo.

Fases de la clasificación

La clasificación consta de los siguientes puntos que dependiendo del tipo de clasificación, supervisada o no supervisada, se utilizarán de un modo u otro estas fases.

1. Fase de entrenamiento. Para la interpretación de la imagen es necesaria una experiencia previa que permita identificar las categorías según su textura, tono, tamaño o situación de los píxeles que la componen.

La finalidad de la fase de entrenamiento es definir un rango de valores de ND que en conjunto describan las características de una cubierta concreta. A esto se le llama área de entrenamiento. Una cubierta no se define únicamente por un valor de ND debido a la dispersión en el comportamiento espectral.

Se deberá seleccionar una muestra de píxeles de la imagen que representen lo más fielmente posible a la categoría de interés. A partir de esta muestra se podrán calcular los ND medios y la variabilidad de cada categoría de las bandas que intervienen en la clasificación. Por lo tanto, las áreas de entrenamiento deben estar bien identificadas, deben ser suficientemente homogéneas y deben cubrir todas las clases.

En el método supervisado, se seleccionan los píxeles representativos teniendo en cuenta la experiencia en campo o el conocimiento previo del comportamiento espectral de las cubiertas por parte del usuario. Mientras, el método de clasificación no supervisado se basa en la búsqueda autónoma de las muestras dentro de la imagen.

El problema más común en la definición de clases es que el tipo de clase informacional (constituyen la leyenda del trabajo e.g. tipos de suelo) no corresponda con el tipo de clase espectral (ofrecen una respuesta espectral similar). Puede darse el caso de que una cubierta esté representada por varias clases espectrales, que varias cubiertas estén representadas por una sola clase espectral o que varias clases informacionales se correspondan con varias clases espectrales.

2. Fase de asignación. En esta fase a cada uno de los píxeles de la imagen se le asigna una clase obteniendo así una nueva imagen con los ND expresando una categoría temática diferente. Los criterios de asignación definen un área de dominio, en torno al centro de cada categoría. Por lo tanto, si el ND del píxel se encuentra dentro de esa área será asignado a esa clase.

Los clasificadores más habituales son:

- Clasificador de mínima distancia: el píxel se asigna a la clase más cercana espectralmente.
- Clasificador de paralelepípedos: permite al usuario señalar los umbrales de dispersión espectral asociados a cada clase.
- Clasificador de máxima probabilidad (maximum likelihood): el píxel se asigna a aquella clase con la que tenga mayor probabilidad de pertenencia.

3. Obtención y presentación de resultados.

4. Verificación de resultados.

Capítulo 2

Material y métodos

2.1. Especies

De todas las especies de mangle existentes en el Golfo de Fonseca se ha decidido tomar tres para este estudio por ser las más predominantes. Son las siguientes:

- Mangle Rojo. Nombre científico *Rhizophora mangle*.
- Mangle Blanco. Nombre científico *Laguncularia racemosa*.
- Mangle Prieto. Nombre científico *Avicennia germinans*.

Más información en [Jiménez \(1985a\)](#), [Jiménez \(1985b\)](#) y [Jiménez & Lugo \(1985\)](#).

2.2. Datos

Los datos obtenidos del espectro-radiómetro de campo se presentan en cuatro archivos de extensión .dat uno para cada especie más uno del conjunto. Al abrir estos archivos en un editor de texto se puede observar como están compuestos por cuatro columnas de datos:

1. Nombre. Columna opcional, en este caso será “Subset 1”.
2. Identificador.
3. Longitud de onda.
4. Reflectividad.

La característica principal de estos datos es que abarcan un amplio rangopectral de forma continua, similar a lo que ocurre en la obtención de una imagen, pero en este caso los datos serían solamente de un punto, no de una superficie extensa.

El rangopectral dado por el espectro-radiómetro comprende de 325.00 - 1075.00 nm que equivaldría a las cinco primeras bandas del OLI de Landsat, es decir, aerosol, azul, verde, rojo e IRC. Teniendo en cuenta la realización de un corte de colas para que los datos sean lo más fiables posible.

2.3. Software

El uso de software libre es un recurso importante para realizar trabajos sobre recursos medioambientales principalmente por, entre otras cosas ([Matellán Oliveira et al. , 2004](#)):

1. Abarata el coste del proyecto al ser bajo o nulo el coste de una licencia de uso.
2. Cuenta con un buen soporte y servicio técnico llevado en algunos casos por comunidades de usuarios y a largo plazo. Se evita la obsolescencia del producto.
3. Formatos estandarizados que permiten la interoperabilidad.
4. Se centra en proporcionar un servicio y no un producto.

Este TFG se ha hecho íntegramente sobre software libre, utilizando los programas seguidamente mencionados sobre un sistema operativo GNU/Linux, en concreto sobre la distribución Ubuntu 14.04.

Adicionalmente se ha hecho un control de versiones localmente con el software Subversion (SVN), que mediante repositorios, permite gestionar un historial de ficheros y carpetas, recordando y organizando el contenido en cada momento, documentando los cambios que ha sufrido y quién y por qué los ha realizado. Permite, por tanto, recuperar el documento a versiones anteriores o revisar el proceso de desarrollo del mismo ([Hernández, 2011](#)). La interfaz gráfica utilizada ha sido RapidSVN.

2.3.1. R

Para el tratamiento de los datos se ha utilizado el software estadístico de uso libre CRAN, más conocido como R ([R Core Team, 2013](#)). R puede definirse como un software de análisis estadísticos, como un generador de gráficos o como un lenguaje de programación. Si bien es un software pensado para su uso sobre interfaces de código, para la realización de este TFG se ha utilizado la interfaz gráfica RStudio con el fin de hacer que su uso resulte más amigable.

R, como la mayoría de software que funciona sobre sistema operativo GNU/Linux, se compone de módulos o paquetes que se incorporan a una base del programa para extender sus posibilidades y funciones. El paquete base de R ya incluye las operaciones estadísticas básicas necesarias para la elaboración de la clasificación angular y el Índice de Acuerdo Espectral (IAE) con la única excepción de que para poder aplicar el analizador Continuum Removal (CR) se debe descargar un paquete adicional llamado prospectr ([Stevens & Ramirez-Lopez, 2014](#)).

R es uno de los lenguajes más utilizados en estadística. Adicionalmente abarca otros muchos campos debido a la cantidad de librerías disponibles como tratamiento de imágenes satélite o clasificación supervisada.

2.3.2. GRASS GIS

Para el tratado de imágenes Landsat y su posterior clasificación se utiliza el programa de SIG gratuito y de código abierto Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) ([GRASS Development Team, 2012](#)). Este es un potente software en lo que a utilización de manejo y análisis de información geoespacial se refiere. Su funcionalidad es similar a otros programas SIG como QGIS, en los cuales, mediante extensiones aplicadas al corazón del programa podemos ampliar sus funciones y adaptarlas a nuestras necesidades ([Neteler & Mitasova, 2002](#)). Como R, GRASS se puede utilizar mediante una interface de código pero se optó por la aplicación de una interface gráfica de usuario que facilita y agiliza mucho el trabajo.

2.3.3. L^AT_EX

En la redacción de este documento de memoria se empleó L^AT_EX, el intérprete de T_EX, lenguaje y motor de composición de textos de bajo nivel potente y versátil especialmente indicado para elaborar documentos de texto de alta calidad tipográfica. L^AT_EX es un conjunto de macros escritas en lenguaje T_EX para la realización de múltiples tareas en lo que a la redacción de un documento de texto se refiere ([Hernández, 2011](#)) ([Galindo Riaño et al., 2001](#)) ([Lamport, 1994](#)).

Como editor se utilizó TeX Maker ([Brachet, 2003-2014](#)) un entorno integrado de edición que facilita la redacción, edición, compilación y revisión del documento.

Para la gestión de la bibliografía, las referencias cruzadas y que fuera correctamente incluida en este

documento se ha utilizado el programa JabRef. Este software compila la bibliografía mediante BibTeX.

2.4. Técnicas de análisis espectral

Las técnicas de separabilidad empleadas en este TFG serán:

- Codificación binaria e índice de acuerdo espectral.
- Clasificación angular.
- Continuum removal.

Se utilizarán para ello diversas funciones creadas en el lenguaje de programación R que se aplicarán a los datos tomados en campo por el tutor Rafael Enrique Corrales.

2.4.1. Índice de acuerdo espectral

Con el fin de cuantificar de alguna forma la similitud entre los espectros de dos cubiertas a priori diferentes, podemos aplicar lo que se llama IAE ([Chuvieco Salinero, 2002](#)), que viene dado por la siguiente expresión:

$$IAE = \frac{\sum_{k=1,m} (CB_{i,k} - CB_{j,k})^2}{m} \quad (2.1)$$

Siendo $CB_{i,k}$ la codificación binaria del espectro i para cada banda k , $CB_{j,k}$ la codificación binaria del espectro j para cada banda k y m el número de bandas.

Este método de cuantificación está basado en una codificación binaria (0 y 1) del espectro para cada banda. Cuanto más cercano sea el valor del IAE a 0, los espectros serán más similares, al contrario que cuanto más se aproxime el valor a 1. De esta forma no solo se puede obtener un análisis cuantitativo de la similitud entre dos espectros, sino que también podemos realizar un análisis a simple vista realizando gráficas de la clasificación binaria de cada espectro.

En la figura 2.1 se muestra el script de la función en R a la que se le aplicarán los datos de campo y que devuelve el dato de acuerdo espectral.

2.4.2. Continuum removal

El método de CR o, como lo cita [Chuvieco Salinero \(2002\)](#), análisis de absorción diferencial frente a la tendencia, es una técnica de análisis en la que se marcan en cada observación los valores máximos

```

IAE <- function(i , j) {

  mediai = mean( i$V5)
  CBi = sapply( i$V5, FUN=function(x) { if(x>=mediai) {1} else {0}})

  mediaj = mean( j$V5)
  CBj = sapply( j$V5, FUN=function(x) { if(x>=mediaj) {1} else {0}})

  Indice = sum((CBi-CBj)^2)/length(CBi)
  return(Indice)
}

```

Figura 2.1: Función del Índice de Acuerdo Espectral en R. Fuente: Elaboración propia.

relativos de reflectividad. Estos máximos sirven como indicadores de tendencia de la observación. Esta técnica busca eliminar el efecto de albedo, permitiendo centrar el análisis en la absorción diferencial propia de cada banda. Lo analizado principalmente será la intensidad de la absorción o profundidad en cada sección de la gráfica, así como la asimetría y anchura con el fin de detectar similitudes entre dos o más muestras espectrales. Fue utilizado por primera vez en 1999 por Kokaly y Clark.

[Huang et al. \(2004\)](#) testaron la efectividad de esta técnica para estimar el contenido de substancias químicas en hojas (de donde se extraen los ejemplos de la figura 2.2). En otro ejemplo [Filippi & Jensen \(2007\)](#) emplean el CR como utilidad para realizar clasificaciones de vegetación con imágenes hiperespectrales. Y [Underwood et al. \(2003\)](#) utiliza este método para detectar y determinar el impacto de especies forestales invasoras sobre otras especies autóctonas apoyándose también en imágenes hiperespectrales.

Este método no aporta un valor numérico de cuantificación de la similitud entre dos espectros, centrándose en un análisis gráfico de cada respuesta por separado.

En la figura 2.3 se muestra el script de la función en R a la que se le aplicarán los datos de campo y que devuelve la gráfica de CR.

Se puede observar como mediante el comando “require()” se llama al paquete “prospectr”, que debe estar instalado para que el script funcione correctamente. Para ello se utilizó el instalador de paquetes de RStudio, localizando el paquete requerido en el repositorio oficial de RCAN e instalando las dependencias necesarias, pero también se podría haber hecho con el comando “install.packages()”. El comando

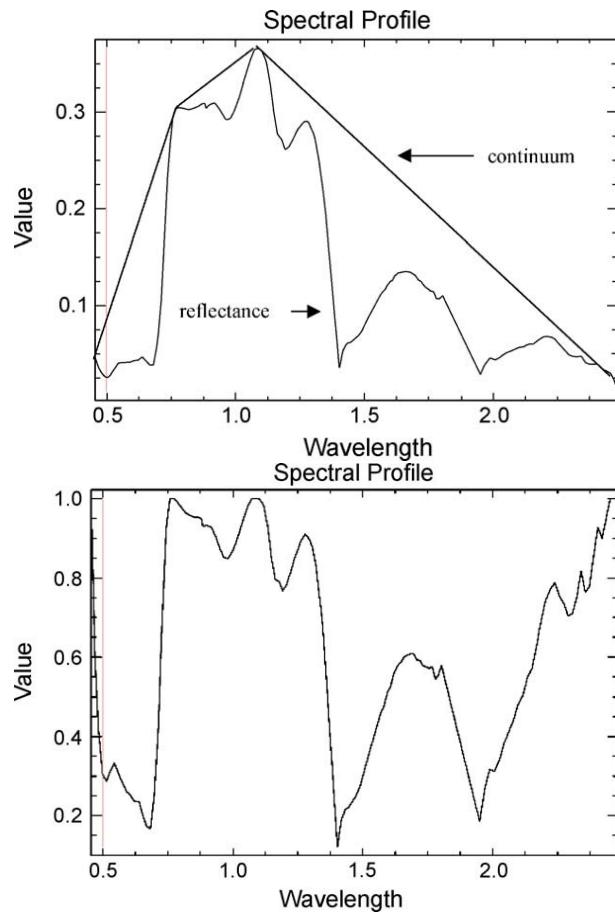


Figura 2.2: Ejemplo de aplicación de la técnica continuum removal. Fuente: Extraído de [Huang et al. \(2004\)](#).

```
require(prospectr)

cr <- continuumRemoval(data1$V5, data1$V4, type="R",
                         interpol="linear")

grafica(data1)
lines(data1$V4, cr)
```

Figura 2.3: Función de continuum removal en R. Fuente: Elaboración propia a propia a partir de [Stevens & Ramirez-Lopez \(2014\)](#).

```

AE <- function(i ,j) {

  Ri = i$V5
  Rj = j$V5

  Angulo = acos (sum(Ri*Rj)/(sqrt(sum(Ri^2))*sqrt(sum(Rj^2))))
  return(Angulo)
}

```

Figura 2.4: Función de clasificación angular en R. Fuente: Elaboración propia.

“grafica()” es la llamada a una función creada para presentar la gráfica a nuestro gusto, mientras que con el comando “lines” se nos permite superponer la gráfica de CR a la anterior.

2.4.3. Clasificación angular

La clasificación angular calcula la similitud entre dos espectros a partir de su distancia angular espectral. Originalmente este método compara espectros desconocidos con otros de referencia tomados, por ejemplo, de bibliotecas espetrales o de la misma imagen (Girouard *et al.*, 2004) con el fin de asignar píxeles desconocidos a clases de referencia conocida en una clasificación temática. El algoritmo de clasificación angular es el siguiente:

$$\theta = \arccos \frac{\sum_{k=1}^m \rho_{i,k} \rho_{j,k}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m \rho_{i,k}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^m \rho_{j,k}^2}} \quad (2.2)$$

Siendo $\rho_{i,k}$ la reflectividad del espectro i en una banda k , $\rho_{j,k}$ la reflectividad del espectro j en la misma banda y m el número de bandas.

Los espectros serán más similares cuanto menor sea el valor del ángulo θ de la ecuación 2.2.

En la figura 2.4 se muestra el script de la función en R a la que se le aplicarán los datos de campo y que devuelve el valor del ángulo θ .

2.5. Imágenes de satélite

2.5.1. Landsat 8

Landsat 8 dispone de 11 bandas espectrales: 9 del sensor OLI (expuestas en la tabla 1.4) y 2 del sensor Thermal Infrared Sensor (TIRS) que no son de interés para este trabajo.

Como los datos del radiómetro de campo solo abarcan las longitudes de onda comprendidas entre 325nm y 1075nm solo son de interés las cinco primeras bandas que se detallan a continuación:

- Banda 1 (Coastal/Aerosol) [430-450 nm]: Detecta azules y violetas intensos. Solventa los problemas de la dispersión de Rayleigh. Facilita la detección de la calidad de aguas poco profundas y partículas de polvo o aerosol en la atmósfera.
- Banda 2 (Blue) [450-510 nm]: Detecta el azul del espectro visible. Útil para diferenciar el suelo desnudo de la vegetación y detectar zonas pavimentadas como carreteras o áreas urbanas.
- Banda 3 (Green) [530-590 nm]: Detecta el verde del espectro visible. Sensible al nivel de turbidez del agua. Brillante en zonas de tierra árida y oscura en zonas boscosas o de cultivos.
- Banda 4 (Red) [640-670 nm]: Detecta el rojo del espectro visible. Útil en la clasificación de zonas vegetales pero no diferencia estas de agua, puesto que aparecen como zonas oscuras.
- Banda 5 (NIR) [850-880 nm]: Detecta el infrarrojo cercano. Especialmente importante en ecología porque la vegetación vigorosa la refleja. Útil para la obtención del Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) y distinguir tipos de vegetación.

2.5.2. Obtención de las imágenes

Las imágenes se obtuvieron del servicio Earth Explorer, de la EROS de la USGS. Estas imágenes ya vienen con una corrección geométrica previa hecha, por lo que no será necesario aplicar más correcciones de este tipo. En un archivo .txt asociado a las imágenes .tiff para cada banda se especifica que el método de corrección utilizado ha sido el de convolución cúbica.

En concreto, los archivos que nos ofrece el servicio de descargas son:

- Una imagen en composición de color natural como las que se muestran en la figura 2.5.
- Una imagen térmica que no nos será de utilidad.

- Una imagen de 8 bits que cuantifica la calidad de la observación.
- Las imágenes anteriormente citadas georreferenciadas.
- Las imágenes correspondientes a cada banda de Landsat 8 con la corrección geométrica aplicada (level 1) en formato GeoTIFF.

Se trata de un producto de Level 1 Terrain (L1T) con correcciones geométricas sistemáticas aplicadas utilizando para ello puntos de control terrestre o información de posición integrada a bordo ([Ariza, 2013](#)).

Se entrega así una imagen registrada a la proyección WGS84. Adicionalmente en este nivel de producto contiene una corrección topográfica por el desplazamiento del terreno debido al relieve. Las imágenes se encuentran en formato de ND que se pueden transformar a valores de reflectividad Top of Atmosphere (TOA) en las bandas 1 a 9.

Para abarcar la zona de estudio se necesitaron descargar dos imágenes que tienen las siguientes características:

Cuadro 2.1: Características de las imágenes Landsat tomadas (figura [2.5](#)).

IMAGEN	PATH	ROW	FECHA	COBERTURA
1 (a)	18	51	06/10/2014	1.46 %
2 (b)	17	51	16/11/2014	45.91 %

Se observa en la tabla [2.1](#) que la cobertura nubosa de la segunda imagen es elevada, pero en la zona de estudio, que ocupa un pequeño porcentaje de esta imagen, la cobertura es aceptable. Este hecho también se observa en las imágenes de calidad (figura [2.6](#)) en las que las nubes y nubes altas se marcan de color blanco y amarillo respectivamente.

Se consideró que el desfase temporal entre ambas imágenes no era determinante suponiendo un escaso cambio fenológico de las especies de mangle en ese periodo de tiempo.

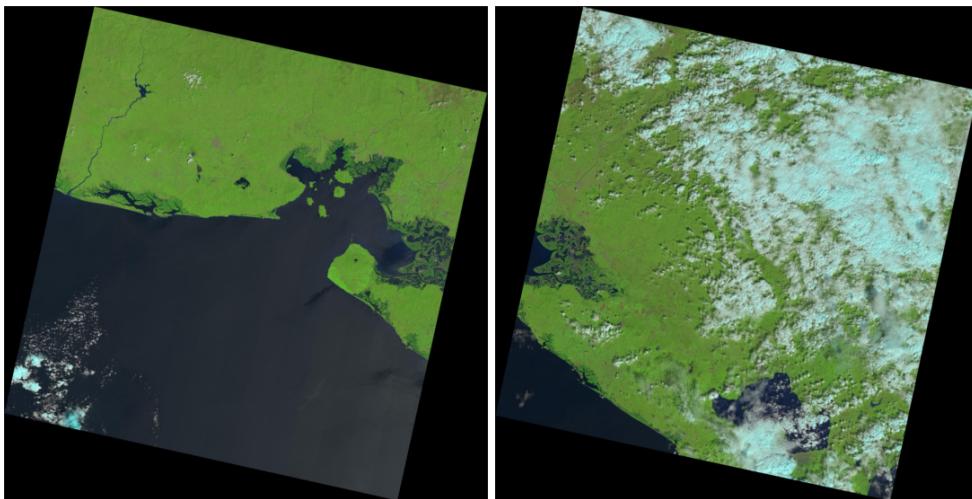
Las imágenes utilizan el siguiente código de identificación en el nombre ([Ariza, 2013](#))

LXSPPR_RYY_YDDGSIVV

donde:

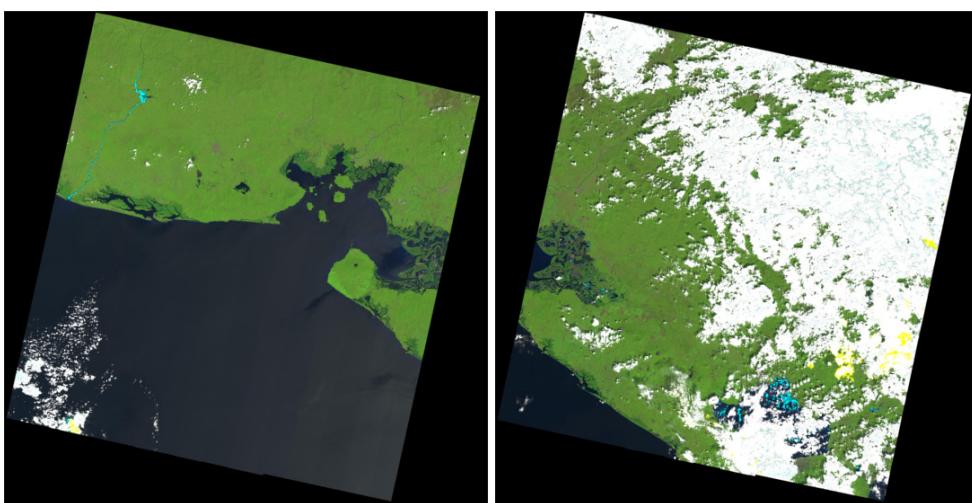
- L: Landsat.

- X: Sensor.



(a) Imagen Landsat path 18 row 51 (06/10/14) (b) Imagen Landsat path 17 row 51 (16/11/14)

Figura 2.5: Imágenes Landsat con corrección geométrica utilizadas para el trabajo. Fuente: USGS.



(a) Imagen de calidad Landsat path 18 row 51
(06/10/14) (b) Imagen de calidad Landsat path 17 row 51
(16/11/14)

Figura 2.6: Imágenes de calidad de Landsat de 8 bits. Fuente: USGS.

- S: Satélite.
- PPP: Path.
- RRR: Row.
- YYYY: Año de adquisición de la imagen.
- DDD: Día juliano del año.
- GSI: Identificador de la estación terrestre de seguimiento.
- VV: Versión del archivo.

2.5.3. Tratamientos previos

Como se decía en el apartado anterior, la geometría de las imágenes ya está corregida. Pero es necesario realizar algunos procedimientos antes de unirlas y recortarlas finalmente para que se adapten a la zona de estudio y sea más cómodo trabajar con ellas. Estos procedimientos son el tratamiento de los valores nulos y la transformación de los ND en reflectancias.

Lo primero que se debe hacer en GRASS es crear la localización de nuestro proyecto y añadir las imágenes al directorio de mapas. Los datos de la localización se establecen gracias a la lectura por parte de GRASS de la configuración de proyección y datum de un archivo de datos georreferenciado, es decir, de cualquier imagen de Landsat del trabajo.

Valores nulos

El tratamiento de los valores nulos se lleva a cabo mediante el comando “r.null” como sigue:

```
r.null map=LC80180512014279LGN00_B1@TFG setnull=0 null=-99
```

donde “map” corresponde a la banda a tratar seguido por el mapset, “setnull” indica el valor de los elementos nulos y “null” indica el nuevo valor de estos elementos. Se elige un valor de -99 para evitar posibles errores de realizarse, por ejemplo un NDVI que trabaja con valores de píxel de [-1,1].

Transformación a reflectancias

Los ND pueden ser reescalados a valores de reflectancias TOA gracias a los coeficientes radiométricos provistos en el archivo .txt que acompaña a las imágenes. Esta transformación se hará con el comando i.landsat.toar como sigue:

```
i.landsat.toar
input_prefix=LC80170512014320LGN00_B
output_prefix=LC80170512014320LGN00_TOAR_B
metfile=/home/marcos/grassdata/Imagenes/Landsat/
P17R51/Base/LC80170512014320LGN00_MTL.txt
sensor=oli8
method=dos4
date=2014-11-16
sun_elevation=52.01756824
```

donde “input_prefix” es el prefijo del nombre de las imágenes para cada banda, “output_prefix” es el prefijo que le queremos dar a las nuevas imágenes corregidas, “metfile” es el archivo de metadatos asociado, “sensor” el tipo de sensor, “date” y “product_date” son las fechas de adquisición y creación y “sun_elevation” la elevación en grados del Sol.

Mosaico de imágenes

El mosaico de imágenes se realizó utilizando la herramienta de la librería Geospatial Data Abstraction Library (GDAL) gdal_merge.py con las siguientes consideraciones:

- Es un método que se ejecuta en la terminal de Linux. Para un método guiado se utilizaría, por ejemplo, la herramienta raster/combinar en QGIS.
- Las dos imágenes deben estar en el mismo sistema de coordenadas.
- Utiliza como método de remuestreo el de vecino más próximo.
- La última imagen de la lista será copiada sobre la precedente en el caso de haber solape.

La línea de comando en cuestión es la siguiente (para las imágenes de la primera banda y en el caso de tener situadas las imágenes en la misma carpeta):

```
gdal_merge.py -n 0 -v LC80170512014320LGN00_B1.TIF
LC80180512014279LGN00_B1.TIF -o mosaicol.tif
```

En este caso se utilizan los comandos asociados u opciones siguientes: -n para que se ignoren los píxeles con valores nulos, -v para que se detallen las operaciones realizadas y -o que permite dar nombre al archivo de salida.

```

Processing file      1 of      2,  0.000% completed.
Filename: LC80170512014320LGN00_B1.TIF
File Size: 7581x7761x1
Pixel Size: 30.000000 x -30.000000
UL:(440385.000000,1554615.000000)  LR:(667815.000000,1321785.000000)
Copy 0,0,7581,7761 to 5590,20,7581,7761.

Processing file      2 of      2, 50.000% completed.
Filename: LC80180512014279LGN00_B1.TIF
File Size: 7611x7791x1
Pixel Size: 30.000000 x -30.000000
UL:(272685.000000,1555215.000000)  LR:(501015.000000,1321485.000000)
Copy 0,0,7611,7791 to 0,0,7611,7791.

real    0m2.820s
user    0m2.239s
sys     0m0.521s

```

Figura 2.7: Dialogo resultante del mosaicado de las imágenes. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2.7 se observa el diálogo resultante de la operación anterior que confirma que se ha hecho bien el mosaico. En él tenemos datos de las imágenes como el nombre, las coordenadas de la esquina superior izquierda e inferior derecha, tamaño del píxel y tiempo que se necesitó para realizar la operación.

De hacerlo en GRASS, el comando sería r.patch, con la salvedad de que las dos imágenes deben estar en la misma región establecida (cuadro 2.2), quedando la siguiente línea de orden:

```
i.image.mosaic image1=LC80180512014279LGN00_TOAR_B1@PERMANENT
image2=LC80170512014320LGN00_TOAR_B1@PERMANENT
```

Recorte de la imagen

Para trabajar solamente con la zona de estudio es necesario recortar la imagen. Para ello empleamos las opciones de visualización de GRASS con una extensión de coordenadas superior derecha de (523526.53 , 1500863.43) e inferior izquierda de (371353.76 , 1402136.71). Una vez fijada se selecciona la opción de zoom “set computational region from display extent” que simplemente reduce la región establecida a la extensión de la visualización actual y nos permite realizar operaciones de esta.

Con el comando r.resample se hace el remuestreo mediante vecino más próximo del área del recorte permitiendo obtener la imagen final para cada banda. El comando se emplea de la siguiente forma:

```
r.resample input=MosaicoB2@PERMANENT output=L8GF_B2
```

2.6. Estudio radiométrico

Cuadro 2.2: Datos de la región establecida.

Proyección	1 (UTM)
Zona	16
Datum	WGS84
Elipsoide	WGS84
Norte	1555215
Sur	1321485
Oeste	272685
Este	667815
Res. esp. vertical (m)	30
Res. esp. horizontal (m)	30
Filas	7791
Columnas	13171
Celdas	102615261

Capítulo 3

Resultados

3.1. Comprobación

Lo primero y necesario es saber si los datos de reflectividad de las especies de mangle se adaptan a los datos de las imágenes raster de Landsat 8 que se han corregido. Para ello tenemos una serie de puntos en los que se conoce la existencia de bosque de mangle (cuadro 3.1). Se creará en GRASS una capa vectorial con estos puntos a las que se le añadirán los valores raster de reflectividad de cada banda.

Los pasos a seguir fueron los siguientes:

- Creación de una capa vectorial en blanco de nombre “PuntosControl” y añadirla al árbol de capas.
- Crear una base de datos asociada a la capa con “v.db.addtable” asignando nuevos campos: “Nombre” de tipo “varchar” en el que se especificará el topónimo de la zona; y “X” e “Y” para las

Cuadro 3.1: Serie de puntos conocidos de existencia de manglar.

EAST	NORTH	NOMBRE
452379	1476560	Pasadero de los Pericos
450493	1476503	Punta de los Elotes
448571	1484829	Corinto
448391	1485182	Corinto
438047	1488915	Jiote Grande
434163	1487386	Los Ganchos
440251	1489561	La Brea

coordenadas.

- Inserción de los datos del cuadro [3.1](#).
- Dar coordenadas reales a los puntos con el comando “v.in.db” creando una nueva capa vectorial llamada “PuntosControl2”.
- Editar la tabla de esta última capa añadiendo los campos: B1, B2, B3, B4 y B5 para alojar los datos de cada una de las bandas en cada punto.
- Copiar los datos del raster en la tabla de la capa vectorial con el comando “v.wath.rast”.

Los gráficos de barras extraídos de la base de datos de la capa PuntosControl2 de GRASS es la mostrada en la figura En ellos se muestra el valor que devuelve el raster de cada banda en cada punto. La tabla de valores [3.2](#) es la siguiente:

Cuadro 3.2: Base de datos asociada a la capa PuntosControl2.

EAST	NORTH	NOMBRE	B1	B2	B3	B4	B5
452379	1476560	Pasadero Pericos	0.108972	0.087300	0.067607	0.046072	0.090234
450493	1476503	Punta Elotes	0.112087	0.089801	0.076839	0.056714	0.192792
448571	1484829	Corinto	0.112906	0.093940	0.081046	0.065742	0.143560
448391	1485182	Corinto 2	0.147221	0.135919	0.142650	0.170120	0.224765
438047	1488915	Jiote Grande	0.123525	0.105970	0.092053	0.086663	0.073201
434163	1487386	Los Ganchos	0.110154	0.089415	0.072701	0.056669	0.035225
440251	1489561	La Brea	0.114179	0.094327	0.084890	0.071473	0.262218

3.2. Primeras conclusiones

Una vez introducidos los datos en R se obtienen las gráficas mostradas en la figura [3.1](#) y el conjunto de ellas en la figura [3.2](#), de donde se pueden sacar las primeras conclusiones.

Como se aprecia en las figuras los datos presentan unas alteraciones al inicio y al final que son propias del radiómetro. Se procedió a deshechar estos datos haciendo un corte de colas entre los valores 420 nm y 900 nm de longitus de onda para preservar lo máximo posible la integridad de los datos y que no afectaran a los análisis de separabilidad. El número de observaciones se reduciría a 481 por las 751 originales. Las gráficas resultantes son las mostradas en las figuras [3.3](#) y [3.4](#).

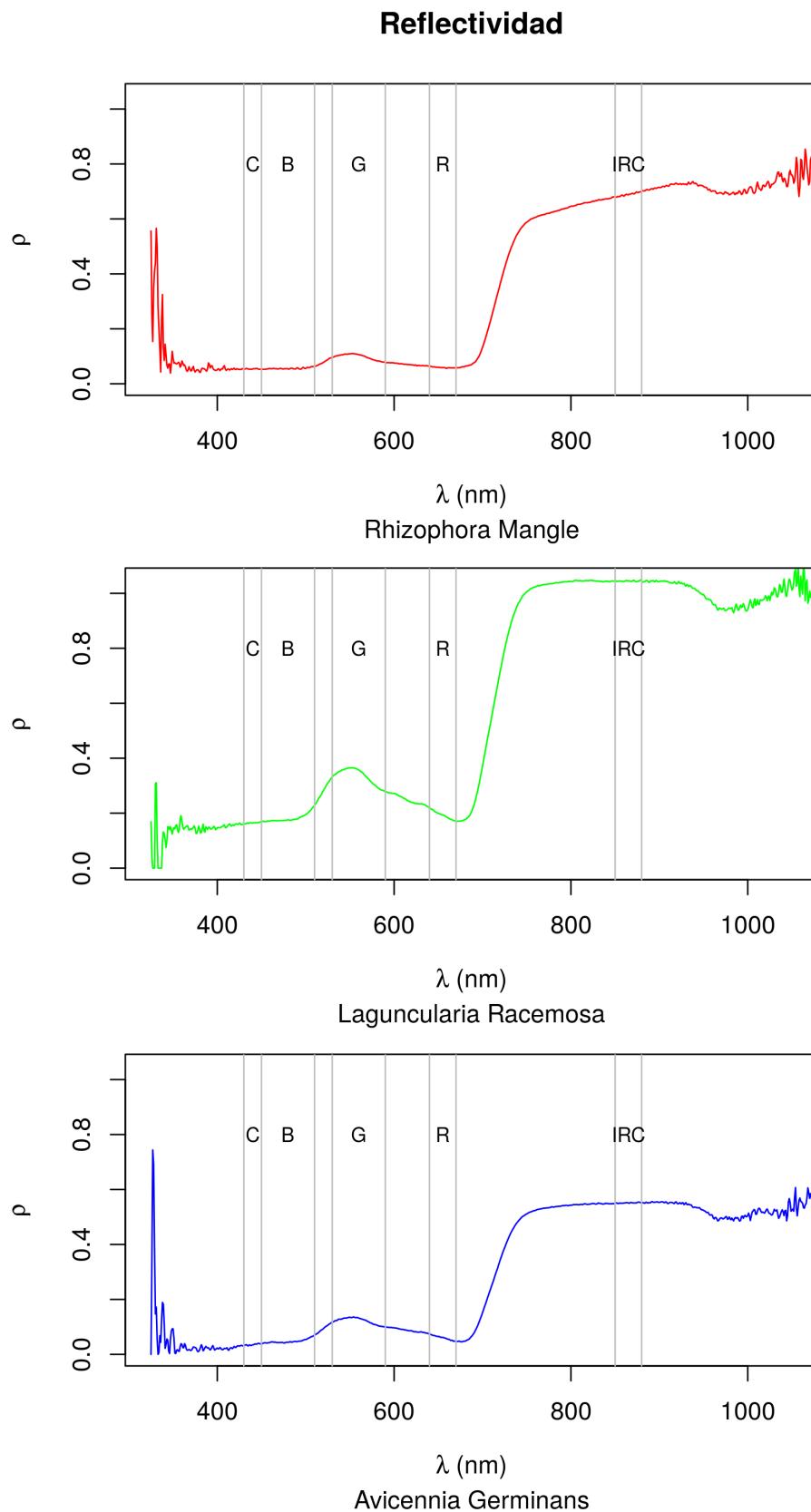


Figura 3.1: Gráficas de las firmas espectrales de las especies de mangle estudiadas. Fuente: Elaboración propia.

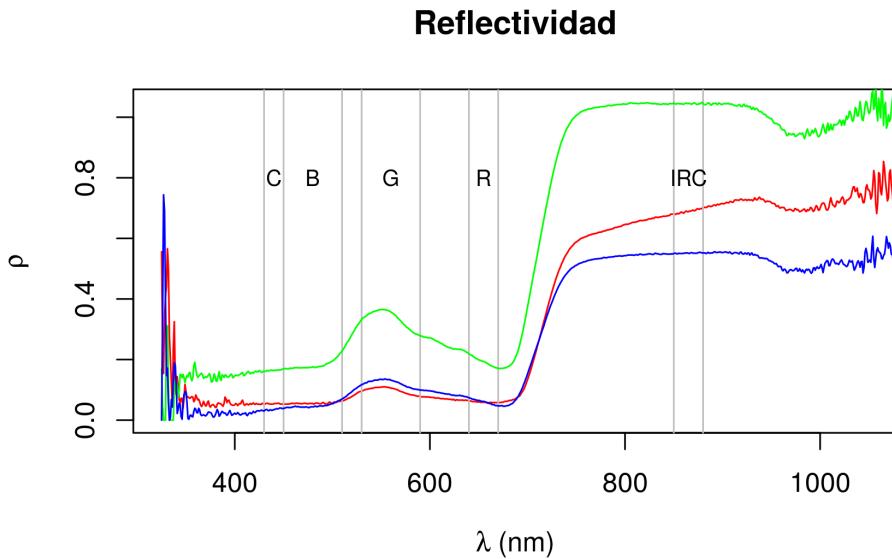


Figura 3.2: Gráfica conjunta de las tres firmas espectrales. Fuente: Elaboración propia.

Las tres especies tienen un máximo local en la banda correspondiente al verde (G), típica de las especies vegetales, así como otro máximo, este de mayor valor, correspondientes al intervalo de longitud de onda (λ) en el que está incluida la banda del IRC. Este último máximo es característico de la vegetación e indicaría su grado de salud. Se desechan los valores extremos de la gráfica que no aportan ningún valor significativo.

Por lo tanto el primer vistazo a las gráficas es el esperado, siendo lo más preocupante el aparente parecido entre las especies Rhizophora y Avicennia, que solo se diferencian en el valor del IRC.

3.3. Aplicación de los análisis

3.3.1. Índice de Acuerdo Espectral

Una vez aplicando el script con la función de IAE creado en R ya se aprecia que el resultado no es muy bueno, aunque esperado, siendo las diferencias casi inapreciables como se ve en la tabla 3.3 y en los gráficos de la figura 3.5, donde se aprecia mejor la poca diferencia espectral existente.

Las diferencias en este método son bajas debido a que se trata de tres especies que, aunque no sean de la misma familia, si son vegetales y coexisten formando asociación en el mismo ecosistema. De haber estudiado la diferencia entre especie vegetal, suelo y agua por ejemplo, las diferencias habrían sido más

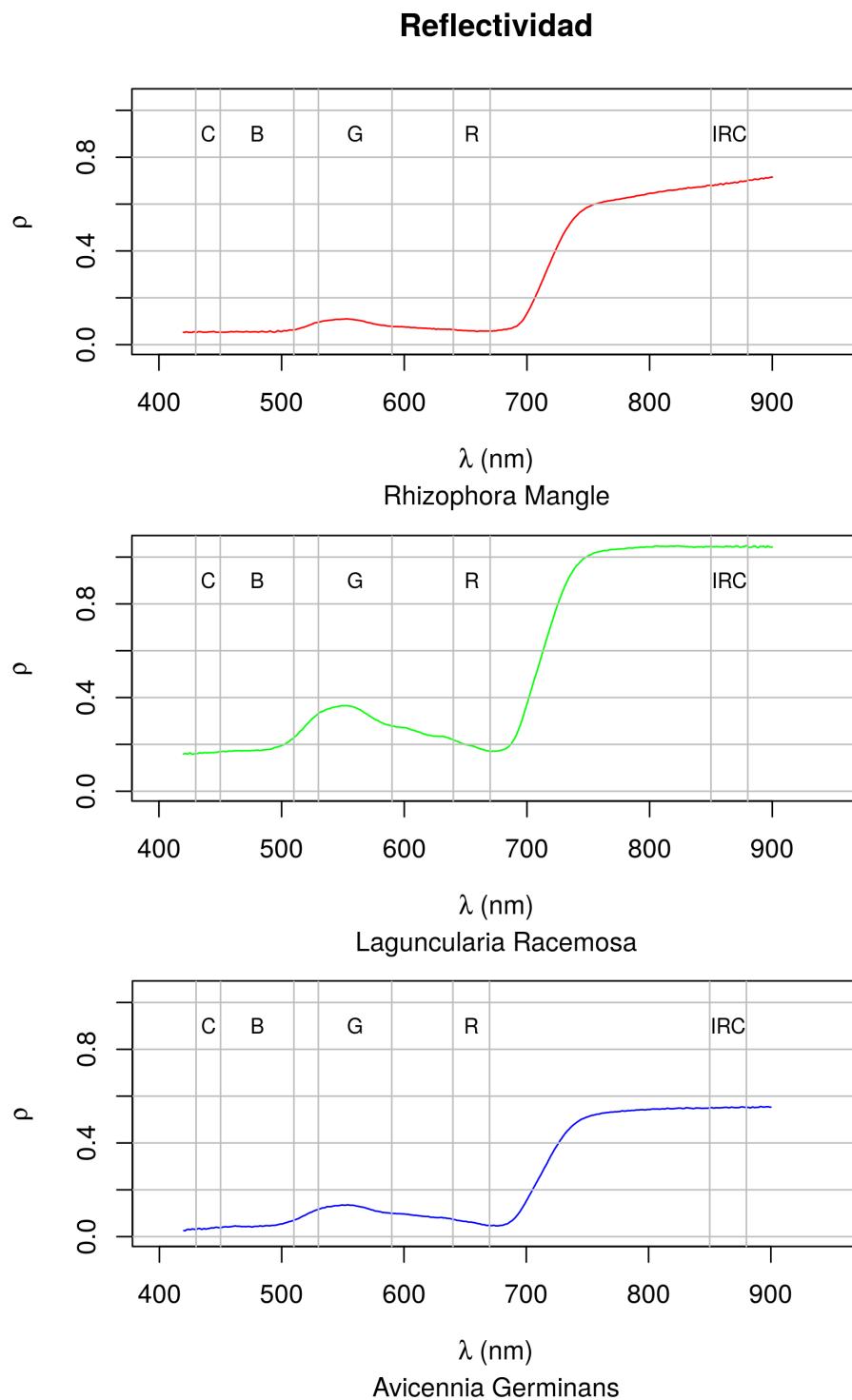


Figura 3.3: Gráficas de las firmas espectrales de las especies de mangle estudiadas una vez realizado el corte de los datos.
Fuente: Elaboración propia.

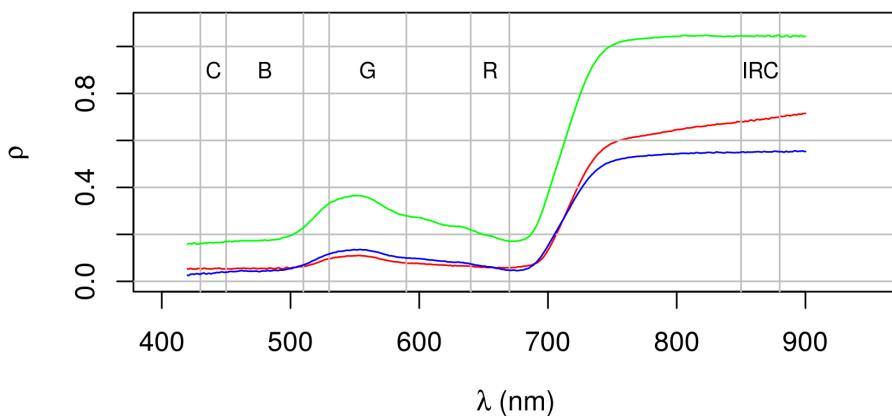


Figura 3.4: Gráfica conjunta de las tres firmas espectrales una vez realizado el corte de los datos. Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3.3: Valores de IAE para cada par de especies de mangle. Fuente: Elaboración propia.

	Rhizophora	Laguncularia	Avicennia
Rhizophora	—	0.0083	0.0062
Laguncularia	0.0083	—	0.0021
Avicennia	0.0062	0.0021	—

notables debido a la diferencia de valor medio de la respuesta espectral. En este caso, el valor medio de las tres especies sería el mostrado en la tabla siguiente:

Cuadro 3.4: Valor medio de la respuesta espectral para cada especie.

ESPECIE	ρ MEDIA	CORTE EN λ (nm)
Rhizophora	0.2897692	714
Laguncularia	0.5424927	710
Avicennia	0.2530166	711

El corte en λ que se menciona en la tabla 3.4 se refiere al valor de longitud de onda a partir del cual la reflectancia es mayor a la media y por tanto se provoca una cambio en el valor binario de 0 a 1 donde, de tener un mayor rango de longitud de onda observada habría más de un cambio. Se observan unos valores similares de λ para las tres especies, pero donde sí se notan diferencias son en el valor medio de la reflectancia, siendo el de la Laguncularia notablemente superior al de las otras dos especies.

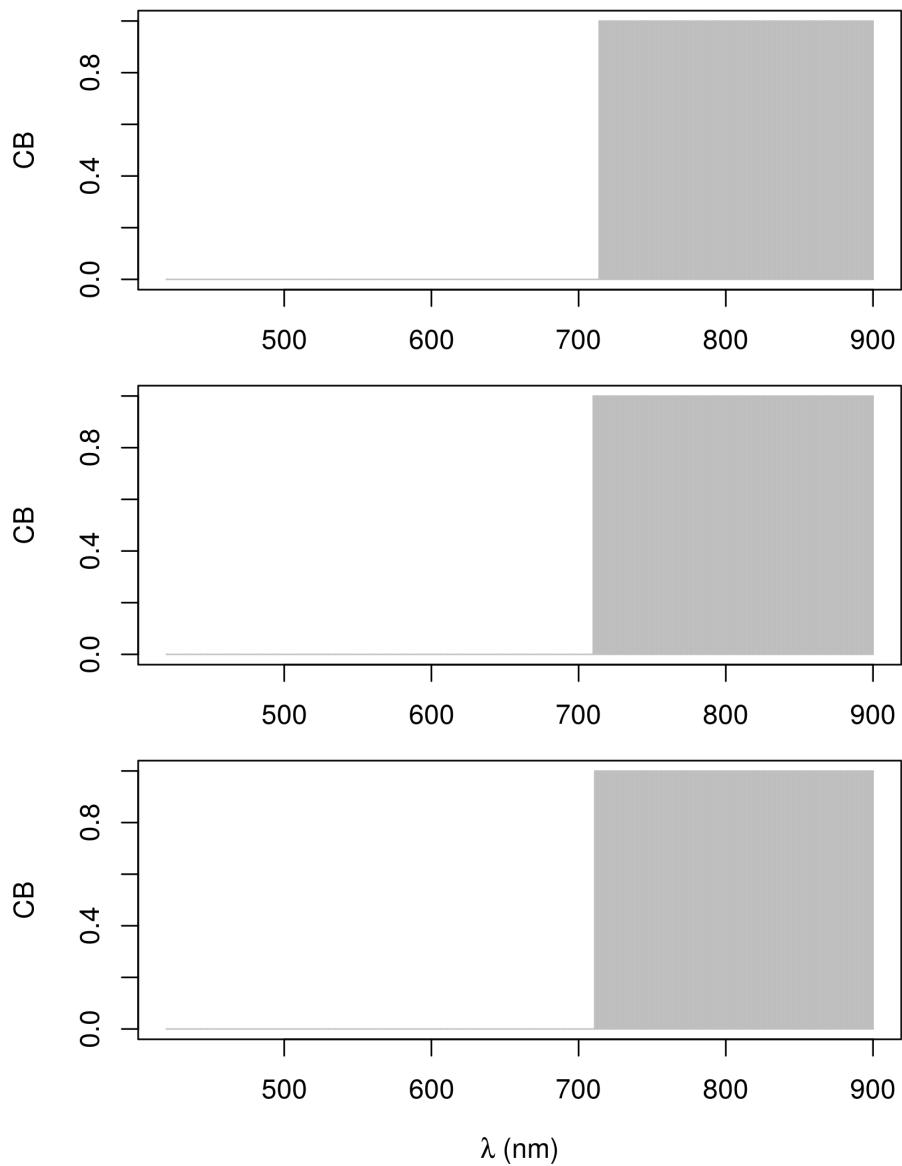


Figura 3.5: Gráficas de combinación binaria de las tres especies de mangle, por orden Rhizophora, Laguncularia y Avicennia.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Continuum Removal

Para el correcto funcionamiento del análisis se procedió a crear una matriz de 3x481 donde las filas corresponden a las tres especies analizadas y las columnas al valor de longitud de onda. El fin es el de presentar de mejor forma los datos en la función de CR de R y aunque el resultado es el mismo (que haciéndolo una por una) nos permite obtener este de forma más rápida y con menos pasos.

El script de la función en R previamente presentado en [2.4.2](#) sufre cambios, quedando de la siguiente manera:

```
matriz <- matrix(c(RhizophoraCorte$V5, LagunculariaCorte$V5,
                     AvicenniaCorte$V5),
                     byrow=TRUE,
                     nrow=3,
                     ncol=481)
bandas <- manglencorte$V4
cr <- continuumRemoval(matriz, bandas)
matplot(bandas, t(matriz), type="l", ylim=c(0,1))
matlines(bandas, t(cr2))
```

Figura 3.6: Script modificado de la función de CR escrita en R. Fuente: Elaboración propia.

Donde “manglencorte” es el archivo de datos con el corte realizado para cada especie como se explicó anteriormente. Se crea un objeto llamado “bandas” tomando los valores de la fila V4 de cualquiera de los archivos de datos. Se crea la gráfica con el comando “matplot” y con “matlines” se superpone la gráfica propia del método CR.

En la gráfica de la figura [3.7](#) se pueden observar las diferencias entre las tres especies que nos indica este tipo de análisis. Son tres los aspectos de esta gráfica a analizar: la profundidad y anchura de las partes convexas y la posición de los puntos mínimos.

En cuanto a la profundidad se observa una clara absorción en torno a los 490 nm y los 670 nm de las tres especies. En el caso de la Avicennia esta absorción es más acusada en ambos puntos. Rhizophora y Laguncularia muestran un comportamiento similar en la primera zona mientras que en la segunda la Laguncularia no muestra la absorción de la Rhizophora.

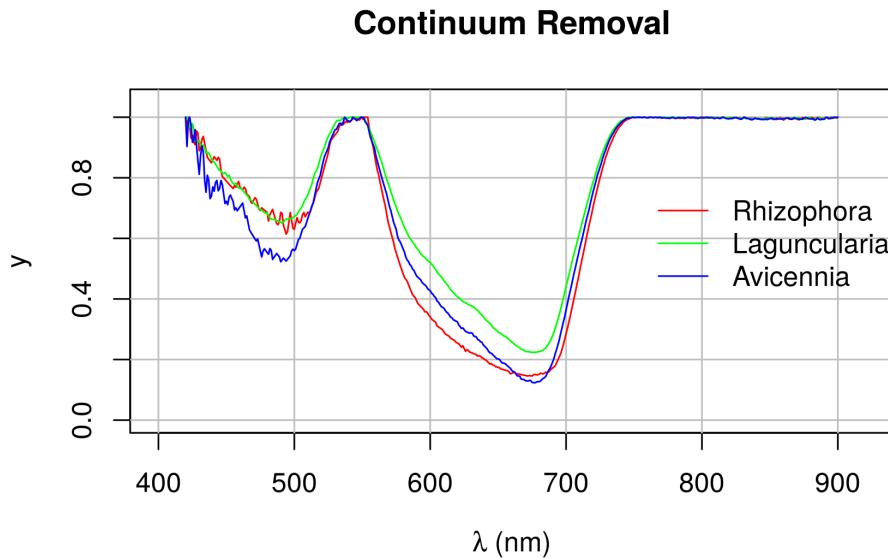


Figura 3.7: Gráfica de continuum removal para las tres especies de mangle. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la anchura lo más llamativo es la amplitud de los valores de la Rhizophora en torno a los valores centrales de la observación.

3.3.3. Clasificación angular

Una vez aplicado el script de R de la función los valores son los de la siguiente tabla:

Cuadro 3.5: Valores del Ángulo Espectral.

	Rhizophora	Laguncularia	Avicennia
Rhizophora	—	0.1651	0.0752
Laguncularia	0.1651	—	0.1062
Avicennia	0.0752	0.1062	—

Se puede observar una mayor separabilidad entre Rhizophora y Laguncularia, siendo menor en las otras combinaciones.

Bibliografía

- Andino, Rafael Enrique Corrales. 2011. Catalogo de firmas espectrales de especies florales, en la Ciudad Universitaria, Tegucigalpa, Fase 1. *Ciencias Espaciales*, 1(1).
- Ariza, Alexander. 2013. *Descripción y Corrección de Productos de Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mision)*. 1 edn. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- Bodart, Catherine, Eva, Hugh, Beuchle, René, Raši, Rastislav, Simonetti, Dario, Stibig, Hans-Jürgen, Brink, Andreas, Lindquist, Erik, & Achard, Frédéric. 2011. Pre-processing of a sample of multi-scene and multi-date Landsat imagery used to monitor forest cover changes over the tropics. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(5), 555–563.
- Brachet, Pascal. 2003-2014. *TeX Maker: The Universal LaTeX Editor*. <http://www.xmlmath.net/texmaker/>.
- Cajacuri, Miguel Ángel Laurente. 2011. Medición de la deforestación mediante percepción remota en la microcuenca río Supte, Tingo María–Perú. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 1–15.
- CEPAL, Naciones Unidas. 1999. *Honduras: evaluación de los daños ocasionados por el Huracán Mitch, 1998. Sus implicaciones para el desarrollo económico y social y el medio ambiente*. Tech. rept. LC/MEX/L. 367), 26 de enero de.
- Chen, Chi-Farn, Son, Nguyen-Thanh, Chang, Ni-Bin, Chen, Cheng-Ru, Chang, Li-Yu, Valdez, Miguel, Centeno, Gustavo, Thompson, Carlos Alberto, & Aceituno, Jorge Luis. 2013. Multi-Decadal Mangrove Forest Change Detection and Prediction in Honduras, Central America, with Landsat Imagery and a Markov Chain Model. *Remote Sensing*, 5(12), 6408–6426.
- Chuvieco Salinero, Emilio. 2002. *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. 2010 edn. Ariel, Planeta.

CIPF. 2014. *Anuario Estadístico Forestal 2013*. Vol. 28. Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF).

Curran, P. 1989. *Principles of remote sensing*. Longman.

Filippi, Anthony M, & Jensen, John R. 2007. Effect of continuum removal on hyperspectral coastal vegetation classification using a fuzzy learning vector quantizer. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, **45**(6), 1857–1869.

Galindo Riaño, Pedro, López Mesa, Miguel Ángel, Lagares Barreiro, Paula, Espina Aragón, Francisco José, Enriquez de Salamanca, José Manuel, & González Barroso, María Ángeles. 2001. *Manual de latex*. Servicio de Publicaciones, Universidad.

Girouard, G, Bannari, A, El Harti, A, & Desrochers, A. 2004. Validated spectral angle mapper algorithm for geological mapping: comparative study between QuickBird and Landsat-TM. *Pages 12–23 of: XXth ISPRS Congress, Geo-Imagery Bridging Continents, Istanbul, Turkey*.

Global Administrative Areas. 2012 (January). *Web GADM*. GADM.

GRASS Development Team. 2012. *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) Software*. Open Source Geospatial Foundation, USA.

Hernández, Luis Alberto Padrón. 2011. *Cómo Crear Documentos Científicos de Calidad con Herramientas de Software Libre*. 1 edn. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Huang, Zhi, Turner, Brian J, Dury, Stephen J, Wallis, Ian R, & Foley, William J. 2004. Estimating foliage nitrogen concentration from HYMAP data using continuum removal analysis. *Remote Sensing of Environment*, **93**(1), 18–29.

Jarvis, A., Reuter, H.I., Nelson, A., & Guevara, E. 2008. *Hole-filled seamless SRTM data V4*. International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). <http://srtm.csi.cgiar.org>.

Jiménez, Jorge A. 1994. El Manejo de los Manglares en el Pacífico de Centroamérica: Usos tradicionales y Potenciales. *Ecosistema de Manglar en América Tropical: Estructura, Función y Manejo. Serie Científica*, 275–290.

Jiménez, Jorge A. 1985a. Laguncularia Racemosa (L.) Gaertn. f. Mangle blanco. *U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station*, 4 p.

- Jiménez, Jorge A. 1985b. Rhizophora Mangle L. Mangle colorado. *U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station.*, 7 p.
- Jiménez, Jorge A., & Lugo, Ariel E. 1985. Avicennia germinans (L.) L. Mangle prieto. *U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station*, 6 p.
- LaboraTe. 2014. Investigación y sensibilización sobre la problemática de actividad acuícola insostenible y promoción de alternativas artesanales basadas en la economía social: puentes entre el Golfo de Fonseca (Centroamérica) y Galicia. *Consellería da Presidencia e Administración Pública*.
- Lamport, L. 1994. *LaTeX user's guide and reference manual* (2^a edición). Addison Welsley. *Reading, Mass.*
- Lara-Domínguez, Ana Laura, Yáñez-Arancibia, Alejandro, Yáñez-Arancibia, A, & Lara-Domínguez, AL. 1999. Productividad secundaria, utilización del hábitat y estructura trófica. *Ecosistemas de Manglar en América Tropical. Instituto de Ecología AC México, UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring, Maryland, USA*, 153–166.
- Lee, Tsai-Ming, & Yeh, Hui-Chung. 2009. Applying remote sensing techniques to monitor shifting wetland vegetation: A case study of Danshui River estuary mangrove communities, Taiwan. *Ecological engineering*, **35**(4), 487–496.
- Matellán Oliveira, Vicente, González Barahona, Jesús M., De Las Heras Quirós, Pedro, & Robles Martínez, Gregorio. 2004. *Sobre Software Libre (Ciencias Experimentales y Tecnología)*. Ciencias Experimentales y Tecnología URJC, vol. 2. Universidad Rey Juan Carlos.
- Neteler, Markus, & Mitasova, Helena. 2002. *Open source GIS: a GRASS GIS approach*. Springer Science & Business Media.
- Olaya, Victor. 2010. *Sistemas de Informacion Geografica*. Proyecto Libre.
- R Core Team. 2013. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Ramsar. 2014 (September). *The List of Wetlands of International Importance*.
- Schowengerdt, Robert A. 2006. *Remote sensing: models and methods for image processing*. Academic press.
- Stevens, Antoine, & Ramirez-Lopez, Leonardo. 2014. *An introduction to the prospectr package*.

- Underwood, Emma, Ustin, Susan, & DiPietro, Deanne. 2003. Mapping nonnative plants using hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, **86**(2), 150–161.
- Yáñez-Arancibia, Alejandro, & Lara-Domínguez, Ana Laura. 1994. Los manglares de América Latina en la encrucijada. *Faro*, **1**, 3–7.