

Trabajo fin de Máster:
Máster Universitario en Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Estudio mediante teledetección del litoral de Doñana:
Influencia del dique Juan Carlos I sobre la
morfología de la costa y las poblaciones vegetales
del sistema dunar.

Autor: Andrés Aguayo Ramírez

Tutor: Emilio Ramírez Juidías

Dpto. de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, Junio de 2018



Departamento de
Ingeniería Gráfica ETSI / ETSIA / ETSIE /

Trabajo Fin de Máster
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

**Estudio mediante teledetección del litoral de
Doñana: Influencia del dique Juan Carlos I sobre la
morfología de la costa y las poblaciones vegetales
del sistema dunar.**

Autor:

Andrés Aguayo Ramírez

Tutor:

Emilio Ramírez Juidías

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Ingeniería Gráfica;

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, Junio de 2018

Trabajo Fin de Máster: Estudio mediante teledetección del litoral de Doñana: Influencia del dique Juan Carlos I sobre la morfología de la costa y las poblaciones vegetales del sistema dunar.

Autor: Andrés Aguayo Ramírez

Tutor: Emilio Ramírez Juidías

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi padre y a mi madre, en especial, por su lucha continua y por hacer mis sueños realidad.

Agradecimientos

Es difícil sintetizar en pocas palabras la cantidad de agradecimientos que debería realizar, pues muchas personas me han aportado muchísimo en mi vida, tanto en lo personal como en lo académico. No me gustaría dejarme a ninguna de ellas por el camino de estas líneas que ahora siguen. Estos agradecimientos son para todos aquellos que me habéis hecho ser cómo soy y que gracias a eso he podido culminar mi carrera académica con este Trabajo Fin de Máster.

En primer lugar me gustaría agradecer a mi familia, a toda ella, pero en especial: a mi madre, por su fuerza, lucha, valentía, capacidad de sacrificio y por habernos criado como lo ha hecho; a mi padre, por su perseverancia, su dedicación y su preocupación para que nos labremos una profesión y un futuro; a mis hermanos Carmen y Alberto, por aguantarme durante tantos años y por enseñarme que nunca estaré sólo, siempre os tendré a vosotros; a Irene, por acompañarme en este camino durante ya casi 7 años y por aguantarme mis monólogos ingenieriles; a mi abuela, mis tíos, mis primos, y mis amigos más cercanos por ayudarme a llegar hasta aquí. Mis méritos son tanto vuestros como míos pues no puedo contar las veces que me habéis dado fuerza y ánimo para llegar hasta aquí.

En segundo lugar querría agradecer a todos mis profesores, tanto los que tuve en la Escuela de Caminos de la UPC como a los que he tenido en la ETSI de la Universidad de Sevilla. No sería justo hablar de unos sí y otros no, parte de lo que soy es gracias también a ellos, pero me gustaría resaltar la labor, la colaboración, la ayuda y la profesionalidad de quien me ha guiado en este TFM, mi tutor Emilio Ramírez Juidías. Gracias Emilio por ayudarme tanto a realizar este trabajo como a enseñarme facetas de la ingeniería y de la vida que me eran desconocidas, gracias por abrirme las puertas de tu despacho y de tus conocimientos.

No podría olvidarme de todos los compañeros y amigos de clase que he tenido durante estos dos años en el máster. Gracias Benito, Antonio e Ismael, por enseñarme que lo más importante es el equipo, así es cómo mejores resultados se obtienen. Hemos formado un equipo impresionante, sin vosotros no hubiese volado tan lejos. El trabajo duro, la capacidad de análisis y la astucia que nos ha caracterizado como grupo ha hecho que, además de forjar una amistad, hayamos realizado trabajos de gran calidad.

Agradecer a la vida que me ha tocado vivir, he sido muy afortunado, lo más preciado que tenemos y el mejor regalo recibido es la vida misma. Simplemente gracias y gracias.

Andrés Aguayo Ramírez

Sevilla, 2018

En el Parque Natural del Entorno de Doñana, un espacio altamente protegido, se han observado cambios en una de sus zonas más expuestas al mar, la zona de las Dunas de Doñana.

Varios son los autores que han realizado estudios sobre estos cambios, en especial enfocándose en la construcción del dique Juan Carlos I, que se encuentra a unos 45 kilómetros en línea recta de la zona estudiada en este trabajo. Así, la motivación principal de este trabajo surge con el fin de estudiar los cambios producidos en las Dunas de Doñana y establecer una relación con los principales agentes que han podido influir en su estado actual. La escala temporal de este trabajo se define teniendo en cuenta la construcción de dicho dique en el año 1981, por lo que las imágenes analizadas van desde la década de los 70 hasta la actualidad.

Para observar, estudiar, analizar y cuantificar estos cambios se ha usado la ciencia de la teledetección. La teledetección se define como la ciencia que es capaz de detectar a distancia información relativa a la superficie de la Tierra y sobre otros astros. Ésta, se basa en el uso de satélites y sensores para obtener imágenes satelitales. Ahora bien, la imagen obtenida necesita de un procesado y de una serie de técnicas, como la firma espectral o la clasificación supervisada, para extraer conclusiones de los resultados obtenidos.

No sólo se trata de analizar los cambios producidos en la zona de estudio, sino también si ha habido modificaciones en los principales agentes que puedan influir en dichos cambios. Esto es: analizar la evolución de los agentes climatológicos y oceánicos (temperatura, precipitación, evaporación, vientos, oleaje, marea y corrientes). También es necesario un profundo análisis de las características físicas de la zona de estudio para entender los resultados derivados del estudio mediante teledetección. Estas son: playas extensas y ricas en arena; batimetría suave con rotura de oleaje gradual; y las principales poblaciones vegetales como el Pino Piñonero y la Psamófila.

Los resultados obtenidos mediante teledetección de la zona de estudio han consistido en una pérdida de sistema dunar gradual a lo largo de los años, a favor de una ganancia de suelo definido como mixto y de suelo definido como vegetación. Respecto a la primera imagen analizada, que data del 21 de mayo de 1976, se han obtenido tasas de pérdida de sistema dunar del -37%, y de ganancia de suelo vegetación y mixto de +16% y +56% respectivamente y a fecha actual. Los resultados arrojados de firma espectral han corroborado que existe una pérdida gradual de sistema dunar. Para la fiabilidad de los resultados de ambos estudios se han efectuado análisis estadísticos como el test ANOVA y el control de histogramas y gráficos de dispersión.

En la escala temporal analizada, varios son los agentes que han sufrido modificaciones y que son los principales causantes del cambio en las Dunas de Doñana. Por un lado se tiene que el rango mareal se ha incrementado en 20-30 centímetros teniendo cierta influencia en el arrastre sedimentario y por ello en la afección a la zona de estudio. También se ha incrementado la tendencia en los registros de altura media mensual de ola, por lo que esto también ha ejercido cierta erosión en la zona de estudio. Además, el viento también ha aumentado sus registros, por lo que también es una variable a tener en cuenta en la erosión de sistema dunar. Por último se encuentra el dique Juan Carlos I, un dique que forma un ángulo de 27° con la costa y que mide más de 3 kilómetros de longitud. Éste ha ejercido cambios en planta en zonas cercanas al dique de +15°, +2° y -2°, y además conlleva zonas de sombra o erosión, zonas de acumulación y el efecto barrera que provoca al arrastre de sedimentos. Varios son los autores que han concluido sobre la influencia de este dique en la zona. Además, la altamente contrastada teoría de oleaje, los mecanismos como la difracción y la influencia de infraestructuras sobre la costa sustentan las distorsiones que los diques pueden provocar a la costa.

En resumidas cuentas, mediante un amplio estudio bibliográfico de la zona a analizar, el uso de la teledetección para detectar cambio, y el conocimiento de las afectaciones a la costa, se concluye que la zona estudiada se encuentra en erosión dunar debido a los agentes comentados en el párrafo anterior.

In the Natural Park Entorno de Doñana, a highly protected space, changes have been observed in one of its most exposed to the sea zones, the Dunas de Doñana.

Several authors have conducted studies about these changes, in special focusing on the construction of the dike Juan Carlos I, which is located 45km straight ahead the zone studied in this work. Thus, the aims of this study are to examine the changes occurred in Dunas de Doñana and establish a relationship between the main agents which may have affected in its current state. The images analyzed in this paper are from the decade of the 70's until nowadays.

In order to observe study, analyze and quantify these changes, the Remote Sensing science has been used. The Remote Sensing is defined as the science which is capable of detect remotely information related to the Earth's surface and other planets. It is based in the use of satellites and sensors for obtaining satellite images. However, the obtained image needs to be processed through different techniques, as the spectral signature or the likelihood classification, to draw conclusions.

It is not only about analyzing the changes occurred in the studied zone, but also if the main influencing factors might have suffered any modifications. That means analyzing the evolution of the weather and oceanic agents (temperature, rainfall, evaporation, winds, waves, tide and water flows). A deep analysis of the physical characteristics is also needed to understand the results obtained. This are: wide and full of sand beaches soft bathymetry with gradual wave break; and the mainly vegetal population as the Pino Piñonero and the Psamofila.

The results obtained using Remote Sensing show a gradual dunes system loss through the years in contrast to the winning of mixed and vegetation soil. Regarding the first analyzed imaged, dated in May 21st, 1976, we obtained rates of a -37% dunes system loss and +16% and +56% vegetation and mixed soil, respectively. The results obtained through the spectral signature technique verify a gradual dunes system loss. For the reliability of the results for both studies statistical analysis have been carried on, as the ANOVA test, the histogram control and dispersion graphics.

In the temporal scale analyzed in this study, several of the main agents causing the changes in Dunas de Doñana have suffered modifications. On one hand, the tide has been increased in 20-30 centimeters, having influence over the sediment dragging. The wave height tendency average per month has been also increased, which has exercised erosion in the studied zone. In addition, the wind register has also augmented, which is also a variable to take into account when studying the erosion of the dunes system. Finally, there is the Juan Carlos I dike, which forms a 27° angle with the coast and measures over 3km long.

This has provoked changes in see from above in areas near to the dike of +15°, +2° and -2°, and moreover it entails areas in erosion, areas in accumulation and the barrier effect that it caused to the flow of sediments. Some authors have concluded about the influence of this dike to the zone of the study. Also, the wave theory, the diffraction and the influence of infrastructure over the coste sustain the distorsion that dikes could produce.

To sum up, through an extensive bibliographic study of the zone, the use of Remote Sensing to detect the change, and the knowledge of the affectation to the coste, it is concluded that the zone in study is in dune erosion due to the commented agents in the previous paragraph.

Agradecimientos	viii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xii
Índice de Tablas	xiv
Índice de Figuras	xv
Capítulo 1: Introducción	21
1.1 <i>Objetivos y motivación</i>	22
1.1.1 <i>Objetivos principales</i>	22
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	22
1.2 <i>Estructura del trabajo</i>	23
Capítulo 2: Zona de estudio	24
2.1 <i>Situación y descripción.</i>	24
2.1.1 <i>Extremo oeste de la zona de estudio: Dique Juan Carlos I</i>	26
2.1.2 <i>Extremo este de la zona de estudio: Sistema Dunar de Doñana</i>	28
2.2 <i>Formación histórica del litoral Onubense</i>	29
2.3 <i>Influencia de infraestructuras portuarias sobre la costa</i>	32
2.4 <i>Antecedentes en la zona</i>	35
2.4.1 <i>Artículos de prensa</i>	36
2.4.2 <i>Estudios del profesor Emilio Ramírez Juidías</i>	36
2.4.3 <i>Estudios del profesor Antonio Rodríguez Ramírez</i>	37
2.4.4 <i>Estudios de Cristina Aguilar Correa</i>	44
2.5 <i>Formación de los sistemas dunares de la desembocadura del río Guadalquivir</i>	45
2.6 <i>Escala temporal de estudio.</i>	46
2.7 <i>Variables climatológicas y morfodinámicas principales.</i>	46
2.7.1 <i>Temperatura media anual, precipitación total media y evaporación total media.</i>	47
2.7.2 <i>Datos de marea de la zona de estudio</i>	48
2.7.3 <i>Clima medio de oleaje y viento</i>	50
2.7.4 <i>Corrientes</i>	54
2.8 <i>Batimetría de la zona de estudio</i>	57
2.9 <i>Principales poblaciones vegetales</i>	60
2.10 <i>Litología de la zona</i>	63
Capítulo 3: Fundamentos de la teledetección	64
3.1 <i>Definición y concepto</i>	64
3.2 <i>Principios físicos de la teledetección</i>	66
3.2.1 <i>La onda electromagnética.</i>	66
3.2.2 <i>El espectro electromagnético</i>	67
3.2.3 <i>Ley de Planck y de Wien</i>	68
3.2.4 <i>Firma espectral</i>	70
3.2.5 <i>Factores externos que afectan a la reflectividad de las ondas</i>	71
3.2.6 <i>Interacciones de la atmósfera con la radiación electromagnética</i>	73

3.3	<i>Sensores y satélites de teledetección</i>	75
3.3.1	Tipos de sensores	75
3.3.2	La imagen digital	77
3.3.3	Resolución de un sistema sensor	78
3.3.4	Plataformas de teledetección: Sistema Landsat	80
Capítulo 4: Resultados del estudio		84
4.1	<i>Metodología para la obtención de los resultados.</i>	84
4.2	<i>Estudio de la firma espectral</i>	86
4.2.1	Imágenes utilizadas	88
4.2.2	Firmas espectrales tipo.	88
4.2.3	Resultados de los perfiles de estudio.	90
4.2.4	Fiabilidad de datos: Test ANOVA	105
4.3	<i>Método de la clasificación supervisada</i>	110
4.3.1	Introducción al método	110
4.3.2	Imágenes utilizadas	111
4.3.3	Tratamiento de las imágenes y refinamiento de la clasificación.	113
4.3.4	Clasificación supervisada tras el refinamiento.	114
4.3.5	Resultados en cambios de uso de suelo.	124
4.4	<i>Análisis de la zona del dique.</i>	126
Capítulo 5: Conclusiones		128
Capítulo 6: Futuras líneas de investigación		132
Bibliografía		133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de Pleamares y Bajamares observadas del mareógrafo Bonanza 2. Estos datos se calculan sobre toda la serie de pleamares y bajamares coincidentes con mareas vivas y muertas. Fuente datos: (Puertos-del-Estado, 2018). Niveles observados en cm.	49
Tabla 2: Ficha de posibles especies en zona de estudio – Sistema dunar de Doñana-. Fuente datos: (ANDALUCIA, 2018)	61
Tabla 3: Sensores a bordo del programa Landsat. Fuente: (Chuvienco, 2008)	82
Tabla 4: Puntos de Control Para la zona de estudio	86
Tabla 5: Imágenes Landsat utilizadas para la obtención de firma espectral	88
Tabla 6: Resumen de resultados por punto	90
Tabla 7: Datos de PPR para análisis ANOVA en Perfil 1	106
Tabla 8: Resultados ANOVA en Perfil 1.	106
Tabla 9: Datos de PPR para análisis ANOVA en Perfil 2.	107
Tabla 10: Resultados ANOVA en Perfil 2.	107
Tabla 11: Datos de PPR para análisis ANOVA en Perfil 3.	108
Tabla 12: Resultados ANOVA en Perfil 3.	108
Tabla 13: Datos de PPR para análisis ANOVA en Perfil 4.	109
Tabla 14: Resultados ANOVA en Perfil 4.	109
Tabla 15: Imágenes para estudio mediante clasificación supervisada.	111
Tabla 16: Resultados en % de suelo según clase para cada imagen clasificada.	124
Tabla 17: Resultados en % de cambio de suelo respecto a fecha 21/05/1976 y respecto a fecha anterior	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Situación de la zona de estudio. Fuente datos: DERA (ANDALUCIA, 2018), (GOOGLE MAPS, 2018). Elaboración propia mediante software ArcGis.	25
Figura 2: Síntesis de flechas de la desembocadura del Tinto-Odiel	26
Figura 3: Orientación media del Dique Juan Carlos I respecto a la costa. Fuente (GOOGLE MAPS, 2018)	27
Figura 4: Vista del Dique Juan Carlos I. Puerto de Huelva. Fuente: (Huelva Buenas Noticias, 2018)	27
Figura 5: Ubicación de zona de Doñana. Síntesis geomorfológica de los distintos sistemas. 1. Sustrato preholoceno, 2. Marismas de estuario, 3. Segunda fase de progradación en las flechas litorales, 4. Tercera fase de progradación, 5. Cuarta fase de progradación, 6. Sistemas de dunas cuaternarias, 7. Cordones litorales. Fuente: (Rodríguez-Ramírez & Cáceres-Puro, Dinámica y evolución de flechas litorales: el litoral onubense (SO, España), 2000)	28
Figura 6. Ubicación de la zona de estudio de este trabajo: sistema dunar de Doñana. Fuente: (GOOGLE MAPS, 2018).	29
Figura 7: Localización geográfica del litoral onubense y situación de los principales sistemas morfosedimentarios, I-III. Secuencia de dunas estabilizadas, 1.Marismas, 2.Sistemas de flechas litorales, 3. Corriente de deriva litoral. Fuente: (Rodríguez-Ramírez & Cáceres-Puro, Dinámica y evolución de flechas litorales: el litoral onubense (SO, España), 2000)	31
Figura 8. A. hace 6500 años, B. hace 4000 años, C hace 2400 años, D hace 800 años, 1. Segunda fase de progradación en las flechas litorales, 2. Tercera fase de progradación, 3. Cuarta fase de progradación, 4. Acantilados.	32
Figura 9: Mecanismo de los fenómenos de propagación de oleaje. Fuente: (Chamorro, 2016)	33
Figura 10: Ejemplos de difracción y de su implicación sobre la costa. Fuente: (Chamorro, 2016)	34
Figura 11: Vista aérea del Puerto de Castellon. Fuente: (Ruiz, 2013)	34
Figura 12: Ubicación del dique Juan Carlos I en el litoral Onubense respecto a las unidades fisiográficas definidas.	35
Figura 13: Cambios en las marismas de Isla Cristina. Fuente: (Ramírez-Juidías, Sedimentary processes in the Isla Cristina salt-marshes: Geomorphological changes of landscape, 2016)	37
Figura 14: Localización estudio Antonio Rodríguez Ramírez. Fuente: (Rodríguez-Ramírez A. , Cambios morfológicos y tasas recientes de erosión-depósito en la costa atlántica oriental de Huelva, 1997)	38
Figura 15: Tasas de retroceso y avance costero en los últimos 240 años. Fuente: (Rodríguez-Ramírez A. , Cambios morfológicos y tasas recientes de erosión-depósito en la costa atlántica oriental de Huelva, 1997)	39
Figura 16: Localización de los perfiles de las playas.	40
Figura 17: Situación de la urbanización de Matalascañas (arriba) y de los dique (abajo).	41
Figura 18: Secuencia evolutiva de la desembocadura del estuario del Tinto-Odiel desde 1829 hasta la actualidad. Fuente: (Antonio Rodríguez-Ramírez, 2008).	42
Figura 19: Evolución del tramo costero de influencia del Puerto de Mazagón desde la creación del dique. Fuente: (Antonio Rodríguez-Ramírez, 2008)	43
Figura 20: Secuencia de evolución en el área del Guadalquivir. A. Primer evento erosivo. B. Segunda fase progradante. C. Segundo evento erosivo. D. Tercera fase progradante. E. Tercer evento erosivo. F. Cuarta fase progradante (Rodríguez Ramírez, 1996).	45

Figura 21: Datos climáticos históricos principales. Fuente datos: AEMET - elaboración propia.	47
Figura 22: Ubicación del mareógrafo Bonanza2, utilizado para la obtención de los datos.	48
Figura 23: Registro histórico de los niveles mínimos (arriba) y máximos (abajo) del mareógrafo de Bonanza 2. Fuente: (Puertos-del-Estado, 2018). Niveles observados en metros.	49
Figura 24: Ubicación del nodo SIMAR 5036020. Fuente datos: (Puertos-del-Estado, 2018)	50
Figura 25: Distribución de periodo pico y altura significativa del punto SIMAR 5036020 en periodo 1958-2017 (arriba); evolución de la altura de oleaje media mensual (abajo). Valores en metros. Fuente: (Puertos-del-Estado, 2018)	51
Figura 26: Rosa de Oleaje del punto SIMAR 5036020 en el periodo 1958-2016. Fuente (Puertos-del-Estado, 2018)	52
Figura 27: Distribución de velocidad media de viento del punto SIMAR 5036020 en periodo 1958-2017 (arriba), evolución de la velocidad media de viento en m/s desde el año 1958-2018 (abajo). Fuente: (Puertos-del-Estado, 2018)	53
Figura 28: Rosa de Viento del punto SIMAR 5036020 en el periodo 1958-2017. Fuente (Puertos-del-Estado, 2018)	54
Figura 29: Representación de Corriente de Deriva. Fuente: (CURSO GEOGRAFIA DEL MAR, 2018)	55
Figura 30: Tipos de corrientes cercanas al litoral Onubense. Fuente datos: (ANDALUCIA, 2018)- Elaboración propia mediante software ArcMap 10.1. Punto azul: ubicación de la Boya del Golfo de Cádiz.	55
Figura 31: Velocidad media de la corriente (cm/s) al paso por la Boya del Golfo de Cádiz. Fuente	56
Figura 32: Batimétricas de la zona de estudio. Fuente de Elaboración propia mediante MatLab. Fuente datos: Prof. Alejandro López Ruiz: Asignatura Puertos y Costas.	57
Figura 33: Batimetría cercana a la costa y perfiles tipo de la zona de estudio. Fuente de Elaboración propia mediante MatLab.	58
Figura 34: Perfil 3 tipo de la zona de estudio. Fuente de Elaboración propia mediante MatLab	59
Figura 35: Perfil 4 tipo de la zona de estudio. Fuente de Elaboración propia mediante MatLab. Línea azul: perfil de playa; línea verde: Airy; línea roja: SWAN.	59
Figura 36: Ubicación de los distintos bancos de vegetación marina de tipo Zostera Marina. Fuente datos (ANDALUCIA, 2018), Elaboración mediante software ArcMap 10.1	62
Figura 37: Capas litológicas en el Parque Natural de Doñana y su entorno marino. Fuente datos: (Instituto de Cartografía y Estadística de la Junta de Andalucía, 2017). Elaboración mediante ArcMap 10.1.	63
Figura 38: Esquema y componentes principales de un sistema de teledetección espacial. Fuente: (REDIAM, 2018)	65
Figura 39: Formas de teledetección: (1) reflexión; (2) emisión; (3) reflexión-emisión. Fuente: (Chuvieco, 2008)	66
Figura 40: Esquema de una onda electromagnética	67
Figura 41: Espectro electromagnético. Fuente: (Chuvieco, 2008)	68
Figura 42: Principales coberturas a determinar mediante teledetección. Fuente: (JUIDÍAS, 2015)	69
Figura 43: Descomposición de flujos.	70
Figura 44: Firmas espectrales típicas para distintas cubiertas. Fuente datos: (Curso SIG nivel 1 CREA, 2018)	71
Figura 45: Reflector especular y lambertiano	71
Figura 46: Factores que modifican la firma espectral de una cubierta: (i): variaciones en las condiciones de observación o iluminación; (ii) orientación de la vertiente; (iii) pendiente; (iv) atmósfera; (v) condición fenológica; (vi) sustrato edáfico. Fuente imagen: (MINISTERIO DEL PODER POPULAR PARA CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN, 2018)	72

Figura 47: Penetración de ondas electromagnéticas en función de su longitud de onda. Fuente: (JUIDÍAS, 2015)	74
Figura 48: Dispersión atmosférica a distintas longitudes de onda. Fuente: (A. Requena, 2018)	74
Figura 49: Rango de utilización de cada tipo de sensor. Fuente imagen: (JUIDÍAS, 2015)	75
Figura 50: Representación de una imagen digital. Fuente: (Valderrama, 2017)	77
Figura 51: Principales tipos de órbitas: Polar, Ecuatorial o Inclinada. Fuente: (Orihuela, 2018)	80
Figura 52: Imagen del Lansat 3(izquierda), Landsat 4 (arriba derecha) y Landsat 8 (abajo derecha) en tierra. Fuente (Wikipedia, 2018)	81
Figura 53: Rango de longitudes de onda de cada banda de cada sensor de los distintos satélites del programa Landsat. Fuente: (USGS, 2018)	83
Figura 54: Metodología seguida para la consecución de los resultados.	84
Figura 55: Perfiles en la zona de estudio para la definición de los puntos de control. Fecha imagen: 27/01/2018	87
Figura 56: Tipología de suelo para la firma espectral utilizada como firma espectral tipo.	89
Figura 57: Firma espectral tipo: Duna; Vegetación Propia; y Mixto	89
Figura 58: Imagen satelital de Landsat 8 de la zona de estudio. Fecha 17/04/2018. Combinación de bandas 4-3-2.	110
Figura 59: 17/04/2018. Imagen satelital completa rotada Landsat 8. Fuente: (USGS, Enero). Escala 1:350000	112
Figura 60: Menú Image Analysis de ArcMap 10.1	113
Figura 61: Establecimiento de áreas de entrenamiento para la clasificación supervisada de imagen 17/04/2018	114
Figura 62: Valores de ND por banda en la imagen 17/04/2018. A la izquierda: gráfico de dispersión entre bandas 1 (banda 4 de Landsat8) y 3(banda 1 de Landsat8); a la derecha: Histograma para banda 3.	115
Figura 63: Leyenda para la clasificación de todas las imágenes expuestas a continuación.	115
Figura 64: Imagen y clasificación de 21/05/1976. Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero). Escala 1:70000	116
Figura 65: Imagen y clasificación de 08/07/1984. Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero). Escala 1:70000	117
Figura 66: Imagen y clasificación de 13/08/1991. Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero). Escala 1:70000	118
Figura 67: Imagen y clasificación de 09/09/1995. Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero). Escala 1:70000	119
Figura 68: Imagen y clasificación de 24/06/2001. Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero). Escala 1:70000	120
Figura 69: Imagen y clasificación de 22/08/2006. Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero). Escala 1:70000	121
Figura 70: Imagen y clasificación de 04/08/2011. Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero). Escala 1:70000	122
Figura 71: Imagen y clasificación de 17/04/2018. Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero). Escala 1:70000	123
Figura 72: Comparativa de imagen y clasificación a fecha de 21/05/1976 (izquierda) con 17/04/2018 (derecha). Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero).	124
Figura 73: Evolución porcentual de suelo ocupado según clase: Sistema dunar (color naranja); Vegetación (color verde oscuro); Mixto (color verde claro); Humedales (color marrón); Zonas de agua (color azul).	126

Figura 74: Área a analizar: arriba imagen fecha 08/07/1984, abajo fecha 17/04/2018. Cotas en metros. 127

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

“El modo de dar una vez en el clavo es dar cien veces en la herradura.”

- Miguel de Unamuno -

Este Trabajo Fin de Máster supone la culminación de los estudios del Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Este trabajo, de claro carácter investigador, cuenta con una dedicación de 12 créditos ECTS y se ha desarrollado en el ámbito de la universidad y bajo la tutela del profesor Dr. Emilio Ramírez Juidías, especialista en teledetección.

Se desarrolla así este TFM de investigación, con el cuál he intentado especializarme en una de las áreas de conocimiento de los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos como es el estudio del medio físico. Este trabajo especializado y científico estudia mediante teledetección, la evolución a lo largo de los años del litoral del Parque Natural del Entorno de Doñana, espacio natural altamente protegido, e intenta establecer una relación entre los cambios sufridos y las acciones a las que se ve expuesto y las infraestructuras realizadas por el hombre en los años de estudio. En concreto, se enfoca este estudio con la finalidad de relacionar la ampliación del Puerto de Huelva mediante el Dique Juan Carlos I, construido en el año 1981, con los cambios sufridos en el litoral de Doñana, hacia el este, y en concreto, en el Sistema Dunar Milenario de Doñana. También habrá que analizar si otros agentes naturales han sufrido cambios en los años estudiados. La escala temporal del estudio estará supeditada a los datos obtenidos, es decir, a las imágenes teledetectadas obtenidas.

La dinámica de un litoral depende de una serie de factores muy diversos que interaccionan entre ellos y a lo largo del tiempo. Como bien se interpreta (Juidías, 2006), el medio físico a estudiar así como su evolución resulta de la combinación de la geomorfología, clima, precipitación, fauna y flora, y de las alteraciones de tipo natural y debidas a la actividad humana. Estas características, que se pueden asumir como variables temporales, hacen del medio físico un conjunto dinámico y cambiante en el tiempo. No obstante, hay medios físicos y naturales que se encuentran protegidos por el Estado, éste es el caso del Parque Nacional de Doñana. Dicha denominación (Junta de Andalucía, s.f.), implica que es y debe ser un espacio natural poco transformado por la explotación y las actividades humanas. Por la belleza de sus paisajes, la representatividad de sus ecosistemas y la singularidad de su flora, fauna, geología y formaciones geomorfológicas, poseen unos valores ecológicos, estéticos, culturales, educativos y científicos destacados, cuya conservación merece una atención preferente. De ahí que cobre tal relevancia este estudio que se realiza, pues se trata de la modificación de un espacio protegido de las actuaciones y actividades humanas.

Este estudio trata de justificar los cambios de una zona del litoral Onubense englobada en el Parque Natural de Doñana. En esta zona de estudio se encuentra un sistema dunar denominado como “*Dunas Milenarias de Doñana*”. Es de vital importancia la determinación de ciertos factores de la zona de estudio, su análisis y la escala temporal a la que se producen con el fin de asociar estos factores a los cambios producidos sobre el terreno.

Cómo se va a abordar este estudio, mediante qué ciencia y qué metodología serán aspectos que se abordarán en los capítulos siguientes. Sin embargo, es preciso avanzar el gran potencial de la teledetección como herramienta para la obtención de información espacial de variables urbano-medioambientales, y para el análisis de los cambios producidos. De acuerdo con Chuvieco (Chuvieco, 2008), dicha herramienta permite obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un sensor remoto que no se encuentra en contacto con el mismo, mediante mediciones de la energía electromagnética reflejada o emitida por estos objetos o fenómenos de interés.

1.1 Objetivos y motivación

El hecho de adentrarme en la temática de la teledetección vino motivada tras mi continuo interés en los procesos cambiantes ambientales. El profesor Emilio Ramírez Juidías me guio desde que le planteé la idea de especializarme en teledetección mediante la realización de este trabajo fin de máster. Además, la singularidad (por su tamaño) de la estructura portuaria del dique Juan Carlos I y mis conocimientos en dinámica costera, me hicieron plantearme las posibles afecciones que de éste se puedan derivar.

En este contexto, aparece dentro de una posible zona de afección, el litoral del Parque Natural de Doñana, así como un sistema dunar milenario. Así que me pregunté: ¿por qué no conjugar las cuatro variables (teledetección, afecciones de infraestructuras costeras, agentes climatológicos-oceánicos y espacios protegidos) y ver qué conclusiones se pueden extraer? Me informé de posibles estudios a realizar y vi potencial en la realización de la temática de este trabajo al consultar algunos antecedentes. Es así como surgen las líneas que siguen en este trabajo de investigación y que sirve para culminar mi etapa académica y a la vez me permite especializarme en un campo que siempre me ha interesado.

Por último, comentar que la ciencia de la teledetección es una disciplina muy específica que permite la consecución de los principales objetivos de un Trabajo Fin de Master: evaluar los conocimientos y capacidades adquiridas por el alumno, teniendo en cuenta el carácter especializado del trabajo y su orientación a la especialización científica.

1.1.1 Objetivos principales

Los objetivos principales de este trabajo de investigación son tres:

1. El primer objetivo consiste en profundizar y detallar exhaustivamente las características de la zona de estudio, el litoral Onubense y el sistema dunar de Doñana con el fin de poder entender los resultados que de este estudio se deriven, y para facilitar el conocimiento de la zona de estudio a futuros investigadores. Estas características principales son las relacionadas con la formación de las dunas, la fauna y vegetación, variables climatológicas y morfodinámicas, batimetría, litología y acciones antrópicas, que puedan explicar los supuestos cambios en planta a lo largo del último siglo de la zona de estudio.
2. Analizar, determinar y explicar la evolución en planta de la zona de estudio, así como determinar la influencia (o no influencia) que haya podido tener los distintos agentes sobre la zona de estudio - Dunas de Doñana -: acciones antrópicas como construcción del dique Juan Carlos; marea; viento; oleaje; clima; características de la zona de estudio; etc. Aquí se detectarán, identificarán y evaluarán los principales cambios en la superficie terrestre de estudio.
3. El tercer y último objetivo es el de usar las herramientas que proporciona la ciencia de la teledetección mediante imágenes por satélite para poder analizar y determinar los cambios producidos en la zona de estudio, es decir, solventar el objetivo número 2. Y esto con el fin de obtener las competencias en investigación aplicada para la superación de la asignatura Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

1.1.2 Objetivos específicos

Para la consecución de los objetivos principales, estos se definirán a partir de los objetivos específicos siguientes:

1. Estudio de antecedentes y de la zona que complementen los resultados que se extraigan de este estudio.
2. Definición de la escala temporal de estudio.
3. Profunda revisión bibliográfica sobre teledetección.
4. Estudio de los principales agentes climatológicos y oceánicos así como la evolución de estos en la zona de estudio.
5. Estudio de la firma espectral de la zona de estudio, así como su complementario estudio estadístico.
6. Estudio de la variabilidad en la zona de estudio a partir de la realización de una clasificación espectral supervisada.

7. Análisis comparativo de diferentes escenarios temporales, antes de la construcción del dique Juan Carlos I y después de su construcción.

1.2 Estructura del trabajo

A continuación se explica brevemente la organización de este trabajo:

- Capítulo 2: Se describe la zona de estudio detallando la situación y descripción de los dos elementos principales de este estudio (Dique Juan Carlos I y sistema dunar de Doñana). Además se realiza una amplia investigación sobre la formación del litoral onubense así como de estudios antecedentes de la zona. También se realiza una breve explicación sobre los fenómenos físicos que ocurren en el mar y un amplio informe sobre las principales características de la zona de estudio (datos climatológicos, oleaje, viento, marea, corriente de deriva, batimetría, poblaciones vegetales y litología).
- Capítulo 3: Se describen los fundamentos de la teledetección: los principios físicos de la teledetección; la importancia del espectro electromagnético y de las ventanas ópticas así como la caracterización de una superficie a través de su firma espectral; los factores que afectan a la reflectividad de las ondas electromagnéticas; los tipos de sensores que existen y su resolución; los fundamentos de la imagen digital y las principales plataformas satelitales que existen.
- Capítulo 4: Son los resultados de este estudio y que se han conseguido a través de la metodología de trabajo realizada: un estudio de la firma espectral mediante puntos de control; distintas clasificaciones espectrales supervisadas; y un análisis en planta de la colindante al dique. Todo ello comparativamente y evolutivamente desde escenarios antiguos hasta la actualidad.
- Capítulo 5: A partir de los resultados obtenidos y de los objetivos planteados en el inicio de este trabajo, se exponen las conclusiones de este estudio.
- Capítulo 6: Se sientan las bases para futuras líneas de investigación, bien para otros Trabajos Fin de Máster, Trabajos Fin de Grado o incluso Trabajos de Doctorado más extensos.

CAPÍTULO 2: ZONA DE ESTUDIO

“Es una situación curiosa que el mar, del que surgió por primera vez la vida, ahora está amenazado por las actividades de una forma de vida. Pero el mar, aunque cambie de una manera desastrosa, seguirá existiendo; la amenaza es más bien para la vida misma.”

- Rachel Carson-

Este capítulo se enfocará desde la explicación de la zona de estudio. Para ello primero se realiza una descripción del tramo de costa que se va a estudiar en este trabajo. En el siguiente punto, se podrá encontrar un breve repaso sobre aquellos fenómenos del oleaje que, en relación con infraestructuras marítimas, pueden causar un cambio sobre la costa. Seguido de esto se explican los antecedentes (otros estudios y trabajos de investigación relacionados) que han motivado en parte la realización de este trabajo y que explican mejor los resultados que se obtendrán del mismo. Para continuar con este capítulo se realiza un breve repaso histórico acerca de la formación de los sistemas dunares de la Desembocadura del Guadalquivir. También se explica el marco temporal en el que estará enfocado este estudio, así como los principales agentes externos que pueden modificar el tramo de estudio, la batimetría y algunos perfiles tipo de la costa. Finalmente se realiza un listado sobre las principales poblaciones vegetales existentes en la zona y en el ámbito de Doñana, así como las características litológicas de la zona de estudio.

Puede preguntarse el lector de esta tesina, por qué es tan importante conocer globalmente las características principales de la zona de estudio. Y es que todos estos aspectos, pueden ayudar a entender y a reflejar los resultados posteriores que se puedan extraer mediante teledetección de este estudio.

2.1 Situación y descripción.

La costa de Huelva está localizada en el sector norte del Golfo de Cádiz y en el sur-oeste de España. Está compuesta por largas playas de arena con una longitud total de la costa de alrededor de 145 kilómetros, interrumpida por la presencia de los estuarios del río Guadiana, río Tinto-Odiel y río Guadalquivir. Todos estos ríos se encuentran en un avanzado progreso de acumulación de sedimentos, en las desembocaduras. Además, la actividad antrópica a lo largo de la costa se ha intensificado en el último siglo, dando lugar a distintas afecciones.

El Parque Nacional de Doñana abarca un amplio territorio en la margen derecha de la desembocadura del río Guadalquivir, ocupando parte de las provincias de Huelva y Sevilla, con un total de unas 55.000 ha.

La zona de estudio comprende desde el dique Juan Carlos I del puerto de Huelva (coordenadas 37°09'09"N y 6°53'55.2"W) hasta la desembocadura del río Guadalquivir (39°47'44"N y 6°22'12.8"W), mostrando especial atención a lo sucedido en la sub-área de estudio: las Dunas Milenarias del Parque de Doñana (36°55'13.2"N y 6°26'27.1"W). En la figura 1 se muestra la ubicación de la zona de estudio, comprendida en su totalidad en la provincia de Huelva, de la comunidad autónoma de Andalucía (España).

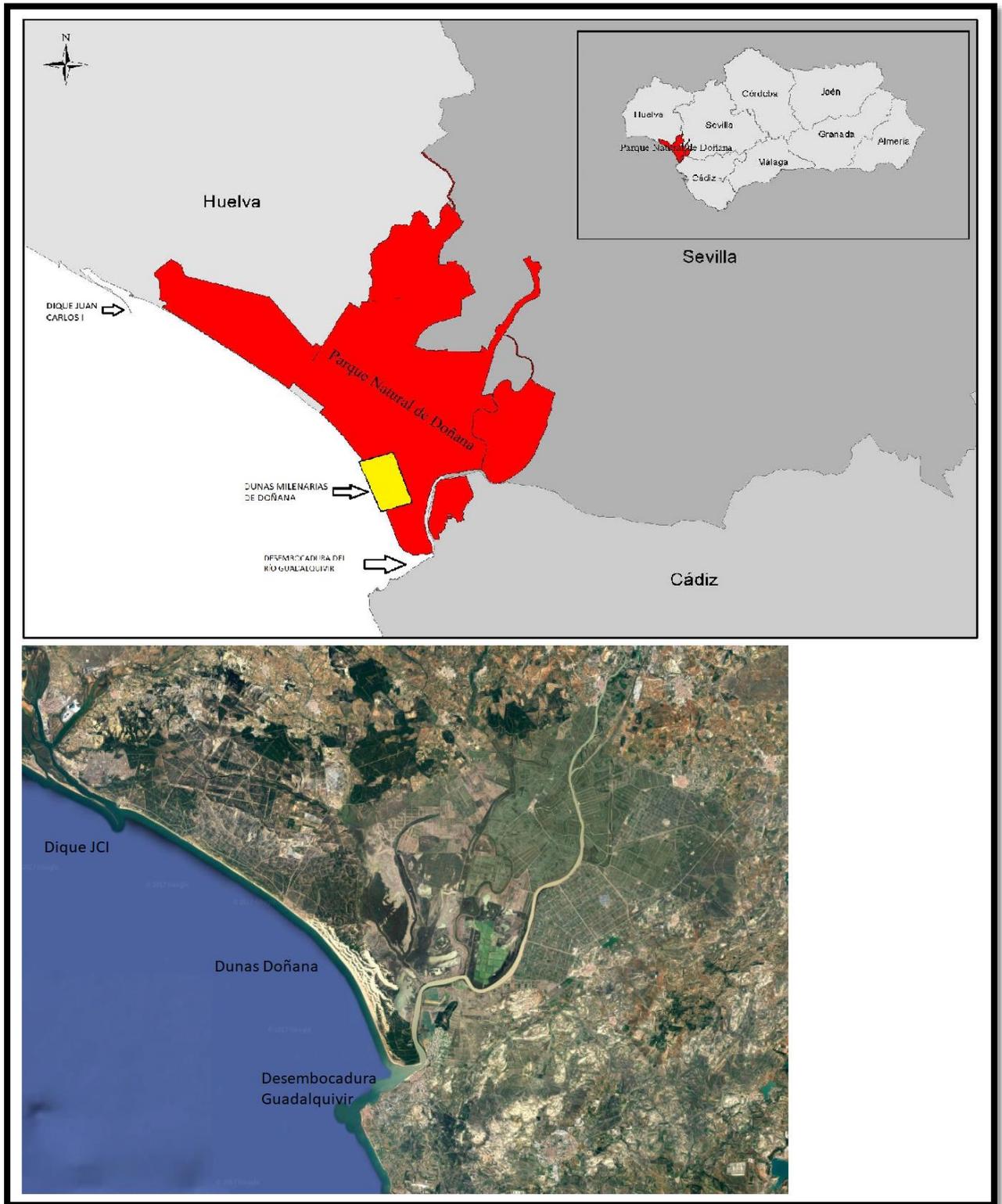


Figura 1: Situación de la zona de estudio. Fuente datos: DERA (ANDALUCIA, 2018), (GOOGLE MAPS, 2018). Elaboración propia mediante software ArcGis.

La morfodinámica costera y la fisiografía del tramo está principalmente vinculada a cinco factores: el régimen de mareas, la acción de las olas, las corrientes de deriva costera, la dinámica fluvial y las acciones antrópicas. Estas variables serán explicadas con mayor profundidad en los siguientes apartados.

Cabe mencionar que son los ríos Guadiana y Guadalquivir los que mayor repercusión tienen en la entrega de sedimentos en la zona de estudio. El Guadiana tiene una descarga media en torno a los $150\text{m}^3\text{s}^{-1}$ y el Guadalquivir de unos $190\text{m}^3\text{s}^{-1}$ (Vanney, 1970).

2.1.1 Extremo oeste de la zona de estudio: Dique Juan Carlos I

En la desembocadura del Tinto-Odiel se desarrolla la flecha litoral de Punta Umbría, adosada al oeste, la contraflecha de Punta Arenilla junto con el Dique Juan Carlos I, y entre ellas, un complejo de barreras arenosas (ver figura 2). La evolución de estos tres sistemas se debió producir de forma sincrónica (Rodríguez-Ramírez & Cáceres-Puro, Dinámica y evolución de flechas litorales: el litoral onubense (SO, España), 2000).

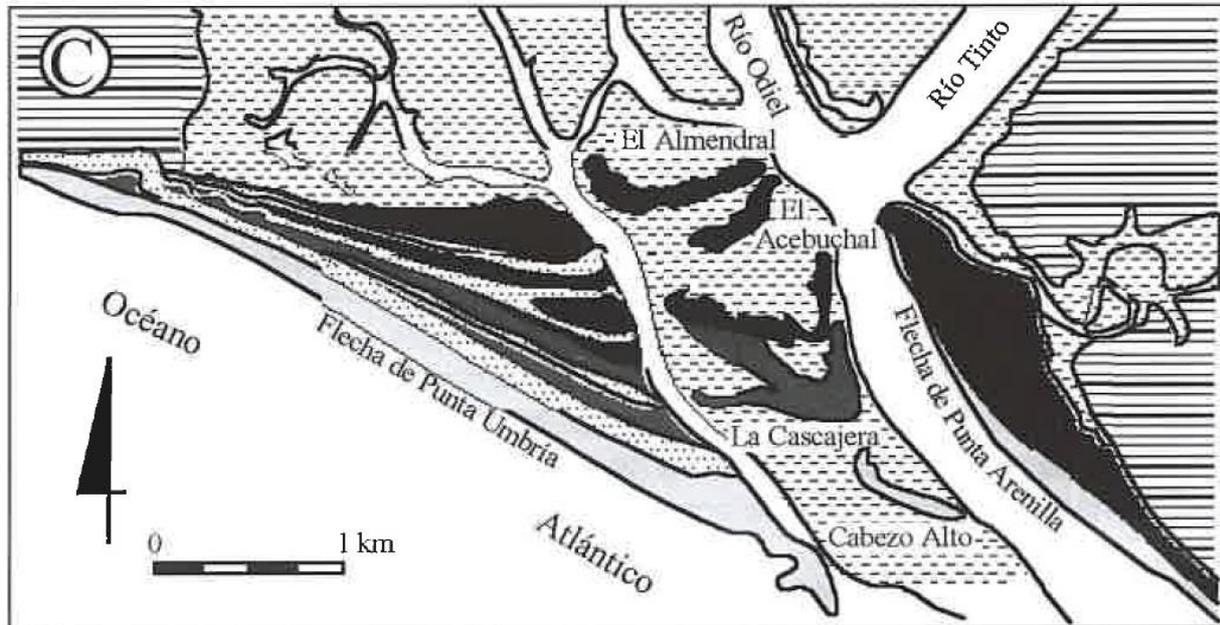


Figura 2: Síntesis de flechas de la desembocadura del Tinto-Odiel

La dinámica y evolución de esta zona está condicionada por la deriva litoral. El crecimiento de esta zona se ha ido produciendo progresivamente por adosamiento de barras de batida formadas y movilizadas oblicuas a la línea de costa (Borrego, Sedimentología del estuario del río Odiel. Huelva, 1992), además, esta evolución se ha visto acrecentada por las acciones humanas posteriores en la costa, en especial, diques como el que es objeto de este estudio, el Juan Carlos I.

El dique Juan Carlos I (figura 4), es de tipología dique en talud, con un total de tres kilómetros de longitud con bloques de hormigón en masa. El dique, supuesto perpendicular al oleaje predominante dominante de la zona de estudio (oleaje desde el SW), tiene un desfase medio actual (medido desde su bocana) respecto de la línea de costa de entorno 27°. Este diseño, pensado para proteger al interior del puerto de los oleajes predominantes, puede tener repercusiones sobre la forma en planta del tramo de costa.



Figura 3: Orientación media del Dique Juan Carlos I respecto a la costa. Fuente (GOOGLE MAPS, 2018)



Figura 4: Vista del Dique Juan Carlos I. Puerto de Huelva. Fuente: (Huelva Buenas Noticias, 2018)

2.1.2 Extremo este de la zona de estudio: Sistema Dunar de Doñana

El sistema dunar de Doñana se localizan cerca de la desembocadura del Guadalquivir (figura 5). En el estuario del Guadalquivir se localiza un sistema de flechas litorales de gran envergadura; Doñana en la margen derecha y La Algaída en la margen izquierda del estuario. El crecimiento de estas flechas ha favorecido la colmatación del estuario y ha ido formando las marismas del Guadalquivir.

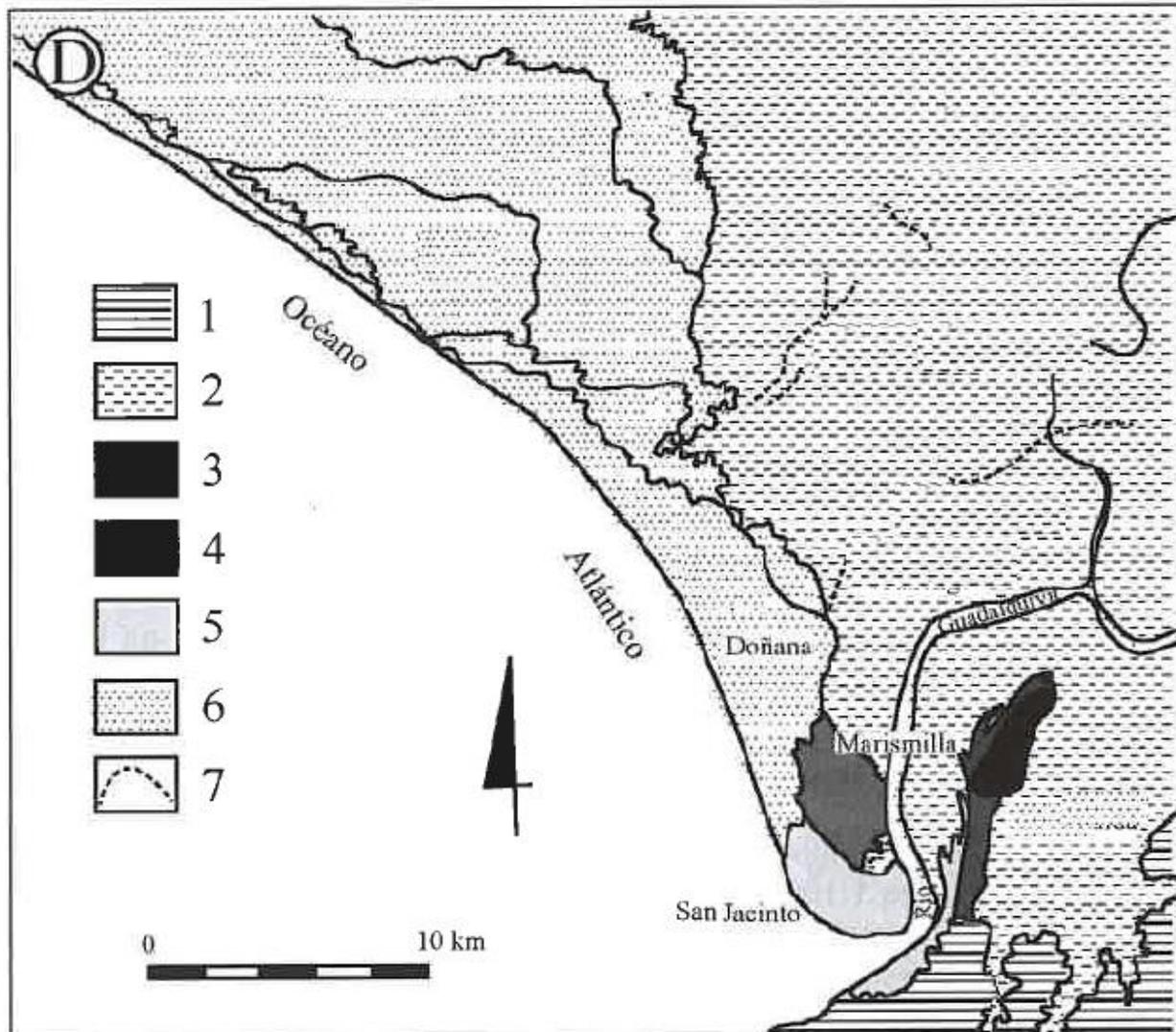


Figura 5: Ubicación de zona de Doñana. Síntesis geomorfológica de los distintos sistemas. 1. Sustrato preholoceno, 2. Marismas de estuario, 3. Segunda fase de progradación en las flechas litorales, 4. Tercera fase de progradación, 5. Cuarta fase de progradación, 6. Sistemas de dunas cuaternarias, 7. Cordones litorales. Fuente: (Rodríguez-Ramírez & Cáceres-Puro, Dinámica y evolución de flechas litorales: el litoral onubense (SO, España), 2000)

El tramo de costa de Doñana se orienta de sudeste a noroeste, con una longitud máxima en torno a unos 45 kilómetros de largo. En su morfología es posible diferenciar por una parte, sucesivos trenes de dunas activas que pueden alcanzar hasta los 30 metros de altura, y una serie de cordones litorales.

El sistema dunar de Doñana, que es objetivo de este estudio, se engloba entre el sistema 5 y 6. En la siguiente imagen se observa la zona de estudio de este proyecto.

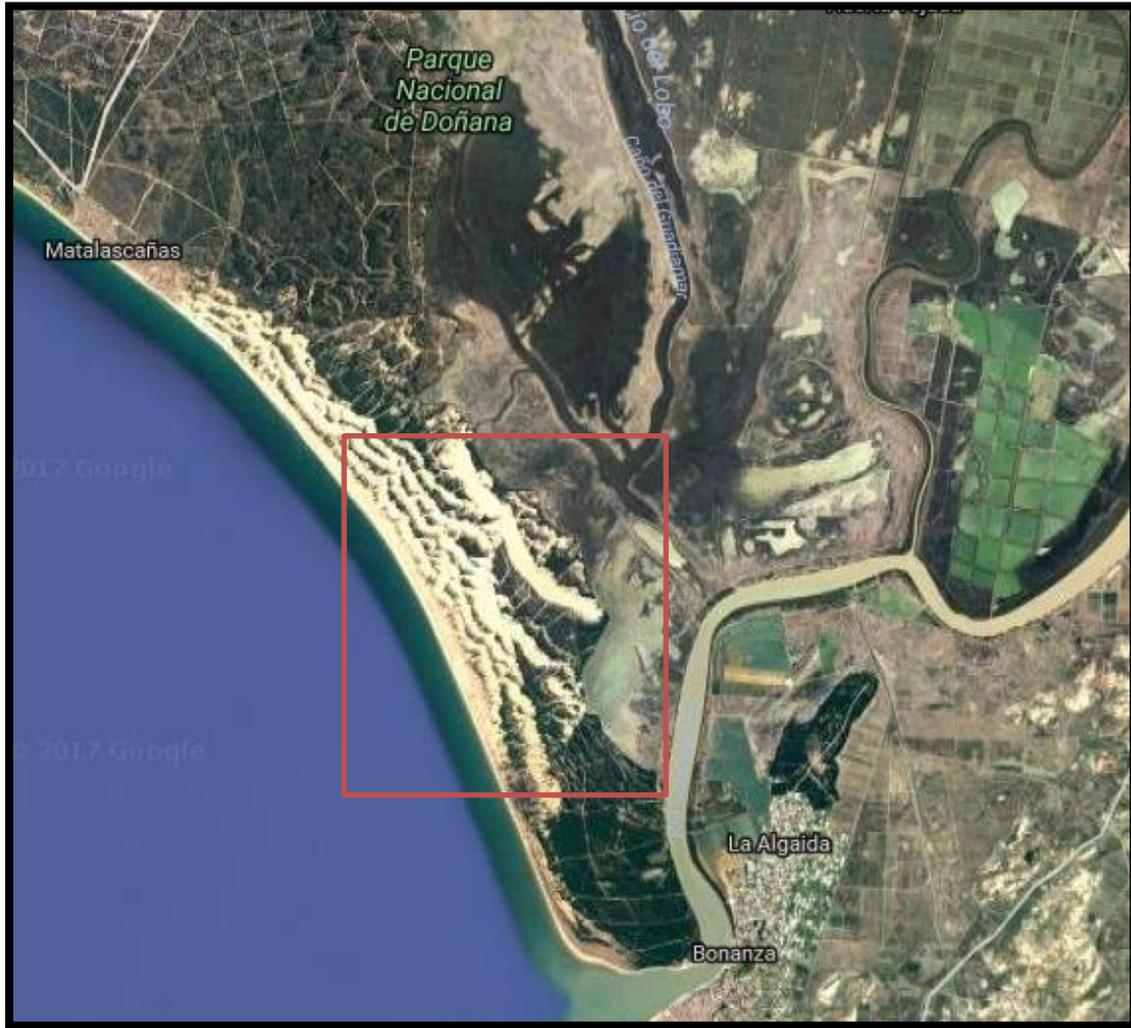


Figura 6. Ubicación de la zona de estudio de este trabajo: sistema dunar de Doñana. Fuente: (GOOGLE MAPS, 2018).

2.2 Formación histórica del litoral Onubense

El litoral Onubense tiene varios estuarios cuyo origen es el resultado del gradual incremento del nivel del mar. El rápido aumento del nivel del mar después de la fase final de la última fase del Holoceno ¹ (Ojeda., 1988), provocó un rápido avance del mar sobre superficie firme que originó acantilados y superficies suaves a lo largo de la costa sur ibérica. Además, los valles de los ríos inferiores se transformaron en amplias rías que desarrollaron los estuarios que conocemos a día de hoy.

El retiro de la costa fue ayudado por un relieve topográfico suave y pendientes y costas sin vegetación, formadas básicamente de arenas de Neógeno² y Cuaternario débilmente cementadas, es decir, que había grandes cantidades de sedimentos que se encontraban disponibles y, a medida que iba subiendo el nivel del mar, éstos fueron transportados a la largo de toda la costa depositándose en los estuarios, dunas y partes sumergidas de la plataformas. Las rías se llenaron de sedimentos debido a estas altas tasas de erosión costera y al intenso suministro de sedimentos fluviales.

Una vez alcanzado el máximo de invasión rápida del nivel del mar sobre la superficie terrestre (6500 años B.P. (antes del presente) y según (Zazo C., 1994)), la dinámica costera se estabilizó favoreciendo la regulación del

¹ Holoceno: es una división de la escala temporal geológica, la última y actual época del período Cuaternario. Comenzó hacia el 10000 a. C.

² Neógeno: El periodo Neógeno es una división de la escala temporal geológica que pertenece a la Era Cenozoica; dentro de ésta, el Neógeno sigue al Paleógeno y precede al Cuaternario.

perfil costero. La sedimentación en estuarios y su desarrollo se vieron favorecidos por la formación natural de islas de barrera y pantanos próximos a la costa. Los ríos Guadiana, Piedras, Tinto-Odiel y Guadalquivir fueron empezando a cerrar su desembocadura parcialmente debido a los montes de Cerro Gordo, El Rompido, Punta Umbría, Punta Arenilla y Doñana respectivamente. Esto conformó playas largas y un conjunto de sucesivos trenes de Dunas.

Una de las características más notables del litoral onubense (ver figura 7) es su suave orografía y la sucesión de amplios entrantes marinos asociados a las desembocaduras de los ríos principales. La elevada dinamicidad y la gran disponibilidad de materiales hace que constituya un medio particularmente activo, con grandes formaciones arenosas en continua evolución (Rodríguez-Ramírez & Cáceres-Puro, *Dinámica y evolución de flechas litorales: el litoral onubense* (SO, España), 2000). Así, se configuran extensas playas, campos de dunas, islas-barrera, flechas litorales en todas las desembocaduras fluviales, y espacios marismesños a su abrigo.

La costa que tenemos hoy día es el resultado del paulatino ascenso del nivel del mar. Una vez alcanzado el máximo, han sido los agentes dinámicos externos como la corriente de deriva, el oleaje, el viento y las acciones antrópicas, los que han regulado de forma progresiva este tramo costero.

La corriente litoral de deriva, que circula hacia el este siguiendo la orientación de la costa, es la responsable fundamental de la configuración de la costa onubense. De esta manera, ha favorecido el crecimiento de las principales barreras arenosas y de la acumulación en sistemas dunares.

La marea determina el modelado y relleno de las zonas protegidas del mar abierto, como los estuarios, que están condicionados también por el aporte sedimentario fluvial. El rango mareal medio o carrera de marea media para el sector de la costa que nos ocupa alcanza los 2.15m (Borrego & Pendón, 1989), situándose en la categoría de mesomareal (Davies 1964) o mesomareal alta (Hayes, 1979).

El clima de la zona, clima mediterráneo-atlántico, parece ser el principal causante del ascenso-descenso del nivel del mar, de tal modo que en períodos de ascenso se favorece la erosión y en períodos de estabilidad o descenso se favorece la progradación (Rodríguez-Ramírez A. , *Cambios morfológicos y tasas recientes de erosión-depósito en la costa atlántica oriental de Huelva*, 1997).

En este sector, entre los ríos Odiel y el Guadalquivir todos estos procesos erosivo-sedimentarios se favorecen gracias al sustrato arenosos neógeno y cuaternario. Las corrientes litorales de deriva, hacia el este, se encargan de redistribuir los materiales erosionados a lo largo de la costa, favoreciendo la evacuación del material y el crecimiento de las barreras arenosas.

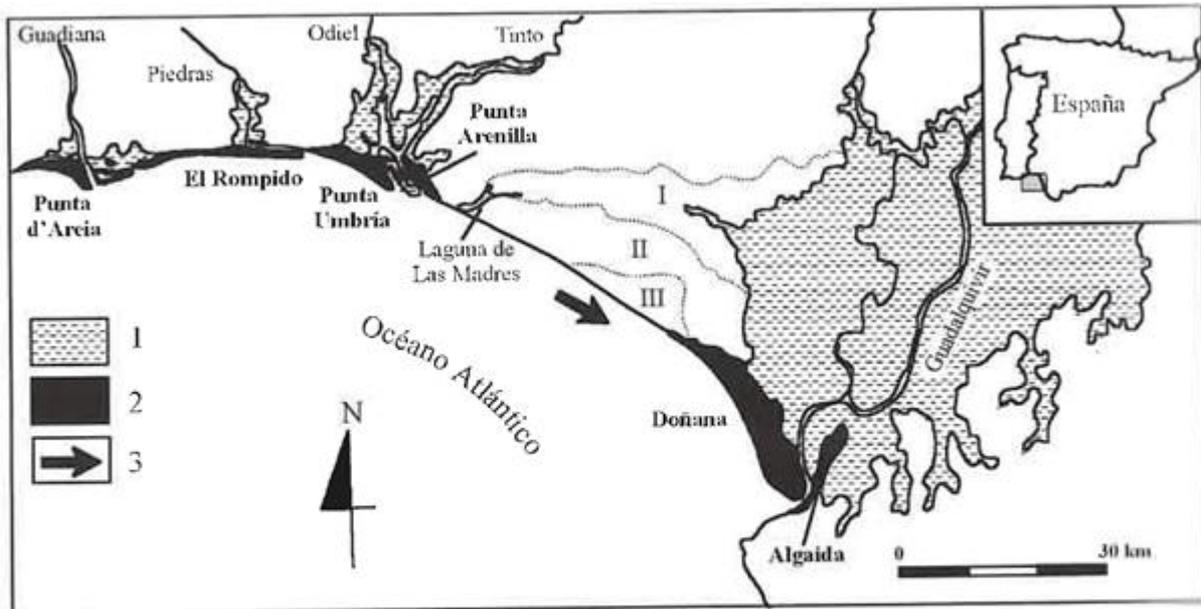


Figura 7: Localización geográfica del litoral onubense y situación de los principales sistemas morfosedimentarios, I-III. Secuencia de dunas estabilizadas, 1.Marismas, 2.Sistemas de flechas litorales, 3. Corriente de deriva litoral. Fuente: (Rodríguez-Ramírez & Cáceres-Puro, Dinámica y evolución de flechas litorales: el litoral onubense (SO, España), 2000)

A continuación, como se puede observar en la figura 8, la evolución de este tramo de costa siempre ha sido desde el noroeste hacia el sureste en el rango de unos 6500 años BP (antes del presente) estableciendo varios ciclos diferenciados.

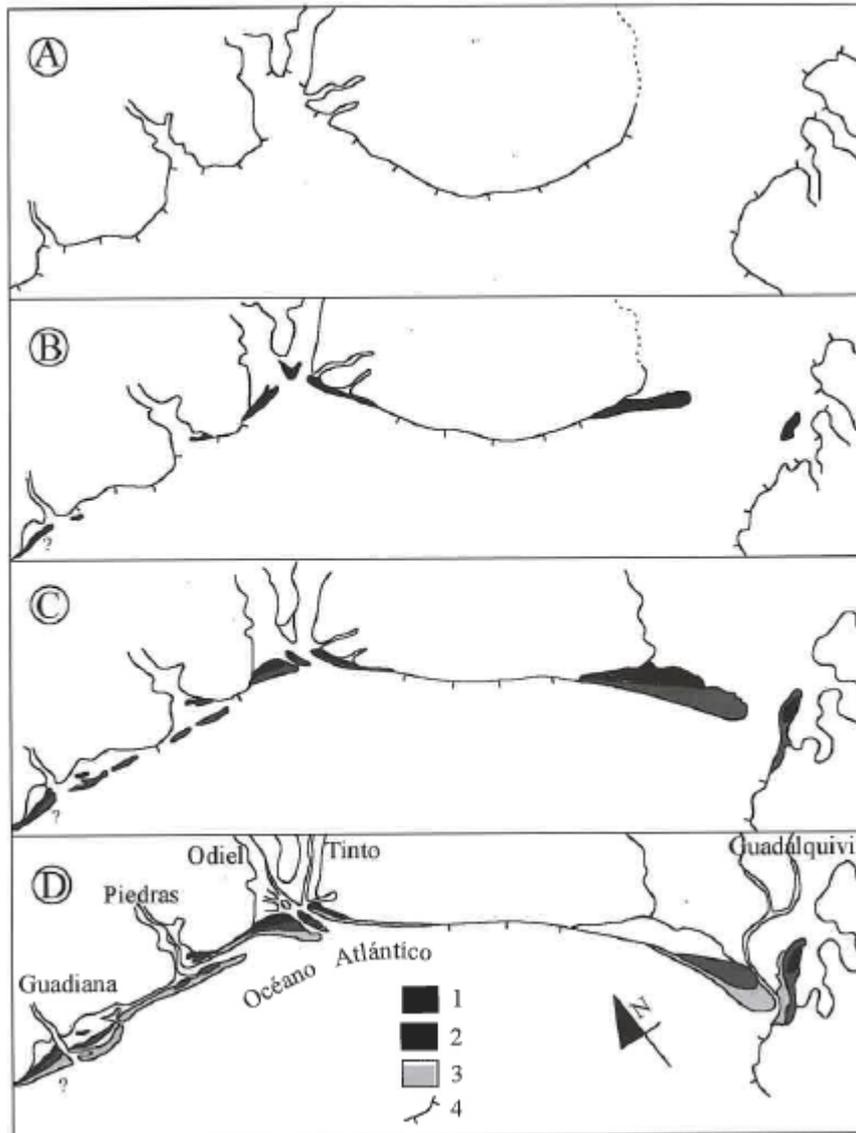


Figura 8. A. hace 6500 años, B. hace 4000 años, C. hace 2400 años, D. hace 800 años, 1. Segunda fase de progradación en las flechas litorales, 2. Tercera fase de progradación, 3. Cuarta fase de progradación, 4. Acantilados.

2.3 Influencia de infraestructuras portuarias sobre la costa

En este contexto, vamos a repasar un concepto marítimo básico e importantísimo acerca de la influencia de las estructuras marítimas sobre la costa. No se trata de hacer un repaso de todos los conceptos hidrodinámicos del oleaje, pero sí de explicar las consecuencias más inmediatas sobre la costa que una infraestructura pueda provocar.

Varios son los fenómenos que se producen en el mar, y sólo algunos los que pueden estar relacionados con estructuras marítimas como pudiera ser el dique Juan Carlos I. A continuación se explican los distintos procesos que existen y en la figura 9 puede observarse su mecanismo.

- Generación de oleaje: cómo su propio nombre indica y a causa de vientos, borrascas y temporales.
- Shoalling: consiste en la reducción de la longitud de ola y el aumento de su altura como consecuencia de acercarse a la orilla (reducción de altura batimétrica).
- Refracción: el frente de onda oblicuo va girando poniéndose paralelo a las líneas batimétricas, minimizando su pérdida de energía. Se da cuando el oleaje incidente forma un ángulo con las batimétricas.

- Difracción: se define como aquellos cambios bruscos en la altura de ola provocados por la cesión lateral de energía que ocurre al encontrarse el tren de olas con un obstáculo. Es uno de los fenómenos que pueden estar provocados por estructuras marítimas.
- Reflexión: proceso por el cual parte de la energía no disipada de un tren de olas genera otro tren de olas de características similares pero en sentido contrario al incidir sobre un obstáculo (rocas, barcos, arrecifes, diques). Es uno de los fenómenos que puede estar provocados por estructuras marítimas.
- Rotura: fenómeno relacionado con todos los fenómenos anteriores. Descenso brusco de altura de ola provocado por la desestabilización de la ola. El oleaje suele romper debido al shoaling cuando se peralta demasiado o bien cuando disminuye la profundidad. El frente de onda no es capaz de mantener la energía en su eje y acaba rompiendo o cediendo energía. Este proceso viene acompañado de una gran disipación de energía que es empleada en la movilización de sedimento. Es en la zona de rotura donde se producen los cambios morfológicos más importantes.

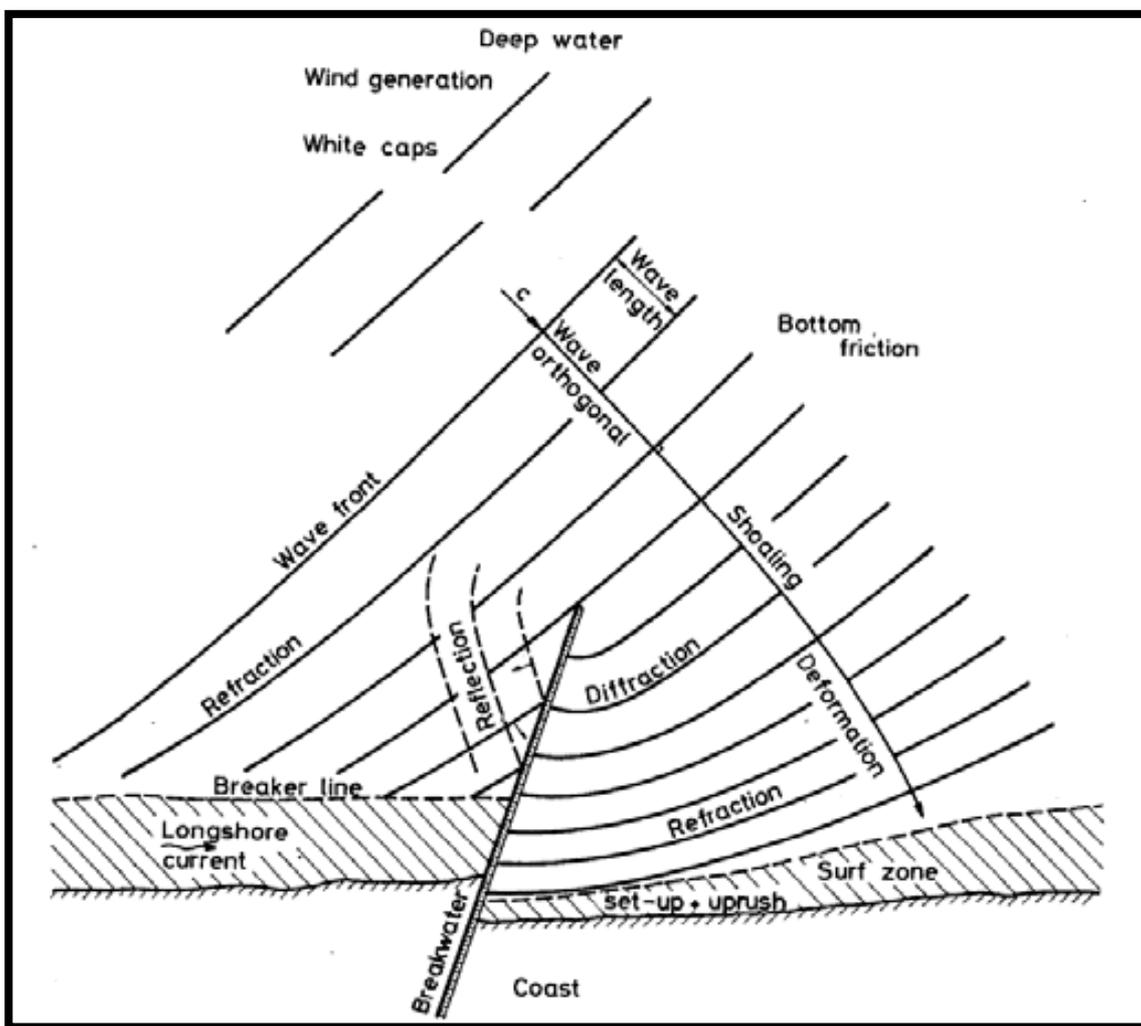


Figura 9: Mecanismo de los fenómenos de propagación de oleaje. Fuente: (Chamorro, 2016)

Todos estos procesos influyen en mayor o menor medida sobre la morfología de la costa, y a su vez, la costa influye sobre ellas. A largo plazo, la costa tiende al equilibrio, pero cualquier perturbación de estos procesos provocará un cambio en planta y en forma, bien sea por motivo de erosión o sedimentación. Así es como se tiene que introducir el concepto de transporte de sedimentos, que se define como el movimiento de las partículas de sedimento debido a la acción del flujo sobre ellas.

De esta forma, si se modifica cualquiera de los procesos anteriores, se altera el transporte de sedimentos a lo largo de la costa, y en consecuencia, se modifica físicamente la costa. La rotura del oleaje y la difracción son los fenómenos que mayor relación tienen con el movimiento de partículas, y es en la difracción dónde actúan

elementos como las infraestructuras marítimas. De este modo, una estructura marítima puede provocar un cambio en los fenómenos del oleaje que provoque un impacto en la morfología de la costa. Pueden verse ejemplos de fenómenos de difracción y de su implicación en la forma de la costa en la siguiente figura 10.



Figura 10: Ejemplos de difracción y de su implicación sobre la costa. Fuente: (Chamorro, 2016)

La pregunta que el lector se tiene que hacer es: ¿Qué pasa si en una unidad fisiográfica³ que se encuentra en equilibrio, añadimos un nuevo elemento como un puerto o un dique dividiendo esa unidad fisiográfica en dos? La respuesta puede deducirse de la observación de la figura 11.



Figura 11: Vista aérea del Puerto de Castellon. Fuente: (Ruiz, 2013)

No sólo no dividimos el tramo de costa en dos, sino que modificamos las unidades fisiográficas resultantes con zonas de erosión (margen izquierdo del puerto) y sedimentación o ganancia de playa (margen derecho del puerto) como resultado de procesos relacionados con la difracción, rotura, shoaling, etc., que ha hecho cambiar la estructura del litoral.

En resumen, lo importante de todo esto es ver que todas las variables que entran en juego con el oleaje están estrechamente relacionadas, y que cualquier cambio en alguna de ellas implica un cambio en el resto y un efecto rebote en la misma, hasta que el tramo de costa vuelve a quedar en equilibrio. Pero eso sí, el proceso de volver a quedar en equilibrio ha tenido como consecuencia un cambio en planta y forma del tramo de estudio, con zonas de erosión y otras de sedimentación. El hecho de introducir un nuevo elemento (un dique o puerto por ejemplo) en cualquier tramo de costa, provocará un cambio, en mayor o menor medida, en el sistema global que será difícilmente reversible, creando en el medio-largo plazo, una nueva situación de equilibrio final.

³ Unidad fisiográfica: entiéndase como tal, aquel tramo de playa que queda libre de obstáculos y a través del cual se puede calcular el balance neto del transporte de sedimentos.

2.4 Antecedentes en la zona

Cabe primero sentar las bases del porqué de este estudio, es decir, de los antecedentes reales que existen acerca de la posible afección de una estructura marítima, dique Juan Carlos I en este caso, sobre el área de estudio. Los estudios que se presentarán a continuación tienen como marco físico dos unidades fisiográficas bien diferenciadas:

Por un lado se tiene la unidad fisiográfica que engloba desde la desembocadura del Odiel (ubicación del dique Juan Carlos I), hacia la zona oeste de la costa, la desembocadura del Guadiana (marismas de Isla Cristina).

Se tiene la segunda unidad fisiográfica, en la que se enmarca este TFM, que va desde la desembocadura del Odiel (ubicación del dique Juan Carlos I), hacia la zona este de la costa, la desembocadura del Guadalquivir.



Figura 12: Ubicación del dique Juan Carlos I en el litoral Onubense respecto a las unidades fisiográficas definidas.

Debido a que el medio ambiente es muy cambiante e implica a muchos actores y variables, resulta difícil extrapolar los resultados de estudios similares de otras áreas a los que se puedan hallar en este estudio, sobre todo a nivel de pequeña escala. Sin embargo, el uso de imágenes satélite en otros estudios de la zona puede indicar un patrón o un marco de estudio común que nos permita relacionar lo que ha pasado en una zona, con lo que pueda pasar o ya ha pasado en otra. La teledetección nos permite obtener información para el análisis: erosión, acumulación, cambios en flora, falta de agua, índice de vegetación, cambios en planta de playa, etc.

Es de vital importancia conocer los estudios que anteceden a este trabajo ya que sirve como base de partida. Con motivo de estos antecedentes que se explican a continuación, se procede a estudiar y a intentar relacionar la posible afección del dique Juan Carlos I al litoral del Entorno del Parque Natural de Doñana, enfocándose en el sistema dunar de Doñana. El factor antrópico está ejerciendo una influencia considerable en todo el tramo costero de Huelva, trastocando considerablemente el balance sedimentario en las últimas décadas (Ballesta, 1998).

A continuación se van a mostrar ejemplos estudiados por otros investigadores, así como artículos de prensa, que ponen de manifiesto la relación entre el cambio morfodinámico de la costa y la construcción del dique Juan Carlos I. Estos ejemplos servirán de motivación y de base para la consecución de los objetivos de este proyecto. Son importantes ya que con su conocimiento se entiende por qué se quiere realizar este estudio.

2.4.1 Artículos de prensa

La construcción del dique Juan Carlos I ha sido objeto de alguna crítica y cuanto menos su impacto sobre el litoral onubense ha sido puesto en entredicho (Huelva, 2013). Según un artículo de prensa publicado en el diario *Huelva Información*, el dique Juan Carlos I es objeto de crítica en relación a la erosión de la playa de Matalascañas (en concreto) y el litoral onubense (en general) cada vez que hay un episodio de temporal. Ciertamente es que en este artículo hay expertos que avalan tanto la versión como de que el espigón es el responsable, como expertos que aseguran que el dique no es el responsable de la erosión. Cuanto menos, es susceptible de ser estudiada la influencia que pueda tener el dique sobre la costa.

Según el arquitecto onubense Alfonso Aramburu, quien afirma haber analizado la dinámica costera en los últimos 45 años, el espigón ha roto totalmente la dinámica del litoral, porque parte de la arena que iba en la unidad fisiográfica del Guadiana hasta el Guadalquivir, se queda interrumpida en el espigón. Según indica, la arena de Matalascañas "se va a las dunas móviles del Parque Nacional de Doñana" y, aunque ésta tendría que reponerse con la que llega desde el Guadiana, finalmente "se queda en los diques alzados por el camino": los dos de Isla Cristina, el de Punta Umbría y el dique Juan Carlos I.

2.4.2 Estudios del profesor Emilio Ramírez Juidías

De los estudios mediante teledetección realizados por E. Ramírez-Juidías en las marismas de Isla Cristina sobre los procesos de erosión y los cambios geomorfológicos (Ramírez-Juidías, *Sedimentary processes in the Isla Cristina salt-marshes: Geomorphological changes of landscape*, 2016) (Ramírez-Juidías, *Use of satellite images to study erosion processes in the Isla Cristina salt-marshes*, 2015) se deduce que, existe una evidente erosión en las marismas de Isla Cristina provocada por varios motivos: el uso industrial de la zona, el efecto de las mareas, y los efectos antrópicos que se dan en sus intermediaciones. Estos efectos antrópicos no son más que la actividad continuada del ser humano y su proyección en forma de construcciones marítimas a lo largo de la costa, en concreto las ampliaciones del puerto de Huelva con el dique Juan Carlos I y de presas que alteran el flujo de sedimentos de los ríos y en consecuencia provocan alteraciones en el medio, como la erosión o pérdida de sedimento de las marismas. En la figura 13 está representada la erosión producida en la zona estudiada por este investigador.

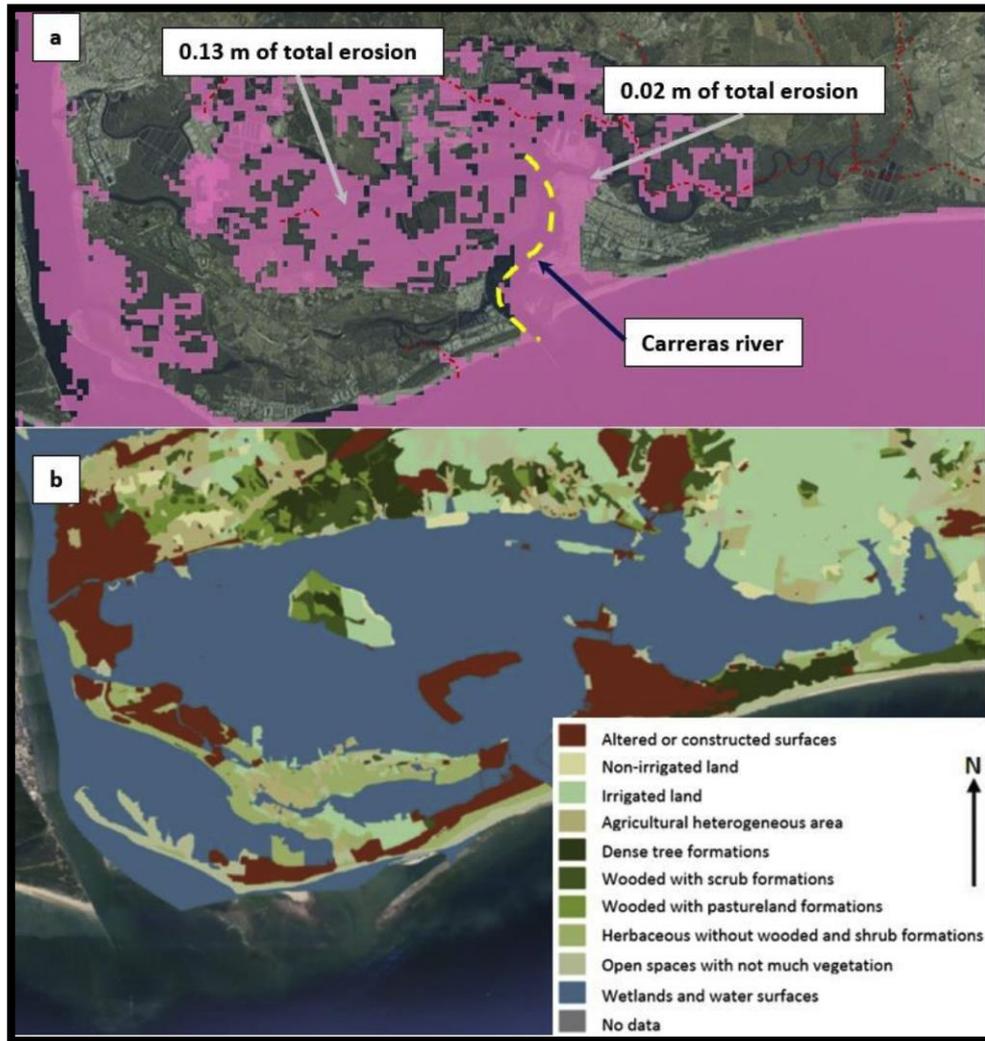


Figura 13: Cambios en las marismas de Isla Cristina. Fuente: (Ramírez-Juidías, Sedimentary processes in the Isla Cristina salt-marshes: Geomorphological changes of landscape, 2016)

Estos estudios se englobarían dentro de la primera unidad fisiográfica descrita anteriormente (Odiel-Marismas de Isla Cristina). Así, queda demostrada la influencia que dicha infraestructura portuaria ha tenido sobre un punto de la costa tan alejado de ella como pudiera estarlo la zona de estudio de este trabajo, marismas con un grado de erosión importante.

2.4.3 Estudios del profesor Antonio Rodríguez Ramírez

Comentar brevemente otros artículos científicos que ponen de manifiesto la erosión o el cambio en el litoral onubense en el último siglo. Estos, a manos del profesor de la Universidad de Huelva Antonio Rodríguez Ramírez, hacen referencia a que el cambio morfosedimentario en el ámbito del Golfo de Cádiz a corto plazo, es debido principalmente a la actividad antrópica (Rodríguez-Ramírez A. , Cambios morfológicos y tasas recientes de erosión-depósito en la costa atlántica oriental de Huelva, 1997), tal como infraestructuras portuarias, cambios en el uso del suelo, una extremada industrialización, etc. En cambio, el profesor Antonio R.R afirma que a muy largo plazo, el tramo costero definido entre los ríos Tinto y Guadalquivir (ver figura 14) ha ido cambiando morfosedimentariamente debido al factor tectónico. Dichos estudios avalan el cambio o la evolución histórica que en el litoral del Golfo de Cádiz se ha ido produciendo.

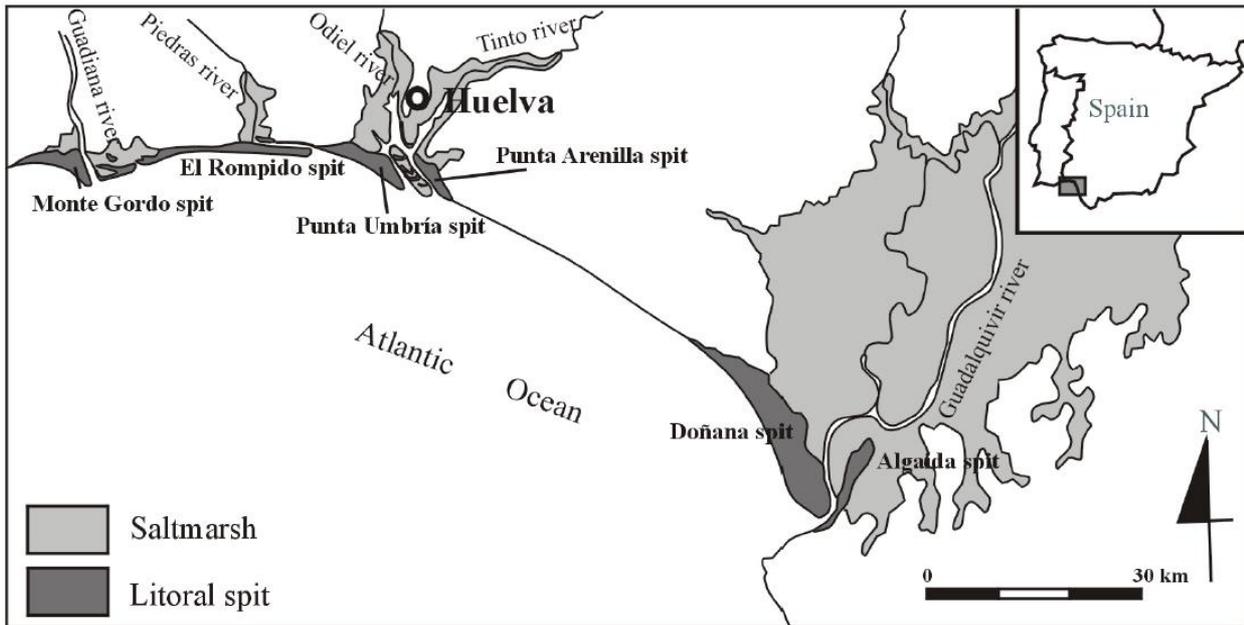


Figura 14: Localización estudio Antonio Rodríguez Ramírez. Fuente: (Rodríguez-Ramírez A. , Cambios morfológicos y tasas recientes de erosión-depósito en la costa atlántica oriental de Huelva, 1997)

2.4.3.1 Cambios morfológicos y tasas recientes de erosión-depósito en la costa atlántica oriental de Huelva

Según este estudio, el tramo se encuentra en un proceso cambiante a largo plazo debido a procesos geomorfológicos y tectónicos, donde la tendencia es claramente retrogradante en gran parte de la zona (pérdida de sedimento) y progradante (acumulación) en el último tramo, justo donde se ubica el sistema dunar de Doñana. En los tramos costeros progradantes (tramo este de Doñana), se adopta una morfología de sucesivos trenes de dunas parabólicas, bien diferenciados, que se suceden sin solaparse, con amplios espacios interdunares. Los sedimentos, frutos de la erosión en la zona retrogradante, han iniciado sucesivas formaciones sedimentarias hacia levante (flecha de Doñana).

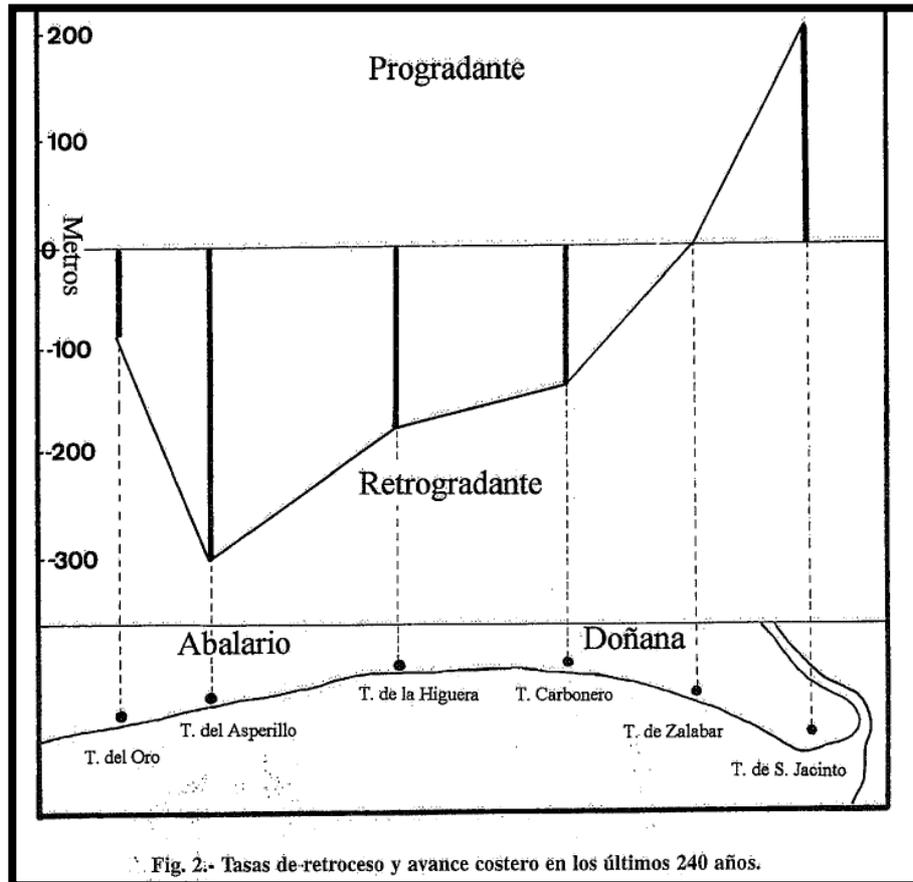


Fig. 2.- Tasas de retroceso y avance costero en los últimos 240 años.

Figura 15: Tasas de retroceso y avance costero en los últimos 240 años. Fuente: (Rodríguez-Ramírez A. , Cambios morfológicos y tasas recientes de erosión-depósito en la costa atlántica oriental de Huelva, 1997)

2.4.3.2 Cuantificación de procesos de erosión costera en el litoral sur-atlántico español

Este estudio de los procesos de erosión (Río, Gracia, Puro, & Rodríguez, 2003), se basó principalmente en fotografías aéreas entre los años 1956 y 2001 (véase que encaja perfectamente en la escala temporal en la que éste estudio se engloba). Se definieron 34 perfiles de playa a lo largo de la costa tal como se muestra en la figura 16.

Los ritmos y tendencias erosivas varían mucho a lo largo de la zona estudiada, debido a diversas causas según el autor. Aparte de las tendencias recientes en cuanto a materia de ascenso del nivel del mar, la principal causa de erosión costera es la construcción de embalses en las cuencas fluviales que vierten a esta costa, que por retención de sedimento han producido una disminución importante del aporte de sedimentos. El retroceso costero se ha hecho más evidente a partir de los años 80 según se explica en este artículo, y la tendencia a ganar playa se hace evidente en perfiles puntuales, como en los extremos libres de flechas o en los lados acumulativos de diques y espigones.

Muchas zonas costeras entre los perfiles 1 a 8, han sufrido diversas intervenciones humanas en forma de diques, espigones y puertos deportivos que han alterado la dinámica costera produciendo erosión (Ballesta, 1998). Según el autor, el dique Juan Carlos I es un ejemplo de erosión a lo largo de más de 25 kilómetros de costa, por bloqueo de deriva litoral. En el invierno de 2000-2001, esta estructura llevó a un retroceso de 10-20 metros en los perfiles 8,9 y 10 (figura 16), con acumulación en el tramo final (Dunas de Doñana). La playa de Mazagón (perfil 7), protegida por la zona de abrigo o de sombra del espigón, provoca poca erosión, sufriendo mayores retrocesos sólo en épocas puntuales como en Enero de 1996, donde se produjo un retranqueo debido al dique J.C.I de 30 metros en pocos días.

El autor de este estudio concluye que la erosión principal en el litoral sur-atlántico español a corto plazo es debida a las obras de ingeniería costera, y a largo plazo es debida al ascenso del nivel del mar.

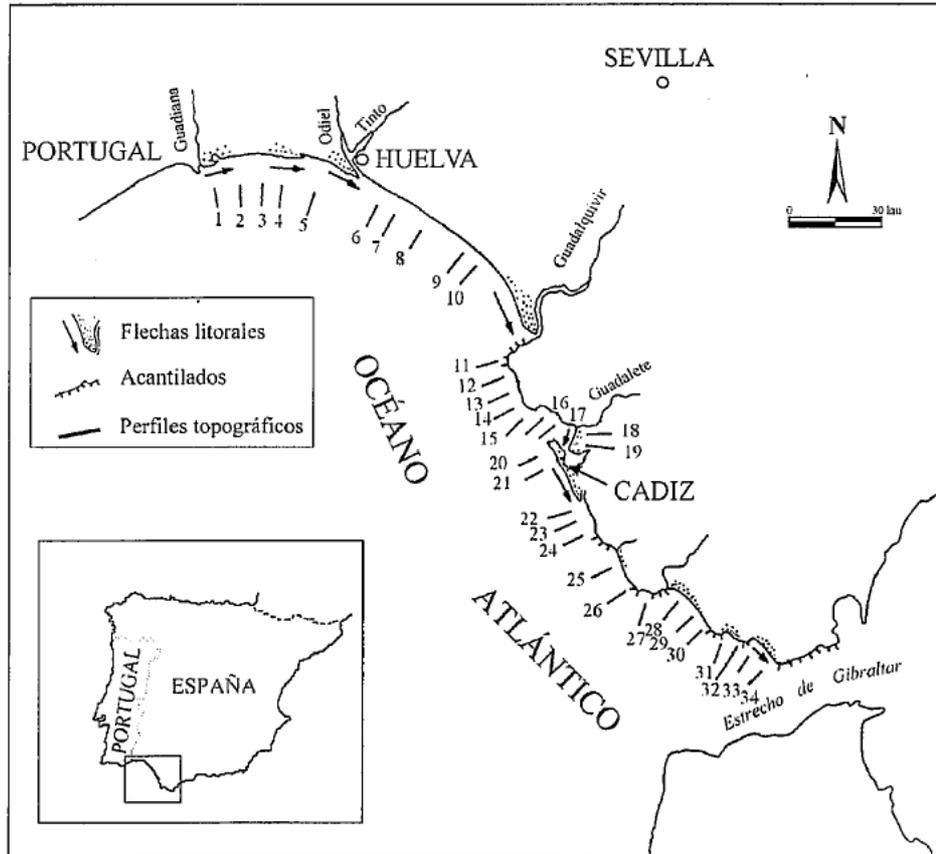


Figura 16: Localización de los perfiles de las playas.

2.4.3.3 Estudio morfodinámico del litoral de la urbanización de Matalascañas

Matalascañas es una población situada a escasos kilómetros de la zona de estudio de este proyecto, el sistema dunar de Doñana (ver figura 17). El autor, (Rodríguez-Ramírez & Morales, Estudio Morfodinámico del litoral de la urbanización de Matalascañas, 2009), calcula la erosión de la zona en las últimas décadas a partir de la posición relativa de distintas edificaciones antiguas a lo largo del tramo de costa, como son la torre del Pico del Oro, la torre del Asperillo, la torre de la Higuera y la torre de Carbonero. Teniendo en cuenta el año de construcción de las torres y la ubicación de las playas se tiene unos retrocesos de playa de 0.4 m/año (90 m); 1.2 m/año (300m); 0.7 m/año (170m) y 0.8 m/año (163m) respectivamente. Además se usaron distintas fotografías aéreas para concluir lo siguiente:

Se confirma que el tramo de costa donde se ubica Matalascañas se encuentra con una tendencia natural a la retrogradación. Los procesos erosivos están muy relacionados con los ciclones invernales y que los espigones que se realizaron en la urbanización de Matalascañas en el año 1979 han contribuido a la estabilización moderada de las playas en ese sector, pudiendo comprometer el flujo sedimentario hacia sectores vecinos.



Figura 17: Situación de la urbanización de Matalascañas (arriba) y de los dique (abajo).

2.4.3.4 El impacto humano sobre la morfodinámica costera de Huelva.

Este estudio (Antonio Rodríguez-Ramírez, 2008) realizado en el año 2008 hace referencia a los cambios, en los últimos siglos, que ha presentado este tramo de costa. La morfología y los procesos de la costa se deben a una serie de factores: el régimen mareal, olas, corrientes de deriva, dinámica fluvial, cambio climático y la actividad antrópica, siendo este último un factor que podemos controlar.

En las últimas seis décadas la actividad antrópica ha modificado la dinámica litoral mediante la construcción de urbanizaciones, diques y puertos. Las principales consecuencias de esta actividad han sido la interrupción del trasvase de sedimento por la corriente de deriva, la modificación local de procesos de difracción y refracción de las olas y la intensificación de procesos erosivos y acumulativos en distintos puntos de la costa.

En esta actividad humana cobra reciente interés según el autor, la construcción a partir del año 1981 del dique Juan Carlos I y otro dique situado en la desembocadura en Punta Umbría. A partir del año 1981, los procesos de dinámica costera se deben principalmente a acciones humanas, como estos diques.

El dique J.C.I, según el autor, redujo el flujo mareal sobre el Estuario del Tinto-Odiel, haciendo que pierda esa funcionalidad. La construcción de un segundo dique dentro de las marismas de Punta Umbría, que permitió crear

barras de arena que subministraba material a la playa este del dique J.C.I, provocó que el delta se quedara aislado de la energía de las olas. A partir de entonces, la marea ha sido el único agente que actúa dentro del delta haciendo que dunas y las crestas de arena ya no migren por la costa.

En la siguiente figura 18 puede observarse la evolución de la desembocadura del Tinto-Odiel y cómo ha cambiado a medida que se construyó el dique Juan Carlos I.

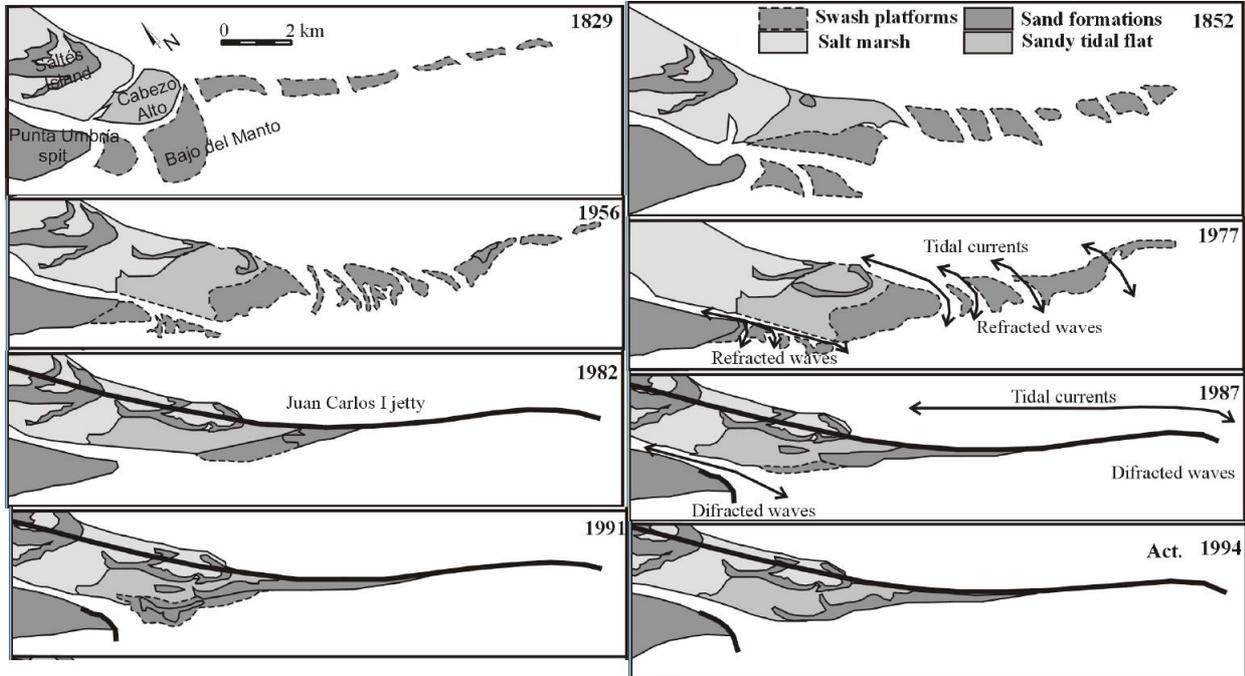


Figura 18: Secuencia evolutiva de la desembocadura del estuario del Tinto-Odiel desde 1829 hasta la actualidad. Fuente: (Antonio Rodríguez-Ramírez, 2008).

Por otra parte se tiene el Puerto de Mazagón, donde se puede hablar de dos áreas bien diferenciadas (ver figura 19), cuya fecha data del año 1991. Existen distintas áreas de acreción relacionadas tanto con este puerto como con el dique Juan Carlos I. La primera zona, situada al oeste del antiguo club náutico fue totalmente erosiva durante el periodo estudiado, mientras que la segunda zona, al este del dique, pasó de ser erosiva a tener una alta tasa de sedimentación después de la construcción del puerto de Mazagón. La zona remarcada de la figura es un claro ejemplo de afección combinada de ambos diques, el del Puerto de Mazagón y el del dique Juan Carlos I.

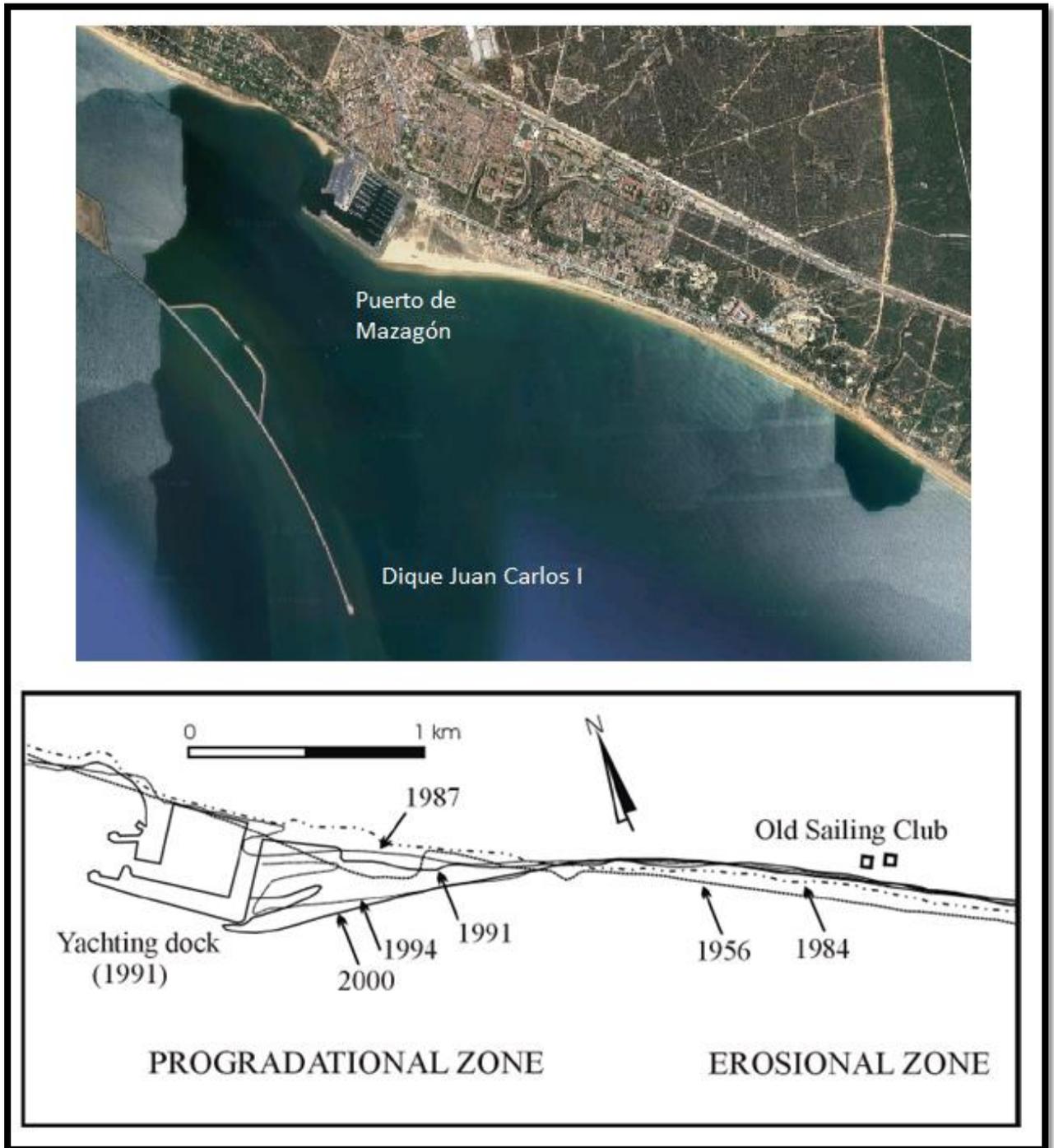


Figura 19: Evolución del tramo costero de influencia del Puerto de Mazagón desde la creación del dique. Fuente: (Antonio Rodríguez-Ramírez, 2008)

2.4.4 Estudios de Cristina Aguilar Correa

Este estudio (Aguilar-Correa & López-Ruiz, 2016) llevado a cabo por mi compañera del Máster de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, pone de manifiesto la problemática de flechas litorales grandes en cuanto a la hidrodinámica de un estuario. En este caso, se estudió la flecha del Rompido, que se encuentra al este de la flecha de Huelva de la que forma parte el dique Juan Carlos I.

La hidrodinámica del estuario del río Piedras (suroeste de España) está controlada por la acción conjunta del oleaje, las variaciones del nivel del mar y el viento. La particularidad de este estuario es que la parte final del río se encuentra separada del mar por una amplia flecha litoral (denominada flecha de El Rompido o de Nueva Umbría).

Esta flecha ha crecido notablemente en los últimos años y el balance de sedimentos neto dentro del estuario es tan alto que favorece el aterramiento de la desembocadura, afectando no sólo a la navegabilidad, sino también a las distintas actividades socioeconómicas de la zona. Por contrapartida, la zona del litoral situada al este de la flecha, se encuentra en continua erosión.

Este estudio demuestra la importancia que tiene las acciones antrópicas sobre la costa. La modificación de una flecha litoral provoca consecuencias como: aterramientos de la bocana, erosión y/o acumulación de distintas zonas, impactos sociales y económicos etc.

2.5 Formación de los sistemas dunares de la desembocadura del río Guadalquivir

Una vez analizados algunos estudios que ponen de manifiesto el cambio en esta zona de estudio, veamos cómo se formaron originariamente los sistemas dunares que son objeto de estudio de este TFM.

Todo el tramo costero está conformado por sistemas que basculan hacia el sureste, de gran extensión en cuanto a la dimensión horizontal, y leves en cuanto al desnivel vertical. En la evolución geomorfológica de la desembocadura del río Guadalquivir se pueden distinguir dos sistemas morfodinámicos y en distintas etapas, según distintos autores (Antonio Rodríguez-Ramírez, 2008), (Vanney, 1970), (Menateau, These 3e cycle). Estos dos sistemas son el litoral y el del estuario.

El sistema litoral está formado por los diversos escudos y barras arenosas que hacen también de límite con el estuario. Existe, al oeste de la desembocadura, un sistema dunar activo. Además el sedimento de arena ha ido depositándose gradualmente a lo largo del litoral, cerrando el estuario. Hay entonces, una relación directa entre el estuario del Guadalquivir y las formaciones arenosas de los alrededores.

Originariamente (situación A de figura 20), unos 6900 años BP (antes del presente), la zona estaba formada por una desembocadura abierta. Más adelante se empezaron a formar distintas zonas como resultado de la deriva litoral y del transporte de sedimentos fluviales. Estas zonas se desarrollaron respectivamente entre 6900-4500 años BP, 4200-2600 años BP, 2300-1000 años BP y 1000 años BP, hasta la actualidad.

Los procesos erosivos más importantes desarrollados son los descritos en las situaciones A, B, C, D, E, F, G, H. Así, en los últimos 2000 años la erosión de los acantilados costeros ha sido muy intensa. Se estima un retiro de algunos puntos de la playa en los últimos 2000 años de hasta 200 metros, mientras que en el tramo más al este (desembocadura), toda esa erosión del oeste se ha transformado en progradación o ganancia de terreno formando así lo que a día de hoy se conoce, y resultando una zona sedimentada de hasta 220 metros en los últimos 220 años (Antonio Rodríguez-Ramírez, 2008).

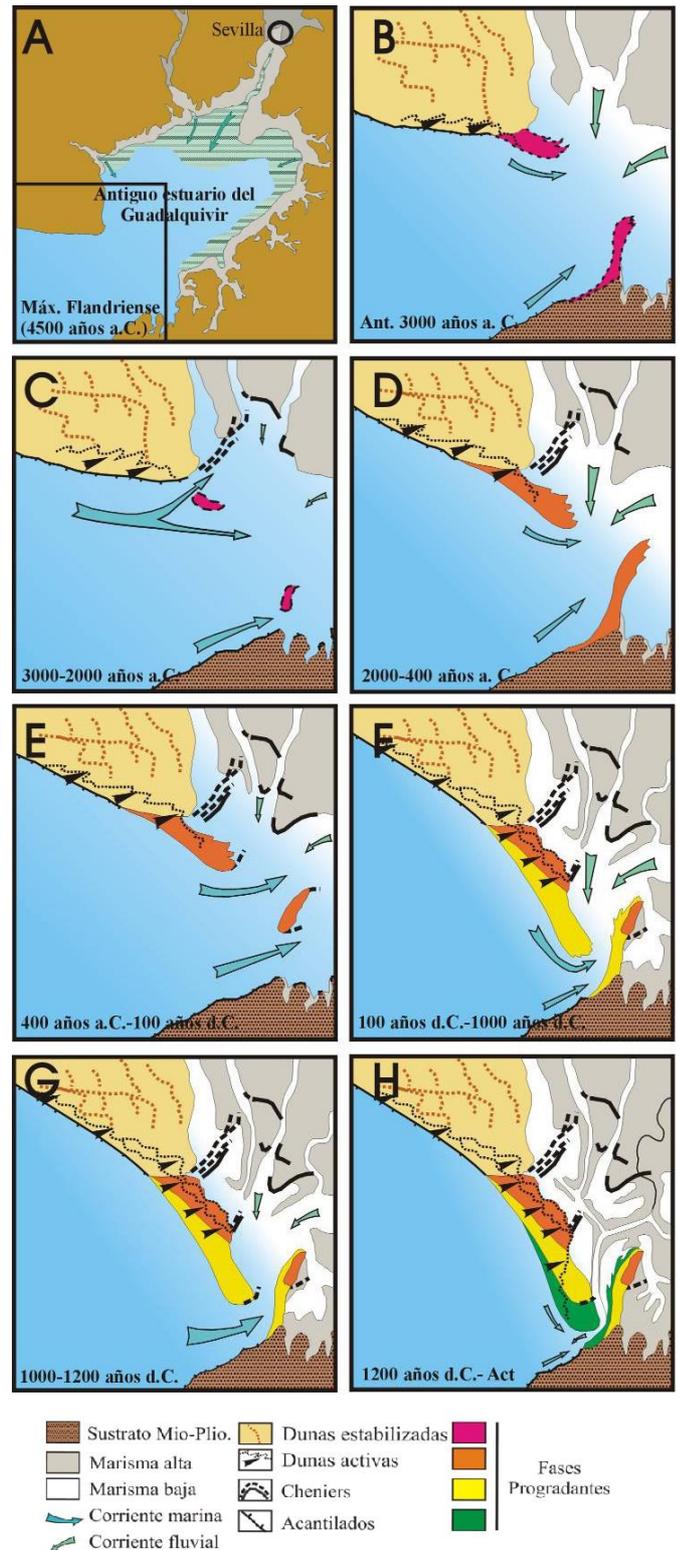


Figura 20: Secuencia de evolución en el área del Guadalquivir. A. Primer evento erosivo. B. Segunda fase progradante. C. Segundo evento erosivo. D. Tercera fase progradante. E. Tercer evento erosivo. F. Cuarta fase progradante (Rodríguez Ramírez, 1996).

Las fases de ganancia de suelo han ido aislando el estuario del Guadalquivir del mar a medida que pasaban las décadas. Esto condujo a una disminución de las mareas y corrientes en el interior. Sin embargo, estas fases de sedimentación se han visto interrumpidas por etapas de rápidos ascensos del nivel del mar, que han provocado erosión en las costas en forma de pronunciados acantilados y acumulación de sedimentos en forma de barras dunares y superposiciones de dunas.

Por otro lado, y en el corto plazo, el estuario del Guadalquivir ha experimentado una progresiva degradación en las últimas décadas. El flujo de sedimentos fluviales ha sido alterado mediante la construcción de numerosas presas en su curso hidrográfico, así como distintos canales y desvíos. Estas alteraciones antrópicas han reducido el caudal del río, especialmente en las épocas de invierno.

Según el autor (Menateau, These 3e cycle), la media anual del caudal se ha reducido desde 5000m³/s (año 1945) hasta los 2000m³/s (en la actualidad). En las últimas décadas, la corriente de deriva se está volviendo más fuerte y la sedimentación está aumentando en la punta de Doñana (tramo este). Barras de arena se han ido formando con orientación NE, invadiendo el canal del Guadalquivir con una tasa de progradación de 9m/año entre 1956 a 1996 (F. Ruiz, 2003).

A diferencia de otros estuarios de la costa de Huelva, no se han construido puertos o muelles en la desembocadura del Guadalquivir, pero sí que se ha producido una importante urbanización de un sector del margen izquierdo de su boca, donde se encuentra Sanlúcar de Barrameda. Es en este sector donde se producen las tasas más altas de retrogradación (Rodríguez-Ramírez A. R., 1997)

2.6 Escala temporal de estudio.

Tal y como se ha podido comprobar en los estudios presentados anteriormente, la escala temporal es básica, pues del enfoque que el investigador le otorgue dependen las conclusiones. En escalas temporales a largo plazo, es difícil concluir sobre la influencia de acciones antrópicas sobre el tramo de costa. Sin embargo, en acciones a corto y medio plazo, pueden asociarse cambios morfodinámicos y ambientales con las acciones del ser humano.

Esta diferenciación entre corto y largo plazo es plausible en los distintos estudios que se han presentado anteriormente. Básicamente se puede realizar esta clasificación y relacionar los periodos a largo plazo con cambios ajenos a la acción humana (cambio climático, subida del nivel del mar, etc), y los de a corto plazo con acciones más identificativas, como puede ser la realización de una obra portuaria, una urbanización costera, un puerto, una regularización del flujo fluvial, etc.

En este sentido, este estudio es de claro carácter cortoplacista, debido principalmente al objetivo de relacionar el dique Juan Carlos I, que data del año 1981, con el cambio que se ha ido apreciando mediante imágenes teledetectadas en la costa Onubense, y en concreto, en el tramo más al este del litoral del Parque de Doñana. Así, el periodo de estudio estará supeditado a la obtención de imágenes satélite antes del dique, situaciones que a partir de ahora llamaremos situaciones predique (anteriores a 1981).

Por otro lado, se tendrán imágenes postdique, que irán desde los años 1981 al 2018 (actualidad). Todo, con el objetivo de comparar imágenes y resultados entre los dos escenarios, el escenario predique y el escenario postdique.

2.7 Variables climatológicas y morfodinámicas principales.

Tan importante como conocer la zona de estudio es conocer su climatología y las acciones principales a las que se ve sometido. Toda el área de estudio se encuentra bajo la influencia del Clima Mediterráneo, que se caracteriza por sus inviernos suaves, prácticamente sin heladas, veranos secos y con altas temperaturas, con las precipitaciones concentradas principalmente en otoño y primavera.

En ese sentido y para poder relacionar y entender mejor los resultados que se expondrán en el capítulo 4 de este trabajo, se explica a continuación la variación histórica de las siguientes variables:

- Temperatura media anual medida en grados centígrados
- Precipitación total media anual medida en milímetros de lluvia: Es decir, la media de las precipitaciones

mensuales totales de cada año de registro.

- Evaporación total media anual medida en milímetros de lluvia: Es decir, la media de las evaporaciones mensuales totales de cada año de registro.
- Datos de marea: Dirección principal, velocidad principal y altura de marea.
- Régimen de oleaje: Dirección de frente de ola, altura de ola, periodo
- Régimen de vientos.
- Corriente de deriva total.

Estas variables pueden resultar de interés para asociarlas con los procesos de erosión vegetal y/o erosión de sedimento, y para relacionarlas con los resultados obtenidos.

2.7.1 Temperatura media anual, precipitación total media y evaporación total media.

Los datos expuestos en la figura 21 han sido consultados a través de Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2017) y se ha escogido la estación meteorológica más cercana disponible, la de Huelva, con fecha inicial a partir del año 1950, con el fin de realizar el histórico y ver la evolución de las variables climáticas en la zona. Se ha realizado una serie temporal de elaboración propia año a año con las variables anteriormente mencionadas. Se ha escogido esa fecha de inicio dado que es una fecha previa a la construcción del dique Juan Carlos I.

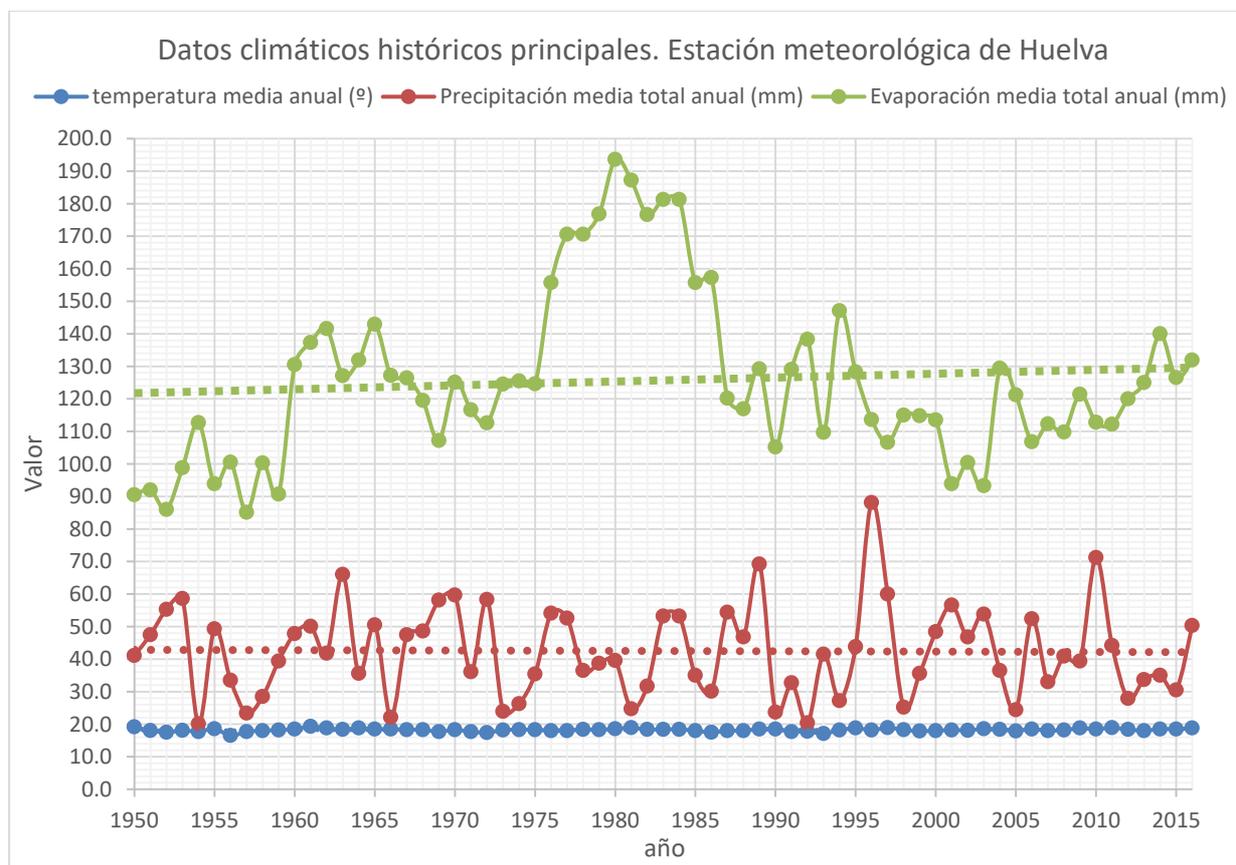


Figura 21: Datos climáticos históricos principales. Fuente datos: AEMET - elaboración propia.

Puede observarse lo siguiente:

- Que los valores de temperatura media anual son prácticamente constantes en el tiempo y que su valor se encuentra comprendido entre los 18° y 20°.
- Que los valores de precipitación total media anual son muy variables, y en concreto se observan tendencias cíclicas en el tiempo, con años de escasez de lluvia y años de abundancia. Sin embargo, la tendencia pese a ser cíclica en el corto plazo, es constante en los 66 años de estudio, como puede observarse con la línea de tendencia (línea discontinua roja).

- Los valores de evaporación total media anual son muy dispersos y variables. Se observa una tendencia al alza al medio plazo de los milímetros de agua evaporados medidos por la estación meteorológica a lo largo de los últimos 66 años.

2.7.2 Datos de marea de la zona de estudio

La marea determina el modelado y relleno de los estuarios, así como es partícipe de la extensión de playas arenosas que puedan estar expuestas a la acción del viento. La marea en la zona, se propaga en dirección de Sur a Norte. Esta marea, se propaga a una velocidad media de entorno a 25km/h (Borrego, 1992) y el rango mareal para la zona de interés es de poco más de 2 metros, con una diferencia entre la PMVE (Pleamar Máxima Viva Equinoccial) y la BMVE (Bajamar Mínima Viva Equinoccial) de alrededor de 3.8 metros. Así, la marea de la costa de Huelva se identifica como mesomareal.

Los datos, que se presentan en la figura 23 son los obtenidos de Puertos del Estado (Puertos-del-Estado, 2018). Éstos son obtenidos del mareógrafo de Bonanza2, que consiste en un sensor de radar situado en 6°20'17.27"W de longitud y 36°48'7.96"N de latitud referidas al elipsoide WGS-84 (véase figura 22). Este mareógrafo se ha escogido por su cercanía con la zona de estudio y queda en la desembocadura del Guadalquivir, por lo que por su proximidad son datos que bien se pueden extrapolar a la zona de estudio.



Figura 22: Ubicación del mareógrafo Bonanza2, utilizado para la obtención de los datos.

A continuación se muestra un resumen, en la tabla 1, donde se representa los niveles máximos, mínimos y medios de toda la serie histórica, así como su evolución en el tiempo a través de la figura 23. La serie histórica presentada, que tiene datos desde el año 1992, refleja lo comentado en el párrafo inicial anterior, con una variación entre la PMVE (dato máximo registrado) y la BMVE (dato mínimo registrado) de en torno 3.8m. Comentar además que la componente de marea astronómica es la componente con más peso sobre la marea total.

Tabla 1: Valores de Pleamares y Bajamares observadas del mareógrafo Bonanza 2. Estos datos se calculan sobre toda la serie de pleamares y bajamares coincidentes con mareas vivas y muertas. Fuente datos: (Puertos-del-Estado, 2018). Niveles observados en cm.

	Máx. (cm)	Min (cm)	Med (cm)
Pleamar	386	184	275
Bajamar	170	-3	76
Pleamar viva	381	274	323
Bajamar viva	122	-3	46
Pleamar muerta	366	184	227
Bajamar muerta	170	61	114

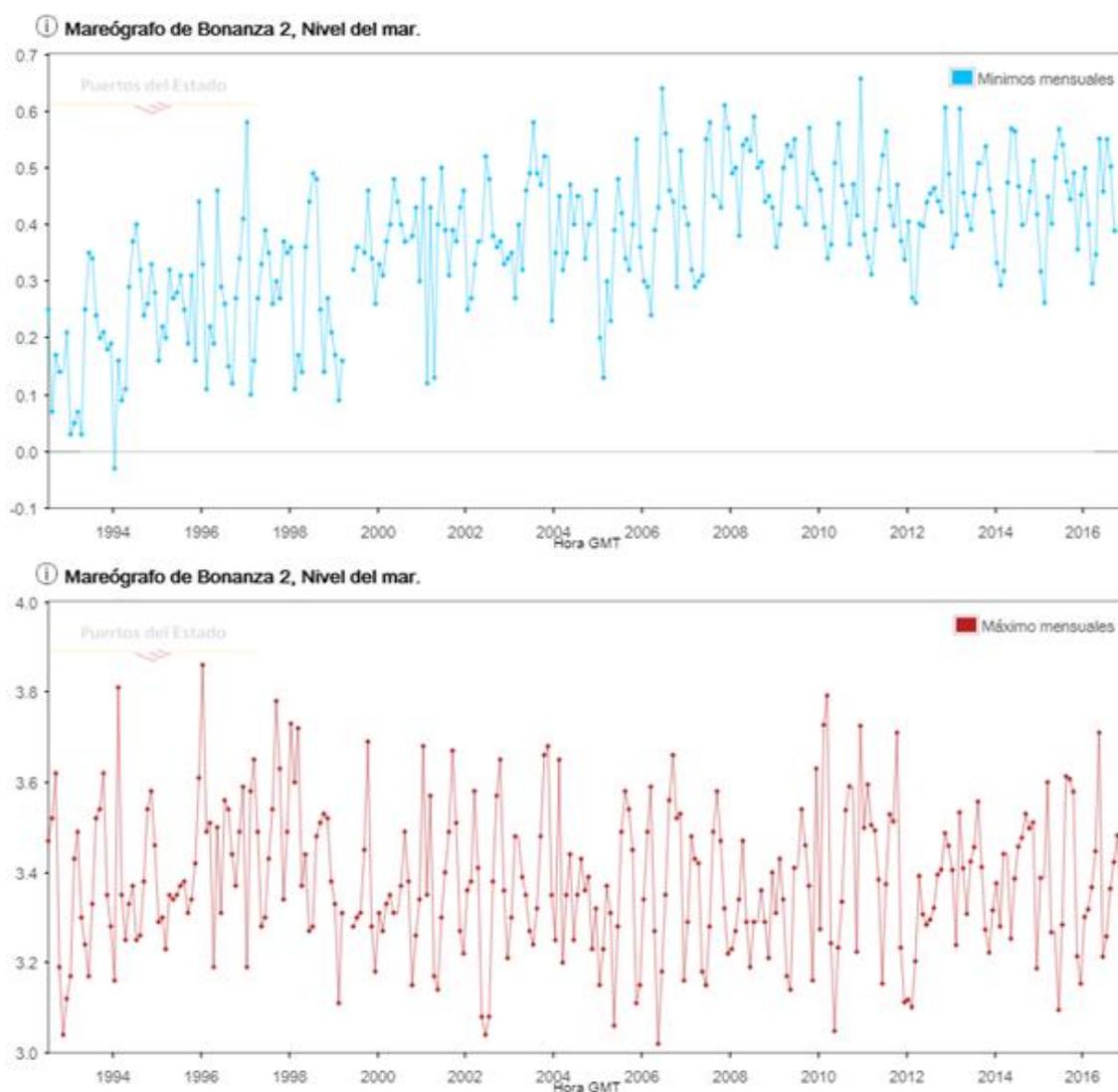


Figura 23: Registro histórico de los niveles mínimos (arriba) y máximos (abajo) del mareógrafo de Bonanza 2. Fuente: (Puertos-del-Estado, 2018). Niveles observados en metros.

2.7.3 Clima medio de oleaje y viento

Los datos de clima medio de oleaje y viento se han obtenido a través del servidor de datos de Puertos del Estado (Puertos-del-Estado, 2018). En la zona de estudio, ubicada en el Golfo de Cádiz, se encuentra una boya propiedad de Puertos del Estado (“Boya de Golfo de Cádiz”) que registra datos de oleaje y viento desde el año 1958. Sin embargo, debido a la lejanía de la Boya de Golfo de Cádiz con el sistema dunar de Doñana, se ha optado por escoger la información de un punto SIMAR.

El conjunto de datos SIMAR está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico. Son por tanto datos sintéticos y no proceden de medidas directas de la naturaleza.

Las series SIMAR surgen de la concatenación de los dos grandes conjuntos de datos simulados de oleaje con los que tradicionalmente ha contado Puertos del Estado: SIMAR-44 y WANA. El objetivo es el de poder ofrecer series temporales más extensas en el tiempo y actualizadas diariamente. De este modo, el conjunto SIMAR ofrece información desde el año 1958 hasta la actualidad.

El punto SIMAR escogido de referencia para la obtención de datos de oleaje y viento es el “Nodo SIMAR 5036020”, situado en longitud -6.500E, latitud 36.917N y profundidades indefinidas. El conjunto de datos de este punto contiene las estimaciones diarias de oleaje (modelo WAM) y viento (modelo HIRLAM) desde 1958. En la figura 24 se muestra la ubicación.

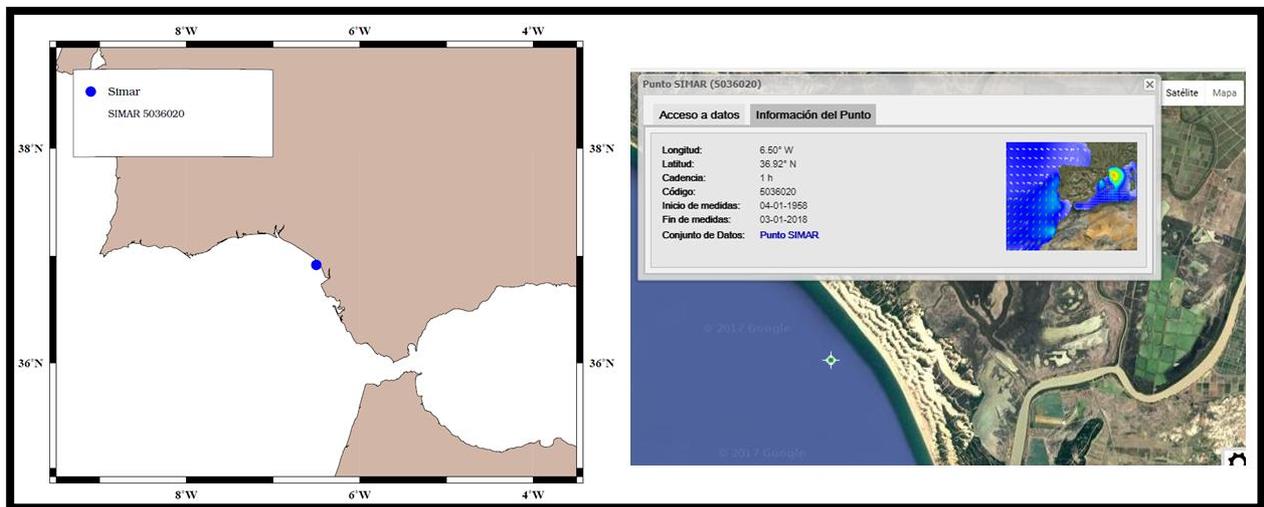


Figura 24: Ubicación del nodo SIMAR 5036020. Fuente datos: (Puertos-del-Estado, 2018)

Se puede definir como régimen medio de una serie temporal al conjunto de estados de oleaje que más probablemente nos podemos encontrar. Si representamos los datos en forma de histograma no acumulado, el régimen medio vendría definido por aquella banda de datos en la que se contiene la masa de probabilidad que hay entorno al máximo del histograma.

El régimen medio se describe, habitualmente, mediante una distribución teórica que ajusta dicha zona media o central del histograma. Es decir, no todos los datos participan en el proceso de estimación de los parámetros de la distribución teórica, sólo lo hacen aquellos datos cuyos valores de presentación caen en la zona media del histograma.

La distribución elegida para describir el régimen medio de las series de oleaje es Weibull cuya expresión es la siguiente:

$$F_e(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x - B}{A}\right)^c\right) \quad (2-1)$$

El parámetro B es conocido como de centrado y su valor ha de ser menor que el menor de los valores ajustados; A es el parámetro de escala y ha de ser mayor que 0; y C es el parámetro de forma y suele moverse entre 0.5 y 3.5.

El régimen medio suele representarse de una forma gráfica mediante un histograma acumulado y el correspondiente ajuste teórico, todo ello en una escala especial en la cual Weibull aparece representada como una recta.

El régimen medio está directamente relacionado con lo que se denominan condiciones medias de operatividad. Es decir, caracteriza el comportamiento probabilístico del régimen de oleaje en el que por término medio se va a desenvolver una determinada actividad influida por uno de estos agentes.

2.7.3.1 Oleaje

Para el oleaje se obtienen los diagramas de distribución de Periodo Pico y de Altura Significativa frente a la frecuencia de ocurrencia (figura 25) y la rosa de oleaje (figura 26). Con estas representaciones se pueden apreciar de forma rápida cuales son las alturas de ola, periodos y direcciones medias de procedencia que predominan en la zona de estudio.

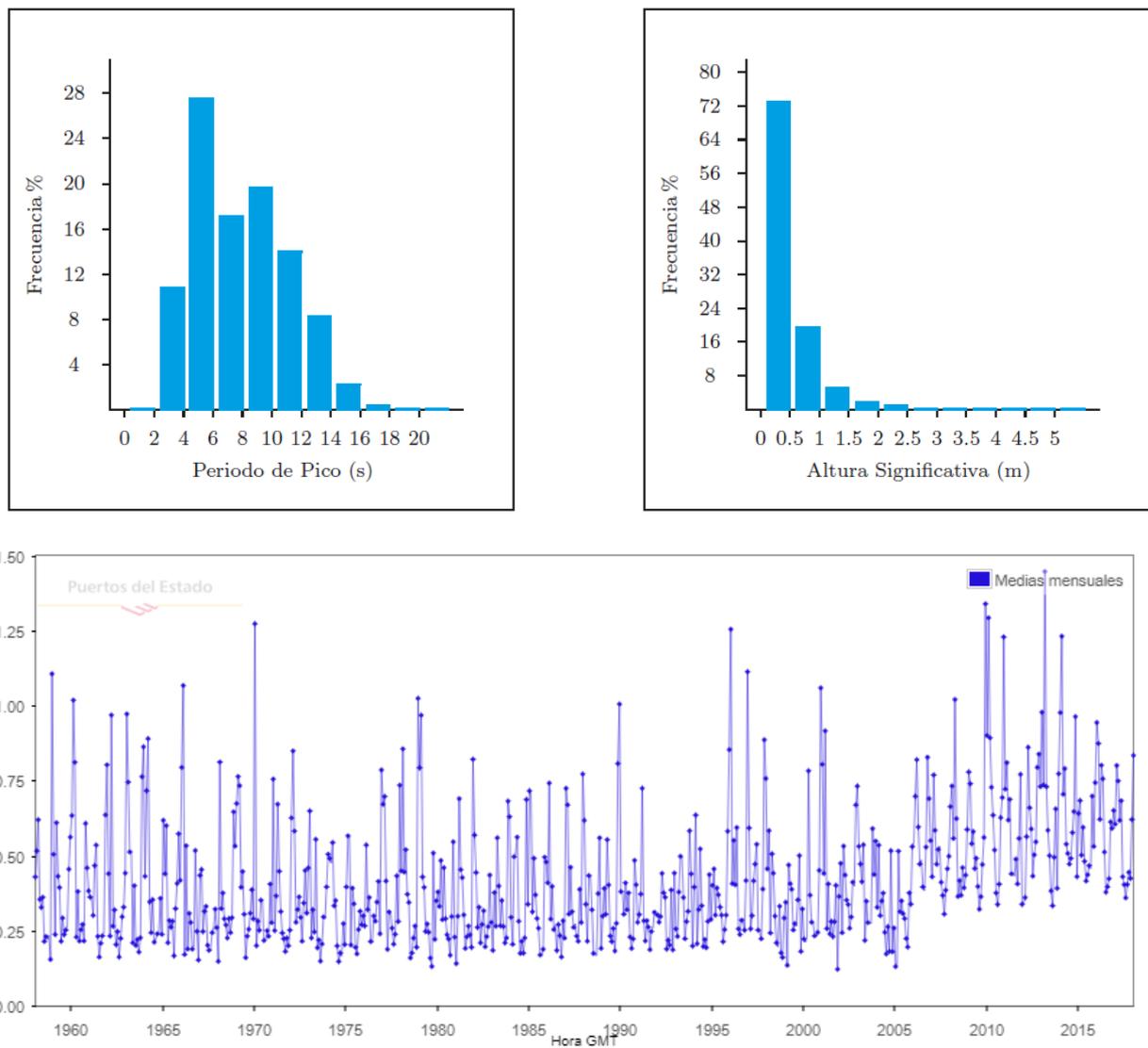


Figura 25: Distribución de periodo pico y altura significativa del punto SIMAR 5036020 en periodo 1958-2017 (arriba); evolución de la altura de oleaje media mensual (abajo). Valores en metros. Fuente: (Puertos-del-Estado, 2018)

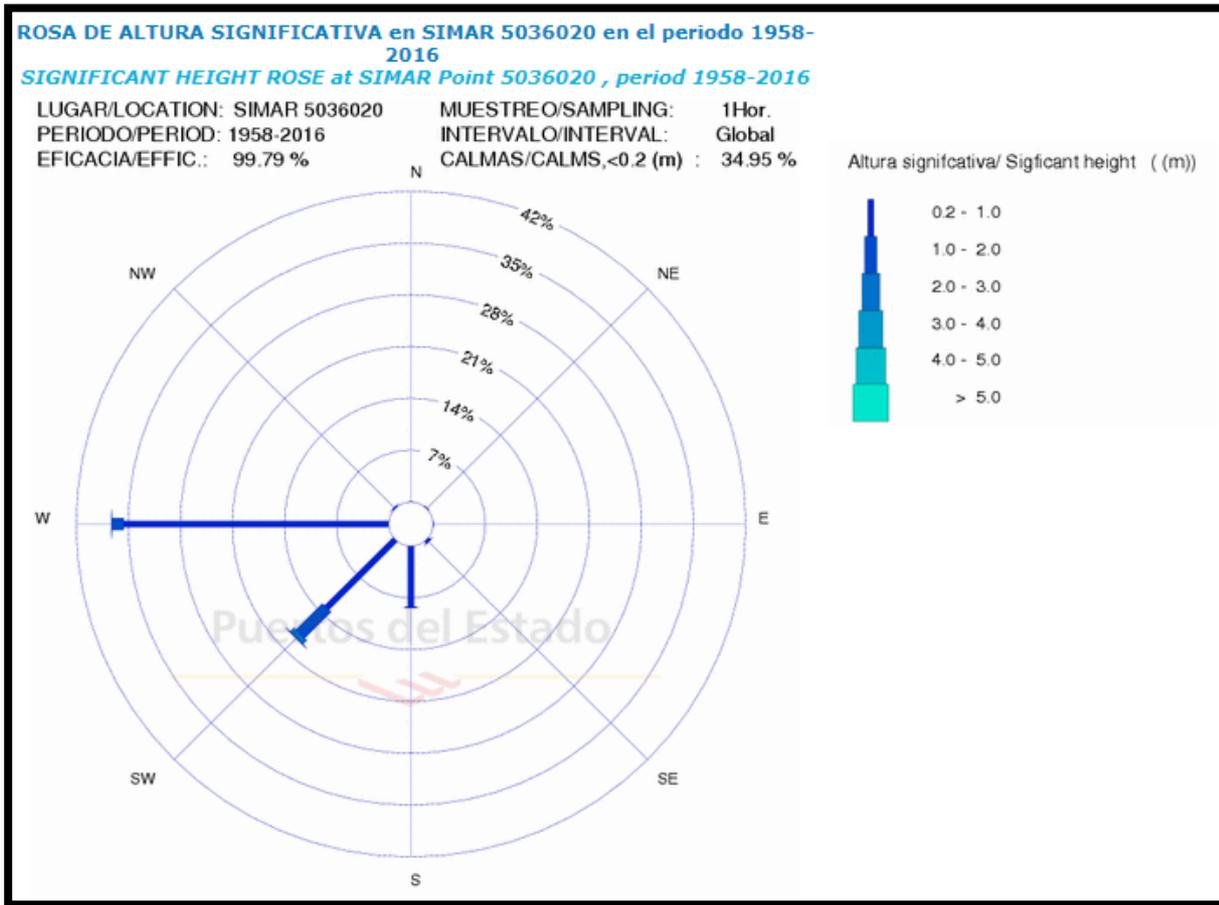


Figura 26: Rosa de Oleaje del punto SIMAR 5036020 en el periodo 1958-2016. Fuente (Puertos-del-Estado, 2018)

Los resultados más reseñables del clima medio de oleaje en la zona de estudio son:

- Rango de alturas de olas entre 0 y 5 m.
- Las alturas de ola más frecuentes están entre 0.1 y 0.5 m.
- Rango de periodos pico entre 2 y 21 s.
- Los periodos pico más frecuentes están entre 4 y 6 s.
- La dirección de procedencia del oleaje más frecuente es W y el SW
- Los niveles de altura significativa del oleaje (la tendencia) se han visto aumentado desde el año 2005 tal y como puede observarse en la figura 25.

2.7.3.2 Viento

El régimen de vientos es una variable importante pues condiciona en cierta medida a los sistemas dunares. Claramente debe haber una relación entre la intensidad y la dirección principal de viento y el movimiento y la formación de sistemas dunares, como el del sistema dunar de Doñana.

Para el viento se obtienen los diagramas de velocidad media frente a la frecuencia de ocurrencia (figura 27) y la rosa de viento (figura 28). Con estas representaciones se pueden apreciar de forma rápida cuales son las velocidades medias, su dirección y su frecuencia de ocurrencia.

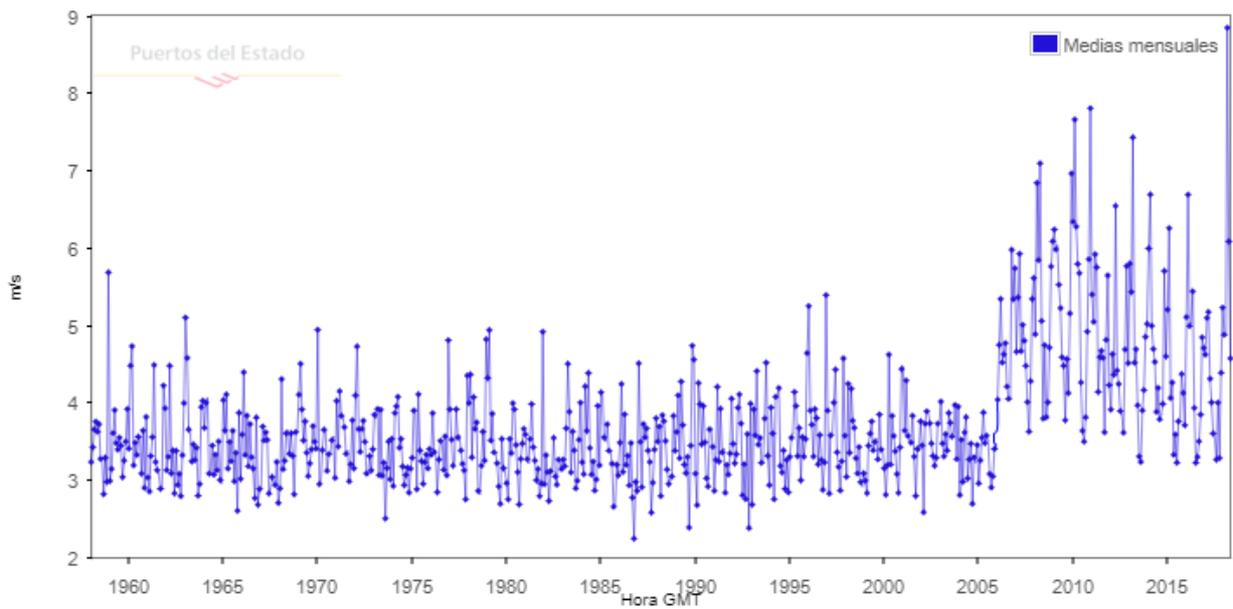
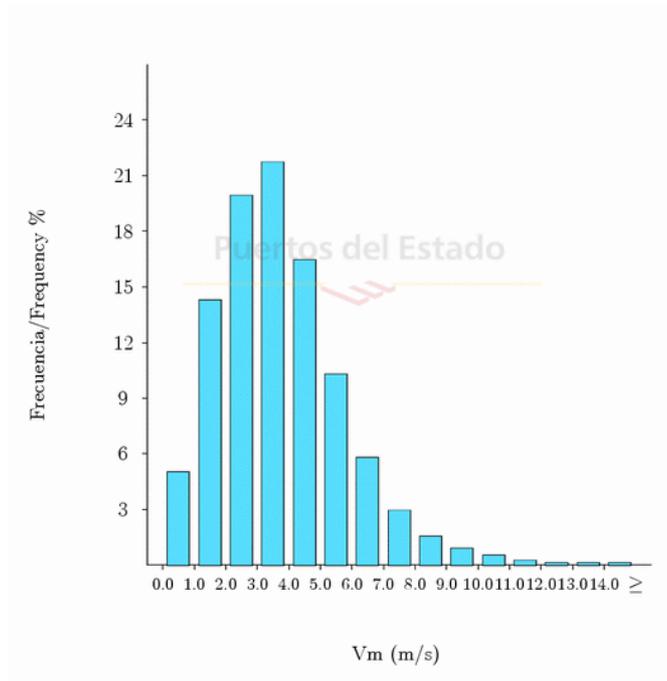
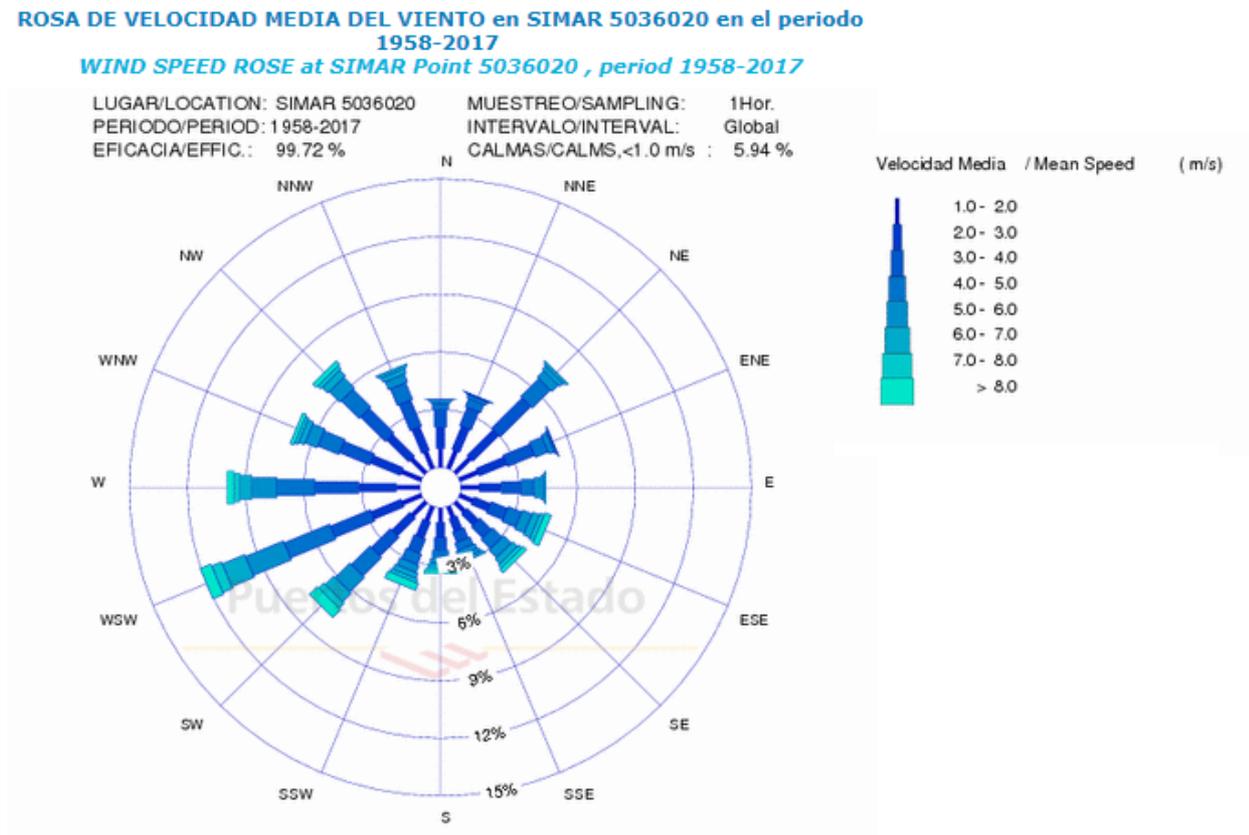


Figura 27: Distribución de velocidad media de viento del punto SIMAR 5036020 en periodo 1958-2017 (arriba), evolución de la velocidad media de viento en m/s desde el año 1958-2018 (abajo). Fuente: (Puertos-del-Estado, 2018)



Los resultados más destacados del clima medio de vientos son:

- Rango de velocidades de viento entre 0 y 14m/s.
- Las velocidades de viento más frecuentes están entre 2 y 4m/s.
- Las direcciones de procedencia del viento más frecuentes así como la de los temporales más fuertes son WSW (12% de los días) y W (9% de los días).
- La tendencia en cuanto a la evolución de la velocidad de viento es constante hasta el 2005. A partir de este año, se aprecia un aumento en la tendencia de los niveles medios de velocidad

2.7.4 Corrientes

El oleaje en la costa también genera corrientes que influyen considerablemente en el movimiento de los materiales sedimentarios a lo largo del litoral y es una causa fundamental de la erosión o progradación de la costa.

La corriente de deriva litoral se produce cuando las olas llegan oblicuas a la costa, esto da lugar a una corriente paralela al litoral, entre la zona de rompiente y la orilla (ver figura 29). La corriente de deriva litoral es la que mayor influencia tiene en el transporte de material a lo largo de todo el tramo del litoral Onubense. En el área de estudio, debido a la combinación de los vientos y el oleaje predominantes procedentes del tercer cuadrante, se genera deriva hacia el este. Se produce una componente neta de transporte litoral del orden de 180000 a 300000 m³/año (Cuenca, Madrid).

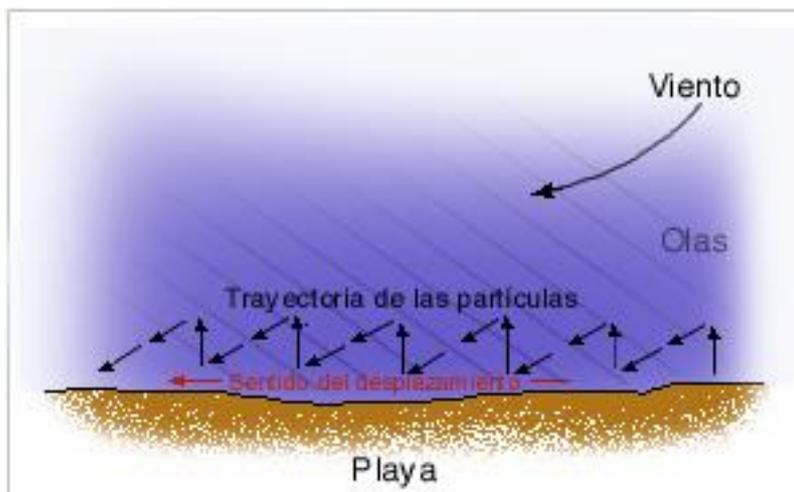


Figura 29: Representación de Corriente de Deriva. Fuente: (CURSO GEOGRAFIA DEL MAR, 2018)

Por otro lado, como suministradores de sedimentos a las zonas costeras, la red fluvial se constituye como un factor importante. Así, el Guadiana y el Guadalquivir son los dos principales cursos fluviales, con una descarga sedimentaria media estimada de 144m³/s y 185m³/s, respectivamente (Vanney, 1970). En las últimas décadas, debido a la construcción de presas reguladoras en los cursos fluviales, el flujo de estos ríos ha decrecido.

También existen las corrientes oceánicas que con mayor o menor repercusión, afectan al flujo de sedimentos hacia la costa. En este caso, se destaca la corriente atlántica superficial que es la más cercana a la costa y que va en el sentido NW a SE, es decir, ayudando al transporte neto de sedimento hacia el este de la costa Onubense, provocando sedimentación.

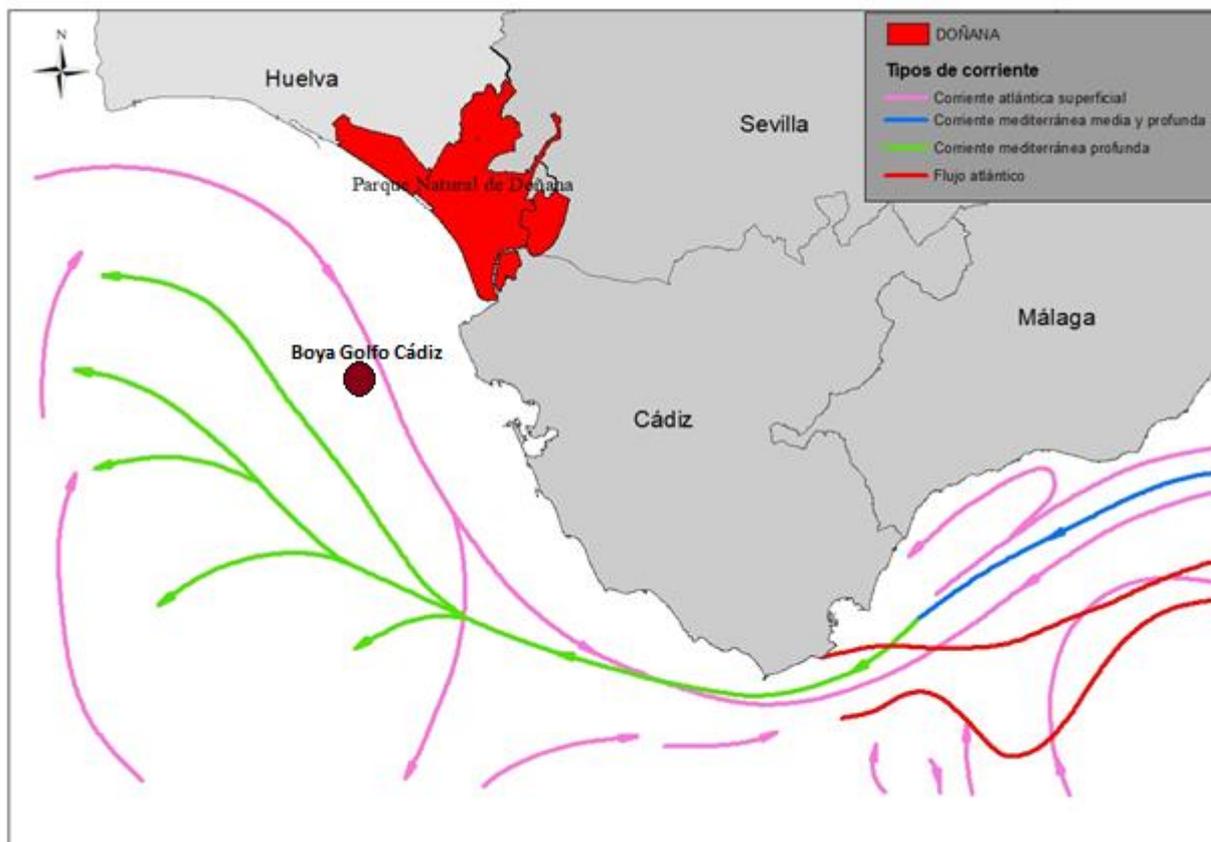


Figura 30: Tipos de corrientes cercanas al litoral Onubense. Fuente datos: (ANDALUCIA, 2018)- Elaboración propia mediante software ArcMap 10.1. Punto azul: ubicación de la Boya del Golfo de Cádiz.

A continuación se muestran datos desde el año 1991 relativos a la velocidad media de la corriente medidos en

la Boya del Golfo de Cádiz (figura 30). Estos muestran cómo la tendencia sigue siendo constante, no se aprecian aumentos ni descensos en la tendencia desde la fecha indicada. La corriente influente es la atlántica superficial

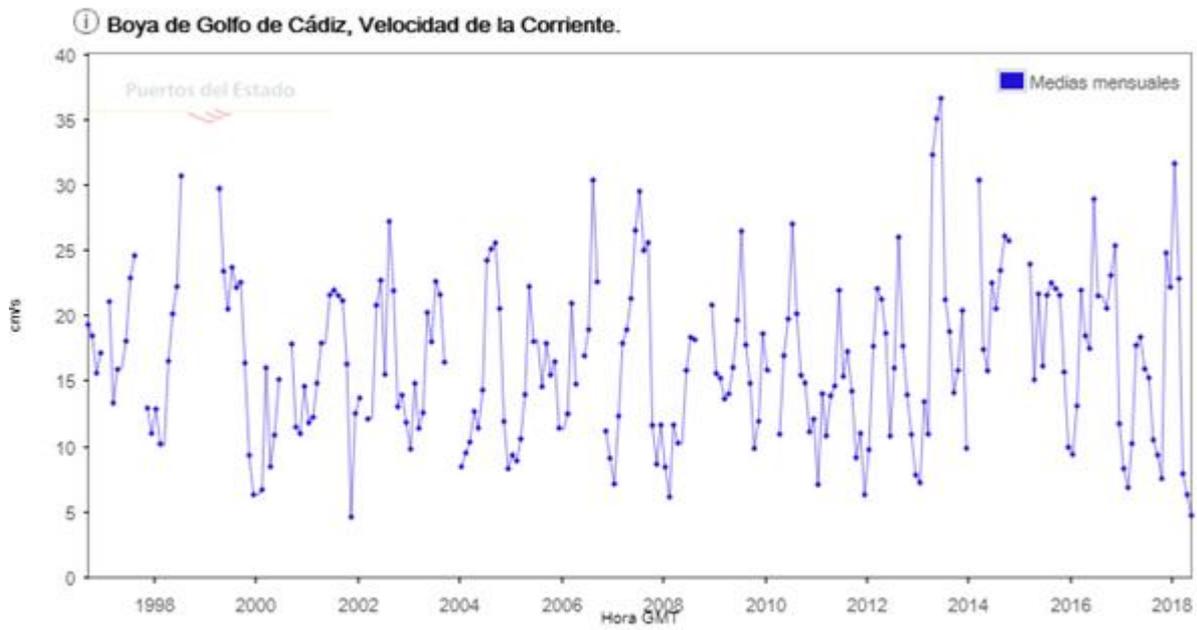


Figura 31: Velocidad media de la corriente (cm/s) al paso por la Boya del Golfo de Cádiz. Fuente

2.8 Batimetría de la zona de estudio

La zona de estudio se caracteriza por tener un perfil de playa con pendiente suave y constante, con una batimetría casi recta y paralela. A continuación (figura 32) se muestra la batimetría de la zona, originada en Matlab a través de un archivo de datos.txt donde se incluyen las coordenadas (x, y, z) de la zona de estudio. Estos datos han sido proporcionados por el profesor Alejandro López Ruiz y son el resultado de una campaña batimétrica para otro estudio. Se puede observar como la batimetría de la zona se va adaptando a la forma general en planta de la costa y como no hay grandes desniveles entre batimétricas.

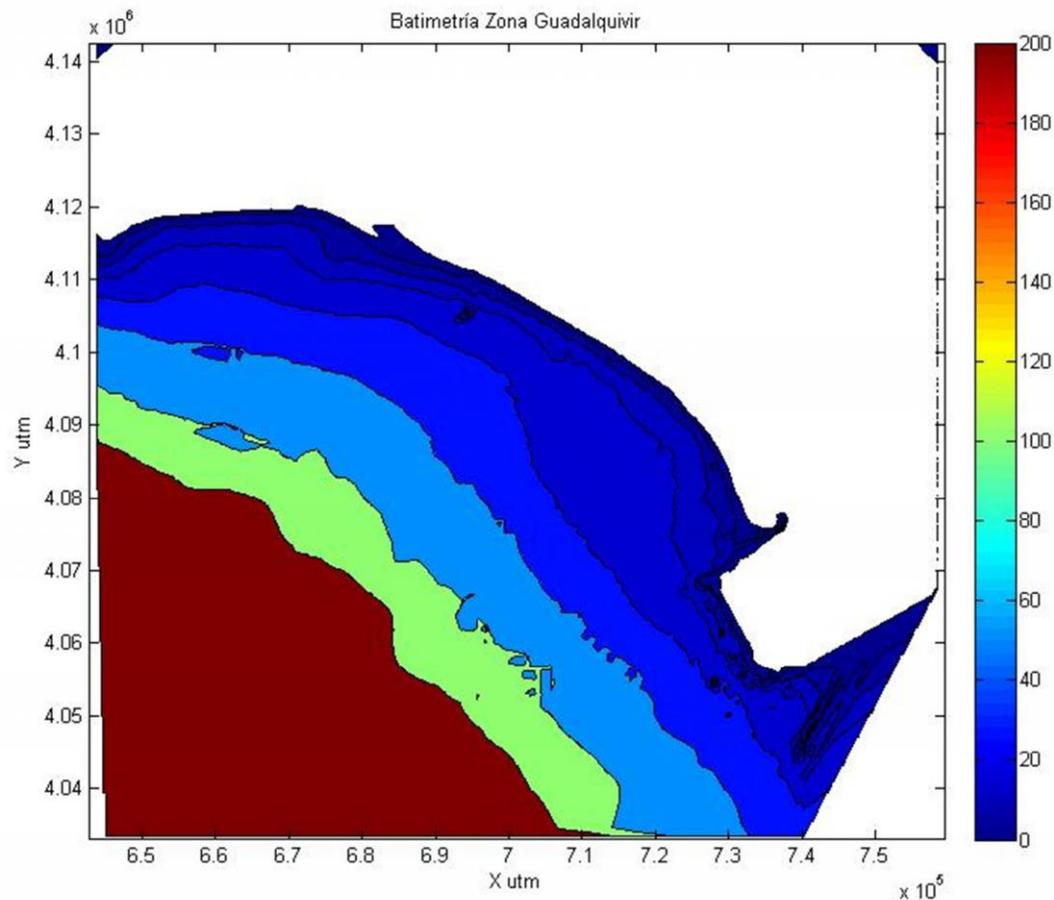


Figura 32: Batimétricas de la zona de estudio. Fuente de Elaboración propia mediante MatLab. Fuente datos: Prof. Alejandro López Ruiz: Asignatura Puertos y Costas.

Conocer la batimetría y el perfil de playa es importante para establecer una relación con la propagación de oleajes que vienen desde aguas intermedias y rompen en aguas someras, y entender por qué hay un tipo de ola y de rotura en un caso y en otro. Se observa como las profundidades vienen desde los 200 metros en aguas profundas con bandas progresivas desde los 100 metros de profundidad hasta llegar a la costa.

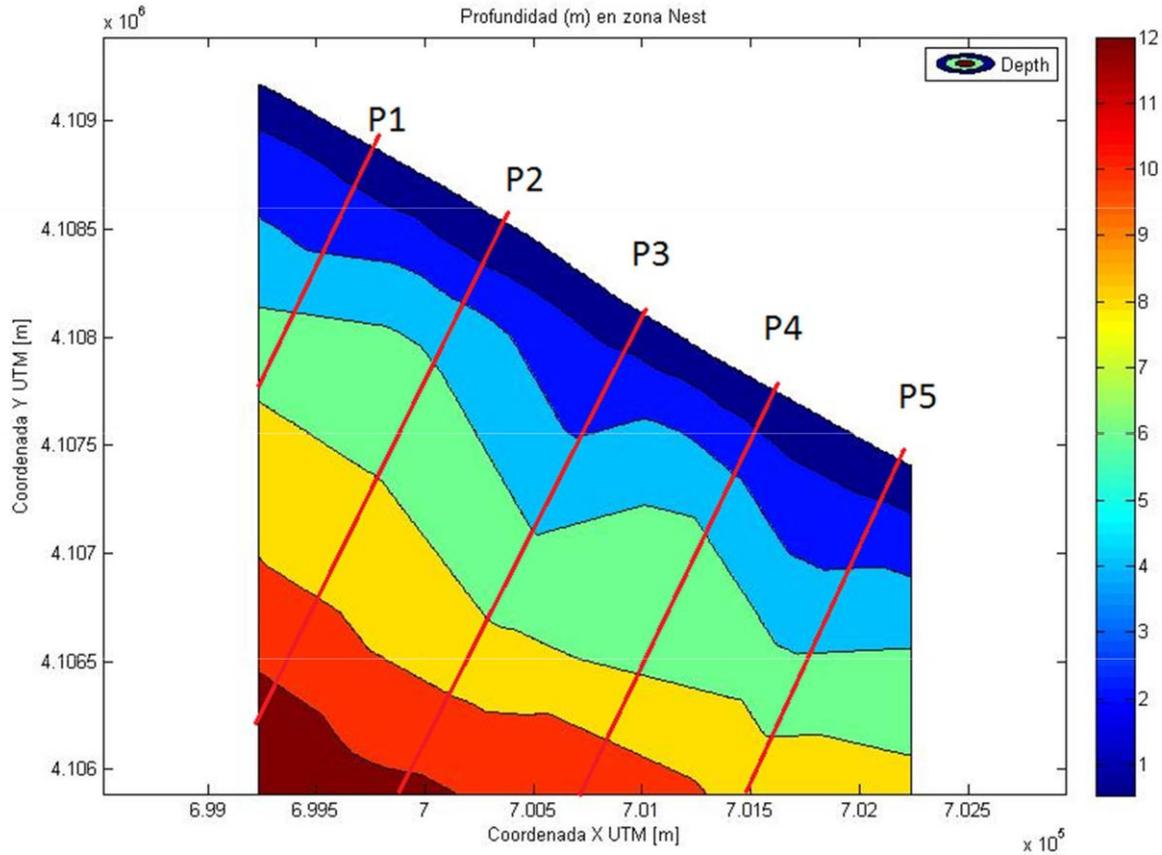


Figura 33: Batimetría cercana a la costa y perfiles tipo de la zona de estudio. Fuente de Elaboración propia mediante MatLab.

Pese a que simular las condiciones hidrodinámicas cerca de la costa no es uno de los objetivos de este trabajo, es conveniente su conocimiento y comportamiento. Se va a representar a continuación, dos tipos de perfiles de playa identificativos del tramo de estudio, en la zona de rompientes (los últimos 15-20 metros de profundidad). En la figura 33 se observan cuáles son los perfiles escogidos y en la figura 34 cómo son los perfiles tipo característicos de la zona. Se han representado únicamente 2 perfiles por la similitud entre ellos en el tramo de costa del sistema dunar.

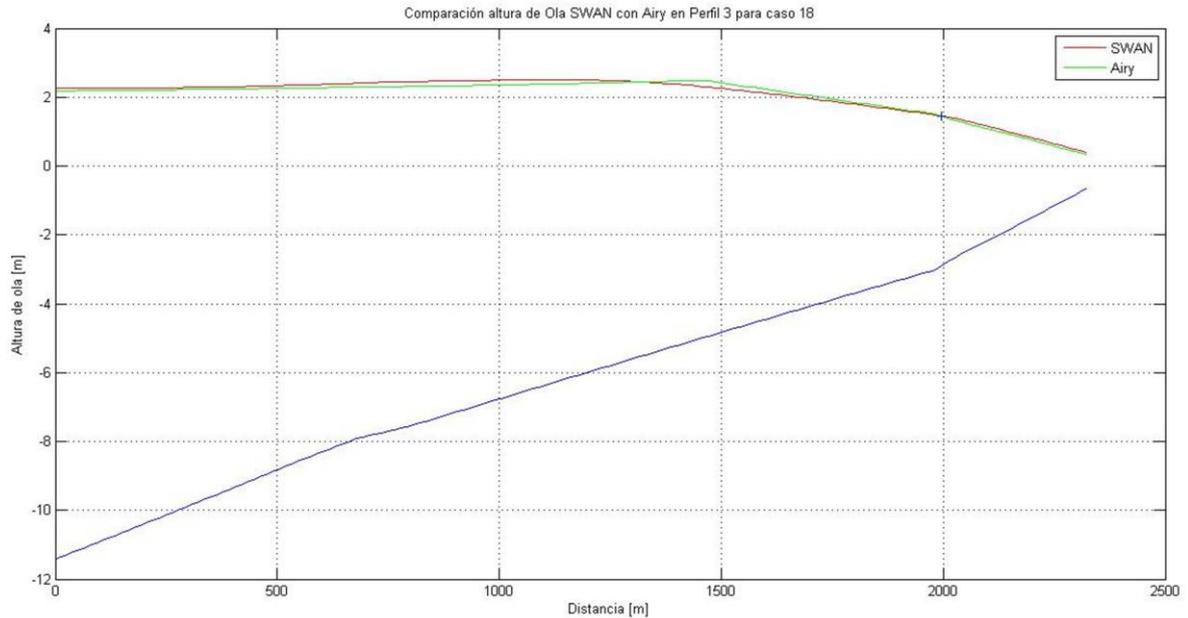


Figura 34: Perfil 3 tipo de la zona de estudio. Fuente de Elaboración propia mediante MatLab

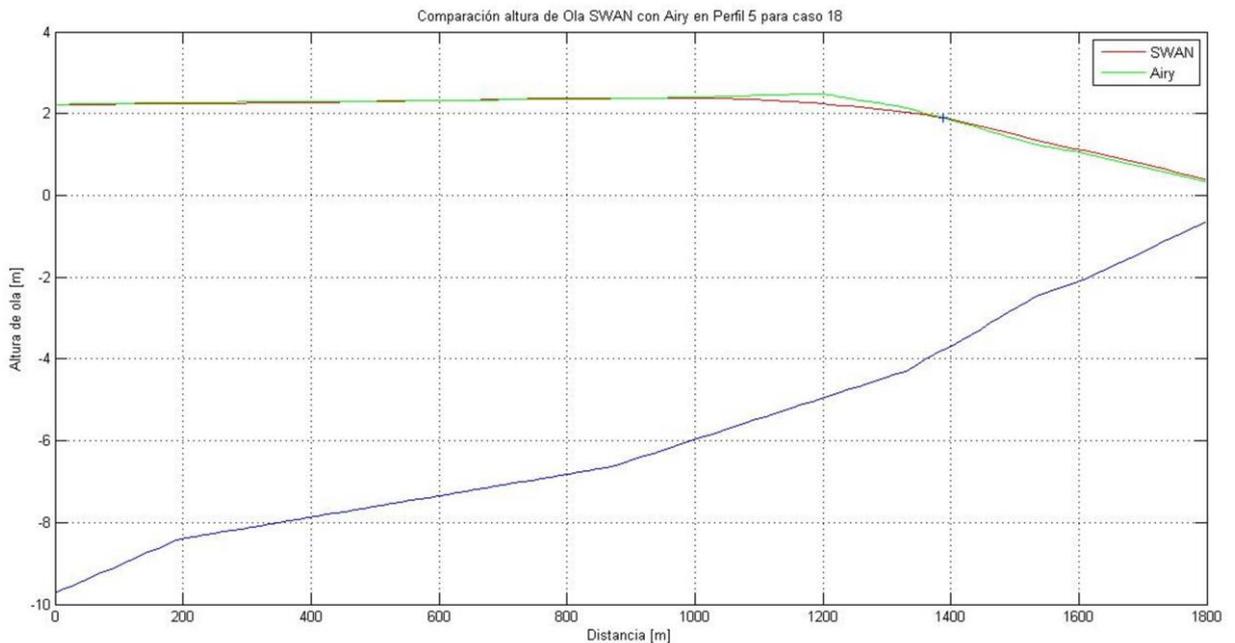


Figura 35: Perfil 4 tipo de la zona de estudio. Fuente de Elaboración propia mediante MatLab. Línea azul: perfil de playa; línea verde: Airy; línea roja: SWAN.

Además, se ha representado sobre cada perfil la altura de ola en aguas intermedias y someras calculada mediante la teoría lineal de Airy y calculada mediante un programa de cálculo numérico de elementos finitos (SWAN) (figura 35).

En este caso, al tener un perfil de playa tipo como los mostrados en las anteriores figuras, la rotura de la ola será progresiva y no abrupta, haciendo que sea posible el arrastre de sedimentos y la formación de amplias playas de arena, como es el caso.

Se puede observar como en ambos perfiles la altura de ola se incrementa levemente hasta una distancia cercana a los 600 metros de la costa, para después decrecer en esos últimos 600 metros para alcanzar la cota 0 de la costa. Pese a que no se va a entrar en profundidad a explicar ninguno de los dos métodos de cálculo de simulación de altura de ola sobre el perfil, se puede comentar que se observan pequeñas diferencias entre ambas teorías y esto

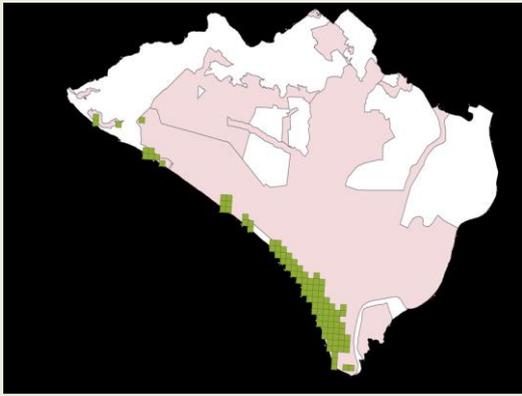
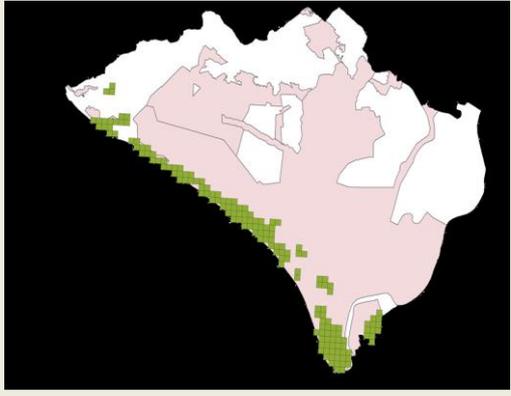
es debido a que Airy es una formulación más sencilla de oleaje regular, mientras que mediante SWAN se tienen en cuenta fenómenos más complejos como el concepto de oleaje irregular. Se observa en ambos perfiles como con los resultados de SWAN (línea roja) la altura de ola crece de manera más suave que con la teoría lineal (línea verde). El final de la curva es prácticamente igual, e incluso el inicio, la única diferencia es en la rotura donde con la teoría lineal se aprecia claramente mientras que con SWAN la rotura se produce más gradualmente.

2.9 Principales poblaciones vegetales

La comarca de Doñana está cubierta por más de un centenar de formaciones vegetales. Es muy diversa debido a los diferentes ecosistemas presentes, tanto acuáticos como terrestres. Desde el punto de vista florístico, el número de especies y subespecies ronda los 1000. Las formaciones vegetales de dunas y playas están en muchas soterradas como consecuencia del movimiento dunar y del viento.

En este apartado únicamente se van a nombrar las tipologías más relevantes (Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, 2010), los que por su importancia o por su extensión en la zona están más presentes. De entre las distintas poblaciones vegetales existentes en todo el ámbito de Doñana, se destaca: la Encina, que se encuentra sobre limos y arcillas; el Alcornoque, que ocupa la mayor parte de las áreas secas de Doñana; el Pino Piñonero; la Adelfa; el Tomillo; el Alhelí de Mar; el Brezo; la Zarzamora; la Armeria Velutina; la Armeria Gaditana; la Camarina; el Escobón; el Ercajo; la Lechetrezna; y la Centaurea Exarata.

En cuanto a las especies que puedan encontrarse en las zonas o alrededores de la zona de estudio –Sistema dunar de Doñana- de esta tesina se destaca (además del Pino Piñonero):

Nombre científico	Psamófila (Enebro marítimo)	Juniperus phoenicea (Sabina)
Breve descripción	Arbusto o pequeño árbol de hasta 6 metros con hábitat en dunas fijas y/o móviles litorales, formando enebrales costeros.	Arbusto o pequeño árbol de hasta 5 metros con hábitat es arenales secos y dunas litorales fijas formando sabinares.
Localización		
Nombre científico	Loeflingia baetica Lag	Armeria pungens
Breve descripción	Hierba anual con tallos de hasta 20cm, ramificados desde la base.	Mata de base robusta lignificada y muy ramificada, con tallos desprovistos de hojas de hasta 75 cm

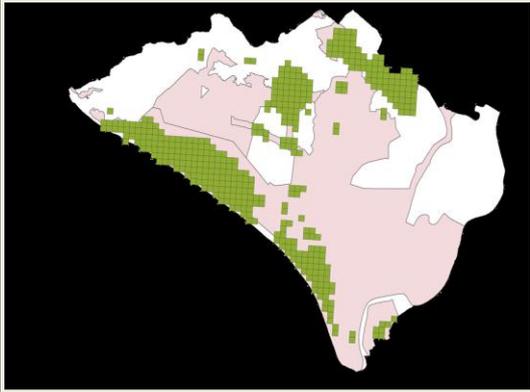
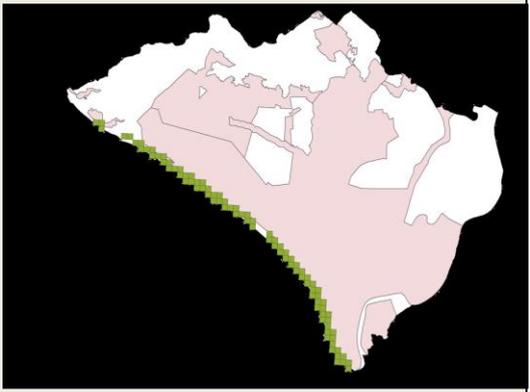
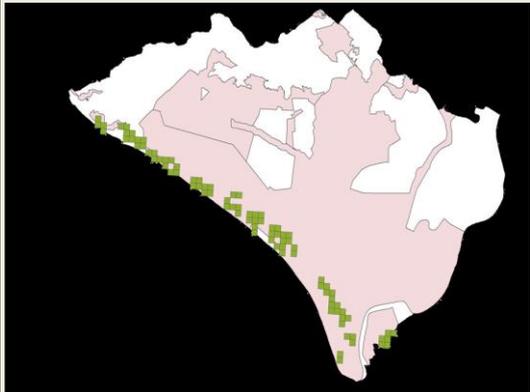
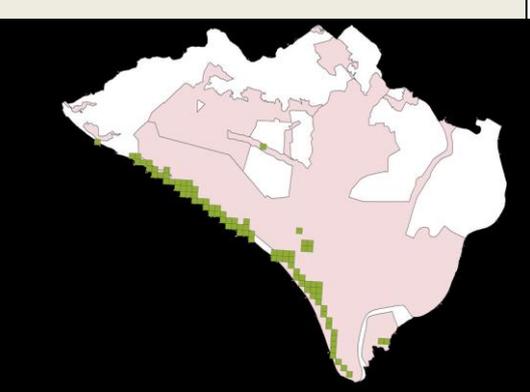
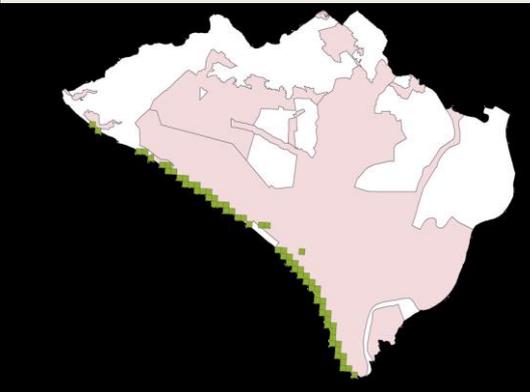
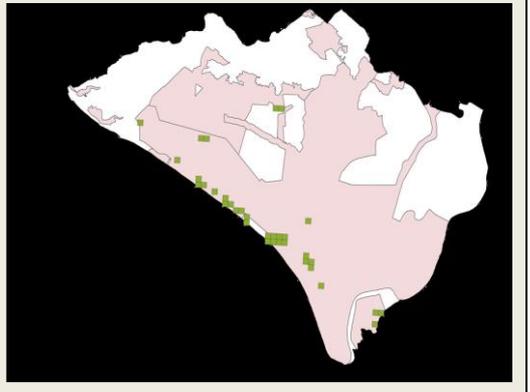
Localización		
Nombre científico	Corema álbum (Camarina)	Linaria tursica
Breve descripción	Arbusto de hasta 1 m, muy ramificado y con hábitat en arenales costeros	Hierba anual de hasta 20 centímetros con tallos simples o escasamente ramificados. De hábitat de arenales móviles y estabilizadas
Localización		
Nombre científico	Artemisia campestris maritima	Vulpia fontquerana
Breve descripción	Mata con tallo de hasta 80 cm, ramificados de hábitat de dunas litorales.	Hierba anual de hasta 40 centímetros con tallos simples o ascendentes. De hábitat de arenales secas, móviles y estabilizadas
Localización		

Tabla 2: Ficha de posibles especies en zona de estudio – Sistema dunar de Doñana-. Fuente datos: (ANDALUCIA, 2018)

En relación a la vegetación marina, principalmente en la zona de estudio se tienen bancos de *Zostera marina* alejadas en torno a los cinco kilómetros desde la costa (véase figura 36). Es una hierba acuática que alcanza un tamaño de hasta 150 cm de longitud.

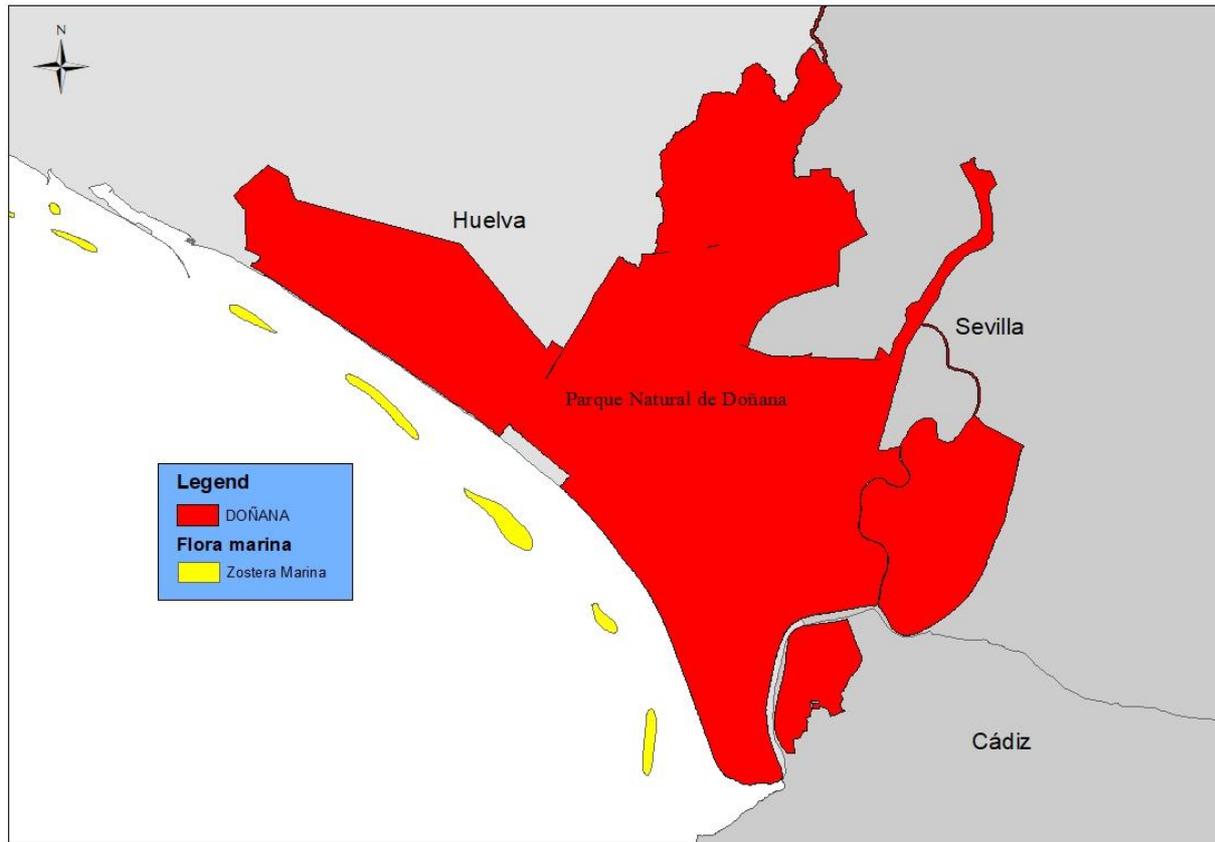


Figura 36: Ubicación de los distintos bancos de vegetación marina de tipo Zostera Marina. Fuente datos (ANDALUCIA, 2018), Elaboración mediante software ArcMap 10.1

2.10 Litología de la zona

Para conocer adecuadamente la morfología del tramo de costa de estudio, no sólo es importante conocer las variables que pueden incidir sobre su modificación, sino también resulta de interés conocer el tipo de rocas y/o suelos que aparecen constituyendo una determinada formación geológica.

En la siguiente figura 37 aparecen las distintas capas litológicas que conforman el Parque de Doñana y su entorno marino. Esta información ha sido extraída del Instituto de Cartografía y Estadística de Andalucía (Instituto de Cartografía y Estadística de la Junta de Andalucía, 2017), y el procesado de la información se ha efectuado mediante el software ArcMap 10.1, mediante la representación de las distintas capas.

Puede observarse como casi en su totalidad, el Parque de Doñana está formado por arenas, limos y arcillas y una parte de arenas y margas. Los tres casos corresponden a sedimentos de tamaño muy fino, con un alto grado de posibilidad de alteración. Por otro lado, en el entorno marino, mayormente predominan las arenas y el fango, con algunas zonas de rocas calcarenitas y gravas.

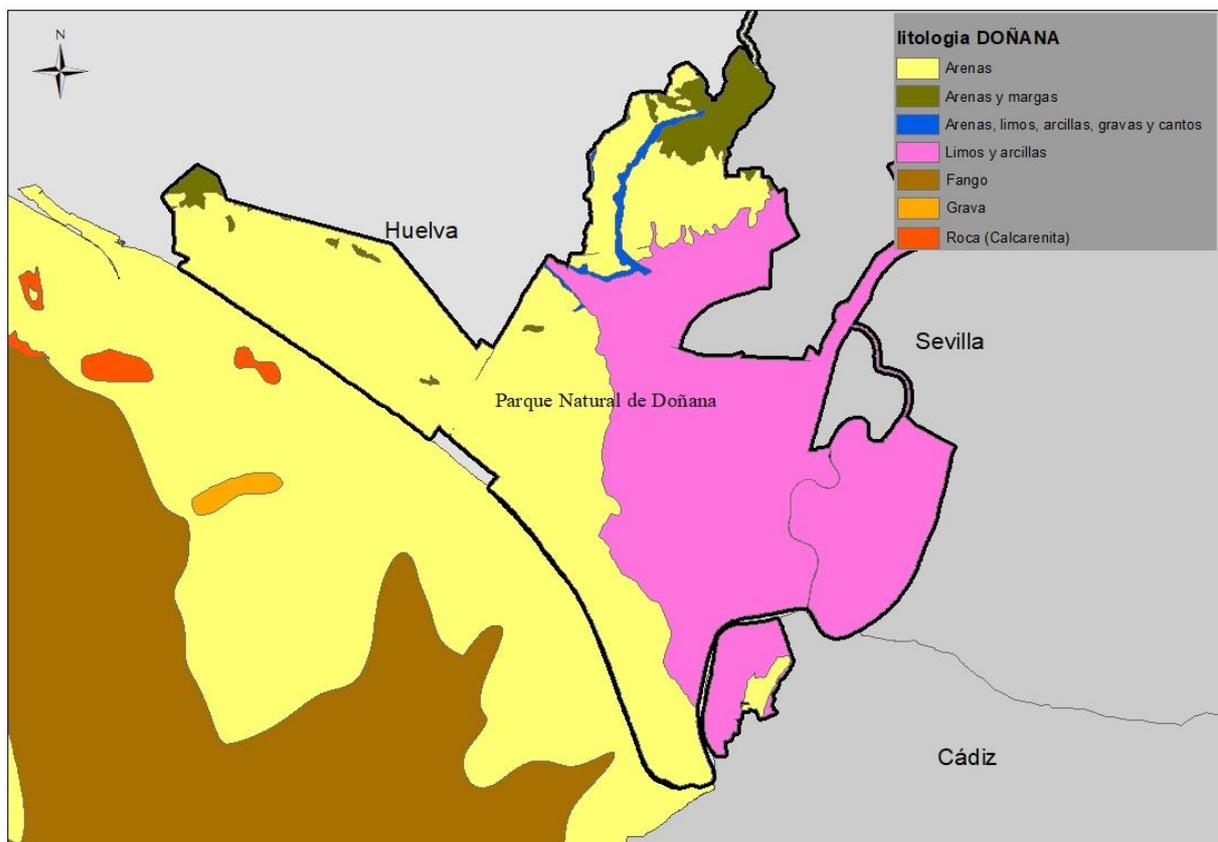


Figura 37: Capas litológicas en el Parque Natural de Doñana y su entorno marino. Fuente datos: (Instituto de Cartografía y Estadística de la Junta de Andalucía, 2017). Elaboración mediante ArcMap 10.1.

La presencia de arena abundante en la zona representa un depósito extra de sedimentos que pudiese moverse por la acción de oleaje y viento a lo largo y ancho de la playa seca, dando lugar a la formación de los sistemas dunares. Se observa como la zona de estudio (sistema dunar de Doñana) se encuentra inmersa en su totalidad en suelo arenoso y/o arcilloso/limoso.

CAPÍTULO 3: FUNDAMENTOS DE LA TELEDETECCIÓN

“Grandes descubrimientos y mejoras implican invariablemente la cooperación de muchas mentes.”

- Alexander Graham Bell -

En el último siglo, la evolución tecnológica nos ha permitido dar un salto sustancial en aquello relacionado con el conocimiento sobre nuestro planeta y sus habitantes. La teledetección, o también denominada como observación remota (*Remote Sensing* en inglés) ayuda a entender el planeta en el que vivimos y los cambios que se originan en él, independientemente de cuál haya sido la causa.

Durante las líneas que siguen en este capítulo, se intentará dar unas nociones básicas e introductorias sobre toda la teoría y los fundamentos de la teledetección.

En primer lugar, se realiza una introducción a la teledetección, para después realizar una explicación más en profundidad de los procesos físicos que permiten la adquisición de la imagen.

Seguidamente a esa explicación, se hace un pequeño énfasis en aquello relacionado a la firma espectral de un objeto o superficie teledetectada, que no es más que su “carnet de identidad” que permite distinguirlo de otro tipo de objeto o superficie, en función de su reflectividad y longitud de onda observada. Se explican también los principales factores que pueden afectar a la firma espectral de esa superficie u objeto y el concepto de ventana óptica, que tan importante es para conocer qué tipo de sensor y en qué banda puedo obtener según qué tipo de información teledetectada.

Para finalizar, se realiza un pequeño resumen con aquello relacionado con los principales tipos de sensores, el concepto de resolución de un sistema sensor y las principales plataformas satelitales (conjunto de satélites) que están a día de hoy en uso para su aplicación en teledetección, mostrando especial interés en los sistemas pasivos y en la plataforma Landsat.

3.1 Definición y concepto

Se define la teledetección como la ciencia que obtiene información acerca de la superficie terrestre sin entrar en contacto con ella. La teledetección consiste en recoger información, desde sensores aéreos o espaciales, de un objeto concreto o un área de estudio.

Se está asumiendo que entre la superficie de estudio y el sensor, debe existir una interacción energética, bien por reflexión de la energía solar (teledetección pasiva) o de una haz energético artificial (teledetección activa). Sin embargo, ese haz de energía reflejado, debe ser almacenado y procesado. Por lo tanto, la teledetección no sólo engloba los procesos que permiten obtener una imagen, sino también su posterior tratamiento e interpretación.

Para que sea posible la obtención de información, es necesario que exista algún tipo de interacción entre los objetos y el sensor, es decir un flujo de radiación, y en este caso de **energía electromagnética**. Ésta, parte de los objetos y se dirige hacia el sensor, ya sea por reflexión de energía como por ejemplo la solar o por emisión propia. Además, es preciso que esa energía electromagnética recibida por el sensor se transmita a la superficie terrestre, donde la señal detectada sea almacenada e interpretada para una determinada aplicación. Tal y como

se presenta en la siguiente figura 38, un sistema de teledetección espacial incluye los siguientes elementos (SALINERO, 2008):

1. Fuente de energía: es el origen de la radiación electromagnética que detecta el sensor. Puede ser teledetección pasiva si existe un foco externo al sensor, o bien teledetección activa si es el sensor el que emite ese haz energético. La fuente de energía más importante es el sol, pero también puede realizarse teledetección por la energía emitida por los mismos objetos observados o desde fuentes artificiales.
2. Cubierta terrestre: que recibe la señal energética de la fuente de energía (1) y la refleja o emite de acuerdo a sus características físicas.
3. Sistema sensor: que tiene como misión la de captar la energía de la cubierta terrestre (2), codificarla y guardarla o bien enviarla directamente al sistema de recepción (4).
4. Sistema de recepción: donde se recibe la información de (3), se graba y se distribuye a los interpretes (5).
5. Interprete: aquella persona especializada que convierte esos datos de (4) en información temática de interés, ya sea visual o digitalmente para facilitar el análisis de un estudio, como es el caso en esta tesina.
6. Usuario final: es el encargado de analizar el

documento fruto de (5) y de desarrollar las conclusiones que se hayan derivado del estudio.

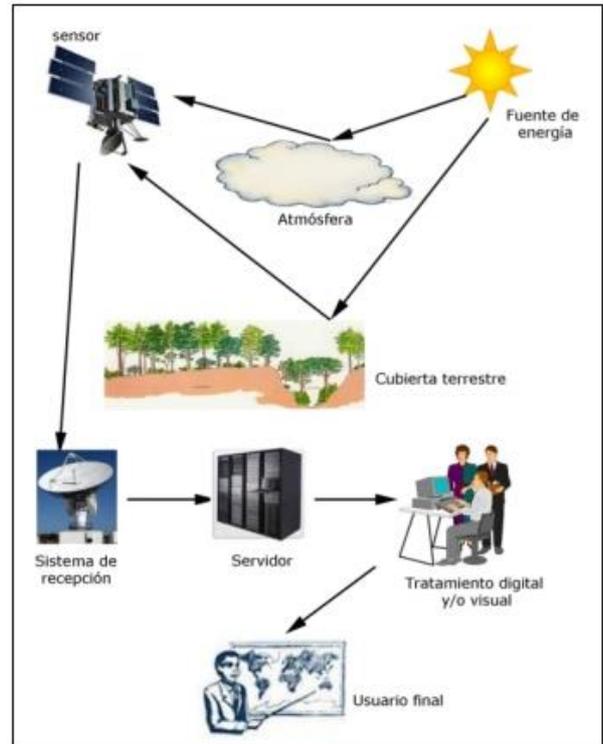


Figura 38: Esquema y componentes principales de un sistema de teledetección espacial. Fuente: (REDIAM, 2018)

Éste esquema anteriormente presentado, es un símil a como los humanos procesamos la información. Podría decirse que la visión humana es un sistema de teledetección. Sin embargo, nuestra visual presenta algunas limitaciones que pueden ser solventadas con un correcto post-proceso de la información captada en un sistema de teledetección. La capacidad visual del ser humano sólo permite apreciar un determinado tipo de energía, denominado el **espectro visible** y además, la perspectiva del ser humano está limitada por nuestra estatura.

Para solventar estos defectos, el ser humano ha desarrollado este sistema de teledetección, bien sea aéreo o espacial, y con ellos se tiene acceso a tipos de energía no visibles, como la ultravioleta, el infrarrojo térmico o medio y el microondas (Chuvieco, 2008).

3.2 Principios físicos de la teledetección

Existen principalmente tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto de un sistema de teledetección (ver figura 39).

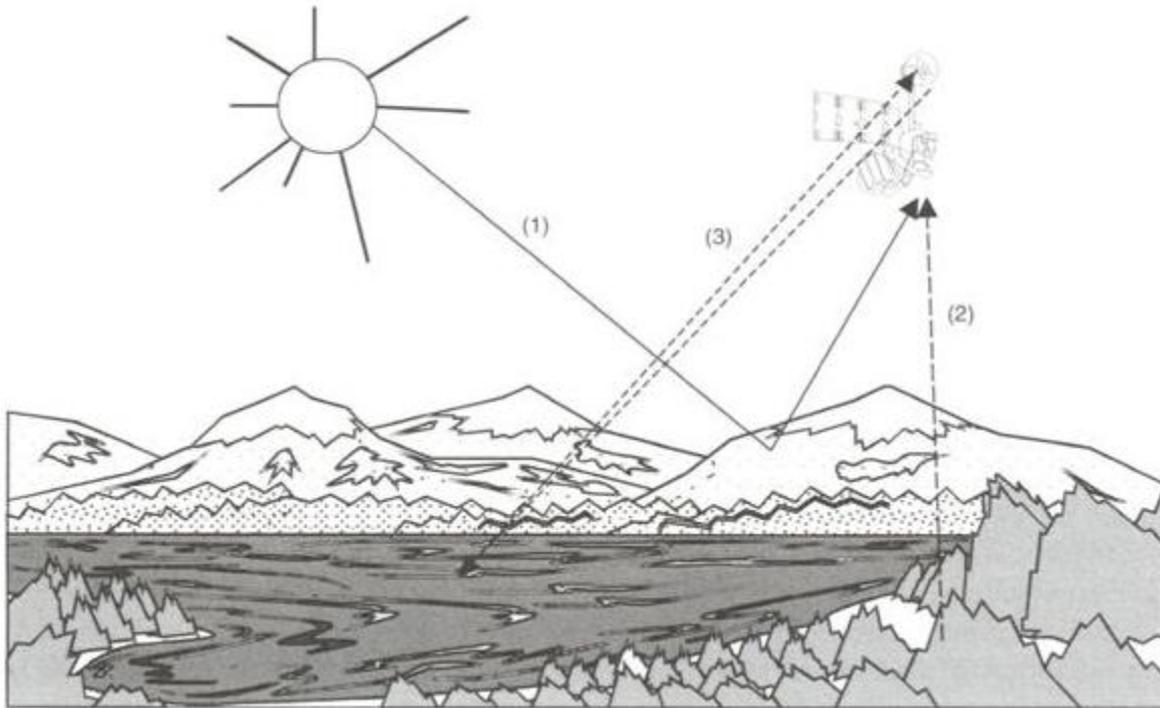


Figura 39: Formas de teledetección: (1) reflexión; (2) emisión; (3) reflexión-emisión. Fuente: (Chuvienco, 2008)

La reflexión (1) es la forma más utilizada en teledetección pues es el Sol quien emite esa energía que es reflejada en la corteza terrestre y capturada por el sensor. De la misma manera, se puede captar información directamente de la corteza terrestre (emisión (2)), si está emitiendo un haz energético, o bien desde el propio sensor (reflexión – emisión (3)) si esta fuera capaz de generar su propio flujo energético. En todos los casos, ese haz o flujo energético constituye una forma de radiación electromagnética.

3.2.1 La onda electromagnética.

Se pueden explicar las propiedades de la radiación electromagnética desde la base de la teoría ondulatoria de Huygens – Maxwell, que explica cómo la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro en forma de un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: el campo eléctrico y el magnético (figura 40). Las características de este flujo energético pueden descomponerse en dos elementos que son la longitud de onda (λ) y la frecuencia (ν), y ambos están inversamente relacionados:

$$c = \lambda \nu \quad (3-1)$$

Donde c indica la velocidad de la luz, que es 3×10^8 m/s, λ es la longitud de onda expresada en micrómetros o nanómetros y ν viene expresada en Hertz (ciclos por segundo).

Se puede calcular la cantidad de energía transportada por un fotón siempre que se conozca su frecuencia y con h constante e igual a la constante de Planck ($6,6 \times 10^{-34}$ J s):

$$Q = h (c/ \nu) \quad (3-2)$$

Lo que significa que a mayor longitud de onda, o lo que es lo mismo: a menor frecuencia, el contenido energético será menor, y viceversa. Esto implica que la radiación en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que aquella que proviene de longitudes de onda cortas. Esto significa que las largas requieren medios de detección más refinados.

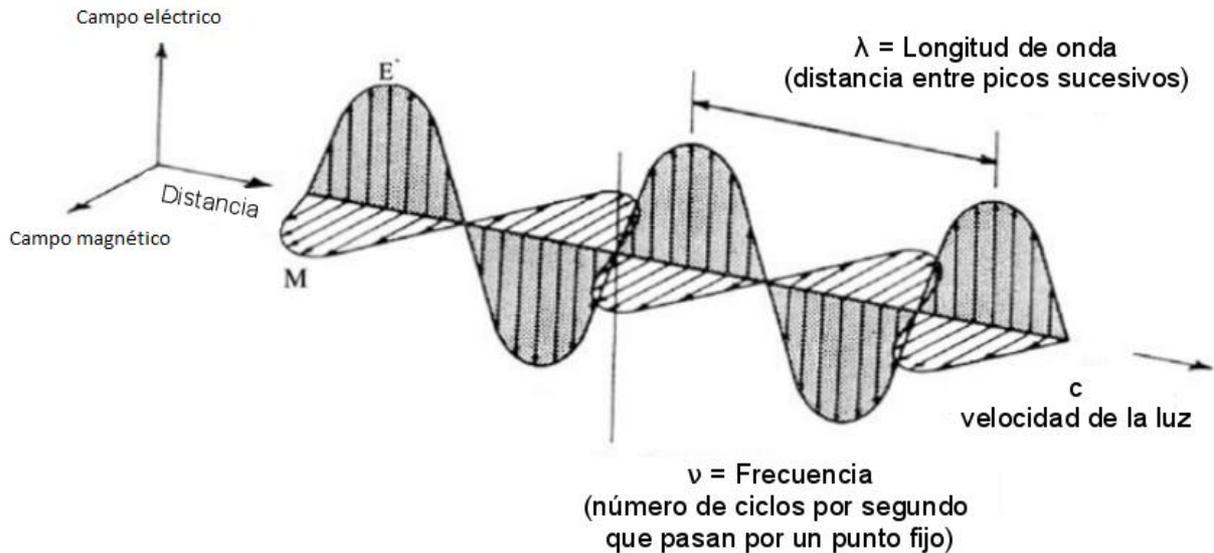


Figura 40: Esquema de una onda electromagnética

3.2.2 El espectro electromagnético

Se puede definir cualquier tipo energía radiante en función de su longitud de onda o de su frecuencia. Se establecen unas bandas donde la radiación electromagnética se comporta de manera similar. Esto es lo que se denomina como espectro electromagnético donde se relaciona frecuencia medida en MHz con la longitud de onda, que es medida desde Angstroms ($1 \text{ \AA} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$) hasta metros (ver figura 41). A continuación se destacan las bandas más utilizadas en teledetección:

- **Espectro visible (0.4-0.7 μm):** Es la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda donde es máxima la radiación solar. Dentro de esta región, suelen distinguirse tres bandas elementales: Azul (A: 0.4-0.5 μm), Verde (V: 0.5-0.6 μm), Rojo (R: 0.6-0.7 μm).
- **Infrarrojo cercano (IRC: 0.7-1.3 μm):** También puede denominarse infrarrojo reflejado, fotográfico o próximo. Se utiliza para distinguir masas vegetales y concentraciones de humedad.
- **Infrarrojo medio (IRM: 1.3-8 μm):** En esta banda se mezclan dos procesos, el de reflexión de luz solar y el de emisión de la superficie terrestre. En el primer caso hablamos de infrarrojo de onda corta (SWIR: 1.3-2.5 μm), que resulta una banda idónea para identificar el contenido de humedad en la vegetación o suelos. La segunda banda se denomina más propiamente como infrarrojo medio (IRM: 3-5 μm), utilizándose para la detección de focos de alta temperatura.
- **Infrarrojo lejano o térmico (IRT: 8-14 μm):** incluye la porción emisiva del espectro terrestre donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.
- **Micro-ondas (M: >1mm):** banda de especial interés por su capacidad de penetración a la cubierta nubosa.

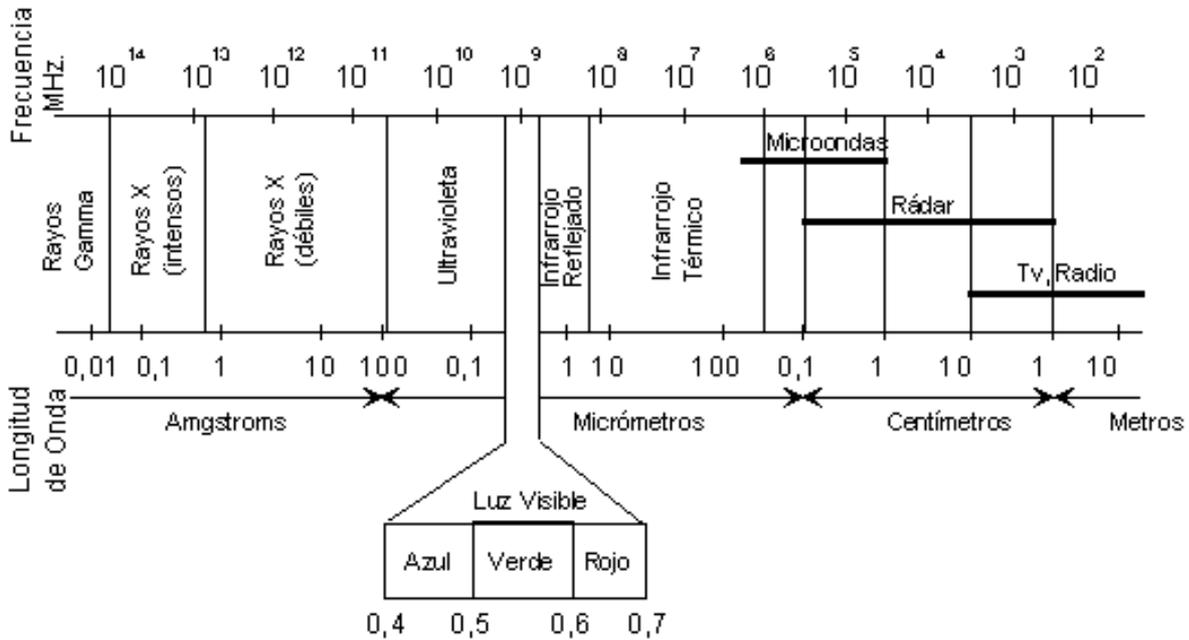


Figura 41: Espectro electromagnético. Fuente: (Chuvieco, 2008)

3.2.3 Ley de Planck y de Wiel

De acuerdo a la fórmula {3.2}, la cantidad de energía que contiene un flujo radiante es inversamente proporcional a su longitud de onda, y esto puede relacionarse con mayor exactitud mediante la ley de Planck, que relaciona el flujo de energía con la longitud de onda mediante el concepto de emitancia radiativa (M)⁴:

$$M_n = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(\exp \frac{c_2}{\lambda T} - 1 \right)} \quad (3-3)$$

Donde “ c_1 ” y “ c_2 ” son respectivamente constantes de valor $3.741 \times 10^8 \text{ Wm}^{-2} \mu\text{m}^4$ y $1.438 \times 10^4 \mu\text{m K}$, “ λ ” es la longitud de onda y “ T ” es la temperatura de un cuerpo negro⁵ en Kelvin.

La fórmula de Planck nos señala que cualquier objeto por encima del cero absoluto (0°K o -273°C) radia energía, y que ésta aumenta con la temperatura (Chuvieco, 2008).

Si se integrara la emitancia (formulación {3.3}) para todas sus longitudes de onda, se puede calcular el total de energía que radia por unidad de superficie. Ésta es la ley de Stefan-Boltzmann, y resulta que la emitancia global de un objeto es sólo función de su temperatura, que pequeños cambios en ésta suponen notables modificaciones en su emitancia.

$$M_n = \sigma T^4 \quad (3-4)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann y toma valor de $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$.

A partir de esta formulación, puede calcularse la ley de Wien, que calcula la longitud de onda a la que se produce

⁴ Emitancia radiativa (M): Total de energía radiada en todas las direcciones desde una unidad de área y por unidad de tiempo. Se mide en vatios por metro cuadrado (W/m^2)

⁵ Cuerpo negro: Es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él. Nada de la radiación incidente se refleja o pasa a través del cuerpo negro.

la máxima emitancia de un cuerpo negro conociendo su temperatura.

$$\lambda_{max}(\mu\text{m}) = \frac{2898}{T(K)} \quad (3-5)$$

Con esta ley, se puede conocer cuál es la banda más conveniente para detectar un objeto de una determinada temperatura. Por ejemplo, si se tiene la hipótesis de que un incendio forestal presenta una temperatura próxima a los 800K (525°C), la ley de Wien diría que la banda más conveniente para detectarla es 3.6 μm , es decir, la banda del infrarrojo medio (IRM).

Todos estos cálculos son válidos para el supuesto de que las superficies naturales se comportan idealmente como cuerpos negros. Cuerpos que absorben toda la energía radiante que inciden sobre ellos. Por este motivo, habrá que corregir las formulaciones anteriores añadiendo la variable de la emisividad⁶, es decir, que se verá reducida en un tanto por ciento al ser la emisividad una relación entre emitancias ($\epsilon=M/M_n$), por lo que la emitancia real que incide sobre un cuerpo:

$$M = \epsilon M_n \quad (3-6)$$

Así, conociendo la temperatura de un objeto o cubierta de interés, y dado que puede estimarse su emisividad, es posible determinar la banda del espectro más idónea para su detección. Los objetos más comunes a teledetectar son los que se presentan en la siguiente figura, y conociendo la temperatura de cada uno de ellos y su emisividad, es posible determinar cuál es la longitud de onda más apropiada para su teledetección.

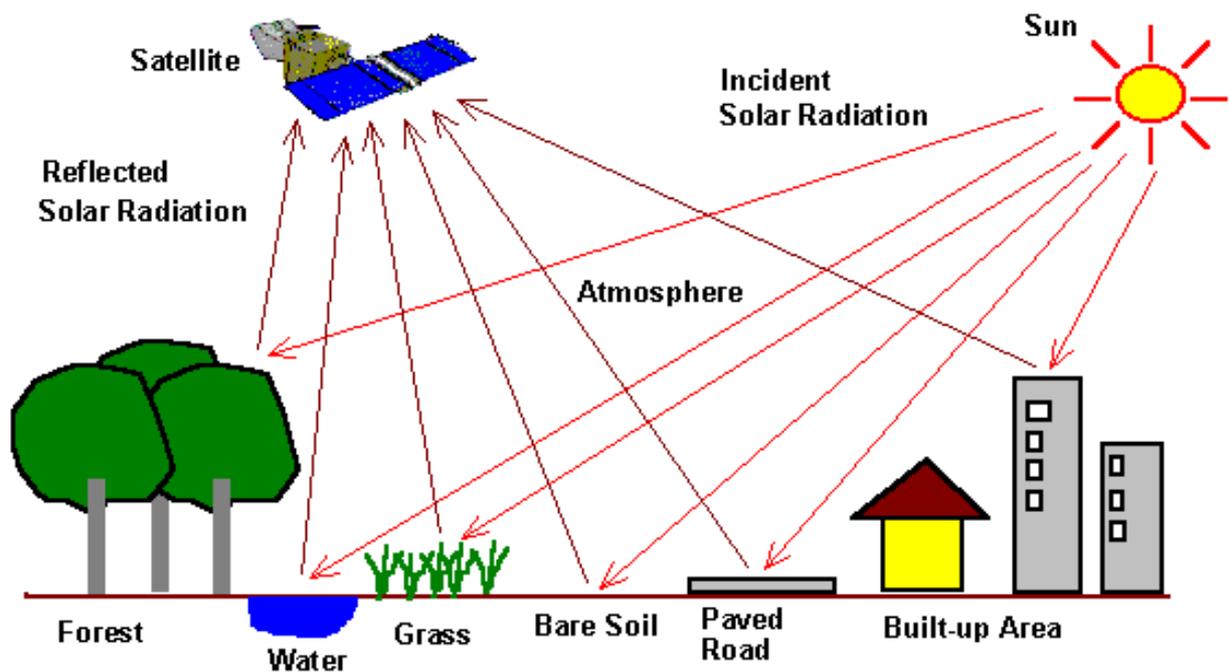


Figura 42: Principales coberturas a determinar mediante teledetección. Fuente: (JUIDÍAS, 2015)

⁶ Emisividad: Relación entre la emitancia de una superficie (M) y la que ofrecería esa superficie comportándose idealmente, como cuerpo negro, a la misma temperatura (M_n)

3.2.4 Firma espectral

La radiancia⁷ que capta un sensor en un rango del espectro, depende de la que reflejan las distintas cubiertas terrestres. Para detectar una cubierta por teledetección hay que entender cómo se descompone el flujo de energía incidente.

Este flujo de energía incidente (Φ_i), que si nos encontramos en el espectro visible es el flujo solar incidente, se descompone en tres términos: flujo reflejado (Φ_r), flujo absorbido (Φ_a), y flujo transmitido (Φ_t) (ver figura 43).

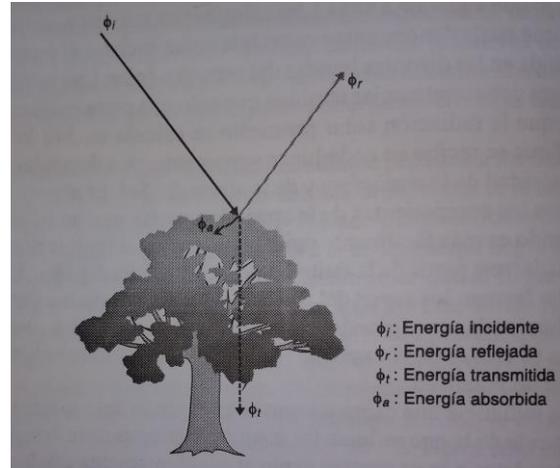


Figura 43: Descomposición de flujos.

Luego:

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t \quad (3-7)$$

Si se expresa esta fórmula en unidades relativas se tiene:

$$\frac{\Phi_i}{\Phi_i} = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} + \frac{\Phi_a}{\Phi_i} + \frac{\Phi_t}{\Phi_i} \quad (3-8)$$

O lo que es lo mismo, que la suma de la reflectividad⁸ (ρ), absortividad⁹ (α) y transmisividad¹⁰ (τ) tiene que ser igual a 1. Esta relación no es constante, pues depende la longitud de onda (λ) y de las características de la superficie que se observa:

$$1 = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda \quad (3-9)$$

Para poder caracterizar una determinada cubierta terrestre, resulta imprescindible conocer su comportamiento reflectivo en diversas longitudes de onda. En el caso del espectro visible, ese comportamiento distinto de los objetos a distintas longitudes de onda se manifiesta en lo que se conoce como color. Un objeto es verde si se refleja intensamente la energía en esa banda del espectro visible (0.5-0.6 μm) y poco en el resto.

A partir de medidas de laboratorio, se obtienen curvas de reflectividad. Éstas son función de la longitud de onda y la superficie observada. Esto es lo que se denomina en teledetección como firma espectral (ver figura 44). La firma espectral es única para cada tipo de superficie y es una curva que relaciona la reflectividad con la longitud de onda a la que se mide.

⁷ Radiancia: Total de energía radiada en una determinada dirección por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Este término describe precisamente lo que mide el sensor. Se cuantifica en $\text{W}/\text{m}^2 \text{sr}^{-1}$

⁸ Reflectividad: relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie

⁹ Absortividad: relación entre el flujo incidente y el que absorbe una superficie

¹⁰ Transmisividad: relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie.

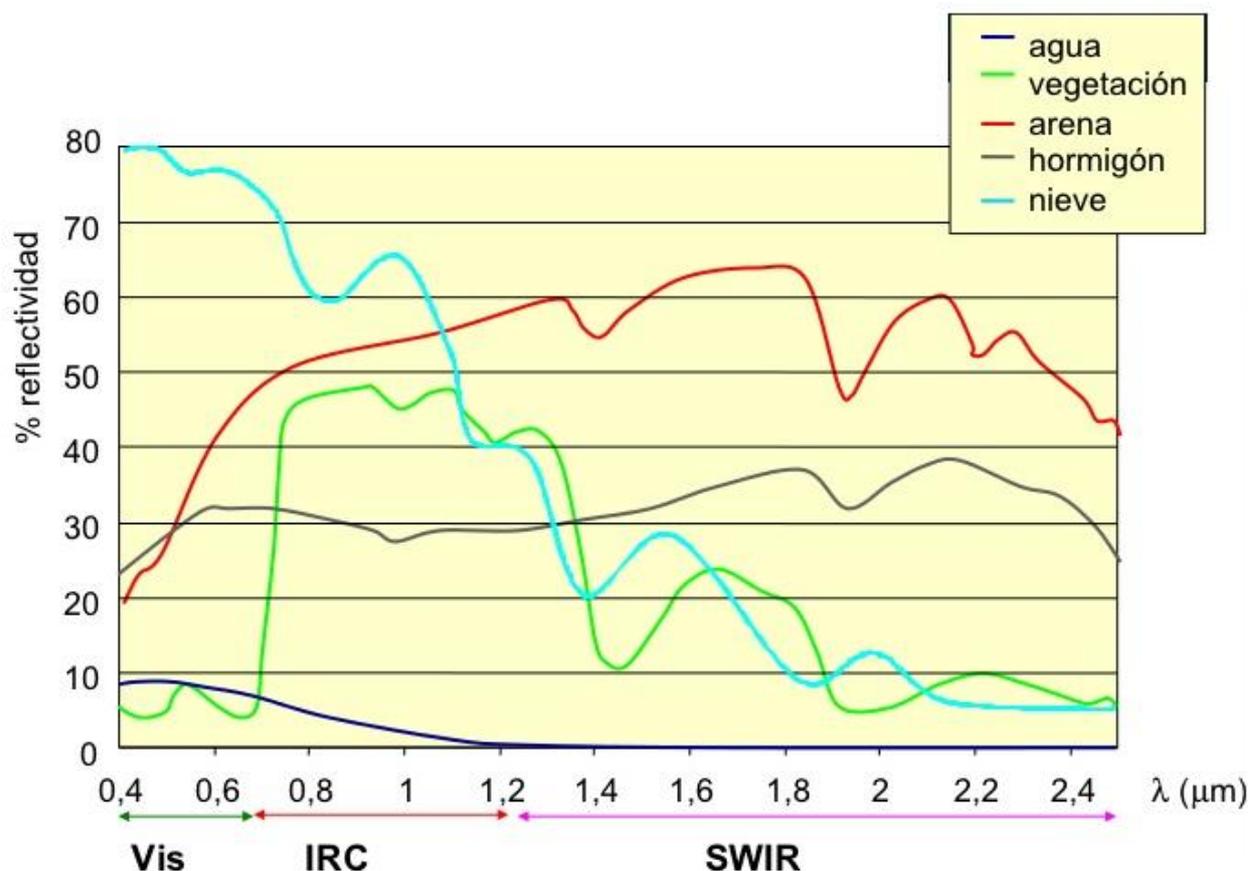


Figura 44: Firmas espectrales típicas para distintas cubiertas. Fuente datos: (Curso SIG nivel 1 CREA, 2018)

Estas curvas de reflectividad en función de la longitud de onda que se muestran en la figura 44, son las típicas para las superficies más comunes que nos encontramos en la superficie terrestre. Éste es el comportamiento típico de una superficie observada (agua, vegetación, arena, hormigón o nieve), por lo que a la hora de analizar qué tipo de superficie es la analizada, se puede comparar con esta firma espectral, que son curvas base o de referencia. Evidentemente, no toda tipología de cubierta se comporta igual, pero sí que siguen un patrón común como el representado en la gráfica anterior.

3.2.5 Factores externos que afectan a la reflectividad de las ondas

Conviene siempre tener presente que la cantidad de energía que llega al sensor del satélite depende del ángulo con que la superficie refleje el haz incidente, así como el que forme éste con la posición del sensor. Además, esto está ligado a la rugosidad que presenta la superficie, y en función de esto se definen dos tipos de cubiertas (Chuvieco, 2008): aquellas que reflejan la energía con el mismo ángulo incidente (especulares) y aquellas que lo reflejan uniformemente en todas las direcciones (lambertianas). Con la reflexión especular pasa que el sensor sólo recibe información si está situado en la dirección del ángulo de reflexión, y si la reflexión es lambertiana, la radiancia reflejada es constante en cualquier ángulo de reflexión.

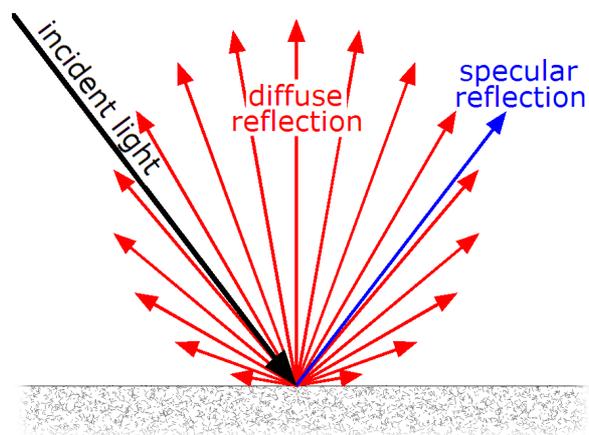


Figura 45: Reflector especular y lambertiano

La mayor parte de las cubiertas terrestres tienden a comportarse de manera intermedia entre ambas reflexiones, en función de sus características y de la longitud de onda con la que se esté trabajando. Si la longitud de onda es

grande, un terreno rugoso puede influir mucho más sobre un comportamiento especular, mientras que en longitudes de onda pequeñas, la rugosidad del terreno tenderá a difundir mucho más la energía incidente (comportamiento lambertiano). En el espectro visible, sólo el agua en calma o algunos materiales de construcción presentan carácter casi especular, mientras que el resto de las cubiertas tienden a ofrecer un comportamiento lambertiano. La mayor parte de superficies tienden a presentar una clara reflectividad direccional, esto es, la reflexión es más intensa en ciertas direcciones.

Así, el ángulo de incidencia solar y el de observación juegan un papel destacado en la respuesta obtenida por el sensor, pues éste puede registrar un valor distinto de radiancia espectral para un mismo tipo de cubierta si varían las condiciones de observación o de iluminación. Por eso es conveniente, que el estudio de firma espectral de un proyecto de teledetección venga acompañado por un estudio estadístico de la firma espectral, así como de intentar asegurar las mismas condiciones de cubierta nubosa. De entre los factores que pueden condicionar el resultado de una firma espectral, se tiene lo expuesto en la siguiente figura 46:

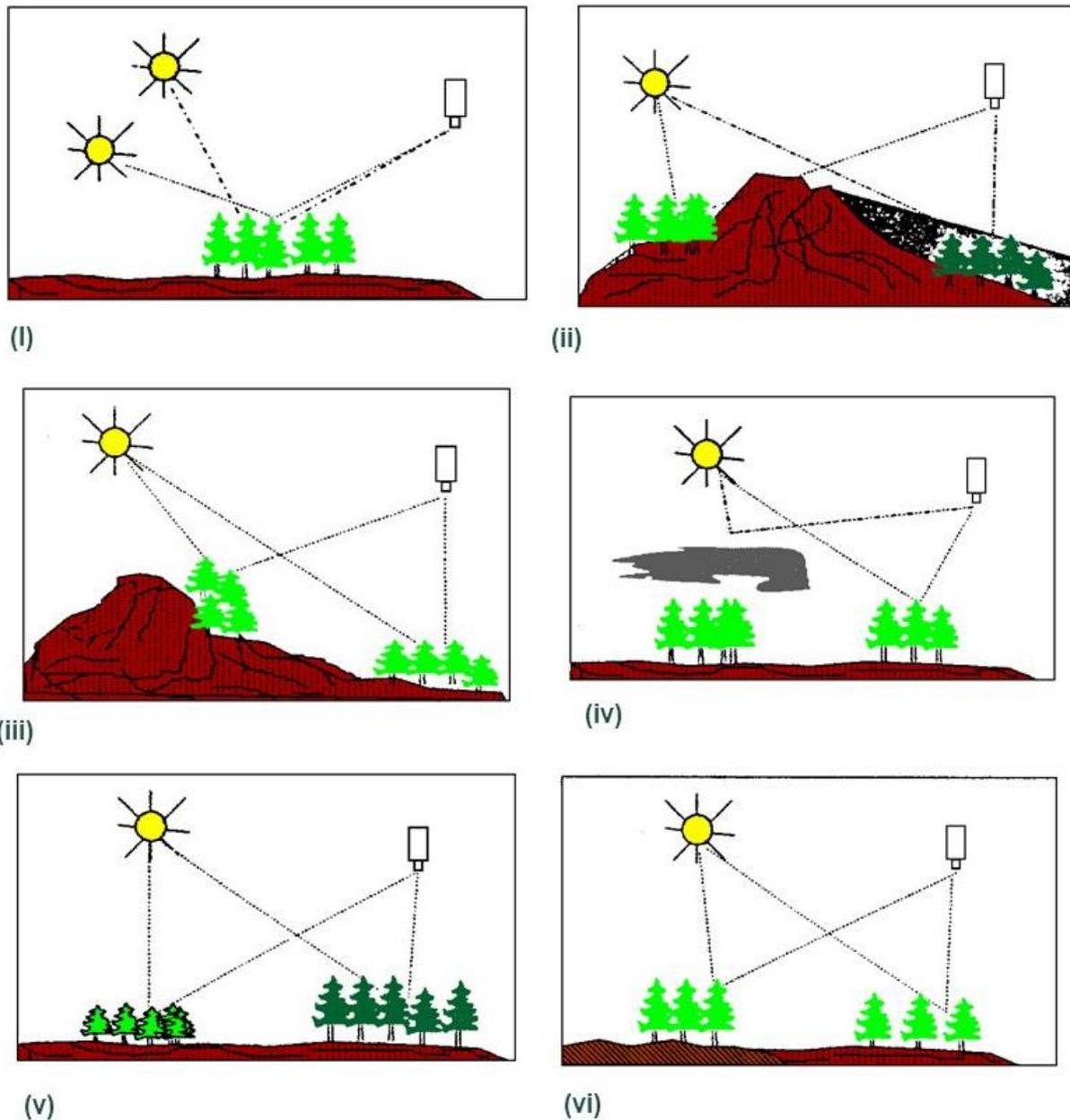


Figura 46: Factores que modifican la firma espectral de una cubierta: (i): variaciones en las condiciones de observación o iluminación; (ii) orientación de la vertiente; (iii) pendiente; (iv) atmósfera; (v) condición fenológica; (vi) sustrato edáfico. Fuente imagen: (MINISTERIO DEL PODER POPULAR PARA CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN, 2018)

El primer factor (i) corresponde a aquel en que los ángulos de iluminación y observación varían con la latitud, fecha del año y hora de observación, además de la posición del sensor.

El segundo (ii) y tercer factor (iii), (orientación de las laderas y pendiente respectivamente) corresponden con aquellas situaciones donde el relieve introduce modificaciones en el ángulo de iluminación.

El cuarto factor (iv) que afecta a la reflectividad de las ondas es la influencia de la atmósfera a través de nubes o concentración de contaminantes, que hacen dispersar las distintas longitudes de onda.

El quinto factor (v) consistente en variaciones medioambientales en la cubierta, como asociaciones a otras superficies, la homogeneidad que presenta, etc.

Y por último, el factor (vi) que es muy influyente cuando la cubierta observada no presenta una densidad muy elevada, consiste en la consideración de distintos sustratos edáficos observados.

Considerar todos estos factores subraya la complejidad que la observación remota lleva consigo, ya que el comportamiento de una cubierta en el espectro visible está condicionado por sus propias características y por estos factores, que hacen modificar su comportamiento espectral teórico de referencia. Las distintas cubiertas de la superficie terrestre no tienen un comportamiento espectral o firma espectral única que coincida con sus curvas de firma espectral de referencia y permita reconocerlas sin confusión frente a otras superficies. La firma espectral presentará una cierta variabilidad debida a los factores anteriormente comentados, pero siempre podrá compararse con la firma espectral de referencia (de laboratorio) para identificar qué tipo de superficie se trata y con qué banda será más fácil su detección.

3.2.6 Interacciones de la atmósfera con la radiación electromagnética

Entre el sensor del satélite y la cobertura terrestre observada se interpone la atmósfera terrestre, y ésta infuye en la solución teledetectada. La atmósfera se compone de gases - nitrógeno, oxígeno, argón, vapor de agua, y dióxido de carbono - y aerosoles. Entre todos, son el dióxido de carbono, el ozono y el vapor de agua los principales responsables de la interacción con la radiación electromagnética.

Se define la profundidad óptica en teledetección como aquella medida adimensional que es utilizada para mostrar cuanto de transparente es un medio, en este caso la atmósfera. Así:

$$\tau(z) = - \int_{\infty}^z k_v(z') dz' \quad (3-10)$$

Donde $k_v(z')$ es la opacidad a una profundidad z' . De esta forma, si $\tau \ll 1$ se dice que el medio es ópticamente delgado y si $\tau \gg 1$ se habla de que el medio es ópticamente grueso.

Existe mayor profundidad óptica, es decir, mayor transparencia de la atmósfera terrestre para la penetración de las ondas, en: zonas montañosas, donde existe menor absorción de la luz y en consecuencia menor contaminación lumínica; y en zonas cercanas al mar o donde existe nieve, al ser grandes estabilizadores térmicos.

La profundidad óptica depende del tipo de onda, de la concentración de contaminantes, de la presencia de capas nubosas, de la temperatura, de la precipitación y de los componentes gaseosos de la atmósfera. El efecto de los componentes gaseosos (dióxido de carbono, el ozono y el vapor de agua) de la atmósfera sobre la radiación electromagnética es triple.

Por un lado, la acción combinada de los gases anteriormente mencionados provoca una absorción atmosférica. La atmósfera se comporta como un filtro selectivo a distintas longitudes de onda, de tal forma que en algunas bandas del espectro electromagnético elimina la posibilidad de observación remota. Tal y cómo puede observarse en la figura 47, sólo ciertas bandas de longitudes de ondas electromagnéticas llegan hasta la superficie terrestre, y son las ondas del espectro visible, que son observadas con una pequeña distorsión, y las ondas de radio, que penetran totalmente en la atmósfera. El resto de ondas como los rayos Gamma, rayos X, rayos Ultravioleta, algunos rayos del Infrarrojo, y las grandes ondas de radio, no son observables desde la corteza terrestre, pues no penetran debido al efecto filtro de la atmósfera. Esto es lo que se denomina como ventana óptica atmosférica.

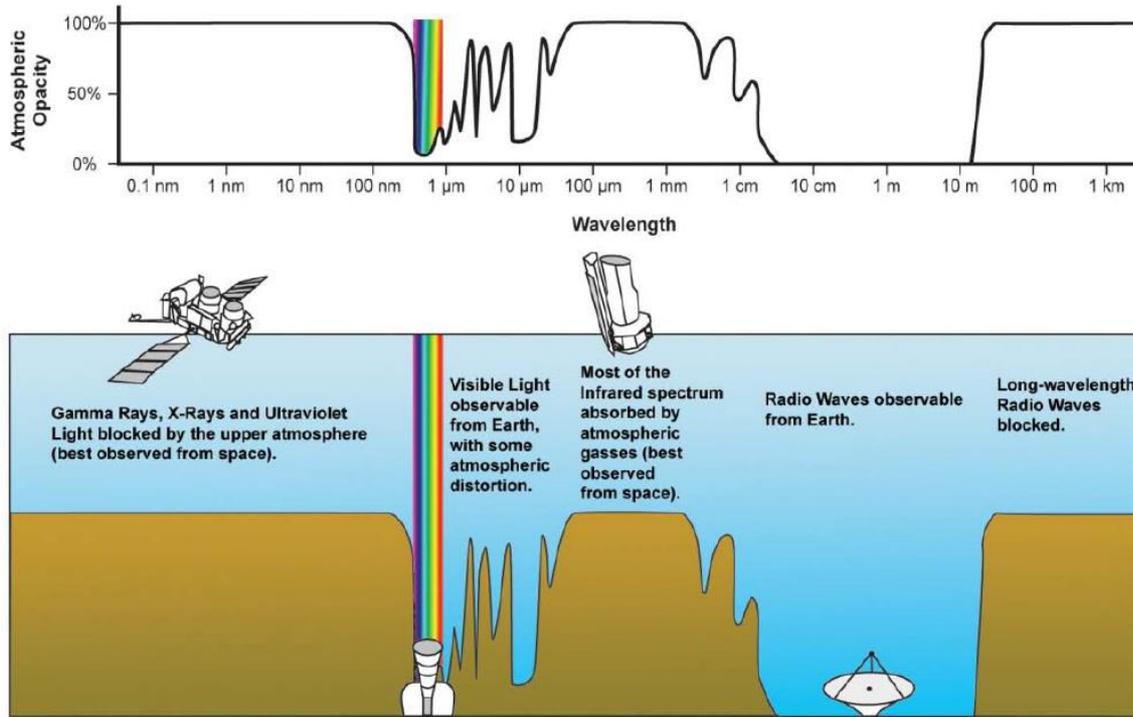


Figura 47: Penetración de ondas electromagnéticas en función de su longitud de onda. Fuente: (JUIDÍAS, 2015)

Las principales ventanas atmosféricas son: (i) espectro visible e IRC (0.35-1.35 μm); varias en el SWIR (1.5-1.8 μm y de 2.0-2.4 μm); (iii) en el IRM (2.9-4.2 μm y de 4.5-5.5 μm); (iv) en el IRT (8.0-14.0 μm); y en las micro-ondas (por encima de 15mm) donde la atmósfera es totalmente transparente. Estas ventanas ópticas son las idóneas para los procesos de teledetección terrestre, por lo que los sensores se ajustan a estas bandas. Sin embargo, si lo que se quiere observar es la atmósfera, las bandas idóneas son todas aquellas que no son ventanas ópticas, que resultan estar al 100% de opacidad.

Por otro lado, se tiene otro fenómeno provocado por la presencia de estos gases en la atmósfera denominado como dispersión atmosférica. La energía electromagnética proveniente del exterior se dispersa al chocar con las partículas en suspensión de la atmósfera, lo que implica una reducción de la radiancia directa y un aumento de la radiancia difusa (ver figura 46). Por lo tanto, para evitar obtener imágenes con una dispersión muy elevada, se tiende a utilizar bandas cercanas a 1 nm. Los procesos de dispersión son muy complejos y difíciles de cuantificar en la imagen resultante. La corrección atmosférica se basa en relaciones entre elementos de la propia imagen.

Dispersión atmosférica en función de λ

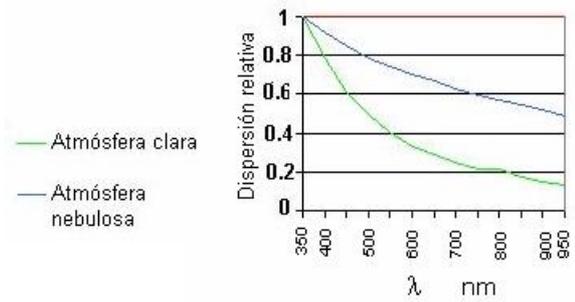


Figura 48: Dispersión atmosférica a distintas longitudes de onda. Fuente: (A. Requena, 2018)

Por último, se tiene el efecto de emisión atmosférica, que resulta fundamental en el trabajo dentro del infrarrojo térmico, si se pretenden obtener mediciones de temperatura a partir de imágenes espaciales. La atmósfera también emite energía, por lo que este parámetro debe considerarse para su corrección en el térmico.

3.3 Sensores y satélites de teledetección

En este apartado se hará un breve repaso a aquello relacionado con la tecnología de los sensores empleados comúnmente en teledetección. Se adelanta ya, que debido a la disponibilidad de imágenes para el enfoque de este estudio, las imágenes utilizadas se han obtenido mediante sensores pasivos.

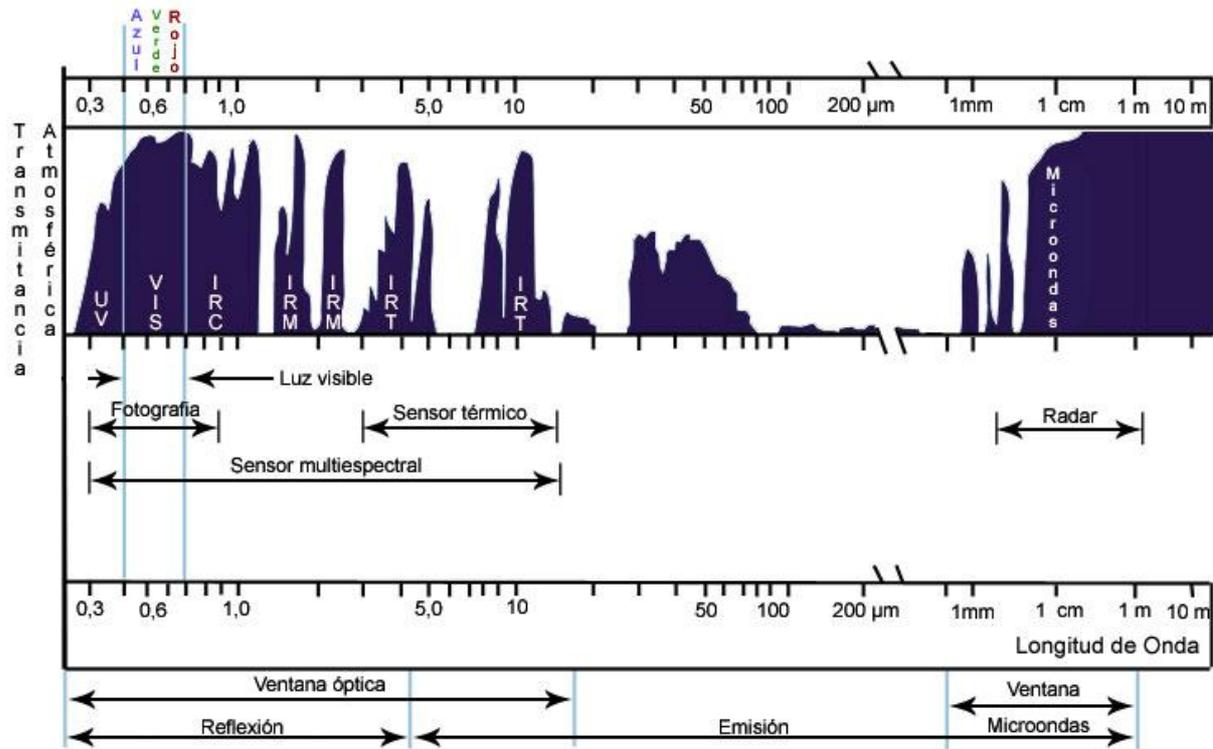


Figura 49: Rango de utilización de cada tipo de sensor. Fuente imagen: (JUIDÍAS, 2015)

Los tipos de sensores se explican a continuación, pero antes se ha visto conveniente ubicar cada sensor en las bandas del espectro electromagnético que éste es capaz de captar (ver figura 49). Las bandas del espectro visible, pueden captarse mediante sensores fotográficos y ópticos electrónicos mientras que los sensores pasivos como el radar se mueven en bandas de longitudes de onda mayores.

3.3.1 Tipos de sensores

El sistema de teledetección requiere de cuatro componentes básicos: un foco energético, la superficie a observar, un sensor, y el correspondiente post-procesado de las imágenes. La principal clasificación que se realiza de sensores es la de sensores pasivos y activos.

3.3.1.1 Sensores pasivos

Son aquellos que se limitan a recibir la energía proveniente de un foco exterior al sensor. Éstos se pueden subclasificar en:

- Cámaras analógicas: son sensores fotográficos que fueron utilizados originariamente. Poco a poco se van sustituyendo por cámaras digitales de alta resolución. Su tecnología estaba limitada por la cantidad de película que podían cargar. Este sensor, registra la energía reflejada por un objeto sobre emulsiones fotosensibles.
- Exploradores de barrido (*scanners*) multiespectrales: son sensores óptico-electrónicos ya que combinan una óptica similar a la fotografía con un sistema de detección electrónica, que evita la dependencia de una superficie sólida de grabación. Consiste en un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria, y que dirige la radiancia recibida hacia unos detectores. Éstos se encargan de amplificar la radiancia y de convertirla en una señal eléctrica. Después, se transforma a un valor numérico que puede

almacenarse a bordo de la plataforma del sensor o transmitirse a la red de antenas receptoras. El sensor convierte una señal analógica en un valor digital. Las principales ventajas de estos sensores frente a las cámaras analógicas son: (i) permiten ampliar la banda del espectro detectada a longitudes de onda mayores del visible. Las cámaras analógicas están limitadas al rango 0.4-0.5 μm (visible e infrarrojo reflejado), mientras que los *scanners* pueden detectar bandas comprendidas entre 0.4-1.6 μm , incluyendo el SWIR, IRM e IRT; (ii) capacidad de convertir los datos detectados en radiancias, es decir, al tener que estar calibrados y convertir radiancias en datos, pueden también invertir el proceso; (iii) posibilidad de realizar coberturas de grandes espacios debido a su capacidad de transmisión de los datos a tiempo real; (iv) grabación digital de la información. Estos sensores se han ido incorporando a las principales plataformas satelitales, en las que destaca el programa Landsat¹¹ (MSS (*Multispectral Scanner*), TM (*Thematic Mapper*), ETM (*Enhanced Thematic Mapper*), y AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), entre otros.

- Exploradores de empuje: son sensores óptico-electrónicos, similares a los exploradores de barrido pero con la peculiaridad de que se elimina el espejo a favor de una serie de detectores que cubre todo el campo de visión del sensor. Estos sensores permiten aumentar la resolución espacial del sistema respecto a los exploradores de barrido, además de eliminar algunos problemas de sincronización entre el espejo y el sensor. Son computacionalmente más rápidos al rellenar la línea de píxeles de información de una sola vez, y no como se realiza en los de barrido que es píxel a píxel. Por lo demás, tienen las mismas ventajas que los exploradores de barrido.
- Cámaras de vídeo: son también sensores óptico-electrónicos y pueden trabajar en forma pancromática¹² o multi-banda. La imagen es enfocada sobre un foto-conductor, construyéndose una réplica electrónica de la imagen original, que se mantiene en esa superficie hasta que el haz de electrones barre de nuevo. Permiten una forma sencilla, rápida y barata de capturar la información, sin embargo tiene una resolución baja, su campo de visión suele estar limitado a 500 píxeles, lo que obliga a que la toma de datos tenga que ser desde baja altura.
- Radiómetros de micro-ondas: son también conocidos como sensores de antena y se trata de sensores que operan en el rango del espectro correspondiente a longitudes de onda milimétricas y normalmente entre 6.8 y 90 GHz de frecuencia, lo que hace que no estén afectados por las condiciones atmosféricas ni de iluminación. El radiómetro está compuesto por un elemento direccional (receptor), que permite la detección y amplificación de las ondas micro-ondas, y un detector. La gran desventaja es la baja calidad en cuanto a la resolución espacial. Son sensores que se utilizan con gran acierto para cartografiar las capas de hielo y nieve sobre la corteza terrestre, y para estimar las condiciones de humedad en el suelo y el estrés hídrico en la vegetación.

3.3.1.2 Sensores activos

Son aquellos que son capaces de emitir su propio haz de energía y recogerlo tras su reflexión sobre la superficie que se pretende observar. Son los más flexibles pues no dependen tanto como los primeros de las condiciones exteriores. Los sensores activos se pueden subclasificar en:

- Radar: es un radiómetro activo de micro-ondas, que trabaja en una banda comprendida entre 0.1cm y 1m de longitudes de onda. Cada píxel en una imagen radar representa el coeficiente de retrodispersión¹³ de esa área sobre el terreno, siendo el valor almacenado mayor, cuanto más intensa es la señal de retorno hacia el sensor. Un radar se puede configurar de formas muy variadas, obteniendo señales de retorno muy diversas. Se utiliza un tipo de radar denominado SAR (*Synthetic Aperture Radar*), que es un radar de apertura sintética que soluciona los problemas para obtener una buena señal a altas alturas con una antena de pequeñas dimensiones. Además de la ventaja de no depender de las condiciones exteriores al sensor, con el radar se consigue resolución en profundidad, al conocerse el tiempo de regreso del pulso emitido.

¹¹ Programa Landsat: consiste en una serie de satélites construidos y puestos en órbita por U.S.A. para la observación y teledetección en alta resolución de la superficie terrestre. Se verá con más detalle en apartados siguientes.

¹² Pancromático: que es sensible por igual a todas las bandas del espectro visible.

¹³ Coeficiente de retrodispersión: cuantifica la reflectividad dependiente de la frecuencia de onda de un medio, es decir, cuanto se refleja dispersivamente la onda sobre la dirección sobre la que proviene.

- Lidar: Lidar (*Light Detection and Ranging*), es un sensor activo que emite pulsos de luz polarizada¹⁴ entre el ultravioleta y el infrarrojo cercano (longitud de onda entorno a 904nm). Se emplea un láser como transmisor que transmite un pulso muy direccional, de fase constante, y polarizado. Esta señal interacciona con la superficie a observar causando su dispersión en función del tipo de elemento encontrado. La onda de retorno se recoge por un telescopio que la transmite a un foto-detector. Se mide el tiempo que el pulso tarda en regresar para determinar la distancia. Se graba la señal eléctrica y se almacena. Así, en función del tiempo de vuelta de la onda y la intensidad de su señal de retorno puede deducirse la información relativa al tipo de cubierta observada. Lidar se puede utilizar para la teledetección tanto de cubiertas terrestres como para detección de partículas contaminantes, concentración de humedad, presión y temperatura de la atmósfera. Consiste en un sensor muy potente para estudios topográficos y de biomasa vegetal, al facilitar información tridimensional muy precisa. Su principal problemática consiste en su dependencia con las condiciones de las condiciones atmosféricas.

3.3.2 La imagen digital

Un sistema de teledetección está conformado, tal y como ya se ha explicado, por distintas partes. El formato mediante el cual se representa la información obtenida por el sistema satelital es una imagen digital.

Una imagen digital es la representación de un objeto real mediante una matriz numérica bidimensional. Cada elemento de la matriz recibe el nombre de píxel, que tiene asignado un valor numérico procedente de la radiación recibida por el sensor por una determinada parcela de la superficie terrestre y en una determinada banda del espectro.

Este valor numérico es comúnmente denominado como Nivel Digital (ND) y se puede traducir a una intensidad visual o nivel de gris. Los ND de la imagen se guardan en código binario (un bit, 0 o 1). La mayor parte de sensores se valen de grupos de 8 bits para almacenar los ND correspondientes a cada píxel. Así, cada píxel se define por un byte, que equivale a un rango de 256 niveles de intensidad.

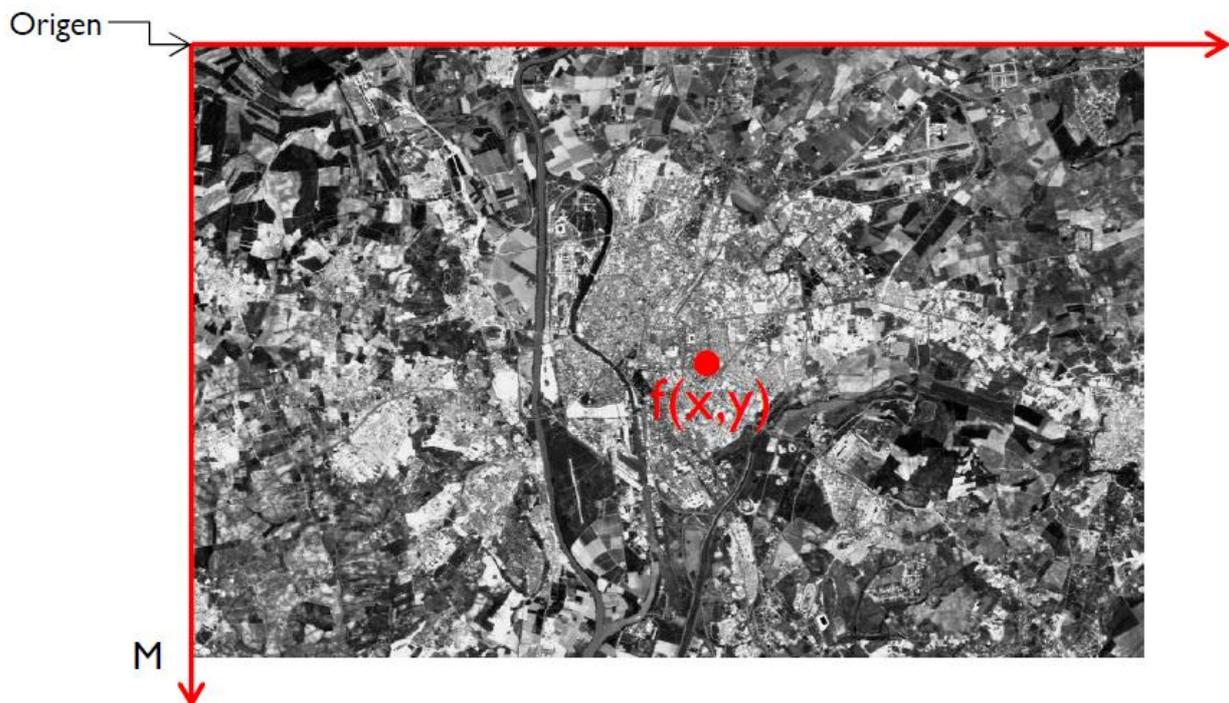


Figura 50: Representación de una imagen digital. Fuente: (Valderrama, 2017)

En la figura 50 se ha representado una imagen digital monocroma como una matriz de puntos o píxeles de tamaño total $M \times N$. Cada punto o píxel ($f(x,y)$) es una función bidimensional de luz. Así, puede definirse cada

¹⁴ Polarización electromagnética: fenómeno por el cual el campo eléctrico oscila sólo en un plano, denominado plano de polarización. Este plano puede definirse por dos vectores perpendiculares entre sí, uno paralelo a la dirección de propagación de la onda y otro perpendicular en la dirección del campo eléctrico.

píxel como una función del número de intensidad de cada banda que contiene:

$$f(x, y) = (\text{nivel } 1, \text{nivel } 2, \dots, \text{nivel } n) \quad (3-11)$$

Donde n se corresponde con el número de bandas que contiene cada punto. Es decir, en una imagen a color en el espectro visible las bandas o niveles son: nivel 1: banda roja; nivel 2: banda verde; nivel 3: banda azul. En cambio en una imagen multispectral el número de niveles o bandas vendrá determinado por el la definición de ancho de banda que tenga el sensor.

En general, el tamaño de cada archivo digital viene definido por la cantidad de píxeles que contiene ($M \times N$), es decir de su resolución espacial- concepto que se explica más adelante-, y el número de bandas (b) que contiene:

$$\text{Tamaño archivo digital (Mb)} = M \times N \times b \quad (3-12)$$

En cuanto a la tipología de archivos de imágenes digitales usados en teledetección se tiene:

- BMP (Bit MaP). Es el formato estándar de Windows con 24 bits por píxel, no suelen comprimirse
- JPEG (Joint Photographic Experts Group). Es un esquema de compresión ideal porque pierde poca información. Almacena 24 bits por píxel.
- EXIF (Exchangeable Image File). Este tipo de archivo contiene una imagen JPEG comprimida más metadatos de la fotografía.
- PNG (Portable Network Graphics). Puede almacenar colores con 8, 24 o 48 bits por píxel y escalas de grises con 1, 2, 4, 8 o 16 bits por píxel.
- TIFF (Tag Image File Format). Es un formato flexible y extensible compatible con gran variedad de plataformas y aplicaciones de procesamiento de imágenes. Pueden almacenar imágenes con un número arbitrario de bits por píxel y emplear algoritmos de compresión. También almacena metadatos.

3.3.3 Resolución de un sistema sensor

Se puede definir la resolución de un sistema sensor en su conjunto como aquella habilidad o capacidad para discriminar información de detalle. Se habla de *discriminación* en cuanto a aquellos objetos que se quieren distinguir de otros, es decir, una detección o una identificación, y se habla de *información de detalle* debido a la capacidad para captar no sólo el detalle, sino también el número y anchura de bandas del espectro que alberga, a su cadencia temporal y a su capacidad para distinguir variaciones en la energía reflejada que detecta.

Así, el concepto de resolución de un sistema sensor se abarca desde distintos puntos, como son la resolución espacial, la espectral, radiométrica, temporal y angular, es decir, depende de cada una de estas resoluciones.

Cabe mencionar que estas resoluciones están estrechamente relacionadas, por ejemplo a mayor resolución espacial, disminuye habitualmente la temporal y puede que también la espectral. Además, el aumento en cualquiera de los cuatro tipos de resolución significa también un incremento notable del volumen de datos a procesar. Y puesto que los distintos tipos de resolución están relacionados, cada sistema de teledetección ofrece unas características particulares orientadas a detectar un problema en particular.

3.3.3.1 Resolución espacial.

Se entiende con resolución espacial como el objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. Se mide en milímetros sobre la foto o metros sobre el terreno, y depende de la longitud focal de la cámara y de su altura sobre la superficie.

Esta resolución es en definitivas cuentas, el tamaño del píxel que se guarda en la imagen rasterizada¹⁵, y que depende de varios factores como son la altura orbital, la longitud focal y el número de detectores. Los satélites

¹⁵ Imagen rasterizada: Es una imagen en mapa de bits o imagen de píxeles. Es una estructura o fichero de datos que representa una rejilla rectangular de píxeles o puntos de color, denominada matriz, que se puede visualizar en un monitor, papel u otro dispositivo de representación.

que cuentan con mayor resolución ofrecen un detalle espacial próximo a 1m^2 , a veces incluso del orden de centímetros, es decir, que cada píxel de la imagen es del tamaño de $1\text{m} \times 1\text{m}$. Existen otros satélites diseñados para la adquisición de imágenes sobre áreas muy diversas que cuentan con resoluciones en torno a $25 \times 25\text{m}$, $100 \times 100\text{m}$, $300 \times 1000\text{m}$, etc. Otros, los dedicados a estudios meteorológicos, cuentan con resoluciones de $5 \times 5 \text{ km}$. En este estudio se usarán imágenes satélite con resoluciones de $30 \times 30\text{m}$ y $57 \times 57\text{m}$.

Así, la resolución espacial está estrechamente ligada con la escala de trabajo y con la fiabilidad finalmente obtenida en la interpretación. Sin embargo, y en algunos casos concretos de cubiertas, aumentar significativamente la resolución espacial es contraproducente para una correcta interpretación y clasificación de los componentes de una imagen, pues dispersa mucho la heterogeneidad interna de algunas categorías (Cushnie, 1985).

3.3.3.2 Resolución espectral

La resolución espectral se refiere a aquella resolución que indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Un sensor será más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilita la caracterización espectral de las distintas cubiertas. A la vez, conviene que esas bandas sean suficientemente estrechas con objeto de recoger la señal sobre regiones coherentes del espectro, ya que bandas muy anchas suponen registrar un valor promedio, que puede encubrir la diferenciación espectral entre cubiertas de interés.

De entre los sensores espacial, los que menor resolución espectral tienen son los de radar (trabaja en un solo canal) y los sistemas fotográficos (ofrece películas pancromáticas). Los que mayor resolución ofrecen son los óptico-electrónicos (Chuvienco, 2008) que ofrecen un elevado número de bandas. Es el caso del sensor Hyperion que va a bordo del satélite Earth Observing-1 y ofrece 220 bandas que van desde los $0,4 \mu\text{m}$ a los $2,5 \mu\text{m}$, con una resolución espectral de $0,10$ a $0,11 \mu\text{m}$ por banda recogida. La serie de satélites Landsat usadas para este trabajo tienen entre 5 a 11 bandas, dependiendo del sistema escogido.

Como ya se comentó en el capítulo 3.2 *Principios físicos de la teletección* la elección del número, anchura y localización de las bandas que incluye un sensor está relacionado con los objetivos de su diseño. Si el objetivo es el de detectar incendios, bastará con colocar un sensor en banda en el IRM.

3.3.3.3 Resolución radiométrica

Con resolución radiométrica se pretende hacer referencia a la sensibilidad del sensor, es decir, a su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que está recibiendo. En el caso de sistemas de sensores fotográficos, la resolución radiométrica del sensor se indica por el número de niveles de gris distintos que aparecen en la fotografía. En cambio, para los sistemas de sensores digitales, la imagen se codifica binariamente de forma que la resolución radiométrica se refiere al rango posible de valores que almacena el sensor, medido como el número de bits que necesita cada valor numérico para almacenarse.

Actualmente la mayor parte de los sensores activos en las plataformas satelitales ofrecen 256 niveles por píxel (8 bits , $2^8=256$), aunque otros tienen la capacidad de almacenar (10 bits) 1024 niveles, 2048 niveles (11 bits) y 65.536 niveles (16 bits) como es el radar.

3.3.3.4 Resolución temporal

Este tipo de resolución se refiere a la frecuencia de cobertura terrestre que es capaz de proporcionar el sensor, es decir, a la periodicidad con la que éste es capaz de adquirir imágenes de la misma superficie. Esta cobertura es función de las características orbitales del satélite y del ángulo de apertura del sensor, que indica el tamaño de imagen. El sistema Landsat suele ofrecer una cadencia de imágenes cada 16 días, mientras que las plataformas satelitales orientadas al estudio meteorológico pueden tener cadencias de la misma superficie de estudio cada 30 minutos.

3.3.3.5 Resolución angular

Debido a que no todas las superficies tienen una reflectividad lambertiana (véase capítulo 3.2.5), y en muchos casos la reflectividad es únicamente direccional, es importante tener en cuenta aquellos sensores que son capaces de obtener imágenes desde distintos ángulos. Por tanto, la resolución angular es aquella capacidad del sensor

por la que se puede obtener la misma imagen observada desde distintos ángulos (observación multiangular) simultáneamente.

3.3.4 Plataformas de teledetección: Sistema Landsat

Existen varias plataformas destinadas a la observación remota, sin embargo, este capítulo se va a centrar en el sistema Landsat, que ha sido la plataforma usada para la obtención de las imágenes de este estudio.

La gran mayoría de plataformas satelitales dedicadas a la teledetección tienen órbita polar (ver figura 51). Esta órbita, cuenta con una inclinación, medida desde el plano del Ecuador, de 90° . Dicha característica le permite una observación en cada momento de una zona distinta completa del planeta, hasta completar la observación, ya que la órbita es perpendicular al movimiento terrestre. Las alturas orbitales de estos satélites oscilan entre los 600 y 900 kilómetros

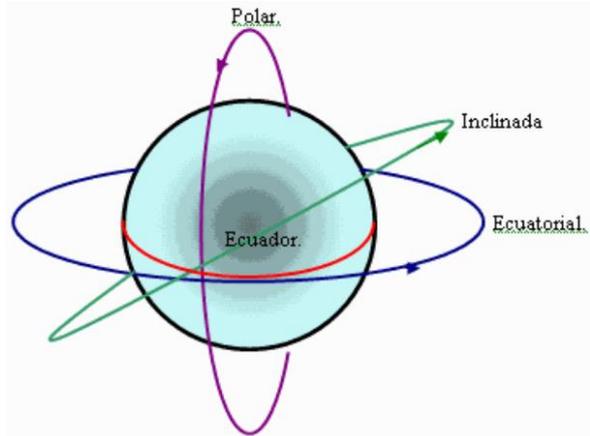


Figura 51: Principales tipos de órbitas: Polar, Ecuatorial o Inclínada. Fuente: (Orihuela, 2018)

El principal motivo de que los satélites tengan esta órbita tiene que ver con la resolución temporal y la cadencia de captura de imagen, con el fin de que siempre pasen por el ecuador a la misma hora para obtener imágenes en las mismas condiciones temporales.

La órbita polar es la más habitual en los satélites de recursos naturales de media y alta resolución (Landsat, SPOT, IRS, IKONOS, etc), si bien también existen órbitas ecuatoriales, cuya inclinación puede ser de 0° con el Ecuador hasta con una ligera inclinación ($5-10^\circ$) para observar con más detalle las zonas cercanas al trópico.

El sistema Landsat fue diseñado por la agencia espacial norteamericana a finales de la década de los 60 con el fin exclusivo de la observación de los recursos terrestres. El primer satélite fue el ERTS lanzado en 1972, al cual le siguió el primer denominado como Landsat en 1975. La buena resolución de sus sensores, el carácter global y periódico de la observación que realizan y su buena comercialización explican que sea el proyecto de teledetección más fructífero hasta la fecha (S.N. Goward, 2005).

Al ERTS, le siguió el Landsat 2 (1975), Landsat 3 (1978), Landsat4 (1982), Landsat5 (1985), Landsat 6 (en 1993 y cuyo lanzamiento fue fallido al no obtener suficiente velocidad para coger órbita), Landsat 7 (1999) y el más reciente Landsat 8 (2013). Landsat 1, 2, 3, 4, 5 están actualmente fuera de servicio por lo que no generan más información.

3.3.4.1 Características orbitales principales:

Los tres primeros satélites Landsat (1, 2, 3) tenían un aspecto similar al de una mariposa por la disposición de sus paneles solares (ver figura 52). Las dimensiones aproximadas de los satélites eran desde los 3 metros de altura por 1.5 metros de diámetro (hasta 4 con sus paneles abiertos) y el peso total del sistema rondaba los 1000 kilogramos.

La órbita de estos satélites era polar ligeramente inclinada (99.1°) y con una altura orbital media de alrededor de 920km, circundando la Tierra cada 103 minutos (14 órbitas diarias) para volver a la misma posición respecto a la superficie terrestre a los 18 días.

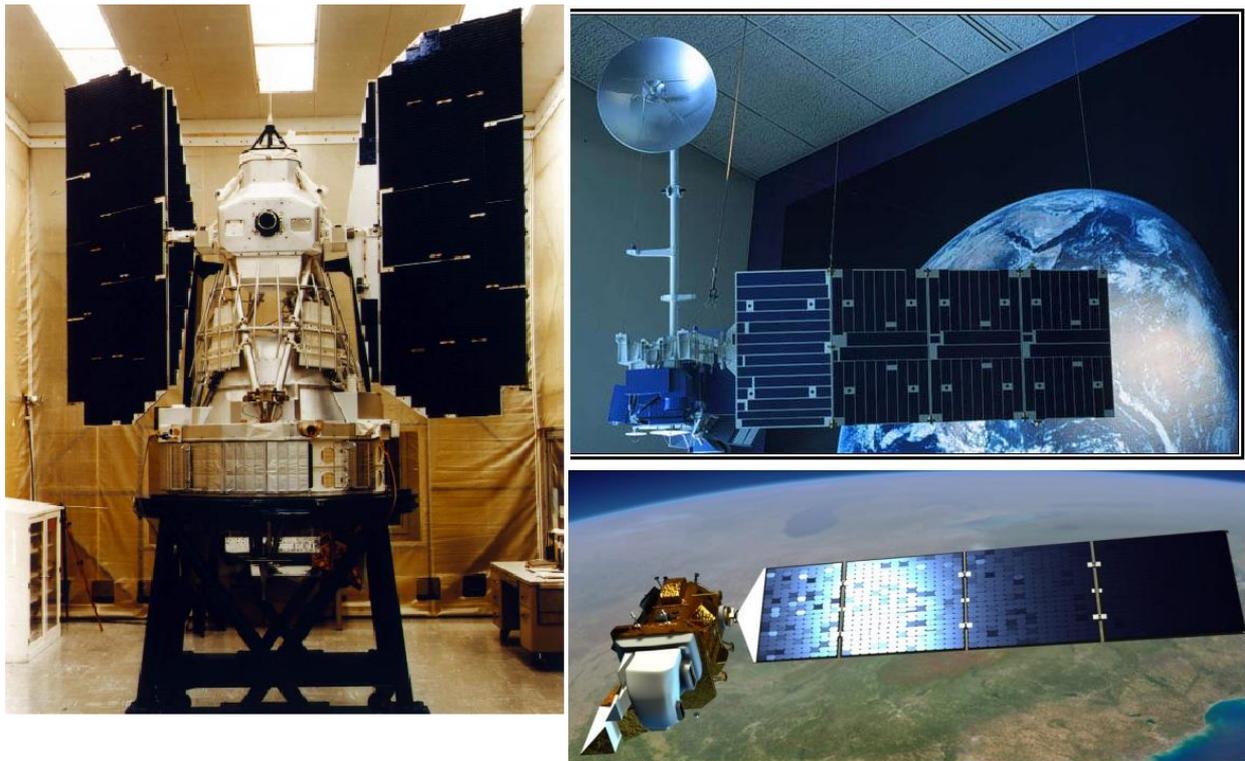


Figura 52: Imagen del Lansat 3(izquierda), Landsat 4 (arriba derecha) y Landsat 8 (abajo derecha) en tierra. Fuente (Wikipedia, 2018)

Los dos satélites siguientes (4 y 5) cambiaron en especificaciones técnicas y sus características orbitales. Presentan un diseño como el mostrado en la figura 50 y su altura de vuelo se redujo a los 705 kilómetros mejorando el ciclo de pasada o recubrimiento de 18 a 16 días debido a que se reducía el periodo orbital a 98.9 minutos.

El Landsat 7 se sitúa también a 705 kilómetros en órbita polar inclinada de 98.2° y un ciclo de recubrimiento de 16 días. Por último el Landsat8 puede también orbitar a 705 km de altura promedio y tiene el mismo periodo que los anteriores, pero eso sí con un desfase frente al Landsat 7 de 8 días. Landsat8 adquiere cerca de 650 imágenes diariamente

3.3.4.2 Sensores de Landsat

MSS

Los tres primeros Landsat venían equipados con sensores de barrido multiespectral o también denominado como MSS y un conjunto de tres cámaras de vídeo (RBV, *Return Beam Vidicon*). Estas cámaras de video fueron eliminadas en los Landsat 4 y 5 y las sustituyeron por un nuevo sensor de barrido denominado TM (*Thematic Mapper*) cuya resolución espacial y espectral era superior al MSS (aunque también había sensores MSS para asegurar la continuidad de los datos). El TM fue diseñado con varias bandas adicionales en el infrarrojo de onda corta (SWIR) y la adición de una banda térmica-IR con 120 metros de resolución.

Para el diseño del MSS se ubicaron 4 bandas que pretendían la aplicación de este sensor en la detección de masas vegetales, recursos hídricos y mineros.

RBV

Este sistema de cámaras de video registraba información en bandas comprendidas entre el verde y el IRC. La resolución espacial de este sensor se prefijaba en 80 metros. Las imágenes obtenidas mediante RBV se han utilizado en estudios morfológicos y en cartografía de la cubierta del suelo. Sin embargo, el hecho de no ser incorporado ya a partir del Landsat 4 ha ido limitando sus aplicaciones.

TM y ETM+

El sensor *Thematic Mapper* fue diseñado para el Landsat 4. El TM es también un sensor de barrido multiespectral aumentando frente al MSS el número de detectores (pasa de 24 a 100), realizando un barrido bidireccional. Permitió mejorar la resolución espacial, espectral y radiométrica frente al MSS: de 70 a 30m y de 4 a 7 bandas. El sensor ETM+ fue incorporado en el Landsat 7 mejorando las características del TM, añadiéndole una banda pancromática de 15 metros de resolución y aumentando la resolución de la banda térmica a 60 metros.

El incremento de la resolución espacial y espectral que ofrecen tanto el TM como el ETM+ permitió mejorar notablemente la precisión obtenida comportando una mejora sustancial en aplicaciones terrestres y marinas.

OLI y TIRS

En el Landsat8 se han incorporado dos nuevos sensores de barrido denominados OLI (*Operational Land Imager*) y TIRS (*Thermal Infrared Sensor*).

Las bandas espectrales de OLI, aunque similares al sensor ETM+, mejoran su resolución espectral añadiendo dos nuevas bandas para la detección de recursos hídricos e investigación de zonas costeras (banda 1), y un nuevo canal infrarrojo diseñado para la detección de nubes cirrus. OLI provee acceso a nueve bandas espectrales que cubren el espectro desde los 0.433 μm a los 1.390 μm .

Las bandas espectrales de TIRS van desde 10.30 μm a 12.50 μm de longitud de onda, las cuales antes estaban como una sola banda en el TM y ETM+.

3.3.4.3 Espectro electromagnético abarcado por Landsat

En tabla 3 siguiente se muestran todos los sensores anteriormente explicados con sus correspondientes bandas, su resolución espacial y en qué satélites Landsat están disponibles.

Tabla 3: Sensores¹⁶ a bordo del programa Landsat. Fuente: (Chuvienco, 2008)

SENSORES EN LANDSAT				
MSS ¹	RBV	TM ²	ETM+ ³	OLI ⁶ y TIRS ⁶
4 0.5-0.6 μm (79m)	1 ⁴ 0.475-0.575 μm (80m)	1 0.45-0.52 μm (80m)	1 0.45-0.52 μm (80m)	1 0.435-0.451 μm (30m)
5 0.6-0.7 μm (30m)	2 ⁴ 0.580-0.680 μm (80m)	2 0.52-0.60 μm (30m)	2 0.52-0.60 μm (30m)	2 0.452-0.512 μm (30m)
6 0.7-0.8 μm (120m)	3 ⁴ 0.690-0.830 μm (80m)	3 0.63-0.69 μm (30m)	3 0.63-0.69 μm (30m)	3 0.533-0.590 μm (30m)
8 ⁵ 10.4-12.6 μm (240m)	1 ⁵ 0.505-0.750 μm (40m)	4 0.76-0.90 μm (30m)	4 0.76-0.90 μm (30m)	4 0.633-0.673 μm (30m)
		5 1.55-1.75 μm (30m)	5 1.55-1.75 μm (30m)	5 0.851-0.879 μm (30m)
		6 10.4-12.50 μm (120m)	6 10.40-12.50 μm (60m)	6 1.566-1.651 μm (30m)
		7 2.08-2.35 μm (30m)	7 2.08-2.35 μm (30m)	7 2.107-2.294 μm (30m)
			8 0.52-0.90 μm (240m)	8 0.503-0.676 μm (15m)
				9 0.503-0.676 μm (30m)
				10 10.6-11.2 μm (100m)
				11 11.5-12.5 μm (100m)

¹⁶ Disponibilidad de los sensores:

¹. Sólo en los Landsat 1 a 5

². Sólo en el Landsat 4 y 5

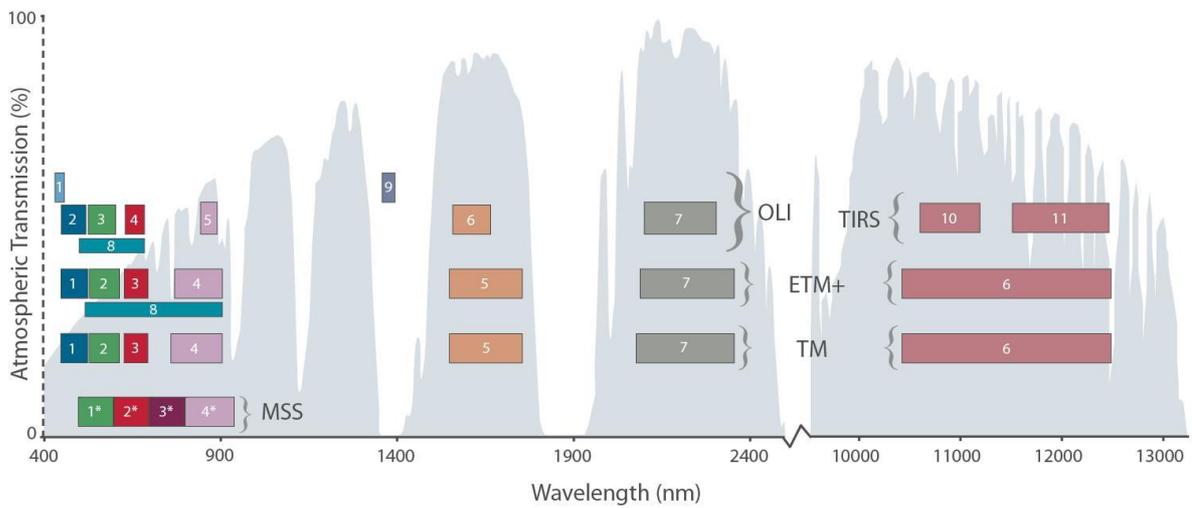
³. Sólo en el Landsat 7

⁴. Sólo en Landsat 1 y 2

⁵. Sólo en Landsat 3

⁶. Sólo en Landsat 8

Por último se muestra también gráficamente (ver figura 53) la ventana espectral de cada sensor en función de su capacidad de penetración en la atmósfera terrestre.



* MSS bands 1–4 were known as bands 4–7, respectively, on Landsats 1–3

Figura 53: Rango de longitudes de onda de cada banda de cada sensor de los distintos satélites del programa Landsat. Fuente: (USGS, 2018)

CAPÍTULO 4: RESULTADOS DEL ESTUDIO

“Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo.”

- Albert Einsten -

En las páginas que siguen a este capítulo se van a describir los procedimientos llevados a cabo y los resultados obtenidos en la zona de estudio. Estos resultados van desde el estudio mediante una serie de puntos de control de la firma espectral, hasta distintas clasificaciones supervisadas. Todo ello para una serie de imágenes con el fin de analizar la evolución en el tiempo. Son en estos resultados donde se apoyan las conclusiones de este estudio, gracias también al análisis realizado en el capítulo 2 y 3, que ayudan a entender y a procesar los resultados que de este capítulo 4 se derivan.

El capítulo se divide en 3 bloques que componen: la descripción de la metodología usada para obtener los resultados; el estudio de la firma espectral mediante puntos de control; y la clasificación supervisada de la zona de estudio.

4.1 Metodología para la obtención de los resultados.

La metodología que se ha previsto utilizar para llegar a los resultados (y en la que se basan las conclusiones) es la que se resume en el siguiente cuadro:



Figura 54: Metodología seguida para la consecución de los resultados.

Es evidente que tanto el capítulo 2, donde se explica el estado de la zona de estudio y sus características principales, como el capítulo 3 donde se explican los fundamentos del método de teledetección son claves para

poder procesar los resultados y para poder llegar a las conclusiones que de este estudio se deriven.

Centrándonos en la base de este capítulo 4, la metodología seguida para la consecución de los resultados ha consistido en lo expuesto en el cuadro anterior (figura 54). Este capítulo se ha abordado desde dos puntos de vista, con el fin de que uno complemente al otro y lo corrobore.

Por un lado se tiene todo aquello relacionado con el estudio de la firma espectral a través de una serie de puntos de control definidos y geoposicionados con una intencionalidad como se explicará más adelante. Gracias a la información de reflectividad o firma espectral de estos puntos de control se consigue analizar la evolución en el tiempo de dichos puntos, y si los resultados son significativos puede extrapolarse las conclusiones a la totalidad de la zona de estudio.

Por otro lado, y seguidamente de esto, se analiza la zona de estudio desde el punto de vista de una clasificación supervisada, exponiendo además resultados porcentuales de tipos de suelo y sus cambios o evolutiva a lo largo del tiempo.

Ambos métodos se sustentan en la ciencia de la teledetección y necesitan como no, de obtener una serie de datos a través de las imágenes y de un procesado de las mismas con el fin de obtener la mejor calidad y los resultados más fiables posibles. Es fundamental para ello, llevar un control estadístico tanto para el estudio de la firma espectral como un control mediante histogramas y gráficos de dispersión de las distintas clases o muestras seleccionadas de cara a la realización de la clasificación supervisada.

A la hora de realizar la clasificación supervisada, la cual se ha realizado mediante el software ArcMap 10.1¹⁷, es vital georreferenciar la imagen debido a que a la hora de recortar la zona de estudio, éstas coordenadas deben estar perfectamente definidas.

Las imágenes utilizadas siempre han sido con cobertura nubosa inferior al 2% por lo que no se han debido de realizar correcciones orientadas a corregir esto. Sí se ha realizado un tratamiento para la mejora visual y la mejora en la clasificación supervisada.

Por último comentar la procedencia tanto de los datos utilizados para firma espectral, como las imágenes utilizadas en la clasificación supervisada:

- Fuente para la obtención de datos de firma espectral: Visualizador Landsat Explorer. (LANDSAT EXPLORER, 2018).
- Fuente para la obtención de las imágenes:
 - Earth Explorer USGS, del servicio geológico de los Estados Unidos. Imágenes del satélite Landsat. (USGS, Enero).
 - Servidor de imágenes Landsat y productos derivados de Doñana del CSIC: Plataforma online de consulta y descarga de imágenes del entorno de Doñana. (CSIC, 2018)

El hecho de obtener los resultados de una sola plataforma satelital (Landsat) está relacionado fundamentalmente por la disponibilidad de las imágenes y además, con el hecho de intentar minimizar desviaciones en los niveles digitales producidas por obtener imágenes de distintas plataformas y sensores.

¹⁷ ArcMap 10.1: Software que visualiza y explora el conjunto de datos SIG de un área de estudio con el fin de editarlos o crear nueva información temática.

4.2 Estudio de la firma espectral

En la zona de estudio (sistema dunar de Doñana) se ha llevado a cabo un estudio de firma espectral mediante cuatro perfiles de firma.

Las firmas espectrales son fundamentales para reconocer el tipo de superficie observada y/o poder comparar la misma superficie en distintos periodos de tiempo. Existen distintas maneras de calcular la firma espectral: se puede medir con un radiómetro¹⁸, extraerla de una biblioteca espectral, simularla mediante modelos físicos o extraerla directamente de la imagen. En este trabajo, se ha extraído la firma espectral de la zona de estudio directamente de la imagen a través de la plataforma online *Landsat Explorer* (LANDSAT EXPLORER, 2018).

Para llevar a cabo lo anteriormente comentado y tal como se ha adelantado al inicio de este capítulo, se han definido en la zona de estudio 4 perfiles (ver figura 55), situados aproximadamente perpendiculares a la dirección principal de la costa y perpendiculares a las acciones predominantes (viento y oleaje). Cuentan con unos puntos de control desde donde se han extraído los valores de firma espectral a lo largo de los años. Estos puntos de control son los definidos en la siguiente tabla.

Tabla 4: Puntos de Control Para la zona de estudio

Perfil ID	Coord.(X/Y)						
1	1.1 6.485/36.950	2	2.1 6.469/36.937	3	3.1 6.453/36.920	4	4.1 6.429/36.891
1	1.2 6.483/36.950	2	2.2 6.468/36.937	3	3.2 6.448/36.923	4	4.2 6.425/36.893
1	1.3 6.477/36.951	2	2.3 6.466/36.940	3	3.3 6.445/36.926	4	4.3 6.417/36.897
1	1.4 6.476/36.956	2	2.4 6.465/36.941	3	3.4 6.443/36.927	4	4.4 6.413/36.900
1	1.5 6.473/36.951	2	2.5 6.463/36.943	3	3.5 6.441/36.929	4	4.5 6.405/36.903
1	1.6 6.471/36.950	2	2.6 6.461/36.944	3	3.6 6.438/36.931	4	4.6 6.398/36.907
1	1.7 6.461/36.950	2	2.7 6.459/36.946	3	3.7 6.437/36.932		
				3	3.8 6.432/36.935		

En total son 28 puntos de control que se han ubicado estratégicamente en los cambios entre dos tipos de suelos: arena y vegetación. Es en esas ubicaciones donde se espera un mayor cambio. La designación de estos 4 perfiles atiende a una hipótesis básica que se ha realizado consistente en que las ondas dunares se han desplazado en movimiento ascendente o descendente perpendicular a la costa.

Como resultado de este estudio se representa la media ponderada por década de la firma espectral de los distintos puntos de control con el fin de poder comparar 5 escenarios, el inicial o de referencia, década de los 80, década de los 90, década de los 2000 y década de los 2010. Finalmente se realiza un test estadístico ANOVA (de análisis de la varianza) para verificar la fiabilidad de los datos.

¹⁸ Radiómetro: Instrumento para detectar y medir la intensidad de energía térmica radiante.



Figura 55: Perfiles en la zona de estudio para la definición de los puntos de control. Fecha imagen: 27/01/2018

Con este estudio, se pretende ver la evolución a lo largo de los años de la firma espectral de esos puntos de control, desde la primera imagen por satélite de la que se dispone (21 de Mayo de 1976) hasta la última (27 Enero de 2018). La firma espectral de referencia, desde la que se deducirán los cambios producidos a lo largo del tiempo, será la de la primera fecha. Y para obtener una conclusión adecuada, es necesario definir cuáles son las firmas espectrales tipo que puedan ser el resultado de una observación, éstas son la de duna, vegetación propia de la zona y la de suelo tipo mixto.

4.2.1 Imágenes utilizadas

Se ha dependido en gran medida de la disponibilidad de imágenes satélite de la serie Landsat para la realización de este estudio. Además, para intentar que la firma espectral no esté alterada por los agentes nubosos se han utilizado únicamente imágenes con una cobertura nubosa inferior al 2%. Aun así, el número de imágenes utilizadas es suficiente para considerarlo como representativo para los fines de este estudio. Se han agrupado las imágenes en 5 tipos, a la hora de realizar promedios con los valores de firma espectral para que el valor de la firma sea más representativo.

Tabla 5: Imágenes Landsat utilizadas para la obtención de firma espectral

Fecha	Satélite	Sensor	Resolución	Path/row WGS84	Tipo
26-03-1973	L-1	MSS	30-120m	217/35	1: Imagen de referencia
21-05-1976	L-1	MSS	30-120m	217/34	1: Imagen de referencia
17-04-1989	L-4	TM	30-120m	202/34	2
10-04-2001	L-5	TM	30-120m	202/34	3
31-01-2005	L-5	TM	30-120m	202/34	3
25-02-2011	L-5	TM	30-120m	202/34	3
06-04-2014	L-8	OLI y TIRS	30m	202/34	4
08-03-2015	L-8	OLI y TIRS	30m	202/34	4
10-03-2016	L-8	OLI y TIRS	30m	202/34	4
24-01-2017	L-8	OLI y TIRS	30m	202/34	5: Imagen actual
27-01-2018	L-8	OLI y TIRS	30m	202/34	5: Imagen actual

4.2.2 Firmas espectrales tipo.

Se va a denominar como firma espectral tipo a aquella firma espectral representativa de cada tipología de suelo. Para eso se va a definir tres tipologías de suelo: duna, vegetación propia de la zona y suelo mixto (ver figura 56). Esto es de vital importancia a la hora de comparar los distintos escenarios entre sí. Así, además de comparar la firma espectral de los distintos escenarios con esta firma espectral tipo, también se realizará con la firma espectral de referencia, es decir, aquella que se toma como la inicial (el promedio entre firmas espectrales de la imagen de 1973 y 1976).

A continuación se representa las firmas espectrales definidas como firmas espectrales tipo (figura 57). Como es de esperar, superficies más reflejantes como la arena, tienen valores de reflectividad asociada más elevados por banda. Los valores más bajos son para el suelo tipo vegetación.

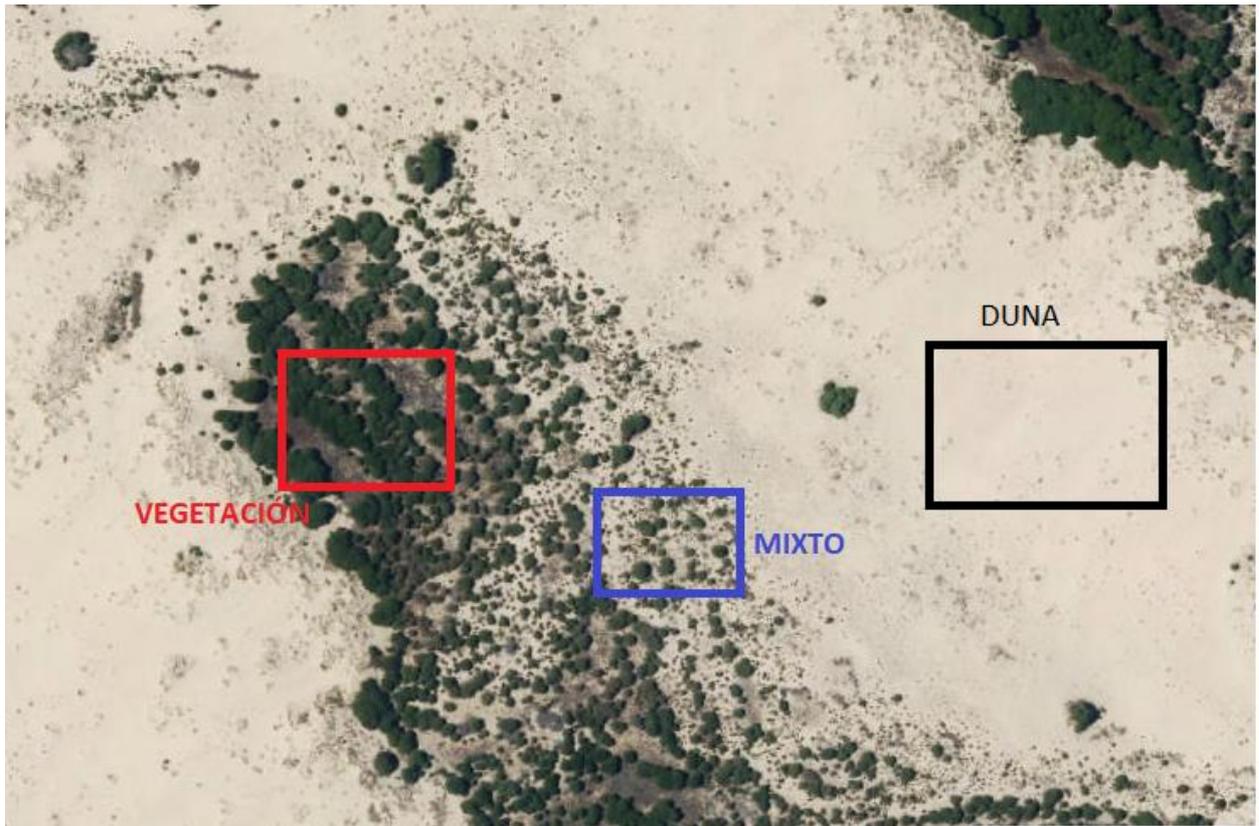


Figura 56: Tipología de suelo para la firma espectral utilizada como firma espectral tipo.

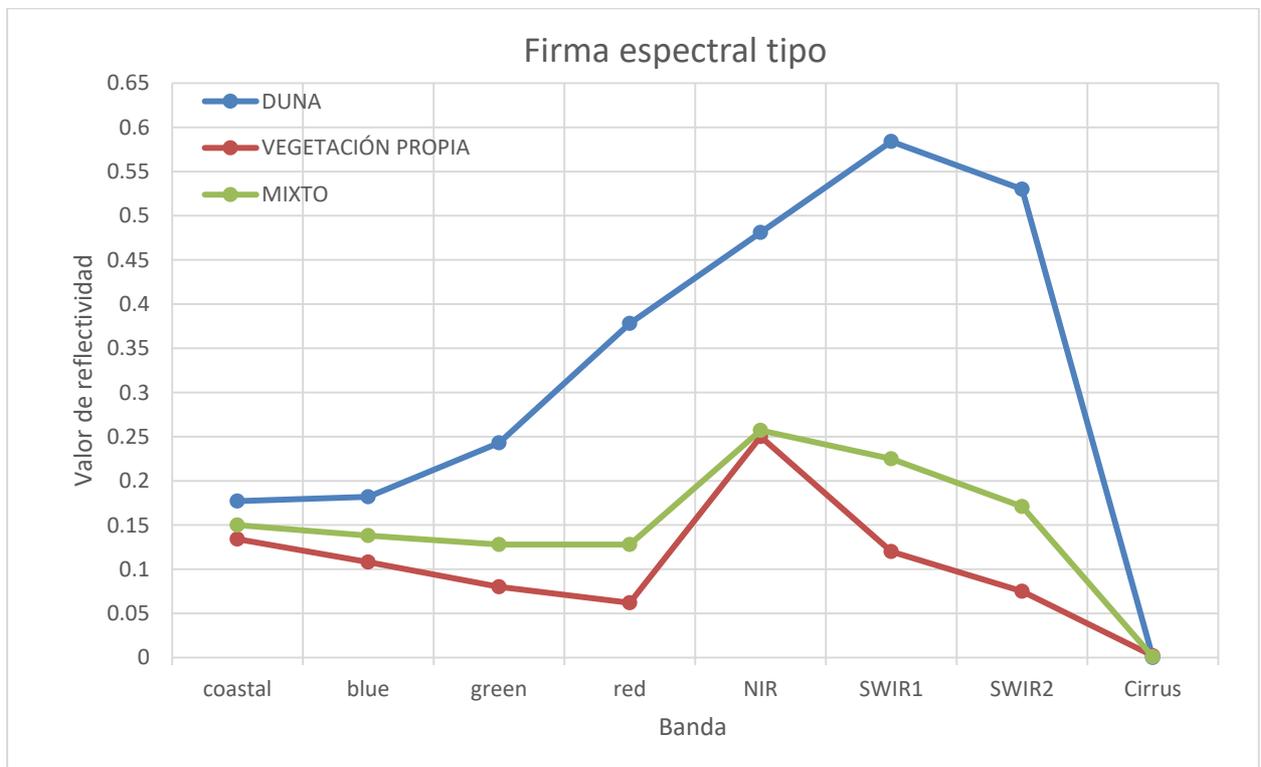


Figura 57: Firma espectral tipo: Duna; Vegetación Propia; y Mixto

4.2.3 Resultados de los perfiles de estudio.

A continuación se detallan los resultados de este estudio para los 28 puntos de control analizados para las imágenes de las respectivas fechas. Los resultados se han dividido por ficha para cada perfil estudiado. En cada perfil se muestran los puntos de control asociados, incluyendo una gráfica de las firmas espectrales de cada tipología. Por un lado se muestran los valores de referencia (Duna, Mixto, Vegetación), y por el otro los resultados de las imágenes de las décadas (1: Década años 70; 2: Década años 80-90; 3: Década años 2000; 4: Década 2010; 5: Actual).

Cada firma de referencia supone el promedio por banda de cada imagen de la década usada. Por ejemplo, la firma tipo 4 (Década 2010) resulta de la conjunción por banda de las imágenes del 06-04-2014, 08-03-2015 y 10-03-2016.

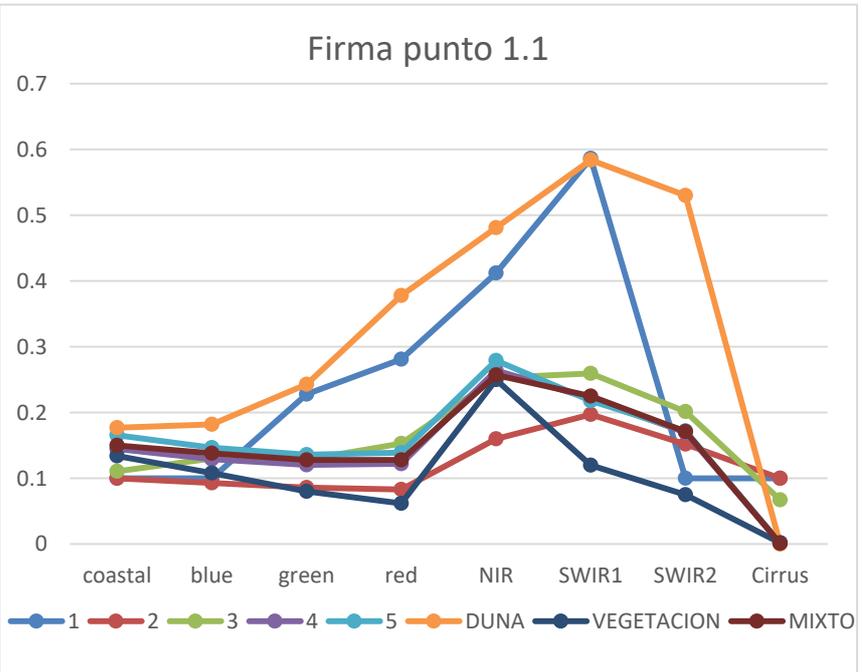
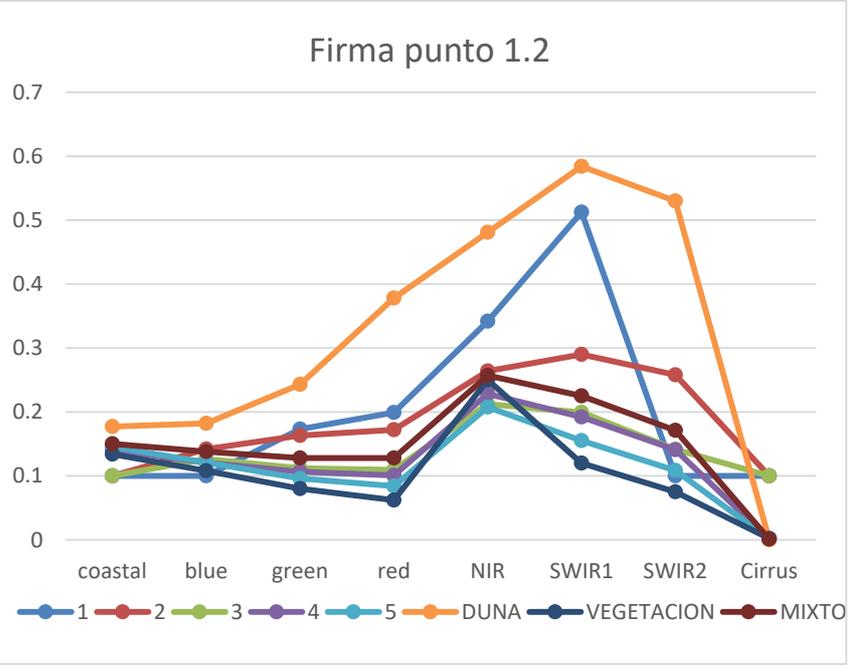
Lo que se espera de este estudio es poder analizar la evolución de cada punto de control, desde la primera fecha de la que se tienen datos, hasta la última. Esto se realiza con el fin de obtener conclusiones preliminares acerca del área de estudio, que puedan ser corroboradas con los estudios posteriores de este trabajo. Como ya se ha comentado anteriormente, los puntos de control han sido tomados estratégicamente en las zonas de interfase actual. Es decir, en zonas donde hay un cambio, a día de hoy, entre los distintos tipos de suelos.

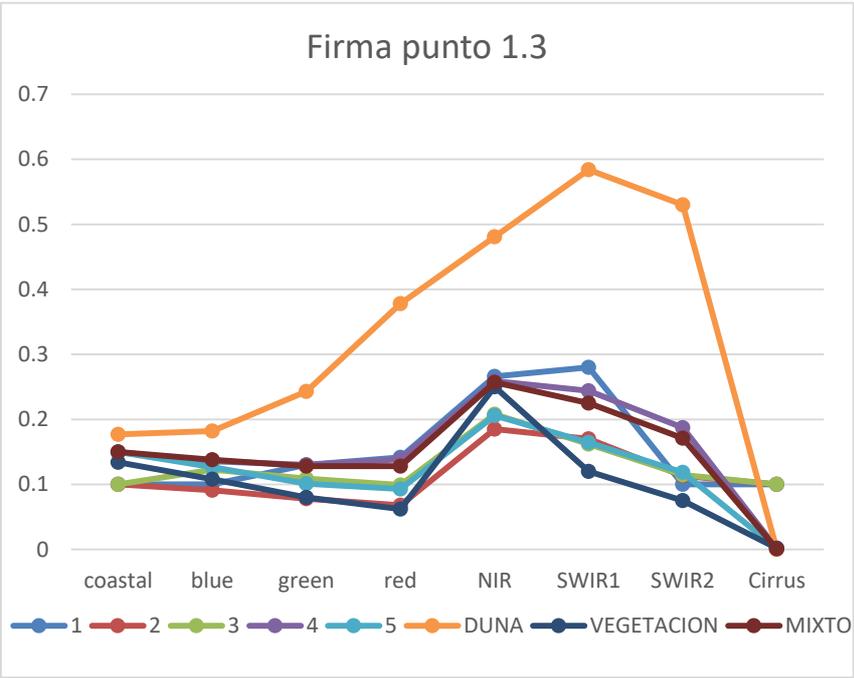
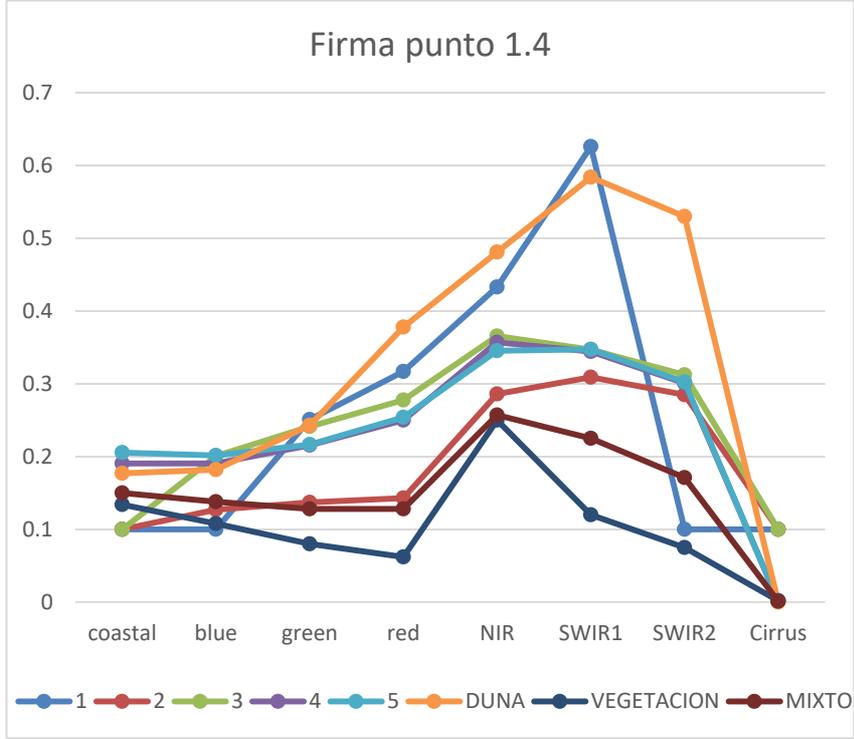
En la siguiente tabla, se anticipan los resultados de inicio y final, es decir, de la imagen tipo 1 (fecha imagen década 70) contra la imagen tipo 5 (actual). Como se puede observar, todos los resultados puntuales indican una pérdida de arena a favor de una ganancia en mixto o vegetación, y de paso de mixto a vegetación (100%: paso de duna a vegetación; 50%: paso de duna a mixto o de mixto a vegetación; 0%: sin cambio).

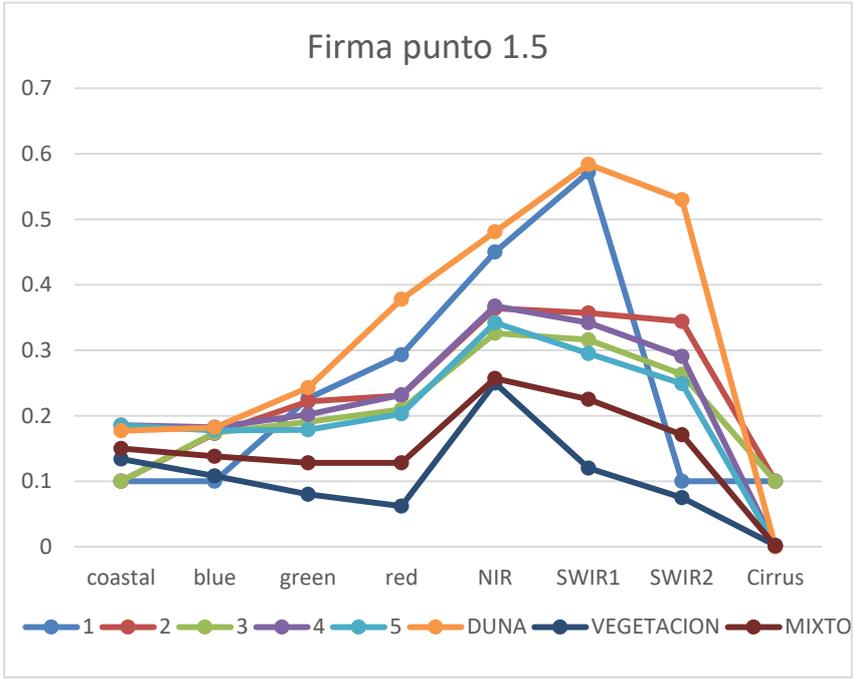
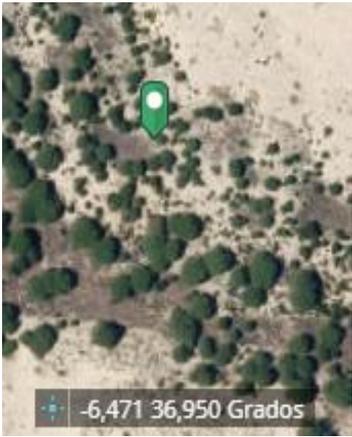
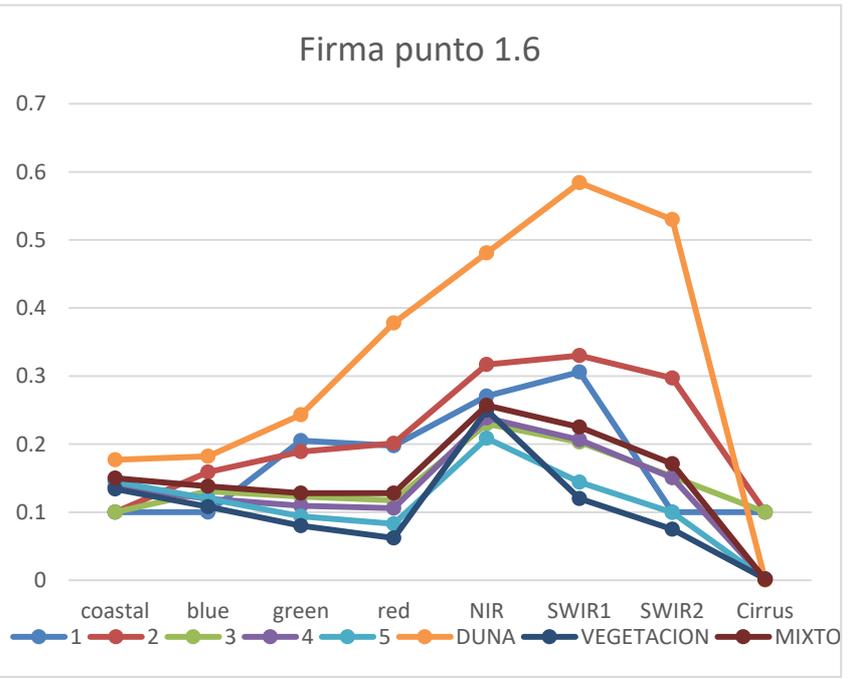
Tabla 6: Resumen de resultados por punto

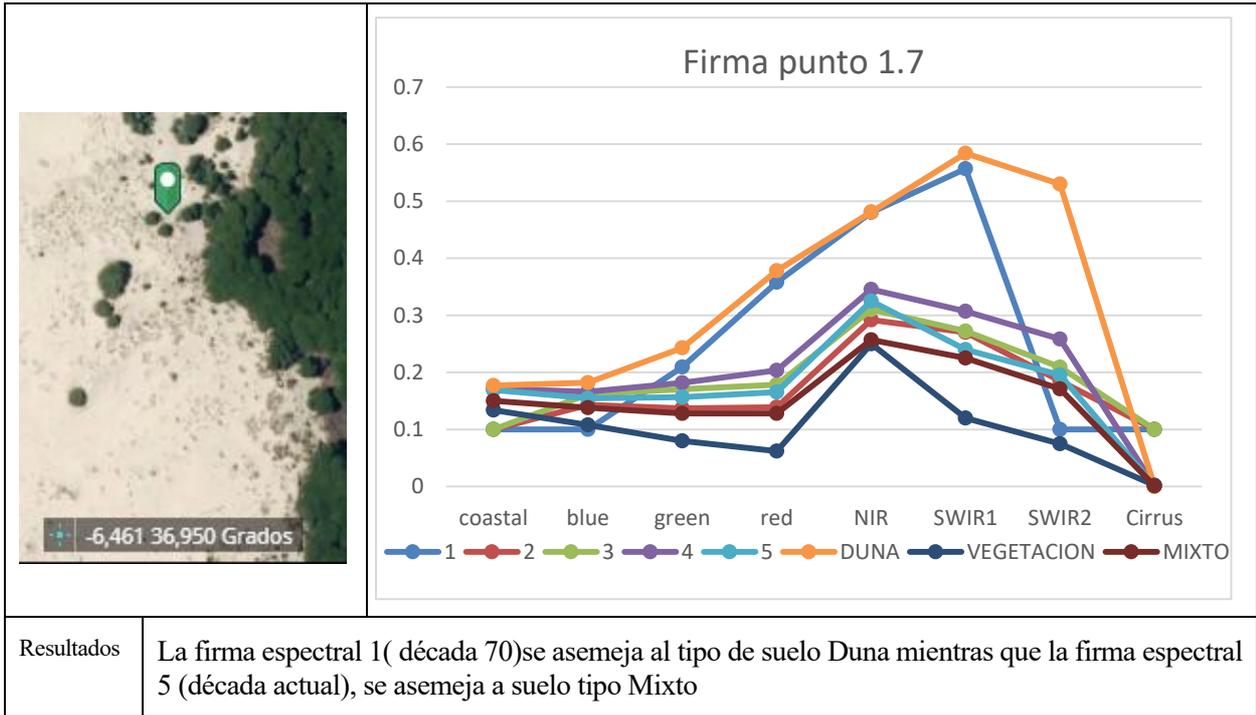
Punto	Inicio (1)	Fin (5)	%Cambio	Punto	Inicio (1)	Fin (5)	%Cambio
1.1	Duna	Mixto	50%	3.1	Duna	Duna	100%
1.2	Duna	Vegetación	100%	3.2	Duna	Mixto	50%
1.3	Mixto	Vegetación	50%	3.3	Duna	Mixto	50%
1.4	Duna	Mixto	50%	3.4	Duna	Mixto	50%
1.5	Duna	Mixto	50%	3.5	Duna	Vegetación	100%
1.6	Mixto	Vegetación	50%	3.6	Mixto	Vegetación	50%
1.7	Duna	Mixto	50%	3.7	Mixto	Vegetación	50%
2.1	Duna	Vegetación	100%	3.8	Duna	Mixto	50%
2.2	Duna	Mixto	50%	4.1	Mixto	Mixto	0%
2.3	Mixto	Vegetación	50%	4.2	Duna	Mixto	50%
2.4	Duna	Mixto	50%	4.3	Duna	Vegetación	100%
2.5	Duna	Mixto	50%	4.4	Mixto	Vegetación	50%
2.6	Duna	Duna	0%	4.5	Duna	Mixto	50%
2.7	Duna	Vegetación	100%	4.6	Duna	Mixto	50%

4.2.3.1 Perfil 1.

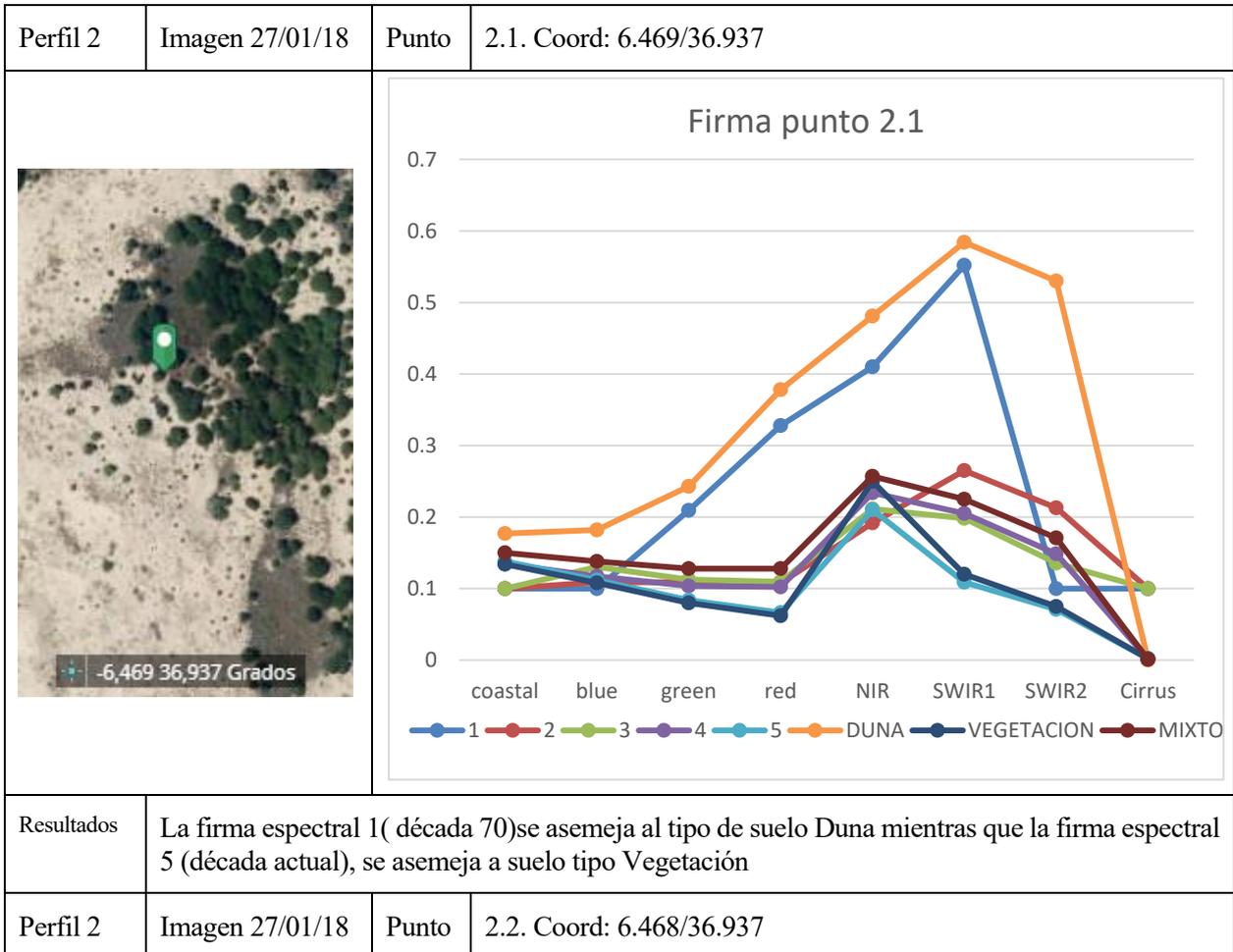
Perfil 1	Imagen 27/01/18	Punto	1.1. Coord: 6.485/36.95
		<p style="text-align: center;">Firma punto 1.1</p> 	
Resultados	La firma espectral 1 (década 70) se aproxima al suelo tipo Duna, mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a suelo tipo Mixto.		
Perfil 1	Imagen 27/01/18	Punto	1.2. Coord: 6.483/36.95
		<p style="text-align: center;">Firma punto 1.2</p> 	
Resultados	La firma espectral 1(década 70) con altos niveles en SWIR1 y NIR, dan a entender la presencia de arena (semejanza e suelo tipo Duna) mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a suelo tipo Vegetación.		

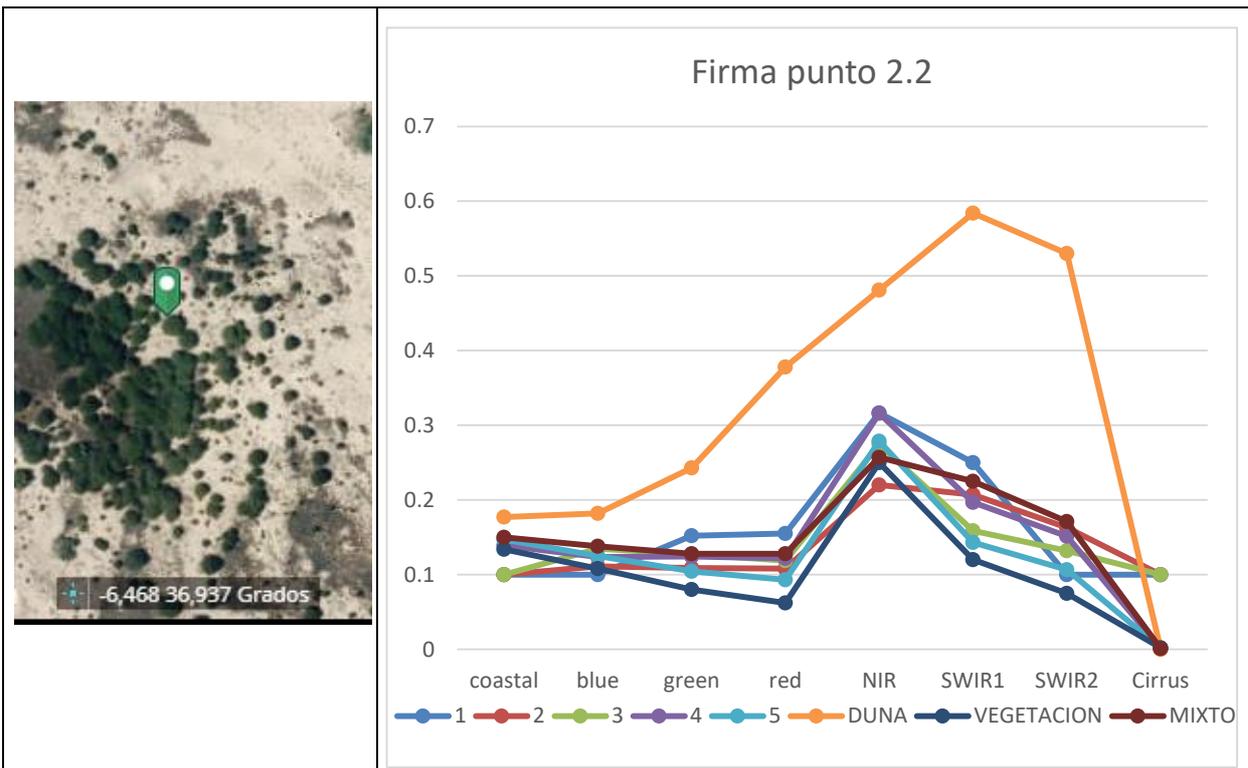
Perfil 1	Imagen 27/01/18	Punto	1.3: Coord: 6.477/36.951
		<h3 style="text-align: center;">Firma punto 1.3</h3> 	
Resultados	La firma espectral 1(década 70)se asemeja al tipo de suelo Mixto mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a suelo tipo Vegetación.		
Perfil 1	Imagen 27/01/18	Punto	1.4: Coord: 6.476/36.956
		<h3 style="text-align: center;">Firma punto 1.4</h3> 	
Resultados	La firma espectral 1(década 70)se asemeja al tipo de suelo Duna mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a suelo tipo Mixto, pero pudiendo ser vegetación seca al tener niveles altos en la banda del rojo, NIR y SWIR		

Perfil 1	Imagen 27/01/18	Punto	1.5: Coord: 6.473/36.951
			
Resultados	<p>La firma espectral 1(década 70)se asemeja al tipo de suelo Duna mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a suelo tipo Mixto, pero pudiendo ser vegetación seca al tener niveles altos en la banda del rojo, NIR y SWIR También el resto de décadas están en esta situación para este punto de control.</p>		
Perfil 1	Imagen 27/01/18	Punto	1.6: Coord: 6.471/36.95
			
Resultados	<p>La firma espectral 1(década 70)se asemeja al tipo de suelo Mixto mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a suelo tipo Vegetación.</p>		
Perfil 1	Imagen 27/01/18	Punto	1.7: Coord: 6.461/36.95



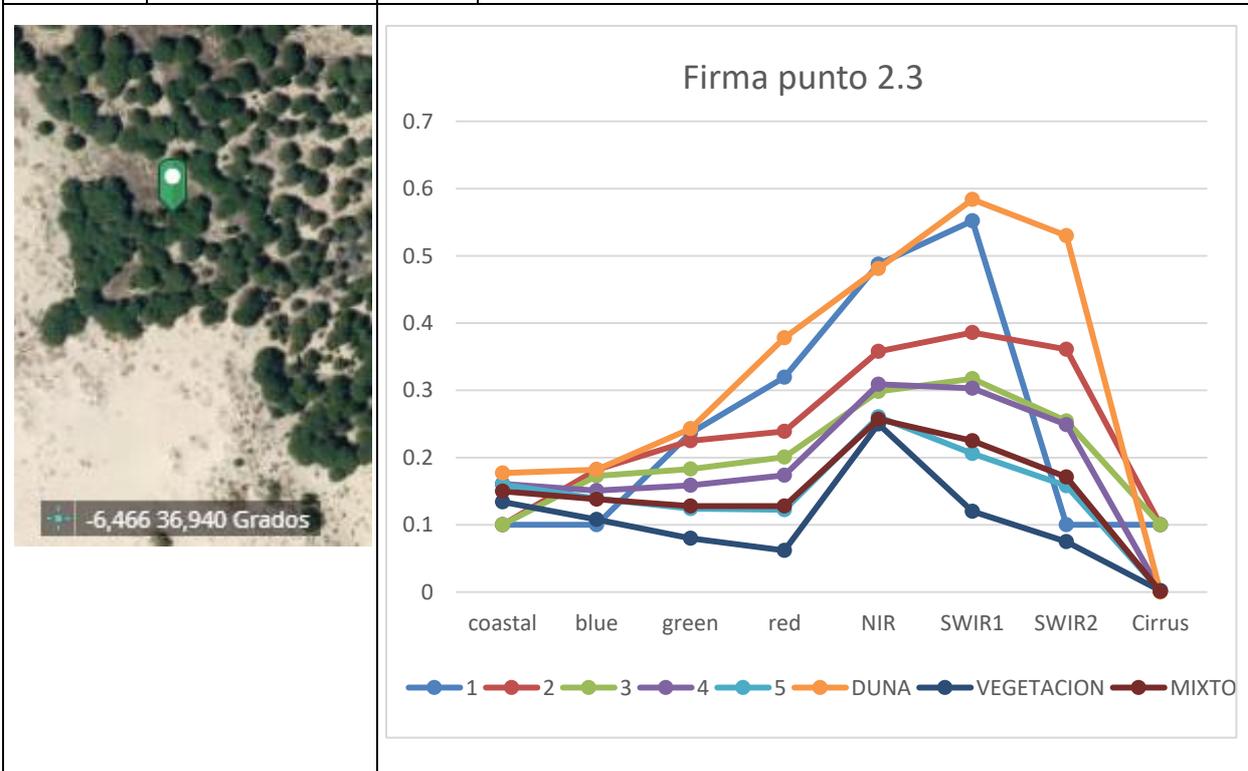
4.2.3.2 Perfil 2.





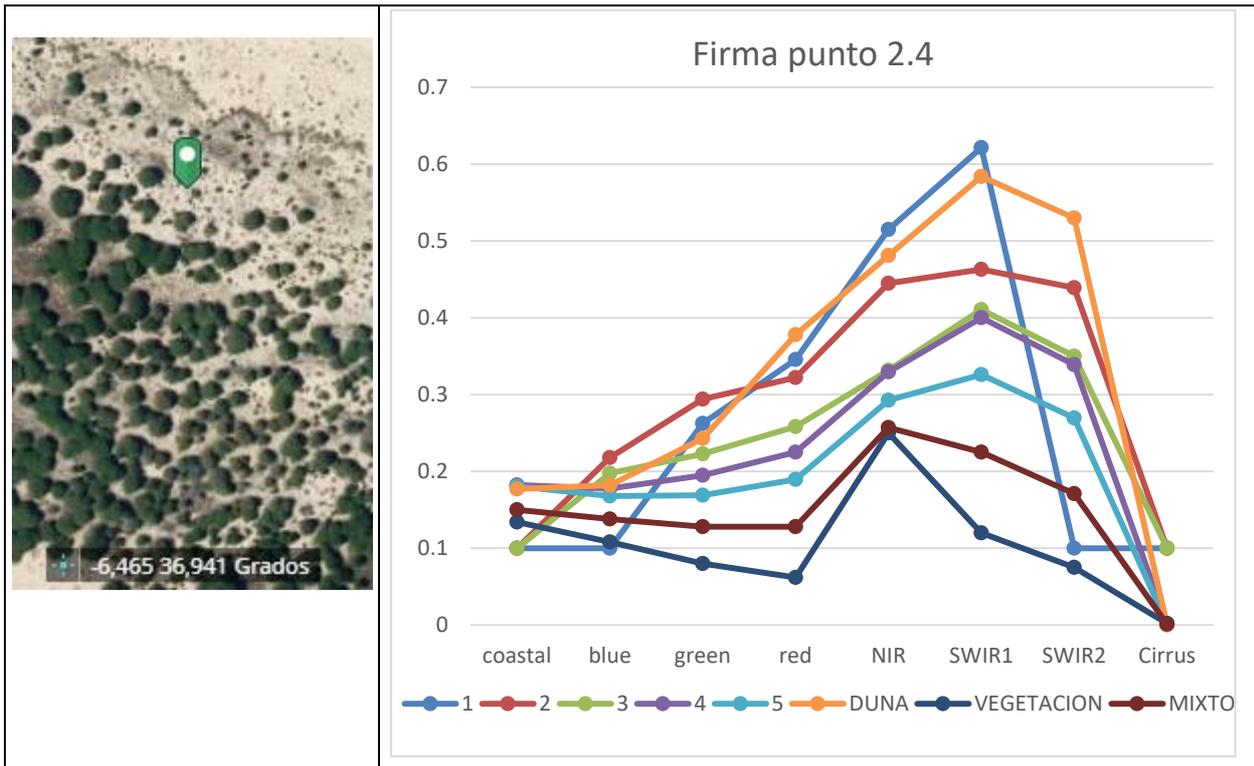
Resultados La firma espectral 1(década 70) se asemeja al tipo de suelo Duna mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a suelo tipo Mixto.

Perfil 2 Imagen 27/01/18 **Punto** 2.3. Coord: 6.466/36.94



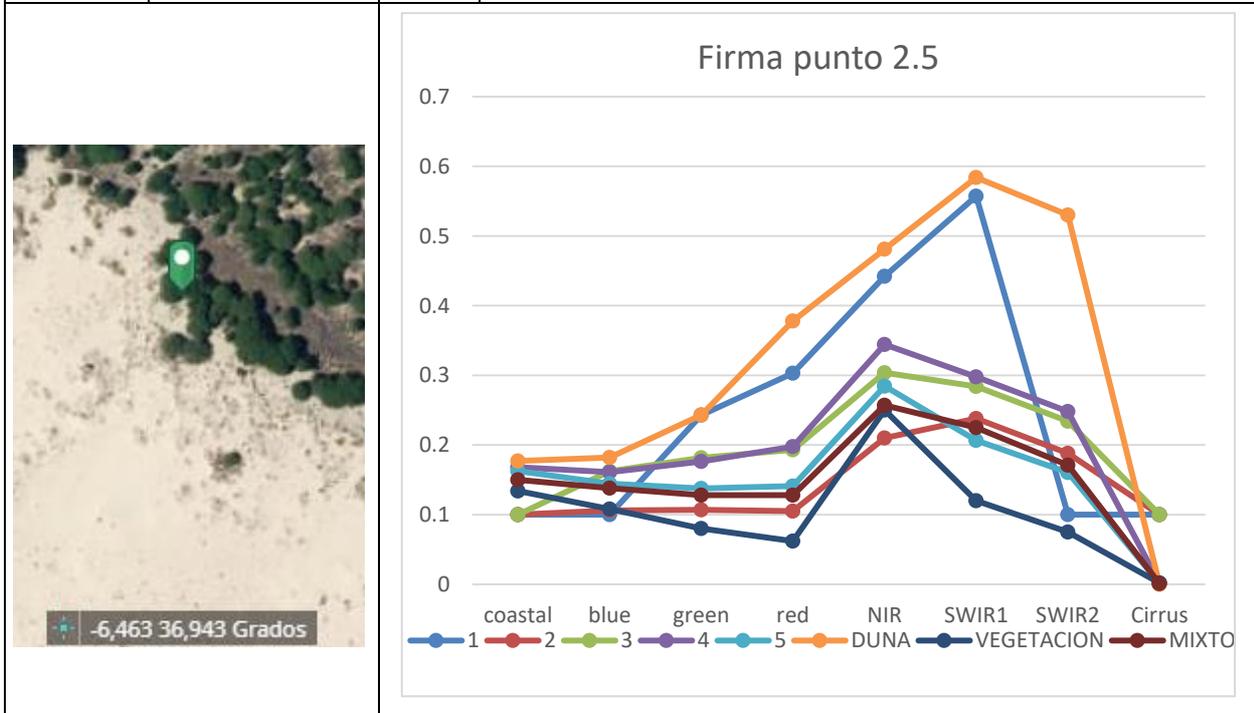
Resultados La firma espectral 1(década 70) se asemeja al tipo de suelo Mixto mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a suelo tipo Vegetación.

Perfil 2 Imagen 27/01/18 **Punto** 2.4. Coord: 6.465/36.941



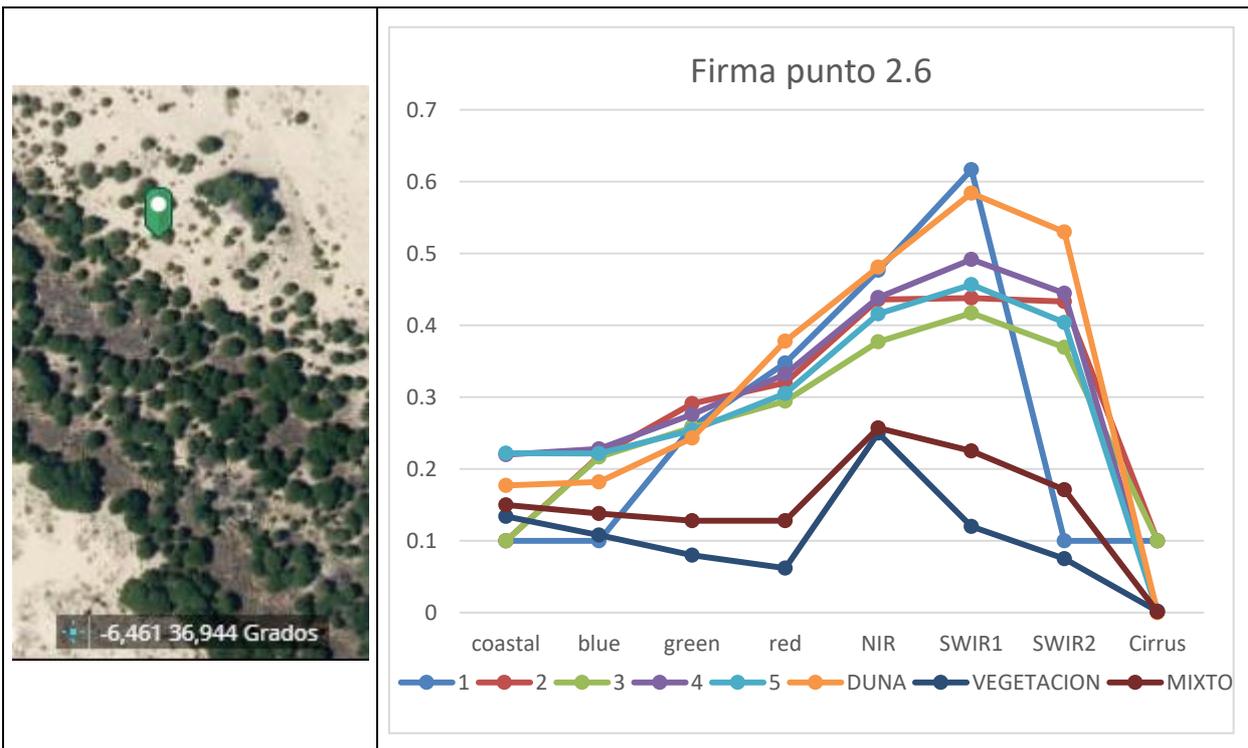
Resultados La firma espectral 1 (década 70) se asemeja al tipo de suelo Duna mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a suelo tipo Mixto.

Perfil 2 Imagen 27/01/18 **Punto** 2.5. Coord: 6.463/36.943



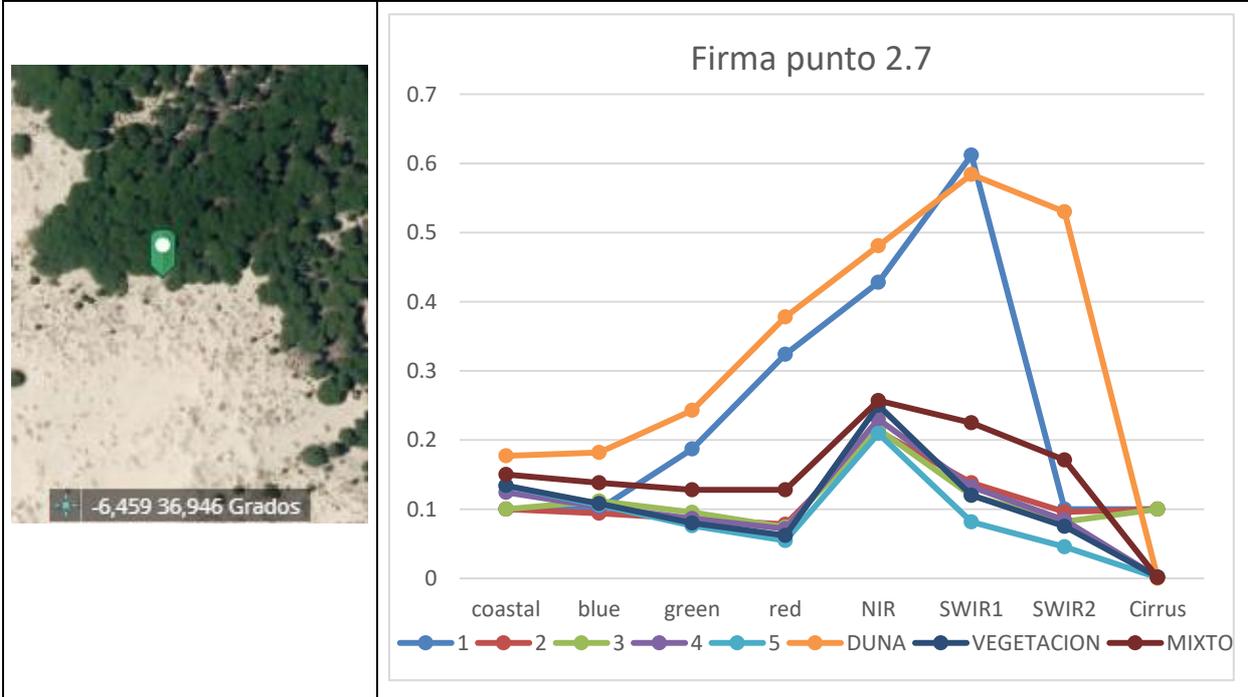
Resultados La firma espectral 1 (década 70) se asemeja al tipo de suelo Duna mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a suelo tipo Mixto.

Perfil 2 Imagen 27/01/18 **Punto** 2.6: Coord: 6.461/36.944



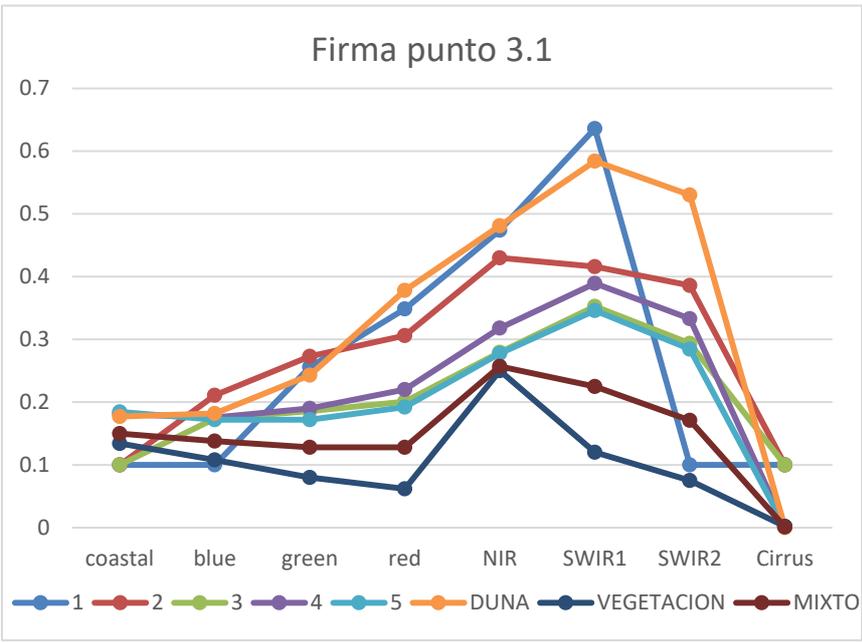
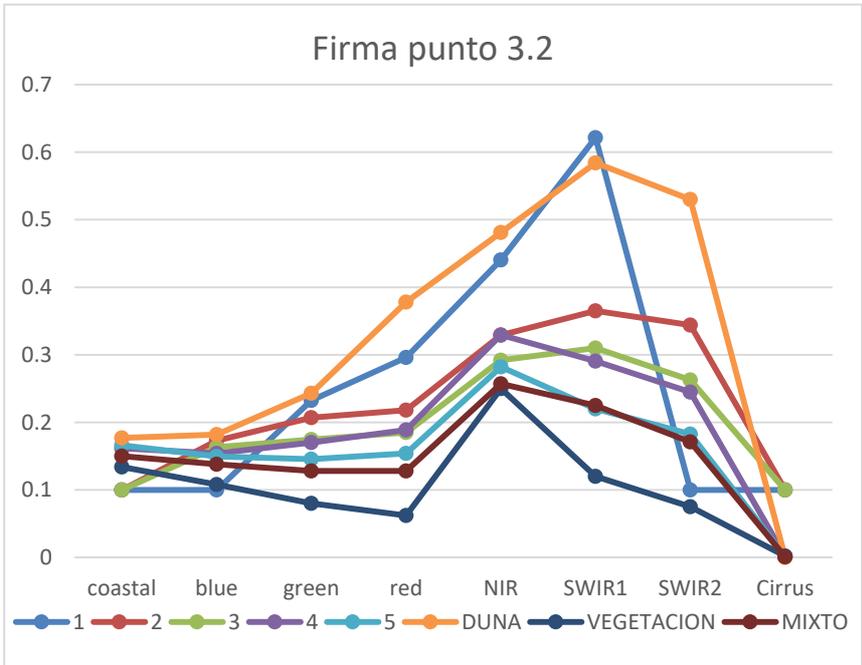
Resultados La firma espectral 1(década 70) se asemeja al tipo de suelo Duna de la misma manera que la banda 5 (década actual), que sigue presentando valores muy elevados en NIR, red y SWIR, de igual forma que las otras décadas.

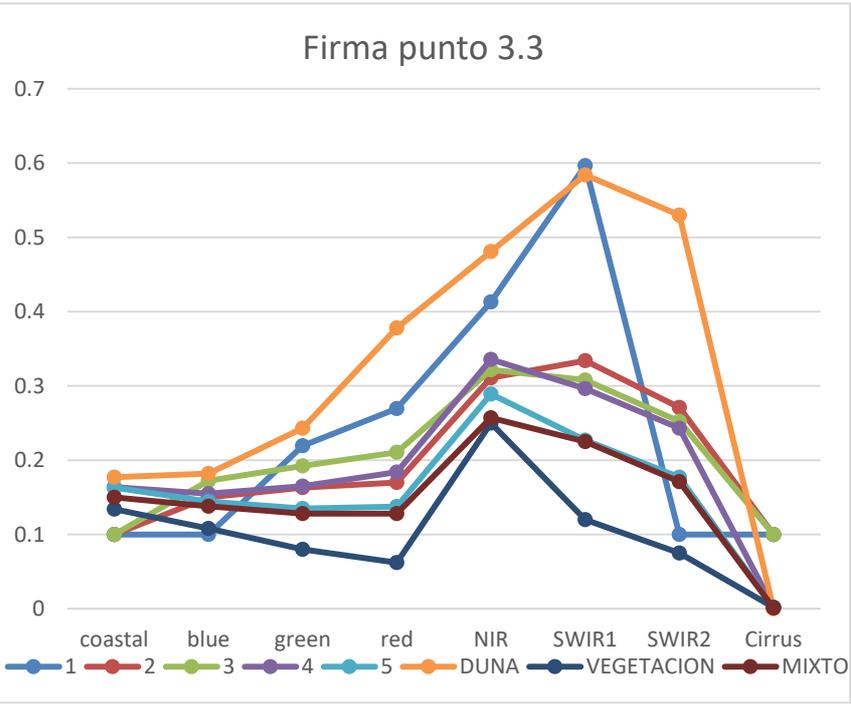
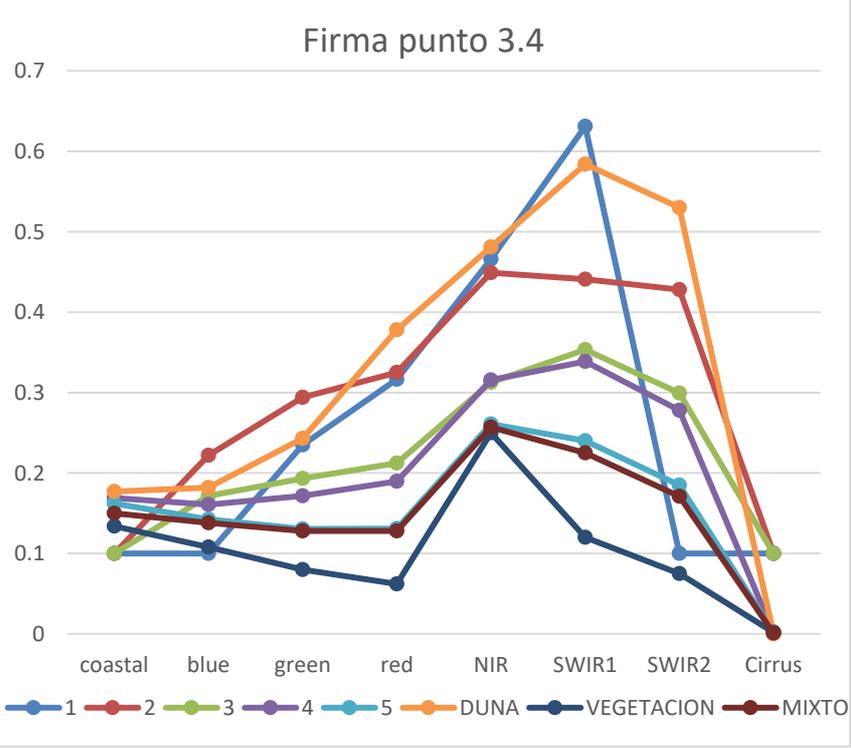
Perfil 2 Imagen 27/01/18 **Punto** 2.7: 6.459/36.946

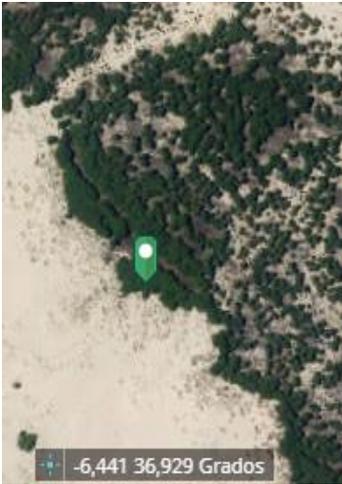
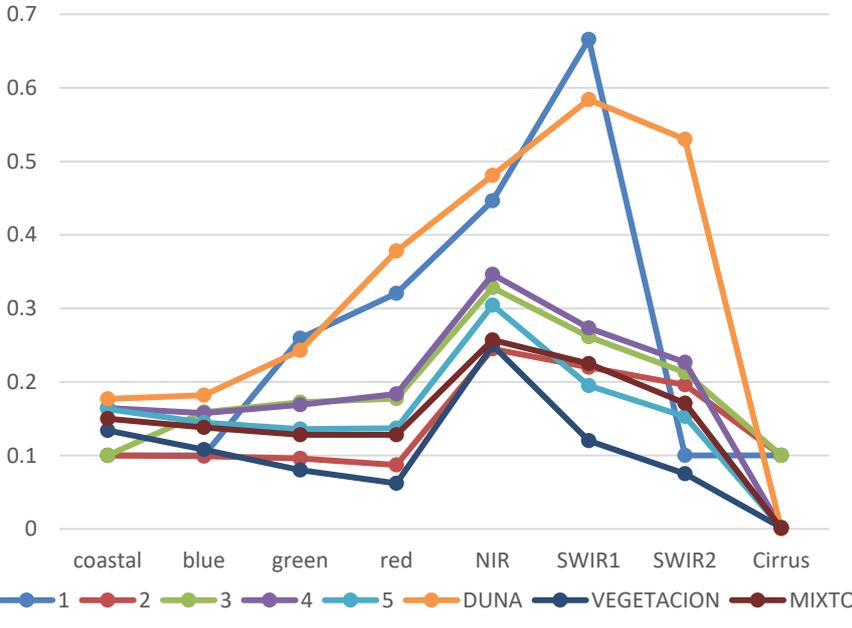
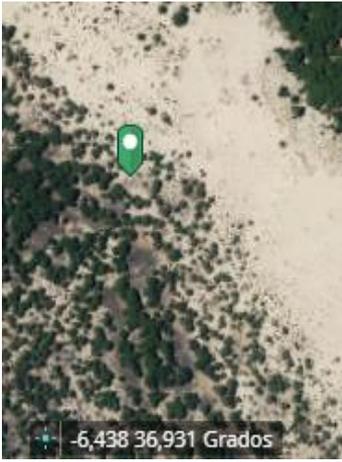
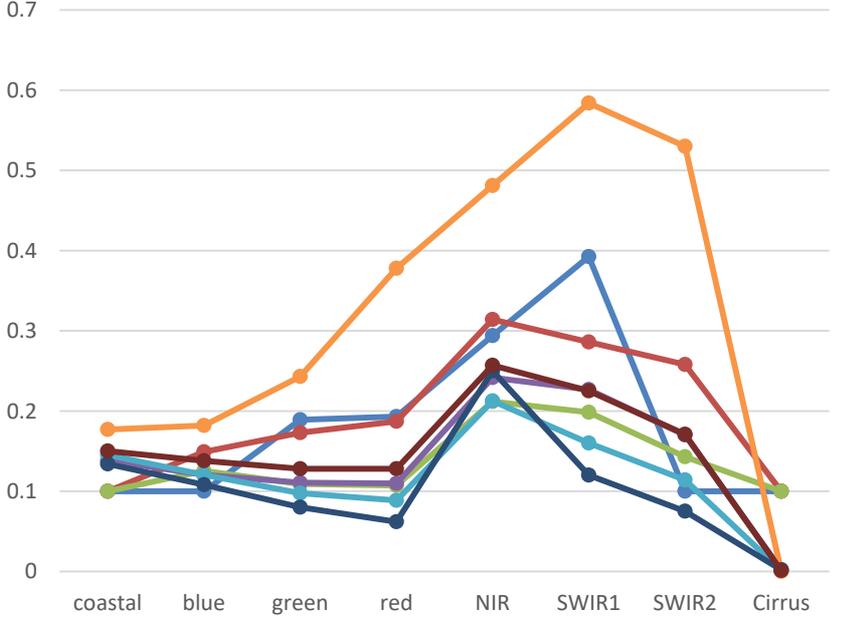


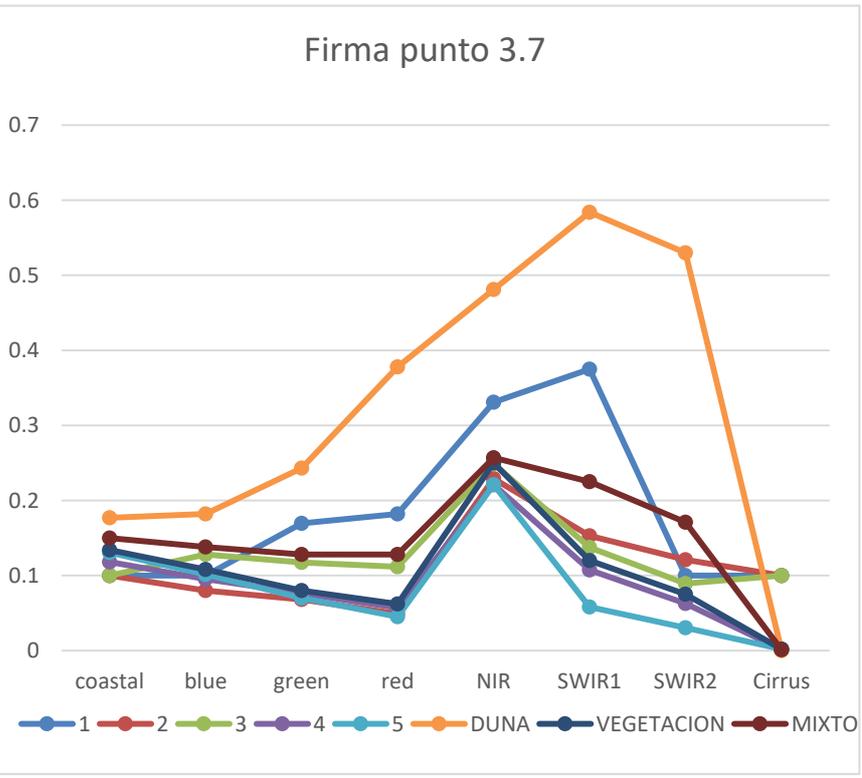
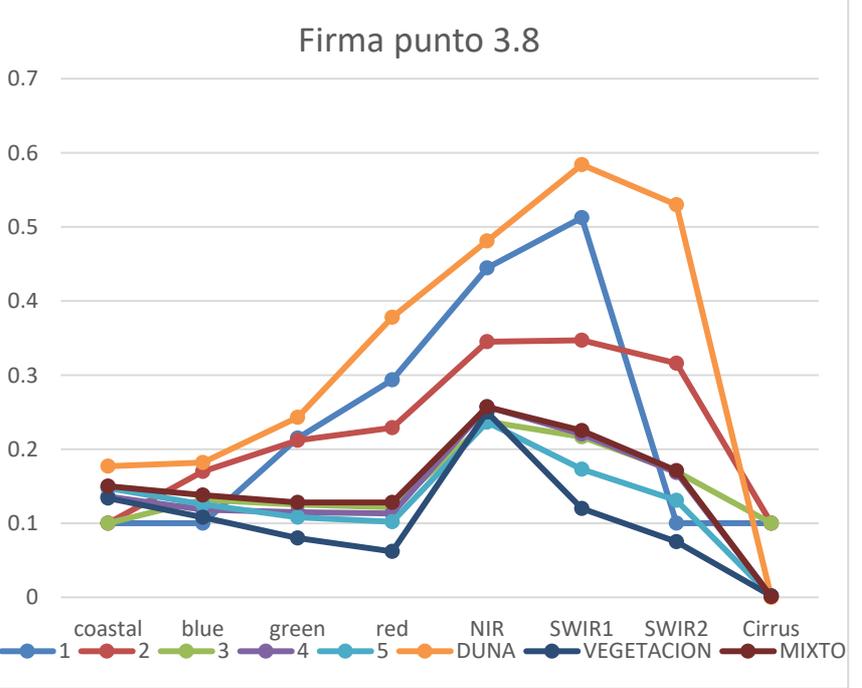
Resultados La firma espectral 1(década 70) se asemeja al tipo de suelo Duna, mientras que la firma espectral 5 (década actual) está muy cercana al tipo de suelo vegetación.

4.2.3.3 Perfil 3.

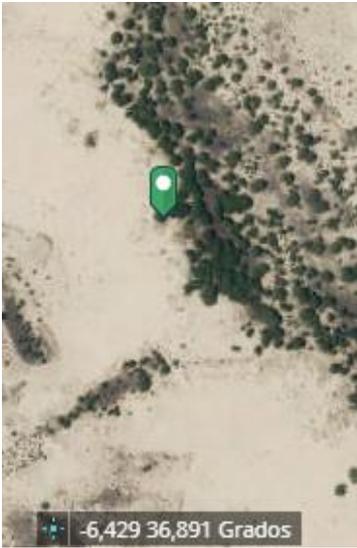
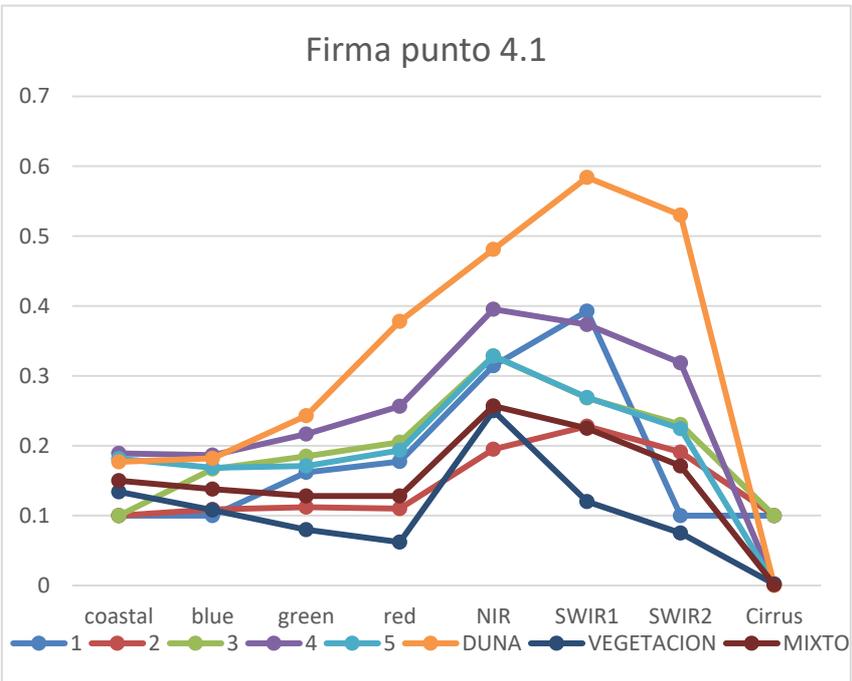
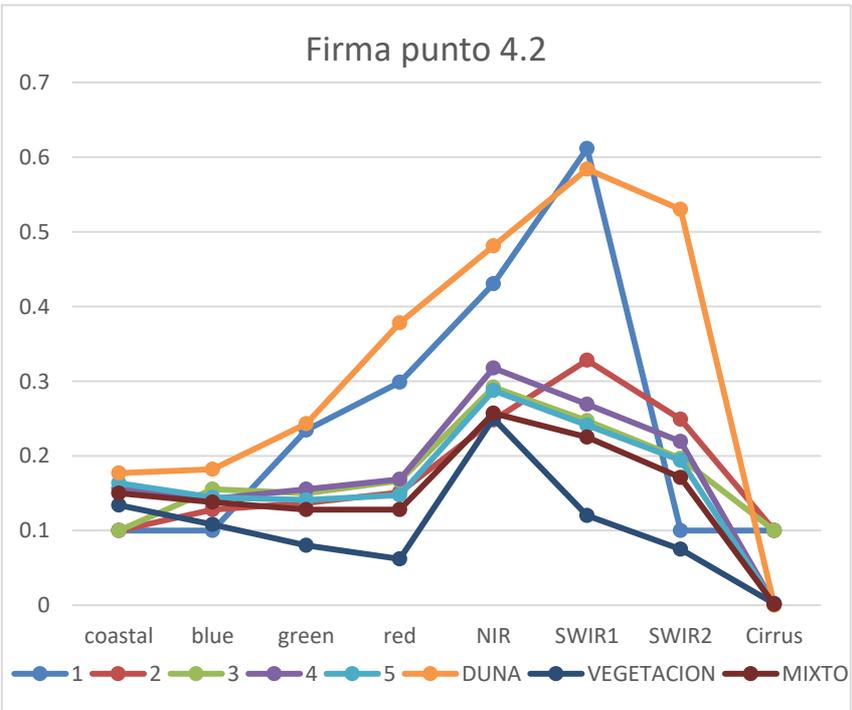
Perfil 3	Imagen 27/01/18	Punto	3.1. Coord: 6.453/36.92
			
Resultados	<p>La firma espectral 1(década 70) se asemeja al tipo de suelo Duna mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja también a tipo de suelo Duna o incluso Mixto.</p>		
Perfil 3	Imagen 27/01/18	Punto	3.2. Coord: 6.448/36.923
			
Resultados	<p>La firma espectral 1(década 70) se asemeja al tipo de suelo Duna mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a tipo de suelo Mixto. En la banda del SWIR se puede observar la evolución de las décadas cómo este punto de control ha perdido reflectividad en esa banda, es decir, hay una pérdida de arena.</p>		

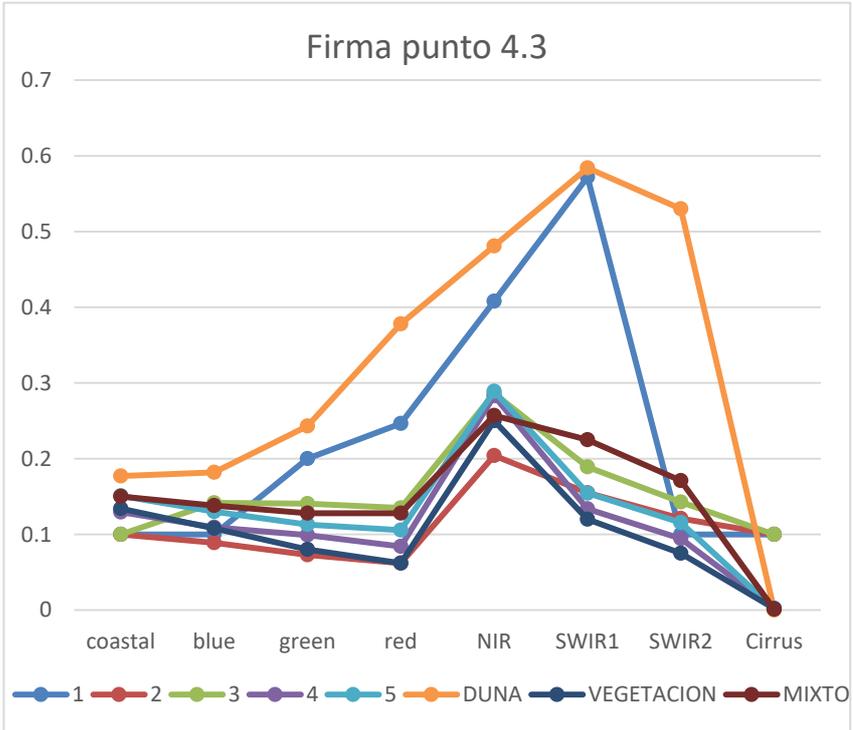
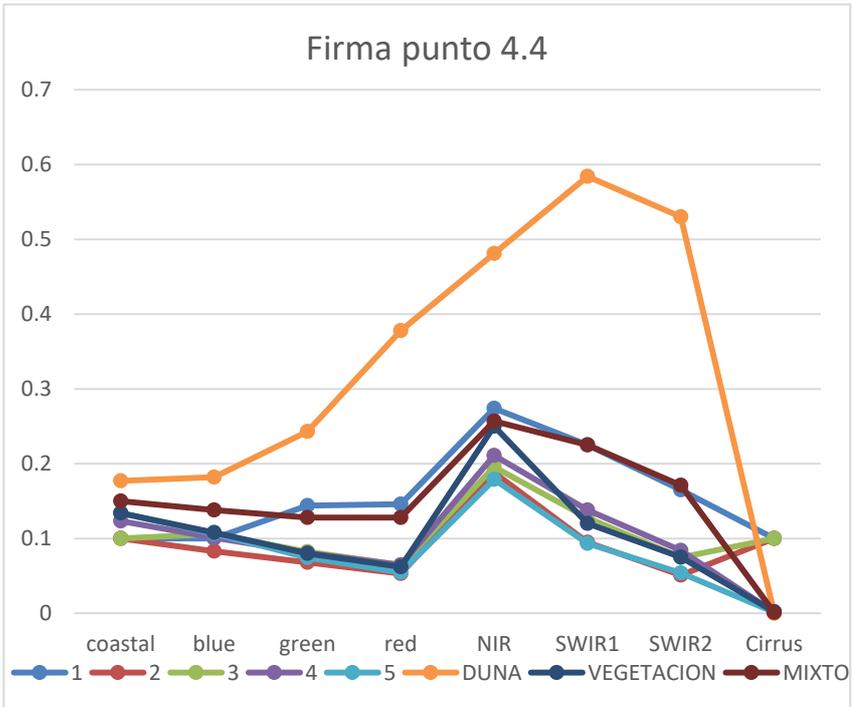
Perfil 3	Imagen 27/01/18	Punto	3.3. Coord: 6.445/36.926
		<h3>Firma punto 3.3</h3> 	
Resultados	La firma espectral 1(década 70) se asemeja al tipo de suelo Duna mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a tipo Mixto.		
Perfil 3	Imagen 27/01/18	Punto	3.4. Coord: 6.443/36.927
		<h3>Firma punto 3.4</h3> 	
Resultados	La firma espectral 1(década 70) así como la 2 (década 80) se asemeja al tipo de suelo Duna mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a tipo Mixto.		

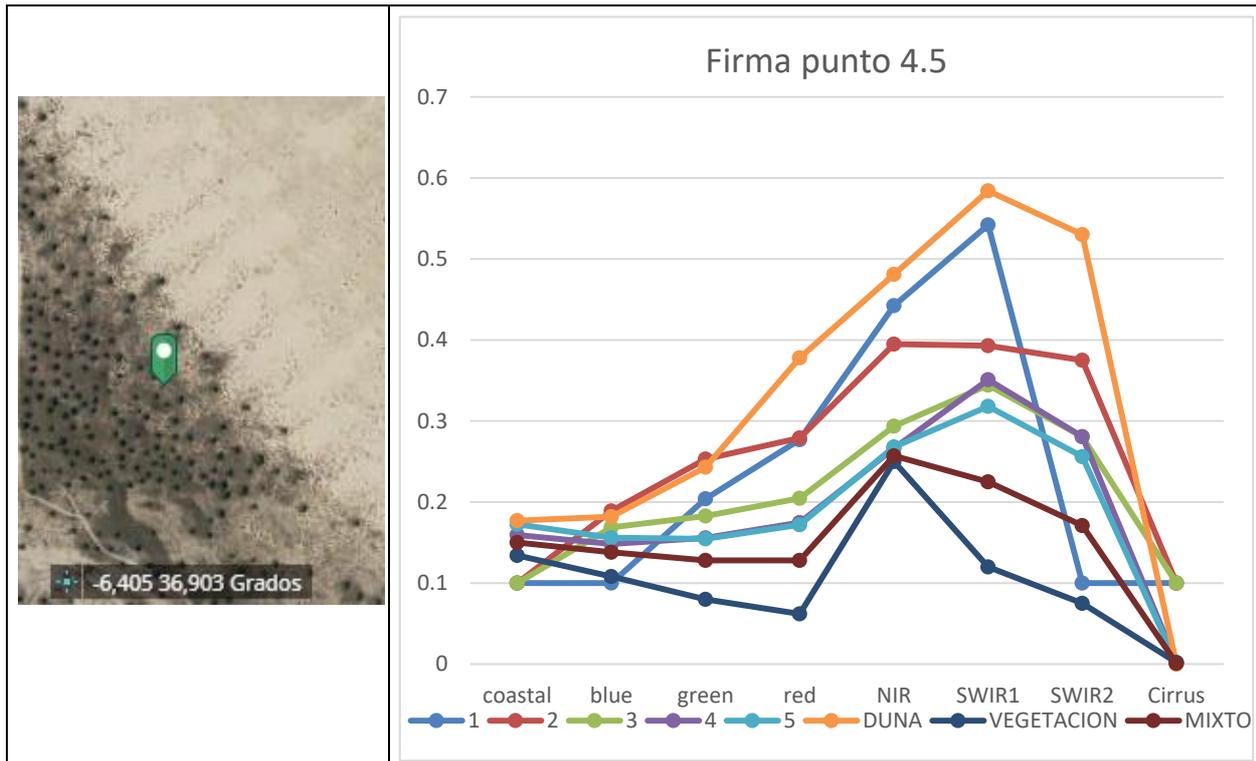
Perfil 3	Imagen 27/01/18	Punto	3.5. Coord: 6.441/36.929
		<p style="text-align: center;">Firma punto 3.5</p> 	
Resultados	La firma espectral 1(década 70) así como la 2 (década 80) se asemeja al tipo de suelo Duna mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a tipo Vegetación		
Perfil 3	Imagen 27/01/18	Punto	3.6. Coord: 6.438/36.931
		<p style="text-align: center;">Firma punto 3.6</p> 	
Resultados	La firma espectral 1(década 70) así como la 2 (década 80) se asemeja al tipo de suelo Mixto mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a tipo Vegetación		

Perfil 3	Imagen 27/01/18	Punto	3.7. Coord: 6.437/36.932
		<h3>Firma punto 3.7</h3> 	
Resultados	La firma espectral 1(década 70) así como la 2 (década 80) se asemeja al tipo de suelo Mixto o Dunar suave mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a tipo Vegetación		
Perfil 3	Imagen 27/01/18	Punto	3.8. Coord: 6.432/36.935
		<h3>Firma punto 3.8</h3> 	
Resultados	La firma espectral 1(década 70) así como la 2 (década 80) se asemeja al tipo de suelo Duna mientras que la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a tipo Mixto.		

4.2.3.4 Perfil 4.

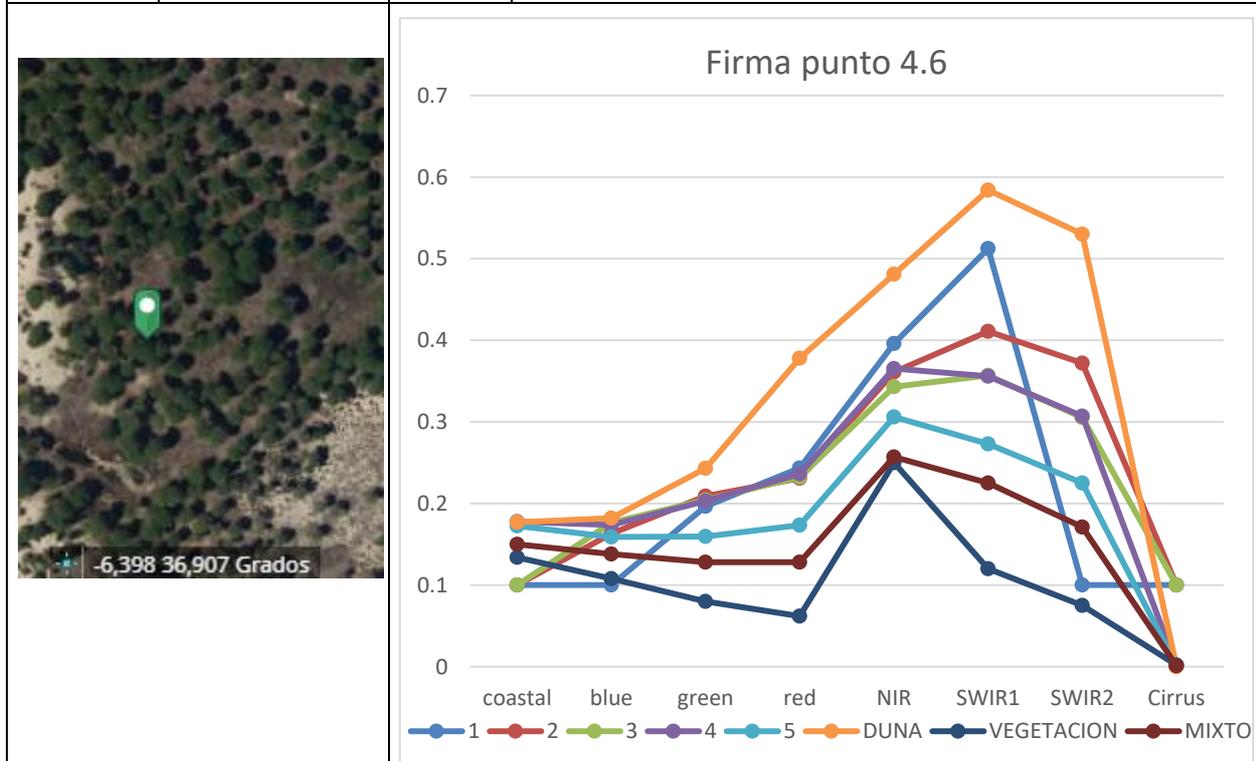
Perfil 4	Imagen 27/01/18	Punto	4.1. Coord: 6.429/36.891
		<p style="text-align: center;">Firma punto 4.1</p> 	
Resultados	La firma espectral 1(década 70) así como la firma espectral 5 (década actual), se asemeja a tipo Mixto.		
Perfil 4	Imagen 27/01/18	Punto	4.2. Coord: 6.425/36.893
		<p style="text-align: center;">Firma punto 4.2</p> 	
Resultados	La firma espectral 1(década 70) se asemeja a tipo Duna, mientras que la 5 (década actual) se asemeja a tipo Mixto.		

Perfil 4	Imagen 27/01/18	Punto	4.3. Coord: 6.417/36.897
		<p style="text-align: center;">Firma punto 4.3</p> 	
Resultados	La firma espectral 1(década 70) se asemeja a tipo Duna, mientras que la 5 (década actual) se asemeja a tipo Vegetación		
Perfil 4	Imagen 27/01/18	Punto	4.4: Coord: 6.413/36.900
		<p style="text-align: center;">Firma punto 4.4</p> 	
Resultados	La firma espectral 1(década 70) se asemeja a tipo Mixto mientras que la 5 (década actual) se asemeja a tipo Vegetación		
Perfil 4	Imagen 27/01/18	Punto	4.5: Coord: 6.405/36.903



Resultados	La firma espectral 1(década 70) se asemeja a tipo Duna mientras que la 5 (década actual) se asemeja a tipo Mixto
------------	---

Perfil 4	Imagen 27/01/18	Punto	4.6: Coord: 6.398/36.907
----------	-----------------	-------	--------------------------



Resultados	La firma espectral 1(década 70) se asemeja a tipo Duna mientras que la 5 (década actual) se asemeja a tipo Mixto
------------	---

4.2.4 Fiabilidad de datos: Test ANOVA

Para analizar la fiabilidad de los datos y en consecuencia de los resultados y conclusiones que se deriven de ellos, se procede a realizar un test ANOVA de un factor o de análisis de la varianza de los datos de firma espectral.

ANOVA de un factor es una técnica estadística que señala si dos variables, una independiente (en este caso las distintas imágenes de distintas fechas), y otra dependiente (los valores de reflectividad de la banda analizada) están relacionadas, en base a si las medias de la variable dependiente (media de reflectividades de bandas) son diferentes en las categorías o grupos de la variable independiente (distintas imágenes), para distintas muestras (puntos de control). Es decir, señala si las medias entre dos o más grupos son similares o diferentes.

Esto último comentado, es precisamente lo que se pretende analizar, si las medias entre grupos no difieren entre sí, lo que supondrá que los datos se mueven en un rango y podemos dar por fiables los resultados, al no haber desviaciones importantes. Se pretende analizar pues, si las medias de una variable (muestra o punto de control de control en este caso) son diferentes entre los niveles o grupos de otra variable.

Así pues, para el test ANOVA conviene tener claros los conceptos y procedimientos que se van a seguir:

- Se va a realizar 4 análisis ANOVA, uno por cada perfil de estudio.
- Cada perfil de estudio tendrá 5 muestras, que son los datos del índice PPR en 5 puntos de control del perfil. Estas muestras son las llamadas variables independientes o factores de las que se realizan medias dentro de cada muestra. Se escoge este índice para relacionar dos bandas en una sola variable, la banda del azul y la del verde se relacionan entre sí, por lo que de esta forma analizamos dos bandas de la firma espectral. Las unidades del índice PPR indican clorofila presente en el suelo, lo cual es un medidor de cuánta vegetación hay en ese punto de control. Si el índice es cero o negativo significa que no hay pigmento vegetal en ese punto de control. El índice PPR se calcula como:

$$PPR[mol * mol^{-1}] = \frac{(Blue - Green)}{(Blue + Green)} \quad (4-1)$$

- Cada muestra tendrá 5 valores, que corresponden como ya se ha adelantado con el índice PPR para cada tipo de imagen analizada. Las imágenes son las variables dependientes de este test ANOVA.

Ahora bien, para conocer que los datos no están relacionados entre sí, son independientes y no existen grandes desviaciones entre sus medias, se utiliza el estadístico F y su significación. Si las medias entre los grupos varían mucho y la media dentro de un grupo varía poco (los grupos son heterogéneos entre ellos pero similares internamente), el valor de F será alto y las variables estarán relacionadas. Cuanto más difieren las medias de la variable dependiente entre los grupos de la variable independiente, más alto será el valor de F . En este caso, lo que se busca es que **F tenga un valor próximo a la unidad**, de esa forma estaremos denotando que las medias entre grupos son similares y no hay grandes desviaciones. Si las medias poblacionales son iguales, las medias muestrales serán parecidas existiendo entre ellas tan sólo diferencias atribuidas al azar, es entonces cuando el valor de F será cercano a 1.

Se define también la significación de F , o lo que es lo mismo: la probabilidad de que este valor de F se deba al azar siguiendo un nivel de confianza del 95%. Cuando la significación de F es menor a 0.05 es que la diferencia es significativa y las dos variables están relacionadas. En este caso, lo que se busca es que esta **significación sea superior al 0.05**, para que las variables no estén relacionadas y no haya diferencias significativas entre los grupos.

Este análisis se puede llevar a cabo dado que los puntos de control que se han tomado son similares, siempre han sido en zonas de interfase duna-vegetación con el fin de analizar su evolución fecha a fecha.

A continuación se detallan los resultados del análisis, incluyendo un análisis estadístico post-hoc de Tukey (posterior a ANOVA) que indica la honestidad entre los datos de un perfil (5 muestras), es decir, si existen diferencias significativas o no entre algunas muestras de un mismo perfil (no sólo a nivel global si es significativo o no). HSD de Tukey sólo se calcula si el resultado del estadístico F es significativo.

4.2.4.1 ANOVA en Perfil 1.

A continuación se detallan los datos utilizados de banda PPR en 5 puntos de control del primer perfil de estudio, y seguidamente se exponen los resultados del test ANOVA para estos datos. Por otro lado, los datos negativos de PPR confirman lo expuesto en el apartado 4.3.3.1 en cuanto a la ausencia de vegetación en las primeras imágenes y la ganancia (datos positivos) en las fechas más recientes.

Tabla 7: Datos de PPR para análisis ANOVA en Perfil 1

PERFIL 1					
IMAGENES	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4	MUESTRA 5
	BANDA PPR P.1.1	BANDA PPR P.1.2	BANDA PPR P.1.3	BANDA PPR P.1.4	BANDA PPR P.1.6
1: década 70	-0.376900	-0.235219	-0.124460	-0.415857	-0.311015
2: década 80	0.039106	-0.068852	0.076923	-0.037879	-0.086207
3: década 2000	0.007017	0.060239	0.071989	-0.090428	0.030687
4: década 2010	0.035099	0.062967	0.034310	-0.060293	0.045499
5: actual	0.041450	0.115704	0.131759	-0.035685	0.121454

Tabla 8: Resultados ANOVA en Perfil 1.

ANÁLISIS DE VARIANZA EN PERFIL 1						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.07343123	4	0.01835781	0.77922154	0.55177638	2.8660814
Dentro de los grupos	0.47118328	20	0.02355916			
Total	0.54461451	24				

Los resultados de ANOVA indican lo siguiente:

- Variaciones entre las medias de los grupos (muestras) con valor de 0.07341123. Un valor bajo comparado con los datos. Esto es indicativo de que no existen grandes diferencias entre grupos.
- Variaciones dentro de los grupos: Existe mayor desviación entre los datos de dentro del grupo, lo cual tiene su lógica dado que existe una evolución en los valores de PPR de las fechas de las imágenes. Es lo esperado
- Un valor del estadístico F cercano a la unidad: $F=0.779$, lo cual también indica que no existen grandes diferencias entre las medias de los grupos.
- Significancia mayor a 0.05: En este caso $P=0.5517638 > 0.05$, lo cual indica que esas pequeñas diferencias entre grupos no son significativas.
- Resultado final de este test ANOVA en Perfil 1: Las medias entre los grupos son similares y los resultados que ha arrojado son los esperados. **Se dan los datos para este perfil como válidos** al no estar relacionados y al no tener diferencias significativas entre sus varianzas. No ha hecho falta realizar la prueba HSD TUKEY para la varianza entre las distintas muestras.

4.2.4.2 ANOVA en Perfil 2.

A continuación se detallan los datos utilizados de banda PPR en 5 puntos de control del segundo perfil de estudio, y seguidamente se exponen los resultados del test ANOVA para estos datos.

Tabla 9: Datos de PPR para análisis ANOVA en Perfil 2.

PERFIL2					
IMÁGENES	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4	MUESTRA 5
	BANDA PPR P.2.1	BANDA PPR P.2.2	BANDA PPR P.2.3	BANDA PPR P.2.4	BANDA PPR P.2.6
1: década 70	-0.3263245	-0.3408552	-0.2055485	-0.3906232	-0.4067811
2: década 80	0	-0.1056511	0.00909091	-0.1484375	-0.1434185
3: década 2000	0.07533954	-0.0268286	0.02955141	-0.0572984	-0.0854572
4: década 2010	0.06426177	-0.023627	-0.0019066	-0.0458585	-0.0951325
5: actual	0.14281993	0.05800821	0.09047166	-0.0016243	-0.0684031

Tabla 10: Resultados ANOVA en Perfil 2.

ANÁLISIS DE VARIANZA EN PERFIL 2						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.09011928	4	0.02252982	0.98737774	0.43694987	2.8660814
Dentro de los grupos	0.45635664	20	0.02281783			
Total	0.54647592	24				

Los resultados de ANOVA indican lo siguiente:

- Variaciones entre las medias de los grupos (muestras) con valor de 0.09011928. Un valor bajo comparado con los datos. Esto es indicativo de que no existen grandes diferencias entre grupos.
- Variaciones dentro de los grupos: Existe mayor desviación entre los datos de dentro del grupo, lo cual tiene su lógica dado que existe una evolución en los valores de PPR de las fechas de las imágenes. Es lo esperado.
- Un valor del estadístico F cercano a la unidad: $F=0.98737774$, lo cual también indica que no existen grandes diferencias entre las medias de los grupos.
- Significancia mayor a 0.05: En este caso $P=0.43694987 > 0.05$, lo cual indica que esas pequeñas diferencias entre grupos no son significativas.
- Resultado final de este test ANOVA en Perfil 2: Las medias entre los grupos son similares y los resultados que ha arrojado son los esperados. **Se dan los datos para este perfil como válidos** al no estar relacionados y al no tener diferencias significativas entre sus varianzas. No ha hecho falta realizar la prueba HSD TUKEY para la varianza entre las distintas muestras.

4.2.4.3 ANOVA en Perfil 3.

A continuación se detallan los datos utilizados de banda PPR en 5 puntos de control del tercer perfil de estudio, y seguidamente se exponen los resultados del test ANOVA para estos datos.

Tabla 11: Datos de PPR para análisis ANOVA en Perfil 3.

PERFIL3					
IMÁGENES	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4	MUESTRA 5
	BANDA PPR P.3.1	BANDA PPR P.3.2	BANDA PPR P.3.3	BANDA PPR P.3.5	BANDA PPR P.3.8
1: década 70	-0.4135429	-0.3806118	-0.3552618	-0.4285396	-0.2572944
2: década 80	-0.1280992	-0.0894737	-0.0415335	0.01538462	-0.1099476
3: década 2000	-0.0331226	-0.0326869	-0.0528436	-0.0399489	0.02414369
4: década 2010	-0.0392046	-0.0484626	-0.0299839	-0.0345803	0.01471781
5: actual	-5.918E-05	0.01344503	0.03440191	0.0312692	0.07542217

Tabla 12: Resultados ANOVA en Perfil 3.

ANÁLISIS DE VARIANZA EN PERFIL 3						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.01457306	4	0.00364326	0.1389457	0.96581214	2.8660814
Dentro de los grupos	0.52441555	20	0.02622078			
Total	0.53898861	24				

Los resultados de ANOVA indican lo siguiente:

- Variaciones entre las medias de los grupos (muestras) con valor de 0.01457306. Un valor bajo comparado con los datos. Esto es indicativo de que no existen grandes diferencias entre grupos.
- Variaciones dentro de los grupos: Existe mayor desviación entre los datos de dentro del grupo, lo cual tiene su lógica dado que existe una evolución en los valores de PPR de las fechas de las imágenes. Es lo esperado.
- Un valor del estadístico F cercano a la unidad: $F=0.1389457$, lo cual también indica que no existen grandes diferencias entre las medias de los grupos.
- Significancia mayor a 0.05: En este caso $P=0.96581214 > 0.05$, lo cual indica que esas pequeñas diferencias entre grupos no son significativas.
- Resultado final de este test ANOVA en Perfil 3: Las medias entre los grupos son similares y los resultados que ha arrojado son los esperados. **Se dan los datos para este perfil como válidos** al no estar relacionados y al no tener diferencias significativas entre sus varianzas. No ha hecho falta realizar la prueba HSD TUKEY para la varianza entre las distintas muestras.

4.2.4.4 ANOVA en Perfil 4.

A continuación se detallan los datos utilizados de banda PPR en 5 puntos de control del cuarto perfil de estudio, y seguidamente se exponen los resultados del test ANOVA para estos datos.

Tabla 13: Datos de PPR para análisis ANOVA en Perfil 4.

PERFIL4					
IMÁGENES	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4	MUESTRA 5
	BANDA PPR P.4.1	BANDA PPR P.4.2	BANDA PPR P.4.3	BANDA PPR P.4.4	BANDA PPR P.4.6
1: década 70	-0.2243357	-0.3832282	-0.3118556	-0.1487432	-0.2527345
2: década 80	-0.0135747	-0.0339623	0.09876543	0.09933775	-0.1236559
3: década 2000	-0.049305	0.01961806	0.00397224	0.12468035	-0.0685429
4: década 2010	-0.0747215	-0.038763	0.05824125	0.11217339	-0.0778997
5: actual	-0.0080206	0.0122975	0.06993886	0.17662512	-0.000969

Tabla 14: Resultados ANOVA en Perfil 4.

ANÁLISIS DE VARIANZA PERFIL 4						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.10320814	4	0.02580203	1.43674295	0.25853698	2.8660814
Dentro de los grupos	0.35917399	20	0.0179587			
Total	0.46238213	24				

Los resultados de ANOVA indican lo siguiente:

- Variaciones entre las medias de los grupos (muestras) con valor de 0.10320814. Un valor bajo comparado con los datos. Esto es indicativo de que no existen grandes diferencias entre grupos.
- Variaciones dentro de los grupos: Existe mayor desviación entre los datos de dentro del grupo, lo cual tiene su lógica dado que existe una evolución en los valores de PPR de las fechas de las imágenes. Es lo esperado.
- Un valor del estadístico F cercano a la unidad: $F=1.43674295$, lo cual también indica que no existen grandes diferencias entre las medias de los grupos.
- Significancia mayor a 0.05: En este caso $P=0.25853698 > 0.05$, lo cual indica que esas pequeñas diferencias entre grupos no son significativas.
- Resultado final de este test ANOVA en Perfil 2: Las medias entre los grupos son similares y los resultados que ha arrojado son los esperados. **Se dan los datos para este perfil como válidos** al no estar relacionados y al no tener diferencias significativas entre sus varianzas. No ha hecho falta realizar la prueba HSD TUKEY para la varianza entre las distintas muestras.

4.3 Método de la clasificación supervisada

En este apartado se va a desarrollar una clasificación supervisada de la misma geoposición de la imagen en distintos periodos de tiempo. La zona de estudio a clasificar es la representada en la figura 58. Antes de empezar, conviene introducir el concepto de clasificación de una imagen así como algunos conceptos relacionados.



Figura 58: Imagen satelital de Landsat 8 de la zona de estudio. Fecha 17/04/2018. Combinación de bandas 4-3-2.

4.3.1 Introducción al método

La clasificación es un procedimiento clave para la creación de información. Las clases o grupos de características se crean a través del análisis estadístico de los atributos identificando los píxeles con firmas espectrales similares en las imágenes multibanda.

Lo primero que hay que tener en cuenta es que cada píxel de la imagen tiene asociado un nivel digital (ND). Éste consiste en un valor numérico que codifica a cada píxel y que puede traducirse en un nivel de intensidad visual en una escala de grises. Cuando se visualiza un píxel, la intensidad de gris o de color con la que aparece en el monitor depende de su ND. Los niveles digitales forman la base para las operaciones de interpretación digital de la imagen. Así, la unidad mínima de información en una imagen digital se denomina píxel, y éste está definido por su valor de ND. La escala de ND suele ir de valores 0 a 255.

Lo segundo que hay que tener en cuenta es que para que una imagen pueda ser interpretada en detalle tiene que existir una experiencia previa por parte de quien la está analizando, con el fin de poder identificar cada una de las categorías de interés. La clasificación no es más que identificar un rango de ND en los píxeles para cada categoría. Para poder cumplir con una adecuada clasificación es necesario seleccionar una muestra de píxeles de la imagen que representen adecuadamente las categorías de interés, es lo que se llama la creación de las áreas de entrenamiento. Ésta es precisamente la diferencia entre la clasificación supervisada y no supervisada, el hecho de crear tipologías o rangos de ND para a posteriori clasificar la imagen según esa asignación. El método de clasificación supervisada parte de un conocimiento previo de la imagen mientras que el método no supervisado

procede a una búsqueda automática de grupos de valores homogéneos dentro de la misma imagen.

En este trabajo se va a realizar, para una mayor precisión, el método supervisado delimitando sobre la imagen unas áreas representativas de cada una de las categorías que componen la leyenda. Se van a clasificar en 5 tipos: Sistema Dunar; Suelo Mixto; Vegetación; Humedales y Agua.

Como se ha explicado, antes de realizar la operación de clasificación supervisada, es necesario poder delimitar las zonas de estudio con el fin de asignarle previamente una tipología de suelo. Para ello, se procede a mejorar visualmente la imagen mediante distintas opciones que el software ArcMap contiene.

La operación final tras una clasificación es la limpieza o refinamiento de los resultados. Esto se realiza fundamentalmente porque hay muchos casos de grupos aislados o de píxeles muy pequeños que se pueden convertir en “ruido”, lo cual influirá en el análisis que se realice. Por último se realiza un breve análisis estadístico entre las covarianzas de los grupos realizados, cuanto más baja sea, menos solapamiento (más diferenciación) existe entre los grupos así como un control sobre los histogramas y los gráficos de dispersión entre bandas.

4.3.2 Imágenes utilizadas

Se han utilizado un total de 9 imágenes para este análisis. Debido a la disponibilidad de las imágenes y a la secuencia histórica de la serie Landsat se tienen las imágenes con unos sensores u otros. Sin embargo, se han establecido las siguientes características comunes en las imágenes de cara a realizar el estudio de la forma más uniforme posible:

- Cobertura nubosa máxima de 0.2% en todas las imágenes.
- Tamaño de píxel de 30x30 metros, salvo en la imagen de fecha 21-05-1976 (57 x 57 metros) debido a configuración del sensor.
- Fecha de obtención de la imagen en periodo no invernal, con el fin de descartar desajustes por temporal.
- Al recortar la imagen para obtener zona de estudio, misma geoposición de las esquinas.
- Imágenes con fechas consecutivas cada 4-5 años aproximadamente para un estudio constante.

Las bandas de las imágenes utilizadas han sido obtenidas a través de dos servidores gratuitos: el primero ha sido el Servidor de Imágenes Landsat de Doñana del CSIC (CSIC, 2018); y el segundo de la plataforma de USGS Earth Explorer (USGS, Enero).

A continuación se detalla las características principales de las imágenes utilizadas en el estudio. Para la clasificación supervisada se ha necesitado de la combinación de bandas. Para crear las áreas de entrenamiento se han combinado bandas para obtener la imagen en color natural (bandas 4-3-2 en Landsat 8 y 3-2-1 en el resto)

Tabla 15: Imágenes para estudio mediante clasificación supervisada.

Fecha	Satélite	Sensor	Resolución	Path/row WGS84
21-05-1976	L-1	MSS	57x57 m	217/35
08-07-1984	L-1	MSS	30x30 m	217/34
13-08-1991	L-4	TM	30x30 m	202/34
09-09-1995	L-5	TM	30x30 m	202/34
29-06-2001	L-5	TM	30x30 m	202/34
22-08-2006	L-5	TM	30x30 m	202/34
04-08-2011	L-8	OLI y TIRS	30x30 m	202/34
17-04-2018	L-8	OLI y TIRS	30x30 m	202/34

Un ejemplo de bandas utilizadas son las de fecha 17-04-2018, que se expone a continuación. Es una imagen de Landsat 8 mediante los sensores OLI y TIRS expuesta en su totalidad (se ha rotado para su exposición) a escala 1:350000.



Figura 59: 17/04/2018. Imagen satelital completa rotada Landsat 8. Fuente: (USGS, Enero). Escala 1:350000

4.3.3 Tratamiento de las imágenes y refinamiento de la clasificación.

Los trabajos previos a la clasificación de las imágenes comportan primero, la obtención de la imagen, seguido de un tratamiento primario de la imagen que conlleva: una combinación de bandas, ya que la clasificación se realiza en una imagen multibanda; un recorte de la imagen; y una mejora visual de la imagen. A continuación se realiza la clasificación y para finalizar el refinamiento de la clasificación.

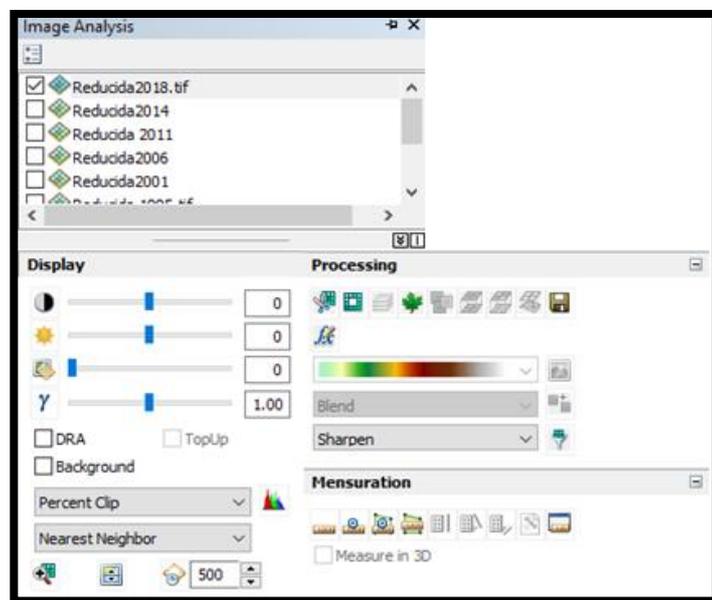


Figura 60: Menú Image Analysis de ArcMap 10.1

El software ArcMap 10.1, de la serie ArcGis, es capaz de realizar todas estas tareas. No se va a profundizar en la base de este software, simplemente en las siguientes líneas se va a explicar algunas de las funcionalidades utilizadas en los procesos anteriormente comentados.

ArcMap dispone de “Image Analysis” (ver figura 60), una ventana que admite el análisis y explotación de imágenes y datos ráster con una colección de funciones de visualización, procesos y herramientas de medición. Contiene un panel de visualización, de procesamiento y de medición. Este panel es imprescindible para tener una mejora visual de las imágenes y poder establecer correctamente las áreas de entrenamiento para la clasificación (ver apartado 4.3.4).

La sección de visualización contiene las herramientas que se usan para mejorar la apariencia de los datos ráster e imagen. Se puede ajustar las características del contraste, del brillo, la transparencia, etc. También permite filtros de visualización, realizando una modificación del histograma de Niveles Digitales de los píxeles así como distintos métodos para asignar un valor a un píxel en función de la matriz de píxeles colindantes. Para discriminar visualmente los distintos tipos de suelo se han utilizado y combinado diferentes canales espectrales (bandas). Las combinaciones de bandas más útiles para observar los diferentes tipos de suelo son la 4-3-2 para Landsat 8, y la 3-2-1 para el resto de satélites Landsat.

La sección de procesado de la imagen, a diferencia de las funciones de visualización, modifican los valores de los píxeles de la imágenes en caso de usar filtros creando una nueva capa temporal. Existen distintas tipologías de filtros que se pueden usar para realzar o corregir unas cosas u otras. En este estudio se ha buscado realzar la nitidez o agudizar la imagen y por eso se ha usado el filtro “sharpen”. Se puede también cambiar la escala de color, crear una imagen multibanda, crear una imagen NDVI, recortarla, etc. El panel Medición contiene las herramientas para medir el punto, distancia, ángulo, altura, perímetro y área de una imagen.

El refinamiento de la clasificación, se realiza después de la clasificación de la imagen (ver apartado 4.3.4). ArcMap tiene funcionalidades para realizar el refinamiento de la clasificación, en este caso la funcionalidad utilizada ha sido la de “Majority Filter”. Ésta reemplaza píxeles en la imagen ráster en función del contenido de Nivel Digital de la mayoría de los píxeles vecinos. Se ha usado en todas las imágenes una sola vez para conseguir una clasificación más compacta, consiguiendo la eliminación de píxeles aislados y la concentración de clases. Este filtro se ha utilizado con 4 píxeles vecinos y reemplazando el píxel con la clase de la mayoría de ellos.

4.3.4 Clasificación supervisada tras el refinamiento.

Una vez establecidas las bases para la mejora visual y el pretratamiento utilizado en las imágenes, se puede empezar con la clasificación supervisada de las imágenes. El procedimiento para llevar a cabo la clasificación una vez ya obtenida las bandas de la imagen a tratar ha consistido en:

1º) Mejora visual de la imagen: Combinado de bandas, utilización del filtro “sharpen”, mejora mediante contrastes, etc. Todo esto con el fin de poder visualizar y diferenciar correctamente las distintas clases, para poder clasificarlas.

2º) Establecer áreas de entrenamiento (muestras): Las áreas de entrenamiento (ver figura 61) son zonas definidas por el usuario donde se clasifica una zona concreta como tipología: Sistema Dunar, Vegetación, Mixto, Humedales o Agua. Para ello es imprescindible un conocimiento exacto de la zona o un calibrado de campo¹⁹. En este caso, al tener un buen conocimiento y al tener imágenes con una resolución adecuada para la escala de trabajo de este estudio no ha sido necesario un calibrado de campo. Establecer las áreas de entrenamiento es el proceso más importante, pues de unas representativas áreas de entrenamiento dependen los resultados del estudio. Para eso, como se ha comentado anteriormente, es importante que la covarianza de las muestras sea baja pues será sintomático de mayor diferenciación. Además ArcMap dispone de herramientas como los histogramas o las gráficas de dispersión (ver figura 62) para estar seguro de que se está realizando un buen muestreo. Cuanto más alejados se encuentran los puntos y más concentrados, mayor seguridad en la diferenciación de muestras.

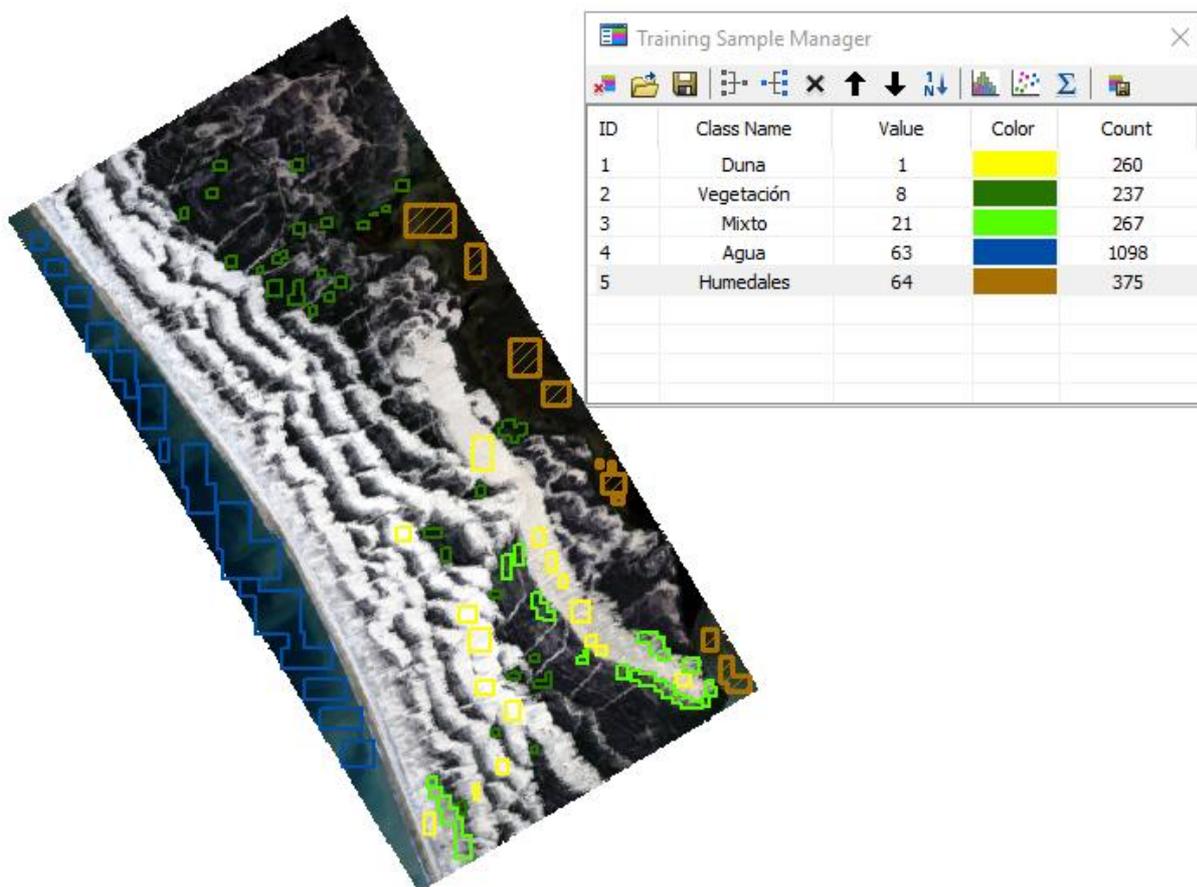


Figura 61: Establecimiento de áreas de entrenamiento para la clasificación supervisada de imagen 17/04/2018

¹⁹ Calibrado de campo: Mediante trabajos de campo, se define exactamente varios puntos de control en la zona de estudio, bien georeferenciados con el fin de relacionar una geoposición a su píxel correspondiente con la información relativa a la tipología de clase que se trata.

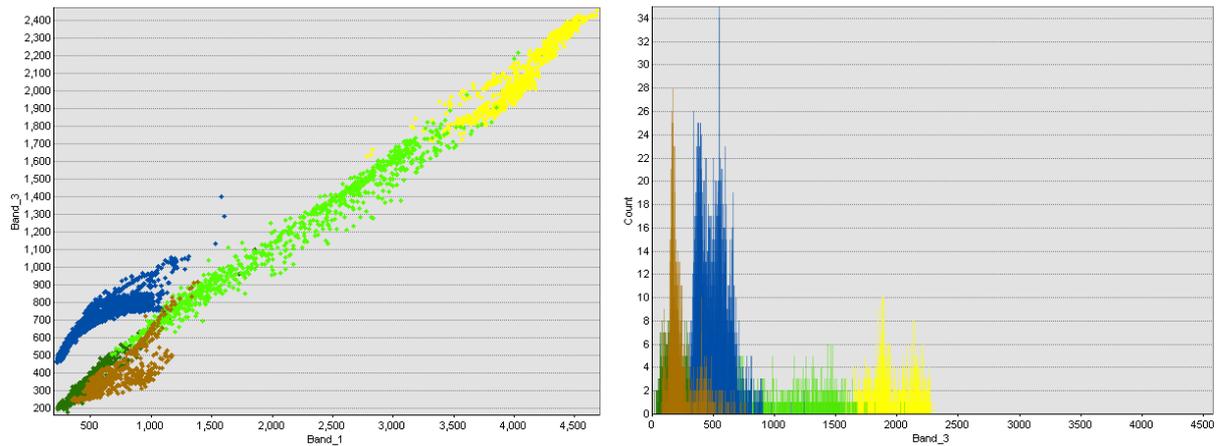


Figura 62: Valores de ND por banda en la imagen 17/04/2018. A la izquierda: gráfico de dispersión entre bandas 1 (banda 4 de Landsat8) y 3(banda 1 de Landsat8); a la derecha: Histograma para banda 3.

Al final, la clasificación que se realiza es meramente estadística y es función de las muestras que se le otorga. Mediante las gráficas de dispersión y los histogramas se puede controlar que realmente se tratan de clases distintas. En este caso expuesto, se observa cómo todas las clases están diferenciadas, únicamente la clase vegetación con la clase humedal podrían confrontar si sólo se analiza el histograma, pero ArcMap se nutre de la relación estadística entre todas las bandas. Se observa en el gráfico de dispersión entre banda 1 y banda 3 cómo estas clases sí están diferenciadas y ocupan lugares de Niveles Digitales diferenciados. El espectro de la clase Mixto es el más amplio, pero con muy buena correlación, el resto de clases tienen un espectro más estrecho y concentrado para este caso. Este mismo análisis se ha llevado a cabo con todas las clasificaciones de imágenes que se han utilizado en este capítulo.

3°) Realizar la clasificación supervisada: Para realizar la clasificación supervisada se dispone en ArcMap de la funcionalidad de “*Image Classification*>*Maximum Likelihood Classification*” donde hay que introducir la imagen a clasificar y el archivo de firma espectral que se deriva de realizar el muestreo de las áreas de entrenamiento. En este menú se puede clasificar utilizando distintas opciones como la fracción de píxeles de rechazo (que en este estudio siempre se ha supuesto como 0) y la probabilidad con la que se trata (que en este estudio siempre se ha utilizado como “igual”, donde todas las clases tienen la misma probabilidad de ocurrencia).

Una vez realizados estos pasos para todas las imágenes que se han decidido estudiar se procede a exponer los resultados obtenidos. Conviene tener en cuenta la leyenda utilizada (figura 63) y la escala de exposición que es de 1:70000.



Figura 63: Leyenda para la clasificación de todas las imágenes expuestas a continuación.

Conviene recordar las clases utilizadas:

- Sistema Dunar: Compuesto únicamente por arena sin ninguna clase de vegetación. Son las dunas propiamente dichas.
- Vegetación: Es cualquier suelo con unos índices de vegetación densos, generalmente pinos concentrados o vegetación tipo arbusto.

- Mixto: Corresponden con aquellas zonas donde coexisten arena y vegetación rasa. Generalmente zonas de vegetación poco pobladas.
- Agua: Zonas de agua. Generalmente aquellas ocupadas por el mar.
- Humedales: Zonas de marismas o suelos con elevada humedad. Generalmente en el noreste de la zona de estudio y en algunos casos en pequeños puntos concentrados entre las dunas.

A continuación se exponen las imágenes clasificadas de las distintas fechas, empezando desde la fecha 21/05/1976 hasta la imagen más actual que se dispone de 17/04/2018. Las imágenes han sido volteadas para su exposición.

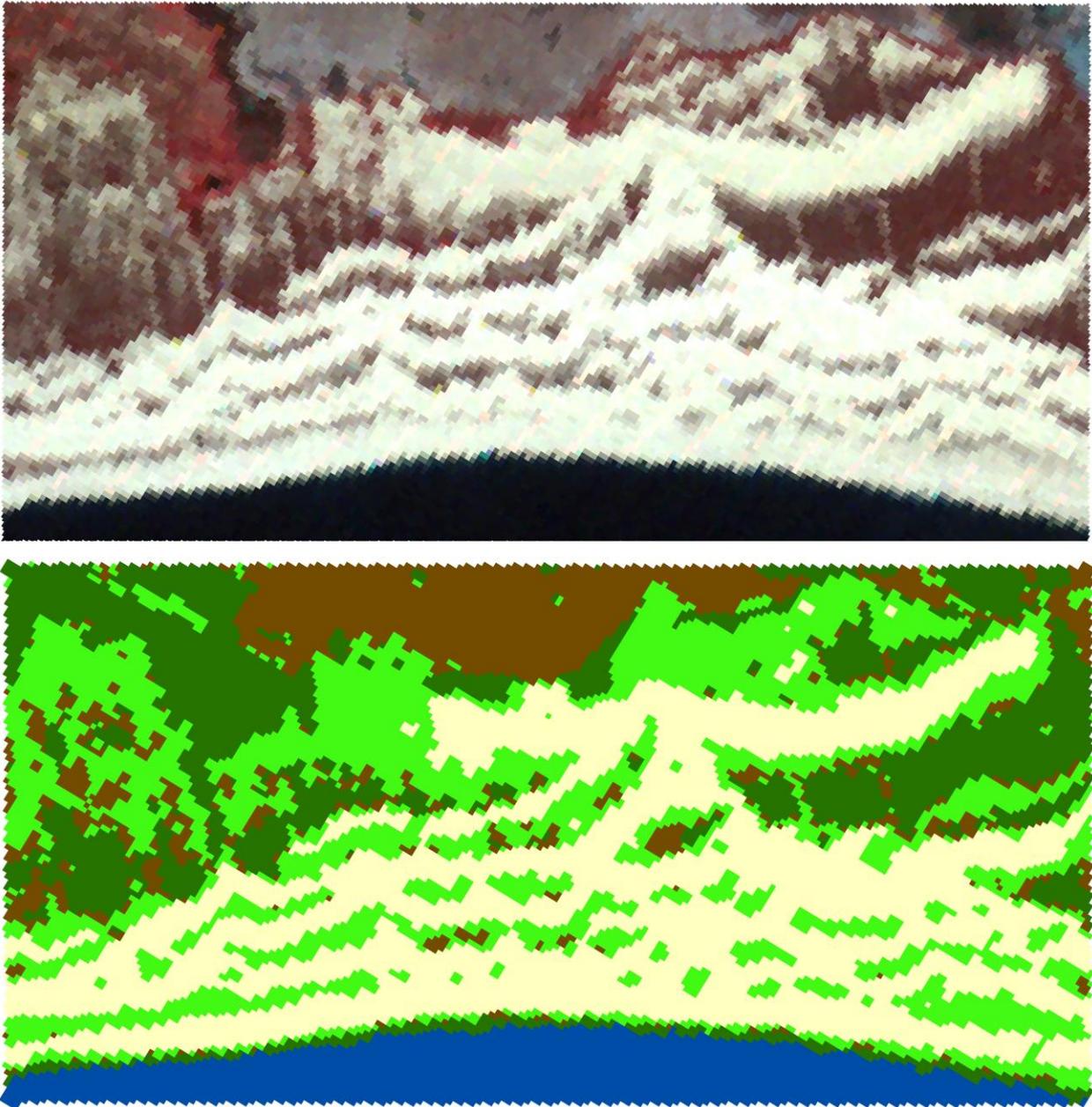


Figura 64: Imagen y clasificación de 21/05/1976. Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero). Escala 1:70000

La resolución de la imagen a fecha 21/05/1976 (figura 64) es la más baja de todas. Debido a la fecha de adquisición y al sensor MSS que la captó. Este hecho se traduce en una resolución espacial relativamente baja comparada con las otras imágenes tal y como puede observarse. No obstante, la clasificación es bastante buena, diferenciando muy bien los distintos tipos de suelos definidos. Además la resolución es suficiente para el detalle

necesario en este estudio. Llama la atención la gran ocupación de la clase “*Sistema Dunar*” y las pocas zonas existentes en cuanto a clase “*Mixto*”. Las zonas de clase tipo “*Humedales*” tienen una alta presencia al noreste de la zona de estudio aunque también se intercalan entre los suelos tipo “*Sistema Dunar*”. Además, lo que a priori parecen bancos de arena en la parte superior de la imagen ha resultado ser zona clasificada como “*Mixto*”. Esto es debido a la presencia de poblaciones vegetales rasas que hacen estas zonas se clasifiquen de esta manera.

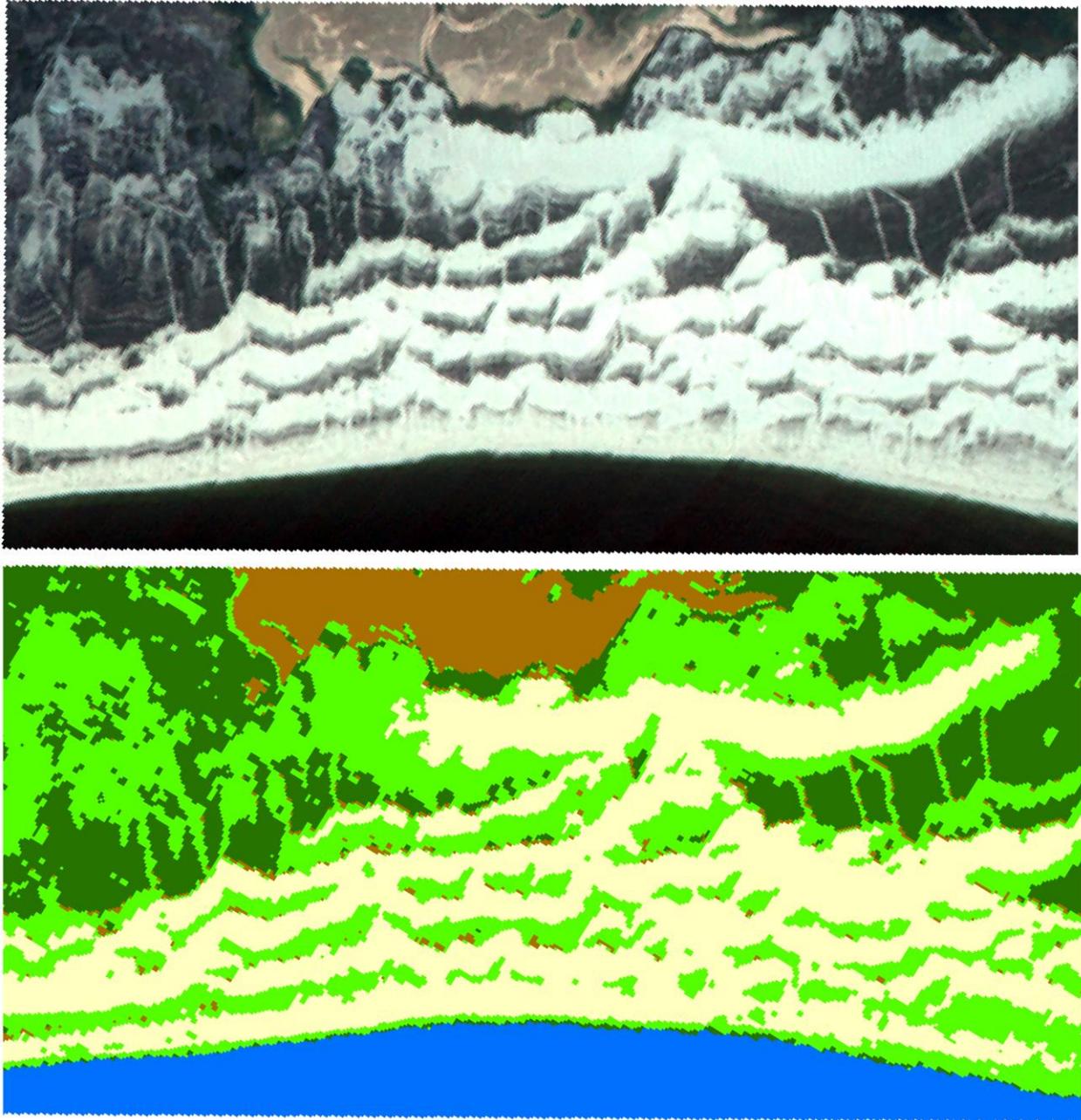


Figura 65: Imagen y clasificación de 08/07/1984. Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero). Escala 1:70000

La clasificación de la imagen con fecha 08/07/1984 (figura 65), conlleva mejor resolución debido al menor tamaño de píxel, que de aquí en adelante es de 30x30 metros. Respecto a la imagen anterior, se observa un crecimiento de la zona clasificada como “*Mixto*”, con un “*Sistema Dunar*” estable pues no se aprecian grandes diferencias. La presencia de suelo “*Humedales*” dispersos ha disminuido respecto a la imagen anterior. Se observa visualmente un ligero aumento de las zonas clasificadas como “*Vegetación*”.

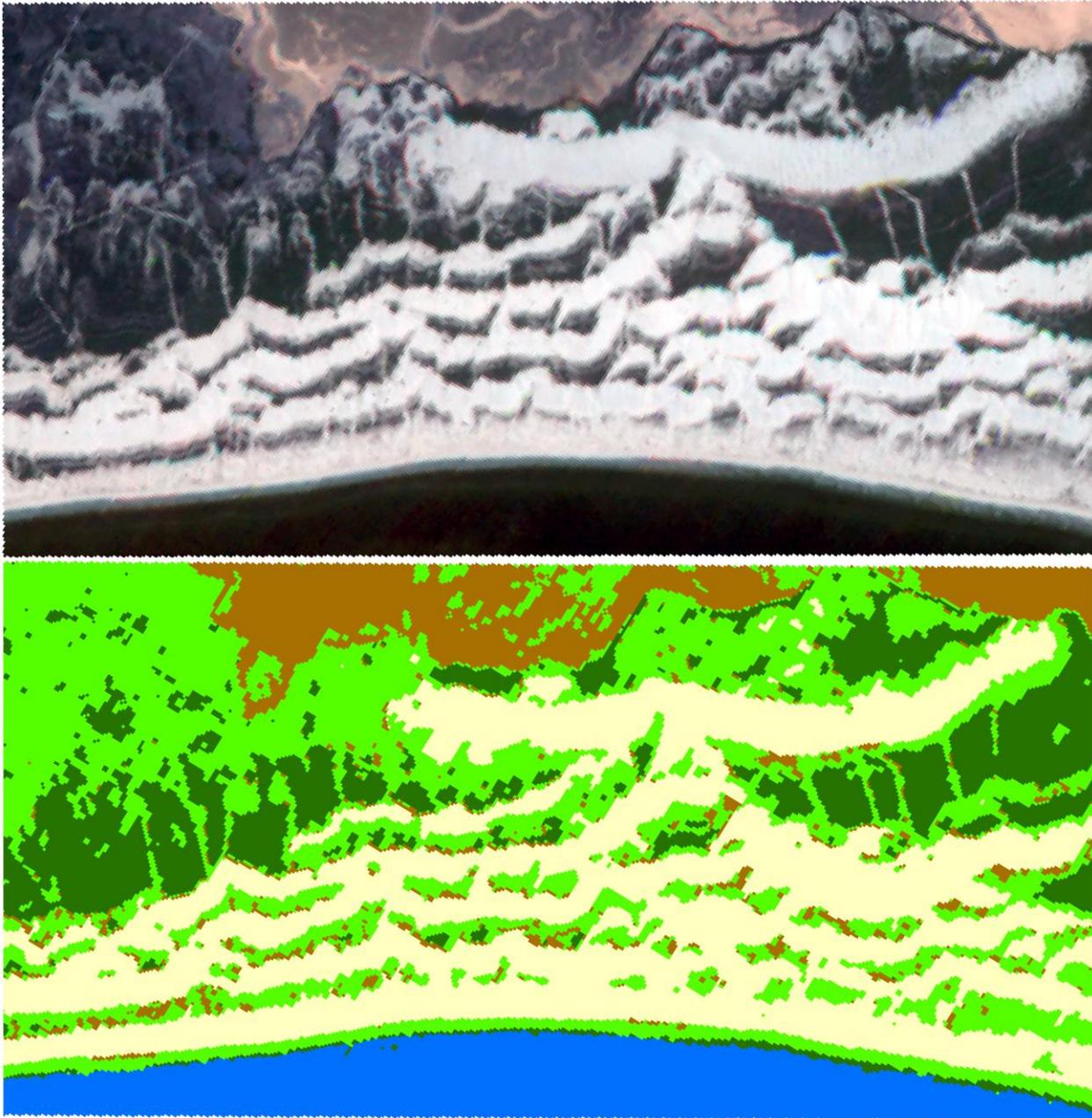


Figura 66: Imagen y clasificación de 13/08/1991. Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero). Escala 1:70000

En esta clasificación (13/08/1991, figura 66) se observa un crecimiento del suelo tipo “*Mixto*” en la zona superior, donde anteriormente había “*Humedales*”. Las zonas con vegetación densa decaen a favor de las zonas mixtas. Respecto a la clasificación de 1976 se observa un decrecimiento de las zonas definidas como “*Sistema dunar*”. También se pierde vegetación en la zona superior derecha de la imagen a favor de zonas de humedales. Los sistemas dunares están perfectamente definidos, pero se empieza a observar pérdidas en la zona inferior derecha de la imagen.

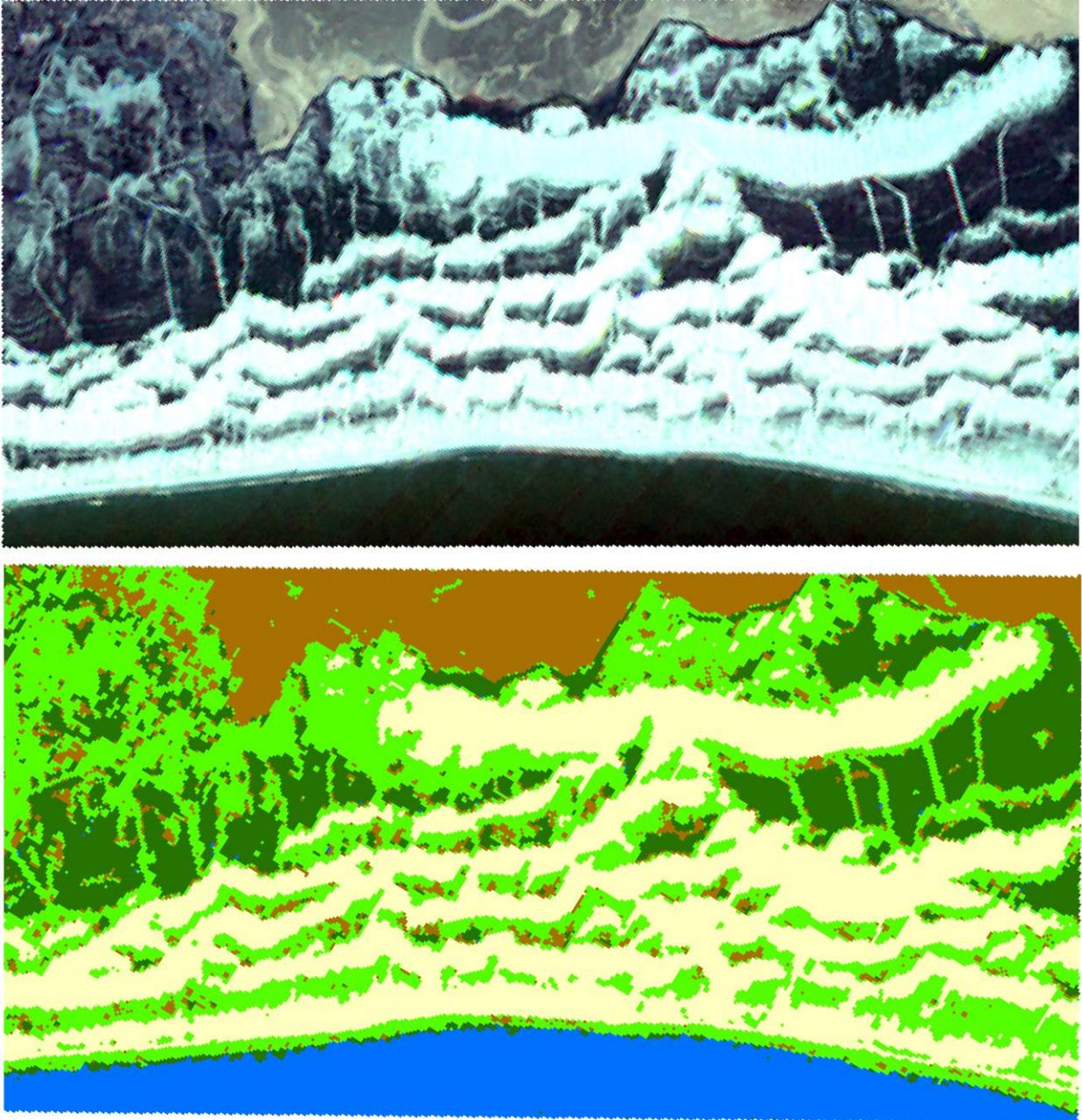


Figura 67: Imagen y clasificación de 09/09/1995. Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero). Escala 1:70000

En la clasificación efectuada para la imagen de 09/09/1995 (figura 67), existe un repunte de las zonas superiores de tipo “*Sistema dunar*”, en cambio en las zonas inferiores se vislumbra una pérdida de esta tipología respecto a la imagen anterior (13/08/1991). Las zonas con vegetación también están perfectamente definidas, sin embargo en este caso también existen zonas “*Humedales*” intercaladas entre el sistema dunar. La morfología del sistema dunar no parece cambiar en el tiempo, sí su pérdida o mejor dicho, su ganancia como suelo de tipología “*Mixto*”.

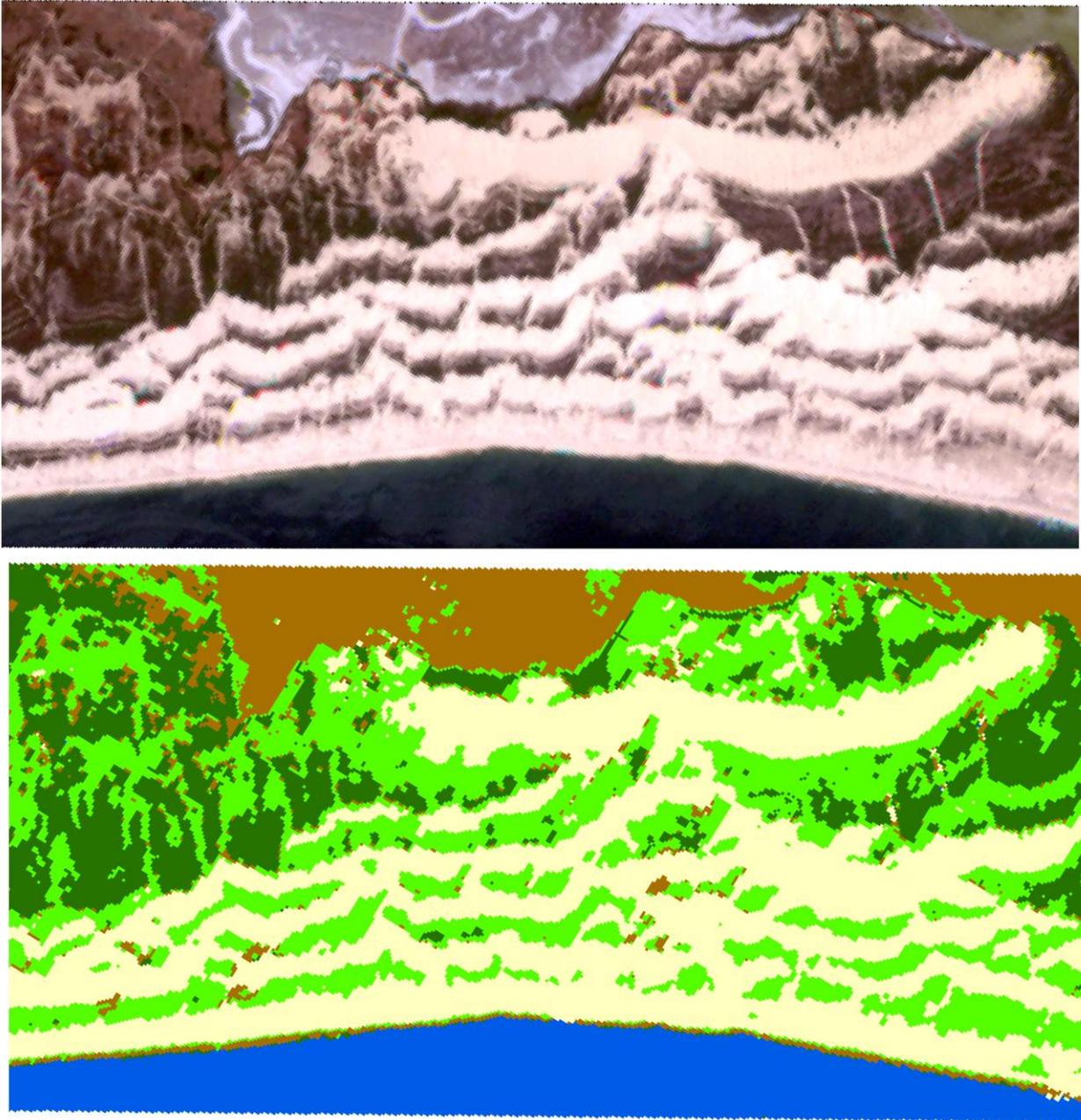


Figura 68: Imagen y clasificación de 24/06/2001. Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero). Escala 1:70000

Esta clasificación (24/06/2001, figura 68), viene caracterizada por un crecimiento de la zona vegetal respecto a la clasificación de la imagen que le precede. Los valores de zonas de “*Sistema dunar*” parecen muy similares a los de su predecesor. Destaca la pérdida de zonas tipo “*Vegetación*” en la zona superior derecha de la imagen a favor de su crecimiento en la zona izquierda. Siguen apareciendo zonas tipo “*Humedales*” intercaladas entre el sistema dunar. Las zonas de tipo “*Mixto*” también son similares a la clasificación de la imagen que le precede. Puede decirse que no existe un gran cambio entre estas dos situaciones temporales.

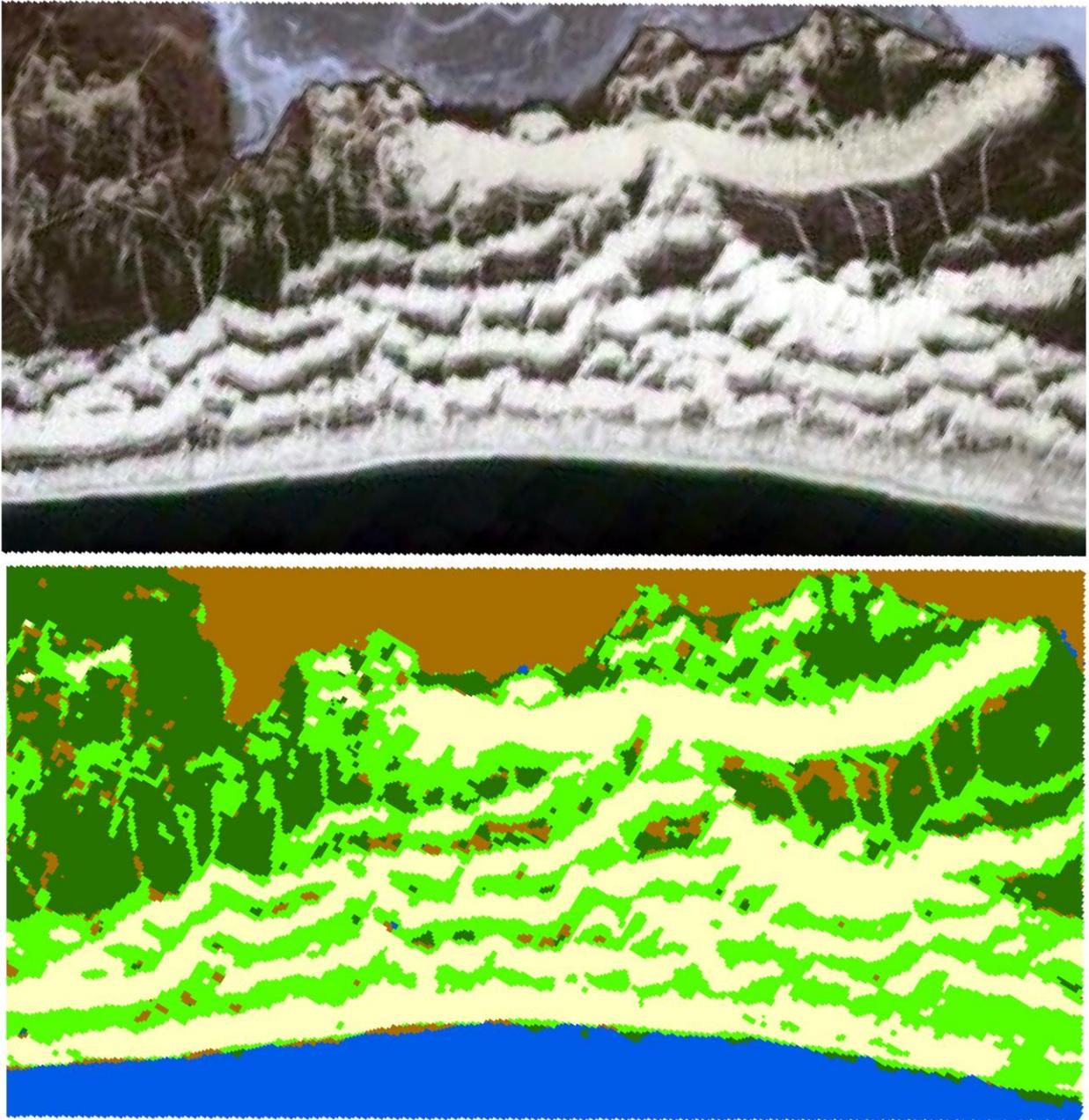


Figura 69: Imagen y clasificación de 22/08/2006. Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero). Escala 1:70000

En la clasificación del 22/08/2006 (figura 69), sí que se observan cambios sustanciales respecto a la clasificación que le precede. Por un lado llama la atención la pérdida de sistema dunar, sobre todo en la zona inferior derecha y en la primera línea de dunas en general. La zona catalogada como tipo “*Vegetación*” experimenta en contra un crecimiento tanto por la zona derecha como la superior izquierda de la imagen. Llama la atención como en la zona de rompientes, la firma espectral de esos píxeles no se consigue ubicar dentro de la tipología “*agua*”, categorizándose en algunos puntos como “*Humedales*”. Esto puede ser debido a la semejanza de reflectividad con zonas de humedales ya que se trata de arena y agua en movimiento.

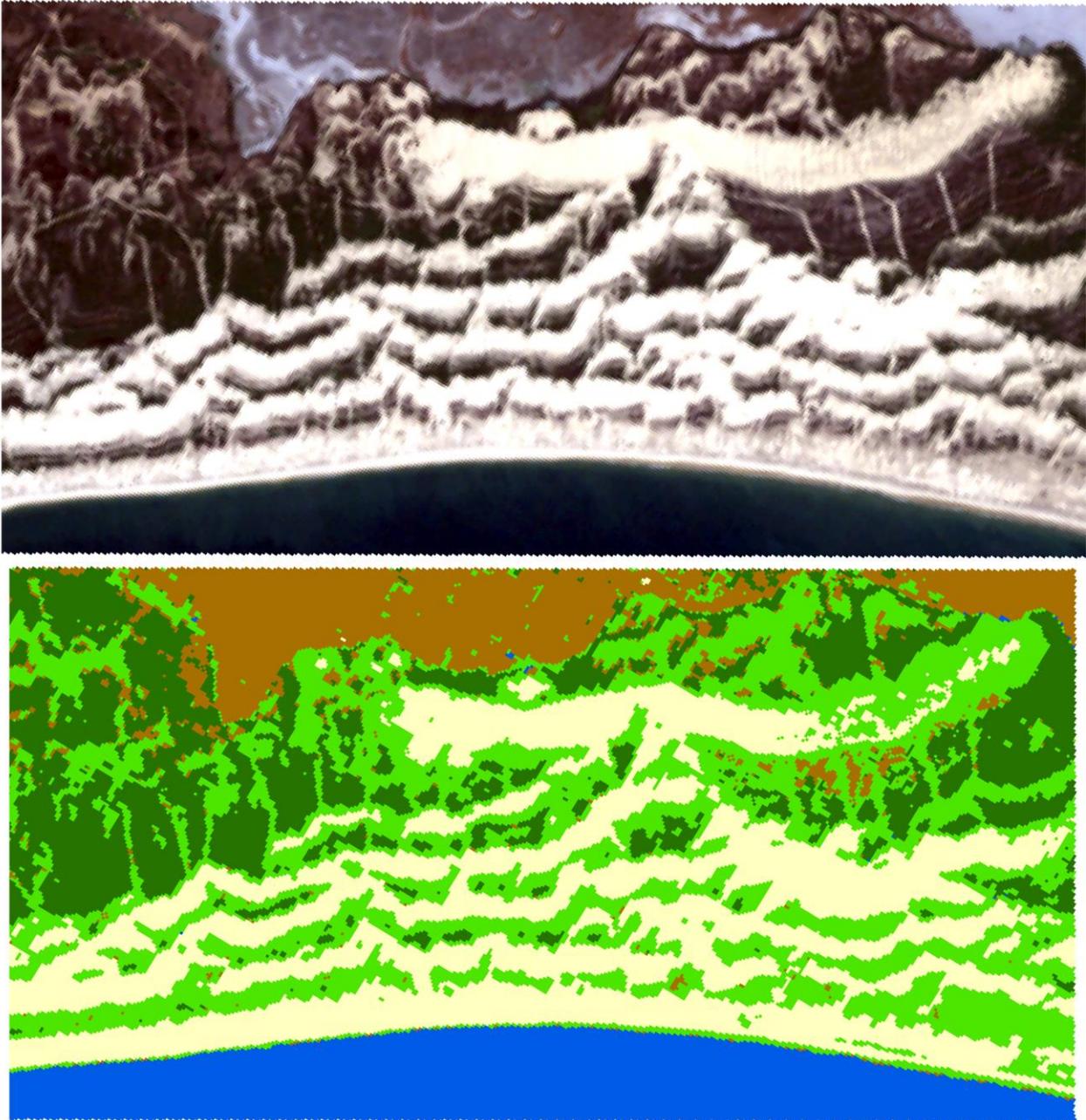


Figura 70: Imagen y clasificación de 04/08/2011. Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero). Escala 1:70000

Lo más llamativo de la clasificación sobre la imagen de 04/08/2011 (figura 70), consiste en que empieza a romperse la línea de dunas superior, por su flanco derecho. Empieza a pasar de ser tipo “*Sistema dunar*” con altas reflectividades a tipo “*Mixto*” con reflectividades algo más bajas debido a la presencia de poblaciones vegetales rasas y/o al posible asomeramiento de pequeñas entidades rocasas. De una forma u otra parece que se empieza a disiparse ese tren de dunas superior. Las zonas de tipo “*Mixto*” cogen mayor presencia que en la clasificación que le precede, aunque se pierden zonas superiores de humedales, también a favor de zonas mixtas.

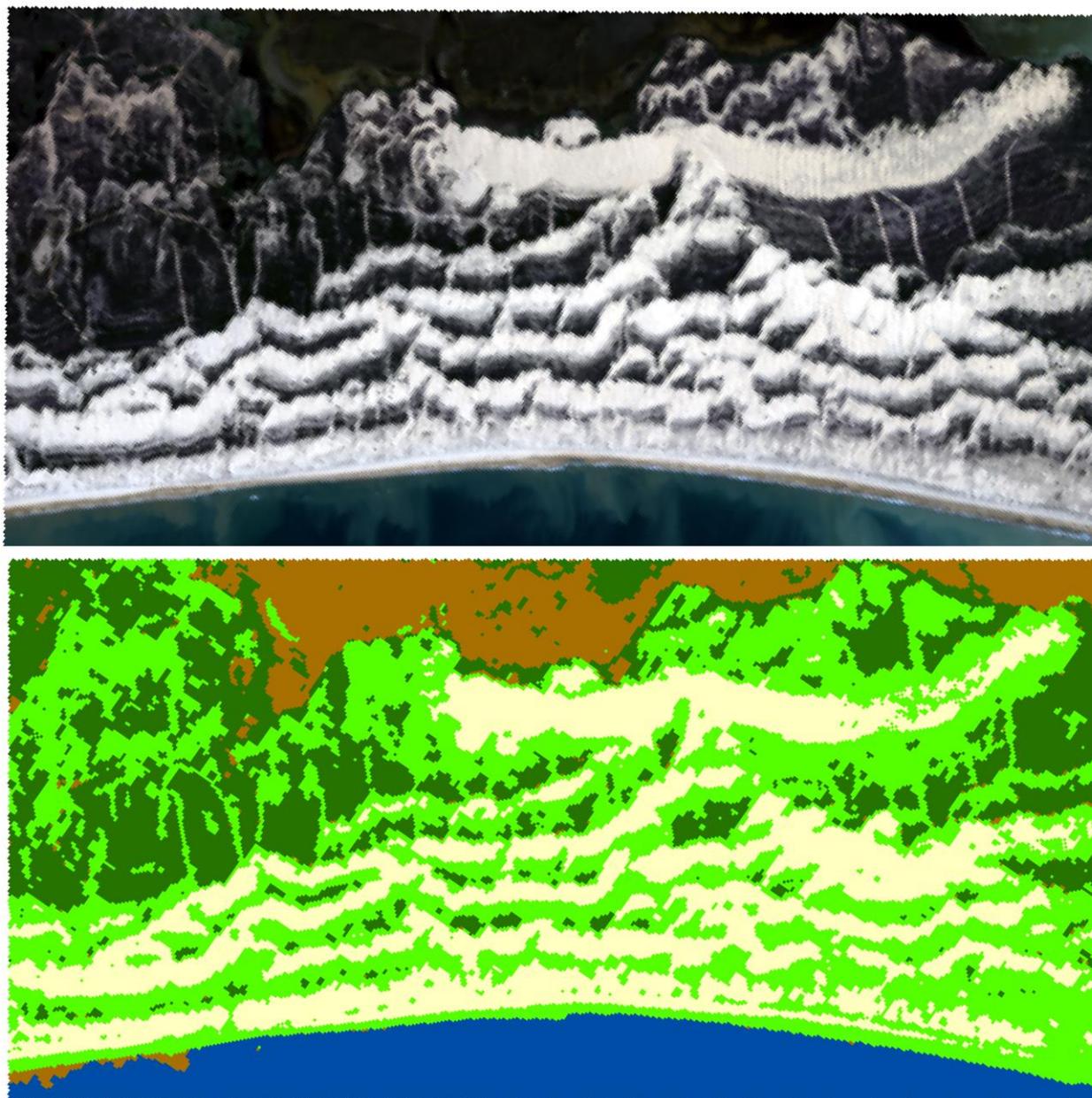


Figura 71: Imagen y clasificación de 17/04/2018. Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero). Escala 1:70000

En esta última clasificación (figura 71), quizás la más importante puesto que es la más cercana a la actualidad, se sigue observando la tendencia a la pérdida de zonas tipo “*Sistema dunar*”. Se observa como las zonas tipo “*Mixto*” continúan al alza en detrimento de los trenes dunares. La pérdida de duna es más generalizada en todo su ámbito en esta clasificación.

Si además se compara la clasificación actual (17/04/2018) con la inicial (21/05/1976) el cambio visual es mucho más significativo (ver figura 72). Si bien la resolución de la imagen inicial es inferior a la actual y puede lastrar mínimamente a la hora de definir pequeñas zonas, los resultados visuales en cuanto a zonas de tipo “*Sistema dunar*” son bastante esclarecedores. Existe una pérdida sustancial de esta zona a favor del tipo mixto mayoritariamente. Se observa también una ligera desviación de la forma en planta de la playa en el tramo izquierdo, aunque a priori nada relevante, podría afectar en mayor o menor medida al suministro de arena disponible.

Por otro lado y para finalizar con los comentarios, se observa una presencia en la zona inferior izquierda de la clasificación 17/04/2018 de zonas de “*Humedales*” puede deberse a la formación de barreras pequeñas de arena, comunes en la zona, que asoman ligeramente por encima del nivel del agua o como en otras clasificaciones, a zonas de rompientes o con altos contenidos de arena en suspensión.

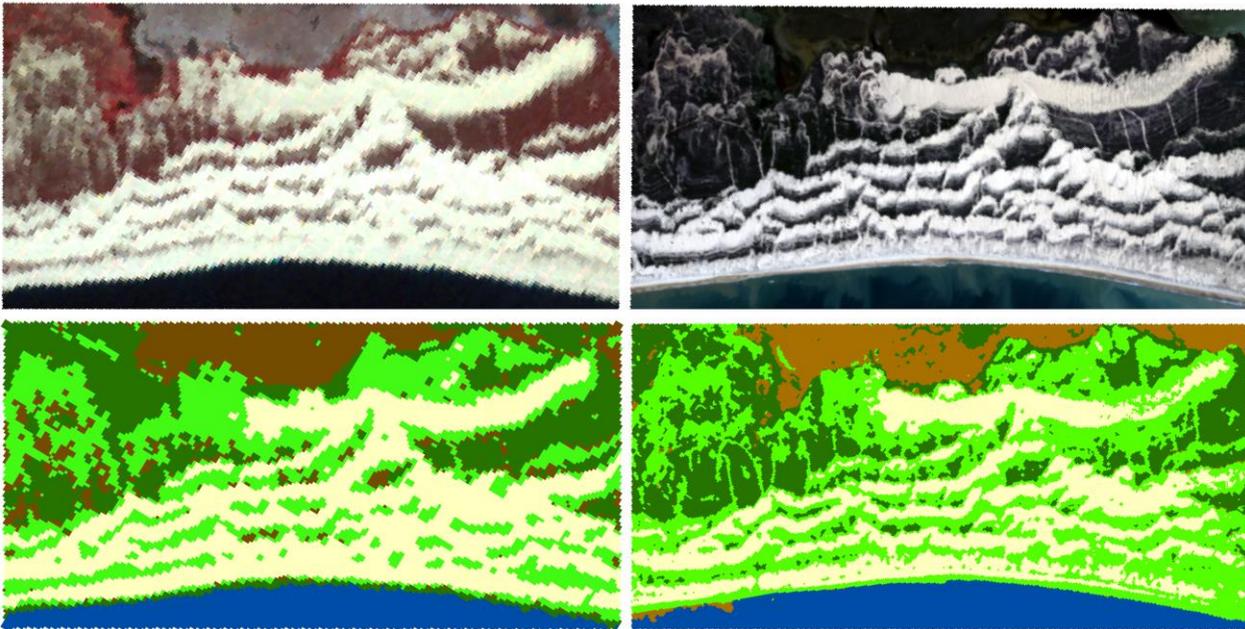


Figura 72: Comparativa de imagen y clasificación a fecha de 21/05/1976 (izquierda) con 17/04/2018 (derecha). Arriba: combinación en color natural; abajo: clasificación supervisada. Fuente imagen: (USGS, Enero).

4.3.5 Resultados en cambios de uso de suelo.

Se pretende en este apartado analizar si las percepciones visuales de las distintas clasificaciones que se han expuesto anteriormente son realmente así. Para ello, se ha analizado el área ocupada por cada clase dentro de cada clasificación. Los resultados son los expuestos en las siguientes tablas:

En la tabla 16, se exponen los resultados porcentuales de área ocupada, cabe mencionar que obviamente todas las imágenes tienen la misma área ocupada.

Tabla 16: Resultados en % de suelo según clase para cada imagen clasificada.

Imagen	Sistema Dunar		Vegetación		Mixto		Humedales		Zonas de Agua	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
21-05-1976	2581	35%	1276	17%	1716	23%	910	12%	850	12%
08-07-1984	2354	32%	1349	18%	2263	31%	483	7%	862	12%
13-08-1991	2310	32%	1020	14%	2372	32%	748	10%	861	12%
09-09-1995	2192	30%	1058	14%	2266	31%	956	13%	859	12%
29-06-2001	2356	32%	1104	15%	2087	28%	864	12%	900	12%
22-08-2006	2071	28%	1504	21%	1956	27%	897	12%	883	12%
04-08-2011	1924	26%	1421	19%	2256	31%	796	11%	914	12%
17-04-2018	1616	22%	1480	20%	2682	37%	629	9%	896	12%

En la siguiente tabla 17 se expone la evolución porcentual por clase respecto a la imagen inicial (21/05/76) y su gradiente respecto al año anterior. No se considera efectuar ese análisis para las zonas de agua pues como se puede observar son prácticamente constantes suponiendo un 12% de área ocupada. Esto es una medida de que la clasificación se ha efectuado correctamente y estandarizada en todas las fechas.

Cómo puede observarse, los resultados van en la línea de los comentarios efectuados en el apartado 4.3.4. Se observa una pérdida paulatina de tipo “*Sistema dunar*” a favor de una ganancia de tipo “*Mixto*” mayoritariamente, aunque también de tipo “*Vegetación*”. Las áreas de “*Humedales*” son casi constantes, únicamente existen cambios que pueden atribuirse a la presencia de lluvias que se hayan producido fechas antes a la obtención de la imagen.

Esta evolutiva se ha expuesto también en la figura 73 para su análisis gráfico. Se observa cómo la tendencia a la pérdida de suelo tipo “*Sistema dunar*” ha sido compensada con la ganancia de suelo tipo “*Vegetación*” y sobre todo de suelo tipo “*Mixto*”. El repunte es importante en los últimos años, debido a la aceleración en el proceso de pérdida de “*Sistema dunar*”.

Llama la atención el 37% de pérdida de suelo tipo “*Sistema Dunar*” respecto a la imagen original y cómo sólo en la fecha 29/06/2001 existió una recuperación de este tipo de suelo.

Respecto al suelo de tipo “*Vegetación*”, ha tenido un crecimiento relativamente estable, con algunos altibajos que han podido producirse debido a la presencia de vegetación estacionaria proliferante junto a las zonas de tipo “*Humedales*”. Es en los últimos años (a partir de la fecha 22/08/2006) cuando existe un mayor crecimiento tanto de suelo “*Vegetación*” como tipo “*Mixto*”. Así, las sensaciones visuales que se habían expuesto en el apartado 4.3.4 son corroboradas con los datos aquí expuestos.

Tabla 17: Resultados en % de cambio de suelo respecto a fecha 21/05/1976 y respecto a fecha anterior

Imagen	Sistema Dunar		Vegetación		Mixto		Humedales	
	% cambio con 1976	% cambio con anterior	% cambio con 1976	% cambio con anterior	% cambio con 1976	% cambio con anterior	% cambio con 1976	% cambio con anterior
21-05-1976	-	-	-	-	-	-	-	-
08-07-1984	-9%	-9%	+6%	+6%	+32%	+32%	-47%	-47%
13-08-1991	-11%	-2%	-20%	-24%	+38%	+5%	-18%	+55%
09-09-1995	-15%	-5%	-17%	+4%	+32%	-4%	+5%	+28%
29-06-2001	-9%	+7%	-13%	+4%	+22%	-8%	-5%	-10%
22-08-2006	-20%	-12%	+18%	+36%	+14%	-6%	-1%	+4%
04-08-2011	-25%	-7%	+11%	-6%	+31%	+15%	-12%	-11%
17-04-2018	-37%	-16%	+16%	+4%	+56%	+19%	-31%	-21%

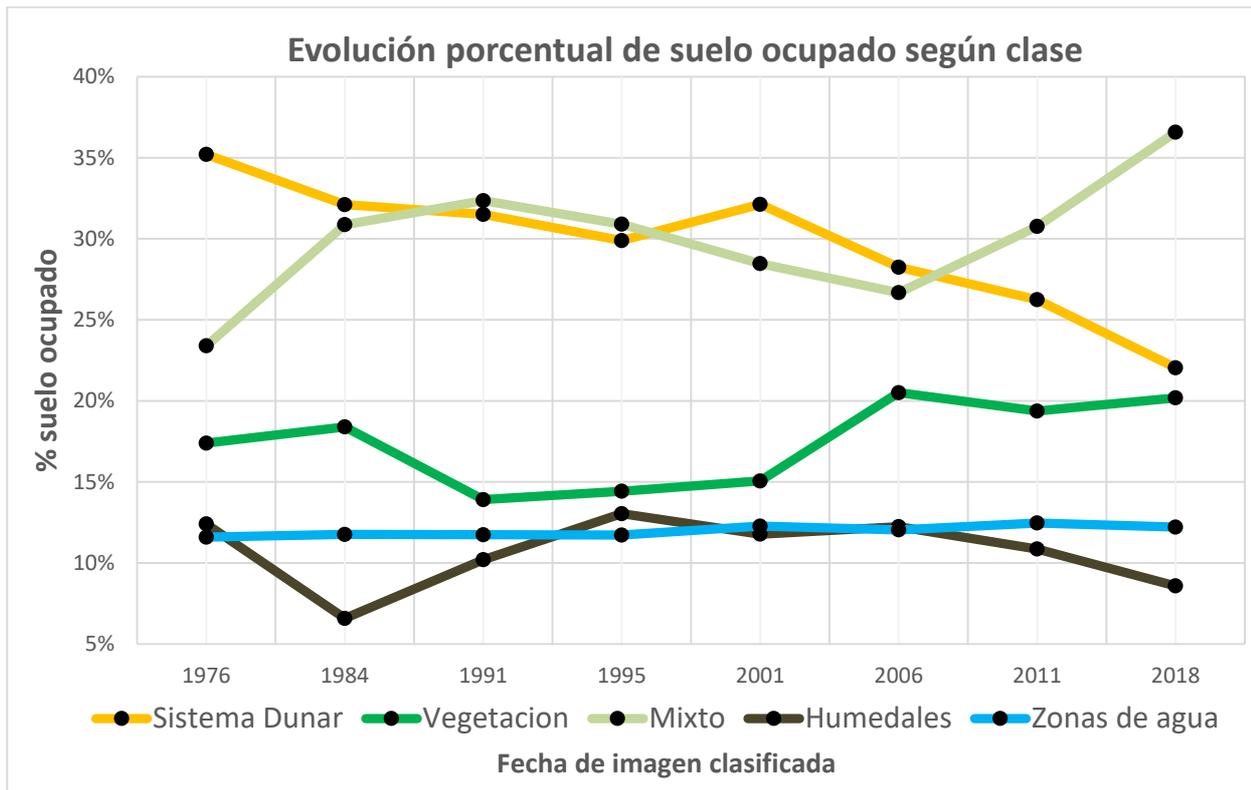


Figura 73: Evolución porcentual de suelo ocupado según clase: Sistema dunar (color naranja); Vegetación (color verde oscuro); Mixto (color verde claro); Humedales (color marrón); Zonas de agua (color azul).

4.4 Análisis de la zona del dique.

Se va a proceder a analizar el cambio en planta de la playa cercana a la construcción del dique Juan Carlos I (ver figura 74). Para ello se va a proceder mediante las mismas imágenes usadas en el punto 4.3 y únicamente midiendo la desviación o ángulo en planta respecto a la imagen más cercana en fecha desde que se construyó el dique (1981). En este caso es suficiente trabajar con una única banda, en cada imagen la que mayor resolución visual nos otorgue, ya que únicamente se quiere analizar ese cambio en planta y el perfil de playa se detecta correctamente. Así, se van a utilizar la imagen de 08/07/1984 y la de 17/04/2018, que es la más actual.

Analizando los 2 puntos de control de las dos imágenes (arriba fecha 08/07/1984 y abajo fecha 17/04/2018) estipulados que se encuentran separados entre sí 4250m (en coordenadas X), se observa cómo el perfil de la playa ha girado -2° en el primer punto y 2° en el segundo. Esto es lógico desde el punto de vista de los fenómenos de oleaje relacionados con infraestructuras marítimas expuestos en el apartado 2.3. En concreto, el fenómeno de difracción está relacionado con estos resultados.

Otros cambios se observan en la imagen a fecha 17/04/1984 en el perfil de playa, pero más tienen que ver con acciones antrópicas muy definidas como son la construcción del puerto deportivo de Mazagón y una ampliación realizada en el dique Juan Carlos I. La construcción del puerto, ha supuesto una acumulación de arena que ha provocado un giro de la playa hasta los 6° (partía de 21° en su origen), lo que supone un desfase de 15° .

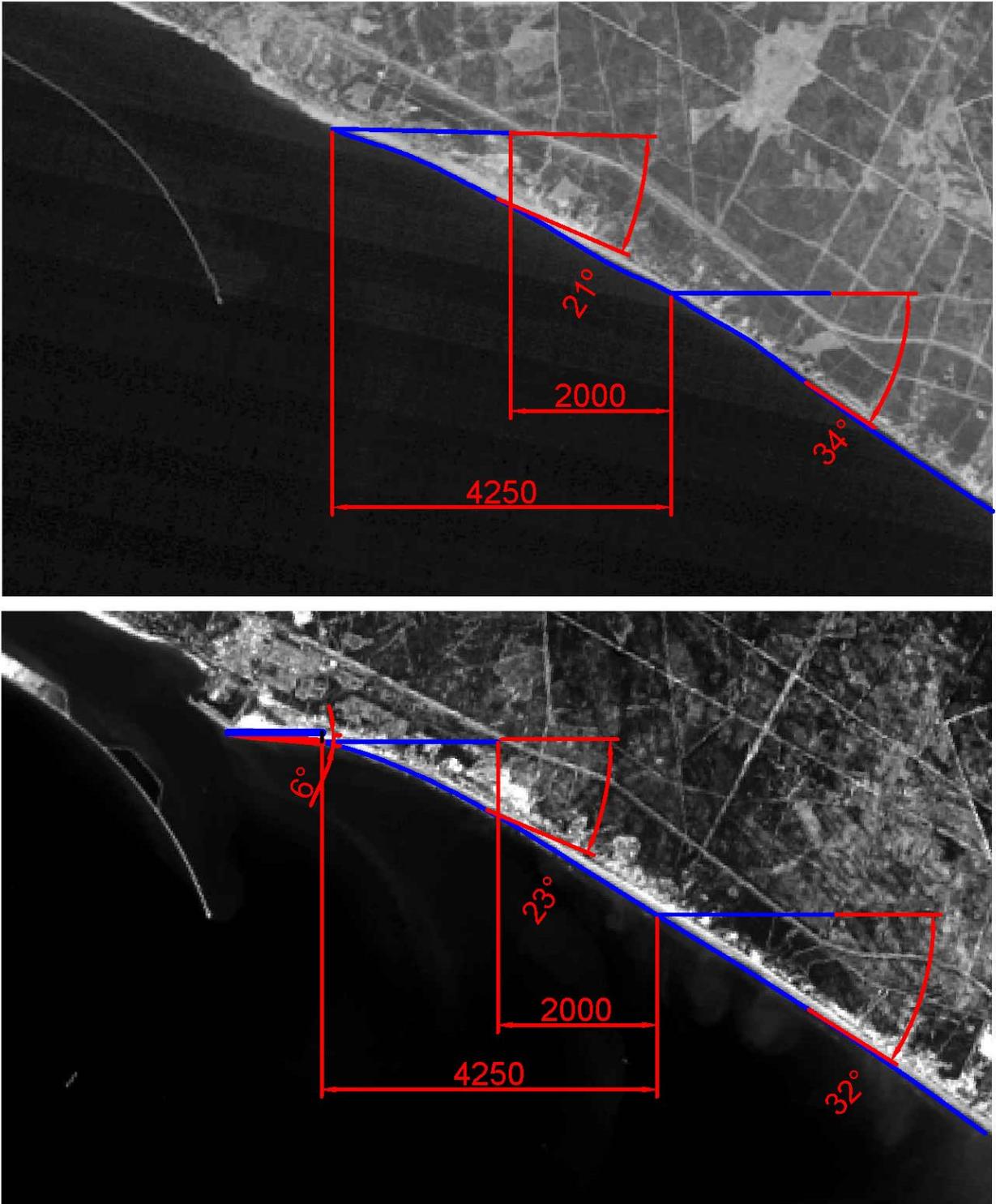


Figura 74: Área a analizar: arriba imagen fecha 08/07/1984, abajo fecha 17/04/2018. Cotas en metros.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

“Si no conozco una cosa, la investigaré.”

- Louis Pasteur -

Introducción a las conclusiones:

Para la consecución de los objetivos principales, se han llevado a cabo todas las acciones definidas dentro de los objetivos específicos planteados. Se ha realizado un completo y extenso estudio de los antecedentes de la zona; una revisión bibliográfica sobre la ciencia de la teledetección; y se han obtenido unos resultados bastante concluyentes y estadísticamente fiables. Los objetivos generales, se han cumplido todos y cada uno de ellos cumpliendo los específicos. Se recuerdan los objetivos principales planteados en el capítulo 1.1.1 de este TFM:

1. *“Profundizar y detallar exhaustivamente las características de la zona de estudio, el litoral Onubense y el sistema dunar de Doñana con el fin de poder entender los resultados que de este estudio se deriven, y para facilitar el conocimiento de la zona de estudio a futuros investigadores...”*
2. *“Analizar, determinar y explicar la evolución en planta de la zona de estudio, así como determinar la influencia (o no influencia) que haya podido tener los distintos agentes sobre la zona de estudio - Dunas de Doñana -: acciones antrópicas como construcción del dique Juan Carlos; marea; viento; oleaje; clima; características de la zona de estudio; etc. Aquí se detectarán, identificarán y evaluarán los principales cambios en la superficie terrestre de estudio.”*
3. *“El tercer y último objetivo es el de usar las herramientas que proporciona la ciencia de la teledetección mediante imágenes por satélite para poder analizar y determinar los cambios producidos en la zona de estudio, es decir, solventar el objetivo número 2. Y esto con el fin de obtener las competencias en investigación aplicada para la superación de la asignatura Trabajo Fin de Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.”*

Por un lado el primer objetivo principal, consistente en profundizar y detallar las características de la zona de estudio, ha facilitado la comprensión de los resultados obtenidos y profundizar en la misma. Además, ha proporcionado al lector una idea de detalle sobre las principales características del litoral Onubense como de las dunas del parque de Doñana. También ha resultado imprescindible para relacionar las características de la zona con los resultados obtenidos.

Por otro lado, en relación al segundo y tercer objetivo principal, se han usado las herramientas que proporciona la teledetección para poder obtener resultados en la zona de estudio y las conclusiones que aquí adelante se explican. Se ha efectuado un profundo análisis de la ciencia de la teledetección para que el lector pueda entender las bases de estos resultados y para realizar un enfoque correcto utilizando las herramientas que la teledetección proporciona. El concepto de onda electromagnética, firma espectral, ventana óptica, reflectividad y nivel digital son claves en teledetección. También lo es el hecho de poder detectar factores que puedan influir en la calidad de las imágenes, como es la cobertura nubosa y la dispersión atmosférica. Por eso este estudio se ha efectuado con imágenes con cobertura nubosa inferior al 2%.

En relación al tercer objetivo:

Se empiezan explicando las conclusiones obtenidas en relación al tercer objetivo planteado.

La imagen digital y el concepto de nivel digital es la base de la teledetección. En relación a las imágenes utilizadas, éstas han sido de suficiente resolución para este estudio. La resolución temporal de Landsat ha sido suficiente, pues hemos dispuesto de varias imágenes por década estudiada, sí es verdad que más imágenes y de mayor calidad antes de la construcción del dique hubieran apoyado las tesis de este estudio. La resolución

espacial también ha sido suficiente. Obtener imágenes con resolución de 30m x 30m y 57m x 57m en esta escala de trabajo comporta una buena fiabilidad de los resultados, que además así se demuestran con los estudios ANOVA realizados y con el control a modo de gráficos de dispersión e histogramas sobre las clasificaciones supervisadas efectuadas.

El uso de imágenes satélite de la serie Landsat está altamente extendido entre profesionales del sector. Landsat dispone de una experiencia contrastada sobre la calidad de sus imágenes pues esta plataforma lleva más de 50 años trabajando en la ciencia de la teledetección. Este estudio pone de manifiesto la potencia de la teledetección aplicada en el estudio del medio físico. Tan sólo con el concepto de reflectividad sobre un cuerpo y en la ventana óptica del ser humano se pueden extraer tantas conclusiones como las expuestas en este capítulo.

En relación al primer y segundo objetivo:

Volviendo al segundo objetivo planteado en este trabajo, se concluye que la metodología empleada ha sido la correcta ya que ha arrojado datos muy concluyentes. En la zona de estudio se han observado los siguientes cambios físicos en la escala temporal estudiada (5 décadas):

El estudio de firma espectral se ha efectuado con suficientes imágenes (2/3 por década) en los distintos puntos de control definidos. De este estudio se concluye que la zona de estudio ha pasado de mayormente tener un sistema dunar consolidado a ir perdiéndose gradualmente. Esto se traduce en unos porcentajes establecidos de cambio de suelo tipo “Duna” a suelo tipo “Mixto” o a suelo tipo “Vegetación”. Los resultados de firma espectral han sido muy concluyentes pues la tendencia en todos los perfiles ha sido la misma, tasas de cambio de suelo del 50% y/o 100%, dependiendo del punto de control y según la escala definida. Sin embargo, la hipótesis primaria de que había habido un desplazamiento de los trenes dunares perpendiculares a la costa no ha sido cierta. Lo que ha ocurrido más bien, y apoyándose este estudio en el estudio de clasificación supervisada, es que ha habido una pérdida gradual de sistema dunar a favor de la creación de suelo vegetal y de suelo tipo mixto. Los resultados arrojados por los distintos puntos de control definidos, han sido validados mediante los distintos test ANOVA realizados, concluyendo que las muestras eran independientes entre sí, dando como válidos los datos obtenidos.

La clasificación supervisada es un método altamente comprobado para el estudio del medio físico mediante teledetección. La parte más crítica de este método es el establecimiento de las áreas de control, pero para ello se han efectuado distintas técnicas para la mejora de la imagen y para el control de las áreas de entrenamiento. Mediante los distintos histogramas y gráficos de dispersión se ha asegurado la independencia entre clases. En cuanto a la escala temporal analizada, con imágenes cada 5-8 años ha sido suficiente para analizar la evolución de la zona. Del estudio de la clasificación supervisada se concluye, teniendo en cuenta lo expuesto en relación al estudio de firma espectral, que la zona se encuentra en un estado erosivo en cuanto a la pérdida de suelo tipo “sistema dunar” a favor de suelo tipo “mixto” y suelo tipo “vegetación”. Se tienen tasas actuales de cambio respecto a la imagen de fecha 21-05-1976 de: -37% en suelo tipo “sistema dunar”; +16% en suelo tipo “vegetación”; +56% en suelo tipo “mixto”; -31% en suelo tipo “humedal”. Las conclusiones son claras: existe un aumento de suelo de vegetación densa y poco poblada por una pérdida de suelo de sistema dunar.

En aquello relativo al primer objetivo planteado, el litoral Onubense tiene una estructura altamente consolidada, sus flechas, barreras arenosas y extensas playas son el resultado del proceso de formación del litoral. En este proceso, los principales hechos históricos que han condicionado su forma han sido sus características morfodinámicas, acciones naturales y los distintos procesos generados a lo largo de las distintas etapas históricas. Sin embargo, la formación del litoral se ha desarrollado paulatinamente, concluyendo que sus cambios se han producido en una escala de tiempo muy grande (miles de años), mientras que los cambios que en este trabajo se han analizado tienen un impacto en una escala temporal muy pequeña (5 décadas).

El parque de Doñana es un espacio natural y protegido en todo su territorio. También lo son los Sistemas Dunares estudiados. Esta característica de espacio protegido hace que este estudio cobre un valor añadido, pues en teoría debe preservarse y protegerse frente a las acciones antrópicas. En cuanto a las principales características de la zona de estudio:

La batimetría se caracteriza por pendientes suaves, homogéneas y continuadas. Esto provoca que la rotura del oleaje sea continuada y no abrupta, generando anchas playas y amplias zonas de acumulación de sedimentos. La forma del perfil de playa es fundamental para la generación de los trenes dunares pues provoca la acumulación de sedimentos. Esto sumado a litología predominante de arenas en la zona y al tipo de rotura de oleaje, ha propiciado la sedimentación de arena en forma de trenes dunares.

En cuanto a las poblaciones vegetales se ha efectuado una descripción en esta memoria de las principales especies catalogándose como suelo tipo “*Vegetación*” si el píxel estaba 100% denso de vegetación y “*Mixto*” sino era así. No se ha efectuado un estudio del cambio de la especie vegetal en la zona. Sin embargo, la zona ha experimentado un cambio en esta catalogación realizada, tal y como se deriva de la clasificación supervisada como de la firma espectral. Las principales poblaciones en la zona estudiada han sido el Pino Piñonero y la Psamófila.

Las acciones climáticas como temperatura y evaporación no han tenido influencia en la escala temporal analizada. La precipitación media así como la temperatura media anual (entre 18° y 20°), han resultado tener una tendencia constante en el periodo estudiado, pese a los resultados cíclicos de la precipitación. No así la evaporación media anual, que experimenta una tendencia al alza. Este aumento de la evaporación no se ve reflejado en pérdida de suelo vegetal en la zona estudiada ya que tanto el suelo definido como vegetación y el suelo mixto han aumentado. Se descarta la influencia de la evaporación en la zona de estudio ya que no ha conllevado la desertificación de la zona.

El rango de marea máximo absoluto actual es en torno a 3.8 metros. El periodo estudiado comporta desde el año 1992 y presenta unos valores mínimos mensuales actuales superiores a los del inicio. Los máximos mensuales siguen una tendencia constante desde el año 1992. Esto ha implicado que el rango de marea se haya visto aumentado en unos 20-30 centímetros, pasando hasta los actuales 3.8 metros. El aumento del rango marea mareal, en unos 20-30 cm, ha tenido cierta influencia en el arrastre sedimentario, y por ello en la afección de la zona de estudio

El oleaje ha sido estudiado desde el año 1958, desde que se registran datos. Las alturas de oleaje más frecuentes han sido entre los 0.1 y 0.5 metros siendo la dirección más frecuente la procedente del Oeste con un 35% de los días y Sur-Oeste con un casi 21% de los días. Sin embargo, los procesos más erosivos como son los temporales vienen con mayor probabilidad desde el Sur-Oeste. Los oleajes procedentes de esta dirección inciden en la costa casi perpendicularmente, motivo por el que el tramo de costa presenta playas extensas y anchas, a consecuencia de la escasa erosión longitudinal que ejercen los temporales procedentes de esta dirección. Por otro lado, la altura de ola media mensual se ha visto incrementada, siendo la tendencia creciente desde el año 2005. Esto va en relación con el aumento de la carrera de marea y también ha tenido relación con la afección a la zona de estudio.

En cuanto al viento, se ha visto incrementada su tendencia en velocidad media a partir del año 2005, no su dirección predominante que es la WSW (Oeste-Sur-Oeste) el 12% de los días y W (Oeste) el 9% de los días. Esta dirección predominante también coincide con la de las acciones de altura de ola, y explica la forma en planta de los sucesivos trenes dunares, perpendiculares a esta dirección. El aumento de la velocidad de viento es una variable a tener en cuenta en la influencia de la pérdida de sistema dunar.

La corriente atlántica superficial no ha tenido influencia en la zona de estudio, bien por su lejanía a la zona y también por su invariabilidad tendencial en la velocidad media de la corriente.

Sobre las acciones antrópicas en el tramo de estudio y en el periodo estudiado, el dique Juan Carlos I ha sido la acción más importante. De la teoría de oleaje se concluye la influencia que tienen las infraestructuras marítimas a través del efecto combinado de los distintos mecanismos que se producen. La difracción es el proceso que mayor repercusión tiene conllevando un cambio en el flujo de sedimento, con zonas de sombra, de acumulación y de erosión, además del efecto barrera del propio dique. Las acciones antrópicas, en concreto la presencia en el tramo de costa del dique Juan Carlos I ha generado como efecto más directo lo expuesto en el apartado 4.4. Existe un cambio en planta de la zona de Mazagón de +15°; +2°y -2° en 3 puntos medidos en la costa cercanos al municipio de Mazagón. Además el efecto barrera producido por el dique ha tenido su influencia en la pérdida de sistema dunar

Asimismo, las conclusiones relativas al efecto del dique Juan Carlos I citadas anteriormente están también sustentadas por las tesis de investigadores que han concluido acerca de las repercusiones y afecciones de este dique en este tramo de costa. En concreto autores como (Ballesta, 1998), (Aramburu, 2013), (Ramírez-Juidias, 2016 y 2015), (Rodríguez- Ramírez, 2009, 2008), han concluido sobre las distintas afecciones del dique Juan Carlos I a distintos tramos de la costa de Huelva, resaltando la erosión producida aguas abajo del dique por el efecto barrera producido. Otro autores (Meneteau, These 3e cycle), (F.Ruiz, 2003) sostienen las tesis de que a causa de la disminución del caudal del río Guadalquivir por la construcción de presas, está aumentando la sedimentación de arena en la desembocadura y la punta de Doñana. Hecho que puede compensar la pérdida de sedimento que la construcción del dique ha comportado sobre la zona de las Dunas de Doñana.

Por otro lado, cabe mencionar también el hecho de que el tramo de costa al que pertenece la zona de estudio de este trabajo se encuentra según el investigador Antonio Rodríguez, en clara tendencia progradante y de acumulación de sedimentos, como resultado de procesos geomorfológicos y tectónicos ajenos a las acciones a corto plazo. Sin embargo, pese a esta tendencia natural, el sistema dunar se está erosionando tal y cómo se ha analizado en los resultados obtenidos.

Finalmente puede concluirse, que la acción combinada de las siguientes acciones, condicionadas por las características de la zona de estudio, han influido en los cambios observados de la zona de estudio. El aumento del rango de marea así como el de altura media de oleaje, la tendencia alcista de velocidad media del viento en los últimos años y la construcción del dique Juan Carlos I son los principales agentes estudiados en este TFM que han producido la pérdida de sistema dunar en la zona de las Dunas de Doñana.

CAPÍTULO 6: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

“Solamente aquel que construye el futuro tiene derecho a juzgar el pasado.”

- Friedrich Nietzsche -

En lo que concierne a las líneas futuras de investigación relativas a este trabajo, se han detectado los siguientes puntos de mejora o temática complementaria a lo estudiado en este TFM:

- En primer lugar, resultaría muy útil la validación de estos resultados con los resultados obtenidos con un número mayor de imágenes. En este trabajo, debido a la disponibilidad de imágenes gratuitas se han analizado 2-3 imágenes por década. Poder realizar este estudio con frecuencias de tomas de datos más estrechas implicaría unos resultados aún más concluyentes.
- También, en lo referente a la calidad de las imágenes, resultaría interesante poder realizar este estudio con imágenes de muy alta resolución, con píxeles de 1x1 metros. Los sensores actuales en satélites privados ya ofrecen esta resolución, e incluso menor. Con la debida financiación del proyecto se obtendrían resultados de mayor detalle.
- Podría también analizarse otra zona del tramo litoral de Doñana, para encontrar patrones comunes y poder analizar los resultados en el conjunto de la zona.
- Analizar cómo influyen únicamente los episodios de temporales a la zona de estudio, con el fin de detallar la influencia que estos tienen sobre las dunas y el perfil de playa.
- Se podría estudiar la zona desde el punto de vista de un modelo oceánico e hidrodinámico. Para ello se necesitarían varias batimetrías, con situaciones antes y después de la construcción del dique. Con esto se podría analizar el flujo de sedimentos a lo largo de la costa y la influencia exacta que una infraestructura marítima tendría sobre la zona de estudio. Estudiar el transporte neto de sedimentos y la evolución de la corriente de deriva litoral a lo largo de la costa. No se ha procedido en este trabajo a analizar la variabilidad en su estudio. Convendría relacionar las conclusiones planteadas en este estudio con esta variable. Comentar que los datos batimétricos son caros de obtener, se necesita de una campaña batimétrica para su obtención.
- También se podría enfocar el estudio sobre el análisis y estudio la influencia de aporte de sedimentos del río Guadalquivir sobre la zona este del litoral estudiado. Analizar su evolución a lo largo de los años y enfocar el estudio a cómo las presas de regulación han influido sobre el aporte de sedimentos y a la forma de la desembocadura.
- Otra línea de trabajo podría consistir en centrar el estudio en analizar la evolución de la tipología de población vegetal sobre la zona de estudio. Habría que tener unas muestras de campo muy exactas sobre los perfiles de firma espectral de cada tipología de vegetación.
- Una vez vista la problemática, también resultaría interesante un proyecto de mejoras para la recuperación del espacio de las Dunas de Doñana. Proyectos de regeneración de arena para el aporte a las dunas, o estudiar si introducir una tipología de vegetación o barreras dunares pueden impedir la erosión de los sucesivos trenes dunares.

BIBLIOGRAFÍA

- Análisis de varianza de una vía.* (22 de ABRIL de 2018). Obtenido de http://vassarstats.net/anova1u_esp.html
- A. Requena, R. Q. (28 de Enero de 2018). *Nuevas Tecnologías y Contaminación de Atmósferas.* Universidad de Murcia. Obtenido de <http://www.um.es/LEQ/Atmosferas/Ch-III-3/F33s1p1.htm>
- AEMET. (17 de 11 de 2017). *AEMET.* Obtenido de <https://opendata.aemet.es/centrodedescargas/productosAEMET?>
- Aguilar-Correa, C., & López-Ruiz, A. (2016). *Modelado hidrodinámico de la Flecha de El Rompido y su entorno.* Sevilla: Universidad de Sevilla.
- ANDALUCIA, I. D. (11 de 01 de 2018). *JUNTA DE ANDALUCIA.* Obtenido de <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/DERA/>
- Antonio Rodríguez-Ramírez, J. M. (2008). The impact of man on the morphodynamics of the Huelva coast (SW Spain). *Journal of Iberian Geology.*
- Ballesta, M. (1998). *Revista Social Geológica de España, 11 (3-4), 285-296.*
- Ballestas, M., Morales, J., & Acosta, E. (1998). Efecto erosivo de los temporales del invierno 1995-1996 sobre la playa de Mazagón (Huelva, SO de España). *Revista Soc Geológica España, 285-296.*
- Borrego, J. (1992). *Sedimentología del estuario del río Odiel. Huelva.* Sevilla: Tesis Doctoral de la Universidad de Sevilla.
- Borrego, J. (1992). Sedimentología del estuario del Río Odiel. Huelva. SW. España. Tesis Doctoral. *Universidad de Sevilla, 308.*
- CEDEX. (1991). Dinámica litoral de la flecha de El Rompido (Huelva). *Centro de estudios y experimentación de Obras Públicas, 100.*
- CEEPYC. (1979). Plan de estudio de la dinámica litoral de la Provincia de Huelva. Informe Dirección General de Puertos y Costas. *Centro de Estudios y Experimentación de Puertos, 37.*
- Chamorro, G. (2016). Fenómenos de propagación de Oleaje. Apuntes de asignatura de Puertos y Costas. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio.* Barcelona: Ariel.
- CLIMATE DATA. (14 de Enero de 2018). Obtenido de <https://es.climate-data.org/>
- Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. (2010). *Guía de las especies de interés de la flora de Doñana y su Comarca.* Consejería de Medio Ambiente.
- CSIC. (02 de Mayo de 2018). *Servidor de Imágenes Landsat y productos derivados de Doñana .* Obtenido de <http://venus.ebd.csic.es/imgs/>
- Cuena, G. (Madrid). Proyecto de regeneración de las playas de Isla Cristina. *Informe del Servicio de Costas del Ministerio de Obras Públicas y Turismo, 100.*
- CURSO GEOGRAFIA DEL MAR. (14 de Enero de 2018). *Corrientes inducidas por el oleaje.* Obtenido de http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h623.html
- Curso SIG nivel 1 CREA. (24 de 01 de 2018). *www.linkedin.* Obtenido de <https://es.slideshare.net/rodbece/modulo1-b-imagenessatelitales>
- Cushnie, J. (1985). *The effect of spatial filtering on scene noise and boundary detail in Thematic Mapper imagery.*
- F. Ruiz, L. C.-R. (2003). Analysis of the recent storm record in the south-western Spain coast: implications for

- littoral management. *The Science of the Total Environment*, 189-201.
- GOOGLE MAPS. (14 de Enero de 2018). www.google.com.
- HIDTMA. (2000). Estudio Integral de la Costa de Huelva. Technical Report, Ministerio de Medio Ambiente.
- Huelva Buenas Noticias. (14 de Enero de 2018). La Autoridad Portuaria de Huelva desvía y corta el tráfico del dique Juan Carlos I para mejorar el firme de la carretera. *Huelva Buenas Noticias*.
- Huelva, E. L. (18 de Marzo de 2013). El espigón bajo sospecha. *Huelva Información*.
- Instituto de Cartografía y Estadística de la Junta de Andalucía. (28 de 11 de 2017). *DATOS ESPACIALES DE REFERENCIA DE ANDALUCIA*. Obtenido de <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/DERA/>
- JET PROPULSION LABORATORY (ASTER). (31 de ENERO de 2018). Obtenido de <https://speclib.jpl.nasa.gov/>
- Juidías, E. R. (2006). Inventario y cartografía del paisaje. *Research Gate*.
- JUIDÍAS, E. R. (2015). Apuntes de asignatura de Teledetección: Introducción a la teledetección, principios físicos y plataformas. *Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Sevilla*.
- Junta de Andalucía. (s.f.). Recuperado el 15 de Octubre de 2017, de <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/porta/web/menuitem.f497978fb79f8c757163ed105510e1ca/?vgnextoid=a250ee9b421f4310VgnVCM2000000624e50aRCRD&vgnnextchannel=39fd545f021f4310VgnVCM1000001325e50aRCRD>
- LANDSAT EXPLORER. (18 de 02 de 2018). *LANDSAT EXPLORER*. Obtenido de <http://landsatexplorer.esri.com/>
- Menanteau, L. (1979). Les Marismas du Guadalquivir. Exemple de transformation d'un paysage alluvial au cours de Quaternaire recent. *Universidad de Paris-Sorbonne*.
- Menanteau, L. (These 3e cycle). *Les Marismas du Guadalquivir. Exemple de transformation d'un paysage alluvial au cours du Quaternaire récent*. Paris-Sorbonne.
- MINISTERIO DEL PODER POPULAR PARA CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN. (28 de ENERO de 2018). *FUNDAMENTOS BÁSICOS DE TELEDETECCIÓN. GOBIERNO DE VENEZUELA*. Obtenido de <http://slideplayer.es/slide/11636922/>
- Ojeda., J. (1988). *Aplicaciones de la teledetección espacial a la dinámica litoral (Huelva): geomorfología y ordenación del territorio*. Sevilla.
- Orihuela, J. J. (31 de Enero de 2018). *Comunicaciones Satelitales*. Obtenido de <http://satscom.blogspot.com.es/2013/03/comunicaciones-satelitales.html>
- Pendón, J. B. (1989). Caracterización del ciclo mareal en la desembocadura del Río Piedras (Huelva). . *Comunicaciones XII Congreso de Sedimentología-Barcelona*, 97-100.
- Puertos-del-Estado. (2 de 1 de 2018). Obtenido de www.puertos.es
- Ramírez-Juidías, E. (2015). Use of satellite images to study erosion processes in the Isla Cristina salt-marshes. *Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos. XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, (pág. 5). Sevilla.
- Ramírez-Juidías, E. (2016). Sedimentary processes in the Isla Cristina salt-marshes: Geomorphological changes of landscape. *Ocean & Coastal Management*.
- Ramírez-Juidías, E., & Yanes-Figueroa, J. (2017). Estudio Medioambiental del municipio de Almadén mediante teledetección. *Interciencia*, 2(13).
- REDIAM. (17 de ENERO de 2018). *Blog de la comunidad de usuarios de la REDIAM*. Obtenido de <https://comunidadrediam.wordpress.com/2014/09/18/teledeteccion-fundamentos-basicos/>
- Río, L. d., Gracia, J., Puro, L. C., & Rodríguez, J. (2003). Cuantificación de procesos de erosión costera en el litoral suratlántico español. Primeros resultados. *Geogaceta*.

- Rodríguez-Ramírez, A. (1997). Cambios morfológicos y tasas recientes de erosión-depósito en la costa atlántica oriental de Huelva. *Geogaceta*.
- Rodríguez-Ramírez, A. R. (1997). Evolución reciente de la red hidrográfica de las marismas del Guadalquivir. *Cuaternario Ibérico, AEQUA. Huelva*, 137-139.
- Rodríguez-Ramírez, A., & Cáceres-Puro, L. (2000). Dinámica y evolución de flechas litorales: el litoral onubense (SO, España). *ResearchGate*.
- Rodríguez-Ramírez, A., & Morales, A. (2009). Estudio Morfodinámico del litoral de la urbanización de Matalascañas. *Nuevas contribuciones sobre geomorfología Litoral*.
- Ruiz, A. L. (2013). Apuntes de la asignatura: Gestión Integral de Puertos y Costas. En *Procesos Costeros y Herramientas Básicas* (pág. 123). Granada: Universidad de Granada.
- S.N. Goward, D. S. (2005). *Landsat 2005: Time to act*. Space News.
- SALINERO, E. C. (2008). *TELEDETECCIÓN AMBIENTAL- LA OBSERVACIÓN DE LA TIERRA DESDE EL ESPACIO*. BARCELONA: ARIEL SA.
- SERVICIO GEOLOGICO ESTADOUNIDENSE. (31 de ENERO de 2018). Obtenido de <https://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html>
- USGS. (28 de Enero de 2018). *Landsat Missions*. Obtenido de <https://landsat.usgs.gov/how-does-landsat-8-differ-previous-landsat-satellites>
- USGS. (14 de 2018 de Enero). Obtenido de Earth Explorer (Online): <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- Valderrama, F. (2017). Apuntes asignatura de Teledetección. La imagen digital. En *Universidad de Sevilla* (pág. 17). Sevilla.
- Vanney, J. (1970). *L'hydrologie du Bas Guadalquivir*. Madrid: Dpto Geografía Aplicada CSIC.
- Wikipedia. (06 de Febrero de 2018). *Landsat3*. Obtenido de https://en.wikipedia.org/wiki/Landsat_3
- Zazo C., J. S. (1994). Holocene sequence of sea-level fluctuations in relation to climatic trends in the Atlantic-Mediterranean linkage coast. . *Journal of Coastal Research*.

