



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Geomática y
Topografía

Estudio Geomorfológico en los Entornos Costeros con Mareas mediante la Extracción Automática de Líneas de Costa de Imágenes de Satélite de Resolución Media

Creación de Herramientas Analíticas y Aplicación de Metodologías sobre la Costa de Lisboa

Autor: Pablo Pinto Santos | En colaboración con CGAT
pabpinsa@topo.upv.es

Tutor:

Josep Eliseu Pardo Pascual
jepardo@cgf.upv.es

Cotutor:

Ángel Antonio Balaguer Beser
abalague@mat.upv.es



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA GEODÉSICA
CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

Valencia, Septiembre de 2016





*“La geomática es como el amor: una idea simple
que puede complicarse”*

ANÓNIMO

Foto de portada: “Al fondo de Tossa del Mar”. Autoría y cortesía de Juan Miguel Sobrón Dasilva.



Agradecimientos

Si he usado más de cien páginas para escribir este trabajo, no me quiero ni imaginar las que tendría que usar para dar las gracias a todas las personas que me han apoyado y he conocido durante mis estudios en geomática de estos 4 años.

Si echo la vista atrás, recuerdo que me mudé a Valencia con una idea clara “¡Quiero ser Topógrafo!”, probablemente con eso me hubiera conformado, sin embargo, acabo de terminar la carrera y presiento que soy mucho más que un “Topógrafo”. Nunca hubiera imaginado que la topografía solo era un preludio a la geomática, y de esta forma, descubrí sus otras muchas disciplinas como la fotogrametría, la teledetección, los SIG, la obra o la geodesia –por desgracia sigo sin tener una favorita-, y todas sus aplicaciones y ventajas que esta puede ofrecer a la sociedad. Por eso, hoy presiento que soy mucho más que un topógrafo, y es que realmente “Soy un Ingeniero en Geomática”. Quizás el mundo (y sobre todo España) aún no esté completamente preparado para tratarme como tal –¿Quizás Tesla en sus época se sentía de igual manera?-pero afortunadamente la tecnología avanza rápido, el mundo cambia y solo es cuestión de esfuerzo y paciencia que la geomática y sus ingenieros se ganen el reconocimiento que tanto se merecen. Creo sinceramente que es este “amor” –el que me han transmitido los profesores de mi carrera y el que siento hacia esta ciencia- el motor que impulsará la geomática a lo más alto. Por esta razón mis primeros agradecimientos son para la Escuela de Ingenieros en Geodesia, Cartografía y Topografía de la UPV, y sobre todo a sus estudios, instalaciones, profesores y personal. Me cuesta imaginar una escuela mejor en dónde se pueda estudiar geomática.

Mis segundos agradecimientos son para mi familia, sin ella poder estudiar esta carrera hubiera sido imposible. Gracias a mi padre Carlos Pinto, por hacer el sacrificio y estar trabajando en países como Indonesia o Iraq para que sus hijos tengan una vida y unos estudios dignos. Sin duda es todo un ejemplo a seguir y no necesita nada más para ser un padre estupendo. Gracias a mi madre Julia Santos por haberme obligado en 4º de la ESO a escoger la rama de ciencias y por demostrarme que estaba equivocado al pensar que: “Los mapas son para gente de letras” –la cierto es que por aquel entonces odiaba las matemáticas-. A ella también le debo muchas cosas buenas que he hecho gracias sus consejos que rebosan sabiduría, y es verdad eso que dicen de: “No hay nadie más inteligente que tu madre”, la verdad es que no... Gracias a mi hermano Jorge Pinto, con el he podido compartir mis mayores frustraciones y es capaz de aguantar hasta la broma más tonta que hago. Sin duda aguantar mis locuras no debe ser tarea fácil y nunca sabes si otras personas serán capaces de hacerlo, pero con mi hermano no tengo esa duda.

Gracias a mis tutores Josep y Ángel, por ofrecerme la oportunidad de colaborar con el CGAT y experimentar lo que es estar en un grupo de investigación, sin duda he aprendido muchas cosas y ha sido una experiencia muy enriquecedora. Gracias también a mis compañeros de seminario Pablo Crespo, Marta Sapena, David y Elena Sánchez por ayudarme con este trabajo y compartir risas, penas, frustraciones, viajes a por fango a la Albufera y alguna que otra cerveza. Gracias también a los componentes del maravilloso grupo CGAT, en especial a Jesús Palomar por su ‘sal2shp’ –¿Qué hubiera hecho sin él?-.

Me gustaría agradecer de manera especial a mi querido Tío (Juan Miguel Sobrón) por sus estupendas fotos de la costa, a mi amigo Alexey por razones obvias, al equipo de Equitación Deportiva Quilis Galán, sobre todo a mi maestro y mentor Pepe Quilis por ser el mejor y motivarme no solo para la hípica, sino para la vida misma; y a mis compañeros de la carrera, en especial a Lluís, Sol, Jaime, Isma y Reda por los cafés en el Trinquet, los ratos entre clases y las cenas de gala.

Y por último mil gracias a todas aquellas personas que me estoy dejando (se me está acabando la página) y que han contribuido en mayor o menor medida -pero no por ello de manera menos importante- a mi desarrollo como persona y como ingeniero. Ojalá pudiera regalaros esta sensación de agradecimiento a todos y cada uno de vosotros.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	10
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	14
1.2. OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO	19
2. MARCO TEÓRICO	23
2.2. GEOMORFOLOGÍA COSTERA	23
2.2.1. Terminología Costera	23
2.2.2. Movimiento Sedimentario.....	24
2.2.3. Costas de Erosión y de Acumulación.....	26
2.2.4. Afecciones Artificiales a la Deriva Litoral.....	26
2.1. CONSTELACIÓN LANDSAT	29
3. MARCO FÍSICO	35
3.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	35
3.2. RASGOS GENERALES	37
3.3. GEOLOGÍA Y DINÁMICA COSTERAS	42
3.3.1. Composición del Entorno y Geomorfología	42
3.3.2. Dinámica Costera.....	44
4. METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO	49
4.1. DATOS DE PARTIDA NECESARIOS	49
4.1.1. Zonas de Estudio.....	49
4.1.2. Imágenes Landsat	50
4.1.3. Ortofotografías	51
4.1.4. Datos Mareales.....	54
4.1.5. Playa de Estudio.....	58
4.1.6. Línea de Referencia	59
4.1.7. Estructuras Artificiales Costeras	60
4.2. EXTRACCIÓN DE LAS LÍNEAS DE COSTA.....	61
4.2.1. Proceso de Extracción Semi-automática: SELI.....	61
5. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	69
5.1. HERRAMIENTAS CREADAS	69
5.1.1. Análisis Espacial	69
5.1.2. Análisis Estadístico.....	74
5.2. PROCESO ANALÍTICO EN LA COSTA LISBONESA	81
5.2.1. Análisis Espacial	81
5.2.2. Análisis Estadístico.....	85

5.2.3.	Análisis de un Conjunto de Líneas de Costa Manualmente Depuradas.....	105
6.	CONCLUSIONES.....	111
6.1.	SOBRE LA METODOLOGÍA	111
6.1.1.	La Teledetección y SELI.....	111
6.1.2.	Herramientas Creadas	112
6.2.	SOBRE LA ZONA DE ESTUDIO.....	114
6.2.1.	Fenómenos del Océano Atlántico	114
6.2.2.	Procedimiento y Resultados del Análisis.....	115
6.2.3.	Fragilidad y Vulnerabilidad de las Costas	117
6.3.	SOBRE EL PROYECTO ACADÉMICO	118
7.	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....	121
	ANEXO 1: LISTA DE DATOS DE ESCENAS LANDSAT → BDA.....	125
	ANEXO 2: PROCESO DE OBTENCIÓN DE ORTOFOTOGRAFÍAS	127
	ANEXO 3: FUNCIONES ESPECÍFICAS DEL ANÁLISIS ESPACIAL	130
	ANEXO 4: FUNCIONES ESPECÍFICAS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Fotografía artística “Costas Acantiladas”. Fuente: fotonatura.org.....	14
Figura 1.2: Desarrollo antrópico sobre una isla barrera. Fuente: greenpeace.org.....	15
Figura 1.3: Daños provocados por temporales en la costa de Caparica (1964). Fuente: Aleixo Pinto 2015	16
Figuras 1.4: Daños provocados por temporales en la costa de Caparica (2001 y 2007). Fuente: Aleixo Pinto 2015.....	16
Figura 1.5: Líneas de costa históricas. Fuente: Veloso-Gomes 2009	17
Figura 1.6: Evolución de perfiles transversales a la costa de Caparica. Fuente: Euroasion Case Study.....	17
Figura 1.7: Retroceso con magnitud aproximada de 200 metros en la línea de costa. Fuente: Aleixo Pinto 2015.....	18
Figura 1.8: Foto artística “Playa del Moro”. Fuente: Cortesía de Juan Miguel Sobrón Dasilva	20
Figura 2.1: Elementos del litoral. Fuente: Thurman & Trujillo 2002.....	23
Figura 2.2: Cambios estacionales en las playas. Fuente: Thurman & Trujillo 2002	25
Figura 2.3: Corrientes longitudinales y deriva litoral. Fuente: Thurman & Trujillo 2002	25
Figura 2.4: Erosión y deposición sobre los espigones. Fuente: Thurman & Trujillo 2002	27
Figura 2.5: Procesos de erosión sobre un malecón. Fuente: Thurman & Trujillo 2002.....	27
Figura 2.6: Misiones Landsat sobre la línea temporal. Fuente: USGS Landsat Project Factsheet.....	29
Figura 2.7: Expansiones urbanas sobre la costa de Dubai. Fuente: USGS Landsat Project Factsheet.....	30
Figuras 2.8: Escena Landsat 7 sin bandeado (izquierda) y con bandeado (derecha).	32
Figura 2.9: Ilustración de las características espectrales de las bandas de los sensores ETM+ y OLI. Fuente: USGS Landsat project.	32
Figura 2.10: Curvas espectrales para las coberturas de vegetación, agua y suelo desnudo.	33
Figura 3.1: Distritos próximos a Lisboa. Mapa Base: OSM Base Map.....	35
Figura 3.2: Conchelos de Lisboa, Santarém y Setúbal. Mapa Base: OSM Base Map.	36
Figura 3.3: Vista aérea del área metropolitana de Lisboa. Fuente: Internet.....	36
Figura 3.4: Mapa de densidad de población de Portugal. Fuente: A. Ferreira Caracterización de Portugal.	36
Figura 3.5: Climograma de Lisboa. Fuente: wikipedia.org.....	37
Figura 3.6: MDE del área metropolitana de Lisboa. Fuente: Geografía Física y Ambiente de Lisboa.	38
Figuras 3.7: Acantilado fósil de la costa de Caparica. Fuente: Geografía Física y Ambiente de Lisboa.....	38

Figura 3.8: Mapa de pendientes del área metropolitana de Lisboa. Fuente: Geografía Física y Ambiente de Lisboa.....	39
Figuras 3.9: Imágenes de los acantilados de la zona de Arrábida (izquierda) e imagen del acantilado fósil (derecha). Fuente: Geografía Física y Ambiente de Lisboa.	39
Figura 3.10: Cuencas hidrográficas y redes fluviales de Lisboa. Fuente: A. Ferreira Caracterización de Portugal.	40
Figura 3.10: Mapa de reservas de Lisboa de la red Natura 2000. Fuente: Geografía Física y Ambiente de Lisboa.....	41
Figura 3.11: Mapa geológico de Lisboa. Fuente: Geografía Física y Ambiente de Portugal.....	42
Figura 3.12: Leyenda del mapa geológico de Lisboa. Fuente: Geografía Física y Ambiente de Portugal... ..	43
Figura 3.13: Perfil longitudinal del acantilado fósil. Fuente: Geografía Física y Ambiente de Portugal.....	43
Figura 3.14: Evolución de perfiles transversales del acantilado fósil. Fuente: Geografía Física y Ambiente de Portugal.	43
Figura 3.16: Corrientes superficiales sobre la desembocadura del tajo. Fuente: Aleixo Pinto 2015.	44
Figura 3.15: Principales vientos y corrientes oceánicas del atlántico. Fuente: Thurman & Trujillo 2002..	44
Figura 3.17: Surfista en las costas de Lisboa (Nazaret). Fuente: Internet.	45
Figuras 3.18: Dirección y altura del oleaje sobre las costas lisbonenses. Fuente: Aleixo Pinto 2015.	45
Figuras 3.19: Estadísticas mensuales de la altura del oleaje sobre la costa de Lisboa. Fuente: Aleixo Pinto 2015.....	45
Figuras 3.20: Dirección de la deriva litoral sobre la costa de Caparica. Fuente: Euroasion Case Study.....	46
Figura 4.1: Zonas de estudio definidas sobre el mapa.Mapa Base: OSM Base Map.	49
Figura 4.2: Descarga de escenas Landsta sobre Earthexplorer.	50
Figura 4.3: Ortofotos obtenidas del servicio.....	53
Figura 4.4: Ortofotos obtenidas del servicio.....	54
Figura 4.5 Repositorio del mareógrafo de Cascais.....	55
Figura 4.6: Diferencias gráficas entre datos mareales ‘.raw’ y ‘.aq’.....	56
Figuras 4.7: Diferentes escenas Landsat con comportamiento mareal creciente y decreciente.	57
Figuras 4.8: Vistas áreas de la playa de estudio. Fuente: Internet.	58
Figuras 4.9: Zonas urbanas adyacentes a la playa de estudio. Fuente: Internet.....	58
Figuras 4.10: Entornos naturales y campos de dunas de la playa de estudio. Fuente: Internet.	59
Figuras 4.11: “Lagoa de Albufeira” sobre la playa de estudio. Fuente: Internet.....	59
Figura 4.12: Línea de referencia y sectores definidos sobre la playa de estudio.	59
Figura 4.13: Construcciones artificiales presentes en la playa de estudio.	60
Figura 4.14 Flujo de trabajo básico de SELI.....	61

Figura 4.15: Estructura satélite-banda del proyecto	62
Figura 4.16: Recortes nubosos sobre zonas 2 y 3 pero despejados sobre zonas 0 y 1.....	63
Figura 4.17: Procesos de detección de la línea de costa a nivel de pixel. Fuente: Pardo & Almonacid 2014.	63
Figura 4.18: Procesos de detección de la línea de costa a nivel sub-pixel. Pardo & Almonacid 2014.	64
Figura 4.19: Línea a nivel de pixel (azul), diferentes posiciones obtenidas de la línea de costa (blanco), línea a nivel sub-pixel calculada (amarillo). Pardo & Almonacid 2014.....	64
Figura 4.20: Resumen del proceso 'sal2shp'.....	66
Figura 4.21: Línea de costa LC82040332013187LGN00_B5 obtenida por proceso de extracción (verde) y por proceso de georreferenciación (roja).	67
Figura 5.1: Esquema de Model Builder y principales pasos del análisis espacial.	72
Figura 5.2: Tabla de atributos resultado de cada línea de costa del análisis espacial.....	73
Figura 5.3: Esquema de trabajo por satélite Landsat y banda infrarroja.....	75
Figura 5.4: Ordenación bidimensional de los datos de análisis.	76
Figura 5.5: Ordenación tridimensional de los datos de análisis.	76
Figura 5.6: Resumen de proceso de concatenación por NIR, MIR, y FIR.	77
Figura 5.7: Matriz de datos Fecha, Distancia media y Variabilidad espacial por sector.....	77
Figura 5.8: Ejemplo del ajuste lineal convencional (rojo) y ponderado (naranja).	79
Figura 5.9: Gráfico de ejemplo de medias anuales.....	80
Figura 5.10: Gráfica de ejemplo de tendencia por todas las fechas.....	80
Figura 5.11: FD creados para el análisis espacial.	82
Figura 5.12: Paso 1 del análisis espacial ejemplificado para la playa de estudio.	82
Figura 5.13: Paso 2 del análisis espacial ejemplificado para la playa de estudio.	83
Figura 5.14: Paso 3 del análisis espacial ejemplificado para la playa de estudio.	83
Figura 5.15: Paso 4 del análisis espacial ejemplificado para la playa de estudio.	84
Figura 5.16: Representaciones de resultados obtenidos por el análisis especial.....	84
Figura 5.17: Diferentes comportamientos geomorfológicos estudiados por medias anuales.....	85
Figura 5.18: Distribuciones Chi-cuadrado y t-Student para diferentes grados de libertad.	87
Figura 5.19: Funciones de distribución F-Snedecor para diferentes grados de libertad	87
Figura 5.20: Valores de estudio de la fiabilidad estadística del sector 1 (MIR) por los diferentes ajustes.	88
Figura 5.21: Distribución t-Student e intervalos de confianza.....	89
Figura 5.22: Distribución F-Snedecor e intervalos de confianza.....	89
Figura 5.23: Representación por bandas de la fiabilidad de los sectores por medias anuales.	90
Figuras 5.24: Ejemplos de gráficas de sectores con una tendencia fiable.....	91

Figura 5.25: Ejemplos de gráficas de sectores con una tendencia no fiable.	91
Figuras 5.26: Ejemplos de gráficas de sectores entre las bandas MIR y FIR.	92
Figura 5.27: Aportes de arena entorno al año 2008. Fuente: Veloso-Gomes 2009.	93
Figura 5.28: Tendencias lineales del sector 4 si se eliminan los aportes de arena artificiales.	93
Figura 5.29: Procesado del análisis estadístico de las diferentes clasificaciones mareales.	94
Figura 5.30: Representación de las tendencias evolutivas aplicadas a los sectores	100
Figura 5.31: Ejemplificación de instantes de rango mareal elevado, con un comportamiento mareal creciente.	102
Figura 5.32: Ejemplo de fuentes de error en la línea de costa por oleaje.	103
Figura 5.33: Ejemplo de fuentes de error en la línea de costa por temporales.	103
Figura 5.34: Ejemplo de fuentes de error en la línea de costa por vegetación.	104
Figura 5.35: Ejemplo de fuentes de error en la línea de costa por fenómenos puntuales.	104
Figuras 5.36: Línea de costa LC82040332013187LGN00_B6 depurada manualmente.	105
Figura 5.37: Gráfica de tendencia del sector 2 (MIR).	107
Figuras 5.38: Estados de la playa de ‘Caparica’ antes, durante y después del aporte llevado a cabo en Julio de 2014. Fuente: Cortesía de Elena Sánchez García.	108
Figura 5.39: Gráfica de tendencia del sector 4 (MIR).	109
Figura 5.40 Resultados de tendencias con líneas depuradas manualmente.	109
.....	109
Figura 6.1: Foto artística “Costa del País Vasco”. Fuente: Cortesía de Juan Miguel Sobrón Dasilva.	113
Figura 6.2: Foto artística “Atardecer y Pasarela”. Fuente: Cortesía de Juan Miguel Sobrón Dasilva.	118
Figura A2.1: Sinopsis de la orden “gdal_translate”. Fuente: http://www.gdal.org/gdal_translate.html	127
Figura A2.2: Fichero ‘.xml’ descriptivo para el servidor y la extensión de la petición.	128
Figura A3.1: Programa ‘DF’ sobre Model Builder.	130
Figura A3.2: Esquema general de ‘SB’ sobre Model Builder.	130
Figura A3.3: Función de distribución normal con el porcentaje de área encerrada según los valores que la definen (media y desviación típica). Fuente: Internet.	131
Figura A3.4: Esquema de ‘R2txt’ sobre Model Builder.	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Descripción de los elementos del identificador de escena Landsat.	31
Tabla 2.2: Anchos de banda y longitud central de bandas de los sensores TM y OLI.	32
Tabla 2.3: Aplicaciones de las diferentes bandas de las constelaciones Landsat.....	33
Tabla 3.1: Parámetros climáticos de Lisboa ordenados por meses. Fuente: Wikipedia.org	37
Tabla 4.1: Extensión y descripción de las zonas de estudio.....	49
Tabla 5.1: Comparativa de gráficas de tendencia neta para la clasificación 2.1.	95
Tabla 5.2: Comparativa de gráficas de tendencia neta para la clasificación 2.2.	96
Tabla 5.3: Comparativa de gráficas de tendencia neta para la clasificación 3.1.	97
Tabla 5.4: Comparativa de gráficas de tendencia neta para la clasificación 3.2.	98
Tabla 5.5: Comparativa de resultados de tendencia evolutiva entre clasificaciones mareales.	101
Tabla 5.6: Lista de datos de la escenas depuradas manualmente.	105
Tabla 5.7: Gráficas resultado de sectores representativos para las líneas depuradas manualmente.	107



INTRODUCCIÓN

En este apartado explicamos el origen y la razón de este trabajo así como su naturaleza, objetivos principales y antecedentes de la zona de estudio. La introducción es quizás la parte más simple del proyecto, pero es sin duda la más importante.

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento recoge la síntesis del Trabajo Final de Grado (TFG) en **Ingeniería Geomática y Topografía** del alumno Pablo Pinto Santos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Geodesia, Cartografía y Topografía (ETSIGCT) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

Una parte de este TFG se ha desarrollado aprovechando los conocimientos adquiridos a través de una beca de colaboración que le ha sido concedida al alumno por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del gobierno de España, para la iniciación en las tareas de investigación en el departamento de Matemática Aplicada de la Universidad Politécnica de Valencia.

Para la confección de este TFG, el alumno ha colaborado con las tareas de investigación del grupo **CGAT** (Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección), en concreto, el alumno ha utilizado algunos programas informáticos desarrollados por dicho grupo y ha aprovechado parte de los conocimientos adquiridos por Elena Sánchez García (grupo CGAT) sobre la costa Portuguesa a través de una estancia de doctorado en la Universidad de Lisboa a finales del año 2015. Ello ha motivado la elección de la costa de Lisbonense, específicamente la Costa de Caparica, como zona de aplicación.

Este trabajo académico tiene por objetivo la aplicación de metodologías y desarrollo de herramientas para el estudio de los entornos costeros mediante la extracción y tratamiento de numerosas líneas de costa. El trabajo ha tenido como fuente principal de datos las imágenes de satélite de resolución media de la flota espacial **Landsat** y la extracción de las líneas de costa se ha llevado a cabo aplicando el software **SELI** (Shoreline Extraction form Landsat Imagery), el cual ha sido desarrollado en el grupo CGAT.

De este trabajo, se espera poder obtener unos resultados los cuales puedan ser estudiados para poder conocer los alcances y las limitaciones de las herramientas y metodologías empleadas en los litorales atlánticos portugueses, las cuales son especialmente difíciles de administrar ambientalmente, dado su amplio régimen mareal y su enérgico oleaje que azota sus costas continuamente.

Se espera que las herramientas desarrolladas en este proyecto puedan ser utilizadas en trabajos futuros y que la metodología aplicada pueda ser comparada con otras para que se siga colaborando en tareas de investigación del grupo CGAT.

El que este trabajo se haya realizado sobre la costa de Lisboa viene condicionado por su naturaleza colaborativa, y aunque la parte de extracción y la utilización de SELI han sido importantes, el esfuerzo de este TFG está enfocado a las herramientas creadas para el análisis de los entornos costeros mediante las líneas de costa que se extraen de SELI.

El haber desarrollado y testado estas herramientas en un entorno tan conflictivo -y para nosotros desconocido- como lo son las costas atlánticas, ha ofrecido una dificultad añadida –incluso en las fases de obtención de datos- pero ha obligado a usar muchas de las herramientas y conocimientos adquiridos en los estudios del grado en geomática para dotar de robustez cartográfica, matemática y analítica todas las tareas y pasos que se explican en las siguientes páginas de este documento.

1.1. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Las **regiones costeras** son áreas de gran importancia en numerosos aspectos. Estas son altamente dinámicas y presentan una alta fragilidad y vulnerabilidad (Derrode & Chorbel, 2001) frente a cualquier afección que se realice sobre ellas.

Respecto a las afecciones naturales, las regiones costeras se ve en constantes cambios debido a la acción directa del oleaje la cual arremete contra el litoral en más de 10.000 veces al día, descargando así su gran cantidad de energía sobre un espacio estrecho y alargado en un corto periodo de tiempo. Este oleaje es el responsable de la erosión y deposición de los sedimentos costeros que resultan en cambios geomorfológicos diarios, semanales, mensuales, estacionales y anuales (Thurman & Trujillo, 2002). Todo ello convierte a los espacios costeros en uno de los medios más difíciles de gestionar desde la perspectiva ambiental (Pardo Pascual, UPV-Ref.: 54).



Figura 1.1: Fotografía artística "Costas Acantiladas". Fuente: fotonatura.org

Durante toda la historia, los humanos se han visto atraídos por los espacios costeros del mundo debido a su clima moderado, su fuente de alimento (pesca marítima), la facilidad de los medios de transporte, las oportunidades recreativas y sus beneficios socio-económicos.

Cerca de **3.200 millones de personas** –aproximadamente la mitad de la población mundial- viven próximas a las costas -o a menos de 200 km del litoral- y estas asientan un gran porcentaje de **actividades socioeconómicas** (Perez-González, 2008), lo que causa un importante impacto en estas regiones naturales. Esta población ya ha producido, y seguirá produciendo, múltiples factores que llevan ligados intensos efectos en las extensas áreas de las zonas costeras mundiales (Valiela, 2006). Estas **afecciones artificiales** normalmente crearán importantes niveles de riesgo, especialmente en aquellos asentamientos con poca elevación sobre el nivel del mar. Además hay que destacar el **carácter turístico** de los litorales, que debido a

su clima cálido y estable regulado por las masas de agua adyacentes, hacen que sean ideales –e incluso se las califique de paraísos- para las actividades recreacionales y las épocas vacacionales.

Esta delicada situación representa un reto para los países costeros, que deben hallar la manera de gestionar la costa sin renunciar al bienestar y la prosperidad actual y futura. La **gestión de riesgos** y la **adaptación** juegan un papel fundamental para afrontar este reto, pero una correcta aplicación de las mismas requiere un análisis y cuantificación de las consecuencias que los eventos extremos y el cambio climático pueden producir en la costa (Magrama, 2007).



Figura 1.2: Desarrollo antrópico sobre una isla barrera. Fuente: greenpeace.org

Cabe destacar también las previsiones a largo plazo. Varios autores afirman que la población que habita en las inmediaciones costeras aumente hasta los **4.800 millones de personas** para el año 2050 (Hinrichsen, 1998) (Lindeboom, 2002). A esto hay que sumarle las declaraciones en la **COP21** (Cumbre del Cambio Climático de París 2015), dónde se indica que es un hecho –y no una opinión- el que el nivel de los mares y de los océanos de todo el mundo aumente significativamente en las próximas décadas, debido al deshielo de los polos y a la influencia humana sobre el sistema climático global. Estos hechos hacen que los numerosos impactos en las costas, tanto naturales como humanos, sean más evidentes y presenten un mayor nivel de **riesgo ecológico**. No cabe duda de que las afecciones en el litoral seguirán prolongándose –y desgraciadamente- aumentarán su impacto en un futuro próximo y lejano.

Por lo tanto, es prioritaria, y de suma importancia, una **administración de los entornos costeros** y litorales, tanto de su dinámica natural, como de sus aspectos socio-económicos y demográficos. Esta administración ha de garantizar una adaptación que prevea con suficiente antelación los impactos, para así poder minimizar, en la medida de lo posible, los efectos colaterales de estos. No hay que olvidar que los litorales son los entornos más cambiantes geomorfológicamente hablando, y si el ser humano se asienta sobre ellos, es su responsabilidad administrar su hábitat de manera responsable.

En este contexto, resulta necesario conocer la evolución de la **línea de costa**, y de ese modo, anticipar y prevenir riesgos e impactos ambientales.

Antecedentes

Aunque en el proyecto hayamos operado sobre casi la totalidad del litoral Lisbonense, nuestra **zona de estudio final**, y en dónde aplicaremos las herramientas de análisis costeras, ha sido la playa más extensa de la zona, que es la que se sitúa al sur del área metropolitana de Lisboa, y se ubica entre los municipios de Almada y Sesimbra. En esta playa de 24 kilómetros de largo encontramos los entornos litorales de **Cova de Vapor** y la **Costa da Caparica**. La elección de esta playa no es aleatoria, la primera razón es debido a que el grupo CGAT tiene pensado aplicar otras metodologías de estudio en la costa de Caparica, y la segunda es debido a la fragilidad y la vulnerabilidad ambiental que ha sufrido esta zona durante los últimos años.

La **erosión** en la costa de Caparica ha sido progresiva y cada vez más grave desde los primeros informes que datan del año 1850. La evolución histórica del entorno se puede resumir en las siguientes acciones y fenómenos:

- **1940:** Erosión de la lengua de arena sobre la Cova do Vapor.
- **1959 - 1963:** Construcción de 2 espigones y malecones de contención en la Cova do Vapor.
- **1957 - 1964:** Episodios de erosión muy severa sobre la Costa da Caparica (Figura 1.3).
- **1969 - 1971:** Construcción de un muro de contención de 2,9 km y 7 espigones sobre la Costa da Caparica.
- **1995 – 2007:** Erosión intensa por la deriva litoral sobre ambas zonas, que dan lugar a retrocesos en la línea de costa de hasta 30 metros, provocan la recesión de dunas, dañan o destruyen numerosas estructuras próximas a la costa y además los temporales causan inundaciones en contadas ocasiones (Figuras 1.4).



Figura 1.3: Daños provocados por temporales en la costa de Caparica (1964). Fuente: Aleixo Pinto 2015



Figuras 1.4: Daños provocados por temporales en la costa de Caparica (2001 y 2007). Fuente: Aleixo Pinto 2015

Esto ha dado lugar a un retroceso en la línea de costa muy significativo y preocupante. El síntoma más evidente de este hecho es la desaparición de la **lengua de arena** por efecto del oleaje en 1940. Esta desaparición coincide además con numerosas afecciones sobre las cuencas hidrográficas de los ríos Tajo y Sorraia, las cuales cortan el flujo de sedimentos sobre los sistemas costeros. Esto puede observarse en la figura 1.5, dónde es evidente el tremendo retroceso de las líneas de costa entre los años 1870 y 1972.

Los cambios no solo se han dado en la línea de costa, sino también en el **perfil transversal** del litoral. En la figura 1.6, vemos la evolución del perfil de la costa de Caparica entre los años 1957 y 1964, dónde se destaca la pérdida en los campos de dunas y el retroceso de las áreas sumergidas. En este periodo de tiempo, la desaparición de la lengua de arena facilitó el transporte de arena a la zona norte (Cova do Vapor), por lo que la costa de Caparica se vio afectada por un proceso de erosión muy acentuado, no solo planimétricamente sino también altimétricamente.

También es importante referirse a la **expansión urbana** que ha ocurrido entre 1972 y 1996 y al creciente **turismo** sobre las costas de Lisboa.

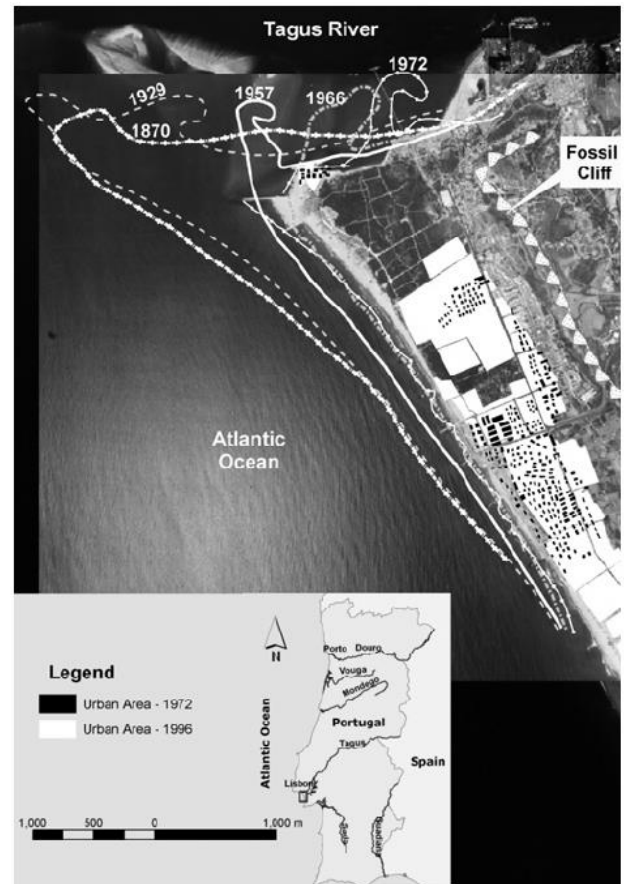


Figura 1.5: Líneas de costa históricas. Fuente: Veloso-Gomes 2009

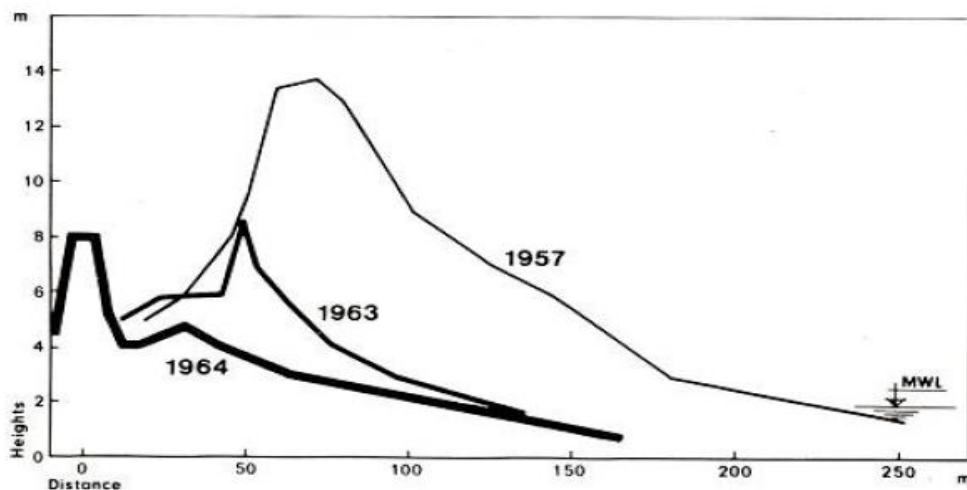


Figura 1.6: Evolución de perfiles transversales a la costa de Caparica. Fuente: Euroision Case Study.

Estos eventos, el incremento de la población y las áreas urbanizadas y la insuficiencia de los planes de manejo y ordenación costera sobre esta zona tan vulnerable; hacen necesarios un seguimiento y un plan de protección frente a la **retirada de la línea de costa**, las **destrucciones de las infraestructuras** y las **inundaciones**.

El plan de administración costera **POOC** (Plano de Ordenamento da Orla Costeira) el cual incluye la Cova do Vapor y la Costa da Caparica, reconoce algunas de las situaciones de riesgo, como por ejemplo:

- El **riesgo** que supone la zona para las **actividades humanas**.
- El **riesgo ambiental** al que se ve expuesta la zona.
- La necesidad **de realizar estudios** de dinámica sedimentaria.
- La propuesta de una serie de **aportes artificiales de arena** a las playas afectadas.

Acorde a este plan, se propusieron diferentes objetivos para la protección de las costas, entre ellos se destacó la construcción de muros de contención (**malecones**) y un campo de **espigones** con 7 estructuras. El propósito de estas estructuras sigue siendo la protección de las instalaciones playeras y áreas urbanas, y la redistribución de los sedimentos costeros.

Sin embargo, a pesar de estas acciones para la estabilidad de la zona, los **temporales del invierno** de 2000-2001, verificaron que:

- **No hay arena** en las playas, permaneciendo parcialmente bajo el agua en niveles de marea alta.
- Las defensas construidas (malecones y espigones) se vieron dañadas y poco útiles en cuanto a sus propósitos de estabilidad sedimentaria.

A la vista de estos acontecimientos se concretó que era necesario proponer objetivos y llevar acabo acciones con una previsión de mayor plazo. Sin embargo se especificó concretamente que estas predicciones se ven muy limitadas debido a los **pocos estudios científicos** y analíticos llevados acabo sobre la zona y a la **carencia de herramientas** disponibles en el mercado.



Figura 1.7: Retroceso con magnitud aproximada de 200 metros en la línea de costa. Fuente: Aleixo Pinto 2015

En definitiva, los fenómenos de los últimos años muestran una costa Lisbonense frágil y vulnerable por efectos de la **deriva litoral**. Las costas además se ven cada vez más pobladas y estas han de soportar una creciente carga turística. Esto hace indispensable una **planificación** y **administración** de las costas dado el potencial urbanístico, económico y natural para el área metropolitana de Lisboa. Estos planes se han de apoyar en una serie de estudios profesionales y técnicos, de los cuales se carece hoy en día, para estudiar y cuantificar las dinámicas costeras y realizar predicciones fiables.

Es en estos antecedentes donde se apoya este trabajo, el cual pretende aplicar una **metodología** que extraiga las líneas de costa de manera semiautomática y se creen unas **herramientas** con las cuales se puedan hacer diversos análisis de los que se obtengan unas **conclusiones** de la zona de estudio para los planes administrativos costeros. No cabe duda de que la costa de Lisboa demanda este tipo de proyectos.

1.2. OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO

Se definen de forma clara los siguientes **3 objetivos principales** para este trabajo:

- 1. Testear el software SELI en otros entornos costeros.** Como también comentaremos más adelante, SELI es un programa semiautomático que extrae líneas de costas a nivel de sub-píxel con una precisión de 5 metros de escenas Landsat, las cuales cuentan con una resolución espacial de 30 metros por píxel. Este software fue desarrollado y testeado sobre el litoral mediterráneo y las costas valencianas. El testear este software en una zona tan diferente como las costas atlánticas, tiene como finalidad conocer el alcance y los inconvenientes que presenta la herramienta. Queda claro que la herramienta de SELI en sí ya es impresionante, debido a que mejora en 6 veces la precisión de la línea de costa de una imagen Landsat, pero la pregunta es: ¿Es igual de buena esta metodología o es extrapolable a otras zonas costeras?
- 2. Crear herramientas analíticas capaces de analizar las líneas de costa extraídas por SELI.** El potencial de utilizar SELI es que se pueden obtener numerosas líneas de costa en pocos años de observación, en concreto, se obtendrán un número proporcional de líneas a las escenas Landsat que se procesen. El analizar las costas con numerosas líneas resulta ser algo diferente, ya que hasta hace poco la cantidad de líneas de costa que se utilizaban para analizar un litoral eran reducidas –estaremos hablando de unas 10 líneas de costa como máximo- y los cambios se detectaban de forma visual y cualitativa; además la diferencia temporal entre líneas era bastante amplia. El analizar numerosas líneas visualmente, con dos o tres años de rango temporal, no revelará las diferencias geomorfológicas la gran mayoría de veces. Por esta razón se necesita del desarrollo de herramientas espaciales y estadísticas que arrojen unos resultados más esclarecedores, que sean fácilmente interpretados y de los que se puedan extraer conclusiones sobre las costas estudiadas. Adicionalmente, el desarrollo geográfico y matemático de estas herramientas no solo debe de arrojar una interpretación cualitativa sobre la costa, sino también **cuantitativa**.
- 3. Analizar, con las herramientas creadas, los entornos costeros de Lisboa.** Se deberá de testear las herramientas creadas sobre nuestra zona de estudio. Con esto se pretende discutir los resultados que se obtienen en las costas de Lisboa y concluir si las herramientas creadas poseen validez y utilidad para el análisis y la administración de los entornos costeros. Sean los resultados satisfactorios o no, se pretenden mencionar una serie de conclusiones acerca de la zona de estudio, y la metodología empleada, para así poder proponer mejoras y futuras líneas de investigación en este campo.

La formulación de estos objetivos es seguramente la fase más importante de este trabajo. El camino para alcanzar estos objetivos llevará consigo una serie de complicaciones a superar en cada fase de este proyecto.

En primer lugar hay que tener en cuenta que para nosotros, las costas atlánticas y la región de Lisboa son entornos completamente desconocidos a nivel geográfico, geomorfológico y administrativo. Esto supone un **reto añadido** ya que se ha de operar sobre una zona desconocida, lo que supondrá profundizar en diversas fuentes y realizar un marco físico descriptivo para poder conocer la zona lo mejor posible. Además el enfrentarse a una región la cual es extranjera, es un inconveniente a la hora de recoger los datos necesarios para este proyecto. Como por ejemplo, y como se verá más adelante, el obtener las ortofotos de la zona de estudio no resultó sencillo y algunos datos como los relacionados con el oleaje de la zona no se llegaron a obtener debido a que se desconocen las fuentes de adquisición.

Por si esto fuera poco, hay que añadir el carácter conflictivo de las costas atlánticas portuguesas, las cuales poseen un amplio **rango mareal** y un **oleaje muy energético**, creados por la dinámica oceánica atlántica. Por lo tanto las líneas de costa extraídas se verán expuestas a numerosos factores los cuales, si no se tratan correctamente, aportarán una cantidad de **“ruido”** y producirán unos resultados difíciles de interpretar y poco representativos. Además, no contamos con algo muy importante en los trabajos geomáticos, que es el poseer unos datos lo suficientemente precisos que actúen como **“verdad terreno”** y sobre los que se pueda comparar los resultados de este proyecto.

No obstante la carencia de datos de “verdad terreno” y las complicaciones de la zona de estudio se pretenden afrontar mediante la extracción de una gran cantidad de líneas de costa de los **archivos Landsat**, los cuales resultan ser los archivos de imágenes satelitales más longevos y continuos de toda la historia. Sin embargo, esto añade otra complicación al trabajo ya que se habrá de tratar y de operar grandes cantidades de información. Esto supone un reto en cuanto a organización, tratamiento, gestión y optimización de los datos que se extraen y de los resultados que se obtienen. Sin duda este trabajo representa un caso en el que la **geomática** y el **“Big Data”** se encuentran en simbiosis, ya que la primera trata los datos susceptibles de ser georreferenciados -la que dota de una calidad posicional-, y el segundo las grandes cantidades de información con la finalidad de procesar millones de datos para obtener un único resultado.

En definitiva, el planteamiento de este TFG obliga a que se empleen diversas técnicas **geomáticas, matemáticas, estadísticas y analíticas** para alcanzar los tres objetivos principales expuestos anteriormente.



Figura 1.8: Foto artística “Playa del Moro”. Fuente: Cortesía de Juan Miguel Sobrón Dasilva



MARCO TEÓRICO

Este apartado está destinado a describir los aspectos teóricos de este trabajo relacionados con la geomorfología costera y la constelación Landsat. Es importante su lectura ya que define la terminología que se usa en el resto del proyecto y da a conocer la perspectiva sobre la que se han desarrollado las fases de análisis.

2. MARCO TEÓRICO

2.2. GEOMORFOLOGÍA COSTERA

Nota: El siguiente contenido relacionado con la geomorfología costera ha sido traducido de la referencia: *Harold V. Thurman & Alan P. Trujillo 2002: Essentials of Oceanography (7th Edition)*.

2.2.1. Terminología Costera

La **costa** es la zona que se encuentra entre el nivel más bajo de marea y la elevación más alta en tierra la cual es afectada por las olas en temporal de tormenta. El **litoral** es la zona que se extiende tierra adentro desde la costa hasta las zonas en dónde se encuentren elementos oceánicos característicos. La anchura de la costa puede variar alrededor de unos cientos de metros, sin embargo el litoral varía entre unas anchuras de menos de un kilómetro hasta decenas de kilómetros. La **línea de costa** es la frontera física entre las aguas marinas y la tierra emergida.

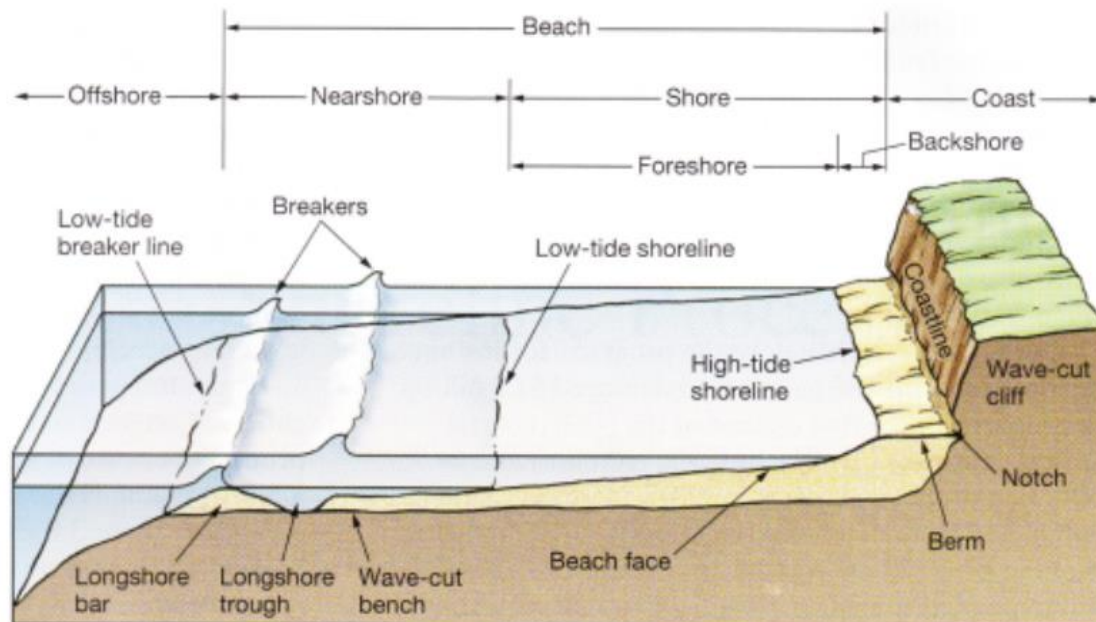


Figura 2.1: Elementos del litoral. Fuente: Thurman & Trujillo 2002

Las subdivisiones de las zonas costeras se pueden apreciar en la figura 2.1. La costa se divide principalmente entre la **tras-playa** y la **zona intermareal** (backshore y foreshore). La tras-playa se encuentra por encima del nivel de marea más alto (pleamar) y solo está cubierta por agua en los temporales de tormenta. La zona intermareal es la que está expuesta a los niveles cambiantes de marea, se encuentra sumergida durante el periodo de marea creciente y está húmeda en los periodos de marea decreciente. La **playa sumergida** (nearshore) es la zona que se extiende mar adentro y está comprendida entre el nivel más bajo de marea (bajamar) y el límite donde el efecto del oleaje afecta al fondo oceánico. Por último se encuentra el **medio marino** (offshore), esta zona es tan profunda que rara vez el oleaje afecta a su fondo.

La **playa** (beach) es el resultado de los depósitos de material costero, que se componen de sedimentos erosionados por el oleaje, los cuales son transportados a lo largo de la costa. La playa, geológicamente hablando, se compone de la costa y la playa sumergida, lo que la convierte en la zona dónde se experimentan los cambios geomorfológicos más significativos.

La **berma** (berm) es la zona seca y con una pendiente suave que se encuentra al pie de los acantilados o de los campos de dunas. La berma está compuesta principalmente de arena, lo que la hace un lugar idóneo para las zonas turísticas y recreacionales. La **terrazza intermareal** (beach face) se corresponde con la zona

húmeda y de pendiente poco pronunciada que se extiende desde la berma hasta la línea de costa. Esta zona se encuentra mayormente expuesta cuando el nivel de marea es descendiente, de ahí su nombre.

Composición de las Playas

Las playas se componen principalmente de material lítico suelto (arenas, gravas o cantos disponibles) del entorno. Cuando este material proviene del proceso de erosión de los acantilados o de las montañas próximas a la costa, las playas se componen de partículas gruesas de minerales. Sin embargo, cuando el material proviene de los cursos fluviales, las partículas son, la mayor parte de las veces, más finas en textura.

Muchas playas se componen de material biológico sobre todo cuando no hay fuentes rocas de material. En estas playas predominan los fragmentos de conchas y los restos de los organismos que viven próximos a la costa. Otras playas más exóticas, que se encuentran en zonas volcánicas, se componen de fragmentos basálticos negros o verdes, o de restos de los arrecifes de coral que se desarrollan en torno a las islas.

Sea cual sea el material del que una playa se compone, este no permanece estable y fijo en un sitio. Las olas que golpean el litoral mueven constantemente los sedimentos costeros, es por ello que se ha pensado que la dinámica morfológica de las playas consiste en el transporte del material a lo largo de la línea de costa.

2.2.2. Movimiento Sedimentario

El movimiento del material costero en las playas se da tanto perpendicularmente (hacia dentro y hacia afuera de la costa) y paralelamente respecto a la línea de costa.

Movimiento Perpendicular a la Línea de Costa

Las olas que rompen contra la costa, provocan el movimiento perpendicular del material costero. Se puede observar, en una playa de pendiente poco pronunciada, que el vaivén de las olas transporta material sobre la terraza intermareal. La predominancia del **movimiento de avance** (el adentramiento de la ola sobre la costa) o de retroceso del oleaje –denominado **contra-ola**–, determina si la arena es depositada o erosionada de la berma.

En playas donde las olas transportan menos cantidad de energía, el movimiento de adentramiento de la ola predomina sobre la contra-ola, por lo que la arena es depositada sobre la terraza intermareal hacia la berma y hace que la playa presente una abundancia de sedimentos con una pendiente suave.

En playas donde las olas impactan con más energía, estas saturan la zona intermareal. El movimiento de contra-ola predomina y este hace que los sedimentos sean erosionados de la berma y transportados mar adentro. Esta arena erosionada se deposita justo en donde las olas empiezan a romper formando bancos de arena sobre-elevados en el fondo (en la figura 2.1 se distinguen como “Longshore bar”), esto es debido al movimiento orbital de las olas que no permite que la arena erosionada de la berma se desplace mucho más allá de la costa.

Sin embargo, las playas no presentan de manera constante un oleaje de mayor o menor energía, sino que este se alterna de manera estacional haciendo que las características morfológicas de las playas cambien también. En las épocas veraniegas, y cuando soplan vientos marinos débiles, las playas se caracterizan por tener un oleaje menos energético el cual hace que las playas tengan una berma y una terraza ancha y rica en arena, lo que la hace ideal como entorno turístico y recreativo. En invierno, y cuando hay situaciones de fuerte tormenta y vientos huracanados, el oleaje rompe en la costa con más energía, erosionando la arena de la terraza y la berma y depositándola en los bancos de arena mar adentro.

En la figura 2.2 se puede apreciar el carácter cíclico del movimiento sedimentario perpendicular en las playas.

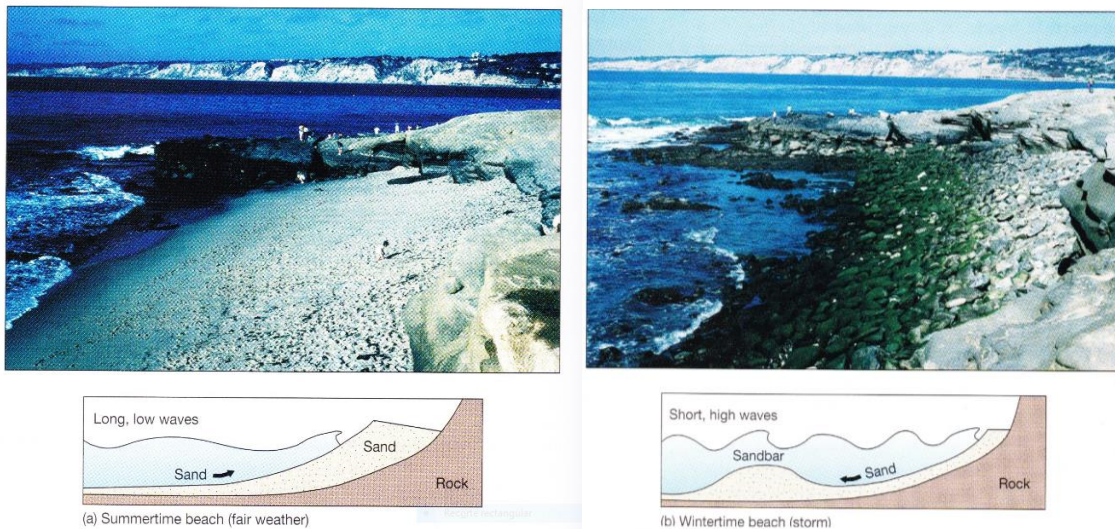


Figura 2.2: Cambios estacionales en las playas. Fuente: Thurman & Trujillo 2002

Movimiento Paralelo a la Línea de Costa

A la vez que el material costero se mueve perpendicularmente, este es también transportado paralelamente sobre la línea de costa. Cada ola que rompa en la costa se adentra en la zona intermareal con un leve ángulo entonces la gravedad hace que la contra-ola vuelva con un ángulo diferente al de entrada. Como resultado, el agua hace un movimiento de zigzag con un movimiento neto paralelo a la costa (Figura 2.3). A este fenómeno se le conoce como **corriente longitudinal**.

Las corrientes longitudinales poseen unas velocidades aproximadas de 4 km/h. Es importante denotar que esta velocidad aumenta a medida que:

- La pendiente de la playa es más pronunciada
- Las olas rompen en la costa con mayor ángulo
- La altura de las olas es mayor
- La frecuencia de las olas aumenta

Muchas veces se ha dado el caso de personas descuidadas que han sido transportadas por las corrientes longitudinales, lo que demuestra que estas corrientes son lo suficientemente fuertes como para transportar personas humanas y gran cantidad de sedimentos a lo largo de la orilla.

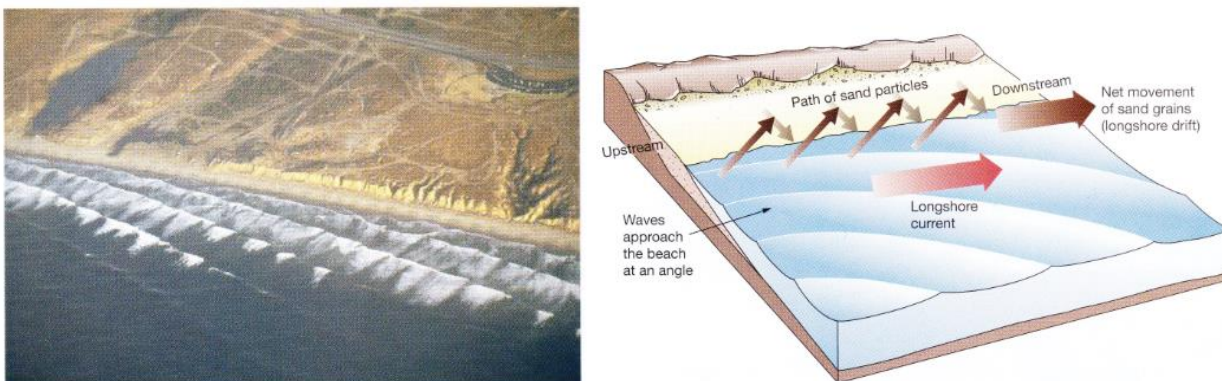


Figura 2.3: Corrientes longitudinales y deriva litoral. Fuente: Thurman & Trujillo 2002

A la componente neta anual del transporte de los sedimentos debido a las corrientes longitudinales se le conoce como **deriva litoral** y es uno de los agentes del moldeado litoral más efectivo. La deriva litoral -así como la corriente longitudinal- afecta principalmente a la zona intermareal de las playas que es dónde las olas rompen en los diferentes niveles de marea.

La cantidad de sedimentos que la deriva litoral transporta depende del equilibrio entre las fuerzas de erosión y deposición. Cualquier ruptura de este equilibrio, hace que se forme un elemento característico de erosión o deposición en una playa.

La deriva litoral y las corrientes longitudinales pueden cambiar de dirección si el ángulo de las olas que llegan a la costa también cambia.

2.2.3. Costas de Erosión y de Acumulación

Los sedimentos erosionados de las diferentes fuentes geológicas costeras se ven transportados a lo largo de la costa y depositados allí donde la energía del sistema costero es relativamente baja. Aunque todas las playas presentan cierto grado de erosión y deposición, estas se pueden clasificar en costas de erosión y costas de acumulación.

Las **costas de erosión** se caracterizan por una pérdida neta de material y morfológicamente se presentan como costas acantiladas, costas bajas rocosas o costas donde se da un movimiento tectónico ascendente. En todos los casos, las pérdidas del material por el oleaje superan ampliamente al volumen de clastos que se pueden acumular. La acción del oleaje en este tipo de costas favorece la puesta en marcha de movimientos de masa por gravedad tales como los desprendimientos o los deslizamientos, y la eliminación por arrastre del oleaje de los sedimentos producidos por los procesos de meteorización.

En las **costas de acumulación** predominan los procesos deposicionales y por ello están cubiertas de clastos (cantos gravas o arenas). La forma más común de estas costas son las largas playas de arena, las cuales presentan una terraza intermareal ancha y con una pendiente suave. El rasgo más característico de estas costas es el estar formado por material móvil que se redistribuye rápidamente a lo largo de la orilla dependiendo de la condiciones energéticas a las que se vea sujeta (deriva litoral). En estas costas son características en la zona emergida las dunas y en la zona sumergida los bancos de arena submarinos (o barras costeras).

2.2.4. Afecciones Artificiales a la Deriva Litoral

Las personas han tratado de modificar en numerosas ocasiones la erosión y deposición de las playas con el fin de mejorar o preservar sus propiedades. Este tipo de acciones normalmente se llevan a cabo con construcciones artificiales en los sistemas costeros, las cuales modifican el equilibrio de erosión-acumulación de las derivas litorales. Muchas de las consecuencias de estos actos, aunque resultan fácilmente predecibles, generan serios problemas y gastos si se gestionan de manera incorrecta y desmesurada.

Construcciones Artificiales

El tipo de construcción artificial más común en las costas es el **espigón**. Los espigones se construyen perpendicularmente a la línea de costa y su principal función es “atrapar” la arena de la deriva litoral en la cara de donde proviene la corriente longitudinal. Sin embargo, una importante zona de la playa se ve erosionada en la otra cara del espigón, debido a que la arena que se ha quedado atrapada en la zona de acumulación no puede fluir paralelamente a la costa. Para evitar la erosión que se produce en una playa se podría construir otro espigón para crear otra zona de acumulación, pero este espigón volvería a crear otra zona de erosión en una de sus caras. Este comportamiento se ve repetido y finalmente se crea a lo largo de la costa numerosos espigones que alteran el equilibrio sedimentario del sistema costero (Figura 2.4).

A diferencia de lo que se cree, un espigón no hace que haya más arena en un sistema costero, sino que la arena se distribuye de manera diferente. Si se aplica una correcta planificación, se puede alcanzar un equilibrio en los sistemas costeros antes de que se produzca una excesiva erosión o acumulación. Sin embargo, se han dado muchos casos de problemas erosivos en playas debido al uso excesivo de espigones.

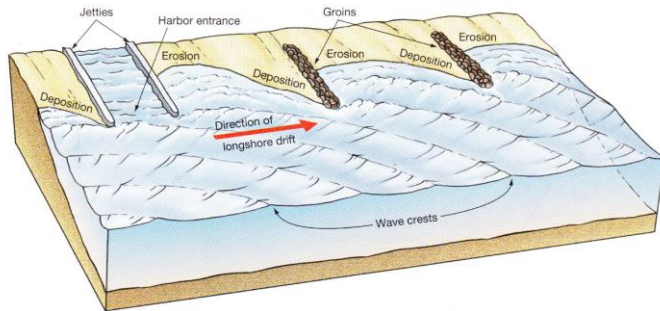


Figura 2.4: Erosión y deposición sobre los espigones. Fuente: Thurman & Trujillo 2002

Los **rompeolas** son construcciones que afectan también a los sistemas costeros. Estos suelen construirse cercanos a los puertos y otras zona de interés para protegerlos del oleaje. Los rompeolas presentan numerosas formas y dimensiones, estos se pueden construir de manera perpendicular, con un cierto ángulo o de manera paralela a la costa. En cualquiera de los casos, estos producen serias zonas de acumulación y erosión -casi siempre más que los encauzamientos o los espigones- y en los puertos, la difracción del oleaje hace que los sedimentos se depositen dentro, lo que implica que se tengan que realizar dragas de manera periódica para evitar los encallamientos de los barcos.

Los **malecones** que se construyen en las inmediaciones costeras son otro tipo de construcción artificial. Estos muros suelen ser construidos paralelos a la costa justo después de la berma de las playas y su propósito es proteger las zonas antrópicas del oleaje –sobre todo en temporal de tormentas-. Los malecones tienen una grave afección en el movimiento perpendicular de los sedimentos costeros. Esto es debido a que cuando se construye un muro el flujo de arena que crean las olas al adentrarse y volver de la costa se ve interrumpido y la pendiente de la terraza se vuelve cada vez más pronunciada, causando más erosión en la zona intermareal y en el muro, hasta que este finalmente con el paso del tiempo se colapsa por el oleaje y el resultado final es la pérdida del muro y de la playa afectada por este. En la figura 2.5 se puede apreciar esto último proceso.

Otro tipo de construcción altera también el equilibrio del transporte sedimentario en las costas, se trata de las **presas**, y a diferencia de las demás, esta no se construye necesariamente en las inmediaciones del litoral. Los ríos erosionan las rocas continentales y gracias a su flujo transportan estos sedimentos por su curso hasta su desembocadura, donde las corrientes longitudinales atrapan los sedimentos y los redistribuyen por la costa. No obstante, cuando se construye una presa en un curso fluvial, esta interrumpe gravemente el flujo de sedimentos y los sistemas litorales se ven privados de una importante fuente de sedimentos. Se puede incluso dar el caso de la práctica desaparición de las playas a largo plazo si todos los cursos fluviales se ven bloqueados.

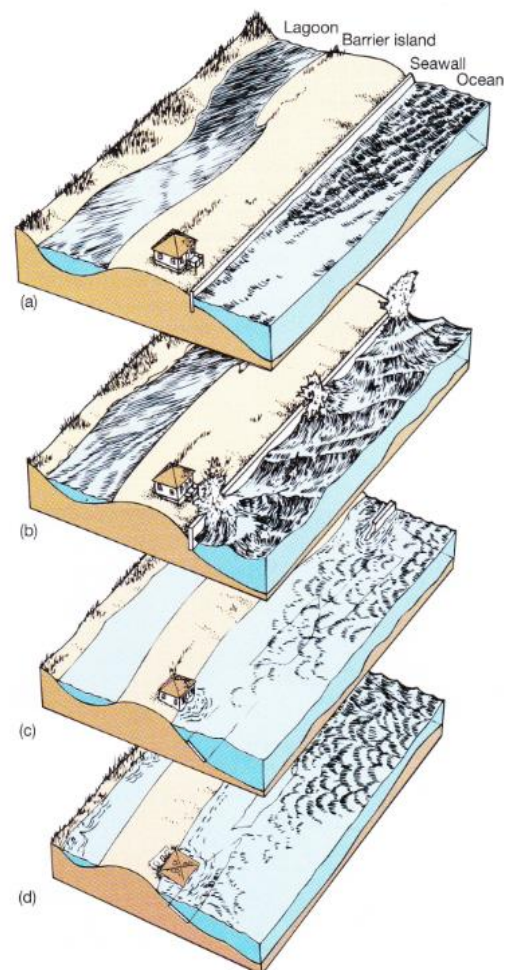


Figura 2.5: Procesos de erosión sobre un malecón. Fuente: Thurman & Trujillo 2002

En definitiva, las construcciones artificiales tienen un importante impacto negativo en los sistemas costeros. La alternativa al uso de estos elementos es la de restringir con mayor severidad las construcciones (apartamentos, complejos turísticos...) que se llevan a cabo en el litoral. Desafortunadamente, esta opción está perdiendo importancia debido al aumento de la población y el turismo en los espacios costeros, además de numerosos programas creados por el gobierno o los ayuntamientos que fomentan los procesos de edificación en lugares poco apropiados. Al final solo es cuestión de tiempo de que los daños y los riesgos demuestren finalmente que no merece la pena llevar a cabo este tipo de "invasión" sobre la costa ya que la naturaleza acaba reclamando -de manera justa- su equilibrio original.

2.1. CONSTELACIÓN LANDSAT

Nota: El siguiente contenido relacionado con la constelación Landsat ha sido traducido de la referencia: *USGS: Landsat Project Factsheet. 2015.*

Sobre la década de los 70, la idea de utilizar satélites para la vigilancia de las cubiertas terrestres y océanos era un concepto visionario. Esta idea da origen al **Programa Landsat**, el cual se basa en una constelación de satélites capaces de observar casi la totalidad del globo terrestre. Esta constelación se gestionan a través de la **NASA** (National Aeronautics and Space Administration) y el **USGS** (United States Geological Survey).

El programa Landsat ha sido de vital importancia para el estudio y comprensión de nuestro planeta. Desde los datos adquiridos en 1972 hasta a los más actuales, esta fuente de información constituye la más larga y continua que ha registrado los cambios de la tierra a una resolución temporal y espacial moderada y satisfactoria para la gran mayoría de aplicaciones.

El primer satélite que se puso en órbita fue el **ERTS-1** (Earth Resources Technology Satellite), el cual fue renombrado Landsat 1. Le siguieron los satélites **Landsat 2**, **Landsat 3** y **Landsat 4** puestos en órbita en 1975, 1978 y 1982 respectivamente. El siguiente fue el **Landsat 5**, lanzado en 1984, el cual superó con creces su vida útil alcanzando los 28 años y 10 meses de misión activa. EL **Landsat 6**, falló al intentar alcanzar la órbita, sin embargo, el **Landsat 7** fue lanzado exitosamente en 1999 y a día de hoy este sigue operativo. El último satélite lanzado fue el **Landsat 8** en 2013, el cual continúa a día de hoy su misión, y se espera que el **Landsat 9** se pueda poner en órbita en el 2023.

El objetivo de esta flota de satélites es continuar con el legado y la continuidad de los archivos Landsat, convirtiéndose en el futuro de los satélites de observación de la tierra de mediana resolución con más historia.

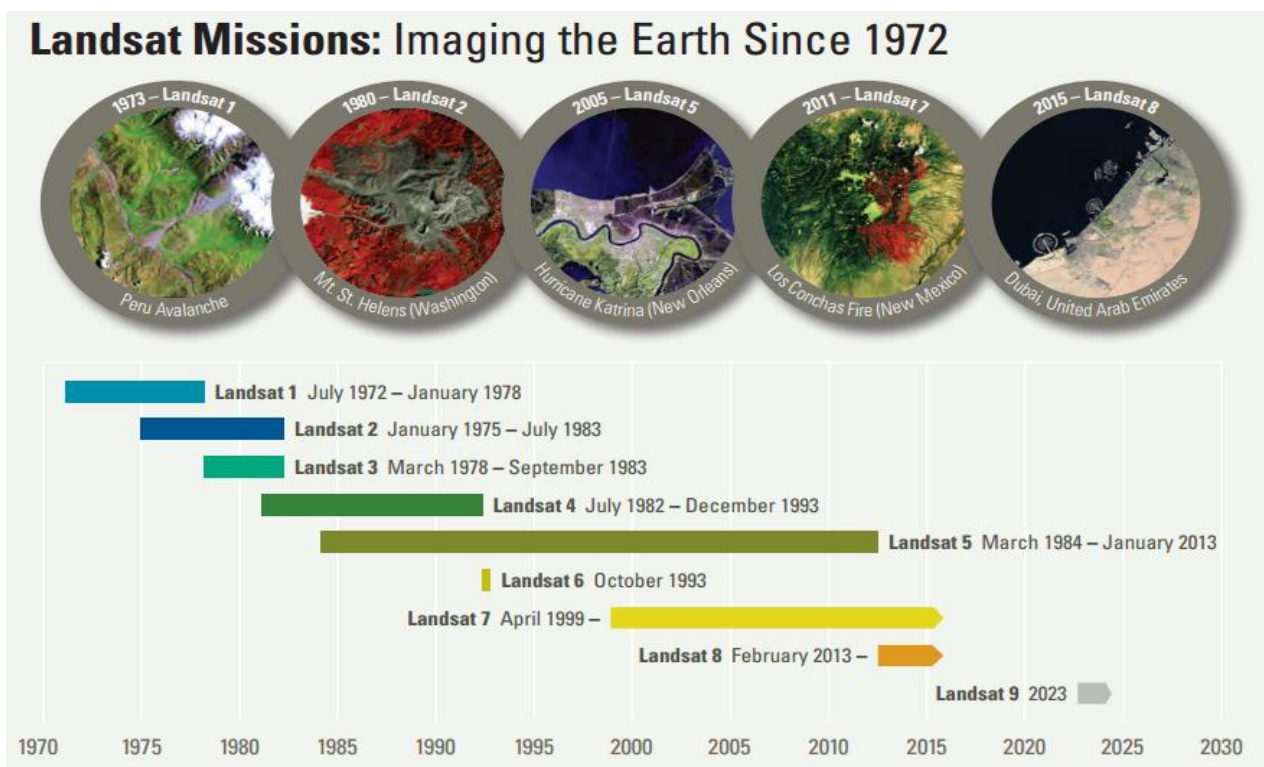


Figura 2.6: Misiones Landsat sobre la línea temporal. Fuente: *USGS Landsat Project Factsheet.*

Los satélites Landsat 4, 5, 7 y 8 se han caracterizado por estar orbitando a una altura de 705 kilómetros sobre la tierra –los denominados **satélites de órbita baja**–, barriendo una anchura de 185 kilómetros en dirección Norte-Sur sobre una **órbita helio-síncrona**. El periodo de una órbita es de aproximadamente **99 minutos**, lo que hace que cada satélite complete sobre **14 órbitas** en 24 horas y sobrevuele un mismo punto de la tierra sobre la misma hora cada **16 días**. No obstante, en el caso de los Landsat 7 y 8, sus órbitas están desfasadas de tal manera que permiten la obtención de una misma escena cada 8 días, mejorando así la resolución temporal y permitiendo capturar más de **1000 escenas** de toda la tierra cada día.

La gran cantidad y versatilidad de los archivos Landsat permiten un gran número de aplicaciones. Los campos más destacados son: los cambios globales, la agricultura, la administración forestal, la geología, la cartografía de los usos del suelo, la administración de recursos y los estudios hidrológicos y costeros entre otros. También se aplican a estudios medioambientales específicos como la deforestación, los incendios, la vulcanología los derrames de vertidos petrolíferos y mineros, o los efectos de los desastres naturales.

La consistencia de estos archivos sobre los años de adquisición, la variedad de rangos espectrales combinada con su **mediana resolución espacial**, y sobre todo su libre acceso y **descarga gratuita**, permite a numerosos usuarios explotar estos datos sobre extensas áreas geográficas para establecer tendencias y monitorizar las diferentes características y variables de la cobertura terrestre.

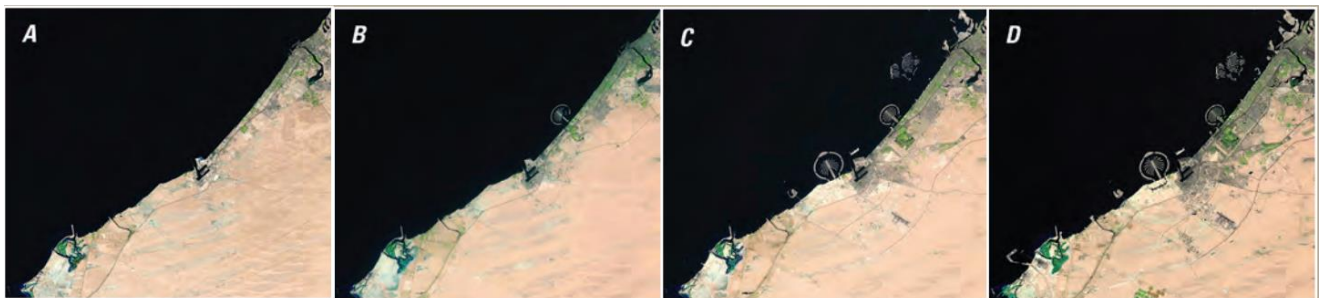


Figura 2.7: Expansiones urbanas sobre la costa de Dubai. Fuente: USGS Landsat Project Factsheet.

El USGS es el responsable de la difusión de las escenas de Landsat. Estas escenas garantizan una calidad geométrica y radiométrica, al estar georreferenciadas sobre el sistema de referencia **WGS84** (“World Geodetic System 1984”) y corregidas radiométricamente. Estos datos están disponibles gratuitamente desde Diciembre de 2008.

Los **productos de nivel 1** son procesados mediante remuestreos de convolución cúbica, sistemas de proyección UTM (Universal Transversa de Mercator), exportación a formato ‘GeoTIFF’ (“Georeferenced Tagged Image File Format”) y compresión a formato ‘.tar’. El número y tamaño de los archivos varía dependiendo del sensor de procedencia. Las imágenes que ofrecen estos productos son diversas, desde las imágenes pancromáticas de alta resolución o las imágenes multiespectrales, hasta las bandas de calidad. Estos datos están disponibles en: <http://earthexplorer.usgs.gov/>

Existen además una serie de **productos de nivel 2**, los cuales cumplen una serie de requisitos internacionales para el Sistema de Observación del Cambio Climático Global (GCOS: Global Climate Observing System). Estos archivos de mayor nivel son procesados para ofrecer una serie de datos continuos y lo suficientemente consistentes para detectar los efectos del cambio climático. Entre estos productos se ofrecen las imágenes corregidas en reflectividad por variables atmosféricas o los índices de reflectividad de las superficies. A diferencia de los productos de nivel 1, los productos de nivel 2 no se pueden descargar de manera inmediata ya que estos necesitan de los productos de nivel 1 para ser obtenidos.

Las imágenes Landsat se corresponden con productos de nivel 1 y vienen comprimidas con extensión ‘.tar.gz’. El nombre de estos archivos viene definido por un **identificador de escena** el cual describe a la escena unívocamente. Este identificador presenta el siguiente formato:

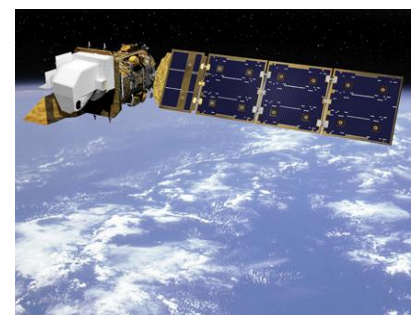
LXSPPRRRYYYDDDGSIIV.tar.gz

Identificador	Descripción
L	Nombre de la misión: Landsat
X	Nombre del sensor. P. ej.: T = Thematic Mapper
S	Número de misión Landsat
PPP	Número de "Path" (franja de barrido)
RRR	Número de "Row" (fila del path)
YYYY	Año de adquisición
DDD	Día juliano de adquisición
GSI	Identificador de la estación de tierra
VV	Versión del archivo

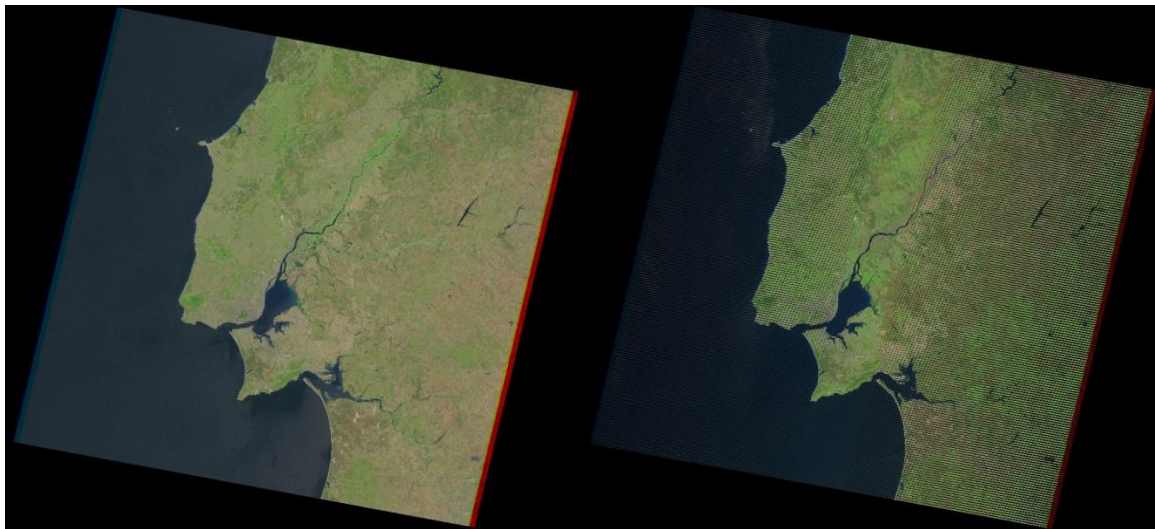
Tabla 2.1: Descripción de los elementos del identificador de escena Landsat.

Durante las diferentes misiones, los satélites Landsat han sido equipados con diferentes **sensores** los cuales codifican y almacenan los valores de reflectividad en niveles digitales por cada pixel del territorio observado. A continuación se exponen los sensores utilizados en las misiones Landsat 5, 7 y 8:

- Landsat 5:** El Landsat 5 se equipó con un sensor pasivo denominado **TM ("Thematic Mapper")**. Se trataba de un sensor de barrido multispectral concebido para proporcionar mayor resolución espacial, mejor discriminación espectral y mayor precisión radiométrica que su predecesor, el MSS del Landsat 4. Este sensor, operaba simultáneamente en **7 bandas** espectrales, 3 en el visible (rojo, verde y azul) una en el infrarrojo cercano (NIR), dos en el infrarrojo medio (MIR) y una en el infrarrojo térmico. Para las bandas visibles e infrarrojas, la resolución espacial es de **30 m/pixel** y para el infrarrojo termal, esta es de **120 m/pixel**. Todas las bandas poseen una resolución radiométrica de **8 bits**.
- Landsat 7:** este Landsat fue equipado con el sensor **ETM+ ("Enhanced Thematic Mapper Plus")**. Este es bastante parecido al TM del Landsat 5, con la diferencia de que el ETM+ incorpora una banda pancromática de alta resolución espacial (**15 m/pixel**). Aunque el Landsat 7 aún sigue en órbita y ofreciendo imágenes del territorio, en Mayo de 2003 el instrumento denominado **SLC ("Scan Line Corrector")** sufrió una avería. Este componente corregía el movimiento de avance del Landsat respecto a la captura de niveles digitales, por lo que las imágenes del Landsat 7 posteriores a esa fecha, sufren una especie de zigzagueado (figura 2.8). A pesar de este inconveniente, las imágenes Landsat con este efecto siguen presentando la misma calidad geométrica y radiométrica.
- Landsat 8:** EL sensor del Landsat 8 incorpora dos instrumentos de barrido: **OLI ("Operational Land Imager")** y un sensor térmico infrarrojo denominado **TIRS ("Thermal Infrared Sensor")**. Las bandas espectrales son bastante similares a las del sensor ETM+, sin embargo los dos nuevos sensores proporcionan dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible (banda 1), diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras, y un nuevo canal infrarrojo para la detección de nubes cirrus (banda 9). También se incluye una nueva banda de calidad con cada producto de datos generado, la cual proporciona información acerca de la presencia de nubes, agua o



nieve. La resolución radiométrica del Landsat 8 se ve mejorada a **12 bits**, proporcionando una ventaja significativa en la discriminación espectral.



Figuras 2.8: Escena Landsat 7 sin bandeado (izquierda) y con bandeado (derecha).

Respecto a la **longitud de ondas** y **rango espectral** de las bandas, no todas presentan los mismos valores en los diferentes sensores Landsat. Los sensores TM y ETM+ en este aspecto, se parecen bastante pero el sensor OLI es algo más diferente. Por ejemplo, en la tabla 2.2 y en la figura 2.9, vemos las diferencias de bandas infrarrojas entre el sensor TM de Landsat 5 y el sensor OLI del Landsat 8. Su ancho de banda se ve modificado considerablemente, sin embargo, las bandas mantienen un valor central bastante próximo.

		Sensor			
		TM		OLI	
Ancho de Banda	NIR	120	nm	40	nm
	SWIR 1 - MIR	200	nm	100	nm
	SWIR 2 - FIR	260	nm	200	nm
Valor Central Longitud de Onda	NIR	840	nm	865	nm
	SWIR 1 - MIR	1650	nm	1610	nm
	SWIR 2 - FIR	2220	nm	2200	nm

Tabla 2.2: Anchos de banda y longitud central de bandas de los sensores TM y OLI.

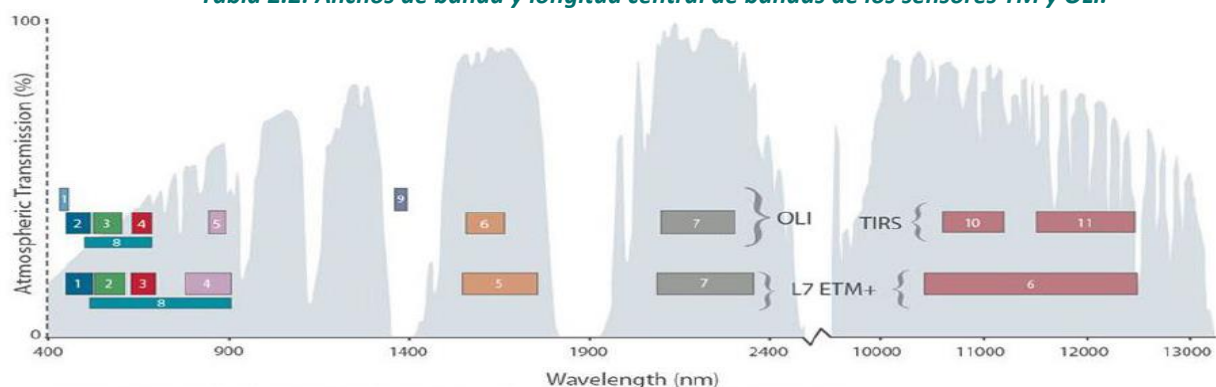


Figura 2.9: Ilustración de las características espectrales de las bandas de los sensores ETM+ y OLI. Fuente: USGS Landsat project.

Las diferentes bandas de los sensores Landsat, al tener diferentes características espectrales, sirven para numerosas y diversas aplicaciones. Las aplicaciones más comunes entre bandas se pueden apreciar en la tabla 2.3

Banda	L8	L7	L5	Aplicaciones
	OLI - TIRS	ETM+	TM	
Aerosol/Costero	Banda 1	-	-	Aplicaciones costeras y estudios de aguas poco profundas. Detecciones de Aerosoles, polvo y humos.
Azul	Banda 2	Banda 1	Banda 1	Batimetrías, discriminaciones de suelo y vegetación e identificación de elementos artificiales.
Verde	Banda 3	Banda 2	Banda 2	Estudios agrícolas y forestales.
Rojo	Banda 4	Banda 3	Banda 3	Identificación de vegetaciones. Estudios del suelo y entornos urbanos.
Infrarrojo Cercano	Banda 5	Banda 4	Banda 4	Detección de vegetación y biomasa. Detección de líneas de costa.
Infrarrojo de Onda Corta - 1 (SWIR-1: MIR)	Banda 6	Banda 5	Banda 5	Detección de fuegos activos y áreas quemadas.
Infrarrojo de Onda Corta - 2 (SWIR-2: FIR)	Banda 7	Banda 7	Banda 7	Humedad y sequía en la vegetación.
Pancromática	Banda 8	Banda 8	-	Fusión de imágenes espectrales para una mayor resolución.
Cirrus	Banda 9	-	-	Detección de nubes cirrus.
Infrarrojo Termal	Banda 10 y 11	Banda 6	Banda 6	Mapeado de la temperatura del suelo y contenido de humedad.

Tabla 2.3: Aplicaciones de las diferentes bandas de las constelaciones Landsat.

Las aplicaciones vienen también determinadas por los valores de los niveles digitales en una banda o en varias, así por ejemplo, el NDVI (“Normalized Difference Vegetation Index”), es producto del contraste entre las bandas del rojo y del infrarrojo próximo. Estos contrastes espectrales vienen determinados por las firmas espectrales de los elementos a analizar (figura 2.10).

Este también es el caso de la detección de las líneas de costa, ya que en el espectro infrarrojo las playas ofrecen una mayor reflectividad que la masa oceánica, debido a la absorción del agua de la energía electromagnética en las longitudes de onda del infrarrojo.

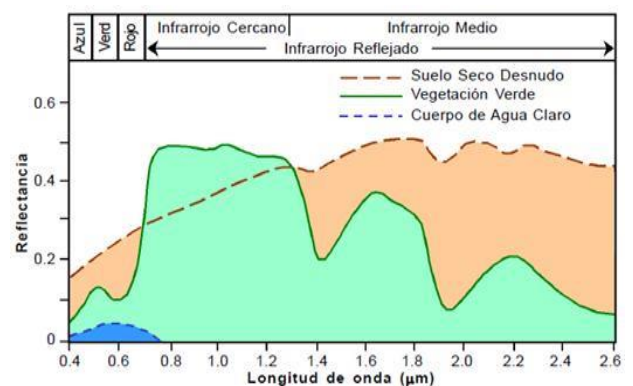


Figura 2.10: Curvas espectrales para las coberturas de vegetación, agua y suelo desnudo.

MARCO FÍSICO

El marco físico describe la zona de estudio atendiendo a sus aspectos geográficos generales como la topografía, la demografía o las redes fluviales. Sobre todo, el interés del marco físico es describir los aspectos geológicos y oceánicos de la zona de estudio, ya que estos son fundamentales en trabajos de estudios geomorfológicos costeros.

3. MARCO FÍSICO

Nota: El siguiente contenido relacionado con el marco físico ha sido traducido de las referencias:
Ramos Pereira: Geografía y Ambiente de Lisboa, Ferrerira: Caracterización de Portugal y Veloso Gomes: EUROSION Case Study.

3.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de estudio para este proyecto ha sido el litoral atlántico de Portugal, en concreto, las costas próximas de su capital, Lisboa (Figuras 3.1 y 3.2).

Lisboa es la capital de la República Portuguesa (estado miembro de la Unión Europea), y la capital del distrito de Lisboa. Su área metropolitana ocupa **2900 km²** y es la ciudad más rica de Portugal.

Lisboa se encuentra aproximadamente a:

- **Latitud** = 38º 43' N
- **Longitud** = 9º 8' W (Coordenadas geodésicas **ETRS 89**)

La ciudad se encuentra a un altitud media de **2 metros** sobre el nivel del mar. Su posición geográfica, la convierte en la capital de Europa más occidental y su huso horario correspondiente es el UTC±00:00.

Administrativamente, la ciudad se encuentra dentro del distrito de Lisboa, correspondiente a la subregión de Gran Lisboa de la región de Lisboa. Los distritos adyacentes al de Lisboa son, Leiria por la zona Norte, Santarém por la zona Este y Setúbal por la zona Sur. Lisboa comparte con estos distritos un elemento geográfico que es la desembocadura del río Tajo.

Las subdivisiones de la ciudad forman las 24 Fregueisas de las que Lisboa es la administración central. El distrito de Lisboa se subdivide en 16 Concelhos (o municipios), de los cuales los más importantes, aparte del de Lisboa, son: Cascais, Loures, Mafra, Torres Agualva-Cacém, Amadora y Queluz.

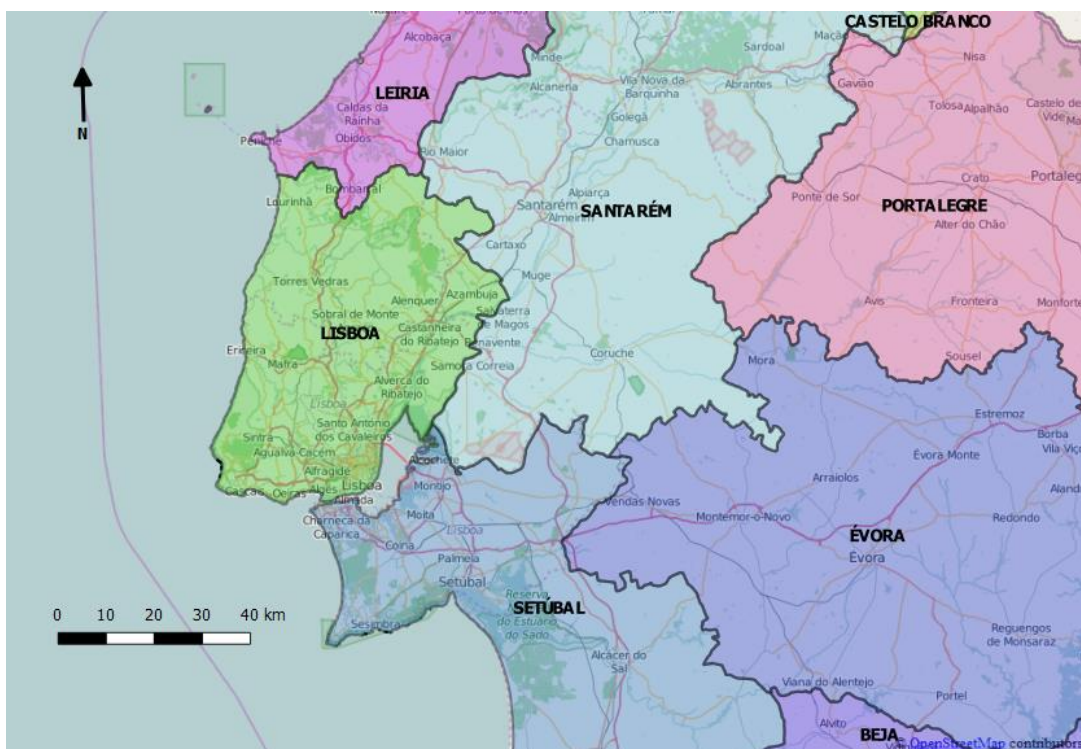


Figura 3.1: Distritos próximos a Lisboa. Mapa Base: OSM Base Map.



Figura 3.2: Conchelos de Lisboa, Santarém y Setúbal. Mapa Base: OSM Base Map.

El área metropolitana de Lisboa cuenta con alrededor de **2.650.000 habitantes**, cerca de un tercio de la población de Portugal. La **densidad de población** es de **6.518 habitantes** por kilómetro cuadrado, lo que la convierte en una de las más altas de todo Portugal (figura 3.4). Lisboa se considera que es una de las aglomeraciones urbanas de Europa que más rápido está creciendo, y se espera que la población alcance hasta los **4,5 millones de habitantes** en 2050.

La actual estructura demográfica presenta una pirámide envejecida con un 23% de personas con 65 años o más y el decenio de 15 a 24 años recoge el 9% de la población total.



Figura 3.3: Vista aérea del área metropolitana de Lisboa.
Fuente: Internet.

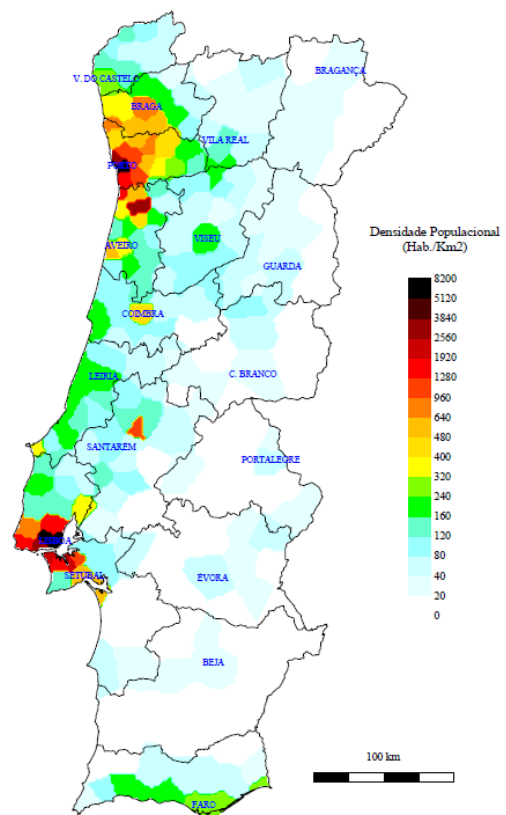


Figura 3.4: Mapa de densidad de población de Portugal. Fuente: A. Ferreira Caracterización de Portugal.

3.2. RASGOS GENERALES

A continuación se explican los diferentes rasgos geográficos generales de las inmediaciones de Lisboa.

Climatología

El clima de Lisboa presenta un carácter mediterráneo y está muy influenciado por las corrientes del Golfo, que hacen que las temperaturas sean más suaves y las lluvias más abundantes. Se trata de uno de los climas más suaves y soleados de Europa, lo que la hace una ciudad con mucho potencial turístico.

En primavera, el promedio de las temperaturas mínimas es de 10º, y la máxima de 20º. Por norma general abundan los días soleados aunque se dan puntualmente algunas precipitaciones.

En verano, las precipitaciones son escasas y el promedio de las temperaturas máximas alcanzan los 25º, por lo que el clima presente es soleado, seco y moderadamente caluroso.

Los inviernos se presentan frescos y lluviosos, con temperaturas mínimas medias de hasta 8º, aunque incluso en invierno, los termómetros pueden alcanzar hasta los 25º con cielos despejados. El hielo y la nieve son fenómenos muy poco habituales, no obstante, en la región predominan, en los meses fríos, los temporales de viento y lluvia levantados por la corriente del golfo.

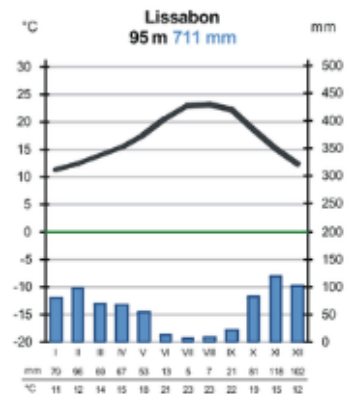


Figura 3.5: Climograma de Lisboa. Fuente: wikipedia.org

Parámetros climáticos promedio de Lisboa, Portugal													
Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Temp. máx. abs. (°C)	22.6	24.8	29.4	32.2	34.8	41.5	40.6	41.8	37.3	32.6	25.3	23.2	41.8
Temp. máx. media (°C)	14.8	16.2	18.8	19.8	22.1	25.7	27.9	28.3	26.5	22.5	18.2	15.3	21.3
Temp. media (°C)	11.6	12.7	14.9	15.9	18.0	21.2	23.1	23.5	22.1	18.8	15.0	12.4	17.4
Temp. mín. media (°C)	8.3	9.1	11.0	11.9	13.9	16.6	18.2	18.6	17.6	15.1	11.8	9.4	13.5
Temp. mín. abs. (°C)	1.0	-1.2	0.2	5.5	6.8	10.4	14.1	14.7	12.1	9.2	4.3	2.1	-1.2
Lluvias (mm)	99.9	84.9	53.2	68.1	53.6	15.9	4.2	6.2	32.9	100.8	127.6	126.7	774
Días de lluvias (≥ 0.1 mm)	15.0	15.0	13.0	12.0	8.0	5.0	2.0	2.0	6.0	11.0	14.0	14.0	117.0
Horas de sol	142.6	156.6	207.7	234.0	291.4	303.0	353.4	344.1	261.0	213.9	156.0	142.6	2806.3

Tabla 3.1: Parámetros climáticos de Lisboa ordenados por meses. Fuente: Wikipedia.org

Topografía

La topografía de Portugal presenta un relieve generalmente llano y moderado, con una altitud máxima de **528 metros** sobre el nivel del mar en el Monte Pena, en la sierra del parque natural de Sintra-Cascais. En cuanto a la rugosidad de la superficie topográfica (que expresa la desigualdad en el relieve) la zona también revela valores medios y bajos.

Se destacan también algunas formaciones montañosas al Norte de la ciudad y en el Sur predomina el Acanalado Fósil de la Costa de Caparica (figuras 3.7), el cual fue moldeado a partir de los agentes geomorfológicos marinos.

En las áreas costeras predominan las formas de relieve asimétricas, las cuales son moldeadas por el principal agente erosivo, el oleaje. Destacan principalmente las fuertes pendientes de los acantilados costeros por los concelhos de Cascais, Sintra, Setúbal y Sesimbra.

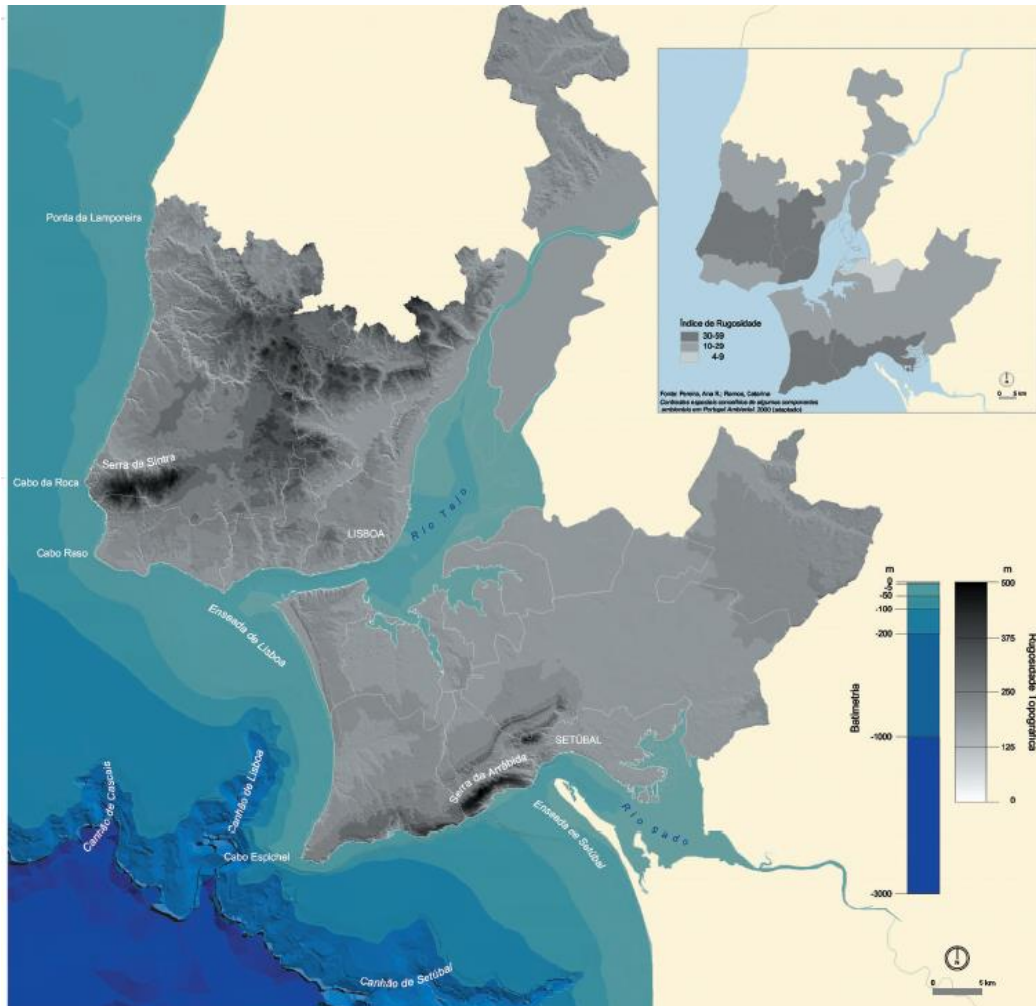
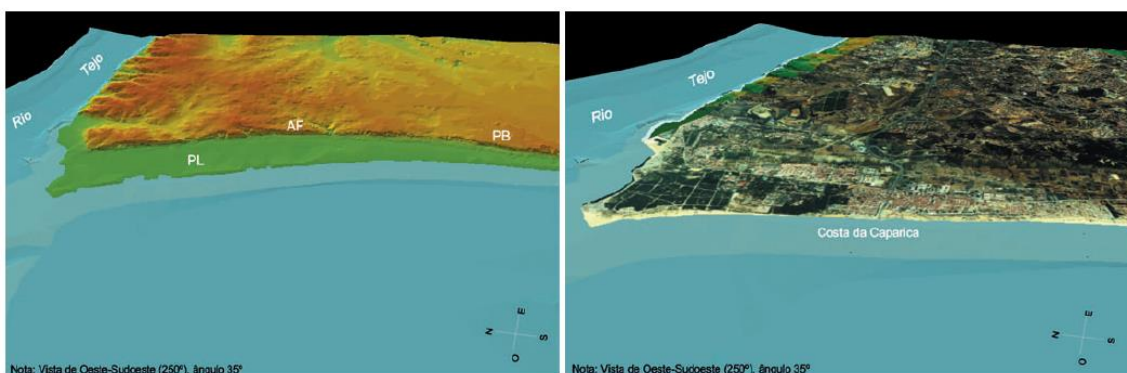


Figura 3.6: MDE del área metropolitana de Lisboa. Fuente: Geografía Física y Ambiente de Lisboa.



Figuras 3.7: Acantilado fósil de la costa de Caparica. Fuente: Geografía Física y Ambiente de Lisboa.

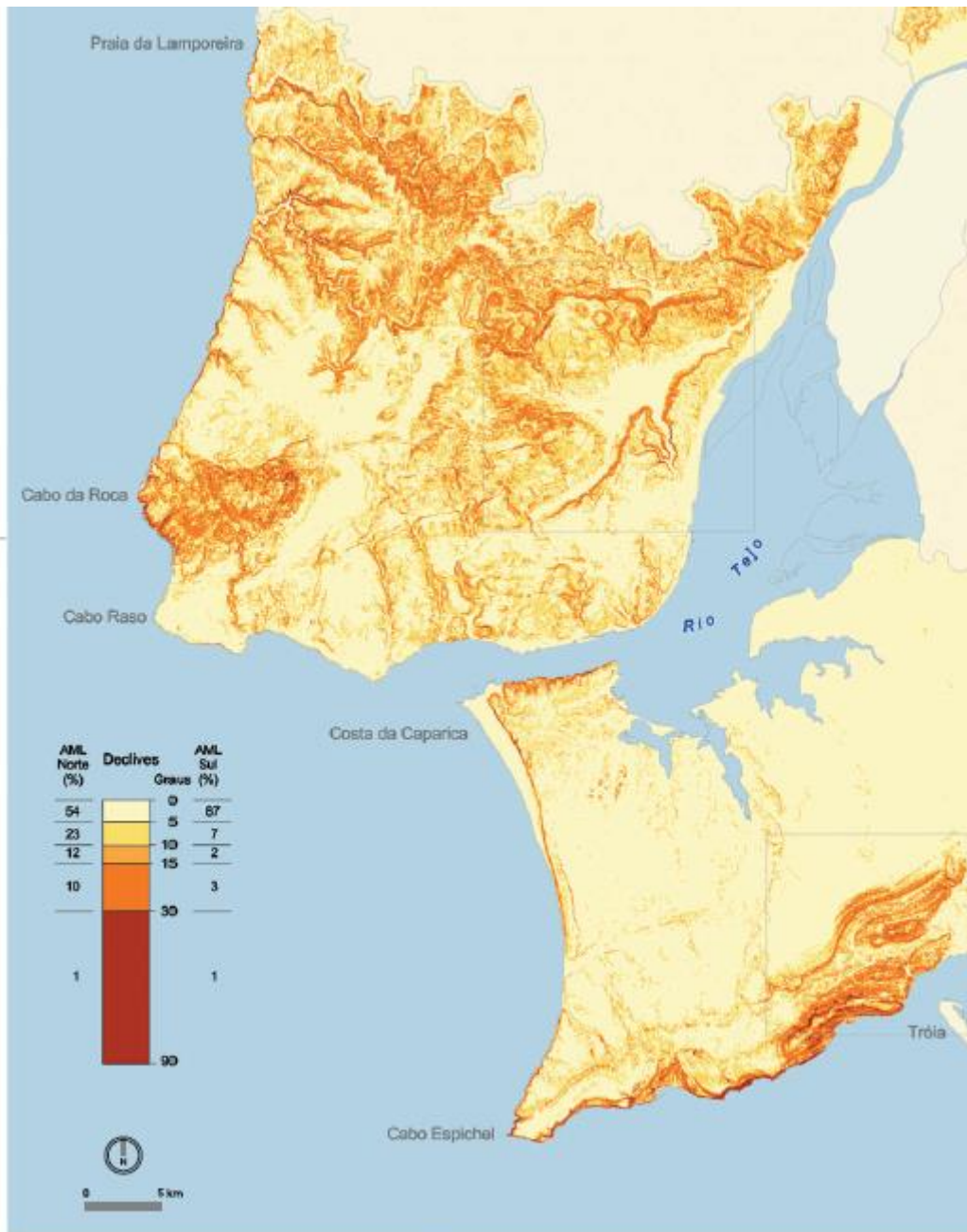


Figura 3.8: Mapa de pendientes del área metropolitana de Lisboa. Fuente: Geografía Física y Ambiente de Lisboa.



Figuras 3.9: Imágenes de los acantilados de la zona de Arrábida (izquierda) e imagen del acantilado fósil (derecha). Fuente: Geografía Física y Ambiente de Lisboa.

Redes Fluviales

La red hidrográfica de la zona de Lisboa está caracterizada principalmente por las desembocaduras del **río Tajo** (Tejo en portugués) y el **río Sorraia**, las cuales forman la peculiar bahía de Lisboa a la que se la conoce como Mar de Paja. Estos dos ríos desembocan en el Mar de Paja formando pequeños deltas y estuarios de gran importancia ambiental. Los principales afluentes de estos ríos son: el Zêzere, el Alge y el Cabril.

Ambos ríos son una fuente de sedimentos para los entornos costeros y ambos presentan construcciones artificiales (presas) que limitan el flujo de estos.

La zona también es rica a nivel de aguas subterráneas, ya que las áreas de aluviones del río Tajo, forman una extensión de alta permeabilidad y muy porosa por la cual se filtra el agua en las épocas de crecidas e inundaciones. Otra fuente importante de los acuíferos son las formaciones calcáreas que se ven disueltas por el bicarbonato cálcico, el cual crea fisuras en los suelos de caliza.

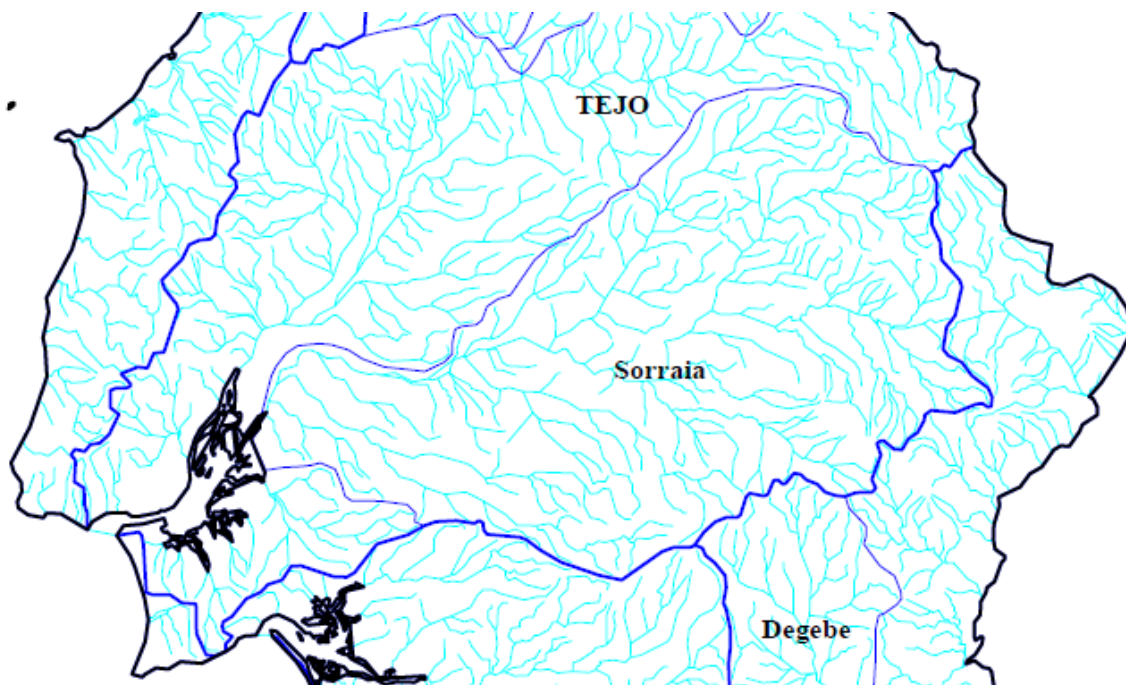


Figura 3.10: Cuencas hidrográficas y redes fluviales de Lisboa. Fuente: A. Ferreira Caracterización de Portugal.

Reservas Naturales

En las últimas décadas se han incluido numerosas áreas protegidas por el interés ambiental a la red Natura 2000. Estas suponen aproximadamente un **11%** del área metropolitana de Lisboa.

Casi todas estas áreas se sitúan en zonas costeras. Se destacan principalmente:

- Parque natural de Sintra-Cascais
- El acantilado fósil de Caparica
- Parque natural de Arrábida
- Reserva natural del estuario Sado
- Reserva natural de la desembocadura del Tajo
- La albufera de la Lagoa de Albufeira

El encontrar tantos espacios protegidos en las zonas costeras y próximas a los litorales demuestra el importante interés de las costas lisboenses, no solo como recurso turístico, sino también como recurso ambiental.

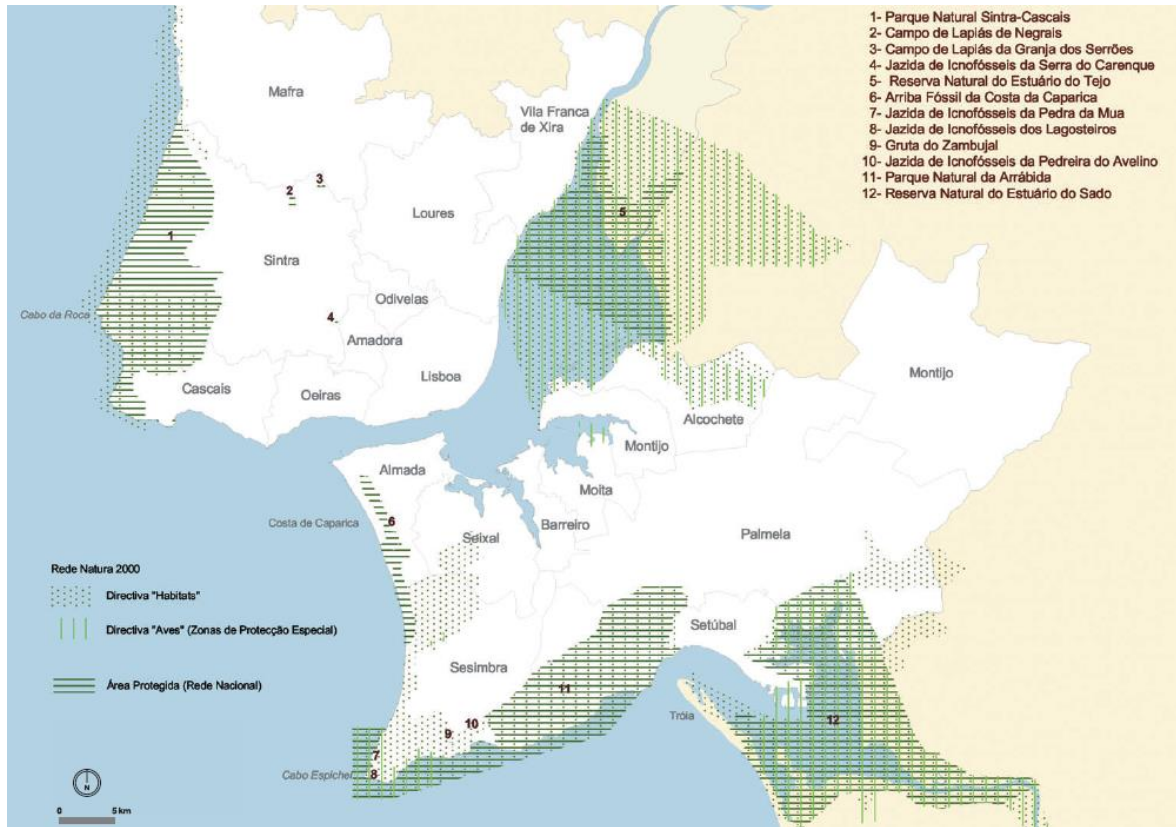


Figura 3.10: Mapa de reservas de Lisboa de la red Natura 2000. Fuente: Geografía Física y Ambiente de Lisboa.

3.3. GEOLOGÍA Y DINÁMICA COSTERAS

Para este proyecto, definir las características litorales y geomorfológicas, resulta fundamental para comprender la dinámica y magnitud de la energía descargadas sobre las costas. Lisboa es una zona que está vinculada a los efectos del océano atlántico y sus litorales son uno de los mayores testigos de estos efectos.

3.3.1. Composición del Entorno y Geomorfología

Desde un punto de vista geológico, el área metropolitana de Lisboa, se asienta sobre la base oeste del borde portugués y sobre la cuenca sedimentaria del Tajo. Por esta razón, la formación de las rocas se dió hace aproximadamente 260 millones de años. Los eventos tectónicos que se dieron en la zona justifican la gran variedad de rocas que se encuentran en la zona: areniscas, arcillas, margas, rocas calcáreas, granito y restos volcánicos provenientes de la región de Mafra. Habría que añadir también las composiciones costeras, como las dunas y las playas en los municipios de Almada y Cascais, y las composiciones sedimentarias producidas por las inundaciones de los cursos fluviales.

La zona de Lisboa, descansa sobre un antiguo campo volcánico, por lo que es una zona tectónicamente muy fragmentada. Lisboa padece a menudo de eventos sísmicos los cuales demuestran que las fallas de la zona están activas y liberan la energía almacenada por la compresión tectónica.

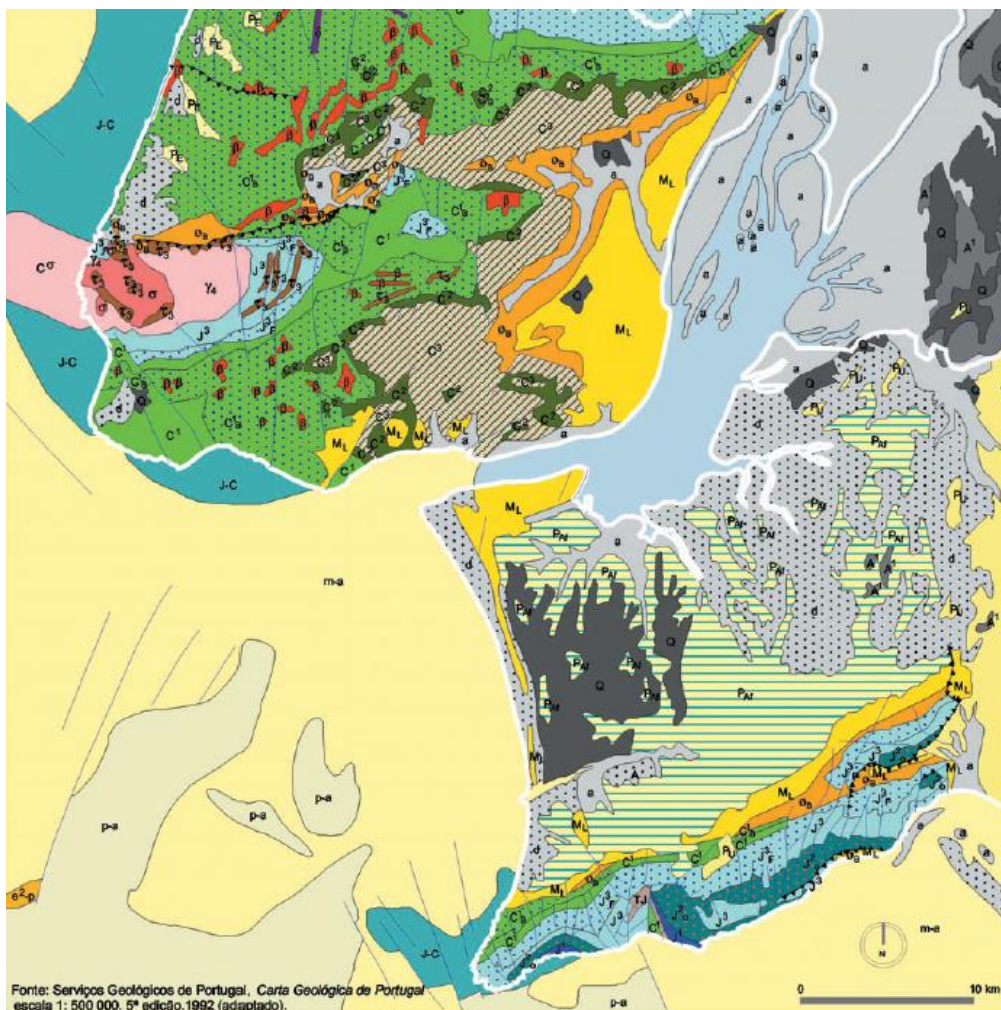


Figura 3.11: Mapa geológico de Lisboa. Fuente: Geografía Física y Ambiente de Portugal.

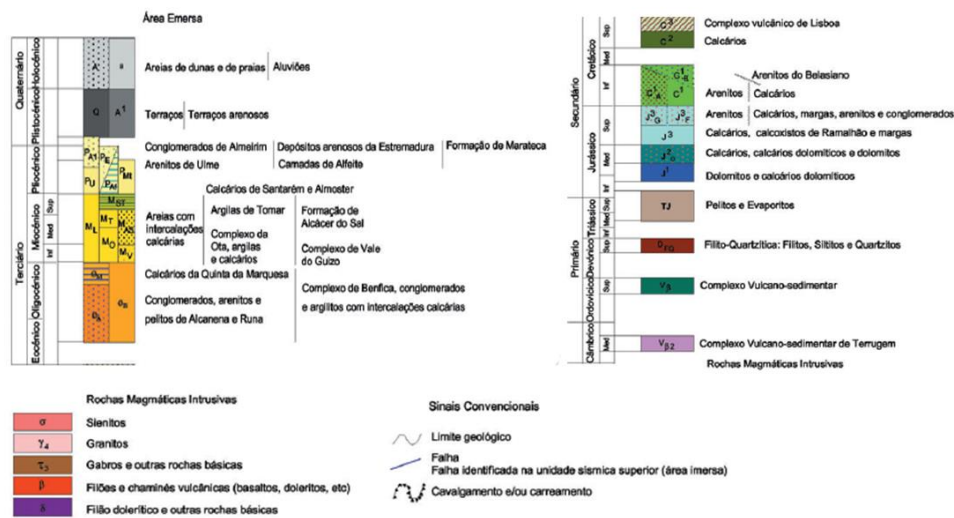


Figura 3.12: Leyenda del mapa geológico de Lisboa. Fuente: Geografía Física y Ambiente de Portugal.

En cuanto a los aspectos geomorfológicos, podemos destacar las formaciones características de la costa de Caparica, que como veremos más adelante, será nuestra playa de estudio.

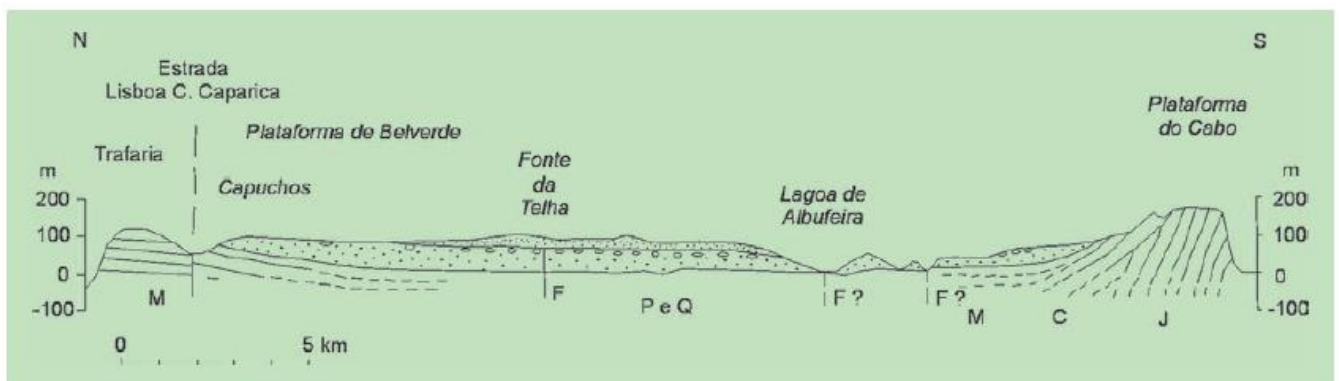


Figura 3.13: Perfil longitudinal del acantilado fósil. Fuente: Geografía Física y Ambiente de Portugal.

En la figura 3.13, tenemos un perfil longitudinal Norte-Sur de la playa. Se aprecia como principal característica que los sedimentos costeros se apoyan sobre una hondonada formada por estratos más compactos, los cuales emergen por la zona Norte (Trafaria) y la zona Sur (Plataforma do Cabo).

En la figura 3.14 se presenta la evolución del perfil transversal del acantilado fósil de la costa de Caparica. Como se puede observar, la acción directa del océano erosiona el acantilado lo cual hace que este se colapse y se creen las llanuras litorales y las playas arenosas. Indudablemente, el acantilado es una de las fuentes principales de sedimentos para las playas.

El acantilado resulta ser una zona sensible del territorio, debido a sus fuertes pendientes y su naturaleza inconsistente. Por lo tanto, y dado que es una reserva ambiental, se ha de tener en cuenta su protección y preservación natural.

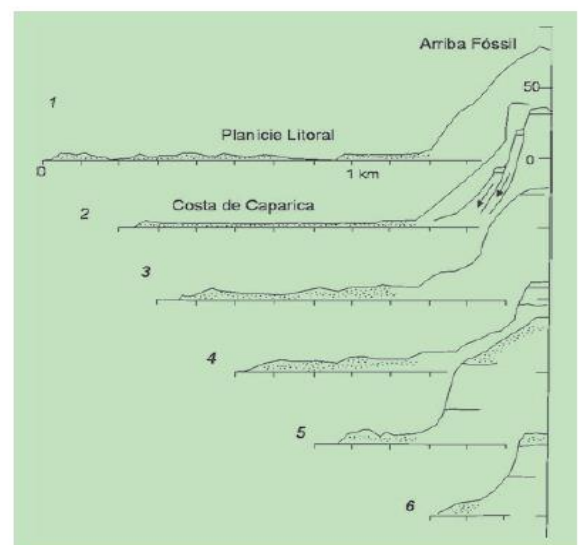


Figura 3.14: Evolución de perfiles transversales del acantilado fósil. Fuente: Geografía Física y Ambiente de Portugal.

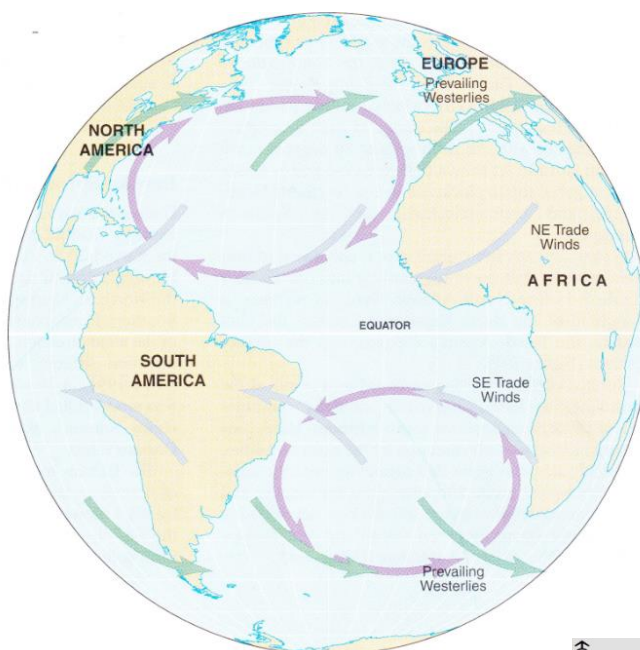
3.3.2. Dinámica Costera

Régimen Mareal

Las mareas astronómicas son de tipo **semi-diurno**, con ciclos mareales de aproximadamente **12h y 25m**, que se propagan de Norte a Sur. Los valores de pleamar que se suelen alcanzar en la costa de Cascais rondan los **4 metros** y el nivel de marea muerta ronda los **0,27 metros**. Sin embargo, el rango mareal, debido a los efectos meteorológicos como bajas presiones o los vientos, puede llegar a alcanzar los **5 metros**.

A la vista de estos datos, se puede garantizar que el régimen mareal del área metropolitana de Lisboa es amplio y provoca la migración continua en la línea de costa.

Corrientes Oceánicas y Longitudinales



Las corrientes que dominan el océano atlántico vienen producidas por el efecto rotatorio de Coriolis. Las corrientes atmosféricas poseen una rotación en sentido horario en el hemisferio norte y anti-horario en el hemisferio sur, afectando de igual manera a la circulación de los océanos como se puede apreciar en la figura 3.15 Este efecto hace que las corrientes oceánicas lleguen a la costa de Portugal desde el NW.

entre Este y Oeste. Otra de las corrientes importantes es la que llega directamente del océano sobre las costas de Cascais con una dirección NW-SE.

Sin embargo, en la costa de Caparica, las corrientes residuales llegan con mucha menos intensidad debido al choque de las corrientes anteriormente mencionadas. Debido a esto, las magnitudes de las corrientes en esta zona alcanzan los **0.2 m/s** y poseen un flujo cerrado Sur-Norte (figura 3.16).

Si profundizamos en nivel de detalle, sobre la costa de Lisboa, una de las corrientes más importantes que se dan son **las corrientes mareales** de la desembocadura del Tajo, llegando a alcanzar los **2 m/s en llenante** y los **1.8 m/s en la vaciante**; estas tienen una dirección cambiante

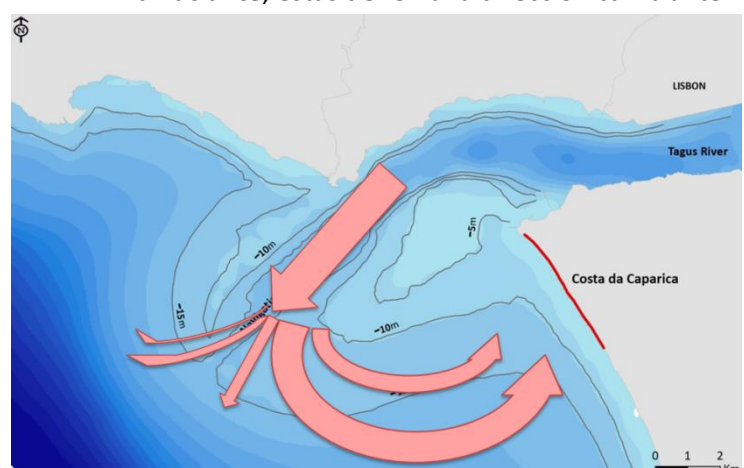


Figura 3.15: Principales vientos y corrientes oceánicas del atlántico. Fuente: Thurman & Trujillo 2002.

Figura 3.16: Corrientes superficiales sobre la desembocadura del tajo. Fuente: Aleixo Pinto 2015.

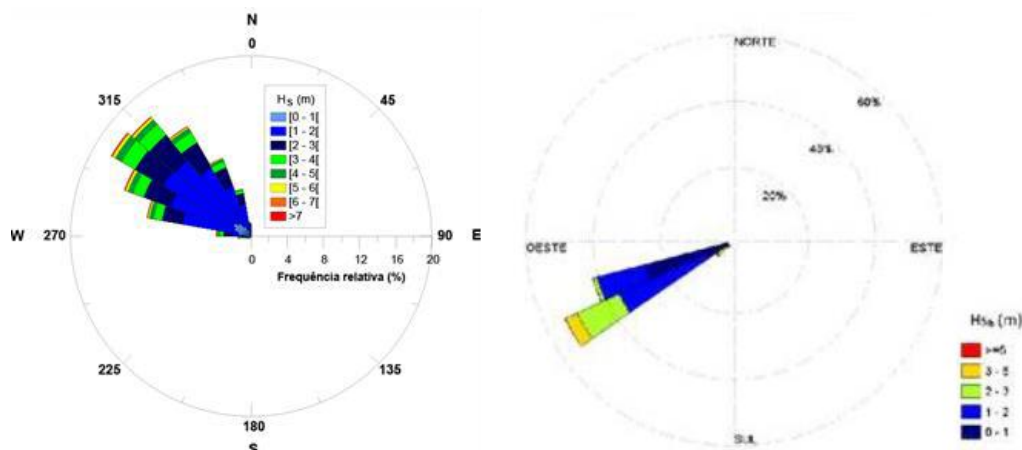
Oleaje

El oleaje de la zona está provocado por las principales corrientes del golfo y es característico por poseer una **alta energía**, la cual libera constantemente sobre la costa moldeando esta. La media mensual está caracterizada por periodos de pico medios entre **5 y 9 segundos**, con un dirección WNW y en ocasiones WSW (Oliveira, 1999). En cuanto a la altura del oleaje, esta varía entre **0,7 y 2,6 metros** y las alturas máximas alcanzan de media sobre los **4,2 metros**, aunque en temporales de invierno se han llegado a registrar alturas mayores.

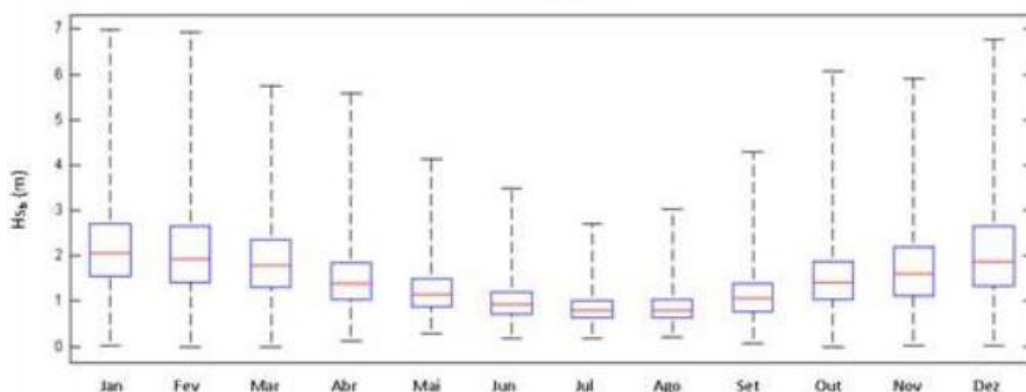
Debido al fuerte oleaje, las costas de Portugal resultan ser uno de los mejores lugares para practicar surf. La gran fama deportiva de estas costas, han hecho que posean el record del mundo de la ola mayor surfada, la cual alcanzó una significativa altura de 30 metros. El record fue batido por Garret McNamara, en la Praia do Norte (Nazaret, Portugal).



Figura 3.17: Surfista en las costas de Lisboa (Nazaret). Fuente: Internet.



Figuras 3.18: Dirección y altura del oleaje sobre las costas lisboenses. Fuente: Aleixo Pinto 2015.



Figuras 3.19: Estadísticas mensuales de la altura del oleaje sobre la costa de Lisboa. Fuente: Aleixo Pinto 2015.

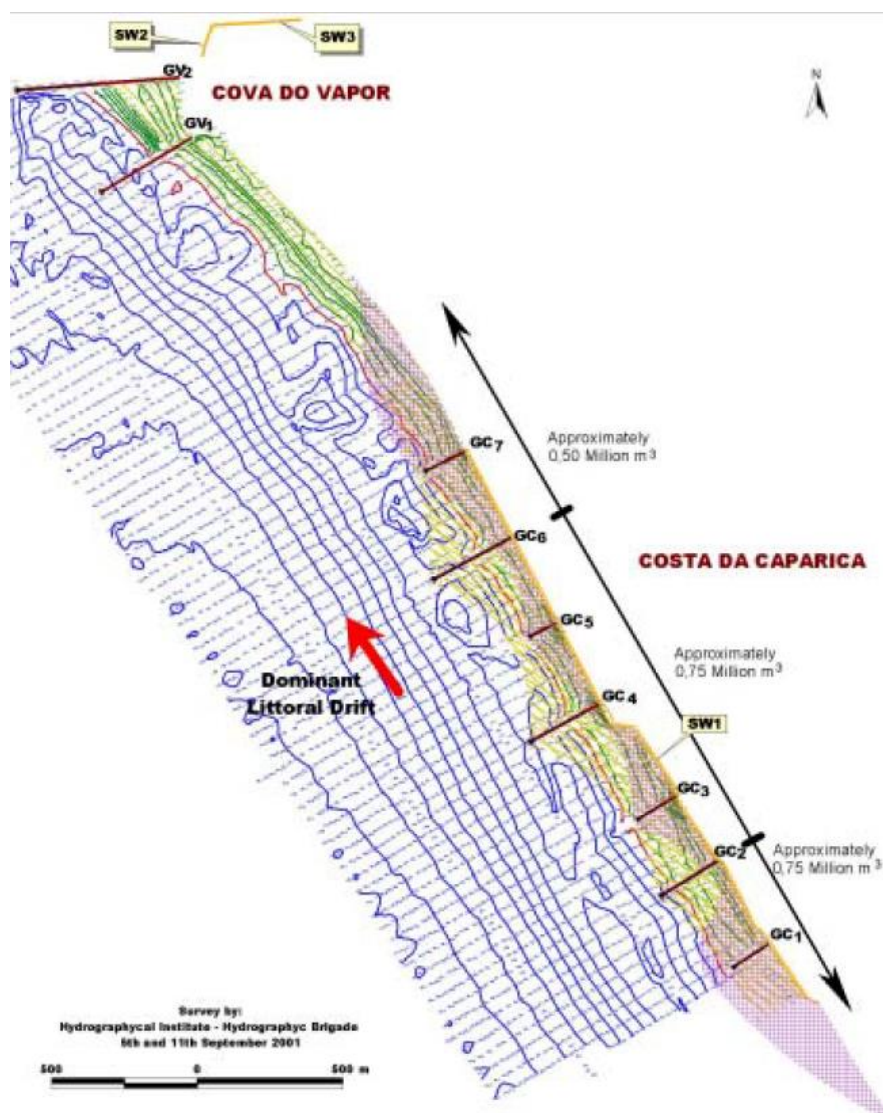
Deriva Litoral

El principal **sustento sedimentario** de las costas de Lisboa son los materiales rocosos erosionados de la zona de las regiones de Mafra, Sintra y Cascais. Sin embargo, la fuente de mayor importancia resulta ser los

materiales continentales que son erosionados y transportados hasta el océano por el río Tajo y Sorraia. La cantidad de sedimentos procedentes de esta fuente depende principalmente de las tormentas e inundaciones. Se estima que el volumen de sedimentos puede variar entre **77 millones ton/año** hasta **0,4 millones de ton/año**. Se ha calculado también que aproximadamente el **65%** de los sedimentos llegan a la desembocadura del Tajo y forman parte del sistema costero Lisbonense. Sin embargo, se ha observado que entre la década de los 20 y los 50, este porcentaje ha decrecido de manera estrepitosa. La razón de esto son las construcciones realizadas sobre las cuencas hidrográficas de los ríos, solo en Portugal, se han llevado a cabo entre 1928 y 2004 sobre 38 embalses en la cuenca hidrográfica del Tajo. Este periodo también coincidió con un retroceso exponencial en la línea de costa en la costa de Caparica.

La dirección de la **deriva litoral** en las costas de estudio resulta variante. Sobre la zona de Cascais, los principales flujos de viento y corriente con dirección Norte-Sur, hacen que la deriva litoral tome esa dirección. Sin embargo, sobre la zona de Caparica, la principal componente es Sur-Norte, esto es debido a que las corrientes oceánicas se ven afectadas por las corrientes mareales de la desembocadura del Tajo (figura 3.20).

“Se ha estimado que la deriva Litoral puede llegar a transportar un total de 1 000 000 de metros cúbicos de sedimentos al año” (Veloso Gomes, Taviera Pinto).



Figuras 3.20: Dirección de la deriva litoral sobre la costa de Caparica. Fuente: Euroasion Case Study.



METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO

El interés de este apartado es describir el proceso de extracción de las líneas de costa mediante el software SELI. También se explican los datos de partida que han sido necesarios para la elaboración de este trabajo.

4. METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO

4.1. DATOS DE PARTIDA NECESARIOS

4.1.1. Zonas de Estudio

La zona que se ha pretendido analizar ha tenido que ser dividida en diferentes zonas de estudio, debido a su gran extensión. El algoritmo que extrae automáticamente las líneas de costa (SELI) trabaja óptimamente con recortes cuadrados de aproximadamente **25 kilómetros** de lado. Procesar recortes mayores sobre las escenas de Landsat, saturaría la memoria de trabajo que permite el software.

Sobre la costa Lisbonense, se realizaron 4 recortes numerados del 0 al 3 en sentido Sur-Norte. Para ello se creó un archivo '.shp' denominado 'zones_overlap.shp'.

Se tomó como precaución que los recortes no superaran los 25 kilómetros de lado y que estos se solaparán lo suficiente. Esto último hizo que no hubiera discontinuidades en las líneas de costa obtenidas en el proceso posterior.

Los recortes abarcan desde las playas nortes de la ciudad de Ericeira, hasta el Portinho de Arrábida, zona cercana al área metropolitana de Setúbal.

En la siguiente tabla se detallan las extensiones de los recortes, los cuales se pueden apreciar en la figura 4.1:

Zona de Estudio	Extensión: Ancho x Largo	Ciudad o Zona Característica
0	20 km x 20 km	Ericeira
1	23 km x 23 km	Cascais
2	18 km x 20 km	Lisboa
3	19 km x 23 km	Sesimbra, Arrábida

Tabla 4.1: Extensión y descripción de las zonas de estudio.

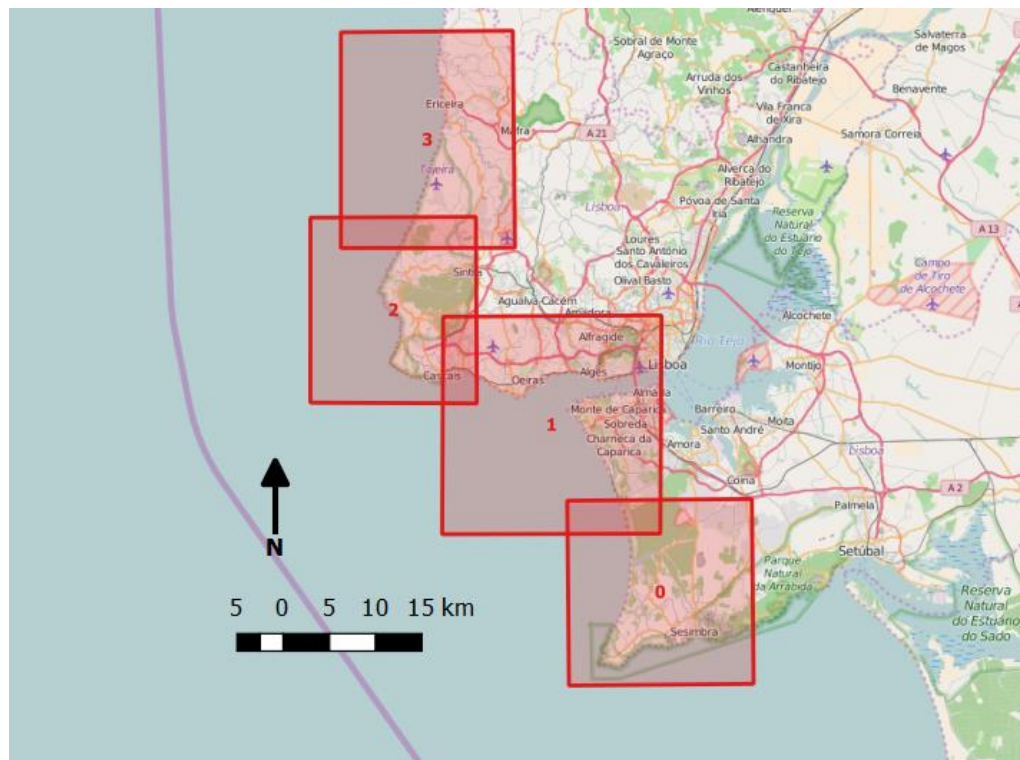


Figura 4.1: Zonas de estudio definidas sobre el mapa. Mapa Base: OSM Base Map.

En las costas de los recortes 3 y 2, predominan los acantilados y las pequeñas calas playeras. En el recorte 1, predominan las playas extensas y de acumulación sedimentaria con entornos heterogéneos entre espacios urbanos y costeros, debido a la proximidad del área metropolitana de Lisboa. El recorte 0, presenta un entorno más natural con playas de arena extensas por la zona norte y acantilados y calas por la zona sur.

4.1.2. Imágenes Landsat

Las imágenes Landsat se corresponden con la principal y mayor fuente de datos del proyecto. Las razones por las que se ha utilizado el archivo Landsat coinciden con sus principales ventajas:

- **Gran cantidad de información espacial:** cada escena Landsat abarca aproximadamente 37.500 kilómetros cuadrados.
- **Variabilidad de información espectral:** diferentes bandas espectrales de los satélites Landsat.
- **Numerosos registros temporales:** datos fiables desde la década de 1990 hasta la actualidad.
- **Descarga libre y gratuita de las escenas:** obtener una escena Landsat no supone ningún coste económico.

Las imágenes se obtuvieron desde el centro de descargas del **USGS** (“United States Geological Survey”), denominado “EarthExplorer” (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Desde esta web se seleccionó unas coordenadas aproximadas a la ciudad de Lisboa y se procedió a revisar primero las escenas del Landsat 8 disponibles para la descarga.

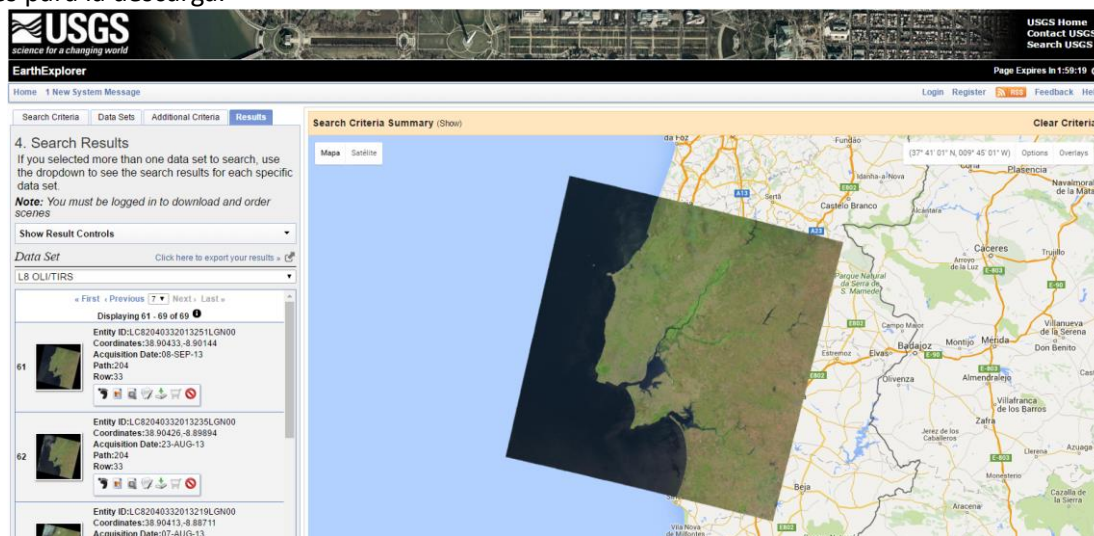


Figura 4.2: Descarga de escenas Landsat sobre Earthexplorer.

Como se aprecia en la figura de arriba, se fueron examinando cada una de las escenas correspondientes a diferentes fechas. Se tomó la precaución de que las zonas de estudio se encontraran libres de nubosidades y se añadieron las imágenes a la lista de descarga. Una vez se marcaron todas las imágenes seleccionadas, se procedió a su descarga empleando la aplicación de “Bulk Download Application” la cual resultó ser la más apropiada debido al gran número de escenas que se tuvieron que descargar.

Una vez examinadas y descargadas las escenas del Landsat 8, se procedió a realizar lo mismo con las imágenes del Landsat 7 y 5.

En total se descargaron:

- 24 escenas del Landsat 8 OLI-TIRS
- 89 escenas del Landsat 7 ETM+. 17 escenas con el SLC (Scan Line Corrector) encendido y 71 con el SLC apagado.
- 37 escenas de los satélites Landsat 4 y 5.

En total se obtuvieron **150 escenas**, todas ellas pertenecientes al “Path” (banda de barrido longitudinal) 204 y a la “Row” (división en filas del path) 033, que abarcaban desde el **01/01/1989** hasta el **09/11/2015** (esta última fecha viene condicionada por la fecha de descarga, el 15/11/2016).

Tras la finalización de la descarga, se examinaron los ficheros de metadatos de las imágenes, y se creó una tabla con el software de Microsoft Excel en dónde se insertaron los identificadores de las imágenes –los cuales definen unívocamente una escena-, su fecha de adquisición y la hora (UTC) del centro de escena. Toda la información recabada de las escenas se almacenó en esta tabla de Excel, la cual actuó como base de datos general del proyecto (ver Anexo 1).

Las imágenes Landsat que se descargan del USGS, vienen definidas sobre un sistema de referencia WGS84, y proyectadas sobre un sistema de proyección UTM (Universal Transversa de Mercator), en concreto para las imágenes de Lisboa, el huso correspondiente es el 29. Este sistema de referencia con código **EPSG: 32629**, es el impuesto para todo el proyecto, por lo que toda la información espacial se definirá sobre este sistema de referencia para garantizar una correcta georreferenciación de los datos.

4.1.3. Ortofotografías

Las ortofotos resultaron ser un dato de vital importancia, ya que gracias a ellas se pudo realizar la georreferenciación diferencial de las líneas de costa durante el proceso de extracción de estas (este paso se explica más detalladamente en el apartado 4.2.1).

Para llevar a cabo este paso, las ortofotos tendrían que tener una resolución espacial o GSD (“Ground Size Dimension”) de al menos **0,5 metros**, lo que nos daría una precisión de **5 m** en la posición absoluta de la línea de costa.

En España, el centro de descargas del **IGN** (Instituto Geográfico Nacional) permite acceder rápidamente a las ortofotos de máxima actualidad del **PNOA** (Plan Nacional de Ortofotografías Aéreas) -con una resolución de 0,5 m/pixel- y realizar su descarga en formato de imagen digital (‘.ecw’). Sin embargo en el ámbito de la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) Portuguesa, no existe -o no se logró encontrar- con un servicio de descargas cómodo como es el caso del IGN; ni siquiera se encontró un servicio WCS (Web Coverage Service) de ortofotos.

La única fuente de ortofotos fueron dos servicios **WMS¹** (Web Map Service) cuyas URL son:

- <http://mapas.dgterritorio.pt/wms/ortos2014-litoral>
- <http://www.igeo.pt/WMS/Cartografia/Ortos>

¹WMS:

Un servicio web de mapas (WMS) produce mapas georreferenciados de forma dinámica a partir de información geográfica que puede ser de naturaleza vectorial, ráster, etc. El servicio web de mapas es un protocolo para servir imágenes georreferenciadas de mapa a través de Internet. Estas imágenes son generadas por un servidor utilizando información geográfica proporcionada por una base de datos SIG.



La ventaja de los WMS es que proporcionan de manera sencilla imágenes georreferenciadas mediante peticiones HTTP “GetMap”. Por lo que la respuesta al problema de obtención de las ortofotos fue la petición de las imágenes a estos servidores WMS.

Se presentan una serie de problemas a la hora de realizar estas peticiones, y son:

- Realizar un gran número de peticiones. Esto se debe a la gran extensión de la zona –las 4 zonas de estudio- y a que el servidor tiene un límite en cuanto a cantidad de información que se puede descargar en una misma petición.
- Necesidad de automatización de las peticiones, ya que realizarlas de manera manual no tiene sentido al poderse programar en entornos SIG.
- Gran cantidad de datos que se van a descargar. Teniendo en cuenta las dimensiones de las zonas de estudio. Solo la ortofoto para la zona de estudio 1 tendría aproximadamente 46.000 filas y 46.000 columnas.
- Además, los WMS tienen una escala de visualización mínima, que si se sobrepasa, devuelve una imagen en “blanco”.

Tras realizar numerosas búsquedas de algún software o herramienta en algún programa SIG que nos ofreciera la utilidad de realizar las peticiones al servidor, nos encontramos con que el SIG de escritorio **QGIS** daba la posibilidad de generar una imagen digital a partir de descargas múltiples a un servidor WMS.

Tras realizar varias pruebas sobre las zonas de estudio se observó que las imágenes no se descargaban correctamente –además en ambos servidores WMS-. Se podían distinguir “huecos” en la imagen y distorsiones radiométricas. Temiendo que estos errores pudieran afectar al proceso de georreferenciación de la extracción de la línea de costa, se optó por obtener las ortofotos por otro medio de peticiones WMS.

La alternativa fue usar la librería de utilidades de **GDAL**². Esta librería se basa en la ejecución de comandos reconocidos sobre una terminal. Cuando se usa este software sobre una plataforma Windows, los comandos se ejecutan sobre la consola de comandos característica de este sistema operativo. Esta característica y que las órdenes de GDAL tengan una sintaxis lineal, hace que se puedan aprovechar algunas ventajas como crear archivos con extensión ‘.bat’ que ejecutan múltiples órdenes. Por lo que GDAL ofrece cómodamente una solución al problema de realizar numerosos procesos, que en nuestro caso, se trata de realizar numerosas peticiones a un servidor WMS.

²GDAL:

Es una biblioteca de software para la lectura y escritura de formatos de datos geoespaciales publicada bajo la “MIT License” por la fundación “OSGeo”. Con esta librería se pueden realizar multitud de operaciones de transformación y procesamiento sobre gran variedad de datos ráster y vectoriales.

<http://www.gdal.org/>

En resumen, el proceso de obtención de una ortofotografía para una zona de estudio y un servidor WMS específico, seguiría los siguientes pasos:



Todos estos procesos fueron realizados mediante órdenes de GDAL que se explican en el Anexo 2 de este proyecto.

Decidido este flujo de trabajo, se obtuvieron las ortofotos por cada zona de estudio y para ambos servidores WMS. Por lo que finalmente se obtuvieron **8 ortofotos** (2 para cada zona de estudio) en un sistema de referencia **EPSG: 32629** y con unas resoluciones espaciales de **0,5 m/pixel y 30 m/pixel**.

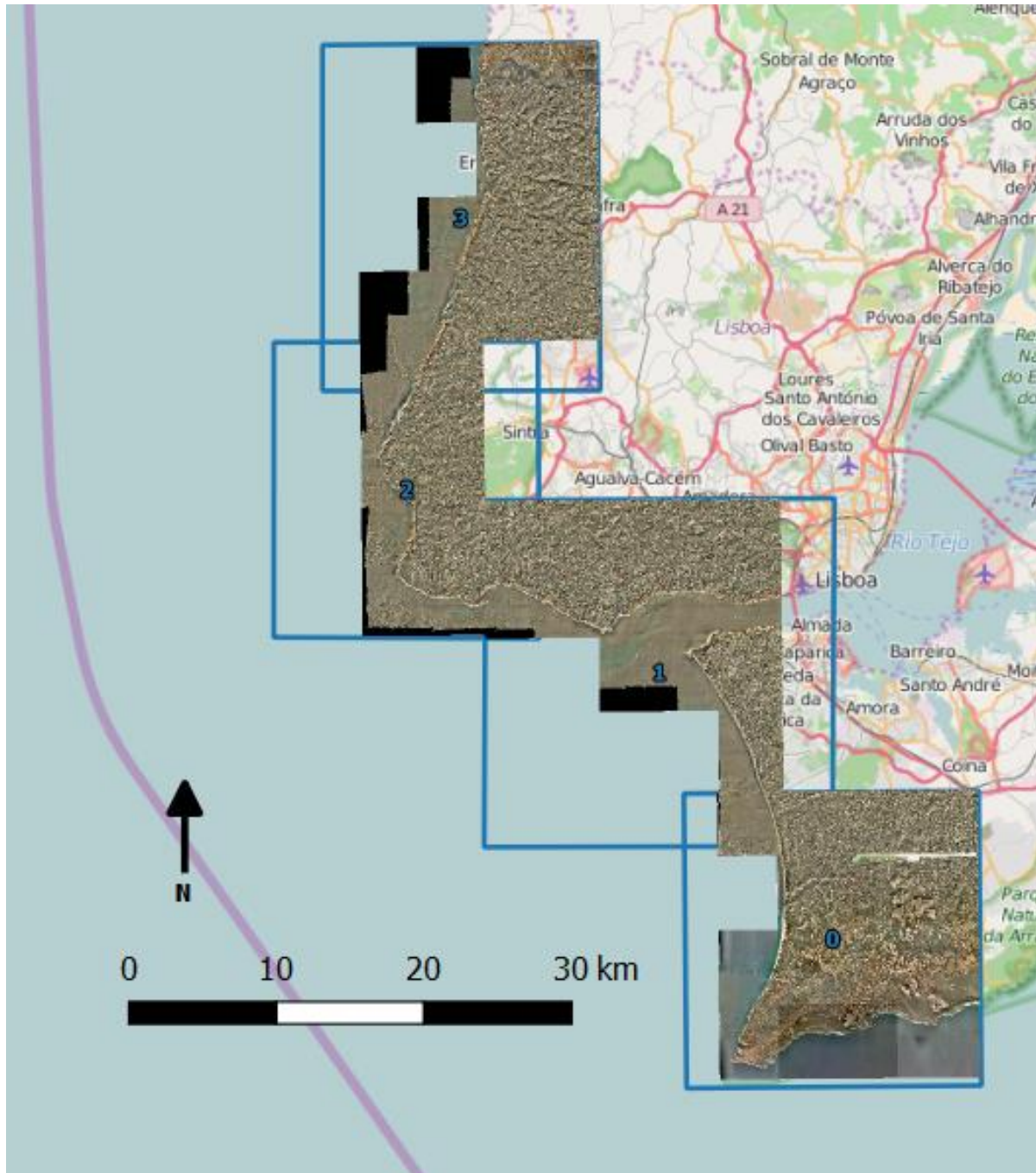


Figura 4.3: Ortofotos obtenidas del servicio <http://www.igeo.pt/WMS/Cartografia/Ortos>

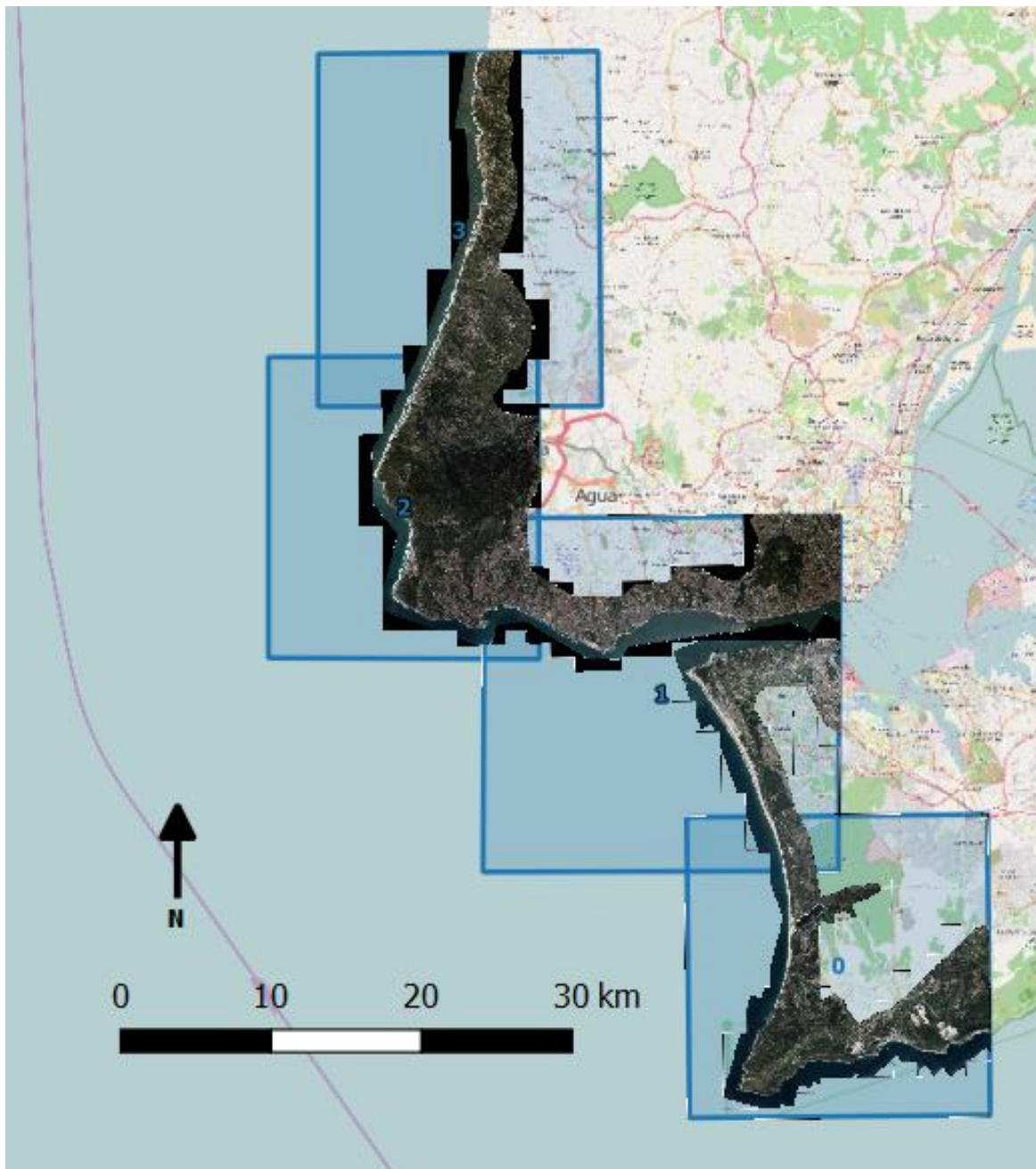


Figura 4.4: Ortofotos obtenidas del servicio <http://mapas.dgterritorio.pt/wms/ortos2014-litoral>

4.1.4. Datos Mareales

Como se ha comentado en el marco físico de este proyecto, la costa Portuguesa se caracteriza por poseer un rango mareal bastante amplio, lo que hace que las variaciones en la línea de costa sean significativas por el constante cambio del nivel del mar.

En este proyecto las mareas han sido uno de los datos más importantes a tratar dando lugar a gestionar estas, -junto con las líneas de costa- de numerosas maneras posibles. Por lo que fue necesario obtener datos mareales los más exactos posibles, ya que a priori, se desconocía la importancia final que tendrían estas sobre los resultados finales.

Los datos de marea fueron extraídos del repositorio de ficheros del **Mareógrafo Nacional de Cascais**³:

³Mareógrafo Nacional de Cascais:

Fuente:

<ftp://ftp.igeo.pt/Cascais/maregrafo/>

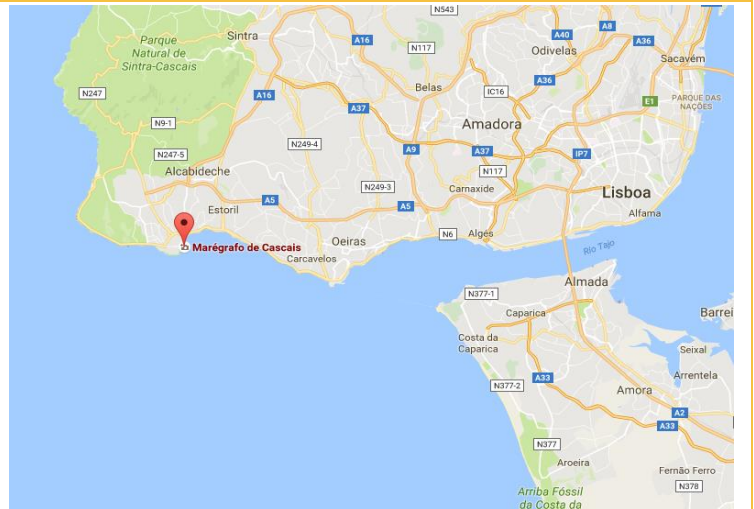
Coordenadas ETRS89:

Latitud = 38.69319444 N (deg)

Longitud = 9.41530555 W (deg)

Altura ortométrica del Benchmark:

H = 3.579m



Como los datos se dividían por fechas, se fueron examinando una a una las fechas correspondientes a las imágenes Landsat en la tabla de Excel y se fueron descargando los paquetes de datos ‘.zip’ del repositorio del mareógrafo.

Se puede apreciar en la figura 4.5, como en el repositorio se disponen de datos solo desde el **4/10/2007**. Esto supuso que al no disponer de datos mareales antes de esa fecha, un gran número de escenas de Landsat se tuvieron que descartar para el proceso de extracción de la línea de costa, ya que a la hora de analizar estas, no se tendría ninguna información acerca del nivel del mar y por tanto la posición relativa de la línea de costa dependería ampliamente de un factor no cuantificado.

De las 150 escenas de partida, se tuvieron que descartar para el proyecto **61 imágenes** anteriores a la fecha del 4/10/2007. Todas las escenas suprimidas pertenecían al sensor ETM+ de Landsat 7 y TM de Landsat 5. Ninguna escena del Landsat 8 fue descartada en este proceso.

Índice de /Cascais/maregrafo/

Nombre	Tamaño	Fecha de modificación
[directorio principal]		
2007/		5/12/15 23:12:00
2008/		5/12/15 23:12:00
2009/		5/12/15 23:12:00
2010/		22/1/16 13:42:00
2011/		5/12/15 23:12:00
2012/		5/12/15 23:12:00
2013/		5/12/15 23:12:00
2014/		5/12/15 23:12:00
2015/		23/3/16 13:30:00
2016/		23/3/16 13:32:00
Cascais-Air-Press-01-05-16.ap	6.8 kB	2/5/16 0:59:00
Cascais-Air-Press-01-06-16.ap	6.8 kB	2/6/16 0:59:00
Cascais-Air-Press-02-05-16.ap	6.8 kB	3/5/16 0:59:00

Índice de /Cascais/maregrafo/2007/		
Nombre	Tamaño	Fecha de modificación
[directorio principal]		
C_2007-10/	22/4/15 11:01:00	
C_2007-11/	22/4/15 11:01:00	
C_2007-12/	22/4/15 11:01:00	

Figura 4.5 Repositorio del mareógrafo de Cascais.

Se procedió entonces a la descarga de los datos del repositorio de las fechas. Cabe destacar que durante la descarga de los datos, algunas fechas como el mes o el día de la escena Landsat no se encontraron en el repositorio. Esto puede que fuese debido a problemas de medición en el mareógrafo o a procesos de

mantenimiento. En total, no se encontraron la fecha exacta de **13 escenas**. Esto mismo se apuntó en una columna de 'Observaciones' en la tabla Excel del proyecto (Anexo1).

El paso siguiente fue descomprimir y examinar los archivos descargados. Los archivos pertenecientes al nivel del mar se dividían entre los archivos de extensión '.raw' y '.aq'. Los primeros hacen referencia a los datos crudos que se obtiene de la medición del mareógrafo, con un intervalo de 5 segundos; el segundo se intuye que son los mismos datos pero depurados de ruido mediante interpolación y con intervalo de tiempo de 3 minutos. Además los ficheros '.aq' ofrecían datos de todo el día mientras los '.raw' se organizaban por horas. Esto último se puede apreciar en la siguiente figura:

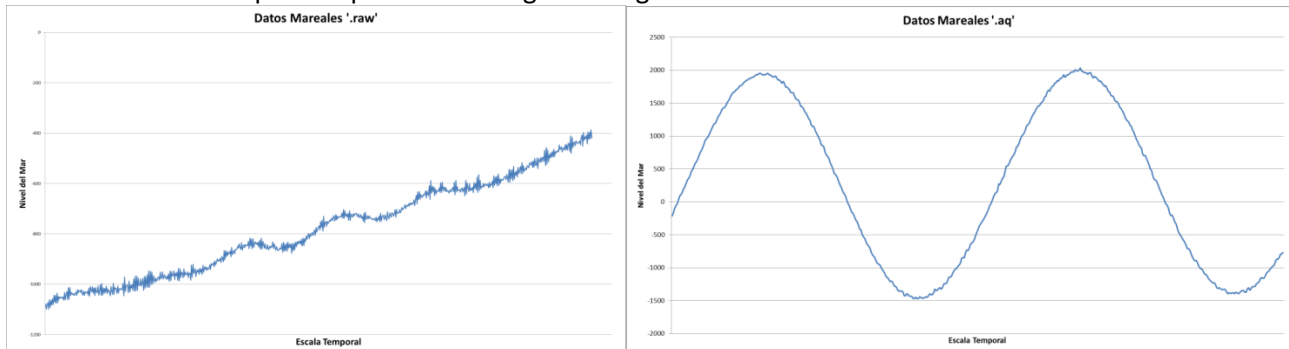


Figura 4.6: Diferencias gráficas entre datos mareales '.raw' y '.aq'.

Se tomaron los datos en la tabla Excel de ambos ficheros, pero finalmente utilizaríamos el valor de marea de los ficheros '.aq'.

- [El valor de nivel del mar de los ficheros '.raw'](#), se insertó en tabal Excel examinando cada fecha y cada hora del centro de escena de las imágenes Landsat y tabulando el dato del nivel mar más cercano a esa hora de centro de escena. Al estar separados los datos por intervalos de 5 segundos, no se supuso una gran variación en el nivel del mar.
- [El valor de los ficheros '.aq'](#), al tener un intervalo de tiempo mayor, se calculó por medio de una interpolación ponderada entre los dos valores más cercanos a la hora del centro de escena. Se supuso que 3 minutos podían ser suficientes para que el nivel del mar experimentar un cambio de hasta 5 cm. La fórmula que se empleó fue la siguiente:

$$NM_{interp.} = \frac{NM_{t_1} * P_1 + NM_{t_2} * P_2}{P_1 + P_2}; \quad P_1 = \frac{1}{|t_{hce} - t_1|}; \quad P_2 = \frac{1}{|t_{hce} - t_2|};$$

Dónde:

- NM_{t_1} y NM_{t_2} son los valores de nivel del mar en los diferentes instantes.
- t_{hce} es la hora del centro de escena.
- t_1 y t_2 son los diferentes instantes, y P_1 y P_2 sus correspondientes pesos.

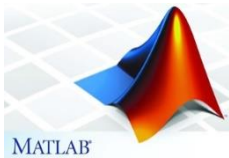
Todos estos valores, se pueden ver recopilados en la tabla Excel del proyecto (Anexo 1), la cual pasamos a denominar a partir de ahora **BDA** (Base de Datos).

Poseer el nivel del mar instantáneo para cada escena Landsat resultaba muy útil ya que se podría analizar de forma individualizada cada línea de costa con un dato de marea cuantitativo, o realizar clasificaciones a las líneas en el proceso de análisis en función de si poseían un nivel del mar positivo o negativo. Sin embargo, una de las clasificaciones más interesantes a realizar sobre los datos mareales es saber que escena se encontraba con una marea creciente o decreciente, o si el instante de toma de las escenas se encontraban en periodos de pleamar o bajamar. Este tipo de clasificación podía mostrar algunos fenómenos interesantes, como que la línea de costa de se esté detectando en las transiciones de arena seca

y húmeda de la terraza intermareal de la playa. Este fenómeno se ha demostrado en otros trabajos en dónde las líneas de costa también se extraen con SELI, por ejemplo: Miguel Rioja, Iñaki; 2016.

Se necesitó crear las gráficas de nivel del mar para cada escena Landsat y mediante su visualización determinar si el instante de toma se encontraba con marea creciente o decreciente. Se decidió programar este método mediante el software **MatLab**⁴.

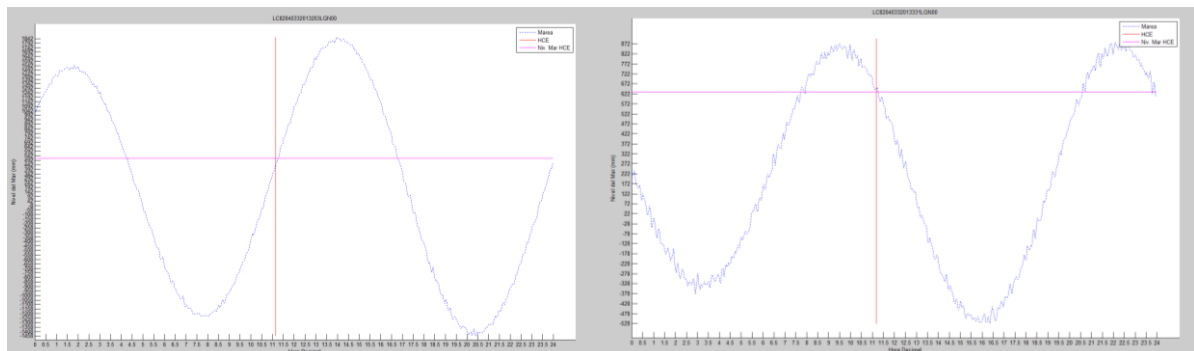
⁴MatLab®:



Es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de procesos y la creación de interfaces de usuario (GUI).

Se crearon dos programas, uno que leyera los ficheros '.aq' y devolviera una matriz cuyas columnas se correspondieran con el tiempo y la cota del nivel del mar, a esta función se la denominó 'read_aq.m'. El otro programa, denominado 'graph.m' y tenía como función principal leer la lista de entrada -dónde se encontraban el identificador Landsat absoluto, y en su misma fila, la ruta al archivo '.aq' que le correspondía- y generar y guardar las gráficas de cada escena con el nombre del identificador Landsat.

En las siguientes figuras 4.7 se muestran ejemplos de las gráficas que se obtuvieron gracias a estos programas:



Figuras 4.7: Diferentes escenas Landsat con comportamiento mareal creciente y decreciente.

En línea discontinua, se representa los datos de nivel del mar, la línea vertical roja se corresponde con la hora de centro de escena de la imagen Landsat de esa fecha y la línea horizontal magenta representa el nivel del mar interpolado que se calculó cuando se introdujeron los datos numéricos del nivel del mar.

En las gráficas mostradas, se puede ver como en la primera escena, la marea se encuentra en fase de crecimiento, mientras que en la segunda se encuentra en fase de decrecimiento.

Con este mismo criterio se fueron introduciendo el comportamiento mareal para cada escena en la BDA del proyecto, identificando los siguientes comportamientos:

- **Creciente**
- **Decreciente**
- **Pleamar (máximo relativo)**
- **Bajamar (mínimo relativo)**

Llegados a este punto, se consideró que los datos mareales habían sido tratados correctamente para más adelante, en el proceso de análisis, clasificar la líneas en función de estos y verificar la concordancia de los resultados finales entre las diferentes clasificaciones.

4.1.5. Playa de Estudio

Resulta que las zonas de estudio que se definieron en un principio para el proyecto, abarcaban mucha extensión para poder realizar un análisis individualizado por cada playa. Esto y las limitaciones en cuanto a tiempo de este TFG, hizo que se tuviera que acotar la zona de análisis a una sola playa.

No obstante, el extrapolar la metodología a otras playas hubiese sido cuestión de repetir el proceso de análisis e interpretar los resultados.

Examinando la zona, se pudo ver que la playa más extensa y representativa de la zona era la que abarca desde el sur de la bahía de Lisboa –la costa de Caparica-, hasta la zona de la Arrábida –cerca al municipio de Aldeia Do Meco-. Se trata de una playa con una extensión aproximada de **24 kilómetros** formada de arena fina, lo que la hace un lugar atractivo para el turismo costero. Se trata además de una playa con características heterogéneas ya que:

- La zona norte se encuentra numerosas construcciones artificiales costeras como el campo de 9 espigones y los malecones construidos paralelos a la costa. Además se puede observar algunas urbanizaciones y asentamientos construidos muy próximos a la costa.
- A medida que se avanza hacia el sur de la playa, se ve como esta presenta un entorno más natural sin construcciones artificiales y con predominancia de campos de dunas con vegetación abundante y algunos acantilados fósiles a continuación de la berma.
- Cabría destacar la presencia de la “Lagoa de Albufeira”, que se trata de una albufera en el municipio de Sesimbra. Esta albufera tiene además la particularidad de que se crean cauces de entrada y salida de agua muy cambiantes, geomorfológicamente hablando, debido a la acción de las mareas en la zona.



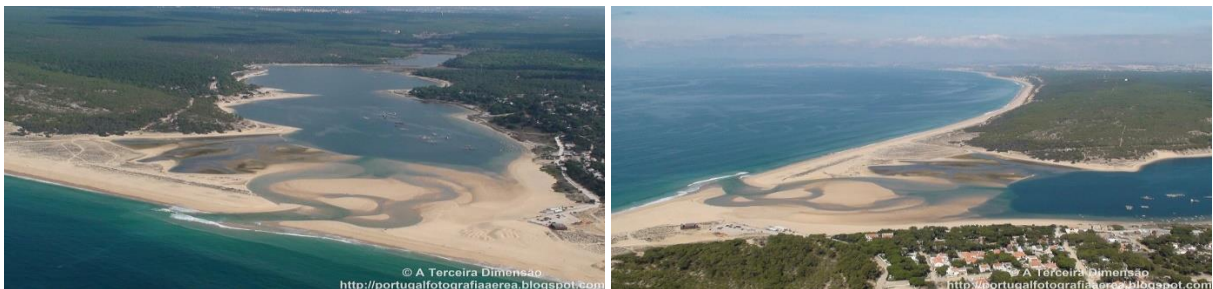
Figuras 4.8: Vistas áreas de la playa de estudio. Fuente: Internet.



Figuras 4.9: Zonas urbanas adyacentes a la playa de estudio. Fuente: Internet.



Figuras 4.10: Entornos naturales y campos de dunas de la playa de estudio. Fuente: Internet.



Figuras 4.11: "Lagoa de Albufeira" sobre la playa de estudio. Fuente: Internet.

4.1.6. Línea de Referencia

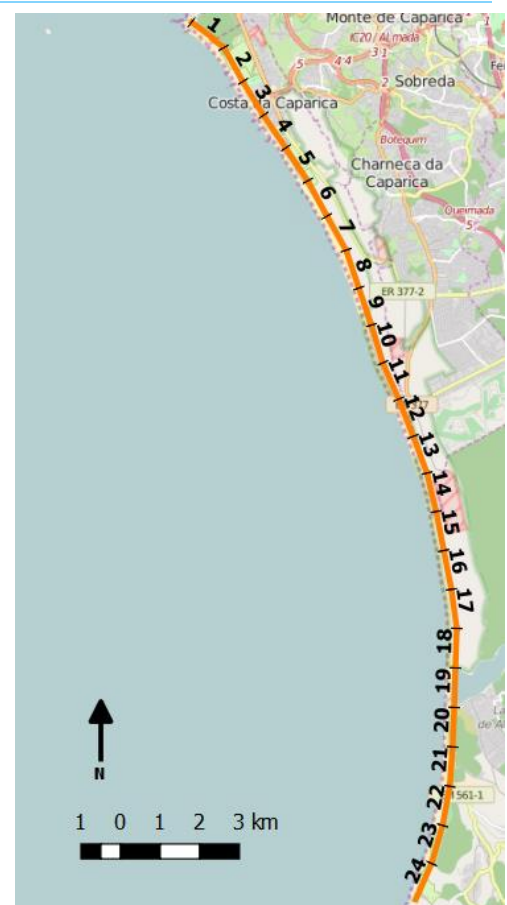
Una vez definida la playa de interés para su estudio, se definió una línea de referencia a esta para estudiar la evolución temporal de las líneas de costa extraídas. Definir esta línea de referencia fue esencial ya que no tiene ningún sentido estudiar las distintas posiciones de la línea de costa sino se establece una referencia clara y estable.

Esta línea fue definida a lo largo de la playa de estudio y separada de ella tierra adentro aproximadamente **200 metros**. Para ello se definió en un SIG de escritorio un archivo '.shp' denominado 'RL_id10.shp'. A esta línea se decidió entonces sectorizarla en segmentos de 1 kilómetro, por lo que la línea se compuso de un total de **24 segmentos** (24 kilómetros de extensión de la playa), cada uno de ellos con un azimut constante ya que se definieron por coordenadas polares.

Esta segmentación sería necesaria a la hora de realizar el análisis sobre la playa ya que nos definiría diferentes sectores en los que la playa pueda tener un comportamiento evolutivo diferente.

Esta línea y sus sectores, se pueden visualizar en la Figura 4.12.

Figura 4.12: Línea de referencia y sectores definidos sobre la playa de estudio.



4.1.7. Estructuras Artificiales Costeras

Por último, se marcaron las estructuras artificiales próximas a la zona costera, sobre todo los espigones de la zona norte de la playa de estudio, además de los malecones cercanos a la costa, los cuales muchas veces se ven cubiertos de agua por los altos niveles de marea o por los fuertes temporales de la zona.

Las construcciones artificiales se definieron en un SIG con una capa de puntos dónde se marcaron los espigones y los malecones, y otra capa de polilíneas donde se marcaron únicamente los espigones.

Esta última capa sería de gran interés a la hora de realizar el análisis espacial ya que el algoritmo SELI no define de modo eficiente la línea de costa en el perfil de los espigones, ya que se trata de una estructura muy estrecha y con una doble transición tierra-agua. Por lo que es normal que en los alrededores de los espigones se presenten puntos anómalos de línea de costa, que afectarían gravemente a los parámetros estadísticos del análisis evolutivo.

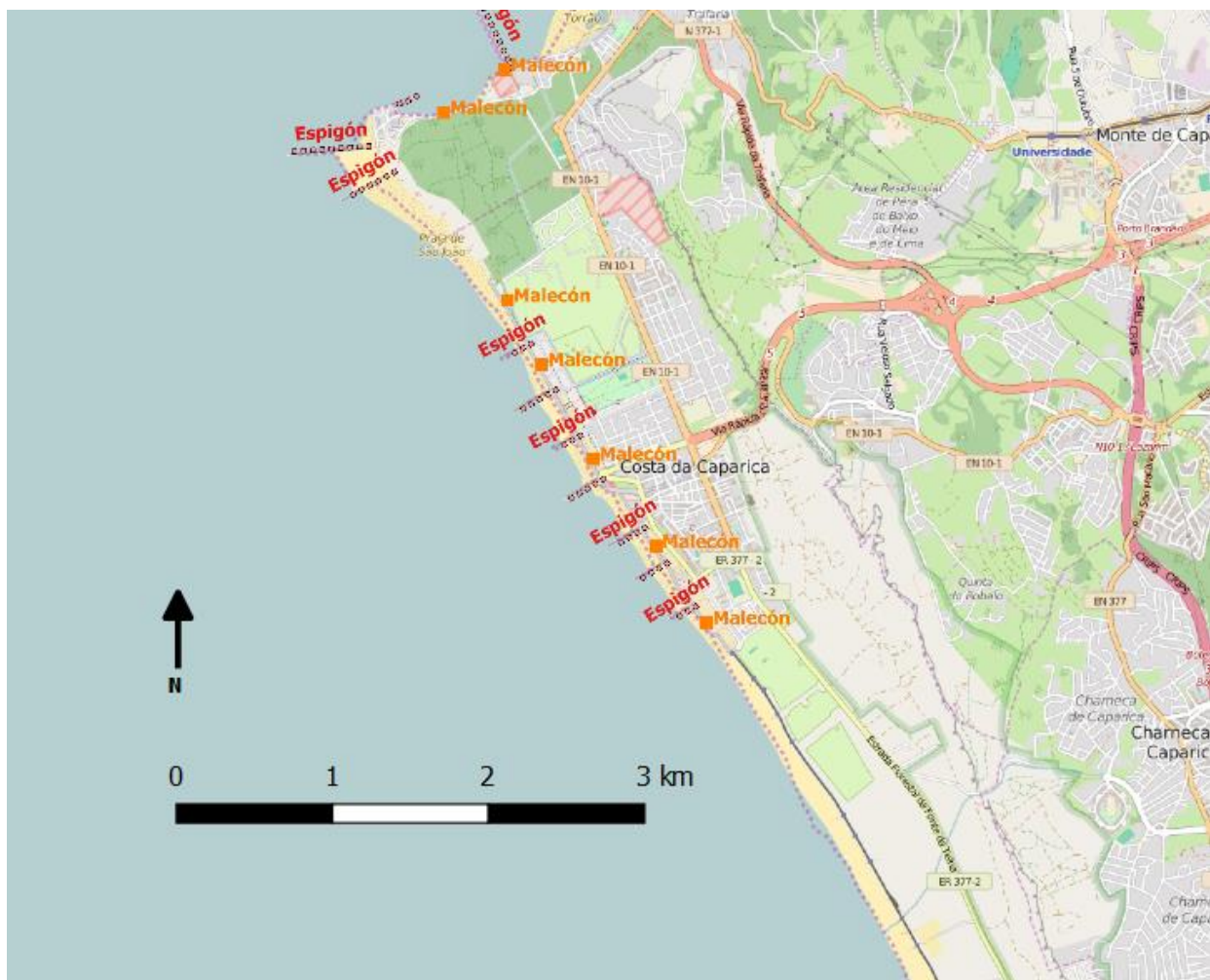


Figura 4.13: Construcciones artificiales presentes en la playa de estudio.

4.2. EXTRACCIÓN DE LAS LÍNEAS DE COSTA

En los siguientes apartados, se explican los procesos seguidos para la extracción de las líneas de costa desde las escenas Landsat descargadas. Esta parte representa la fase de “Obtención de los datos de estudio”.

4.2.1. Proceso de Extracción Semi-automática: SELI

La metodología usada para la extracción de las líneas de costa ha sido la metodología propuesta por Pardo-Pascual y Almonacid Caballer (2014). Dicha metodología se denomina **SELI** (Shoreline Extraction from Landsat Imagery) y es propiedad del grupo de investigación de **CGAT** (Grupo de Cartografía Geo-Ambiental y Teledetección, UPV).

SELI, resulta ser un software de extracción de líneas de costa sobre imágenes Landsat con precisión sub-píxel. Recordemos que las imágenes Landsat constan de una resolución espacial de **30 m/píxel**, sin embargo, esta resolución resulta inadecuada para poder apreciar cambios de menor magnitud en las costas. SELI, aplica una serie de algoritmos los cuales permiten obtener los puntos que definen una línea de costa con una precisión entorno a **±5 metros**, la cual supone una mejora muy considerable en la precisión.

Su esquema de procesamientos puede apreciar en la figura 4.14:

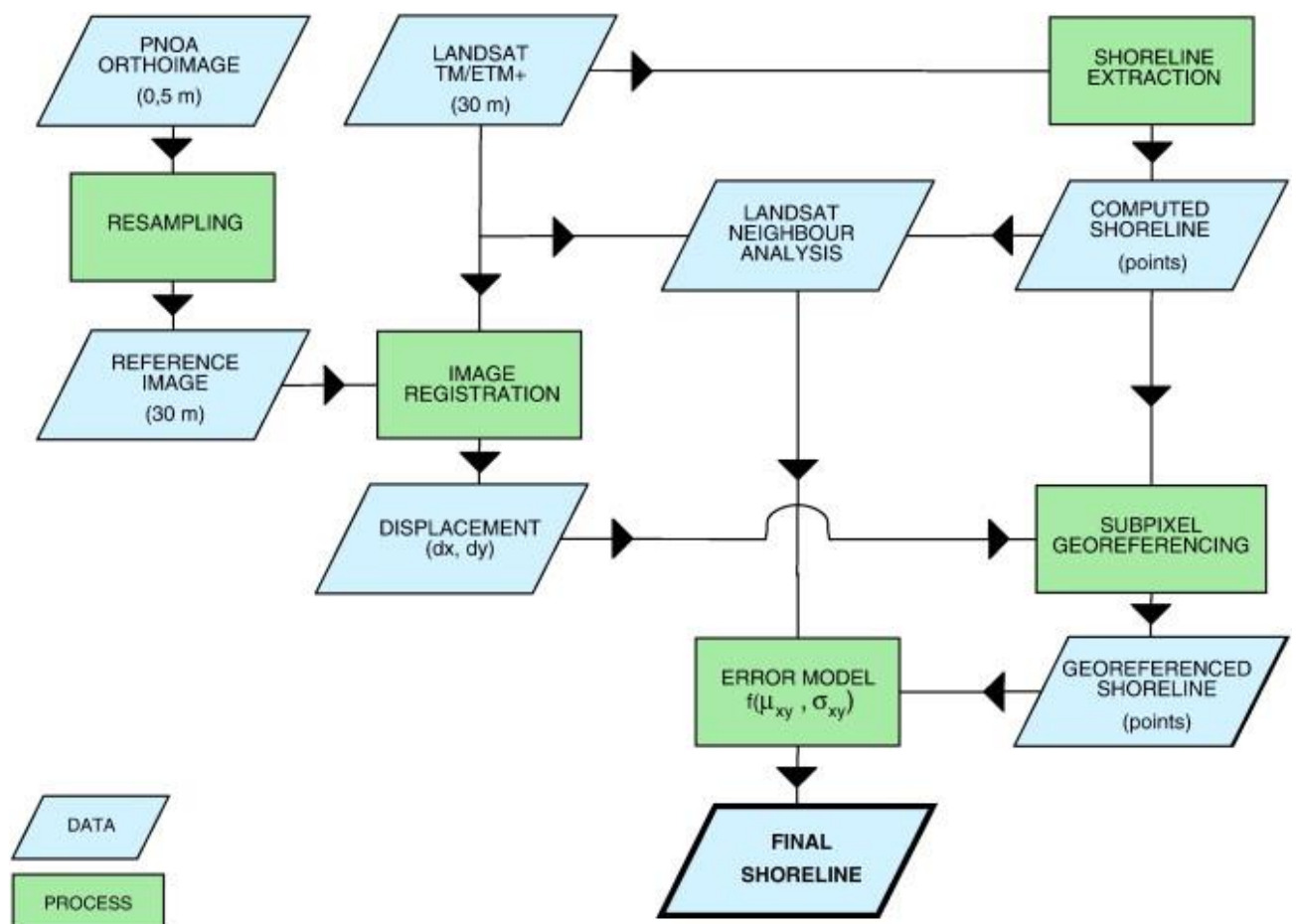
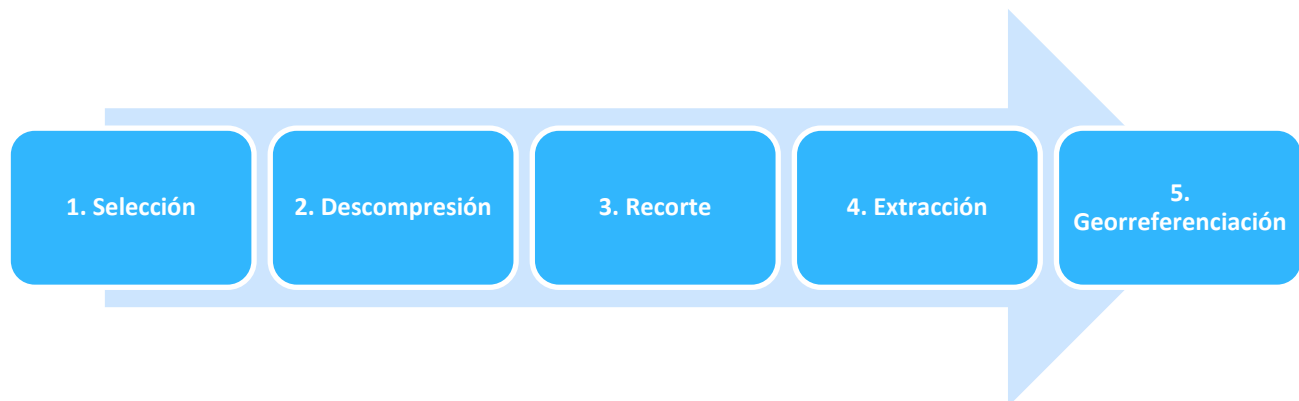


Figura 4.14 Flujo de trabajo básico de SELI.

SELI se encuentra programado de manera semi-automática en los entornos de MatLab® e IDL (entorno de programación del SIG de ENVI®) de manera que realizar los diferentes procesamientos, requiere ejecutar una serie de códigos en uno de estos dos softwares.

Los pasos que se siguieron para la utilización de SELI en este proyecto son los que se representan a continuación:



1. **Selección.** De las 150 escenas descargadas en un principio, solo usaríamos para nuestro proyecto un total de **74 imágenes**, ya que el resto o por falta de datos de marea o porque el porcentaje de nubes era muy elevado, no entrarían en el proceso de extracción. Este proceso de selección no es propio de SELI, pero para nuestro proyecto fue necesario.
2. **Descompresión.** El primer proceso de SELI, consiste en la descompresión de las imágenes Landsat descargadas. Las escenas vienen comprimidas en formato ‘.tar’ y el nombre de archivo de cada escena coincide con su identificador absoluto. Este proceso ha de ser ejecutado sobre MatLab®. El resultado son las imágenes de las bandas correspondientes al infrarrojo cercano, medio y lejano (NIR, MIR y FIR) de los archivos ‘.tar’ seleccionados. Respecto a las bandas que se extraen esta depende del satélite Landsat de procedencia, así pues se define una estructura por satélite y banda infrarroja la cual se observa en la figura 4.15. Esta estructura que se crea es esencial tenerla presente, ya que cada línea de costa que se extrae pertenece a un Landsat y a una banda infrarroja concreta.

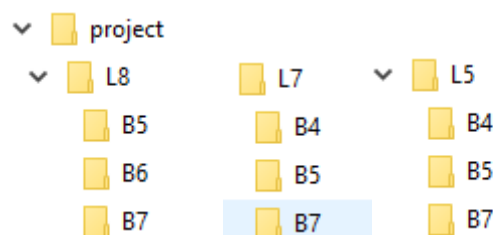


Figura 4.15: Estructura satélite-banda del proyecto

3. **Recorte.** Es el proceso por el cual, las escenas Landsat se recortan según las zonas de estudio definidas en el apartado 4.1.1 de este capítulo. Como se comentó anteriormente, este recorte es necesario para no saturar la memoria del proceso de extracción. Este proceso se ejecuta sobre IDL y como “inputs” tienen las escenas Landsat descomprimidas del paso anterior y el archivo de geometrías ‘.shp’ que definen las zonas de estudio (‘zones_overlap.shp’). Cuando se han recortado todas las escenas, se examinan los recortes de manera visual y se descartan aquellos que tienen una cobertura nubosa considerable, de lo contrario el proceso de extracción de estos recortes “nubosos” daría un error de procesamiento. Esta fase aunque no es propia de SELI, sí que es necesaria, ya que

en nuestro proyecto hay escenas en las que una zona de estudio presentaba intervalos nubosos, pero en otras zonas el cielo está despejado (ver figura 4.16).

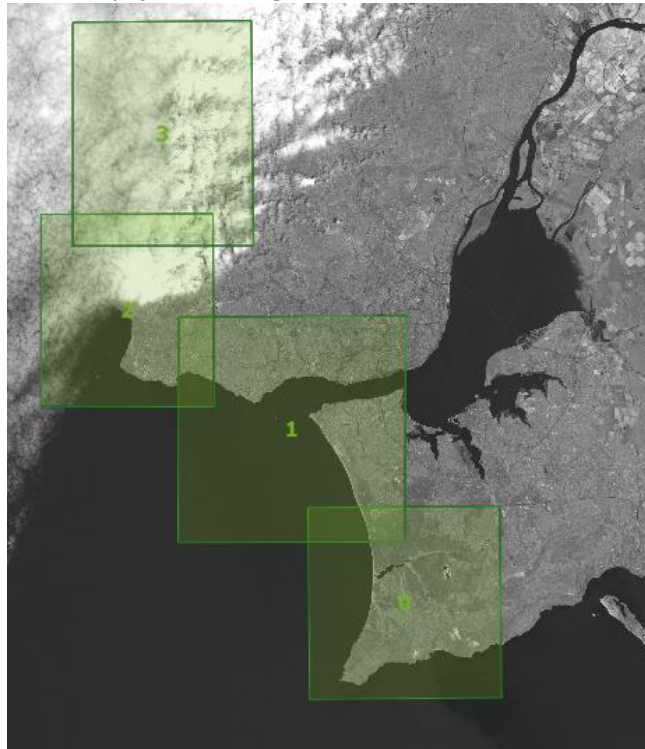


Figura 4.16: Recortes nubosos sobre zonas 2 y 3 pero despejados sobre zonas 0 y 1.

4. **Extracción:** La extracción se trata de la parte más significativa de SELI. En ella se calculan la serie de puntos que forman la línea de costa. Este proceso se ejecuta sobre MatLab® y se efectúan los siguientes pasos:
 - a. Detección de línea a nivel de pixel: Esta línea se usa como primera aproximación para definir la ventana de barrido. La detección se basa en la toma de dos muestras definidas por el usuario, una zona de agua y otra de tierra, de las cuales se obtienen la media y la desviación típica de los niveles digitales. Con estos valores y asumiendo que cada una de las muestras se aproximan a una distribución normal, se obtiene el umbral óptimo mediante la intersección de las dos distribuciones. Posteriormente se aplica un filtro de dilatación morfológica sobre la cobertura terrestre y este se resta sobre la primera imagen binarizada (tierra-agua) obtenida. Se obtiene entonces una línea definida por píxeles de **30 metros** que representa la línea de costa de manera aproximada.

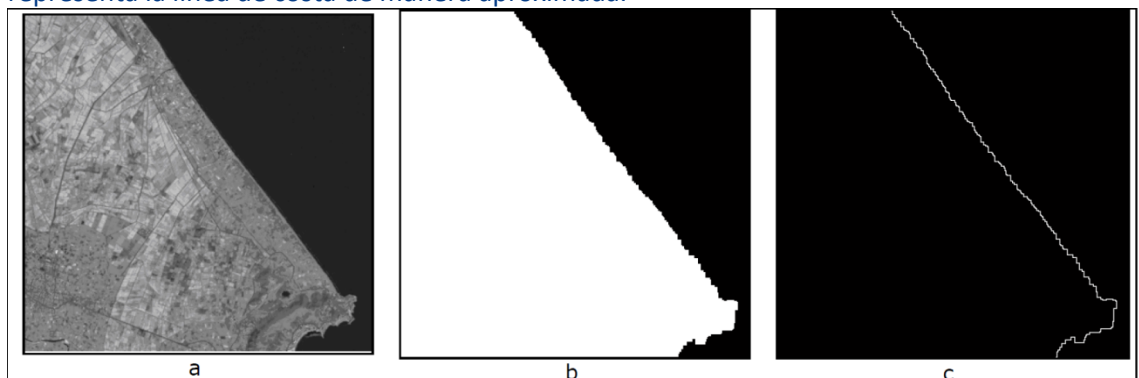


Figura 4.17: Procesos de detección de la línea de costa a nivel de pixel. Fuente: Pardo & Almonacid 2014.

- b. Detección de línea a nivel sub-píxel: Esta fase opera sobre la primera línea de aproximación y para ello, se asume que la separación tierra-agua se sitúa en el gradiente máximo de la función de intensidades de la banda infrarroja. La aplicación se basa en la definición de una ventana de análisis de 7x7 píxeles que se desplaza sobre la primera línea y que definen la función de intensidades como $z = f(x, y)$. Mediante una densificación por convolución cúbica, se incrementa el número de puntos, de este modo es posible ajustar los datos a un polinomio matemático por mínimos cuadrados. Con las funciones matemáticas ajustadas en cada vecindario, se aplica un operador laplaciano que detecta su punto de inflexión, que resulta ser el lugar dónde el gradiente es máximo. El resultado representa la posición de separación de la tierra y el agua. Como se procesan todos los puntos en el vecindario de 7x7, se asume que los puntos centrales a la ventana serán más precisos, por lo que se aplica un peso gaussiano a estos en función de su distancia desde el centro.

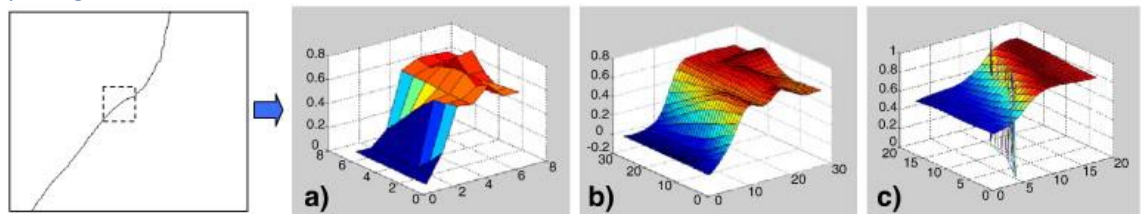


Figura 4.18: Procesos de detección de la línea de costa a nivel sub-píxel. Pardo & Almonacid 2014.

Adicionalmente, este proceso se aplica a cada píxel de la primera línea, por lo que un mismo píxel se procesa en varios vecindarios produciendo diferentes soluciones. La solución final se calcula mediante una media ponderada de los pesos gaussianos previamente definidos.

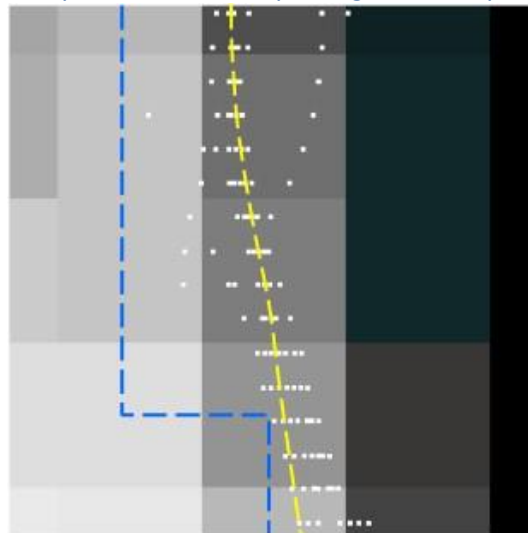


Figura 4.19: Línea a nivel de píxel (azul), diferentes posiciones obtenidas de la línea de costa (blanco), línea a nivel sub-píxel calculada (amarillo). Pardo & Almonacid 2014.

5. **Georreferenciación:** este proceso es el que dota de precisión métrica a la línea de costa y representa uno de los procesos más importantes en SELI. Este se llevó a cabo sobre IDL. EL USGS, sirve las imágenes Landsat con una precisión mejor que **0,4 píxeles**, es decir, que las imágenes Landsat presentan una precisión en su georreferenciación de aproximadamente **12 metros**. Esta precisión puede no ser suficiente para determinar cambios menores en las líneas de costa, por esta razón, se ha de llevar a cabo una georreferenciación sub-píxel. Esto se logra aplicando la Transformada Discreta de Fourier, la cual se basa en la correlación cruzada de dos imágenes de la misma ubicación. Utilizando este procedimiento, se determina la magnitud del desplazamiento en los ejes x e y de los puntos que forma la línea de costa calculados en el paso anterior, cuando se comparan dos imágenes de la misma ubicación. Las imágenes que se utilizaron para este proceso, fueron los

recortes de las imágenes Landsat y las ortofotos obtenidas en el apartado 4.1.3. Recordamos que tanto los recortes como las ortofotos se obtuvieron mediante las zonas de estudio, por lo que ambas imágenes abarcan la misma extensión. Las ortofotos se obtuvieron con una resolución de **0,5 m/pixel** y estas fueron remuestreadas a **30 m/pixel** para que el proceso de georreferenciación funcionara correctamente. En concreto, se usaron los ortos del servicio WMS de <http://mapas.dgterritorio.pt/wms/ortos2014-litoral>.

Tras aplicar SELI mediante todos los pasos anteriores, el resultado final son unos archivos de texto con formato **‘.sal’** en dónde se almacenan los puntos que forman la línea de costa espaciados entre sí aproximadamente unos **7,5 metros** y con una precisión de posicionamiento de unos **5 metros**. Los archivos **‘.sal’** se nombran según el identificador absoluto de Landsat, su banda y su zona de estudio de procedencia.

Nota: SELI cuenta con proceso adicional después de la georreferenciación, en el que se aplica una corrección radiométrica para retranquear los puntos que se hayan visto desplazados por diferencias radiométricas en la escena Landsat y obtener una precisión en los puntos de hasta 3 metros. Este proceso al estar solo calibrado para del Mediterráneo no se aplicó a nuestro proyecto ya que las características radiométricas de las escenas Landsat cambian de un lugar a otro.

Tratamiento de los Datos Brutos Obtenidos

Para poder analizar con propiedad las líneas de costa, estas debían de ser exportadas a algún formato de geometría con el cual se pudiera tratar con un SIG de escritorio. Se optó por exportar los archivos **‘.sal’** obtenidos a formato **‘.shp’**.

Dada la gran cantidad de líneas de costa obtenidas, **222 en total**, resulta inviable exportar a **‘.shp’** cada una de ellas manualmente, por esta razón, se optó por crear un programa en lenguaje **Python** –lenguaje de programación usado por la gran mayoría de SIG- que leyera las coordenadas de los diferentes puntos en los archivos **‘.sal’** y creara un archivo **‘.shp’** de las líneas.

Este programa se le denominó **‘sal2shp.py’** y fue creado en colaboración con este proyecto por Jesús Palomar Vázquez, miembro del grupo CGAT.

El programa además de transformar las líneas a **‘.shp’** realiza también otras operaciones de vital importancia:

- **Define el sistema de referencia** de la capa mediante un archivo de proyección **‘.prj’**. En nuestro caso, el sistema de referencia a aplicar es el: **WGS84 UTM Zone 29N**.
- **Fusiona las líneas de las diferentes zonas de estudio**, para que una misma línea no se encuentre dividida en diferentes archivos.
- **Calcula un campo de fecha** en formato **‘dd/mm/aaaa’** mediante el identificador de Landsat el cual almacena el año y el día juliano de adquisición.

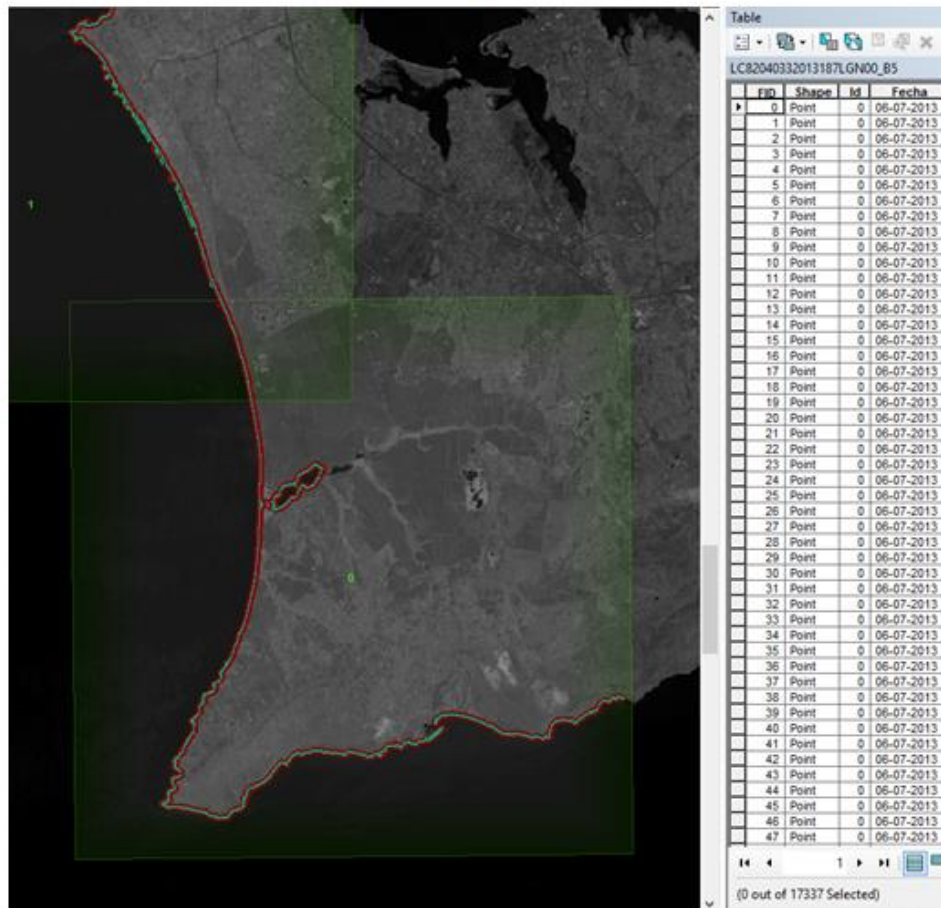
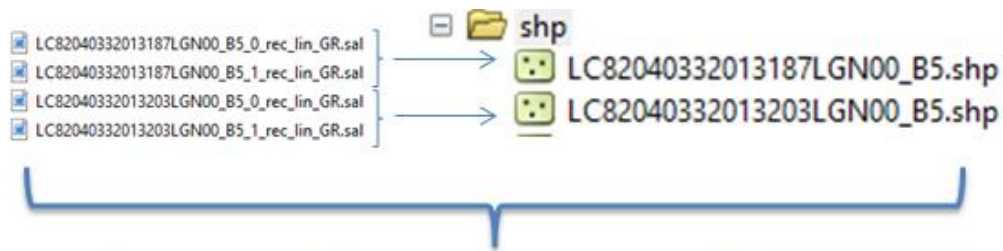


Figura 4.20: Resumen del proceso 'sal2shp'.

Visualización de las Líneas de Costa

Examinando visualmente las líneas de costa obtenidas, observamos que las líneas en las zonas de estudio 2 y 3 no habían sido correctamente procesadas, ya que se encontraban en una posición errónea –a veces exagerada- respecto a las imágenes Landsat. Esto nos hizo determinar qué proceso de los mencionados en SELI, se había dado este error.

Resulta, que si comparamos una línea obtenida por el proceso de extracción, esta resulta estar aparentemente bien posicionada, sin embargo, si se compara la misma línea obtenida después de la georreferenciación, esta se ve gravemente retranqueada. Por lo que deducimos que es el proceso de georreferenciación es el que está causando este error. Curiosamente, el error se está dando en las zonas de estudio las cuales presentan un perfil de costa más irregular debido a los acantilados y las terrazas marinas emergidas. Sin embargo, la fuente del problema podría también estar en las ortofotos, las cuales por algún motivo, no se estén correlando correctamente con las imágenes Landsat; pero este error resulta menos

probable ya que con las otras zonas de estudio (las zonas 0 y 1) la georreferenciación ha funcionado correctamente.

Concluimos por lo tanto que SELI en costas de perfil irregular, ya sean por barrancos, puertos, marismas, etc, no obtiene líneas de costa representativas de la realidad. Esto no es de extrañar ya que SELI fue desarrollado y testeado sobre playas de la costa mediterránea con un perfil de playa suave sin cambios abruptos o artificiales, que son los entornos en dónde se llevan a cabo la gran mayoría de análisis costeros.

Dado que las zonas 2 y 3 resultan menos significativas desde una perspectiva analítica -ya que las únicas playas que se pueden estudiar son calas de tamaño reducido- se decidió prescindir de ellas para las siguientes fases del proyecto.

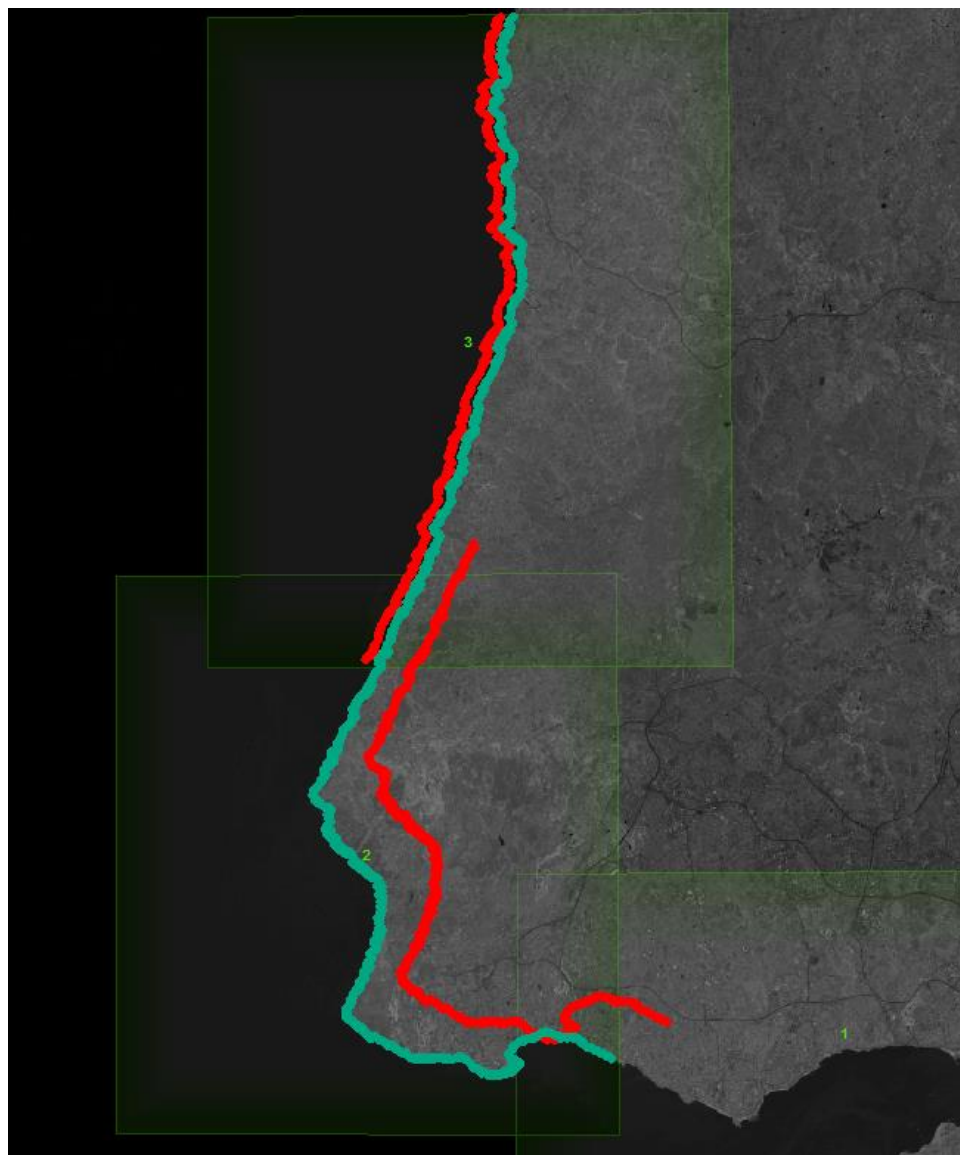


Figura 4.21: Línea de costa LC82040332013187LGN00_B5 obtenida por proceso de extracción (verde) y por proceso de georreferenciación (roja).

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Este apartado aborda la fase analítica del trabajo, primero describiendo las herramientas creadas por el alumno y segundo aplicando estas sobre las costas de Lisboa. Las herramientas creadas son la componente principal de este trabajo y la aplicación de estas sirve para ver que utilidades pueden alcanzar para el estudio de entornos costeros.

5. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

5.1. HERRAMIENTAS CREADAS

Las líneas de costas extraídas de SELI pueden ser analizadas visualmente para examinar características geomorfológicas puntuales o comparar dos líneas de diferentes fechas. No obstante, al examinar las líneas de esta manera, no resultan obvios los cambios a largo plazo sufridos en las costas –a no ser que sean muy abruptos-. Por esta razón, se necesita de un proceso analítico que procese todas las líneas de costa, y mediante técnicas de regresión, establecer una evolución clara y fiable de las playas estudiadas.

Para este proyecto esta metodología de análisis se divide principalmente en dos grandes partes:

1. **Análisis Espacial:** programado en un SIG de escritorio. Este proceso tiene como objetivo principal seleccionar nuestra playa de estudio y depurar, en la medida de lo posible, los posibles puntos anómalos que se hayan extraído junto a la línea de costa (nubes, oleaje, etc).
2. **Análisis Estadístico:** este proceso analiza las líneas de costa que se le indiquen sobre la línea de referencia previamente definida, y mediante modelos de regresión lineal e inferencia estadística, determina la tendencia evolutiva de los diferentes sectores definidos.

Para los diferentes procesos, se crearon diferentes herramientas analíticas sobre diferentes plataformas de software. En los siguientes apartados, se explica más detenidamente el funcionamiento de estas herramientas y su enfoque hacia el análisis evolutivo de los espacios costeros.

Nota: En el apartado de Metodología de Procesamiento, una línea de costa extraída por SELI está formada por una serie de puntos (los cuales se definen por un par de coordenadas planimétricas sobre un sistema de proyección cartográfico). Estos puntos extraídos de SELI, forman lo que muchas veces denominamos ‘Línea de Costa’ y cada línea de costa provienen de un Landsat y una banda infrarroja específica, además, esta tiene una fecha vinculada a la obtención de la imagen satelital.

La diferencia técnica entre una ‘línea de costa’ y una ‘fecha’ puede ser obviada por motivos prácticos, por esta razón, muchas veces nos referiremos a una línea de costa como una ‘fecha’ para abreviar y hacer más llevadera la lectura.

5.1.1. Análisis Espacial

Este proceso se corresponde con el paso posterior a la exportación de los archivos ‘.sal’ a formato de capa geométrica ‘.shp’, y se correspondería con el paso previo al análisis estadístico, ya que, selecciona, depura y mide las líneas de costa sobre la línea de referencia.

Objetivos Principales

Como se ha comentado, la herramienta de análisis espacial persigue **tres objetivos fundamentales:**

1. **Selección** de la playa de estudio.
2. **Depuración** de posibles puntos anómalos.
3. **Medición** de las líneas de costa sobre los diferentes sectores de la línea de referencia.

Para estos propósitos serán necesarios unos datos de entrada y unos **geoprocesos**, sobre todo recortes, disoluciones y funciones de mínima distancia. Para agilizar el proceso se establecerá de un proceso de

iteración, ya que un mismo tratamiento espacial se repetirá para tantas líneas de costa como se indiquen en los “inputs” de la herramienta.

Entorno de Programación

El proceso fue desarrollado sobre la plataforma de **ArcGIS**⁵, en concreto, sobre la versión **10.1**.

Nos decantamos por este SIG de escritorio debido a su profesionalidad, su multitud de funciones analíticas y sus posibilidades de programación y automatización de procesados espaciales. Además, ArcGIS[®] dispone el almacenamiento de la información espacial de una manera centralizada y eficaz mediante el uso de una ‘Geodatabase’ (denominada a partir de ahora **GDB**⁶), la cual resultó ideal para nuestro proyecto y para el uso de esta herramienta dado la gran cantidad de datos que se analizan en este proceso.

Para el procesado espacial y la automatización de este, usamos la extensión de ‘**Model Builder**’⁷ de ArcGIS[®].

Model Builder es un entorno en el que se pueden programar geoprocamos de manera muy intuitiva ya que los elementos se representan como objetos y se establecen conexiones entre los datos de entrada, las herramientas y los datos de salida.

⁵ArcGIS[®]:



Es un SIG de escritorio comercial y propietario, producido y comercializado por ESRI. Este SIG agrupa varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño y publicación de la información geográfica.

<http://www.esri.es/es/productos/arcgis/>

⁶Geodatabase (GDB):



Una geodatabase de ArcGIS[®] es una colección de datasets geográficos de varios tipos contenida en una carpeta de sistema de archivos común, una base de datos de Microsoft Access o una base de datos relacional multiusuario DBMS.

⁷Model Builder:



Model Builder es la herramienta con la que cuenta ArcGIS[®] para la automatización de tareas de Geoproceso.

Datos de Entrada

Los datos de partida necesarios para realizar el procesamiento espacial de una serie de líneas de costa son los siguientes:

- **Feature Dataset de entrada**, dónde se encuentren las líneas de costa que se quieran procesar.
- **Un polígono de primera aproximación**, que abarque la extensión necesaria para que las líneas de costa, donde se encuentren las playas de interés, sea recortada.

- **La línea de referencia** definida tierra a dentro y sectorizada por segmentos con una longitud que definirá el usuario según su interés. Por ejemplo, si estamos estudiando una playa de aproximadamente 1 km de longitud podemos sectorizar la línea de referencia cada 100 metros, de esta manera tendríamos 10 sectores los cuales podríamos estudiar de manera conjunta o separada.
- **Polígonos de áreas conflictivas**, como espigones o zonas que se quieran descartar para el análisis ya que se prevé que las líneas de costa en estos sitios contengan mucho "ruido".
- **Feature Dataset de salida**, dónde se almacenarán las líneas de costas procesadas.

Para una centralización de la información y una mejor gestión de esta, las capas de partida han de formar **'Feature Classes'**⁸ (abreviadas de ahora en adelante FC) y estas se han de hallar en una GDB. Las líneas de costa a procesar deberán de encontrarse obligatoriamente en una **'Feature Dataset'**⁹ (denominada a partir de ahora FD), para que el algoritmo itere únicamente sobre las líneas de costa. Además, cada línea ha de estar nombrada por el identificador de la escena Landsat y de la banda de la que proviene. Por ejemplo: 'LC82015124LGN00_B6', línea de costa proveniente del Landsat 8 y de la banda 6.

También es conveniente que el resto de datos (línea de referencia y los polígonos) se organicen en otra FD, aunque esto último no es completamente necesario.

⁸Feature Class (FC):



En ArcGIS®, es una colección de elementos geográficos con el mismo tipo de geometría (como punto, línea o polígono), los mismos atributos y la misma referencia espacial. Las clases de entidad pueden ser almacenadas en geodatabases, shapefiles, coberturas, u otros formatos de datos. Las clases de entidad permiten almacenar características homogéneas en una sola unidad para fines de almacenamiento de datos. Por ejemplo, autopistas, carreteras principales y caminos secundarios se pueden agrupar en una clase de entidad de línea denominado "carreteras". En una geodatabase, las clases de entidad también pueden almacenar anotación y dimensiones.

⁹Feature Dataset (FD):

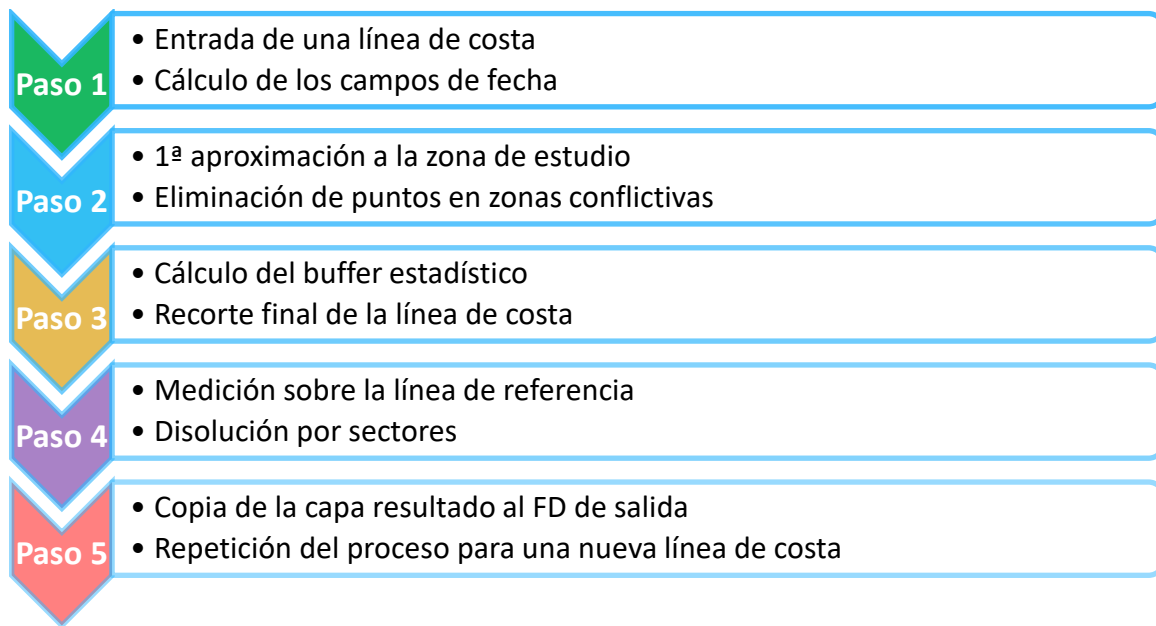


En ArcGIS®, es una colección de clases de entidades almacenadas juntas que comparten la misma referencia espacial, es decir, que comparten un sistema de coordenadas, y sus características dentro de un área geográfica común. Las clases de entidad (FC) con diferentes tipos de geometría se pueden almacenar en un Feature Dataset.

Proceso General

El modelo general de procesamiento espacial fue denominado **'GEN_loop4FC'**, que viene a ser una abreviatura de 'General process that loops for each feature class' (Proceso general que itera por cada FC).

El proceso general del análisis espacial se divide y define en los siguientes pasos:



En la siguiente figura se muestra el algoritmo en la aplicación de Model Builder con los pasos representados y a continuación se explica con más detalle que geoprocenos se realizan en los mencionados pasos:

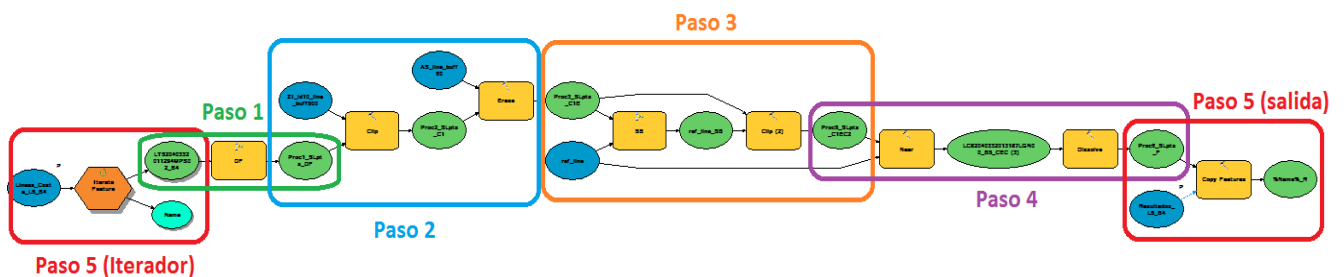
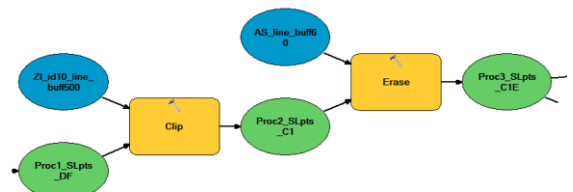


Figura 5.1: Esquema de Model Builder y principales pasos del análisis espacial.

En el **paso 1**, la línea de costa que originalmente entra como una FC de puntos con un atributo de fecha en formato 'dd/mm/yyyy', se le ejecuta una función específica denominada **'DateFields'** y abreviada 'DF' (esta función se detalla más a fondo en el Anexo 3) que lo que realiza en la línea de costa es la creación de tres nuevos campos en la tabla de atributos, para almacenar el día, el mes y el año respectivamente en campos separados. El tener la fecha en campos separados, será útil posteriormente para crear una escala temporal en los gráficos de tendencia evolutiva.

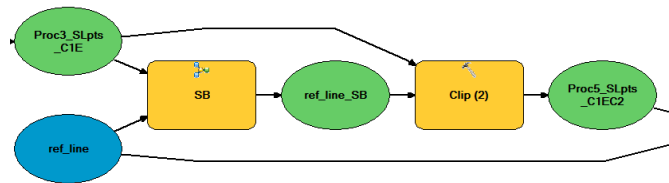


En el **paso 2**, se realiza un primer recorte a la línea de costa denominado **primera aproximación** y seguidamente se procede a un borrado de los puntos de la línea de costa en las **zonas conflictivas** –como los puntos sacados sobre los espigones-. Como se observa en el diagrama de Model Builder, los datos de entrada para estos geoprocenos se corresponden con el polígono de primera aproximación y con el polígono de zonas conflictivas (elementos en azul).



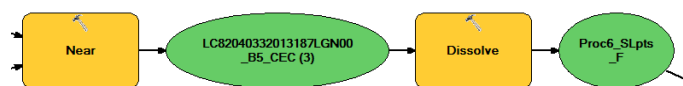
En el **paso 3**, como se prevee que la línea de costa contenga algo de "ruido", se ejecuta una función específica denominada **'Statical Buffer'** y abreviada 'SB'. Esta función se detalla más a fondo en el Anexo 3,

pero básicamente lo que realiza es el cálculo de la distancia mínima entre la línea de referencia y cada uno de los puntos de la línea de costa, de estas mediciones, se extrae la media y la desviación típicas obtenidas. Entonces se ejecuta un 'buffer' sobre la línea de referencia con una distancia igual a la distancia media más dos veces la desviación típica obtenida, es decir, se crea un polígono que contenga el 97% de los puntos de la línea de costa (suponiendo que dichas distancias sigan una distribución normal). Seguidamente, se procede a recortar la línea de costa con esta área de influencia obtenida. La misión de este paso es eliminar los posibles puntos anómalos de la línea de costa que se encuentran mar adentro a causa de fenómenos como la espuma del oleaje o los intervalos nubosos.



Nota: El límite en la fijación del buffer es tentativo y en el futuro podría modificarse si los resultados obtenidos en cada costa sugiriesen que podría obtener mejores resultados con otro umbral.

En el **paso 4**, se ejecuta la función 'Near'. Esta función calcula la mínima distancia entre los puntos de la línea de costa (recortados por el buffer estadístico del paso 3) y la línea de referencia además de indicar el sector (las segmentaciones de la línea de referencia) desde el cual se mide cada punto. Acto seguido, se realiza una disolución por sector en la capa obtenida anteriormente y se calculan los valores estadísticos de las distancias mínimas obtenidas. Los estadísticos que se calculan son:



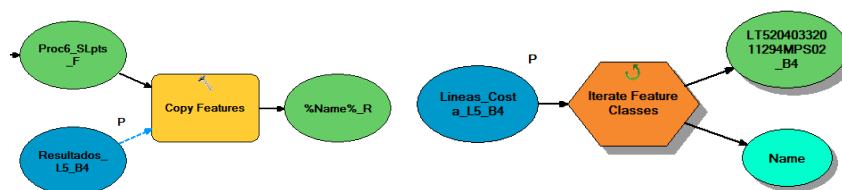
- Número de puntos que se miden
- Rango de distancias mínimas
- Distancia media al sector
- Desviación estándar (indicador de variabilidad espacial)
- Máxima y mínima distancia medida

Además, se conservan los atributos de fecha calculados con anterioridad. Por lo que finalmente se obtiene una línea de costa "limpia" la cual su tabla de atributos muestra una estructura de la siguiente manera:

Campos de Fecha							Estadísticos de la línea de costa					
OBJECTID *	Shape *	NEAR_FID	Fecha	Day	Month	Year	Nº de puntos	Rango	Dist. Media	Desv. Estándar	Max Dist.	Min Dist.
24	Multipoint	24	11-07-2009	11	7	2009	224	227.977992	215.473135	32.752293	331.46229	103.484298
23	Multipoint	23	11-07-2009	11	7	2009	158	32.557685	220.788214	8.988562	240.689969	208.132284

Figura 5.2: Tabla de atributos resultado de cada línea de costa del análisis espacial.

En el **paso 5**, finalmente se copia la capa resultado al FD de salida, ya que todos los procesos llevados a cabo se realizan sobre un FD temporal, y se vuelve iterar el proceso para otra nueva línea de costa hasta que todas las líneas del FD de entrada quedan procesadas.



Quedaría otro proceso de exportación de la tabla de atributos de cada línea a un formato de texto genérico como ASCII. Este paso último se realizó con una función específica denominada 'R2txt'. Los

archivos '.txt' generados por esta función se usarían en la siguiente fase del proceso analítico, la denominada fase de análisis estadística.

5.1.2. Análisis Estadístico

Una vez procesadas espacialmente las líneas de costa con sus atributos exportados a ficheros '.txt', se ha de procesar los datos obtenidos de esta fase mediante una serie de procesos estadísticos que arrojaran unos resultados los cuales puedan ser interpretables para esclarecer una tendencia evolutiva de cualquier entorno costero que se esté estudiando.

Objetivos Principales

La función tiene un **objetivo básico** y es el arrojar una serie de resultados evolutivos capaces de ser geomorfológicamente interpretados, para ello, será necesario que el algoritmo a programar realice las siguientes tareas:

- **Agrupar los diferentes resultados** del análisis espacial por sectores (las segmentaciones de la línea de referencia) y agrupar las diferentes líneas de costa de cada banda en diferentes grupos. Por ejemplo, del Landsat 5 y del Landsat 7, las líneas de costa obtenidas por las bandas del infrarrojo cercano –la banda 4 para los satélites nombrados- pueden ser agrupadas en un único grupo y procesarse a la vez.
- Si los valores importados de las tablas de atributos contienen “outliers”, será necesario realizar algún tipo de eliminación de estos con **umbralizaciones**.
- **Obtener medias anuales o estacionales**, las cuales permitan disipar los posibles efectos mareales o estacionales y evaluar de manera más robusta la evolución costera.
- **Realizar ajustes por mínimos cuadrados de funciones polinómicas** de diferente grado para analizar las tendencias evolutivas de cada sector.
- **Guardar los resultados** y agrupación de los datos en ficheros los cuales se puedan leer fácilmente desde cualquier software por si se desea trabajar más a fondo con ellos.
- **Dibujar las diferentes gráficas** de las diferentes fases para una mejor interpretación y análisis de los resultados.

Entorno de Programación

Realizar todas estas tareas requerirá que se procesen grandes cantidades de información, por esta razón, la elección del software de programación ha vuelto a ser **MatLab®**.

Se ha elegido este entorno de programación por varias razones:

- **Potencia de Procesamiento**.
- **Multitud funciones matemáticas y estadísticas ya programadas de serie**.
- **Entorno de programación fácil e intuitivo**, que permite al usuario la creación de códigos y funciones propias mediante líneas de comandos.

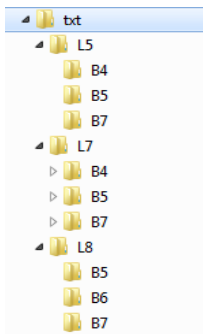
También en esta fase de análisis se ha utilizado el software de hojas de cálculo Excel de Microsoft Office®. Este programa, lo utilizaremos para realizar los contrastes de hipótesis de los ajustes de los polinomios de diferente grado.

Excel, en comparación con MatLab®, cuenta con la ventaja de que resultan más intuitivos los cálculos que se realizan, ya que las hojas se dividen por celdas, sin embargo, Excel no ofrece la simpleza y la flexibilidad de MatLab® para la automatización de procesos.

Datos de Entrada

El algoritmo general que se programó, resulta ser un 'Script' (código) de MatLab® al cual se le denominó 'stat_proc_NMF.m' (Proceso estadístico para NIR MIR y FIR).

El código, tiene dos "inputs" principales:



- **Lista de entrada** con los identificadores absolutos de las escenas Landsat. Esta lista refleja las líneas de costa provenientes de las diferentes bandas de las escenas descargadas que se desean analizar.
- **Ruta de la carpeta** en dónde se guardarán todos los resultados del proceso estadístico (tablas, gráficas...)

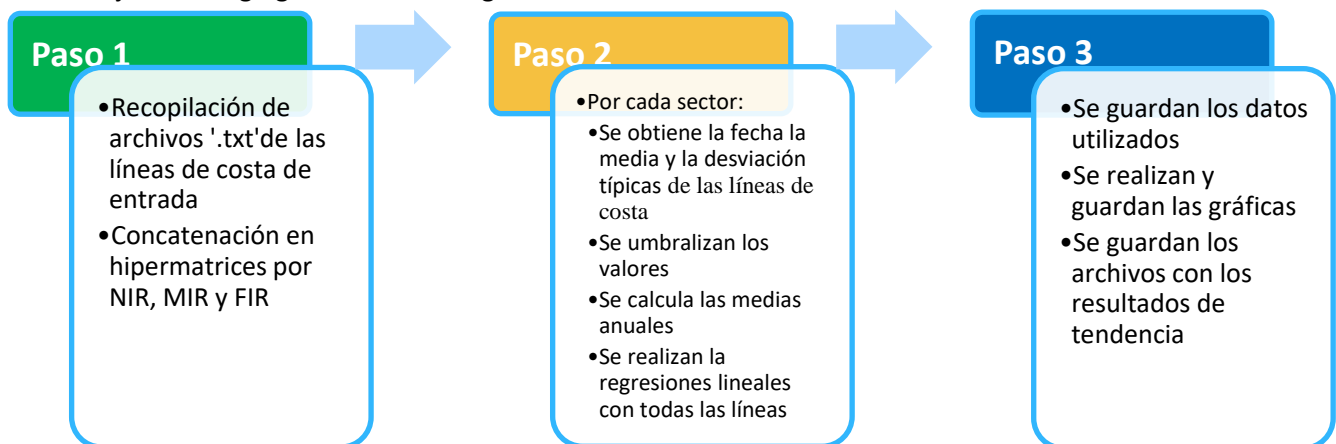
Además, es esencial para el algoritmo que los ficheros '.txt' –los resultados del proceso de análisis espacial- se organicen por carpetas según el satélite Landsat y su banda de procedencia (ver figura 5.3), que resulta ser la misma estructura de carpetas en la que se organiza SELI. Adicionalmente, estas carpetas se han de encontrar en la misma ruta en dónde se ejecuta el código de MatLab®.

Figura 5.3: Esquema de trabajo por satélite Landsat y banda infrarroja.

Proceso General

El código general realiza una serie de procesos iterativos y llama a varias funciones, las cuales se detallan en el Anexo 4 de este proyecto.

El flujo del código general sería el siguiente:



En el **paso 1**, como del análisis espacial se obtuvo, para cada línea de costa, una serie de valores estadísticos en las correspondientes tablas de atributos, si el análisis que se pretende realizar en esta fase se va a dividir por sectores, es necesario agrupar las tablas de atributos exportadas a '.txt' en hipermatrices de 3 dimensiones. Para explicar mejor este procedimiento hemos de recordar como se organizaban las tablas de atributos obtenidas del análisis espacial.

Como se aprecia en la figura 5.4, las tablas de atributos contienen en cada fila los estadísticos del sector analizado, por lo que en teoría, todas las líneas de costa para una playa de estudio han de tener el mismo número de filas y columnas ya que para cada línea se analizan los mismos sectores. Esto hace que tengamos para cada línea de costa (o para cada fecha) un **conjunto de datos 2D** dónde el eje X representa el número de sector de la línea de referencia y el eje Y los diferentes valores estadísticos para cada sector: fecha, distancia media, desviación típica, etc. Como cada línea posee el mismo número de sectores y los mismos

campos, cada línea obtenida se puede almacenar en un eje Z. Por lo que finalmente, la agrupación de una serie de líneas de costa analizadas para cada sector tendría la siguiente estructura (figura 5.5):

OBJECTID *	Shape *	NEAR_FI	FIRST_Fecha	FIRS	FIR	FIRST_Y	COUNT_NEA	RANGE_NEAR_DIST	MEAN_NEAR_DIST	STD_NEAR_DIS	MAX_NEAR_DIS	MIN_NEAR_DIST
1	Multipoint	1	06-07-2013	6	7	2013	194	203.427415	159.123692	44.415975	285.693017	82.265602
2	Multipoint	2	06-07-2013	6	7	2013	128	123.11072	157.855886	20.825284	250.368635	127.257915
3	Multipoint	3	06-07-2013	6	7	2013	108	122.066708	171.319018	20.364252	276.181724	154.115017
4	Multipoint	4	06-07-2013	6	7	2013	135	155.127608	163.190049	23.235365	293.633329	138.505721
5	Multipoint	5	06-07-2013	6	7	2013	184	105.470963	191.073409	16.280252	255.646297	150.175334
6	Multipoint	6	06-07-2013	6	7	2013	183	34.560934	179.398328	10.099965	200.189965	165.629032
7	Multipoint	7	06-07-2013	6	7	2013	171	61.66479	187.22654	15.929794	226.037166	164.372376
8	Multipoint	8	06-07-2013	6	7	2013	175	131.940601	186.331517	21.581095	290.991997	159.051396
9	Multipoint	9	06-07-2013	6	7	2013	166	43.650741	165.697636	13.065434	188.330082	144.679341
10	Multipoint	10	06-07-2013	6	7	2013	167	27.229843	185.539659	6.018113	199.14131	171.911466
11	Multipoint	11	06-07-2013	6	7	2013	178	15.867635	180.957487	3.646457	190.62313	174.755495
12	Multipoint	12	06-07-2013	6	7	2013	348	36.500668	160.692201	7.852053	184.163382	147.662714
13	Multipoint	13	06-07-2013	6	7	2013	336	87.507468	160.981574	18.394909	196.351427	108.843959
14	Multipoint	14	06-07-2013	6	7	2013	385	124.057881	140.557645	44.208862	205.368004	81.310123
15	Multipoint	15	06-07-2013	6	7	2013	253	94.307009	125.445839	36.888575	188.622016	94.315007
16	Multipoint	16	06-07-2013	6	7	2013	160	101.417805	172.957565	34.625671	205.551401	104.133596
17	Multipoint	17	06-07-2013	6	7	2013	138	112.51963	189.901823	32.468519	228.222625	115.702995
18	Multipoint	18	06-07-2013	6	7	2013	131	29.419399	207.472018	7.436566	227.260167	197.840768
19	Multipoint	19	06-07-2013	6	7	2013	140	121.46241	187.389096	32.359909	223.235886	101.773475
20	Multipoint	20	06-07-2013	6	7	2013	131	27.916258	199.868265	6.443691	211.805746	183.889488
21	Multipoint	21	06-07-2013	6	7	2013	130	20.001315	200.913212	4.564216	213.430605	193.42929
22	Multipoint	22	06-07-2013	6	7	2013	142	30.254997	207.778829	7.820795	225.915744	195.660747
23	Multipoint	23	06-07-2013	6	7	2013	162	121.748128	198.35694	19.042843	227.578044	105.829915
24	Multipoint	24	06-07-2013	6	7	2013	222	195.763821	188.427477	29.495768	275.446002	79.682181

Figura 5.4: Ordenación bidimensional de los datos de análisis.

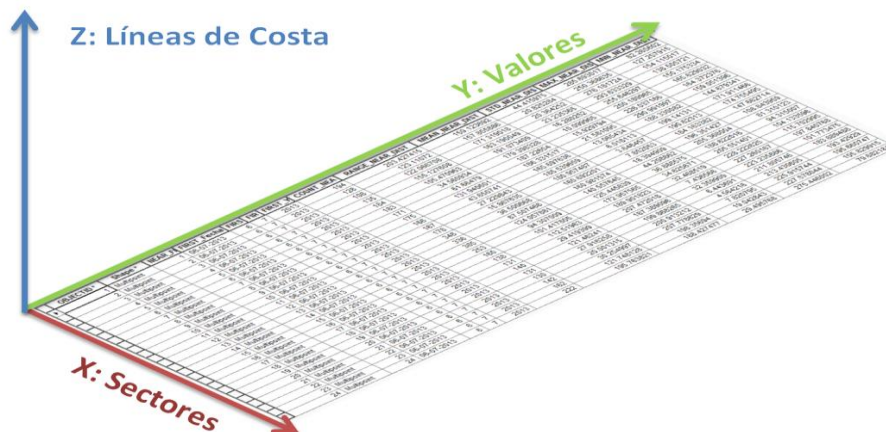


Figura 5.5: Ordenación tridimensional de los datos de análisis.

De esta forma se pueden analizar todas las líneas de costa de cada sector, ya que su acceso ahora es mucho más eficaz al tener todos los resultados del análisis espacial “compactados” en una **hipermatriz 3D**.

Hay que tener en cuenta también en este paso, la organización del proyecto en satélite Landsat y banda infrarroja. En el código general se generaron las hipermatrices por cada banda de cada satélite Landsat, es decir, se generaron un total de 6 hipermatrices.

Dado la gran cantidad de subdivisiones que se tienen, llegados a este punto, se decidió que el código organizara las hipermatrices según las características espectrales de cada banda. Se organizaron entonces en una sola hipermatriz, las bandas correspondientes al infrarrojo cercano (NIR) de cada Landsat y en las otras dos hipermatrices las bandas correspondientes al infrarrojo medio (MIR) y al infrarrojo lejano (FIR). De esta manera, con esta agrupación el proceso analítico se simplifica mucho más y se garantiza que se puedan analizar los sectores con todas las fechas posibles, ya que como se pudo ver en el marco teórico, cada Landsat tuvo una fecha de puesta en órbita y una vida útil.

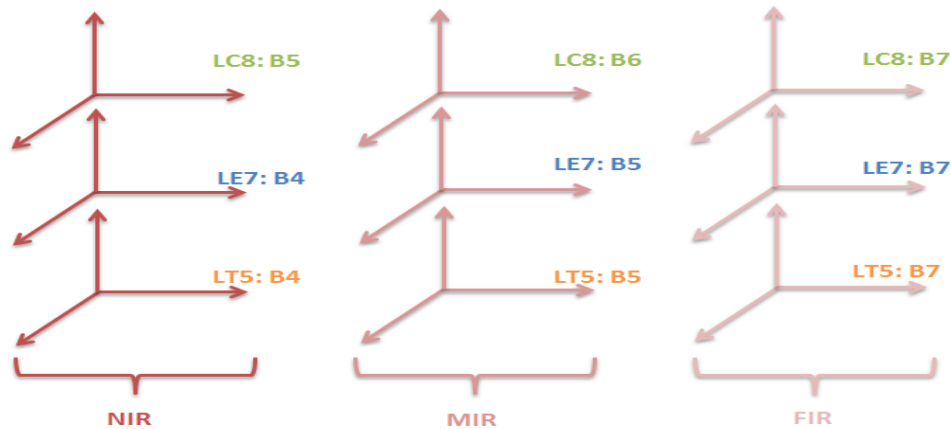


Figura 5.6: Resumen de proceso de concatenación por NIR, MIR, y FIR.

Nota: Técnicamente las bandas 7 de los tres Landsat, se corresponden con el rango espectral del infrarrojo medio de onda corta 2 (SWIR-2). No obstante, para diferenciar las bandas 7 de las del infrarrojo medio de onda corta 1 (MIR = SWIR-1), las denominaremos bandas de infrarrojo lejano (FIR).

En el **paso 2**, por cada hipermatriz generada en el paso anterior se ejecuta una función específica denominada **'graph_evo.m'** detallada en el Anexo 4, la cual accede a cada uno de los sectores –y a todas sus líneas y datos- con un bucle iterativo. Para cada sector entonces se recopilan básicamente de cada línea de costa los campos de fecha, la **distancia media (μD)** –se recuerda que es la media de las distancias mínimas de los puntos de la línea de costa al sector de la línea de referencia- y la **variabilidad espacial (σD)** –en este caso resulta ser la desviación típica de las distancias mínimas de los puntos de la línea de costa al sector de la línea de referencia -. Estos campos escogidos se almacenan en una matriz 2D con la siguiente forma (figura 5.7):

Datos analíticos de un sector determinado para una banda infraroja		
Fecha	Distancias Medias (μD)	Variabilidad Espacial (σD)
11/09/2015	205 m	7 m
12/08/2012	210 m	8 m
10/02/2010	198 m	2 m
...

Figura 5.7: Matriz de datos Fecha, Distancia media y Variabilidad espacial por sector.

Entonces, se realizan una serie de operaciones a esta matriz generada:

- Se realiza una **umbralización** de los valores de distancia media (μD) según un límite superior y un límite inferior definidos. Esta operación sirve para descartar valores anómalos. Por ejemplo, si la línea de referencia está definida a aproximadamente a 200 de la costa, no tiene sentido que haya valores de distancia media de 300 ó 100 metros, ya que en la realidad, y salvo en casos excepcionales o periodos de muchos años, una línea de costa no varía tanto de posición. Esta operación se llevó acabo con la función **'clr_dat.m'**, especificada en el Anexo 4.
- Con los datos libres de "outliers", se procede entonces a realizar una **media anual** de las distancias medias (μD). Como cada distancia media proviene de una línea de costa, es decir, de una fecha concreta, lo que se realiza en esta operación es realizar un promedio de las distancias medias por año, por lo que se tendrán tantas distancias medias anuales como años de observación haya. Además, se hacen dos tipos de promedios, un **promedio convencional** dónde todas las fechas tienen la misma importancia y se realiza otro **promedio ponderado** el cual

otorga más peso a las fechas (líneas de costa) que posean menor variabilidad espacial (σD) de la siguiente manera:

$$\text{Media Anual Ponderada} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu D_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}; \text{ dónde } P_i = \frac{1}{\sigma D_i};$$

- De esta forma, se pueden estudiar el entorno costero en cuestión eligiendo uno de los promedios o comparar ambos para estudiar posibles fuentes de error. Como se ha comentado antes, el estudiar las playas con una media anual y no con todas las líneas a la vez, resulta más robusto (Almonacid & Sánchez 2015), y los análisis se simplifican mucho más. Además, las medias anuales permiten observar las variaciones anuales en las playas y esclarecer un comportamiento dinámico.
Esta operación se llevó a cabo con la función 'awm.m', especificada en el Anexo 4.

- Por último, a los datos libres de "outliers" (todas las fechas) se realiza sobre ellos una **regresión lineal**. Realmente, se realizan dos regresiones lineales, una convencional dónde se obtiene una recta la cual se ajusta por MMCC (mínimos cuadrados) a los puntos definidos por la fecha y la distancia media (μD) y otra la cual se ajusta mediante una ponderación para la variabilidad espacial de la distancia media (ver figura 5.8). Esta segunda regresión lineal se programó mediante una función aparte denominada 'lf4ey.m' ("Linear fit for errors on Y"), la cual se detalla en el anexo 4, pero básicamente lo que realiza esta función es un ajuste mínimo cuadrático por el método general dónde el modelo matemático a ajustar es la ecuación de una recta y el modelo estadístico se define mediante los pesos otorgados a cada observable (fecha o distancia media)

Modelo Matemático: $y = a + b \cdot x;$

Modelo Estadístico: $\sigma_{fecha} = 0; \sigma_{\mu D} = \sigma D_i + |R_i|; P_{fecha} = \frac{1}{\sigma_{fecha}^2} = \infty; P_{\mu D} = \frac{1}{\sigma_{\mu D}^2};$

Dónde: σ_{fecha} y $\sigma_{\mu D}$ representan los **errores** en los observables, P_{fecha} y $P_{\mu D}$, sus correspondientes **pesos**, y σD_i y R_i la **variabilidad espacial** de la línea de costa y el residuo del primer ajuste lineal.

- Como se puede observar, el peso de las fechas resultará infinito en el ajuste ya que las fechas de las líneas de costa son conocidas, y los pesos de las distancias medias son calculados en función de la variabilidad espacial y el residuo del primer ajuste lineal, entonces, al ponderar por la inversa del cuadrado, los puntos que tendrán más peso serán aquellos que posean menor variabilidad espacial y menor residuo del primer ajuste (los que se encuentren más cerca de la primera línea). Se decidió este tipo de ponderación para que la recta de tendencia evolutiva se ajustara mejor a los puntos más "fiables". Una alta variabilidad espacial puede ser indicativo de oleaje y puntos erróneos en la línea de costa y un alto residuo en el primer ajuste es indicativo de alguna anomalía en el proceso de extracción por SELI que esté afectando a la distancia media entre la línea de costa y la línea de referencia.
- El realizar este tipo de ajuste con todas las fechas y ajustarlas mediante una regresión lineal será necesario para estudiar y profundizar en los diferentes sectores. Las medias anuales pueden resultar más robustas a la hora de determinar una tendencia evolutiva, pero al visualizar y ajustar todas las fechas se podrán estudiar y comprender los valores aportados por las medias anuales y completar el estudio con un nivel de detalle mayor. Adicionalmente, cuando una tendencia por media anual en un sector no es fiable, estadísticamente hablando, este sector se ha de estudiar con la ayuda de todas las fechas y el ajuste lineal ponderado, clasificando las líneas de costa por diferentes factores físicos (mareas, oleaje...). Esto último es lo que se ha llevado a cabo en este proyecto en el apartado 5.2.2: Análisis por Clasificación de Mareas.

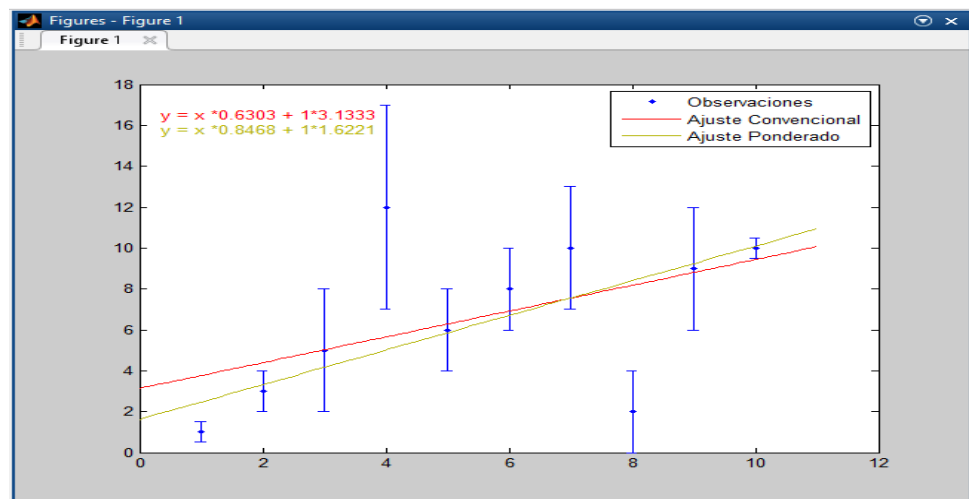


Figura 5.8: Ejemplo del ajuste lineal convencional (rojo) y ponderado (naranja).

Una vez procesados todos los sectores, se tendrían todos los datos editados y almacenados en matrices y valores de MatLab®. La función 'graph_evo.m' se tendría que repetir tantas veces como hipermatrices se hayan generado, en nuestro caso, esta función se ejecutaría 3 veces, una para cada conjunto de bandas infrarrojas (NIR, MIR y FIR) de los satélites Landsat.

En el **paso 3**, finalmente, con los datos generados y los ajustes realizados, se procede a guardar exportar los datos en formato de texto genérico y a realizar las gráficas en MatLab® y guardar estas para poder estudiar los diferentes sectores por las diferentes bandas infrarrojas.

Resultados

Los resultados que genera el código general del análisis estadístico, son los que se detallan a continuación:

- **Archivos de texto genérico:**

- 'all_dat': son todas las fechas, distancias medias y variabilidades espaciales que se obtienen de un sector y desde una hipermatriz determinada. Sería el equivalente de los datos brutos que luego se procesan por las operaciones del paso 2.
- 'in_dat': es un archivo derivado de 'all_dat' y que se genera cuando se aplica la umbralización. El archivo contiene los datos cuyas distancias medias se encuentran entre los valores de corte indicados en la función. Este archivo es el que se usa para obtener las medias anuales y los ajustes lineales con todas las fechas, ya que está libre de "outliers".
- 'out_dat': son los datos obtenidos de 'all_dat' cuyas distancias medias han superado por encima o por debajo, los valores de corte. Estas fechas son útiles para analizar las líneas de costa de las que provienen e identificar las fuentes de error en el proceso de extracción con SELI.
- 'annual_dat': es el archivo con las medias anuales ponderadas y sin ponderar de los años de observación. Este archivo es el que se exporta a la hoja de cálculo de Excel y se estudia mediante la inferencia estadística y que se determine la forma evolutiva que tiene el sector y si esta es fiable. Este paso como no se programó en MatLab® se explicará cuando apliquemos el proceso analítico a las costas portuguesas.
- '*.res': este archivo contiene de cada sector, la pendiente y la norma cuadrática de los residuos del ajuste lineal ponderado. Este fichero será útil cuando se quieran representar los resultados de la evolución lineal de los sectores en un SIG de escritorio y

poder apreciar los sectores costeros con acumulación o erosión neta. El código general genera tantos ‘.res’ como hipermatrices se hayan procesado por la función ‘graph_evo.m’.

- Archivos de gráficos:

- Gráficas de medias anuales: en estas gráficas se dibujan las medias anuales ponderadas y sin ponderar donde el eje X se corresponde a los años de observación y el eje Y a las medias anuales medidas desde la línea de referencia.

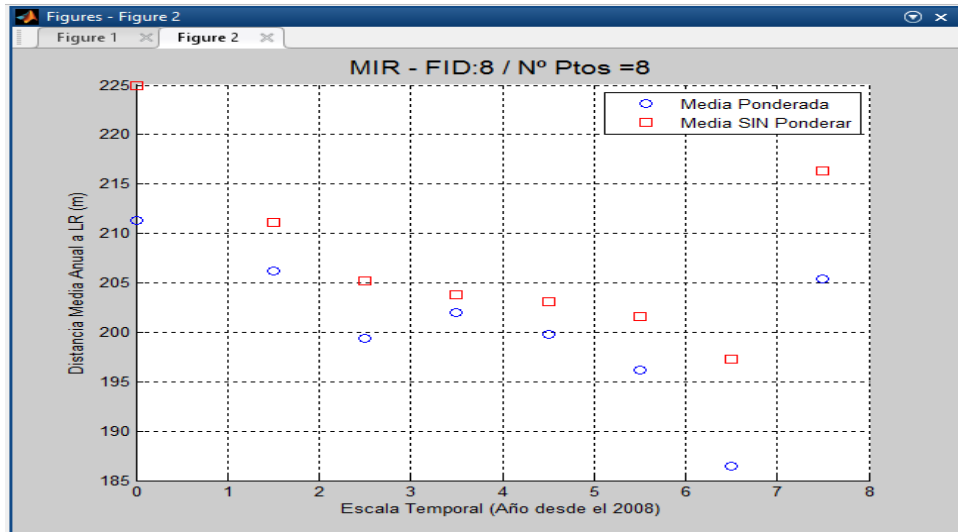


Figura 5.9: Gráfico de ejemplo de medias anuales.

- Gráficas con todas las fechas y ajustes lineales: en ellas se establece el eje X como el eje temporal (las fechas de las líneas de costa) y el eje Y se representan las distancias medias sobre la línea de referencia. En estas gráficas se representan todas las fechas con su distancia media y su variabilidad espacial representada por una barra de error. Se representan también los dos ajustes lineales realizados y sus ecuaciones explícitas así como los residuos de cada par de fecha y distancia media al ajuste lineal. Adicionalmente, se representan los valores de corte establecidos en la umbralización y los “outliers”.

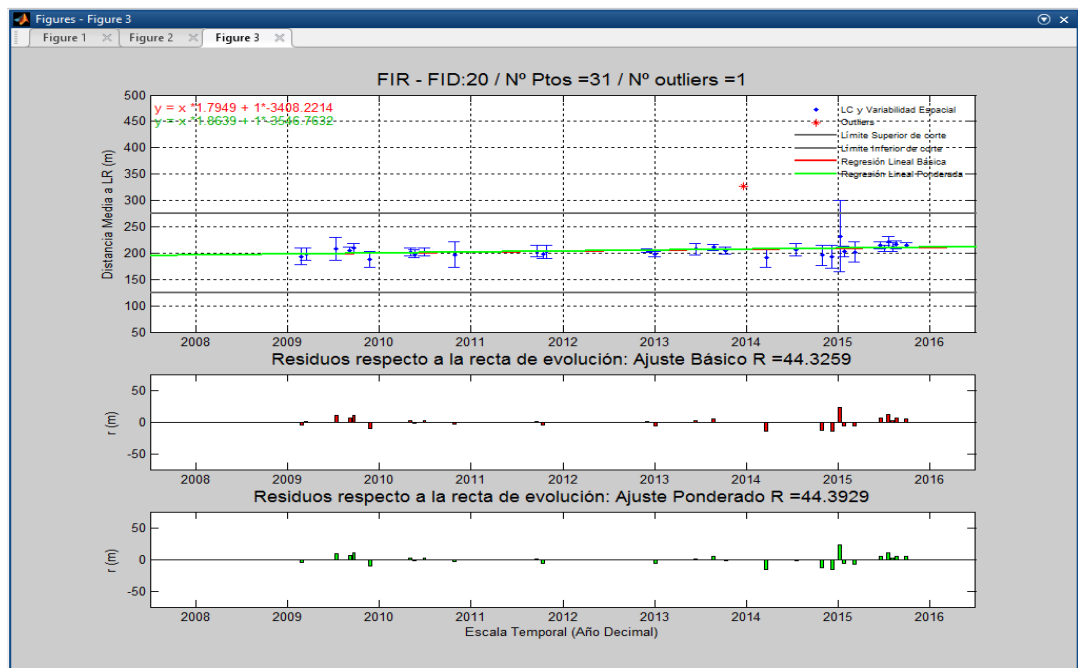


Figura 5.10: Gráfica de ejemplo de tendencia por todas las fechas.

5.2. PROCESO ANALÍTICO EN LA COSTA LISBONESA

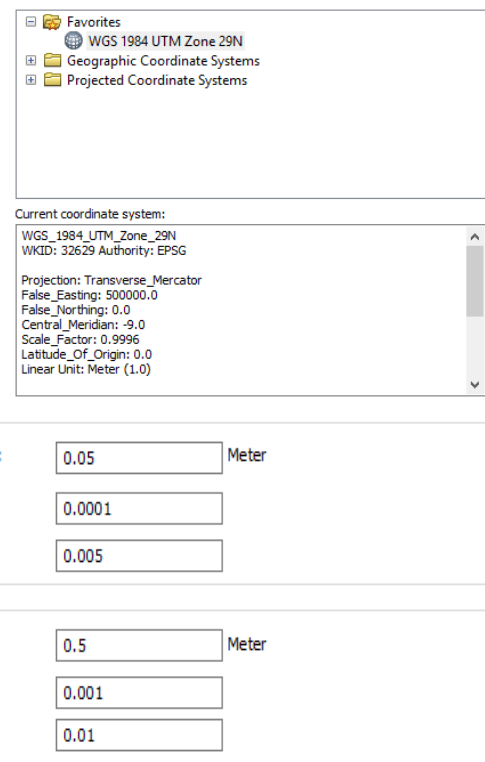
Aunque las herramientas analíticas fueron creadas a la par que se analizaba la costa Lisbonesa, haber estudiado y comprendido estas, será de gran ayuda en este apartado ya que abordaremos directamente el procesamiento de nuestra playa de estudio. Con los procesos programados, se podrán ver que resultados se obtienen, y discutiendo estos, extraer conclusiones acerca de la zona y la metodología empleada. Finalmente con lo estudiado se podrán proponer mejoras y futuras líneas de desarrollo para el análisis, estudio y entendimiento de los entornos costeros macro-mareales y de gran energía, como son las costas atlánticas portuguesas.

5.2.1. Análisis Espacial

El primer paso consistió en realizar el análisis espacial, el cual selecciona, depura y mide sobre la línea de referencia todas las líneas de costa extraídas de SELI.

Como el entorno de procesamiento era ArcGIS®, y en concreto se debían de procesar las líneas sobre una GDB (Geodatabase), el primer paso consistió en crear una GDB y dentro de ella una serie de FD (Feature Datasets) con las siguientes características:

- **Sistema de Referencia:** el sistema de referencia escogido fue, lógicamente, el WGS84 con un sistema de proyección UTM de la zona 29N. Este sistema de referencia es el mismo para las escenas Landsat, y por lo tanto, el mismo para las líneas de costa extraídas con SELI. Una de las ventajas de trabajar sobre una GDB, y con FD, es que todos los geodatos garantizan que estén georeferenciados sobre un mismo sistema de referencia.
- **Tolerancia y Resolución:** una buena práctica en los SIG, es definir la tolerancia y resolución de los datos que componen la FD. Como nuestro proyecto no partimos de una escala de trabajo, que es la que marca estos dos parámetros, se decidió que sería conveniente una tolerancia de 0.5 metros, que son los desplazamientos diferenciales que se aplican en las líneas de costa en la fase de georreferenciación; y establecer una resolución del 10% de la tolerancia, que viene a ser 0.05 metros.



The screenshot shows the ArcGIS interface for setting coordinate systems and parameters. It includes a tree view with 'WGS 1984 UTM Zone 29N' selected under 'Projected Coordinate Systems'. Below, the 'Current coordinate system' details are shown: WGS_1984_UTM_Zone_29N, WKID: 32629, Authority: EPSG. The 'Projection' is Transverse_Mercator with various parameters like False_Easting: 500000.0, False_Northing: 0.0, Central_Meridian: -9.0, Scale_Factor: 0.9996, Latitude_Of_Origin: 0.0, and Linear Unit: Meter (1.0).

Resolution settings:

- XY Resolution: 0.05 Meter
- Z Resolution: 0.0001
- M Resolution: 0.005

Tolerance settings:

- XY Tolerance: 0.5 Meter
- Z Tolerance: 0.001
- M Tolerance: 0.01

Como las líneas de costa a importar se encontraban divididas en grupos según su satélite y banda infrarroja de procedencia, se crearon un total de 10 FD para importar todas las líneas de costa, que eran nada más ni nada menos que un total de **222 líneas de costa** a procesar. Se crearon también otras 10 FD para almacenar las líneas de costa procesadas por el análisis espacial y dos FD más que contendrían los resultados temporales del procesamiento y los "Datos Base" del análisis (línea de referencia, polígono de primera aproximación, zonas de espigones...). Todas estas FD fueron creadas con las características anteriormente citadas.

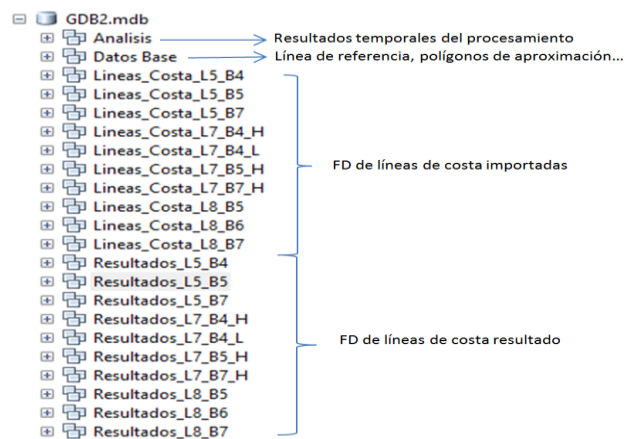


Figura 5.11: FD creados para el análisis espacial.

Organizada la estructura de la GDB, se importaron las líneas de costa en formato ‘.shp’ a sus FD correspondientes. Para ello se utilizó una utilidad de ArcGIS® denominada ‘Import Feature Class (Multiple)’, la cual nos permitió seleccionar todos los archivos ‘.shp’ de líneas de costa de manera conjunta e importarlas a las FD como FC (Feature Classes). También se importaron los datos base para el análisis, que fueron:

- **Línea de referencia:** la línea que se definió en la fase de datos de partida (apartado 4.1.6)
- **Polígono de primera aproximación:** obtenida a partir de una línea de costa aproximada a la que se ejecutó un ‘buffer’ de 500 metros para asegurar que todas las líneas entraran en el procesamiento.
- **Polígonos de espigones:** son los polígonos que marcan un área de influencia aproximada de los espigones en el proceso de extracción de SELI. Fueron obtenidos mediante las polilíneas definidas en los espigones y aplicando a estas un ‘buffer’ de 60 metros.

Finalmente, se procesaron las líneas de costa mediante el código general definido en Model Builder: ‘GEN_loop4FC’. Se ejecutó el programa general un total de 10 veces, una por cada FD de importación definido.

A modo de ejemplo se muestran en las siguientes figuras el proceso de análisis espacial sobre una línea de costa, en concreto la ‘LC82040332013187LGN00_B7’ y sobre los primeros sectores, que se corresponderían con la parte Norte de nuestra playa de estudio.

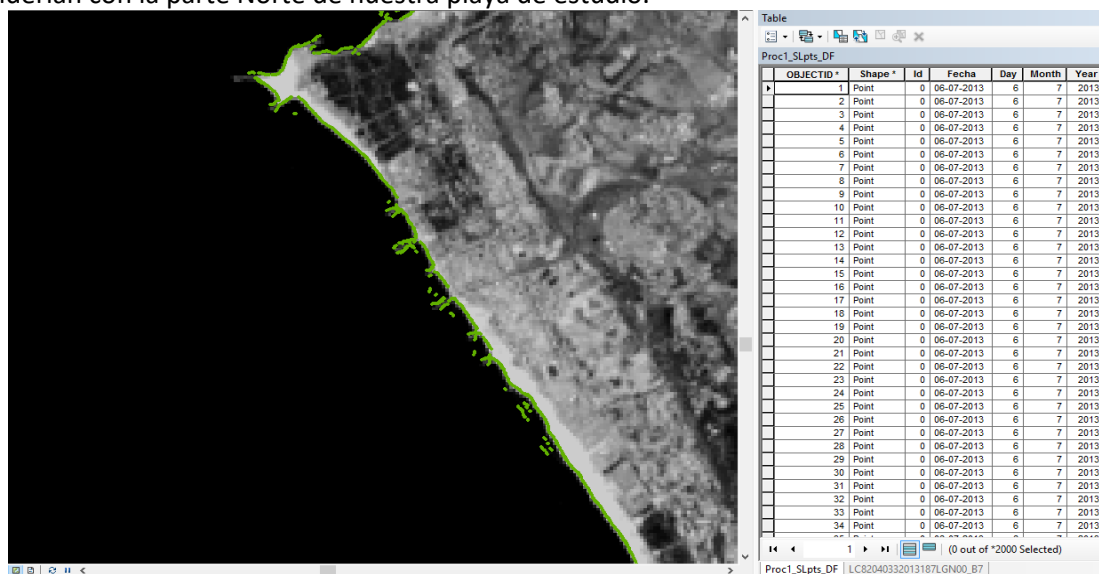


Figura 5.12: Paso 1 del análisis espacial ejemplificado para la playa de estudio.

En la anterior figura se observa, como se ejecuta el **paso 1 del análisis espacial**, dónde se crean los tres campos para almacenar el día el mes y el año.

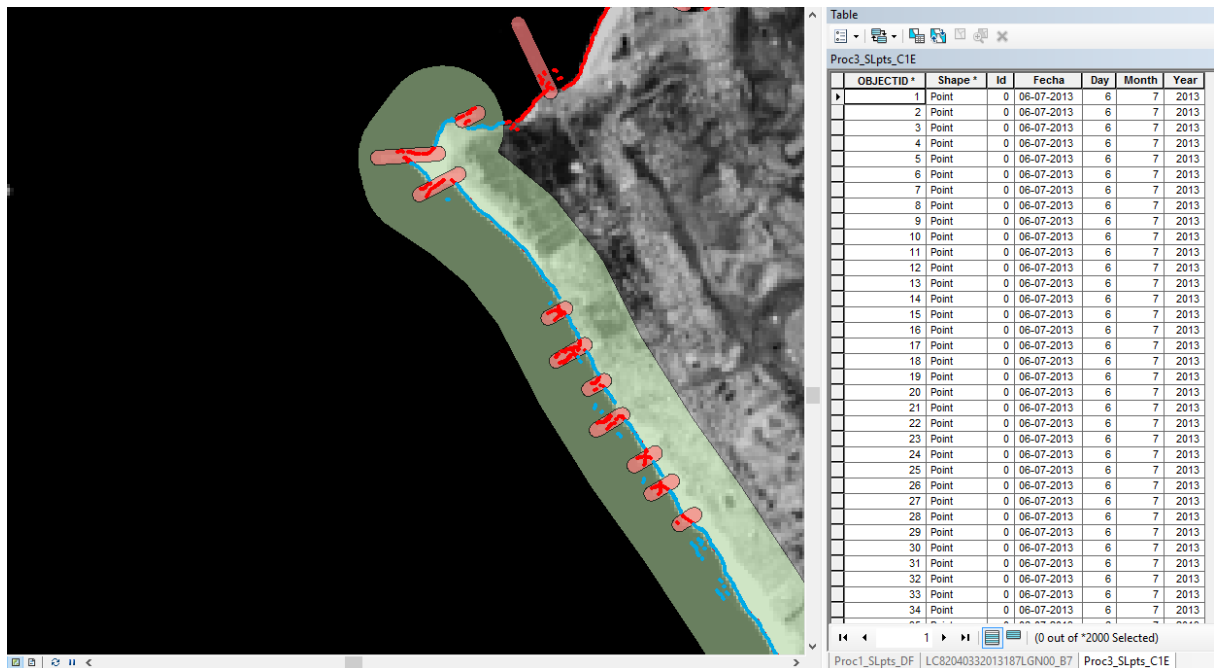


Figura 5.13: Paso 2 del análisis espacial ejemplificado para la playa de estudio.

Se puede apreciar como se ejecuta el **paso 2 del análisis espacial**. El área verde se correspondería con el polígono de primera aproximación y las áreas rojas con las zonas de espigones dónde se puede apreciar un mayor “ruido” en la línea de costa. Se han simbolizado en azul los puntos de la línea de costa que pasarían al siguiente paso y en rojo, los que se eliminarían.

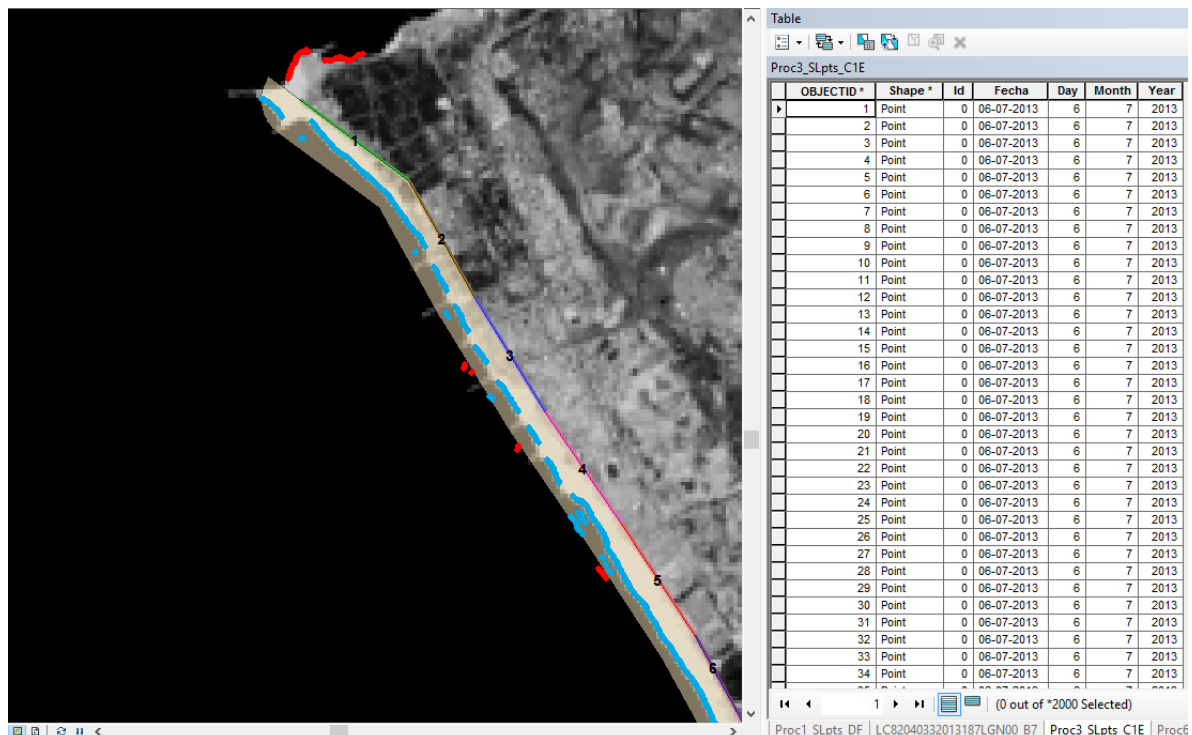


Figura 5.14: Paso 3 del análisis espacial ejemplificado para la playa de estudio.

En el **paso 3**, se ejecuta el ‘buffer’ estadístico sobre la línea de referencia. Como se puede observar, el ‘buffer’ solo se define hacia los puntos de la línea de costa seleccionados. Se han vuelto a marcar en azul los puntos que caerían dentro del ‘buffer’ y en rojo lo que quedarían eliminados. Se aprecia que parte del “ruido”, pero no en su totalidad, es eliminado de la línea de costa.

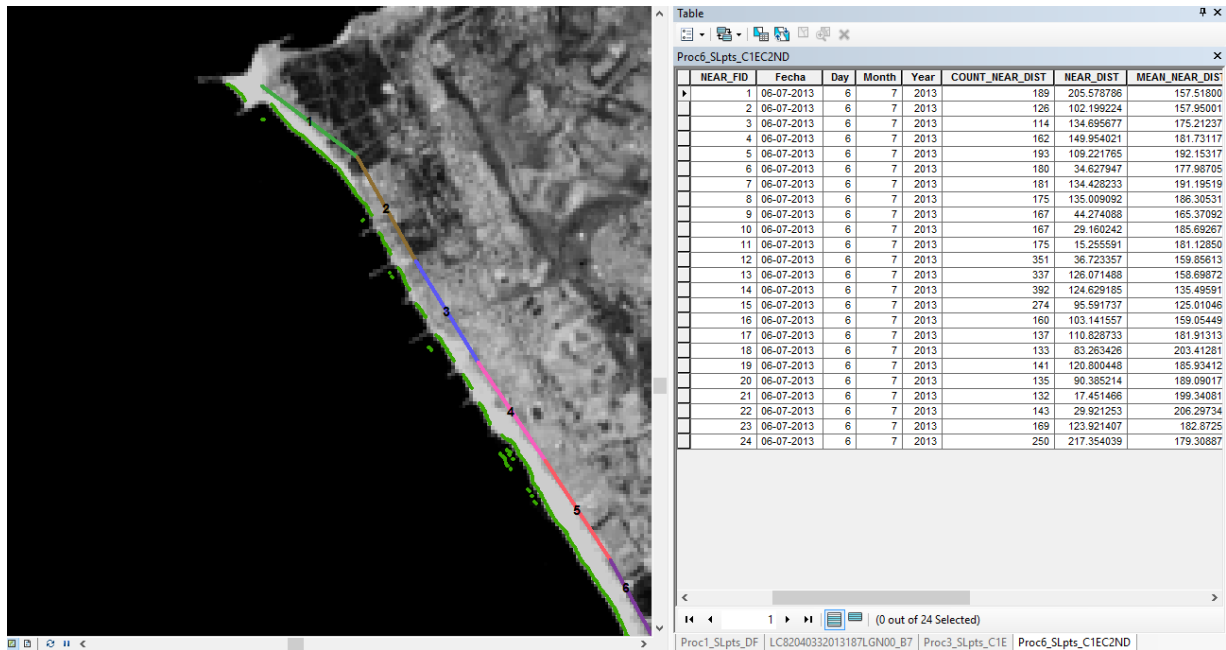


Figura 5.15: Paso 4 del análisis espacial ejemplificado para la playa de estudio.

Finalmente en el **paso 4**, se ejecuta la función de mínima distancia (‘Near’) sobre la línea de referencia de los puntos seleccionados por todos los pasos anteriores. Estas distancias se disuelven –o se calculan– por sector más cercano y se obtienen finalmente las fechas, las distancias medias y el resto de valores estadísticos, los cuales se pueden ver en la tabla de atributos de la figura anterior.

La extracción de los valores estadísticos en la disolución por sector más cercano quizás es de las partes más importantes del procesamiento espacial, ya que permiten ver mediante representaciones de la línea de costa algunos resultados interesantes. Por ejemplo, en las figuras 5.16, se han representado los puntos de las líneas de costa en función de su variabilidad espacial y por su distancia media:

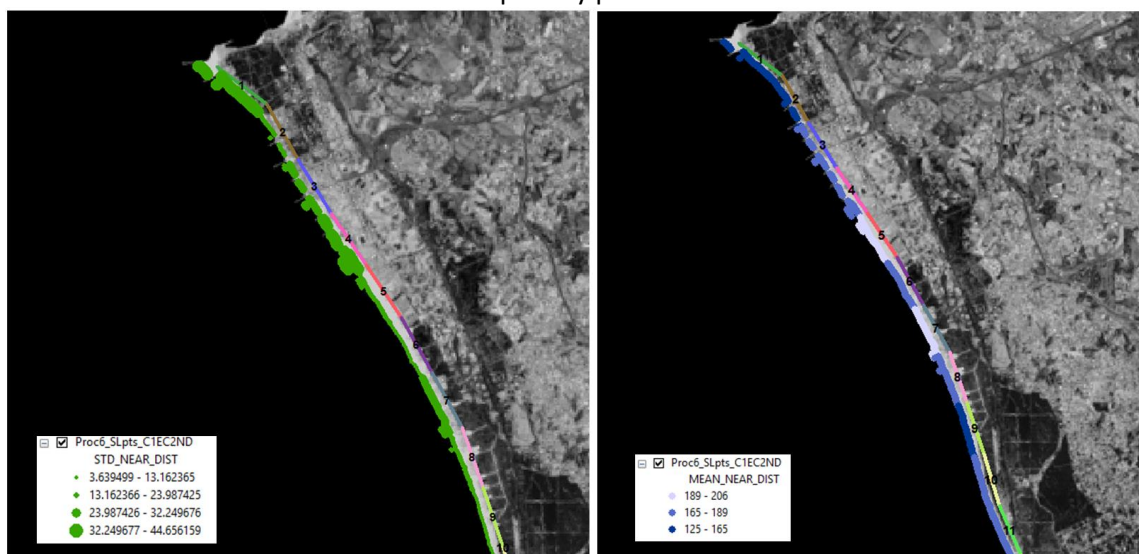


Figura 5.16: Representaciones de resultados obtenidos por el análisis espacial.

En la primera figura, se aprecia a un golpe de vista, los sectores que poseen mayor variabilidad espacial a causa de los puntos anómalos de las estructuras artificiales o del oleaje. En la segunda se pueden apreciar los sectores más próximos y más lejanos a la línea de referencia.

Después de analizar visualmente algunas líneas de costa procesadas, se procedió a la exportación de las tablas de atributos de estas a formato de texto genérico '.txt' mediante la herramienta creada 'R2txt' en Model Builder. Los ficheros fueron organizados en carpetas por satélite y banda infrarroja de procedencia.

5.2.2. Análisis Estadístico

Realizado el análisis espacial, se procedió entonces a realizar el análisis estadístico en el entorno de MatLab®.

El objetivo final de esta fase analítica es analizar las distancias a la línea de referencia de las diferentes fechas y obtener un comportamiento geomorfológico fiable de los sectores de la playa a analizar. No obstante, realizar este análisis estadístico para un conjunto tan grande de datos requiere de una planificación previa. Aprovechando la arquitectura del programa general ('sta_proc_NMF.m'), donde su "input" principal es la lista de las escenas Landsat que se quieren analizar, definimos el siguiente esquema de análisis:

- En primer lugar, ejecutaríamos el programa añadiendo todas las escenas Landsat seleccionadas para el proyecto, es decir, se procesarían todas las líneas de costa obtenidas. De este procesamiento, obtendremos las medias anuales ponderadas, las cuales ajustaremos mediante polinomios de diferente grado (hasta grado 3) mediante una hoja de cálculo de Excel, y aplicando la **inferencia estadística**, estudiaremos los diferentes ajustes realizados en los sectores y en las diferentes bandas infrarrojas. Los sectores que se muestren fiables en las diferentes bandas se considerarán que su evolución geomorfológica sigue el polinomio ajustado, dando lugar a las diferentes posibilidades mostradas en la figura 5.17:

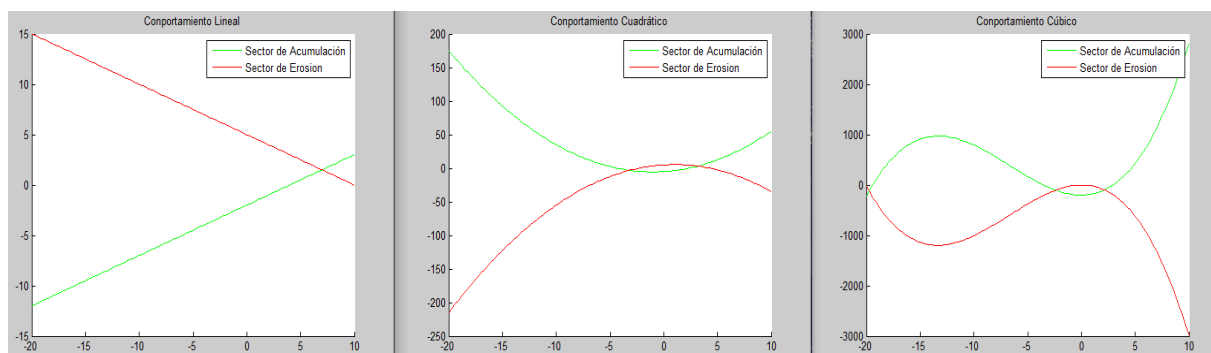


Figura 5.17: Diferentes comportamientos geomorfológicos estudiados por medias anuales.

- Los sectores que no pasen los tests estadísticos correspondientes, se asumen que su polinomio más representativo es la tendencia neta lineal, y estos tendrán que ser analizados en mayor detalle utilizando los datos de todas las fechas. Por esta razón, en segundo lugar, se pasará a clasificar las líneas de costa según sus datos mareales extraídos en el apartado 4.1.4. Se decidió realizar dos clasificaciones según el comportamiento de las mareas sobre las escenas Landsat:
 - Clasificación por marea creciente y marea decreciente
 - Clasificación por nivel del mar positivo y negativo

Analizar a posteriori los ajustes lineales y ver las congruencias entre los resultados de las diferentes clasificaciones, ayudará a establecer que clasificación se ajusta mejor a la realidad estudiada. Esto es necesario ya que al no poseer datos "verdad terreno" sobre los que comparar un resultado, será necesario comparar los resultados obtenidos entre ellos.

Analizar todas las líneas de costa mediante las medias anuales tiene sentido, ya que en un mismo año, las diferencias de distancia media debidas a los rangos mareales (o a casi cualquier otro factor) se pueden llegar a compensar. Sin embargo, cuando las medias anuales no aportan información fiable y es necesario estudiar los sectores con todas las fechas, analizar todas ellas en un mismo conjunto carece de sentido práctico. Para nuestro caso, se prevé lógico que las mareas sea el factor que más influya en las líneas de costa (sobre todo en la costa atlántica) y es por esta razón que se han de clasificar las fechas cuando se pretende estudiar los sectores con un nivel de detalle mayor.

Análisis por Medias Anuales

Para el análisis de medias anuales, se ejecutó el código general de MatLab®, la lista de entrada contenía los **74 identificadores absolutos** de las escenas Landsat descargadas.

Dado que para los años iniciales de nuestro proyecto, 2007 y 2008, se poseían pocas líneas de costa, se decidió agrupar las fechas correspondientes a estos años en una única media anual. Esto se realizó modificando ligeramente el código de la función 'awm.m'.

Se obtuvieron los resultados de medias anuales por banda infrarroja, es decir, se obtuvieron las tablas de datos y sus gráficas correspondientes a las bandas de NIR, MIR y FIR. Como se pueden predecir un peor comportamiento en las bandas del infrarrojo cercano, ya que las respuestas espectrales de la espuma creada por el oleaje, las nubes o material suspendido en el agua puede ser más marcada; se decidió trabajar solo con los resultados del infrarrojo medio y lejano (MIR y FIR). Los resultados de las bandas infrarrojas cercanas también pueden ser aprovechados para poder detectar posibles fuentes de error que estén afectando al proceso de extracción, como se verá más adelante.

Se procedió entonces a importar las tablas con los años y las distancias medias ponderadas a la hoja de Excel dónde estudiaríamos el comportamiento geomorfológico de los sectores y la fiabilidad estadística de estos. Esta tabla de Excel fue proporcionada por cortesía del grupo de CGAT. Esta hoja de cálculo estaba programada originalmente para un total de 15 fechas y sus valores de distancia media a una línea de referencia. Para nuestro proyecto disponíamos solo de 8 fechas, por lo que la tabla fue ligeramente modificada.

A partir de los valores de fecha y distancia, se ajustan los polinomios de diferente grado y se aplica la **inferencia estadística**¹⁰ para determinar la fiabilidad del ajuste.

¹⁰Teoría de la inferencia estadística:

Se entiende por inferencia estadística el proceso mediante el cual se extraen conclusiones generales en términos de probabilidad, sobre una población, a partir de medidas obtenidas de observaciones hechas sobre una muestra tomadas de esa población.

Los estadísticos más habituales para estimar una población son la media y la varianza, que definirían un comportamiento idóneo de distribución normal tipificada $N(0,1)$ sobre una variable aleatoria, sin embargo, existen dos principales distribuciones teóricas asociadas al proceso de muestreo que estudian esta compatibilidad:

Distribución χ^2 : Sean X_1, \dots, X_v , v variables aleatorias independientes que siguen una distribución $N(0,1)$. Entonces la variable aleatoria $Y = X_1^2 + \dots + X_v^2$ sigue una distribución Chi-cuadrado de Pearson con v grados de libertad.

La distribución χ^2 se aplica en la inferencia estadística en poblaciones normales ya que permite medir la discrepancia entre una distribución observada y una teórica. Si S^2 es la varianza muestral de una muestra de tamaño N extraída de una población normal de varianza σ^2 desconocida, entonces la variable aleatoria $\frac{(N-1)S^2}{\sigma^2}$ sigue una distribución χ^2 con $(N-1)$ grados de libertad.

Distribución t-Student: Sea Z una variable $N(0,1)$ e Y una variable χ^2_ν independiente. Se dice que la variable T sigue una distribución t de Student con ν grados de libertad si $T = \frac{Z}{\sqrt{Y/\nu}}$.

Esta distribución se aplica en la inferencia estadística en las poblaciones normales, ya que si \bar{X} y S son respectivamente la media y la desviación típica de una muestra de tamaño N extraída de una población normal de media μ desconocida, entonces la variable aleatoria $\frac{\bar{X}-\mu}{S/\sqrt{N}}$ sigue una distribución t-Student con $N - 1$ grados de libertad.

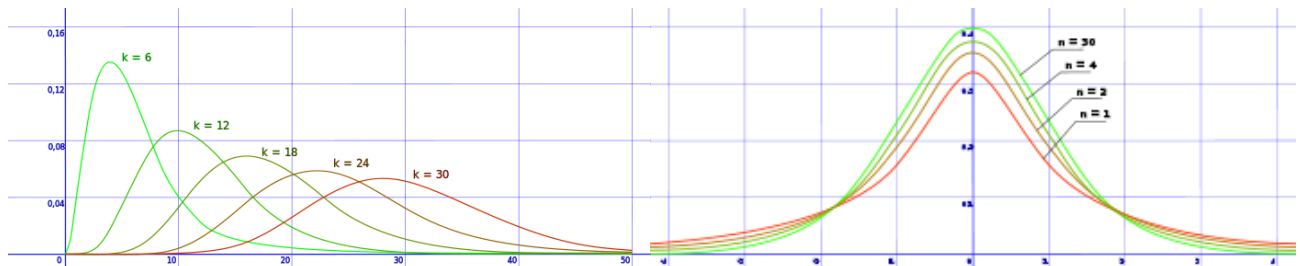


Figura 5.18: Distribuciones Chi-cuadrado y t-Student para diferentes grados de libertad.

Distribución F-Snedecor: Una variable aleatoria de distribución F se construye como el cociente de dos distribuciones Chi-cuadrado de la siguiente manera: $F = \frac{\chi^2_a/m}{\chi^2_b/n}$; con m y n grados de libertad respectivamente, $F_{\alpha,m,n}$.

La variable F es no negativa y su distribución presenta un sesgo hacia la derecha. Resulta útil cuando se pretende contrastar la compatibilidad entre varios ajustes.

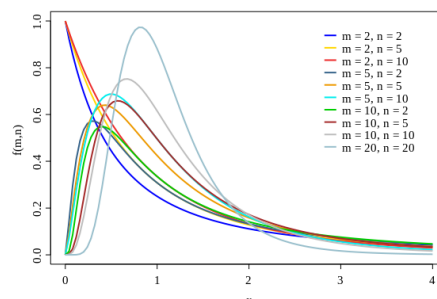


Figura 5.19: Funciones de distribución F-Snedecor para diferentes grados de libertad

La probabilidad de que una muestra aleatoria de una población produzca un valor calculado de $\chi^2 o t$, que se sitúe entre dos valores específicos teóricos, es igual al área bajo las respectivas curvas entre las dos abscisas correspondientes a los valores determinados. Esto es lo que se conoce como intervalo de confianza:

Un **intervalo de confianza**, es un rango de valores usados para estimar el valor verdadero de un parámetro θ de la población.

- El nivel de confianza $1 - \alpha$ es la probabilidad de que el valor verdadero θ se encuentre en dicho intervalo.
- El nivel de significación α es la probabilidad de que el valor verdadero de θ no esté en el intervalo.

Por ejemplo para el sector 1 en las bandas del infrarrojo medio (MIR) tendríamos las siguientes tablas:

Sector	Año	Distancia	Tiempo	Tiempo^2	Tiempo^3
1	2008.0	163.60248000000	1.0	0.00000	0.00000
1	2009.5	185.11706000000	1.0	1.50000	3.37500
1	2010.5	180.28404000000	1.0	2.50000	15.62500
1	2011.5	175.74741000000	1.0	3.50000	42.87500
1	2012.5	179.26094000000	1.0	4.50000	91.12500
1	2013.5	164.20045000000	1.0	5.50000	166.37500
1	2014.5	173.56412000000	1.0	6.50000	274.62500
1	2015.5	198.98221000000	1.0	7.50000	421.87500

Recta			Grado2		
Parameter	1.740517061	170.7415528	Parameter	0.299764635	-0.53783759
Error	1.686655689	7.769379467	Error	0.821052394	6.50135399
R2, sey	0.150729567	11.40443067	R2, sey	0.172782619	12.3296587
F, df	1.064887424	6	F, df	0.522180212	5
ssreg, ssresid	138.5003647	780.3662335	ssreg, ssresid	158.7641773	760.102421
Estimate	1.031933828	21.9762149	Estimate	0.365098059	-0.08272701
P-value T	0.341892936	5.80107E-07	P-value T	0.729973168	0.93728
P-value F	0.341892936		P-value F	0.502288047	

Grado 3:				
Parameter	0.836276693	-9.064472517	25.48290613	163.3985988
Error	0.174493501	1.985622188	6.10854609	5.183774877
R2, sey	0.877308261	5.30889208	#N/A	#N/A
F, df	9.5340107	4	#N/A	#N/A
ssreg, ssresid	806.1292578	112.7373405	#N/A	#N/A
Estimate	4.792595081	-4.565054002	4.171681077	31.5211603
P-value T	0.008695053	0.010299304	0.014012136	6.03718E-06
P-value F	0.036655451			

Figura 5.20: Valores de estudio de la fiabilidad estadística del sector 1 (MIR) por los diferentes ajustes.

En la primera tabla se indican los valores de ajuste de los diferentes polinomios. Para el grado 1 las variables a escoger serían la distancia y el tiempo, que se corresponde con los años contados desde el año 2008, para el polinomio de grado 2 las variables se corresponderían con la distancia, el tiempo y el tiempo elevado al cuadrado:

- **Grado 1:** $d = a + b \cdot t$;
- **Grado 2:** $d = a + b \cdot t + c \cdot t^2$;
- **Grado 3:** $d = a + b \cdot t + c \cdot t^2 + d \cdot t^3$;

Dónde d y t , representan las variables de distancia y año respectivamente y a, b, c y d ; son los parámetros a ajustar.

En las siguientes tablas, se muestran los ajustes descritos en matrices dónde se almacenan los parámetros calculados, sus desviaciones asociadas y el coeficiente de determinación R^2 , entre otros valores.

Para nuestro caso, los parámetros más importantes que se extraen son:

- Los **parámetros de los polinomios ajustados y sus desviaciones típicas**. En la tabla Excel se indican como 'Parameter' y 'Error'.
- Los **valores 'F' y 'df'**, que representan el valor crítico para la distribución F-Snedecor y los grados de libertad del ajuste realizado.

Con los primeros valores se calculan por cada parámetro unos valores de estimación indicados como 'Estimate': $t_{\alpha/2}(\lambda) = \frac{\lambda}{\sigma_\lambda}$; donde λ es el parámetro ajustado (λ) del polinomio en cuestión y σ_λ su desviación

estándar. Estos valores calculados representan los valores críticos de la distribución t-Student, la cual mide la significatividad de los parámetros. Si aplicamos los valores críticos a ambos lados de la distribución t-Student con 'df' grados de libertad, obtendríamos **el nivel de significación α** (en Excel se indican como 'P-value T') para el parámetro estudiado según se muestra en la figura 5.21.

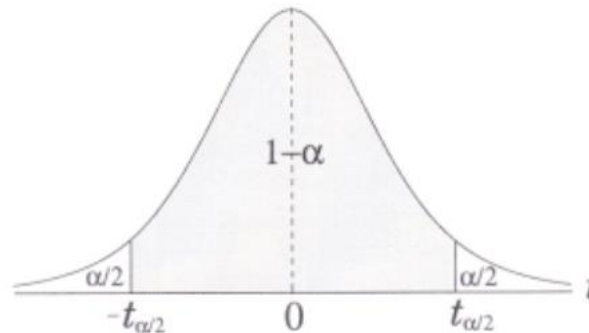


Figura 5.21: Distribución t-Student e intervalos de confianza.

Los valores '**F**' y '**df**', se utilizan para determinar si el ajuste sirve para explicar el modelo observado, mediante la distribución **F-Snedecor**. Para ello se calcula el nivel de significación α (denotado en Excel como 'P-value F') como el área encerrada entre el valor 'F' y el infinito (hacia la derecha).

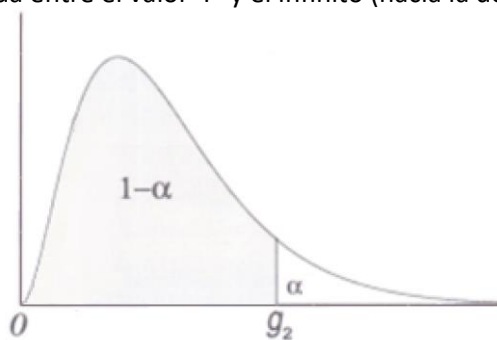


Figura 5.22: Distribución F-Snedecor e intervalos de confianza.

Para nuestro proyecto decidimos establecer un **nivel de confianza $1 - \alpha$** mayor o igual que el **95%**, por lo que el **nivel de significación α** se establece en un **5%**. Esto significa que deseamos estar seguros a un 95% de que los parámetros ajustados sean significativos y que los ajustes expliquen el comportamiento geomorfológico, o en otras palabras, que las distancias medias anuales dependan de las fechas con 95% de seguridad.

Para aclarar esto último y siguiendo con el ejemplo de la tabla Excel del sector 1, para determinar un ajuste fiable se han de observar los 'P-valores':

- Para el **ajuste de grado 1**: el 'P-valor F' ofrece $\alpha = 0.34$, y por consiguiente un $1 - \alpha = 0.66$. Afirar que el ajuste es representativo a un 66% resulta arriesgado. Es preferible descartar la tendencia que aceptarla siendo esta errónea.
- Para el **ajuste de grado 2**: el 'P-valor F' muestra un intervalo de confianza α justo del 5%, sin embargo, dos de los parámetros presentan unos 'P-valores T' muy superiores al 5% (nivel α de confianza), lo que nos indica que este ajuste no resulta óptimo.
- Para el **ajuste de grado 3**: su 'P-valor F' es menor que el 5%, y por consiguiente, se analizan los 'P-valores T' de sus parámetros y resulta que estos también presentan un nivel α menor del 5%. Por lo que se acepta un comportamiento polinómico de tercer grado para este sector de manera fiable.

Este análisis estadístico fue repetido para todos los sectores con sus correspondientes distancias medias anuales en las bandas del MIR. Acto seguido, se repitió el proceso para las bandas del FIR.

Se marcaron en una tabla de Excel los sectores que resultaron fiables, no fiables y dudosos –que eran los que no alcanzaban los P-valores por muy poco margen- para estudiar las compatibilidades entre los resultados de las diferentes bandas infrarrojas:

BANDAS MIR			BANDAS FIR		
Sector	Grado de Ajuste	Criterio	Sector	Grado de Ajuste	Criterio
1	3	Fiable	1	3	Fiable
2	1	No Fiable	2	1	No Fiable
3	1	Dudoso	3	1	No Fiable
4	3	Dudoso	4	3	Dudoso
5	1	No Fiable	5	1	No Fiable
6	1	No Fiable	6	1	No Fiable
7	1	No Fiable	7	1	No Fiable
8	1	No Fiable	8	1	No Fiable
9	3	Dudoso	9	1	No Fiable
10	1	No Fiable	10	1	No Fiable
11	1	No Fiable	11	1	No Fiable
12	1	No Fiable	12	1	No Fiable
13	1	Dudoso	13	1	No Fiable
14	1	No Fiable	14	2	Dudoso
15	1	Fiable	15	1	No Fiable
16	1	Fiable	16	2	Fiable
17	1	No Fiable	17	1	No Fiable
18	1	No Fiable	18	1	No Fiable
19	1	No Fiable	19	1	No Fiable
20	1	No Fiable	20	1	No Fiable
21	2	Dudoso	21	1	No Fiable
22	1	Fiable	22	1	Fiable
23	1	No Fiable	23	1	No Fiable
24	1	Fiable	24	1	No Fiable

Figura 5.23: Representación por bandas de la fiabilidad de los sectores por medias anuales.

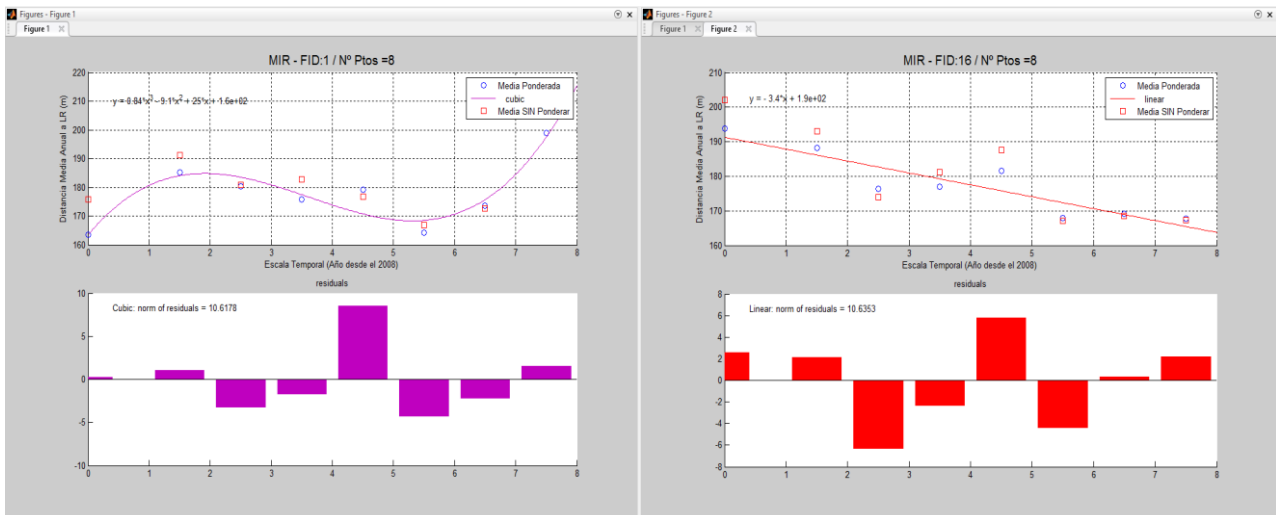
De la figura 5.23 podemos afirmar lo siguiente:

- Los resultados no son fiables en general y son un posible indicador de que los ajustes de hasta grado 3 puedan no ser suficientes para determinar las variabilidades geomorfológicas anuales o que el ruido introducido por el proceso de extracción con SELI no haya sido mitigado y que las líneas de costa contengan posiciones incorrectas.
- Los sectores que se toman como fiables son el **sector 1**, con un comportamiento de tendencia acumulativa de tercer grado, y el **sector 22**, con un comportamiento lineal de tendencia erosiva.
- El sector 16, se muestra fiable en ambas bandas pero con un grado de ajuste distinto. Esto se traduce en una incongruencia. Como no se puede establecer que banda se está comportando de manera realista, se ha de marcar este sector como no fiable y estudiarlo con mayor nivel de detalle en la siguiente fase.
- Los sectores dudosos son los que poseían P-valores muy próximos al valor de corte. Si por ejemplo, el sector 3 se marca dudoso en las bandas MIR pero en las bandas FIR se marca como fiable, entonces podría considerarse el marcar este sector como “correcto”. Desgraciadamente ocurre lo contrario en todas las situaciones de dudas, salvo en el sector 4 en el que para ambas

bandas se obtiene una tendencia dudosa de tercer grado, no obstante, como veremos en sus gráficas, sus valores más significativos siguen una tendencia lineal fiable (figura 5.26).

- El resto de sectores no fiables pasarán a ser analizados mediante las tendencias lineales clasificadas por mareas y calculadas para todas las fechas.

Se exponen a continuación algunos de los gráficos que muestran visualmente lo comentado anteriormente:



Figuras 5.24: Ejemplos de gráficas de sectores con una tendencia fiable.

Se observan los gráficos pertenecientes a las bandas del MIR de los sectores 1 y 16 los cuales resultaron fiables. Se han adjuntado sus polinomios de mejor ajuste, dónde se puede comprobar visualmente la compensación de los residuos de estos, lo cual indica que siguen una distribución normal. Además se destaca la estrecha norma cuadrática de los residuos de ambos ajustes que están entorno a los 10 metros.

Los parámetros de la recta son los que tienen una interpretación cuantitativa inmediata. En el caso de la segunda figura, el **sector 22**, tendría una pérdida neta anual de sedimento de **-3.5 metros por año**.

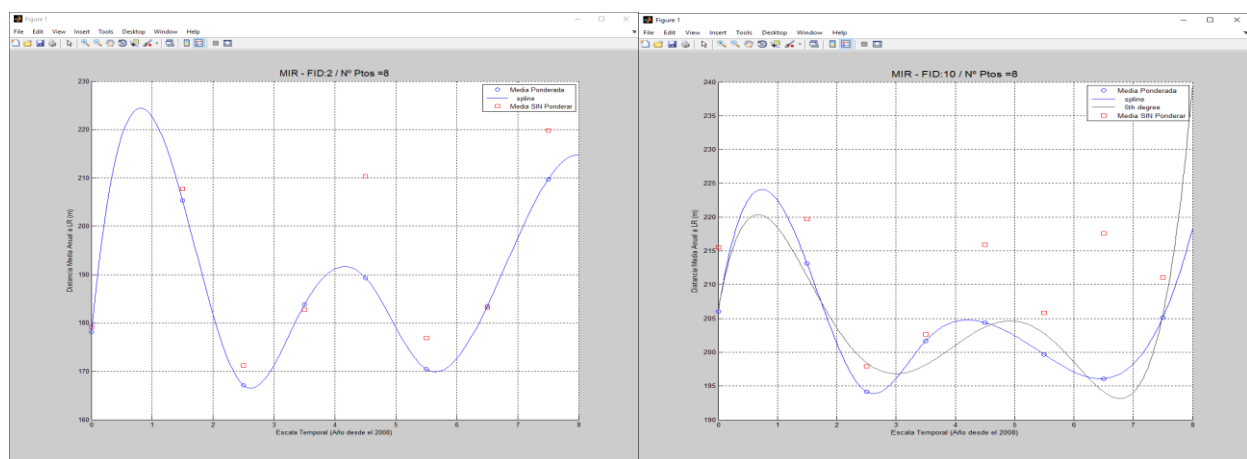
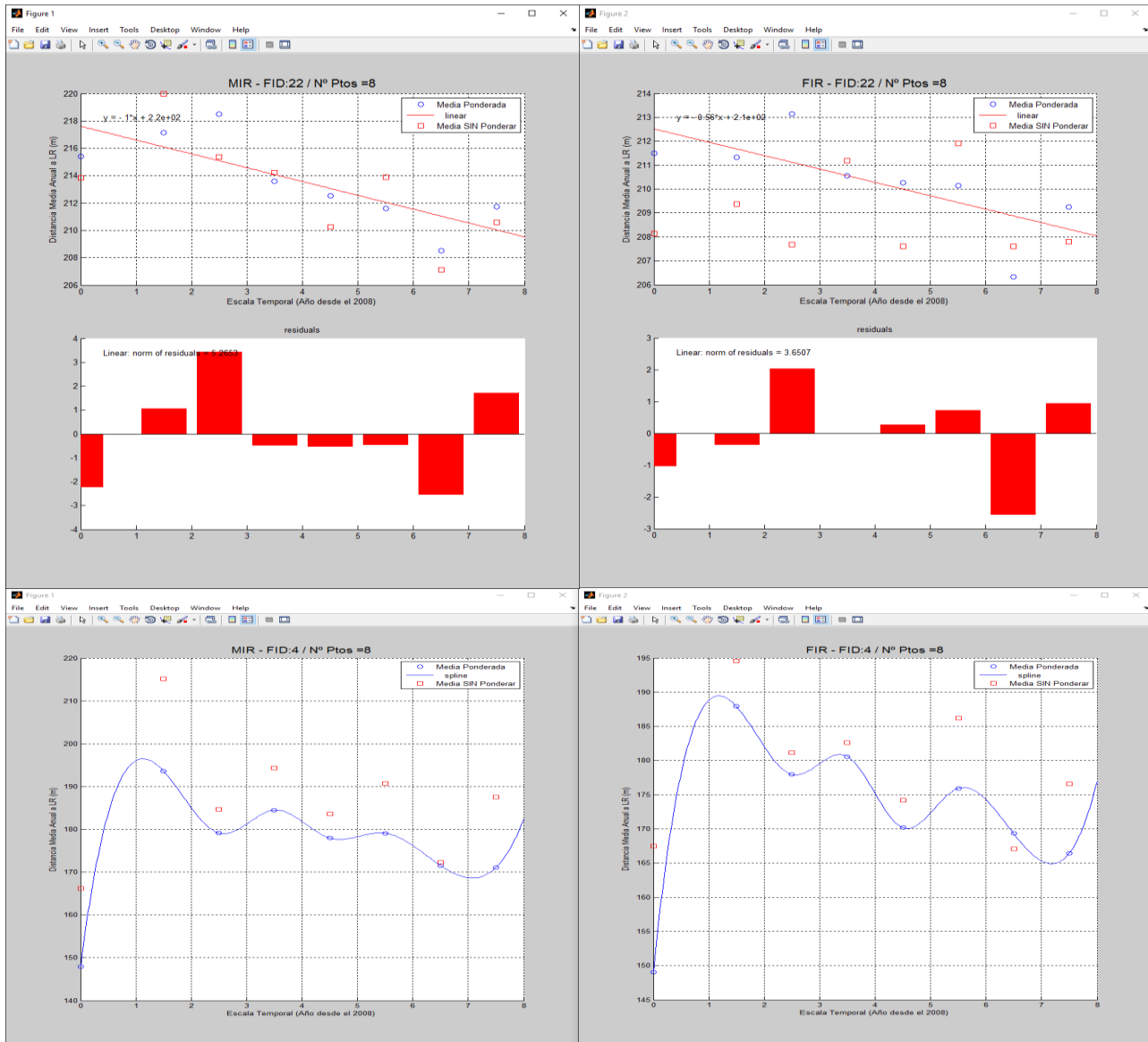


Figura 5.25: Ejemplos de gráficas de sectores con una tendencia no fiable.

En esta figura se muestran dos sectores de las bandas MIR que no resultaron fiables. Al interpolar sus valores mediante 'splines' se pueden observar las variaciones anuales que sufren las costas de Lisboa.

Estos casos son un claro ejemplo del porque puedan estar saliendo muchos sectores no fiables. En la segunda figura se ha ajustado un polinomio de 5º grado y se intuye rápidamente su similitud con la interpolación por 'splines'. Por lo que esto viene a indicar que ampliar los grados de ajustes -no solo experimentar hasta el grado 3- sea una mejora del proceso analítico muy conveniente, sobre todo para las

costas atlánticas donde la gran cantidad de energía hace de las variaciones anuales un fenómeno muy frecuente. Adicionalmente, el que se presenten magnitudes de cambio medio anual del entorno de 40 m y sin un sentido o tendencia definido nos obliga a dudar de los datos de partida.



Figuras 5.26: Ejemplos de gráficas de sectores entre las bandas MIR y FIR.

Las gráficas anteriores muestran los resultados para las diferentes bandas infrarrojas. Primero se muestra el sector 22, que resultó ser fiable para ambas bandas; y a continuación se muestra el sector 4, el cual se marcó como dudoso en ambas bandas.

Para el caso del sector 4, se observan como las tendencias interpoladas por 'splines' siguen un comportamiento bastante parecido para ambas bandas. También se puede observar como el primer año desvirtúa completamente la tendencia del sector. El que haya una diferencia de distancia entre la primer año y el segundo año de 45 metros, por causas naturales, es poco creíble. Esto indica que entorno al año 2008 hubo alguna afección artificial a la playa y evidentemente se constató que por el sector 3 y 4, hubo un aporte artificial de arena sobre esas fechas:

“Aportes artificiales de arena de las playas y las dunas, con 3 millones de metros cúbicos dragados del canal de navegación como fuente de nuevo sedimento (0.5 millones de metros cúbicos fueron depositados

entre Julio y Septiembre del 2007; 1 millón de metros cúbicos sobre Agosto y Noviembre del 2008; y otro aporte de 1 millón de metros cúbicos en el año 2009)" (F. Veloso-Gomes).

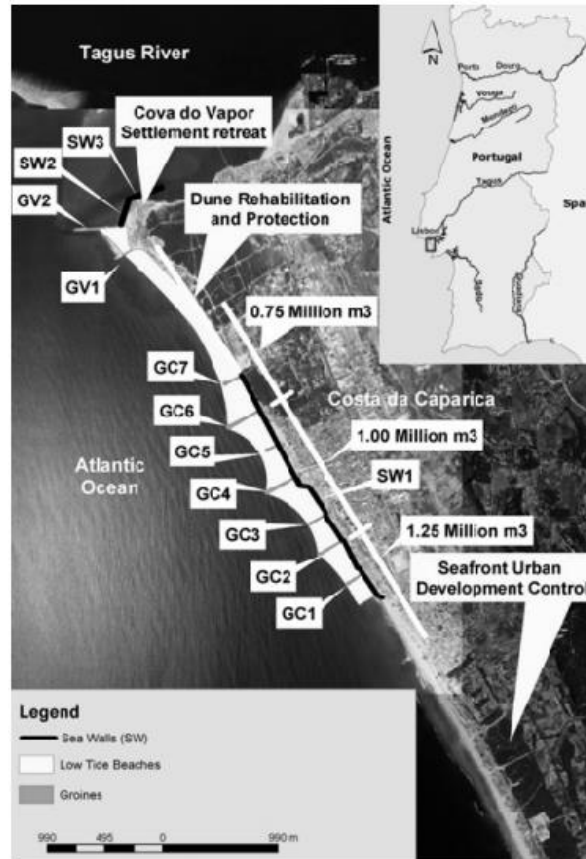


Figura 5.27: Aportes de arena entorno al año 2008. Fuente: Veloso-Gomes 2009.

Descartando la primera fecha que se ve afectada por un fenómeno artificial, se puede observar un comportamiento erosivo lineal de **-3 metros por año**, lo que justificaría el uso de aportes artificiales para proteger las costas y las áreas urbanas adyacentes.

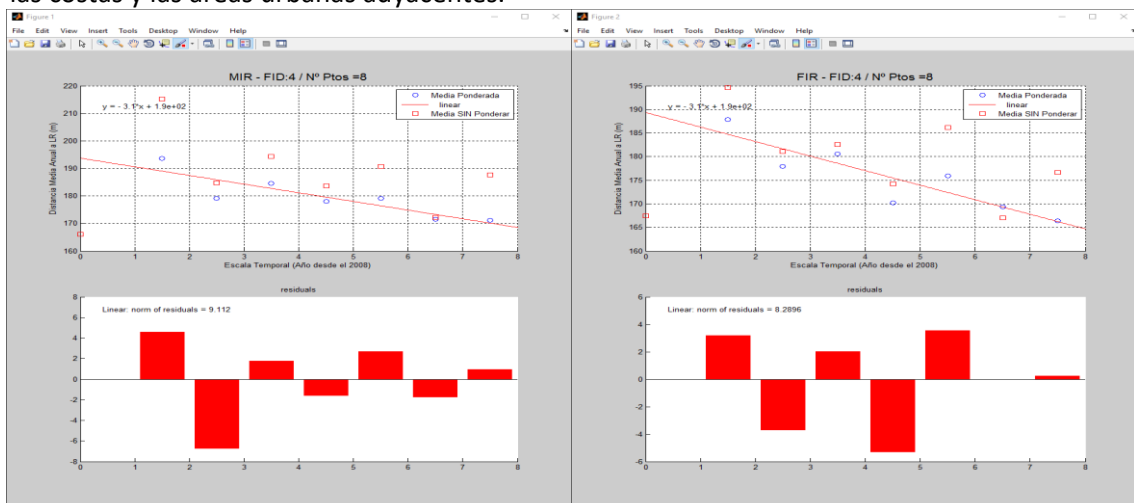


Figura 5.28: Tendencias lineales del sector 4 si se eliminan los aportes de arena artificiales.

Por último como observación general para las gráficas mostradas, las diferencias entre la media convencional y la media ponderada se las puede dotar de un significado lógico.

- Si la media convencional muestra mayor valor de distancia que la ponderada, esto indica que las fechas con mayor variabilidad espacial obtienen una mayor distancia a la línea de referencia. El sentido físico de esto último, son las **fuentes de ruido “mar adentro”** como el oleaje.
- Si por el contrario la media convencional muestra un valor menor de distancia que la ponderada, esto es un indicativo de que las mayores **variabilidades espaciales ocurren “tierra adentro”**. Aunque este tipo de variabilidades no se contemplaron a priori, estas tienen un sentido físico que veremos más adelante cuando estudiemos las fuentes de error de las líneas de costa.

Estos fenómenos demuestran que una ponderación en función de la variabilidad espacial es útil tanto para representar más fielmente las evoluciones de la costa y para detectar las posibles fuentes de “ruido”.

Análisis por Clasificación de Mareas

Los sectores que no resultaron fiables por el análisis de medias anuales, pasan a la siguiente fase, que es el análisis por clasificación de mareas y sin promedios anuales, dado que al dividir los datos en clasificaciones, existen años con pocos registros.

Como se comentó anteriormente, se consideraron dos clasificaciones mareales: **Creciente-Decreciente** y **Positiva-Negativa**. Para obtener las lista de identificadores Landsat con los diferentes comportamientos mareales, se utilizó la BDA del proyecto (se puede acceder a esta en el Anexo 1) donde se almacenaba toda la información recabada de las escenas Landsat. Gracias a las utilidades de Excel, se generaron las listas de entrada para el programa de análisis estadístico. Obtuvimos entonces las siguientes listas:

- Clasificación de líneas en **Creciente-Decreciente**:
 - 'C21_tideUP.txt': lista de escenas donde la marea tiene un comportamiento ascendente o de pleamar.
 - 'C22_tideDOWN.txt': lista de escenas donde la marea tiene un comportamiento descendente o de bajamar.
- Clasificación de las líneas en **Positiva-Negativa**:
 - 'C31_tidePOS.txt': lista de escenas donde el nivel de marea es positivo.
 - 'C32_tideNEG.txt': lista de escenas donde el nivel de marea es negativo.

Una vez generadas y guardadas las listas, se procedió a ejecutar cuatro veces el código general programado en MatLab® –una por cada fichero generado- y a guardar los resultados del procesamiento en diferentes carpetas.

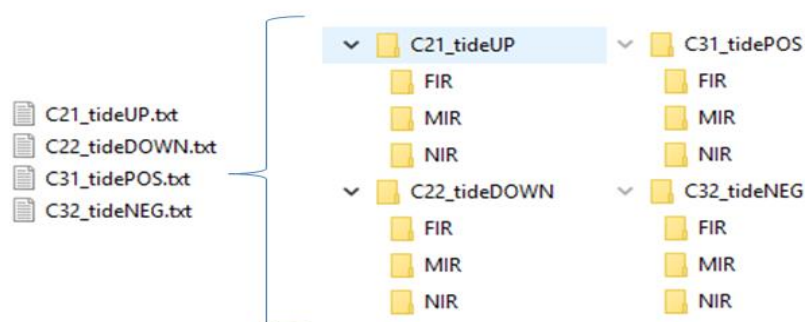


Figura 5.29: Procesado del análisis estadístico de las diferentes clasificaciones mareales.

Como se observa en la figura 5.29 cada procesamiento genera los resultados para las diferentes bandas infrarrojas. Al igual que hicimos en el anterior apartado, usaremos solo las bandas del infrarrojo medio y lejano (MIR y FIR) y descartaremos el infrarrojo cercano (NIR) por las razones mencionadas en el apartado de medias anuales.

A continuación se exponen algunas gráficas obtenidas de las diferentes clasificaciones y para 3 sectores, los cuales se han considerado más representativos:

Clasificación 2.1: Mareas Ascendentes

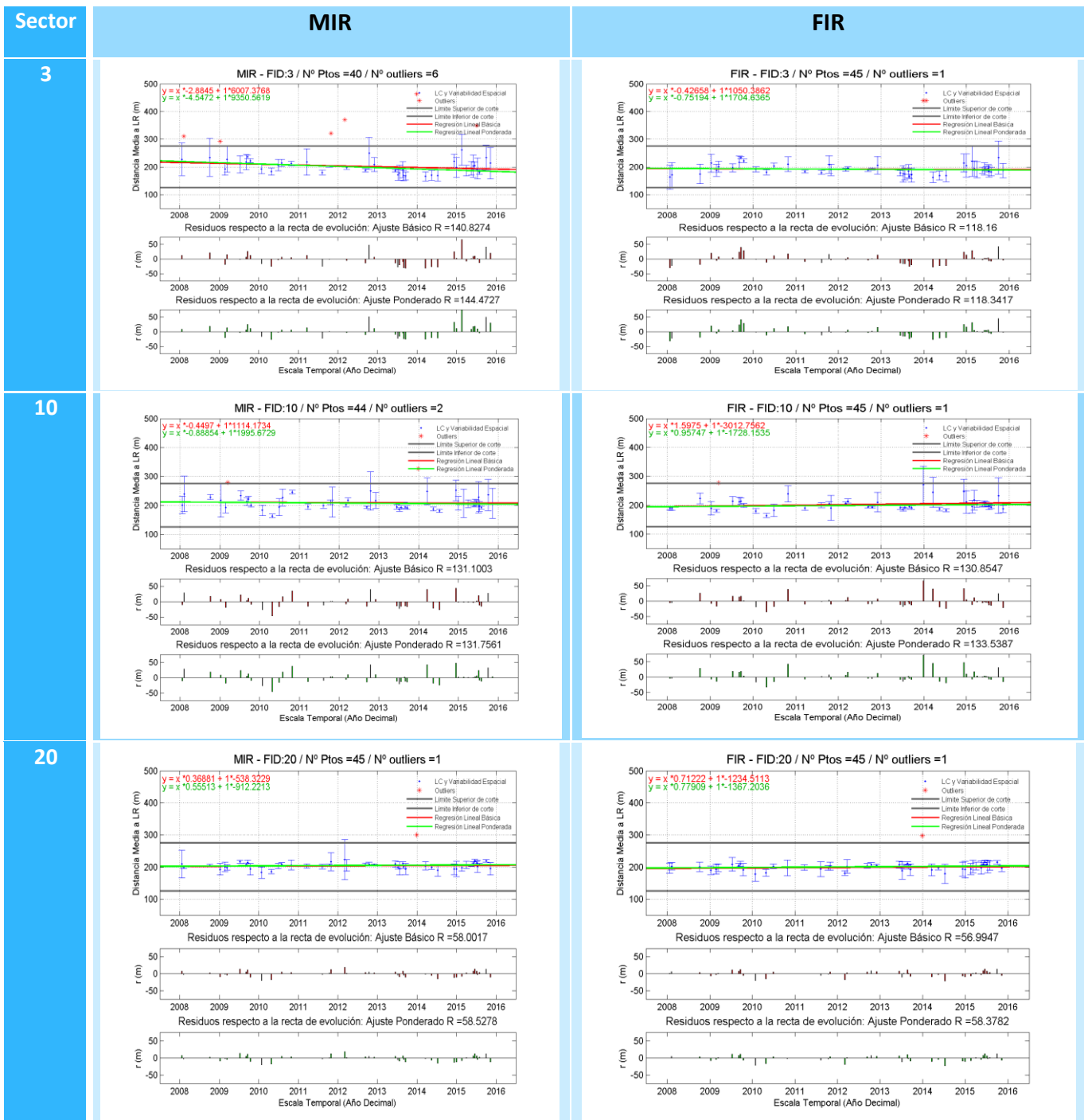


Tabla 5.1: Comparativa de gráficas de tendencia neta para la clasificación 2.1.

Para la **clasificación 2.1**, las tendencias son poco congruentes entre bandas, solo se aproximan mejor cuando los datos poseen poca variabilidad espacial, como en el sector 20. Esto también se corrobora con las normas de los residuos, para los sectores 3 y 10 son muy elevadas, sin embargo para el sector 20 mejoran en más de un 50%. En el sector 3, en la banda MIR se observan una gran cantidad de valores anómalos, sin embargo, en la banda FIR no se observan tantos. Esto se traduce en algún tipo de fenómeno detectable en la banda MIR pero no en la FIR.

Clasificación 2.2: Mareas Descendentes



Tabla 5.2: Comparativa de gráficas de tendencia neta para la clasificación 2.2.

Para la **clasificación 2.2**, se vuelven a observar valores de tendencia incongruentes, además se disponen de muchas menos fechas que en la clasificación 2.1. Por ejemplo para el sector 3 se obtienen alrededor de 40 fechas en la clasificación 2.1, sin embargo solo se obtienen 23 en la clasificación 2.2. Esto hace que en algunos casos la norma de los residuos mejore, pero se comprueba que hay espacios temporales “vacíos de datos” -lo cual no es muy recomendable para un buen ajuste-, que se dan debido a que las líneas de costa se clasifican en dos grupos. Se vuelven a observar grandes variabilidades espaciales en los sectores 3 y 10 y sus

“peores puntos” (los que poseen mayor variabilidad espacial) casi siempre muestran una mayor distancia a la recta ajustada, un claro indicio de confusión de la espuma del oleaje con las líneas de costa.

Clasificación 3.1: Mareas Positivas



Tabla 5.3: Comparativa de gráficas de tendencia neta para la clasificación 3.1.

Los resultados de la clasificación 3.1 son algo más congruentes, a excepción del sector 10. Aun así, se siguen observando grandes variabilidades espaciales y una norma de los residuos bastante elevada. Se puede observar en esta clasificación y en el resto, que el mayor nº de “outliers” se dan en el sector 3, que se

trata de una zona costera artificialmente modificada (espigones, malecones de contención...). Además, los "outliers" siempre se concentran más en la banda MIR que en la FIR.

Clasificación 3.2: Mareas Negativas



Tabla 5.4: Comparativa de gráficas de tendencia neta para la clasificación 3.2.

De la clasificación 3.2, volvemos a observar una discrepancia entre bandas en el sector 10, donde predominan las fechas con alta variabilidad espacial. El número de fechas de esta clasificación respecto a la clasificación 3.1, vuelve a ser significativamente menor, sin embargo, las fechas parecen distribuirse

temporalmente mejor que en la clasificación Creciente-Decreciente (no quedan espacios temporales exageradamente “vacíos”).

Dicho lo anterior, como observaciones generales, podemos afirmar lo siguiente:

- **Respecto a las bandas:**
 - Las bandas de MIR aparentan un peor comportamiento. En la gran mayoría de los casos siempre se observan fechas con mayor variabilidad espacial y mayor nº de “outliers”.
 - Casi siempre, las bandas FIR muestran una menor norma cuadrática de los residuos
 - Las tendencias evolutivas entre bandas son incongruentes cuando la norma de los residuos del ajuste es mayor o igual a los 100 metros. Esto indica que a pesar de la ponderación de la tendencia lineal, nos encontramos con valores con una fuente de “ruido” importante que distorsionan los resultados entre bandas.

- **Respecto a los sectores:**
 - Se observan mayores variabilidades espaciales y mayores “outliers” en los sectores donde predominan las acciones antrópicas, como el sector 3. En el caso del sector 10, las altas variabilidades espaciales se deben al intenso oleaje que azota la zona.
 - El comportamiento regresivo mejora significativamente en zonas de tendencia estable, sin fuentes de “ruido” y entornos naturales, como es el sector 20. Esto se ve reflejado en la norma cuadrática de los residuos –la raíz del sumatorio de los residuos al cuadrado-.
 - Respecto a la evolución geomorfológica de los sectores:
 - Para el **sector 3**, es difícil cuantificar su tendencia neta anual dado la gran variabilidad de sus valores, no obstante, estos siempre son erosivos y su media de decrecimiento es de aproximadamente **1.5 metros por año**.
 - Respecto al **sector 10**, sus tendencias son en ocasiones contradictorias entre positivas y negativas, aun así, predominan las tendencias positivas con una media de **0.7 metros por año** de acumulación.
 - En el **sector 20**, los resultados son mucho más congruentes que los casos anteriores. Las tendencias siempre son positivas, indicando una acumulación de sedimento costero que gira en torno a **1.3 metros por año**.

- **Respecto a las clasificaciones:**
 - La clasificación Creciente-Decreciente (2.1 y 2.2), al realizar la clasificación entre escenas, hay un mayor número de fechas en marea creciente que en decreciente (46 frente a 27), lo cual hace que los ajustes en una clasificación cuente con la mitad de datos que la otra. Adicionalmente, esto hace que en la clasificación 2.2 las fechas no se distribuyan de manera uniforme sobre la escala temporal.
 - La clasificación Positiva-Negativa (3.1 y 3.2), vuelve a dar un mayor número de puntos a una clasificación que a otra, pero esta vez la diferencia es menos marcada (41 frente a 32). Además, esta clasificación distribuye más uniformemente las fechas que la anterior.

Analizando las gráficas anteriores es algo costoso analizar las congruencias entre resultados y determinar si el comportamiento entre las clasificaciones es similar. Para mostrar esto último, analizaremos los ficheros ‘.res’ dónde se almacenaban el identificador del sector, su tendencia evolutiva y su norma residual.

Mediante la ayuda de un SIG de escritorio, se realizó una representación cuantitativa de las tendencias evolutivas para todos los sectores, a excepción del 1 y 22, que como vimos en el análisis de medias anuales, presentan un comportamiento fiable.

Utilizamos el SIG de escritorio **QGIS Desktop 2.14.3**. Se cargaron solo los archivos correspondientes a la bandas FIR, ya que como se pudo ver en las gráficas, estas presentaban un mejor comportamiento a la hora de analizar los datos.

- Se importaron los archivos ‘.res’ como tablas sin geometrías para cada clasificación.

- Se realizaron uniones de estas tablas a la línea de referencia usando el identificador del sector como campo de unión.
- Se aplicó una representación cuantitativa bipolar por valor y tono de 5 intervalos con los siguientes valores de tendencia evolutiva. Esta representación fue aplicada a todas las clasificaciones por igual:

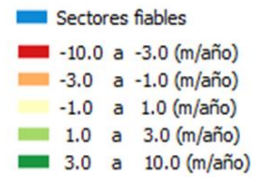
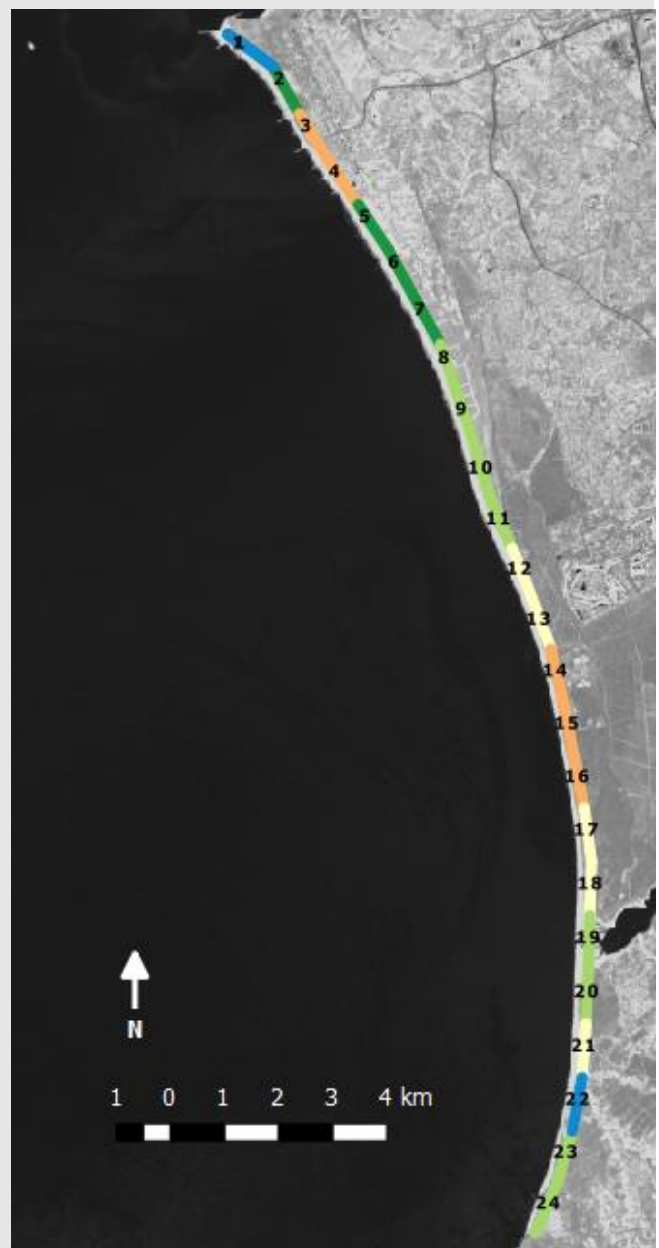
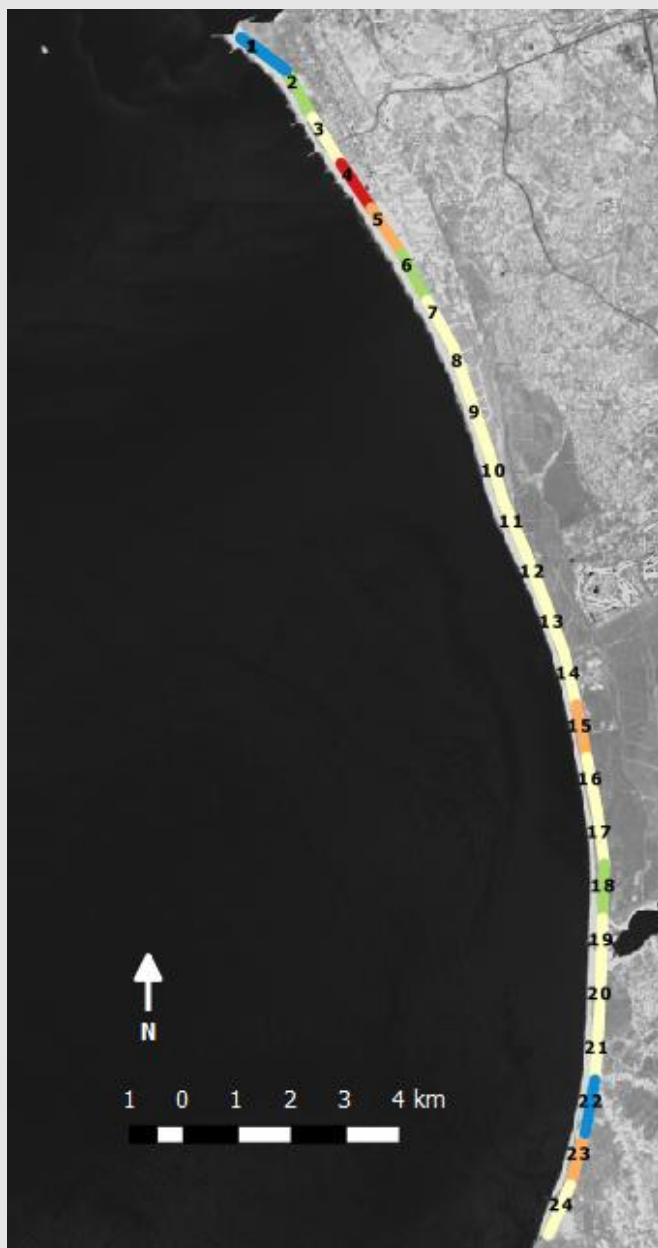


Figura 5.30: Representación de las tendencias evolutivas aplicadas a los sectores.

Comparación entre clasificaciones

Clasificación 2.1: Creciente (FIR)

Clasificación 2.2: Decreciente (FIR)



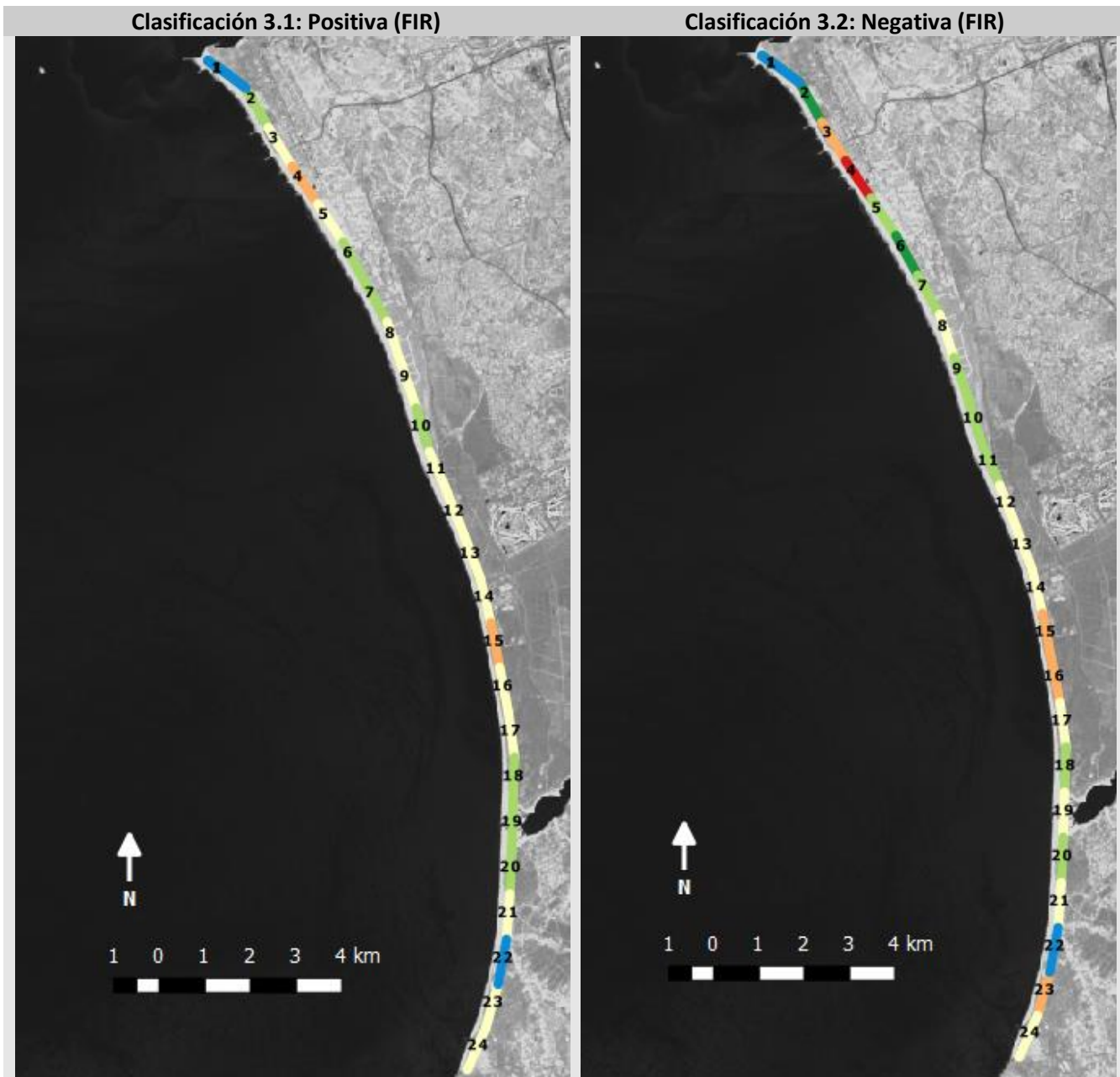


Tabla 5.5: Comparativa de resultados de tendencia evolutiva entre clasificaciones mareales.

Si se compara la **clasificación Creciente-Decreciente**, observamos valores de tendencia muy dispares, sobre todo en los sectores del 3 al 11. Las razones de esta incoherencia pueden ser diversas:

- Por una parte, tenemos diversas fuentes de ruido y anomalías que desvirtúan gravemente las tendencias. Además no es de extrañar que las zonas donde encontramos más incoherencias sean aquellas que presentan un entorno más antropogénico (sectores del 1 al 4) y una mayor intensidad de oleaje (sectores del 5 al 10).
- Es también probable que esta clasificación no esté actuando de manera correcta. Como se puede ver en la figura 5.31 ambos instantes están en fase de marea creciente, sin embargo el rango de altura que separa a ambos, para la zona de Lisboa, puede llegar a ser de hasta 4 metros. Esto se traduce en un retranqueo importante de la línea de costa que hace las distancias a la línea de referencia estén menos correladas y por tanto se realice un peor ajuste.

Si se compara la **clasificación Positiva-Negativa**, también existen disparidades y estas se vuelven a dar entre los sectores más conflictivos, sin embargo, las tendencias entre las clasificaciones son más homogéneas, es decir, si un sector es erosivo, estable o acumulativo en la clasificación 3.1, también lo es en la clasificación 3.2 –salvo en casos puntuales-. Esto señala que la clasificación positiva-negativa, parece tener un mejor comportamiento que la creciente-decreciente.

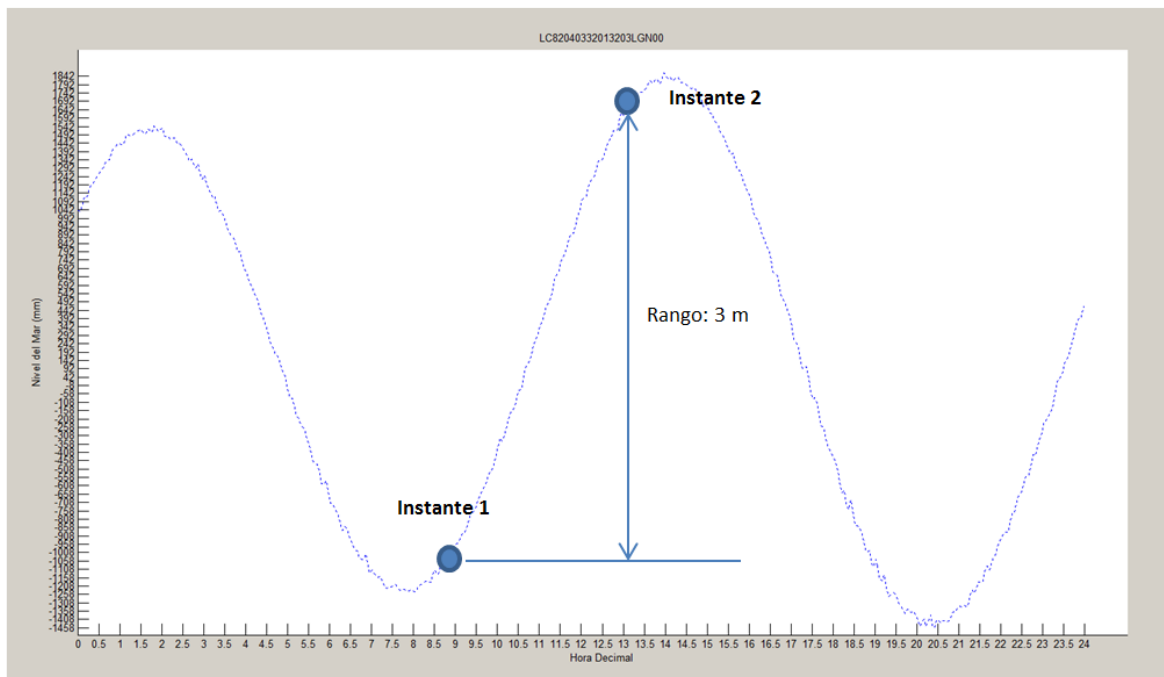


Figura 5.31: Ejemplificación de instantes de rango mareal elevado, con un comportamiento mareal creciente.

Consideraciones Sobre los Resultados

A la vista de los resultados de medias anuales y clasificaciones por mareas, y de que no se disponen datos de “verdad terreno”, resulta poco fiable determinar una evolución geomorfológica cualitativa o cuantitativa para la gran mayoría de los sectores. Está claro que en las diferentes fechas la variabilidad espacial indica que las líneas no se definen de manera correcta por el algoritmo de SELI, ni siquiera a pesar del tratamiento espacial que reciben las líneas de costa y la ponderación en la fase de análisis.

Todo esto indica que la costa lisbolesa resulta bastante conflictiva a la hora de procesarla mediante algoritmos automatizados, y por lo tanto, es necesario algún proceso manual de depuración de las líneas de costa brutas extraídas por SELI.

Dado el gran número de líneas de costa disponibles en este proyecto, se decidió analizar algunas pocas líneas manualmente depuradas. Este análisis se explica en el apartado 5.2.3.

Fuentes de Error en las Líneas de Costa

Visto los análisis realizados en los apartados anteriores, una de las conclusiones fundamentales es que las líneas de costa para los litorales de alta energía poseen numerosas fuentes de distorsión que no se llegan a eliminar completamente por procesos automatizados. Pero, las herramientas creadas para este proyecto se pueden aprovechar para detectar las fuentes de error e indicar que fenómenos afectan negativamente a las líneas de costa, y a raíz de esto plantear mejoras.

Las herramientas que se usaron para detectar las fuentes de error fueron los archivos 'out_dat' que se corresponden con los "outliers" que detecta el código de procesamiento estadístico. Estos "outliers" también son visibles en los gráficos de tendencia para todas las fechas.

Consideramos que las fuentes de error han de ser clasificadas según el fenómeno que las causa. Al revisar las escenas de las fechas anómalas pudimos aclarar las siguientes fuentes de error:

- **Oleaje:**



Figura 5.32: Ejemplo de fuentes de error en la línea de costa por oleaje.

- En la figura observamos que la línea de costa es extraída por el contorno irregular de la espuma creada por el oleaje. Esta escena resulta ser un caso extremo de mala extracción, pero esto demuestra que el oleaje es un fenómeno "molesto" –además del más abundante- sobre todo en la banda 4 del Landsat 8 (NIR).

- **Temporales:**

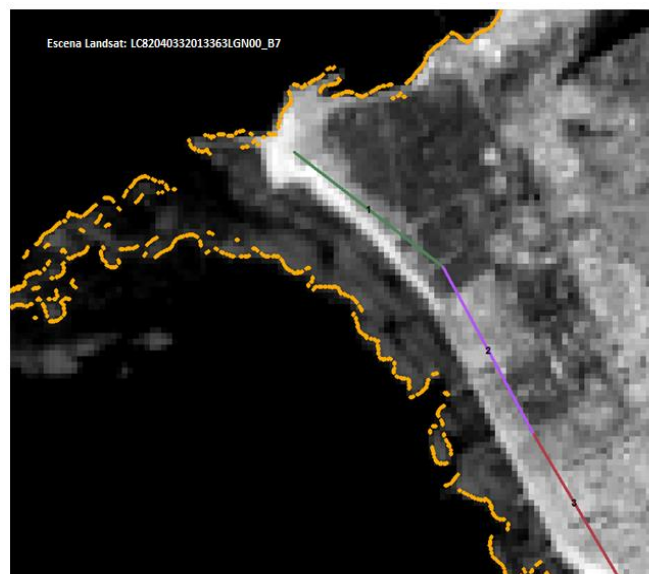


Figura 5.33: Ejemplo de fuentes de error en la línea de costa por temporales.

- Los fuertes vientos de la zona, sobre todo en épocas de invierno, crean violentos temporales y a su vez grandes olas que rompen contra la costa. Esta escena resulta un caso excepcional dónde la línea de costa es marcada por la espuma que se crea cuando las olas rompen sobre los bancos de arena submarinos.

- **Línea de vegetación-playa:**

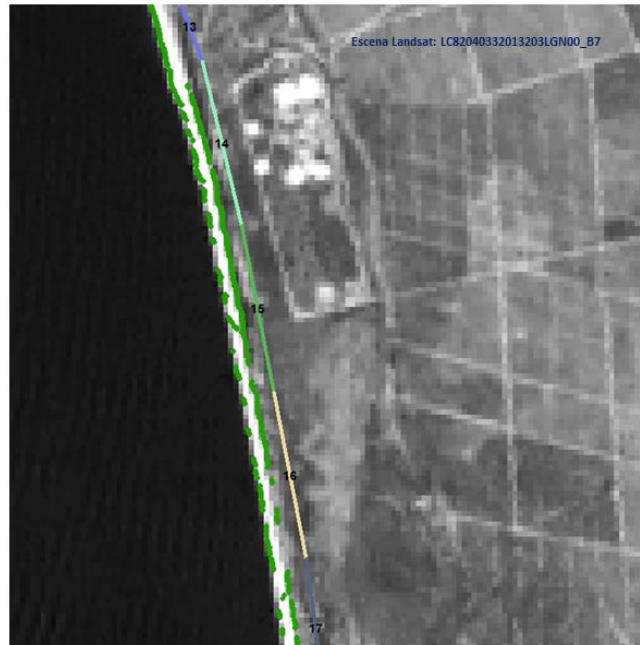


Figura 5.34: Ejemplo de fuentes de error en la línea de costa por vegetación.

- Este fenómeno tiene lugar en las costas dónde predominan los **campos de dunas** con vegetación. Se observa como el algoritmo de SELI detecta el gradiente agua-playa, en una zona de transición de playa-vegetación. Esto ocurre debido a que la respuesta espectral de la vegetación y el agua son relativamente parecidas en la bandas del infrarrojo lejano (SWIR-2).

- **Otros fenómenos:**



Figura 5.35: Ejemplo de fuentes de error en la línea de costa por fenómenos puntuales.

- Se pueden dar anomalías relacionadas con otros fenómenos. En este ejemplo se muestra como SELI detecta -y de manera acertada- los límites de la 'Lagoa de Albufera'.

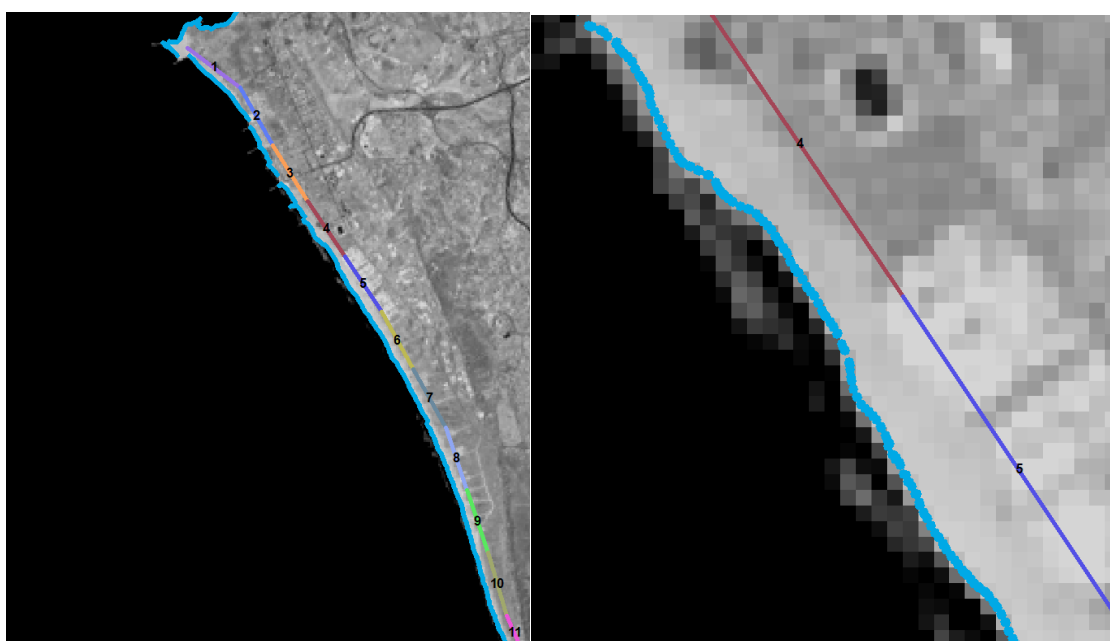
5.2.3. Análisis de un Conjunto de Líneas de Costa Manualmente Depuradas

Dados los resultados poco convincentes del primer análisis realizado debido a las diversas fuentes de error vistas, concluimos que era necesario un proceso manual de depuración de las líneas de costa brutas obtenidas por SELI. Esta depuración manual se descartó en un principio, ya que depurar 222 líneas de costa de forma manual requiere un trabajo de gabinete prolongado, y desde el punto de vista de un proyecto académico, resultaba más interesante y didáctico desarrollar herramientas para el procesamiento y análisis de líneas de costa.

Se procedió entonces a depurar manualmente un conjunto reducido de líneas de costa como muestra de un correcto procedimiento de análisis para unos entornos costeros tan conflictivos. Se escogieron un total de 17 líneas todas ellas pertenecientes al satélite Landsat 8 OLI-TIRS y en concreto de su banda 6 (MIR). En la tabla 5.6 se muestran los identificadores absolutos de las escenas escogidas, juntos con sus datos de mayor relevancia.

ID-Landsat	Fecha de Adquisición	Hora Centro de Escena	Nivel del Mar .raw	Comportamiento Marea	Codigo Marea
LC82040332015273LGN00	30/09/2015	11:14:31	-984	Creciente	1
LC82040332015209LGN00	28/07/2015	11:14:07	1078	Creciente	1
LC82040332015193LGN00	12/07/2015	11:14:02	1094	Pleamar	2
LC82040332015177LGN00	26/06/2015	11:13:50	713	Decreciente	3
LC82040332015145LGN00	25/05/2015	11:13:34	55	Decreciente	3
LC82040332015113LGN00	23/04/2015	11:13:51	x	x	99
LC82040332015049LGN00	18/02/2015	11:14:19	166	Creciente	1
LC82040332015001LGN00	01/01/2015	11:14:32	1004	Pleamar	2
LC82040332014302LGN00	29/10/2014	11:14:40	-606	Decreciente	3
LC82040332014190LGN00	09/07/2014	11:14:22	1132	Pleamar	2
LC82040332014078LGN00	19/03/2014	11:14:57	-948	Creciente	1
LC82040332013331LGN00	27/11/2013	11:16:07	577	Decreciente	3
LC82040332013315LGN00	11/11/2013	11:16:15	544	Decreciente	3
LC82040332013283LGN00	10/10/2013	11:16:24	-727	Bajamar	4
LC82040332013235LGN00	23/08/2013	11:16:33	-885	Creciente	1
LC82040332013203LGN00	22/07/2013	11:16:28	524	Creciente	1
LC82040332013187LGN00	06/07/2013	11:16:30	688	Creciente	1

Tabla 5.6: Lista de datos de la escenas depuradas manualmente.

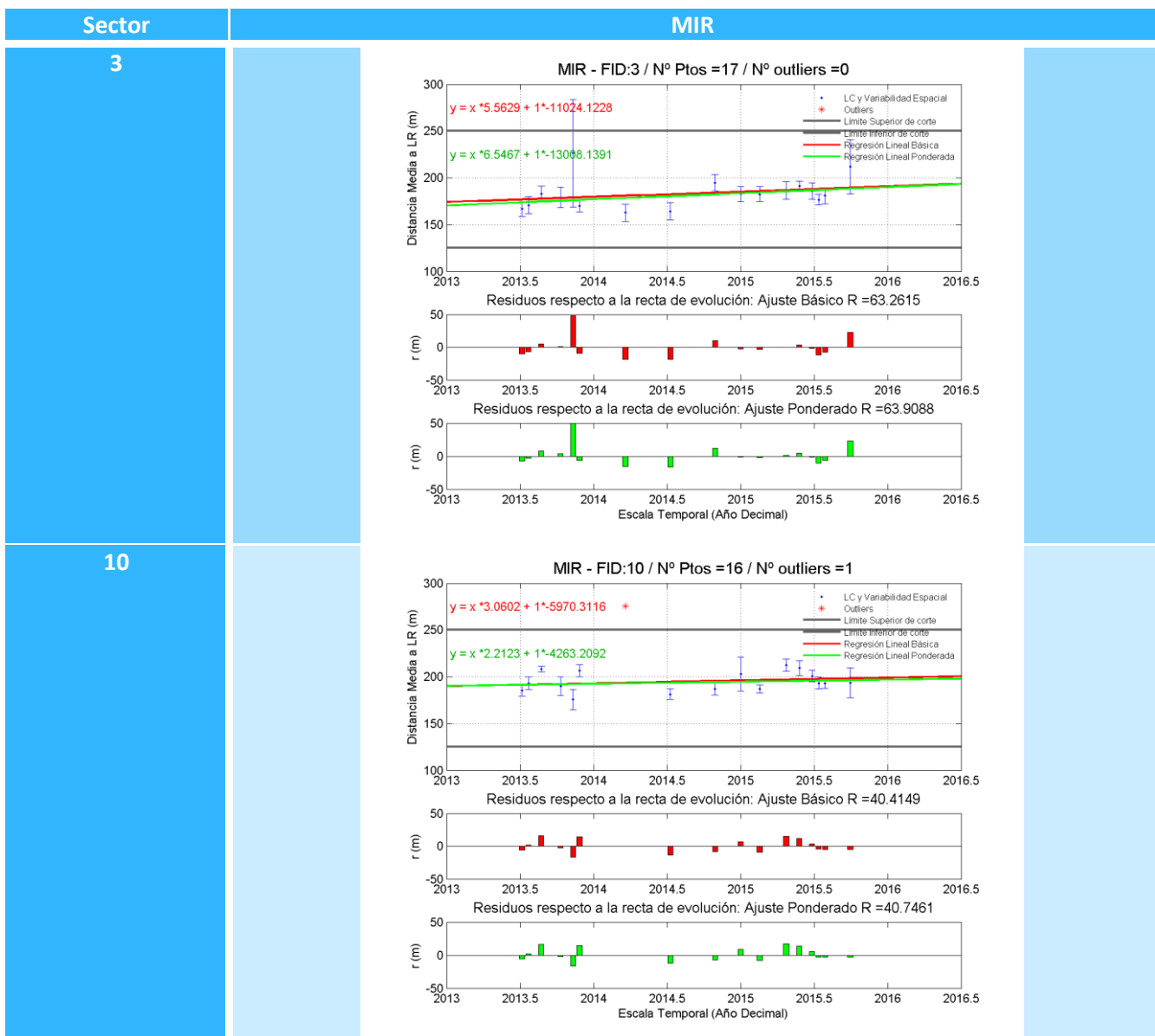


Figuras 5.36: Línea de costa LC82040332013187LGN00_B6 depurada manualmente.

Seleccionadas las líneas de costa, se procedió a procesarlas analíticamente. El primer paso fue ejecutar el análisis espacial de la misma forma que para el primer análisis, con la excepción de no aplicar el ‘buffer’ estadístico, ya que no había necesidad de depurar más aún las líneas. Acto seguido se ejecutó el análisis estadístico utilizando solo la hipermatriz correspondiente al MIR, ya que solo seleccionamos las líneas de la banda 6 del Landsat 8. Volver a realizar todo el análisis no fue nada costoso, ya que la ventaja que han ofrecido las herramientas creadas es que están automatizadas.

Recordamos que los resultados que se obtenían eran una serie de medias anuales y también se realizaban clasificaciones según los comportamientos mareales. Sin embargo, con tan pocas líneas y tan pocos años de observación (solo 3 años), no resulta viable realizar un estudio por medias anuales ni por clasificación de mareas, ya que 3 medias definen unívocamente un polinomio de grado 2, y como se puede observar en la tabla 5.6, clasificar las líneas por mareas deja las clasificaciones desigualadas en cuanto al número de fechas. Por lo tanto se procesaron todas las fechas juntas.

Para analizar geomorfológicamente los resultados, se usaron las gráficas de todas las fechas y se observaron las rectas de tendencia evolutiva neta:



20

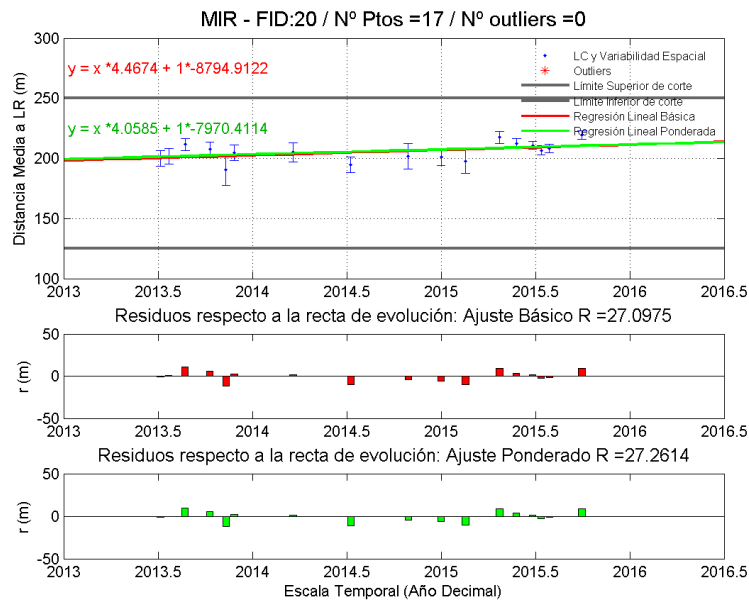


Tabla 5.7: Gráficas resultado de sectores representativos para las líneas depuradas manualmente.

De la tabla 5.7 se pueden comparar estas gráficas con las del primer análisis y enseguida salta a la vista como han mejorado las variabilidades espaciales y han descendido significativamente la norma cuadrática de los residuos. En los casos mostrados, los sectores presentan un comportamiento acumulativo.

Analizando el resto de gráficas, podemos destacar los siguientes **sectores “interesantes”** desde la perspectiva de la administración de espacios costeros:

- Sector 2:

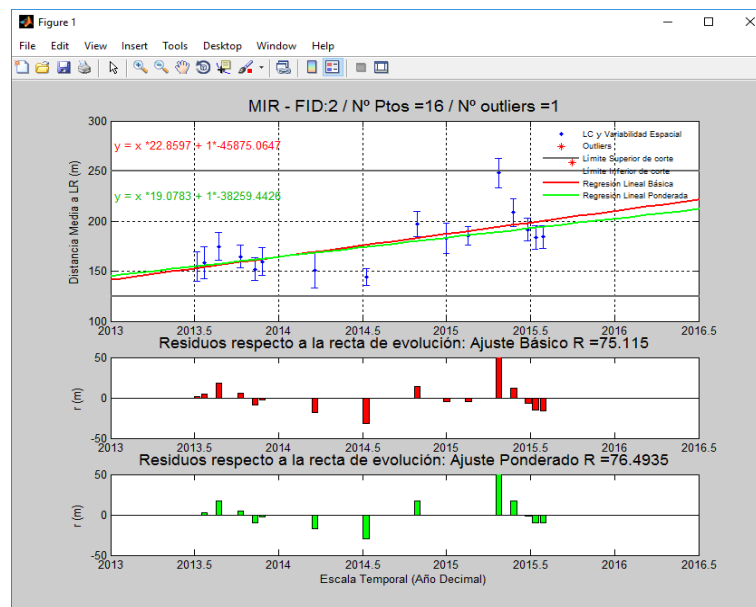


Figura 5.37: Gráfica de tendencia del sector 2 (MIR).

- Resulta sorprendente la tendencia acumulativa que se obtiene en el sector 2, casi 20 metros por año. Si se observa la gráfica hay un “salto” entre las fechas sobre la mitad del año 2014 y finales de este. Este salto es de casi 50 metros por lo que se intuye un **aporte de arena artificial** realizado en esta fecha. Y efectivamente, se llevaron a cabo aportes en la zona de la playa de ‘Caparica’ (sector 2) entre las fechas del 5 al 25 de Julio de 2014.



Figuras 5.38: Estados de la playa de 'Caparica' antes, durante y después del aporte llevado a cabo en Julio de 2014. Fuente: Cortesía de Elena Sánchez García.

- **Sector 4:**

- En este sector se observa una tendencia erosiva considerable de **7 metros por año**. Si se tiene en cuenta la dirección Sur-norte de la deriva litoral, esta mueve los sedimentos situados más al sur hacia la zona norte (Cova do Vapor). Esto es lo que ocurre en el sector 4, el sedimento playero se ve transportado hacia el norte y este no se recupera debido al campo de espigones construido en las inmediaciones. Este resultado, puede ser indicativo de que se necesitan de medidas correctoras, como los aportes artificiales que se llevan a cabo en la zona, para proteger las áreas urbanas adyacentes.

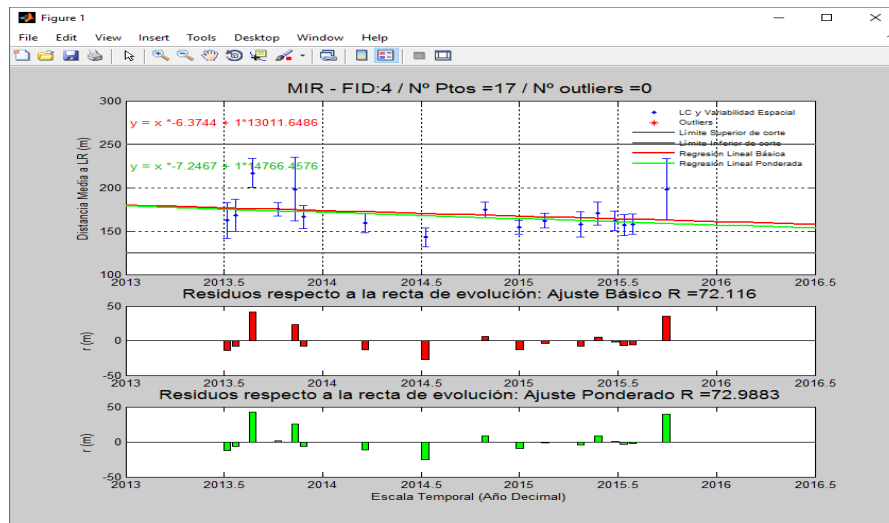


Figura 5.39: Gráfica de tendencia del sector 4 (MIR).

Finalmente, se volvió a utilizar el archivo ‘.res’ para representar los **resultados parciales** de tendencia evolutiva obtenidos. Estos pueden ser consultados en la Figura 5.40.

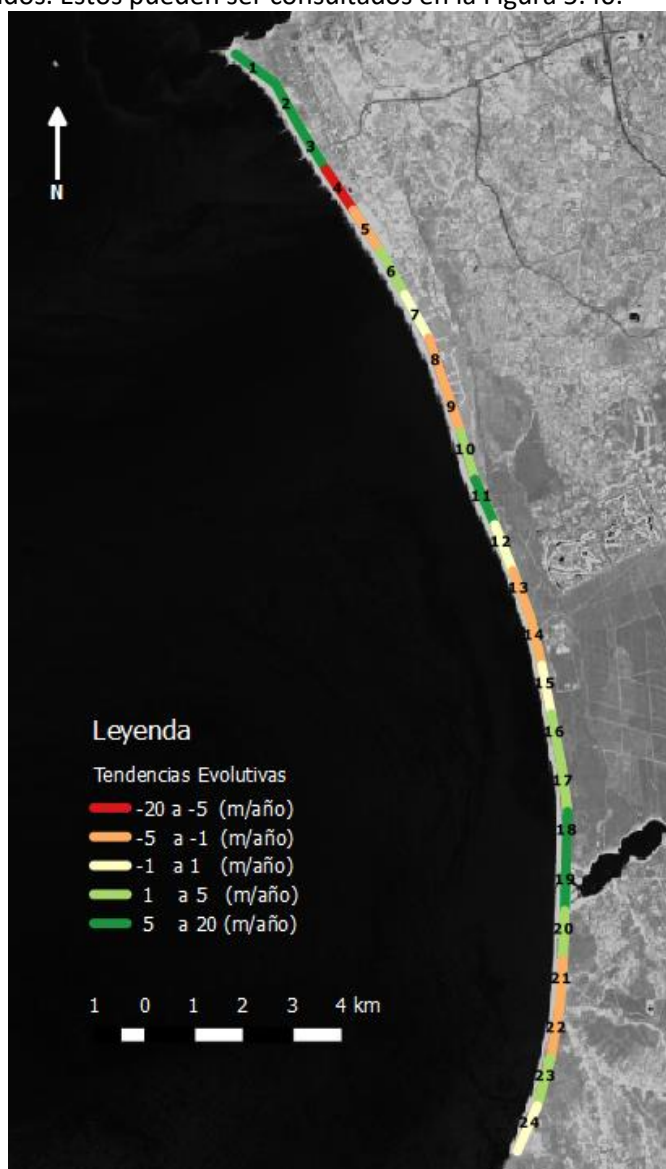


Figura 5.40 Resultados de tendencias con líneas depuradas manualmente.

CONCLUSIONES

El último apartado de este proyecto resume los diferentes aspectos del trabajo realizado y formula una serie de conclusiones con objetivo de evaluar al proyecto en sus aspectos de aplicación (metodologías, zona de estudio...) y de sus propósitos académicos.

6. CONCLUSIONES

Finalmente, con todos los aspectos recogidos y estudiados en este trabajo de final de grado, se pretende formular una serie de conclusiones de diferente índole. Estas conclusiones resumen y esclarecen la utilidad, las dificultades o las mejoras de los diferentes aspectos y procesos llevados a cabo en este proyecto.

Estas conclusiones se han dividido en relación a la zona de estudio (las costas lisbonenses), la metodología expuesta en este trabajo (herramientas creadas y procedimiento de análisis) y sobre el proyecto académico en sí. Esta clasificación se ha realizado para una mejor comprensión de este apartado.

6.1. SOBRE LA METODOLOGÍA

6.1.1. La Teledetección y SELI

De entre todas las técnicas que se puedan usar para la monitorización y seguimiento dinámico de los espacios costeros, la **teledetección** resulta ser una herramienta económica que ofrece una amplia variabilidad en cuanto a resoluciones espaciales, espectrales, temporales y radiométricas se refiere. Todo esto permite:

- Repetitividad en las observaciones que facilitan el conocimiento de situaciones pasadas, presentes y futuras.
- Manejo matemático y cuantitativo de las imágenes de satélites gracias a la codificación en niveles digitales de las imágenes.
- Amplio rango espectral que permite caracterizar las coberturas por diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético.
- La eficiencia y bajo coste de la adquisición de las escenas satelitales en comparación con campañas de campo.

Adicionalmente, **SELI** resulta ser un software de extracción de líneas de costa con mucho potencial por diversas razones:

- Mejora en la precisión posicional de la línea de costa. Las líneas de costa se extraen desde una imagen Landsat de resolución espacial mediana y gracias al procesamiento sub-píxel se obtienen una precisión suficiente como para analizar cambios geomorfológicos en los espacios costeros.
- El coste que supone la obtención de imágenes es nulo, ya que SELI opera sobre las imágenes Landsat, las cuales son gratuitas. Esto supone una clara ventaja económica ya que en el mercado existen otras imágenes satelitales con mayor resolución espacial, sin embargo el coste de estas se dispara. SELI permite obtener una buena precisión en las líneas de costa mediante una fuente de datos gratuita.
- Variedad y gran cantidad de datos. SELI permite analizar los entornos costeros mediante numerosas líneas de costa en periodos cortos de observación, además de obtener diferentes líneas en función del rango espectral de las bandas infrarrojas Landsat. Esto supone un cambio en la metodología tradicional del estudio de espacios costeros mediante líneas de costa, los cuales operaban con un número reducido de líneas y un amplio rango temporal.

Sin embargo, SELI ha de calibrarse sobre otros entornos costeros diferentes al mediterráneo para fortalecer y ampliar sus posibilidades. Este trabajo ha pretendido estudiar esto mismo, definiendo las limitaciones y alcances de SELI en las costas atlánticas.

Por lo tanto concluimos que:

- ✓ Tanto la teledetección como SELI son técnicas y metodologías completamente válidas las cuales ofrecen un amplio abanico de posibilidades y ventajas para el estudio y el análisis de los espacios costeros.

Como mejoras podemos destacar brevemente que:

- Las continuas mejoras en las diferentes resoluciones de las imágenes de satélite siempre supondrán un mejor análisis sobre la variable que se esté estudiando.
 - SELI ganaría mucho más potencial si se editara para que resultara ser un software automático y no semi-automático, y este estuviera desarrollado sobre un mismo entorno de programación.
-

6.1.2. Herramientas Creadas

Las herramientas creadas han pretendido analizar de forma eficiente los numerosos datos de este trabajo y procesar estos para llegar a obtener unos resultados que simplifiquen la gran cantidad de información tratada.

Las herramientas creadas también han operado mediante diferentes perspectivas, nos referimos al tratamiento espacial y estadístico que se consideran igual de importantes sobre los datos masivos y susceptibles de ser georreferenciados. Además, el grado de complicación de la zona y la tutorización tanto desde una perspectiva geomorfológica, como matemática han hecho que las herramientas se hayan desarrollado con un objetivo claro y sobre una base teórica y práctica bastante sólida.

La herramienta de **análisis espacial** ha demostrado que selecciona y mide sobre la línea de referencia la playa de estudio de manera eficiente, y en cuanto al objetivo de depuración de los puntos anómalos, este se consigue parcialmente; lo cual supone un logro, ya que eliminar el ruido de las líneas de costa por completo mediante procesos automatizados es una tarea bastante complicada. Todo esto se consigue gracias a una serie de geoprosesos distintivos en los software de SIG y los que el usuario ha aplicado a conciencia.

La herramienta de **análisis estadístico** cumple con su objetivo de obtener una serie de resultados capaces de ser interpretados, tanto cualitativamente como cuantitativamente. Esto se consigue gracias a una ordenación eficiente y gracias a una serie de operaciones estadísticas sobre los numerosos resultados del análisis espacial. La herramienta permite la flexibilidad de procesar las líneas de costa que el usuario desee, además, esta arroja resultados útiles como las medias anuales y las diferentes gráficas y resultados de ajuste, los cuales permiten analizar desde diferentes perspectivas los espacios costeros.

Estas herramientas suponen una nueva forma de analizar los litorales mediante un número masivo de líneas de costa, la cual permite que los cambios sean perceptibles con pocos años de observación y además estos queden cuantificados y no solo cualitativamente descritos.

Si consideramos esto, podemos concluir acerca de las herramientas que:

- ✓ La herramienta de análisis espacial resulta útil para los objetivos de selección, medición y parcialmente para los objetivos de depuración, sobre las líneas de costa.
 - ✓ La herramienta de análisis estadístico resulta útil para los objetivos de determinación de tendencias evolutivas y obtiene unos resultados capaces de ser interpretados, ser estudiados más fondo o ser representados sobre un SIG.
-

- ✓ Estas herramientas sirven como utilidades de interpretación geomorfológica, las cuales pueden ser aprovechadas por profesionales más específicos del sector de la geología y/o por personas familiarizadas con la zona de estudio.
- ✓ Estas herramientas suponen una diferente y novedosa forma de analizar los entornos costeros mediante el uso de las líneas de costa. Las mejoras se traducen en una mejora en interpretación y resolución temporal.
- ✓ Las herramientas también responden a una necesidad de carencia de utilidades de esta naturaleza en el mercado actual, tal y como se indicaron en los antecedentes de este trabajo.
- ✓ La automatización resulta una tarea indispensable en las herramientas geomáticas cuando se trabaja con grandes cantidades de información.

Como mejora podemos destacar detalles puntuales de las propias herramientas creadas:

- Flexibilidad o valor de entrada del usuario de los umbrales para los procesos de buffer estadístico del análisis espacial o de la umbralización de fechas del análisis estadístico.
- Para el tratamiento de todas las fechas se pondrían programar ajustes de diferente grado y no solo limitarse a la recta de regresión.
- Se podrían realizar algunas mejoras de optimización sobre los procesos de ambas herramientas.
- El proceso de inferencia estadística se tendría que programar en el código general del análisis estadístico para no tener que migrar a Excel cuando se analizan las medias anuales.



Figura 6.1: Foto artística “Costa del País Vasco”. Fuente: Cortesía de Juan Miguel Sobrón Dasilva

6.2. SOBRE LA ZONA DE ESTUDIO

6.2.1. Fenómenos del Océano Atlántico

No cabe duda de que la **costa atlántica portuguesa** es un entorno complejo y complicado de estudiar, ya que está sometida a numerosos factores que pueden entorpecer los estudios analíticos de líneas de costa. Y por si esto no fuera poco, el carácter extranjero y el desconocimiento de la zona, por parte del autor de este trabajo, hace que el desarrollo de este sea más arduo.

La **costa de Caparica** se ve expuesta a un enérgico oleaje y a un rango mareal muy amplio, además de temporales violentos y afecciones humanas sobre las costas. Estos fenómenos son los que más han afectado al desarrollo de este trabajo:

- El **oleaje** perjudica gravemente al proceso de extracción mediante SELI, ya que en las tres bandas infrarrojas de las imágenes Landsat, SELI detecta el gradiente agua-arena en los perfiles irregulares de la espuma blanca creada por el oleaje. Este hecho retranquea la posición de la línea de costa hacia el mar e introduce “ruido” en los ajustes de regresión. Este “ruido” se materializa como una alta variabilidad espacial en la línea de costa.
- El **régimen mareal** atlántico es característico por ser semi-diurno con rangos en nivel del mar de hasta 5 metros. Esto supone una variación considerable sobre la posición de la línea de costa, que resulta mayor dónde las terrazas intermareales son más pronunciadas. A diferencia del oleaje, para este proyecto se disponían de datos de nivel del mar los cuales han podido ser relacionados con las escenas Landsat. Esto posibilita analizar, desde diferentes clasificaciones, el efecto de las mareas sobre las costas de Portugal.
- Los **temporales y las afecciones artificiales** sobre el litoral atlántico, son datos capaces de ser registrados en la línea temporal y que afectan de forma drástica a los análisis de líneas de costa. Los cambios que producen estos fenómenos desvirtúan la tendencia natural que siguen las playas, y debido al cambio tan pronunciado que producen sobre los análisis, estos fenómenos pueden ser considerados como “outliers” cuando realmente no lo son. Sin duda esto demuestra que en el proceso de estudio de resultados ha de intervenir un profesional que conozca la zona para detectar este tipo de situaciones.

Dicho esto, podemos entonces concluir que:

- ✓ La costa atlántica portuguesa es un entorno conflictivo y complejo para los estudios litorales debido a los fenómenos asociados con la dinámica oceánica.
- ✓ El oleaje afecta al proceso de extracción con SELI, produciendo un efecto aleatorio y grosero en la línea de costa incapaz de ser tratado en este proyecto debido a la falta de datos.
- ✓ El régimen mareal es un efecto importante a tener en cuenta pero que puede ser mitigado gracias a los datos que se disponen de la red de mareógrafos de la zona.
- ✓ Los temporales y alimentaciones artificiales a las playas de Lisboa son efectos con una gran repercusión en el litoral, los cuales han de ser registrados para poder comprobar su afección sobre los análisis evolutivos de la costa.
- ✓ Es necesario disponer del apoyo de profesionales con un conocimiento de la zona de estudio para entornos tan conflictivos y complicados de estudiar.

Como mejoras podemos destacar muchas de las soluciones ya propuestas por parte de las conclusiones como por ejemplo:

- El disponer de datos de oleaje, los cuales nos permitan estudiar las magnitudes asociadas y enlazarlas con las líneas de costa.
- El estudio de esta zona, y de cualquier otra, debería de ser apoyado por técnicos que conozcan la zona. Esto supone una gran ventaja en entornos tan complicados como las costas de Lisboa.

6.2.2. Procedimiento y Resultados del Análisis

El procedimiento de análisis de la costa de Lisboa ha dado lugar a determinar varios aspectos relacionados con la zona de estudio y con la metodología analítica empleada.

En primer lugar, el proceso de georreferenciación de SELI en playas acantiladas y de perfil irregular no se ejecuta de manera apropiada y se obtienen unas líneas de costa exageradamente retranqueadas. Esto se demuestra en las zonas de estudio 2 y 3 de este proyecto. No obstante, las zonas acantiladas no presentan interés evolutivo costero, pero se ha demostrado que SELI no opera bien en estos entornos.

El **análisis espacial** opera adecuadamente sobre la playa de estudio y se considera útil ya que los resultados están organizados por sectores de la línea de referencia lo cual permite una mejor administración de los resultados finales y se elimina parte del ruido creado mar adentro por la espuma del oleaje. Sin embargo, no se llega a eliminar el ruido producido tierra adentro por el gradiente de coberturas arena-vegetación.

El **análisis estadístico** por medias anuales pretende detectar las variaciones anuales en las costas y establecer una tendencia fiable ajustando polinomios de diferente grado y comprobando su compatibilidad con los valores observados, todo ello mediante la robustez de los métodos de la inferencia estadística. No obstante, la gran cantidad de ruido presente en las líneas de costa tratadas automáticamente hacen que los sectores resulten en la gran mayoría de los casos poco fiables, y esto obliga a analizar la playa mediante su tendencia lineal neta. Sin embargo, el que se presenten numerosos sectores poco fiables aumenta las sospechas sobre la ineficacia de SELI frente a la extracción de líneas de costa en litorales diferentes al mar mediterráneo (entorno en donde fue desarrollado SELI). No obstante, se obtienen resultados interesantes como la detección de los aportes artificiales de arena llevados a cabo sobre la costa de Caparica y el efecto de algunos de los temporales.

El análisis estadístico por clasificación de mareas, pretende completar al de medias anuales para aquellos sectores que no resultaron fiables en su tendencia anual, esto se consigue gracias a la clasificación de líneas de costa por diferente comportamiento mareal y al ajuste de una recta ponderada por la variabilidad espacial, la cual representa la tendencia evolutiva neta del sector analizado. Aun así el gran ruido introducido por los fenómenos del atlántico y que no es eliminado vuelve a entorpecer el análisis y resulta difícil extraer una conclusión esclarecedora aparte de que las líneas de costa poseen una alta variabilidad espacial que se traduce en un alto contenido de ruido. Esto es también apreciable por el número de outliers que se detectan y por las incongruencias que se dan entre bandas infrarrojas, entre sectores y entre clasificaciones mareales. Sin duda esto reanima a las sospechas de que la extracción por SELI en el atlántico se ve afectada por diversos fenómenos aleatorios y groseros, y que los esfuerzos por eliminar estas fuentes de error de forma automática no son suficientes para depurar las líneas de costa. Además que los datos de

partida sean “**poco creíbles**” y que se carezcan de **datos “verdad terreno”** no permiten validar las clasificaciones mareales ni los resultados que se obtienen.

Debido a las fuentes de error observadas en las líneas de costa, las cuales en muchos casos y sectores no quedan bien definidas, es necesario abandonar los procesos automáticos de tratamiento y depurar las líneas de costa manualmente. Esta depuración para un número amplio de líneas de costa resulta una tarea bastante pesada y por lo tanto en este trabajo se realizó únicamente en una serie de líneas de costa que comprendían 3 años de observación. Los resultados, mostraron lo esperado reduciendo así la variabilidad espacial de las líneas de costa y mediante el estudio de las gráficas de tendencia lineal neta se pudo apreciar la acumulación o la erosión en metros por año de cada sector. Desgraciadamente, aunque los resultados parezcan ser fiables, para darles una validez adecuada, estos tendrán que ser comparados por una fuente o un estudio de líneas de costa con más precisión, nos referimos a la comparación con un conjunto de datos “verdad terreno”.

Todo el estudio y su procedimiento nos hace concluir que:

- ✓ SELI georreferencia erróneamente las líneas de costa en litorales de geometría heterogénea.
- ✓ El procedimiento de análisis ha pretendido estar estructurado de manera lógica y útil para extraer conclusiones sobre la playa de estudio.
- ✓ Las herramientas aparte de pretender estudiar la tendencia evolutiva de las playas, han conseguido ilustrar que las líneas de costa que se han extraído resultan poco creíbles.
- ✓ SELI confunde los gradientes arena-agua con los gradientes espuma-agua y vegetación-arena en aquellas costas más conflictivas. Esto produce una serie de resultados poco representativos de la línea de costa.
- ✓ El ruido de las líneas de costa no permite validar algunos pasos del proceso analítico como las clasificaciones mareales.
- ✓ Debido a las fuentes de error en las líneas de costa y que los procesos de depuración no son suficientes, es inevitable que para un correcto análisis de la costa de Lisboa las líneas de costa han de ser editadas manualmente.
- ✓ La carencia de datos de otra naturaleza y más precisos, es una limitación importante para este proyecto y para validar con contundencia los resultados.

Las mejoras que se proponen están relacionadas con el proceso de extracción de SELI, ya que es nuestra principal fuente de incongruencias:

- Si su interés lo requiere, sería necesario estudiar porque razón exacta falla la georreferenciación de SELI en las costas acantiladas.
- Para la confusión de gradientes, SELI podría aplicar algún tipo de clasificación espectral y crear una máscara para solo operar en los gradientes arena-agua.
- El oleaje resulta un fenómeno complicado de eliminar por parte de SELI. Como determinamos anteriormente, este tiene que ser estudiado mediante datos de oleaje.

6.2.3. Fragilidad y Vulnerabilidad de las Costas

Los antecedentes y resultados del trabajo, muestran una costa de Lisboa frágil y muy vulnerable a los procesos de erosión, lo que afecta gravemente a los aspectos económicos, sociales y naturales de la costa de Caparica.

Las acciones antrópicas que se han llevado a cabo –y se siguen llevando hoy en día– son un intento por parte de las administraciones por preservar la zona. Algunos autores (p.ej.: Veloso Gomes), argumentan que los espigones y los malecones construidos en la zona durante la década de los 60 han servido para frenar los procesos erosivos y estabilizar las playas. Sin embargo, en el marco teórico de este trabajo se demuestra justo lo contrario. La construcción de **estructuras artificiales** puede llegar a frenar los efectos negativos a corto plazo, pero a largo plazo las afecciones negativas al litoral por estas estructuras son inevitables. Esto se demuestra para la zona de Caparica que siempre después de la construcción de este tipo de estructuras las playas sufren graves periodos de erosión (ver apartado 1.1: Antecedentes).

La insuficiencia de material sedimentario proveniente de las redes fluviales y los efectos colaterales por la deriva litoral hacen necesarias una serie de alimentaciones de arena artificial llevadas a cabo periódicamente sobre la costa de Caparica, las cuales han sido detectadas gracias a las herramientas creadas en este proyecto. Estas acciones son una solución inmediata para los problemas erosivos pero no resuelven el conflicto a largo plazo además de que es necesaria una periodicidad continua en estas alimentaciones artificiales. Según Aleixo Pinto 2015, las **alimentaciones artificiales** llevadas a cabo entre los años **2007 y 2014** supusieron un coste total a las administraciones de **20 millones de euros** y se transportaron sobre las playas de la costa de Caparica un total de **3 millones y medio de metros cúbicos** de arena procedente de las barreras submarinas. Sin duda, el equilibrio natural en la deriva litoral que se ve modificado por las afecciones antrópicas, ha de ser compensado, significando esto numerosos costes y riesgos.

Por lo tanto, podemos concluir que:

- ✓ Los antecedentes de este proyecto muestran una costa sur de Lisboa afectada por problemas erosivos y en dónde se llevan a cabo numerosas acciones antrópicas para la protección de estos.
 - ✓ Los resultados parciales de este proyecto detectan las alimentaciones artificiales de arena y los problemas erosivos que muestran una costa de Caparica frágil. Sin embargo, más al sur los sectores playeros se muestran relativamente más estables. Esto es debido a la inexistencia de construcciones artificiales costeras.
 - ✓ Los espigones conducen a un gran desequilibrio para la deriva litoral, mientras que los malecones hacen que la terraza intermareal de las playas sea cada vez más pronunciada y el agua alcance los entornos urbanos.
 - ✓ Las alimentaciones artificiales de arena suponen una solución a corto plazo, sin embargo estos son tremendamente caros para las administraciones y no solucionan el problema a largo plazo.
-

6.3. SOBRE EL PROYECTO ACADÉMICO

Es importante que los aspectos generales y sobre todo académicos de este trabajo sean evaluados.

Este trabajo ha planteado la **aplicación de procesos**, el **desarrollo de herramientas** y la **puesta en práctica de estas**, sobre un entorno lo suficientemente complejo y desconocido para que puedan de verdad ser evaluados en todas sus posibilidades. Esto ha supuesto el uso de numerosas técnicas de análisis y geomáticas aprendidas por el alumno para que los objetivos que se han planteado a priori sean resueltos de la mejor manera posible.

Finalmente se concluye que:

- ✓ Los objetivos del proyecto han sido abordados por diferentes técnicas y estudios, y se puede afirmar que se han cumplido correctamente teniendo en cuenta las posibilidades y limitaciones de la naturaleza de este trabajo.
- ✓ El proyecto ha servido al alumno para la puesta en práctica y en conjunto de numerosas disciplinas, aptitudes y conocimientos aprendidos en el grado en geomática y topografía.
- ✓ El trabajo también ha servido como medio de concienciación sobre la fragilidad ambiental y la importancia de la monitorización de los entornos costeros.
- ✓ Este trabajo también ha demostrado que el profesional en geomática tiene cabida en los estudios geomorfológicos y es un técnico de importancia en grupos de investigación.



Figura 6.2: Foto artística "Atardecer y Pasarela". Fuente: Cortesía de Juan Miguel Sobrón Dasilva.



REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

*Este apartado recoge las publicaciones, documentos, libros
y apuntes consultados para este trabajo.*

7. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Almonacid Caballer, J., Sánchez García, E., Pardo Pascual, J., Balaguer Beser, A., Palomar Vázquez, J. . 2015. Evaluation of annual mean shoreline position deduced from Landsat imagery as a mid-term coastal evolution indicator. *Marine Geology*:79-88.
- Pardo Pascual, J., Almonacid Caballer, J., Ruiz, L., Palomar Vázquez, J. . 2012. Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision. *Remote Sensing of Environment*: 1-11.
- Sánchez-Arcilla Agustín, Jiménez José A. 1994. *Ingeniería de playas (I): Conceptos de morfología costera. Laboratori d'Enginyeria Marítima*. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. Nº Pág.: 18.
- Aleixo Pinto, C., Gomes, E., Rodrigues, A. 2015. *Dredging and beach nourishment: A sustainable sediment management approach in Costa da Caparica beach (Portugal)*. Portuguese Environment Agency. Nº Pág.: 37.
- Ramos Pereira Ana. *Geografia y Ambiente de Lisboa*. Centro de Estudios Geográficos, Universidade de Lisboa. Nº Pág.: 22.
- Veloso Gomes Fernando, Tavieria Pinto Francisco. *EUROSION Case Study: Cova do Vapor y Costa da Caparica (Portugal)*. Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos – IHRH. Nº Pág.: 26.
- Veloso-Gomes, F., Costa, J., Rodrigues, A., Tavieria Pinto, F., Pais-Barbosa, J., Das Neves, L. . 2009. Costa da Caparica Artificial Sand Nourishment and Coastal Dynamics. *Journal of coastal research*: 678-682.
- Aspectos técnicos de las imágenes Landsat*. INEGI. Dirección General de Geografía y Media Ambiente. Nº Pág.: 22.
- Ferreira, A. . *Caracterização de Portugal Continental*. Nº Pág.: 43.
- Ojeda Zújar, J., Díaz Cuevas, M. P., Prieto Campos, A., Álvarez Francoso, J. . 2013. Línea de Costa y Sistemas de Información Geográfica: Modelo de Datos para la Caracterización y Cálculo de Indicadores en la Costa Andaluza. *Investigaciones geográficas, Instituto interuniversitario de geografía, Universidad de Alicante pp*. 37-52.
- November 2015. *Landsat Project Factsheet 2015-3081*. U.S. Department of Interior & U.S. Geological Survey. Nº Pág.: 4.
- Alexander Ariza. *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8, LDCM*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Grupo Interno de Trabajo en Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas. Nº Pág.: 46.
- Pons Valls, Josep María. *La Medición del Nivel Medio del Mar: Principios y Métodos*. Universidad Politècnica de Catalunya. Nº Pág.: 5.
- Marín Molina J., Felipe Román M.J., Balaguer Beser A., Capilla Román M.T. . 2012. *Álgebra Lineal*. Editorial UPV. Nº Pág.: 174.
- Ajuste de Observaciones. Bloque I: Estadística, Distribuciones y Leyes de Transmisión y Bloque II: Mínimos Cuadrados 2012-2013*. UPV, ETSIGCT. Nº Pág.: 37.

Thurman, Harold V.; Trujillo, Alan P. . 2002. *Essentials of Oceanography 7th Edition*. Prentice Hall. Nº Pág.: 514.

Pardo Pascual, Josep Eliseu. *Introducción a la Geografía Física*. Dpt. De Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Ref. UPV.: 54.

Alemany E., Balaguer A., Capilla M. T., Felipe M. J., Marín J., Monreal Ll. . *Métodos Matemáticos Bloque 2, Estadística: Tema 4. Inferencia Estadística*. UPV. Nº Pág.: 9.

Martínez Llario, José Carlos. 2015. *Módulo 4: Servicios de Visualización (WMS)*. UPV. Nº Pág.: 42.





ANEXOS

Los anexos recogen los datos, procesamientos y herramientas específicas. Su propósito ha sido facilitar la lectura del documento y servir de apoyo si se desea conocer más a fondo algún dato o herramienta.

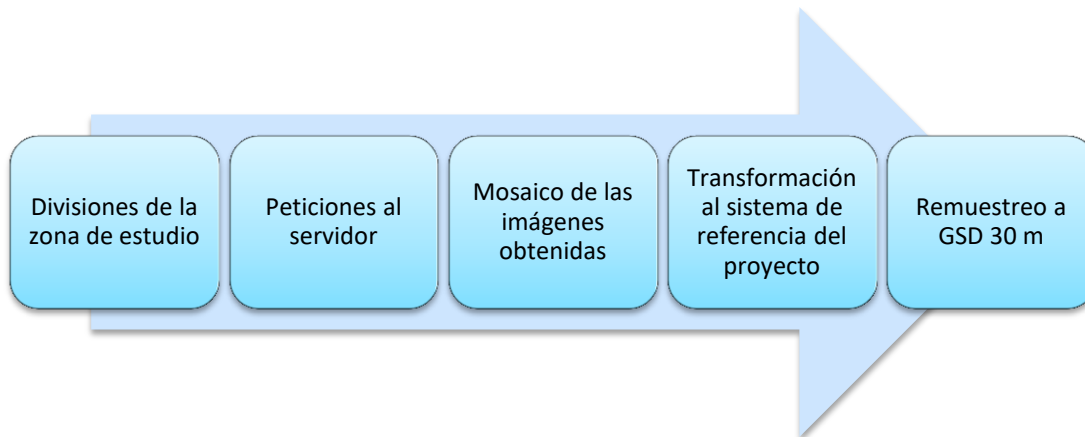
ANEXO 1: LISTA DE DATOS DE ESCENAS LANDSAT → BDA

ID-Landsat	Sensor	Fecha de Adquisición	Hora Centro de Escena	Nivel del Mar .raw	Hora .raw	Nivel del Mar Interpolado	Comportamiento Marea	Seleccionada (S/N)	Observaciones
LE72040332015313ASN00	ETM	09/11/2015	11:15:07	837.00	11:15:05	827.911111	Creciente	SI	chequear datos mareas / coincidente con trabajo de elena
LC82040332015273LGN00	OLI_TIRS	30/09/2015	11:14:31	-984.00	11:14:30	-973.233333	Creciente	SI	x
LE72040332015265ASN00	ETM	22/09/2015	11:14:28	431.00	11:14:30	436.916667	Decreciente	SI	x
LC82040332015241LGN00	OLI_TIRS	29/08/2015	11:14:19	-	-	0.000000	x	NO	no seleccionada (nubes)
LE72040332015233ASN00	ETM	21/08/2015	11:14:22	-454.00	11:14:20	-453.088889	Decreciente	SI	x
LE72040332015217ASN00	ETM	05/08/2015	11:14:19	-998.00	11:14:20	-967.966667	Decreciente	SI	x
LC82040332015209LGN00	OLI_TIRS	28/07/2015	11:14:07	1078.00	11:14:05	1042.266667	Creciente	SI	x
LE72040332015201ASN00	ETM	20/07/2015	11:14:16	-812.00	11:14:15	-773.600000	Bajamar	SI	x
LC82040332015193LGN00	OLI_TIRS	12/07/2015	11:14:02	1094.00	11:14:00	1097.322222	Pleamar	SI	x
LE72040332015185SG100	ETM	04/07/2015	11:14:11	-862.00	11:14:10	-871.666667	Creciente	SI	x / no se recortó con las demás en zona 1 (B7-H)
LC82040332015177LGN00	OLI_TIRS	26/06/2015	11:13:50	713.00	11:13:50	698.372222	Decreciente	SI	x
LE72040332015169ASN00	ETM	18/06/2015	11:14:07	-541.00	11:14:05	-540.955556	Creciente	SI	x
LE72040332015153ASN00	ETM	02/06/2015	11:14:03	205.00	11:14:05	174.333333	Creciente	SI	x
LC82040332015145LGN00	OLI_TIRS	25/05/2015	11:13:34	55.00	11:13:35	67.938889	Decreciente	SI	x
LE72040332015137ASN00	ETM	17/05/2015	11:13:58	492.00	11:14:00	472.805556	Creciente	SI	x
LC82040332015113LGN00	OLI_TIRS	23/04/2015	11:13:51	-895.00	11:13:50	-884.100000	x	NO	no hay hora en .aq : detectado en las gráficas de marea
LE72040332015089ASN00	ETM	30/03/2015	11:13:34	559.00	11:13:35	620.800000	Pleamar	SI	x
LC82040332015065LGN00	OLI_TIRS	06/03/2015	11:14:13	-421.00	11:14:15	-497.000000	Creciente	SI	x
LC82040332015049LGN00	OLI_TIRS	18/02/2015	11:14:19	166.00	11:14:20	68.211111	Creciente	SI	x
LE72040332015025ASN00	ETM	25/01/2015	11:13:07	-1173.00	11:13:05	-1160.722222	Decreciente	SI	x
LE72040332015009ASN00	ETM	09/01/2015	11:13:05	-1056.00	11:13:05	-1057.711111	Bajamar	SI*	Analisis evolutivo: Outlier
LC82040332015001LGN00	OLI_TIRS	01/01/2015	11:14:32	1004.00	11:14:30	941.900000	Pleamar	SI	x
LE72040332014342ASN00	ETM	08/12/2014	11:12:54	-740.00	11:12:55	-751.200000	Creciente	SI	x
LC82040332014302LGN00	OLI_TIRS	29/10/2014	11:14:40	-606.00	11:14:40	-590.211111	Decreciente	SI	x
LE72040332014230ASN00	ETM	18/08/2014	11:12:09	344.00	11:12:10	363.266667	Decreciente	SI	x
LE72040332014198ASN00	ETM	17/07/2014	11:12:02	-952.00	11:12:00	-931.866667	Decreciente	SI	x
LC82040332014190LGN00	OLI_TIRS	09/07/2014	11:14:22	1132.00	11:14:20	1143.644444	Pleamar	SI	Corregido el nivel de mar aq en gráficas de mareas
LE72040332014166ASN00	ETM	15/06/2014	11:11:55	-	-	0.000000	x	NO	no hay DIA
LE72040332014134ASN00	ETM	14/05/2014	11:11:50	240.00	11:11:50	230.833333	Creciente	SI	x
LC82040332014078LGN00	OLI_TIRS	19/03/2014	11:14:57	-948.00	11:14:55	-966.666667	Creciente	SI	x
LE72040332014070ASN00	ETM	11/03/2014	11:11:19	-	-	0.000000	x	NO	no hay HORA
LC82040332013363LGN00	OLI_TIRS	29/12/2013	11:15:56	1124.00	11:15:55	990.661111	Pleamar	SI*	Analisis evolutivo: Outlier
LE72040332013355ASN00	ETM	21/12/2013	11:10:52	-860.00	11:10:50	-930.572222	Bajamar	SI*	Analisis evolutivo: Outlier
LC82040332013331LGN00	OLI_TIRS	27/11/2013	11:16:07	577.00	11:16:05	630.333333	Decreciente	SI	x
LC82040332013315LGN00	OLI_TIRS	11/11/2013	11:16:15	544.00	11:16:15	565.900000	Decreciente	SI	x
LC82040332013283LGN00	OLI_TIRS	10/10/2013	11:16:24	-727.00	11:16:25	-719.250000	Bajamar	SI	x
LE72040332013259EDC00	ETM	16/09/2013	11:10:10	1382.00	11:10:10	1399.377778	Creciente	SI	x
LC82040332013251LGN00	OLI_TIRS	08/09/2013	11:16:32	-	-	0.000000	x	NO	no hay DIA
LE72040332013243ASN00	ETM	31/08/2013	11:09:59	887.00	11:10:00	890.077778	Pleamar	SI	x
LC82040332013235LGN00	OLI_TIRS	23/08/2013	11:16:33	-885.00	11:16:35	-909.001667	Creciente	SI	x
LC82040332013219LGN00	OLI_TIRS	07/08/2013	11:16:31	-	-	0.000000	x	NO	no hay HORA

LE72040332013211EDC00	ETM	30/07/2013	11:09:46	243.00	11:09:45	241.961111	Decreciente	SI		x
LC82040332013203LGN00	OLI_TIRS	22/07/2013	11:16:28	524.00	11:16:30	513.305556	Creciente	SI		x
LC82040332013187LGN00	OLI_TIRS	06/07/2013	11:16:30	688.00	11:16:30	700.183333	Creciente	SI		x
LE72040332013179EDC00	ETM	28/06/2013	11:10:04	-890.00	11:10:05	-871.066667	x	NO	no hay hora en .aq : detectado en las gráficas de marea	
LC82040332013171LGN00	OLI_TIRS	20/06/2013	11:16:26	-		0.000000	x	NO	no hay DIA	
LE72040332013163EDC00	ETM	12/06/2013	11:10:11	-809.00	11:10:10	-804.755556	Creciente	SI		x
LE72040332013131ASN00	ETM	11/05/2013	11:10:23	-		0.000000	x	NO	no hay DIA	
LE72040332013115ASN00	ETM	25/04/2013	11:10:25	-		0.000000	x	NO	no hay MES	
LC82040332013107LGN01	OLI_TIRS	17/04/2013	11:16:19	-		0.000000	x	NO	no hay MES	
LE72040332013003ASN00	ETM	03/01/2013	11:10:41	-865.00	11:10:40	-835.844444	Decreciente	SI		x
LE72040332012337ASN00	ETM	02/12/2012	11:10:29	-901.00	11:10:30	-909.577778	Creciente	SI		x
LE72040332012289EDC00	ETM	15/10/2012	11:10:15	479.00	11:10:15	406.600000	Creciente	SI		x
LE72040332012257ASN00	ETM	13/09/2012	11:09:56	1054.00	11:09:55	1032.833333	Creciente	SI		x
LE72040332012081ASN00	ETM	21/03/2012	11:08:38	209.00	11:08:40	160.555556	Creciente	SI		x
LE72040332012065EDC00	ETM	05/03/2012	11:08:37	660.00	11:08:35	670.288889	Creciente	SI		x
LE72040332011302ASN00	ETM	29/10/2011	11:07:52	-1073.00	11:05:50	-1056.933333	Creciente	SI		x
LTS2040332011294MPS02	TM	21/10/2011	11:02:29	754.00	11:02:30	735.277778	Decreciente	SI		x
LE72040332011286ASN00	ETM	13/10/2011	11:07:45	-272.00	11:07:45	-262.333333	Creciente	SI		x
LTS2040332011278MPS00	TM	05/10/2011	11:02:36	606.00	11:02:35	649.200000	Decreciente	SI	falla el análisis espacial em banda 4 en el primer CLIP	
LTS2040332011262MPS00	TM	19/09/2011	11:02:57	-398.00	11:02:55	-374.066667	Decreciente	SI		x
LE72040332011222EDC00	ETM	10/08/2011	11:07:55	1047.00	11:07:55	1061.955556	Creciente	SI		x
LE72040332011206EDC00	ETM	25/07/2011	11:08:00	651.00	11:08:00	663.570474	Decreciente	SI		x
LTS2040332011166MPS00	TM	15/06/2011	11:03:50	-		0.000000	x	NO	no hay MES	
LTS2040332011134MPS00	TM	14/05/2011	11:04:05	-		0.000000	x	NO	no hay MES	
LE72040332011078EDC00	ETM	19/03/2011	11:08:04	96.00	11:08:05	42.711111	Creciente	SI		x
LE72040332010299ASN00	ETM	26/10/2010	11:07:00	-829.00	11:07:00	-821.183333	Creciente	SI		x
LTS2040332010211MPS00	TM	30/07/2010	11:04:56	-804.00	11:04:55	-803.850000	Creciente	SI		x
LE72040332010187EDC03	ETM	06/07/2010	11:06:43	599.00	11:06:45	607.611111	Decreciente	SI		x
LTS2040332010179MPS00	TM	28/06/2010	11:05:05	-569.00	11:05:05	-561.755556	Creciente	SI		x
LE72040332010139EDC00	ETM	19/05/2010	11:06:37	-672.00	11:06:35	-661.088889	Decreciente	SI		x
LE72040332010123ASN00	ETM	03/05/2010	11:06:41	-673.00	11:06:40	-684.422222	Bajamar	SI		x
LTS2040332010115MPS00	TM	25/04/2010	11:05:21	1148.00	11:05:20	1131.400000	Creciente	SI		x
LE72040332010027ASN00	ETM	27/01/2010	11:06:12	939.00	11:06:10	930.200000	Creciente	SI		x
LE72040332009360ASN00	ETM	26/12/2009	11:05:42	833.00	11:05:40	837.683333	Decreciente	SI*	Analisis evolutivo: Outlier	
LE72040332009328ASN00	ETM	24/11/2009	11:05:14	3.00	11:05:15	-27.766667	Decreciente	SI		x
LTS2040332009288MPS00	TM	15/10/2009	11:04:37	1363.00	11:04:35	1378.866667	Creciente	SI		x
LE72040332009264ASN00	ETM	21/09/2009	11:04:39	-1045.00	11:04:40	-1059.266667	Creciente	SI		x
LE72040332009248EDC00	ETM	05/09/2009	11:04:41	-234.00	11:04:40	-262.622222	Creciente	SI		x
LTS2040332009192MPS00	TM	11/07/2009	11:03:17	-877.00	11:03:15	-863.888889	Creciente	SI		x
LE72040332009072EDC00	ETM	13/03/2009	11:04:39	-1102.00	11:04:33	-1100.833333	Creciente	SI		x / solo *.aq
LE72040332009056ASN00	ETM	25/02/2009	11:04:31	-441.00	11:04:33	-441.500000	Creciente	SI		x / solo *.aq
LE72040332009008ASN00	ETM	08/01/2009	11:04:10	3036.00	11:02:00	3037.083333	Creciente	SI	x / solo *.aq / no se recortó con las demás en zona 1 (B5-H)	
LE72040332008278EDC00	ETM	04/10/2008	11:03:13	1322.00	11:02:00	1322.405556	Creciente	SI		x / solo *.aq
LE72040332008182EDC00	ETM	30/06/2008	11:04:05	-		0.000000	x	NO	no hay HORA (mezcladas)	
LE72040332008038EDC00	ETM	07/02/2008	11:04:49	1569.00	11:02:00	1598.105556	Creciente	SI		x / solo *.aq
LE72040332008022EDC00	ETM	22/01/2008	11:04:51	1751.00	11:02:00	1779.500000	Creciente	SI		x / solo *.aq
LE72040332007307ASN00	ETM	03/11/2007	11:04:31	2899.00	11:02:00	2899.000000	Decreciente	SI		x / solo *.aq

ANEXO 2: PROCESO DE OBTENCIÓN DE ORTOFOTOGRAFÍAS

Las órdenes de GDAL utilizadas para la obtención de una ortofotografía se explican en este anexo a continuación.



1. Peticiones al servidor:

La orden para realizar las peticiones fue la denominada “**gdal_translate**” y en la figura de abajo se puede apreciar su sinopsis.

```

gdal_translate [--help-general]
  [-ot {Byte/Int16/UInt16/UInt32/Int32/Float32/Float64/
    CInt16/CInt32/CFloat32/CFloat64}] [-strict]
  [-of format] [-b band]* [-mask band] [-expand {gray|rgb|rgba}]
  [-outszie xsize[%]|0 ysize[%]|0] [-tr xres yres]
  [-r {nearest,bilinear,cubic,cubicspline,lanczos,average,mode}]
  [-unscale] [-scale[_bn] [src_min src_max [dst_min dst_max]]]* [-exponent[_bn] exp_val]*
  [-srcwin xoff yoff xsize ysize] [-epo] [-eco]
  [-projwin ulx uly lrx lry] [-projwin_srs srs_def]
  [-a_srs srs_def] [-a_ullr ulx uly lrx lry] [-a_nodata value]
  [-gcp pixel line easting northing [elevation]]*
  [-mo "META-TAG=VALUE"]* [-q] [-sds]
  [-co "NAME=VALUE"]* [-stats] [-norat]
  [-oo NAME=VALUE]*
  src_dataset dst_dataset
  
```

Figura A2.1: Sinopsis de la orden “gdal_translate”. Fuente: http://www.gdal.org/gdal_translate.html

Tras leer la documentación de las diferentes opciones del comando, se determinó que para una petición WMS de una imagen en concreto, la sintaxis de la orden presentaría el siguiente formato:

gdal_translate *-projwin ulx uly lrx lry* *-outszie xsize ysize* **WMS_service.xml** **output_image.tif**

Se puede apreciar:

- El **nombre de la orden** (en azul).
- La opción de ‘-projwin’ que define la **extensión** en coordenadas cartesianas (X,Y) o geodésicas (Latitud, Longitud).
- La opción de ‘-outszie’ especifica el **tamaño de las imágenes** peticionadas en píxeles.
- La opción de ‘WMS_service.xml’, indica el fichero de extensión ‘.xml’ en dónde vienen indicadas las particularidades del **servicio WMS**.
- El **fichero de salida**, que se trata de la imagen pedida en cuestión.

El fichero que más complejidad presenta en esta orden es el fichero en dónde se indican las propiedades del servidor WMS (en el ejemplo anterior se denomina “WMS_service.xml”). Este fichero se codifica en lenguaje XML (eXtended Markup Language), un lenguaje organizado por etiquetas y atributos, muy usado en los entornos web y que resulta eficiente a la hora de organizar información.

Nota: Para más información acerca de este fichero se puede visitar el siguiente enlace web:
http://www.gdal.org/frmt_wms.html

En nuestro fichero XML introducimos principalmente:

- El tipo de servicio, su versión y la URL de nuestro servidor WMS.
- El sistema de referencia de petición de las imágenes y su formato de salida.
- La extensión geográfica de la zona dónde se realizan las peticiones y su resolución espacial.
- Otros atributos y parámetros específicos del servicio WMS.

```

<GDAL_WMS>
  <Service name="WMS">
    <Version>1.3.0</Version>
    <ServerUrl>http://mapas.dgterritorio.pt/wms/ortos2014-litoral?</ServerUrl>
    <CRS>EPSG:3763</CRS>
    <ImageFormat>image/jpeg</ImageFormat>
    <Layers>LoteD\42_ECW\Ortos2014-D,LoteC\42_ECW\Ortos2014-C/Layers>
    <!--<BBoxOrder>xyXY</BBoxOrder>-->
  </Service>
  <DataWindow>
    <UpperLeftX>-98413.8061810517</UpperLeftX>
    <UpperLeftY>-120698.371742667</UpperLeftY>
    <LowerRightX>-78413.8061810536</LowerRightX>
    <LowerRightY>-140698.371742663</LowerRightY>
    <SizeX>40000</SizeX>
    <SizeY>40000</SizeY>
  </DataWindow>
  <!--<BlockSizeX>500</BlockSizeX>
  <BlockSizeY>500</BlockSizeY>-->
  <Projection>EPSG:3763</Projection>
  <BandsCount>3</BandsCount>
  <ClampRequests>>true</ClampRequests>
</GDAL_WMS>

```

Figura A2.2: Fichero ‘.xml’ descriptivo para el servidor y la extensión de la petición.

En cuanto al sistema de referencia, el servidor no nos permitía escoger el sistema de referencia de nuestro trabajo, el EPSG: 32629, ya que el servicio no ofrece las imágenes en este sistema de referencia. Se optó entonces por escoger uno de los sistemas de referencia del servicio. Esto se realizó examinando las capacidades del servidor. Finalmente se escogió el sistema de referencia ETRS89/Portugal TM06 -con código EPSG: 3763- ya que era uno de los pocos sistemas en coordenadas cartesianas. Sin embargo, sería sumamente necesario que las imágenes descargadas estuvieran en el mismo sistema de referencia. Esto último lo volvimos a realizar con los comandos de GDAL, los cuales explicaremos más adelante.

Una vez testado la orden de “gdal_translate” en una zona concreta, se programó una hoja Excel con todas las peticiones y sus parámetros, para cada zona de estudio.

Por ejemplo, la zona de estudio 0, tiene una extensión exacta de 20km x 20km, por lo que se decidió realizar divisiones de esta zona en imágenes del servidor con 0,5 GSD y 200 x 200 píxeles, lo que equivaldría a dividir el ancho de la zona en un total de 20 imágenes –así como el alto-. Por lo en definitiva se tuvo que generar un fichero ‘.bat’ con 400 órdenes de petición al servidor WMS, que devolvía 400 imágenes – en nuestro caso, 400 ortofotos con la resolución buscada-.

2. Mosaico de imágenes obtenidas:

Obtenidas las imágenes, estas había que juntarlas en un solo fichero, es decir, realizar un mosaico. Para ello volvimos a usar una orden de GDAL con la siguiente sintaxis. Se puede volver a distinguir los diferentes parámetros de la orden:

```
gdal_merge.bat -of GTiff -o output_file.tif input_file1.tif input_file2.tif ...
```

El resultado fueron las ortofotos con 0,5 m/pixel y con las extensiones de las zonas de estudio.

3. Transformación al sistema de referencia del proyecto y remuestreo:

Los pasos siguientes en la ortofoto, fueron la transformación del sistema de referencia y el remuestreo de la ortofoto a un GSD de 30 m/pixel. Este último paso fue necesario, ya que el algoritmo de extracción trabaja en la georreferenciación de la línea de costa con la imagen Landsat y la ortofoto por un método de correlación cruzada, por lo que estas dos imágenes tendrían de tener la misma resolución espacial.

Estos dos procesos también se programaron en GDAL:

```
gdaldalwarp -overwrite -s_srs EPSG:3763 -t_srs EPSG:32629 -r cubic -of GTiff input_file.tif output_file.tif
```

```
gdalwarp -tr 30 30 -r cubic input_file.tif output_file.tif
```

Como puede intuirse en las órdenes, el remuestreo para ambas transformaciones se realizó por la técnica de convolución cúbica –qué es la que mejores resultados radiométricos proporciona-. Haber usado otra técnica hubiera afectado gravemente al proceso de extracción de la línea de costa.

ANEXO 3: FUNCIONES ESPECÍFICAS DEL ANÁLISIS ESPACIAL

A continuación, se especifican los procesos de las funciones específicas para la fase de análisis espacial.

Función: 'DateFields' (DF)

Esta función tiene como objetivo crear y calcular tres campos nuevos para la línea de costa, los cuales se corresponden respectivamente con el día, el mes y el año.

Los campos se calculan a partir de un campo que alberga la fecha de la línea de costa en formato: 'dd/mm/yyyy'.



Figura A3.1: Programa 'DF' sobre Model Builder.

Función 'StaticalBuffer' (SB):

Esta función calcula la distancia del área de influencia (desde la línea de referencia) con la cual se recortan los puntos de la línea de costa para que esta quede depurada de posibles puntos anómalos.

Para entender mejor el funcionamiento de esta función la vamos a dividir en diferentes pasos en su esquema de Model Builder:

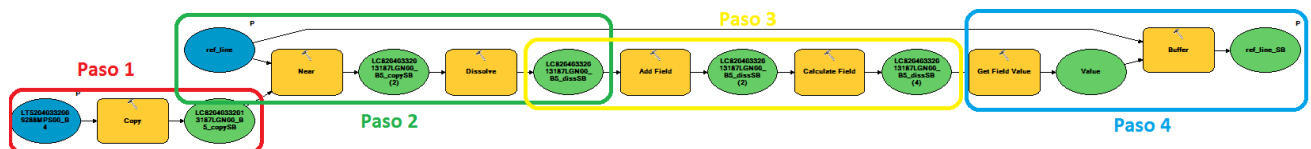


Figura A3.2: Esquema general de 'SB' sobre Model Builder.

- En el **paso 1**, la línea de costa de primera aproximación (ver modelo general) general se copia en un FD temporal para realizar el análisis
- En el **paso 2**, se ejecuta la función 'Near' entre la línea de costa y la línea de referencia. Las distancias mínimas obtenidas se disuelven en un único atributo y se calcula su media y desviación típica.
- En el **paso 3**, se asume que las distancias entre la línea de costa y la línea de referencia siguen una distribución normal –los valores próximos a la media son frecuentes y reflejan datos fiables y los valores dispersos de la media se consideran puntos anómalos-. Entonces, en la capa de un solo atributo calculada en el paso anterior, se crean un campo nuevo denominado 'dist_buff' y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$dist_{buff} = \mu D + 2 \cdot \sigma D;$$

Dónde, 'μD' y 'σD' son la media y la desviación típica de las distancias mínimas entre los puntos de la línea de costa y la línea de referencia que se calcularon al ejecutar el geoprocreso de disolución en el paso 2.

Lo que viene a decir la anterior fórmula es que para una variable unidimensional, como es la distancia, la distancia de 'buffer' calculada asegura que el 97% de los puntos originales de la línea de costa se encontrarán sobre esa área de influencia.

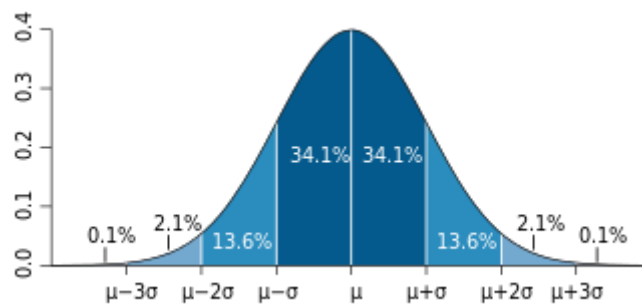


Figura A3.3: Función de distribución normal con el porcentaje de área encerrada según los valores que la definen (media y desviación típica). Fuente: Internet.

- En el **paso 4**, finalmente se calcula el área de influencia con la distancia obtenida. Como el 'buffer se calcula sobre la línea de referencia, y esta se ha de encontrar tierra a dentro, al buffer se le han de fijar el parámetro que permite definir el buffer hacia uno de los lados topológicos de la línea y no dejarlo por defecto ya que de lo contrario el buffer se definirá hacia ambos lados de la línea de referencia.

Función 'R2txt':

Esta función resultó bastante simple de programar ya que solo se aplica un único geoprocenso sobre las líneas resultado que ha generado la función general de análisis espacial. Este único geoprocenso se denomina 'Export Feature Attribute to ASCII' y lo que realiza es la exportación de la tabla de atributos -dónde se encuentran todos los campos calculados- de cada línea de costa a formato genérico ASCII y genera tantos ficheros '.txt' como líneas de costa haya en el FD.

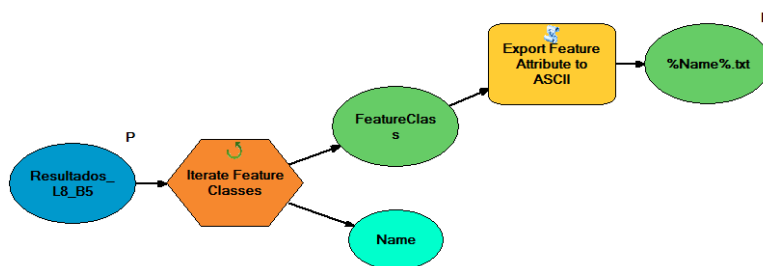


Figura A3.4: Esquema de 'R2txt' sobre Model Builder.

Como se aprecia en la anterior figura, los "inputs" de la función son el FD de salida de resultados y la ruta de salida para los archivos '.txt'.

ANEXO 4: FUNCIONES ESPECÍFICAS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

A continuación, se detallan los procesos de las funciones específicas para la fase de análisis estadístico junto sus cabeceras de código.

Función 'graph_evo.m':

Esta función, tiene como objetivo realizar todas las operaciones de los pasos 2 y 3 del código general (ver apartado 5.1.2: Proceso General).

La función tiene como entrada una hipermatriz 3D dónde el eje X se corresponden con los sectores de la línea de referencia, el eje Y con los atributos (fecha, distancia media, variabilidad espacial, etc) y el eje Z con las diferentes líneas de costa. También se especifican como datos de entrada una ruta informática específica donde guardar los resultados generados y una cadena de texto para adjuntar a los títulos de los gráficos.

Como salidas, la función devuelve varios ficheros de texto:

- Fichero '.res' que contiene las pendientes y la norma de los residuos del ajuste lineal ponderado de cada sector.
- Ficheros '.dat' que son en total 4, 'all_dat' que contiene todas las fechas y distancias medias obtenidas, 'in_dat' que son las fechas y distancias medias que quedan dentro del procesado después de ejecutar la umbralización, 'out_dat' los "outliers" obtenidos por la umbralización y 'anual_dat' que son las medias anuales ponderadas y sin ponderar de las distancias medias.
- Ficheros de gráficas en formato '.fig' (gráfica de MatLab®) y '.png' (formato imagen). Las gráficas que se generan son dos: la primera con las medias anuales ponderadas y sin ponderar dónde el eje X representan los años de observación y el eje Y las distancias medidas y calculadas sobre la línea de referencia, y la segunda los ejes se representan de igual manera pero esta vez se representan todas las fechas con su variabilidad espacial y los ajustes lineales realizados con sus residuos y sus ecuaciones ajustadas.

La función utiliza las funciones 'clr_dat.m', 'awm.m' y 'lf4ey.m'.

```
%  
%  
%-----  
%  
% Función: graph_evo.m  
% Versión: 1.4  
% Objeto: Obtiene los datos de las gráficas de tendencia evolutiva:  
%         DATE(DD,MM,YYYY) ,MEAN_DIST y NEAR_STD.  
% Entrada: - Hipermatriz 3D de la compilación de datos: FID x Fields x Escena.  
%           - Ruta para guardar los datos y sus gráficas.  
%           - Etiqueta de LANDSAT y banda tratadas (título del gráfico).  
% Salidas: - Matriz con la tendencia evolutiva (pendiente de la recta) y  
%           - residuo cuadrático para ajustes sin ponderación y con ponderación.  
%           - Gráficas y datos tabulados que se almacenan en la ruta  
%             especificada.  
%  
%  
% Ejemplo: [res] = graph_evo(data, route, 'LB');  
%  
% Autor: Pablo Pinto Santos  
%  
%-----  
%  
%  
%
```

Función 'clr_dat.m':

Esta función realiza la umbralización a los datos recopilados de la hipermatriz por cada sector. La umbralización se realiza por el campo de distancia media. Simplemente a la función se le indica un límite superior y otro inferior de corte y la matriz de datos dónde se desea realizar la umbralización. La función devuelve dos matrices de datos, una dónde se encuentran las filas de las matrices que han cumplido que sus distancias medias están entre los valores de corte y otra matriz cuyas filas han superado por encima o por debajo sus valores de corte. Si la función no detecta "outliers" entonces la segunda matriz se compone de 99 filas cuyos valores son ceros.

```

%%
%
%-----
% Function: clr_dat.m
% Versión: 1.0
% Purpose: Makes a slicing in an input numeric array [m x 3]. The slicing
%          is made on the second field.
% Input:  - Data organised by 3 columns: {X, Y, STD}.
%          - Upper slicing limit (upl) & Lower slicing limit (lwl).
% Output: - Numeric array [m x 3] with the rows that are between the slicing
%          values.
%          - Numeric array [m x 3] with the rows that are above or below the
%          slicing values.
%
% Example: [ in, out ] = clr_dat( dat, upl, lwl );
%
% Author: Pablo Pinto Santos
%
%-----
%%

```

Función 'awm.m':

Esta función es la responsable de realizar las medias anuales. Se calculan dos tipos de medias, una ponderada dónde el peso se de cada fecha se define por la inversa de la variabilidad espacial y otra media convencional y sin ponderar. La entrada de esta función son los datos recopilados de la hipermatriz por sector (fecha, distancia media y variabilidad espacial). La salida son los años de observación y sus medias ponderadas y son ponderar respectivamente.

La función se diseñó para los años de observación de este proyecto, que abarcan desde el 2007 hasta el 2015, en total 9 años que se traducen en 9 medias anuales por sector y por banda infrarroja.

```

%%
%
%-----
% Function: awm.m
% Versión: 1.0
% Purpose: Makes the anual weighted mean for the distances to the Shoreline.
% Input:  - Data organised by 3 columns: {Time, Dist, STD}.
% Output: Numeric array [9 x 2] organised: { Year, Weigthed Mean }.
%          *Note: function only represents years from 2007 till 2015 (9 years).
%
% Example: [ anual_dat ] = awm( dat )
%
% Author: Pablo Pinto Santos
%
%-----
%%

```

