

Universitat Politècnica de València

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría



TESIS DOCTORAL

**Obtención de líneas de costa con precisión
sub-píxel a partir de imágenes Landsat
(TM, ETM+ y OLI)**

Valencia, noviembre de 2014

Autor: **Jaime Almonacid Caballer**

Directores: **Dr. Josep Eliseu Pardo Pascual**

Dr. Luis Ángel Ruiz Fernández

Diseño portada: **Lluís Carrasco Martínez**

A mis padres, mi hermana, mis tíos... y un bicho peludo.

Agradecimientos

Estos agradecimientos son distintos a otros que hasta ahora he escrito tras cada culminación académica (dos proyectos fin de carrera y un trabajo de investigación de piano con su recital) pues la realización de una tesis conlleva una transformación personal diferente, tal vez más profunda. Lo que fueron sprints, con objetivos relativamente claros y directos, se convierten aquí en una carrera de fondo. Es un trabajo de resistencia y orientación como nadar en medio del mar: cuando hundes la cabeza das brazadas intentando avanzar, de vez en cuando levantas la mirada y descubres que ni has mantenido el rumbo esperado ni sabes exactamente hacia dónde te dirigirás al hundir de nuevo la cabeza. Sin embargo, corriges el rumbo y vuelves a hundir la cabeza confiando que llegarás a algún destino. No es fácil entender ni asimilar esta dinámica pero confío que al pasar el tiempo uno pueda volver la mirada atrás y comprender el camino que recorrió. Posiblemente ser doctor sea la suma tres factores: la propia tesis doctoral, su crítica y su aceptación. Así pues: la tesis es, como documento en sí, una pequeña muestra trabajo realizado; la capacidad de criticarla es saber qué conservarías o cambiarías de ella –incluso de la forma en que afrontaste cada paso- y tener los conocimientos, no siempre escritos en la tesis, que te permiten argumentarlo; la capacidad de aceptarla es aceptar el avance realizado, independientemente del destino al que se haya llegado, y así poder cerrar un capítulo para que la nueva, y liberada, versión de uno mismo siga adelante, aportando lo que hasta el momento se pueda y sabiendo exigir que ese proyecto futuro te haga seguir creciendo.

El primer agradecimiento recae en el Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección en que me he podido desarrollar estos últimos años. De ellos he de destacar a Josep Pardo y a Luís Ángel Ruiz pues considero que no ha sido una tesis ni fácil ni cómoda de dirigir, sobretodo hacia el final. El hecho de discutir con Josep, casi acaloradamente, sobre diferentes puntos de vista ha sido parte de esa dificultad. He podido asentar opiniones, creo que argumentadas, para defender unos puntos de vista –más allá de la tesis- en las nuevas investigaciones que nacen y tiendo a mantenerme cada día más férreo en la defensa de lo que considero correcto, lo cual no deja de ser una aportación de la experiencia durante el doctorado. Sin embargo, estas pequeñas disputas, al igual que como sucede con un padre, implican haber alcanzado una meta como persona. Debo añadir a Ángel Balaguer que, aunque no consta como director, ha tenido un papel más que relevante al afianzar muchos aspectos matemáticos. A Jesús, Maru, Jorge y Alfonso, quienes fueron mis profesores y que quedan ya como hermanos mayores en quienes he encontrado una complicidad única y me han hecho sentir un igual. Por último, y con un cariño inmenso, a la gente con que he pasado tantísimas horas en el seminario de teledetección. A Elenita y Marieta, a quienes he podido dirigir los respectivos proyectos fin de carrera, con quien pude aprender la otra parte de la relación tutor-aprendiz y que me quedan como hermanas pequeñas y grandes amigas. Y, por supuesto, a Jose Luís y Txomin con quienes he vivido momentos tan buenos como duros. De Jose Luís destaca la manera más que el contenido: “sé feliz, no perfecto” diría él. Del doctor, que no ‘señor’

(cosas nuestras) Txomin, cabe guardar todo cuanto diga aunque rara vez fuera de las mejores maneras. "Y así somos los tres, oiga".

No puedo olvidar a las personas que han estado siempre. A mis queridos *espartanos* (cada uno tan distinto a los demás y, sin embargo, siempre juntos para vivir cosas que veo difícil que pudieran darse con otras personas), los amigos de Bétera (ese turbulento coro llamado *Fent Ressò*) y demás grupos que seguro dejo en el tintero. Todos ellos han tenido que tragar más ladridos que palabras en algunos momentos y por ello, más que un agradecimiento, les pido que me disculpen. Particularmente hay personas con quien he podido compartir momentos concretos difícilmente entendibles por quien no ha estado en ellos o no ha vivido su propia tesis; me refiero a mi hermana adoptiva María Cebrián (gracias por tanto tiempo, su contenido y su valor), Marga Mondoño, Amanda Sancho y Toni Ligeró. Echaré de menos a Jesús Ángel, mi padre pianístico, a quien perdimos el pasado 9 de marzo de 2014, pues tras la meta que alcancé con él, la tesis ha sido el último logro y me habría gustado hacerle partícipe.

Por último, por supuesto, la familia. A mi hermana, porque se ha convertido en otra de esas personas que ha ido comprendiendo los diferentes estados a que lleva una tesis. Casualmente la primera vez que escribo este texto, 22 de julio, ha depositado su tesis, y cuando vuelvo a revisarlo, en octubre, la ha defendido. Eso significa llevarme tres años de ventaja y me enorgullece. A vosotros, mis padres –Paqui y Jaime- y mis tíos –Mariola y Ricardo-, ¿qué decir? lo vuestro sí que ha sido resistencia, paciencia y aguante. Frente mi falta de fuerzas y ante mis continuas dudas sobre el esfuerzo realizado o el camino escogido, me habéis mantenido en pie y no se puede agradecer con palabras. De hecho no sé cómo agradecerlo. Ojala pudiera envolver todo esto en una sola e intensa vivencia y regalárosla.

Resumen

En esta tesis se presenta un método y una serie de herramientas informáticas para obtener automáticamente la posición de líneas de costa partiendo de imágenes registradas por los satélites Landsat (5, 7 y 8) con un nivel de precisión cercano a 5,5 m (EMC). Para conseguirlo se han resuelto tres cuestiones: (i) la definición de un algoritmo de extracción automática de la línea de costa a nivel sub-píxel, (ii) la georreferenciación de las sucesivas imágenes también a nivel sub-píxel y (iii) la adaptación específica a los distintos tipos de imágenes Landsat.

El método desarrollado se sustenta en el análisis de las bandas del infrarrojo próximo y medio, en las que existe una diferencia muy marcada en la respuesta radiométrica del agua y el suelo. Una umbralización inicial permite la detección de la línea de costa a nivel píxel. Alrededor de tal línea, se aplica el algoritmo propuesto para alcanzar la precisión sub-píxel. Concretamente, se ajusta una función alrededor de cada píxel de la línea aproximada y, sobre dicha función matemática, se deducen, realizando perfiles transversales, los puntos de máximo gradiente. Finalmente, el promedio de tales puntos define la posición de la línea de costa.

En primer lugar se ha evaluado el algoritmo sobre imágenes QuickBird (2,4 m de resolución espacial). En ellas se ha fotointerpretado la posición verdadera de la línea de costa para servir de referencia. Posteriormente, se han remuestreado esas mismas imágenes a tamaños de píxeles similares a los de las imágenes Landsat, se ha aplicado al algoritmo propuesto y evaluado frente a la línea de referencia.

En segundo lugar, se ha propuesto y evaluado un método de georreferenciación basado en la correlación cruzada. Para realizar una evaluación independiente de las líneas de costa, se ha generado un conjunto de imágenes de traslación conocida. Al aplicar el método propuesto y comparar sus resultados con la traslación conocida se ha podido describir el comportamiento de los errores. Los errores observados se acercan a los 0,1 píxeles. Esto implica, al aplicarse sobre imágenes con una resolución igual a la de Landsat TM/ETM+/OLI (30m/píxel), un error esperable de 2 m.

En tercer lugar, se han unificado los procesos de obtención de la línea de costa y de georreferenciación para su aplicación sobre las bandas infrarrojas de Landsat TM/ETM+/OLI. Para la validación, se han tomado como referencia ciertas zonas de costa que no han sufrido variaciones en el tiempo de estudio. Se ha demostrado que la reflectancia de las zonas terrestres próximas a la costa afecta a la posición de la línea de costa que obtiene el algoritmo. Este comportamiento ha podido ser descrito estadísticamente. De esta manera, en función de qué sensor y banda se empleen, es posible corregir la línea de costa y llevarla a su posición definitiva. Tomando el total de líneas de costa analizadas se obtiene un error medio cuadrático de 5,5 m.

Una vez establecido el nivel de precisión que se consigue con la metodología propuesta en la tesis se abordan dos aplicaciones específicas: (i) un estudio sobre el impacto de

una serie de temporales costeros sobre un amplio segmento de playas arenosas (100 km) y los procesos de recuperación de esas playas y (ii) un estudio de la tendencia a medio plazo (casi treinta años) de un segmento costero (14 km). Estos dos estudios han permitido mostrar la utilidad de las líneas de costa así obtenidas, evidenciando que aportan una nueva fuente de información para los estudios de la dinámica de las playas. Si bien la metodología presenta algunas limitaciones, resulta claro que también resuelve otras que son propias del resto de fuentes de datos disponibles para los estudios de la dinámica costera.

Resum

En aquesta tesi es presenta un mètode i una sèrie d'eines informàtiques per a obtenir automàticament la posició de línies de costa a partir de imatges registrades pels satèl·lits Landsat (5,7 i 8) amb un nivell de precisió proper als 5,5 m (EMC). Per aconseguir-ho s'han resolt tres qüestions: (i) la definició d'un algorisme d'extracció automàtica de la línia de costa a nivell sub-píxel, (ii) la georeferenciació de les successives imatges també a nivell sub-píxel i (iii) l'adaptació específica als diferents tipus d'imatges Landsat.

El mètode desenvolupat es basa en l'anàlisi de les bandes del infraroig proper i mitjà en què hi ha una diferència molt marcada en la resposta radiomètrica de l'aigua i el sòl. Una umbralització inicial permet la detecció de la línia de costa a nivell píxel. Al voltant d'aquesta línia s'aplica l'algorisme proposat per assolir la precisió sub-píxel. Concretament, s'ajusta una funció al voltant de cada píxel de la línia aproximada i, sobre aquesta funció matemàtica, es dedueixen, realitzant perfils transversals, els punts de màxim gradient. Finalment, la mitjana d'aquests punts defineix la posició de la línia de costa.

En primer lloc s'ha avaluat l'algorisme sobre imatges Quickbird (2,4 m de resolució espacial) sobre les quals s'ha fotointerpretat la posició real de la costa per servir com a referència. Posteriorment s'ha degradat aquestes mateixes imatges a dimensions de píxels semblants als de les imatges Landsat, s'ha aplicat l'algorisme proposat i ha pogut ser avaluat enfrontant el resultat obtès amb la línia de referència fotointerpretada.

En segon lloc, s'ha proposat i avaluat un mètode de georeferenciació basat en la correlació creuada. Per realitzar una avaluació independent de les línies de costa, s'ha generat un conjunt d'imatges de translació coneguda. En aplicar el mètode proposat i comparar els seus resultats amb la translació coneguda s'ha pogut descriure el comportament dels errors. Els errors observats s'acosten als 0,1 píxels. Això implica, sobre imatges amb una resolució igual a la de Landsat TM/ETM+/OLI (30m/píxel), un error esperable de 2 m.

En tercer lloc, s'han unificat els processos d'obtenció de la línia de costa i la georeferenciació per a la seua aplicació sobre les bandes infraroges de Landsat TM/ETM+/OLI. Per a la validació, s'ha pres com a referència certes zones de costa que no han patit variacions en el temps d'estudi. S'ha demostrat que la reflectància de les zones de terra que envolten la costa afecta la posició de la línia de costa que obté l'algorisme. Aquest comportament ha pogut ser descrit estadísticament. D'aquesta manera, en funció de quin sensor i banda s'utilitze, és possible corregir la línia de costa i portar-la a la seua posició definitiva. Prenent el total de línies de costa analitzades es té un error mitjà quadràtic de 5,5 m.

Una vegada establert el nivell de precisió que s'aconsegueix amb la metodologia proposada en la tesi s'aborden dues aplicacions específiques: (i) un estudi sobre l'impacte d'una sèrie de temporals costers sobre un ampli segment de platges arenoses

(100 km) i els processos de recuperació d'aquestes platges i (ii) un estudi de la tendència a mig termini (gairebé trenta anys) d'un segment coster concret (14 km). Aquests dos estudis han permès mostrar la utilitat de les línies de costa obtingudes, evidenciant que aporten una nova font d'informació per als estudis de la dinàmica de les platges. Potser presenta algunes limitacions però també resol altres limitacions pròpies de la resta de les fonts de dades disponibles per als estudis de dinàmica costanera.

Abstract

This thesis presents a method and a set of tools to automatically obtain shorelines from Landsat imagery (5, 7 and 8) with an accuracy close to 5.5 m (RMSE). Three principal questions have been faced: (i) the definition of an algorithm for the automatic extraction of sub-pixel shorelines, (ii) the georeferencing of the successive images with sub-pixel accuracy, and (iii) its adaptation and application to different types of Landsat images.

The developed method is based on the analysis of the Near and Middle Infrared bands, where there are noticeable differences in terms of spectral response between water and soil. The definition of an initial threshold allows to obtain the coastline at pixel level. Around this line, the sub-pixel accuracy algorithm is applied. A function is adjusted by least squares method around each pixel on the preliminary line and the positions of maximum gradient are deduced from this mathematical function. The obtained points are preserved to finally obtain the average position and define the position of the coastline.

First, we evaluated the algorithm on QuickBird images (2.4 m/pixel) where the true position of the coastline has been drawn manually to serve as a reference. Subsequently, each image was resampled to pixel sizes similar to the Landsat images. We applied the proposed algorithm and evaluated it with respect to each reference coastline.

Secondly, we propose and evaluate a method based on cross-correlation to geometrically register images. In order to evaluate this method without the influence of the coastline detection method, a set of images of known translation was generated. By applying the proposed method and comparing the results with the known translation the errors were analyzed. The observed errors are close to 0.1 pixels. This means an expected error of 2 m when applied to images with resolution similar to Landsat TM/ETM+/OLI (30m/pixel).

Third, the shoreline extraction and the georeferencing processes were merged for the application on the infrared bands of Landsat TM/ETM+/OLI. For the validation, certain coastal areas that have remained unchanged along the time were taken as reference. It has been shown that the reflectance of the land areas surrounding the coast affects the position of the obtained coastlines. This behaviour has been described statistically. Thus, depending on the sensor and band used, the shoreline can be corrected to its definite position. Taking the whole set of analyzed coastlines a mean square error of 5.5 m is obtained.

Once the accuracy level is described we present two specific applications: (i) a study on the impact of a series of coastal storms on a large segment of sandy beaches (100 km) and the recovery process of those beaches, and (ii), a study of the medium-term trend (almost thirty years) of a coastal segment of about 14 km length. These two studies allowed us to show the usefulness of the coast lines obtained by the proposed method. The obtained coastlines provide a new source of information for studies of the dynamics of the beaches. Even with some limitations, the method faces and solves some others that are characteristic of standard data available for coastal dynamics studies.

Índice

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
1.1. Introducción.....	3
1.2. Objetivos	6
1.3. Estructura de la tesis y planteamiento inicial	7
2. ALGORITMO DE EXTRACCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA CON PRECISIÓN SUB- PÍXEL.....	11
2.1. Introducción y objetivo	11
2.2 Metodología	12
2.2.1 Descripción del algoritmo	12
2.2.2. Procedimiento de evaluación	21
2.2.3. Aplicación de la metodología	23
2.3. Escenas analizadas y fotointerpretación de las líneas de referencia	24
2.4. Aplicación y análisis de resultados.....	30
2.4.1. Análisis de variables contextuales	31
2.4.1.1. Comportamiento medio por resolución y fecha.....	32
2.4.1.2. Comportamiento diferenciado por segmento de estudio	38
2.4.2. Evaluación de los parámetros de cálculo	48
2.5. Conclusiones	53
3. DESCRIPCIÓN Y EVALUACIÓN DEL MÉTODO LUFT PARA LA GEORREFERENCIACIÓN AUTOMÁTICA Y DE PRECISIÓN SUB-PÍXEL DE IMÁGENES LANDSAT.....	57
3.1. Introducción y objetivo	57
3.1.1. El método de correlación cruzada a nivel sub-píxel.....	61

3.2. Metodología	66
3.2.1. Generación de imágenes para la evaluación	66
3.2.2. Descripción de los experimentos	67
3.2.2.1. Experimento 1: Efecto del factor de 'upsampling' f	68
3.2.2.2. Experimento 2: Efecto del tamaño de píxel y características internas de las imágenes cruzadas	68
3.3. Análisis de resultados	71
3.3.1. Experimento 1: Efecto del factor de ampliación f.....	71
3.3.1.1. Comportamiento de la precisión	72
3.3.1.2. Comportamiento de la exactitud.....	73
3.3.1.3. Comportamiento diferencial entre precisión y exactitud.....	74
3.3.2. Experimento 2: Efecto del tamaño de píxel y características internas de las imágenes cruzadas.....	75
3.3.2.1. Comportamiento de la precisión	77
3.3.2.2. Comportamiento de la exactitud.....	78
3.3.3. Comportamiento global de la exactitud	79
3.4. Conclusiones	81
4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DE LÍNEAS DE COSTA A IMÁGENES PROCEDENTES DE LANDSAT TM, ETM+ Y OLI.....	83
4.1. Introducción.....	83
4.2. Las imágenes Landsat	86
4.2.1. La misión Landsat.....	86
4.2.2. Características generales de los sensores TM, ETM+, OLI y TIRS	89
4.2.3. Niveles de procesado de las imágenes Landsat por parte del USGS	92
4.3. Metodología de procesado y evaluación	95
4.3.1. Flujo de trabajo propuesto para la extracción de líneas de costa en imágenes Landsat.....	95
4.3.2. Procedimiento particular de evaluación	97
4.3.3. Factores potenciales de error y estadísticos para su cuantificación.	100
4.3.3.1. Análisis global de histogramas	102
4.3.3.2. Análisis de medias por fecha.....	104
4.3.3.3. Análisis de dispersiones por línea	104
4.4. Importancia de la georreferenciación sobre la exactitud de las líneas de costa .	105
4.5. Aplicación inicial de la metodología de extracción de la línea de costa sobre una serie de imágenes Landsat	108
4.5.1. Evaluación de errores por geometría	108
4.5.2. Análisis global de histogramas de distancias.....	110
4.5.2.1. Comportamiento global.....	118
4.5.2.2. Comportamiento en cada escollera	118
4.5.3. Análisis de medias por fecha.	119
4.5.4. Análisis de dispersiones por línea.....	121

4.5.5. Interpretación de resultados.....	125
4.6. Modelización radiométrica	131
4.7. Aplicación y evaluación de la metodología definitiva	140
4.7.1. Análisis global de histogramas de distancias.....	142
4.7.1.1. Comportamiento global.....	148
4.7.1.2. Comportamiento en cada escollera	150
4.7.2. Análisis de medias por fecha	155
4.7.3. Análisis de dispersiones por línea.....	157
4.8. Conclusiones	164
5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA AL ANÁLISIS DE LA	
DINÁMICA COSTERA.....	167
5.1. Introducción.....	167
5.2. Las playas arenosas y su estudio	169
5.3 Planteamiento del capítulo	171
5.4. Evaluación del impacto de una serie de temporales costeros sobre playas	
arenosas en el golfo de Valencia.....	173
5.4.1. Área de estudio y datos	176
5.4.2. Imágenes analizadas.....	178
5.4.3. Características de los temporales.....	180
5.4.4. Metodología	181
5.4.5. Resultados	183
5.4.6. Discusión	186
5.4.6.1. Principales factores que intervienen en los cambios morfológicos	186
5.4.6.2. Potencial y limitaciones.....	193
5.4.7. Conclusiones sobre impacto de temporales	195
5.5. Caracterización de la evolución reciente de las playas de Sagunt y Canet d'En	
Berenguer a partir de imágenes Landsat TM	197
5.5.1. Zona de estudio.....	197
5.5.2. Metodología	199
5.5.3. Resultados	206
5.5.3.1. Tendencia evolutiva para todo el periodo analizado	206
5.5.3.2. Variaciones de la tendencia en los cambios durante los periodos	
analizados: 1984-2000 y 1999-2009	210
5.5.3.3. Variabilidad en los cambios a corto plazo	212
5.5.4. Conclusiones sobre la evolución de la costa de Sagunt.....	215
5.6. Conclusiones	219
6. CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS	223
6.1 Conclusiones	223
6.2 Investigaciones futuras.....	227
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	231

ANEJOS.....	245
AI. UMBRALIZACIÓN DE LA IMAGEN.....	247
AI.1. Introducción	247
AI.2. Parametrización del histograma y del umbral	249
AI.2.1. Modelo bi-gaussiano	250
AI.2.2. Modelo bi-normal y su ponderación.....	250
AI.2.3 Obtención de los parámetros.....	253
AI.2.3.1. Obtención de parámetros por regiones de interés	254
AI.2.3.1. Ajuste iterativo de los parámetros.....	255
AI.3. Metodología	257
AI.4. Datos y zona de estudio	258
AI.5. Análisis y resultados	259
AI.5.1. Imágenes no adecuadas para el estudio	259
AI.5.2. Comparación de los métodos iterativos.....	260
AI.5.3. Comparación de los modelos bi-normal y bi-gaussiano	262
AI.5.4. Validez de los modelos bivariados para la obtención automática de umbrales.....	264
AI.6. Conclusiones y futuras investigaciones.....	264
AII. REVISIÓN MÍNIMOS CUADRADOS NO LINEALES	267
AII.1. Introducción	267
AII.2. Gauss-Newton y Newton-Raphson	269
AII.3. Levenberg-Marquardt.....	274
AII.4. Desarrollos	276
AII.4.1. Desarrollo 1: derivada del cuadrado del residuo	276
AII.4.2. Desarrollo 2: Expresión de la Jacobiana de χ^2 a partir de la función modelo f	276
AII.4.3. Desarrollo 3. Expresión de la hessiana de χ^2 a partir de la función modelo	278
AIII. RELACIÓN DEL ÍNDICE DE CORRELACIÓN DE PEARSON Y SU CÁLCULO MEDIANTE TRANSFORMADAS DE FOURIER.....	285
AIII.1. Índice de correlación de Pearson	285
AIII.2. Correlación Cruzada	288
AIII.3. Relación con la transformada de Fourier.....	292
AIV. TABLAS COMPLEMENTARIAS CAPÍTULO DE EXTRACCIÓN DE LÍNEA DE COSTA	297
AIV.1. Descripción	297
AIV.2. Error medio por degradación, fecha y zona de evaluación	297
AV. TABLAS COMPLEMENTARIAS CAPÍTULO IV.....	301

AV.1. Descripción	301
AV.2. Estadísticas líneas georreferenciadas sin corrección radiométrica	302
AV.2.1. Landsat 5	302
AV.2.2. Landsat 7	314
AV.2.3. Landsat 8	326
AV.3. Estadísticas líneas georreferenciadas y con corrección radiométrica.....	329
AV.3.1. Landsat 5	329
AV.3.2. Landsat 7	341
AV.3.3. Landsat 8	353
AVI. DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE LA LÍNEA DE COSTA CON PRECISIÓN SUB- PÍXEL EN IMÁGENES LANDSAT 7 CON ERROR SLC-OFF.....	357
AVI.1. Introducción.....	357
AVI.2. Zona de evaluación y datos.....	iError! Marcador no definido.
AVI.2. Zona de evaluación y datos.....	358
AVI.3. Metodología	358
AVI.3.1. Extracción de la línea de costa.....	359
AVI.3.2. Georreferenciación sub-píxel	362
AVI.3.3. Corrección de la línea por radiometría	363
AVI.3.4. evaluación	363
AVI.4. Resultados.....	363
AVI.5. Conclusiones.....	365

Índice de figuras

Figura 1. Imagen de la banda 5 de Landsat TM (a). En su histograma (b) se observa el comportamiento diferenciado de las zonas de agua y tierra.	13
Figura 2. a) Imagen infrarroja (banda 4 de QB) . b) Imagen umbralizada distinguiendo tierra y mar. c) La línea del borde será considerada la línea de costa de partida.	14
Figura 3. Perfil de píxeles de transición de tierra a mar (línea discontinua) y función ajustada (línea continua).	15
Figura 4. (a) Vecindario de 7x7 píxeles alrededor de 1 píxel de la línea de costa aproximada. (b)Representación tridimensional de los niveles de intensidad de un vecindario normalizados entre 0 y 1. (c) Superficie ajustada (superficie matemática) del vecindario y línea de máximo gradiente.....	16
Figura 5. Líneas de inflexión (líneas rojas continuas) sobre (a) función laplaciano y sobre (b) la función ajustada de un vecindario concreto de 7x7 píxeles.	18
Figura 6. Líneas de inflexión (líneas rojas continuas) y además de máximo gradiente sobre (a) función laplaciano y sobre (b) la función ajustada de un vecindario concreto de 7x7 píxeles.	19
Figura 7. El recuadro en rojo discontinuo abarca 9x9 píxeles. Al analizar cada vecindario 9x9 se obtiene una línea de costa parcial (puntos verdes). La cruz roja indica el mismo píxel en todas las imágenes. Se observa que conforme se desplaza el vecindario 9x9, las líneas de costa se superponen. Ello implicará obtener posteriormente un promedio de tales líneas.	20
Figura 8. En azul discontinuo, línea uniendo el centro de los píxeles de línea aproximada. En verde, puntos de las líneas de cada vecindario analizado. En rosa, línea promedio, línea de costa sub-píxel definitiva.	21

Figura 9. Superficie matemática de los niveles de intensidad de un vecindario analizado. En rosa líneas paralelas al eje de abscisas (x) y en verde, líneas paralelas al eje de ordenadas (y). El gradiente es la derivada direccional de la superficie por lo que tiene dos componentes. Estas dos componentes del gradiente sirven para indicar vectorialmente (flecha roja asociada a un punto de la línea de inflexión) la dirección en que se encuentra la zona oscura e, interpretando su significado, la dirección que toma la línea de costa en ese punto.	22
Figura 10. Línea de referencia en la zona de análisis, desde el puerto de Valencia al norte al término de Cullera al sur. La numeración indica las diferentes zonas de análisis; en 0 se indican segmentos concretos excluidos por tratarse de espacios que no son playas sino estructuras artificiales.	26
Figura 11. Detalle de la zona 3, correspondiente a Cullera. Zona acantilada y con inflexiones en el trazado de la línea de costa.....	27
Figura 12. En rojo continuo, línea de agua/arena, margen de error en casos ideales ± 1 píxel. En naranja discontinuo, la separación de arena mojada/seca.....	28
Figura 13. Doble origen de sombras observado en las imágenes. En la Figura 11 aparece un caso ideal de esta misma zona sin efecto de sombras u olas.....	29
Figura 14. Norte de la zona 3 de estudio en fechas de 9 de abril (a) y 4 de enero de 2006 (b). El relieve produce sombras que afectan tanto a la fotointperpretación como al algoritmo que tomará estas imágenes como datos de entrada.....	29
Figura 15. Distancias medias a las líneas de referencia de cada línea de costa y sus respectivos parámetros de cálculo.	34
Figura 16. Errores medios cuadráticos obtenidos (EMCs) de cada línea de costa y sus respectivos parámetros de cálculo.	36
Figura 17. La espuma en la zona de ruptura de olas, pese a ser agua, presenta fuerte reflectividad en la frecuencia del infrarrojo y genera falsas líneas de costa.....	37
Figura 18. Errores medios cometidos en cada segmento de análisis en cada imagen analizada en sus diferentes resoluciones espaciales. El efecto de diferentes vecindarios y factores de densificación ha sido promediado. Obsérvese que el eje Y varía según la fecha dadas las elevadas diferencias.	39
Figura 19. La zona 1 para 27 de noviembre de 2007 es inviable por la existencia de nubes, especialmente en las resoluciones más bajas.....	40
Figura 20. Detalle de errores medios del segmento de costa 3 (Cabo de Cullera) para las diferentes fechas y resoluciones.	41
Figura 21. Segmento 3 de análisis para las imágenes con oleaje con espuma. La espuma de 4 de enero de 2006 no genera anomalías, en 27 de noviembre de 2007 la mayor extensión de la espuma es detectada como línea de costa generando su posición errónea. En la imagen de 2006 se observa un caso concreto de error: se detecta una serie de	

puntos correctos de línea de costa y otra costa falsa, tierra adentro por efecto de las sombras, ambas señaladas por las flechas verdes.....	42
Figura 22. Líneas obtenidas para resoluciones 9,6 y 14,4 m/píxel. Visualización sobre la imágenes QuickBird original (2,4 m/píxel) y las propias resoluciones y sobre las imágenes procesadas. Fecha: 26 de octubre de 2004.	43
Figura 23. Imagen Líneas obtenidas para resoluciones 19,6 y 24 m/píxel. Visualización sobre la imagen QuickBird original (2,4 m/píxel) y las propias resoluciones y sobre las imágenes procesadas. Fecha: 26 de octubre de 2004.....	44
Figura 24. Líneas obtenidas para resoluciones 28,8 y 33,6 m/píxel. Visualización sobre la imagen QuickBird original (2,4 m/píxel) y las propias resoluciones y sobre las imágenes procesadas. Fecha: 26 de octubre de 2004.	45
Figura 25. Comportamiento diferenciado del zona 5 (Mareny de Barraquetes) en 26 de octubre de 2004 y 18 de julio de 2005. El algoritmo parece responder a pequeños episodios de espuma en el mar.	47
Figura 26. Distancias medias (errores medios) obtenidos entre las líneas detectadas y la de referencia.....	50
Figura 27. Errores medios cuadráticos (EMCs) obtenidos entre las líneas detectadas y la de referencia.....	52
Figura 28. (a) Imagen original; (b) transformada de Fourier de (a); (c) transformada de Fourier 'incrustada' en una matriz mayor; (d) transformada inversa, <i>upsampling</i> de la imagen original.	64
Figura 29. . Flujo de trabajo. Los principales factores analizados son los dos grupos de imágenes, los parámetros que afectan al registro y su interacción.	67
Figura 30. Extracción de sub-imágenes para evaluación del efecto de características internas en la CC.....	69
Figura 31. Cada imagen con traslación conocida (T_{IN}) ha sido cruzada con la correspondiente imagen de referencia ($T_{IN} = 0$) de cada grupo de imágenes sintéticas (ABD o PSFD), empleando diferentes factores de <i>upsampling</i> . Considerando 3 bandas por imagen, se obtiene 9 resultados (T_{OUT}); la media de los 9 valores se representa en puntos negros y su desviación típica en líneas rojas verticales. La aparición de las desviaciones no es aleatoria, a su vez, su valor decrece con rapidez al aumentar el factor de <i>upsampling</i>	71
Figura 32. Comparación entre el valor teórico MPD (Desviación Potencial Máxima) y los valores medidos de mínima y máximas desviaciones obtenidas para cada factor a lo largo de todos los desplazamientos evaluados.....	73

Figura 33. Errores máximos y mínimos obtenidos para cada factor a lo largo de todas las traslaciones. En verde el rango de errores para el grupo de imágenes ABD, en rojo para el grupo PSFD. El valor teórico MDP en azul.	74
Figura 34. Comportamiento del error para tamaños específicos de sub-imágenes cruzadas. Cada tamaño de imagen permite obtener multitud de vecindarios para un mismo tamaño en diferentes zonas. Los gráficos representan el promedio de tales soluciones (a) y su desviación típica (b) debida al efecto de la textura interna de las imágenes cruzadas. Dado que cada media y desviación se ha obtenido en 9 ocasiones por el hecho de cruzar diferentes bandas se representa en rojo las desviaciones de las propias medias y desviaciones.	76
Figura 35. Comportamiento del rango de errores en función del tamaño de sub-imagen empleado en la CC.....	79
Figura 36. a) Errores cometidos frente a la traslación real de la imagen T_{IN} . b) Errores cometidos frente a la traslación obtenida, T_{OUT} . En rojo los resultados para el grupo PSFD, en verde para el grupo de imágenes ABD.	80
Figura 37. Cronología de los sensores Landsat. (http://landsat.usgs.gov/about_mission_history.php)	86
Figura 38. Descarga de escenas Landsat desde su distribución gratuita. (http://landsat.usgs.gov/Landsat_Project_Statistics.php)	87
Figura 39. a) Banda 5 de la escena de Landsat 7 del 19 de junio de 2005, afectada por el error SCL-off. A lo largo de la traza del satélite no existen errores, pero aparecen y aumentan al alejarse de ella. b) y c) corresponden al mismo detalle sobre la Albufera de Valencia. b) El efecto zig-zag se presenta como franjas sin dato. c) Junto a las escenas descargadas se aporta una máscara que informa de los píxeles útiles.	88
Figura 40. Evolución de las resoluciones espacial y espectral de las imágenes a lo largo de las misiones Landsat. Infrarrojo cercano (Near Infrared, NIR) en violeta alrededor de los 900 nanómetros (banda 4 de Landsat 5 y 7, banda 5 de Landsat 8). Infrarrojo de onda corta 1 (Short Wave Infrared, SWIR1) en naranja alrededor de 1700 nanómetros (banda 5 de Landsat 5 y 7, banda 6 de Landsat 8). Infrarrojo de onda corta 2 (Short Wave Infrared, SWIR2) en gris alrededor de 2300 nanómetros (banda 5 de Landsat 5 y 7, banda 6 de Landsat 8). Tomado de la presentación de Xavier Pons "Landsat 8. Novedades y posibilidades" Presentación en el Instituto Geográfico Nacional del 23 de mayo de 2013. (http://blogpnt.files.wordpress.com/2009/06/xavierpons_sistema_landsat8.pdf).	90
Figura 41. Solapamiento entre escenas Landsat. En verde se observa el "path" 198 y en naranja el "path" 199. Se observa que, en ciertas zonas, como sucede en la albufera de Valencia, el solape hace posible disponer de más de una sola escena cada dieciséis días.	91
Figura 42. Diferencia visual de procesamiento de las bandas Landsat mediante sistemas LPSG y NLAPS. Se observa dónde se ubica la 'huella' de las bandas de diferente	

resolución según el método de procesado. (http://landsat.usgs.gov/products_IP_LPGSvsNLAPS.php).....	93
Figura 43. Pendientes de las transformaciones que implica la toma de las imágenes en alta o baja ganancia según las especificaciones técnicas de Landsat 7 (Landsat 7 Handbook, on line, NASA, 2006). http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf	94
Figura 44. Flujo de trabajo: integración de la extracción de la línea de costa y la georreferenciación.	96
Figura 45. Escolleras (líneas rojas) del área de estudio. Círculo amarillo explicado en el texto. De fondo imagen Landsat 5.	98
Figura 46. Año de construcción de las diversas escolleras. De fondo, ortofotografía del PNOA (2008). Detalle de las escolleras 2 y 3.....	99
Figura 47. Detalle constructivo de a) extremo norte de la escollera 2 y b) resto de la escollera 2 y toda la escollera 3.....	100
Figura 48. Histogramas de las distancias a las líneas de referencia antes y después de la georreferenciación sub-píxel. a) Landsat 5, b) Landsat 7, c) Landsat 8. El eje Y de la figura c) es diferente dado el número sustancialmente menor de imágenes disponibles de Landsat 8.	106
Figura 49. Comportamiento anómalo de las líneas detectadas en inflexiones pronunciadas. a) líneas extraídas superpuestas a una ortofotografía de 0,5 m/píxel. b) líneas superpuestas a una imagen Landsat.	109
Figura 50. Comportamiento de las líneas de costa provenientes de imágenes Landsat. Las cuadrículas representan vecindarios 7x7 de resolución Landsat. A) tipología idónea de vecindario, B) vecindarios con doble vertientes y curvaturas exageradas.....	110
Figura 51. Histogramas de distancias de los puntos de línea sub-píxel a las líneas de referencia. Caso: Landsat 5	113
Figura 52. Histograma de distancias de los puntos de línea sub-píxel a las líneas de referencia. Caso: Landsat 7	115
Figura 53. Histograma de distancias de los puntos de línea sub-píxel a las líneas de referencia. Caso: Landsat 8.	117
Figura 54. Distancias/errores medios de las líneas sub-píxel para cada sensor y banda frente a las dos escolleras de referencia. No se indica la fecha de todas las imágenes pero se ha mantenido el orden cronológico de las mismas. Obsérvese que la escala horizontal (fechas) cambia para cada satélite. Para observar los valores numéricos aquí resumidos: Anejo V	120
Figura 55. Distancias/errores medios y dispersión por cada línea sub-píxel de cada banda frente a las dos escolleras de referencia, para escenas de Landsat 5. En el eje de abscisas de cada gráfica no se explicitan todas las fechas analizadas pero sí se han	

representado todas las líneas dispuestas de forma cronológica. La barra dentro de la caja marca la mediana, cercana a la media, dibujada con el punto negro. Los márgenes de la caja marcan los percentiles 25 y 75. Los bigotes engloban el 99% de los datos. Para observar los valores numéricos aquí resumidos ver ANEJO VI	122
Figura 56. Distancias/errores medios y dispersión por cada línea sub-píxel de cada banda frente a las dos escolleras de referencia, para escenas de Landsat 7. En el eje de abscisas de cada gráfica no se explicitan todas las fechas analizadas pero sí se han representado todas las líneas dispuestas de forma cronológica. La barra dentro de la caja marca la mediana, cercana a la media, dibujada con el punto negro. Los márgenes de la caja marcan los percentiles 25 y 75. Los bigotes engloban el 99% de los datos. Para observar los valores numéricos aquí resumidos ver ANEJO VI	123
Figura 57. Distancias/errores medios y dispersión por cada línea sub-píxel de cada banda frente a las dos escolleras de referencia, para escenas de Landsat 8. En el eje de abscisas de cada gráfica no se explicitan todas las fechas analizadas pero sí se han representado todas las líneas dispuestas de forma cronológica. La barra dentro de la caja marca la mediana, cercana a la media, dibujada con el punto negro. Los márgenes de la caja marcan los percentiles 25 y 75. Los bigotes engloban el 99% de los datos. Para observar los valores numéricos aquí resumidos ver ANEJO VI	124
Figura 58. Correlación entre los errores (distancias medias a la línea de referencia por cada línea obtenida) en las escolleras 2 y 3.	126
Figura 59. Correlación entre los errores (distancias medias a la línea de referencia por cada línea obtenida) en las escolleras 2 y 3. Caso particular de Landsat 5, antes y después de 2002.	127
Figura 60. a) Detalle de la escollera 2, se observa el comportamiento diferenciado de 2 conjuntos de líneas. b) Detalle de la escollera 3, ambos conjuntos de línea para las mismas fechas no presentan anomalías. c) y d) muestran el cambio visible en la cobertura de tierra cercana a la costa en la zona de la escollera 2, causa probable del comportamiento anómalo.	128
Figura 61. Detalle sobre la ortofotografía del PNOA y en campo de a) la escollera 2 en su tramo de construcción por bloques y b) la escollera 3.	130
Figura 62. R-cuadrado ajustado para cada banda de las escenas Landsat analizadas. NIR: banda 4 de Landsat 5 y Landsat 7, banda 5 de Landsat 8. SWIR_1: banda 5 de Landsat 5 y Landsat 7, banda 6 de Landsat 8. SWIR_2: banda 7 de Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8.	136
Figura 63. Flujo de trabajo definitivo.....	140
Figura 64. Histograma de distancias de los puntos de línea sub-píxel a las líneas de referencia. Caso: Landsat 5.	143
Figura 65. Histograma de distancias de los puntos de línea sub-píxel a las líneas de referencia. Caso: Landsat 7.	145

Figura 66. Histograma de distancias de los puntos de línea sub-píxel a las líneas de referencia. Caso: Landsat 8.	147
Figura 67. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 5.	149
Figura 68. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 7.	149
Figura 69. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 8.	150
Figura 70. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 5, escollera 2.	151
Figura 71. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 7, escollera 3.	152
Figura 72. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 7, escollera 2.	152
Figura 73. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 7, escollera 3.	153
Figura 74. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 8, escollera 2.	153
Figura 75. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 8, escollera 3.	154
Figura 76. Distancias/errores medios de las líneas sub-píxel para cada sensor y banda frente a las dos escolleras de referencia. No se indica la fecha de todas las imágenes pero se mantiene el orden cronológico.....	155
Figura 77. Distancias/errores medios y dispersión por cada línea sub-píxel respectivas a cada banda frente a las dos escolleras de referencia. No se plasma la fecha de todas las imágenes pero se ha mantenido el orden cronológico de las mismas. Caso Landsat 5.	159
Figura 78. Distancias/errores medios y dispersión por cada línea sub-píxel respectivas a cada banda frente a las dos escolleras de referencia. No se plasma la fecha de todas las imágenes pero se ha mantenido el orden cronológico de las mismas. Caso Landsat 7.	160
Figura 79. Distancias/errores medios y dispersión por cada línea sub-píxel respectivas a cada banda frente a las dos escolleras de referencia. No se plasma la fecha de todas las imágenes pero se ha mantenido el orden cronológico de las mismas. Caso Landsat 8.	161
Figura 80. Correlación entre los errores (distancias medias a la línea de referencia por cada línea obtenida) en las escolleras 2 y 3.	162
Figura 81. Correlación entre los errores (distancias medias a la línea de referencia por cada línea obtenida) en las escolleras 2 y 3. Caso particular de Landsat 5, antes y después de 2002.	163

Figura 82. Zonas de estudio. En verde se muestran las playas con frentes dunares cercanos. En rosa se muestran playas circundadas por zonas construidas. La numeración indica la ubicación de los perfiles sumergidos tomados en diciembre de 2007. A, B y C indican las zonas cubiertas por diferentes imágenes Landsat (Tabla 35).	176
Figura 83. Pendientes observadas en cada perfil entre las cotas 0 y -5 m en diferentes zonas estudiadas en 2007. La línea roja indica la pendiente media. En la Figura 82 se observa la localización de estos perfiles.....	178
Figura 84. Altura significativa de ola (H_s), y altura máxima de ola (en gris) durante el periodo de estudio, de octubre de 2001 a diciembre de 2002. La fecha de adquisición de cada imagen Landsat en rojo (mes/día/año). Se ha trazado en rojo la altura significativa igual a 2 m, valor recomendado por Mendoza y Jiménez para definir un temporal.....	180
Figura 85. Cambio del nivel del mar respecto al de la fecha de adquisición de la primera imagen Landsat, y máximo nivel del mar observado en cada temporal.	181
Figura 86. Flujo de trabajo empleado para la extracción y procesado de las líneas de costa.	181
Figura 87. Principales pasos de la herramienta SDL: a) Eliminación de puntos anómalos, b) unión de puntos bajo criterios angulares y de distancia; c) suavizado lineal de la línea de costa	182
Figura 88. Variación media respecto al 8 de noviembre de 2001 en el global del área de estudio para las respectivas fechas de cada imagen Landsat.	183
Figura 89. Distribución de las zonas de estudio, nombres particulares y longitudes de costa respectivas.	184
Figura 90. Gráfico Hovmoeller. Indica las variaciones para cada zona (separadas según su latitud) a lo largo del periodo de estudio. A ambos lados: la pendiente y orientación medias de cada sector.....	185
Figura 91. Retroceso medio de cada segmento. En rojo el retroceso medio global.....	187
Figura 92. Relación entre la pendiente media de cada sector y su retroceso medio observado. El estudio analiza el 78,5% de la longitud de costa global de estudio. No se incluyen ciertas zonas cuya pendiente puede haber variado entre 2002 y 2009 por aportaciones artificiales de arena.....	188
Figura 93. Cambios observados en la posición de playa a lo largo del periodo, distinguiendo las 3 direcciones principales.	190
Figura 94. Detalle del cambio registrado entre el 8 de noviembre y 26 de diciembre de 2001, entre 3 y 8 kilómetros al norte del puerto de Gandía. Las líneas verticales punteadas indican la posición de los perfiles hechos en 2007 por la DGC. En paréntesis se representa la pendiente de la playa sumergida medida en los perfiles de 2007 (ver Figura 83).	191
Figura 95. Zona de estudio.	198

Figura 96. Diagrama de Flujo del método desarrollado para la realización de los análisis.	200
Figura 97. Número de imágenes, y líneas de costa, analizadas en cada año.	202
Figura 98. Ejemplo de cómo se opera desde el sistema de tratamiento digital de líneas de costa (DSAS) en el entorno de ArcGis. Los perfiles o transectos están equiespaciados cada 50 m. De fondo la ortofotografía de 2008 del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea. Cuadrícula con separación igual a 100 m.	203
Figura 99. Ejemplo de cómo se ha calculado el cambio máximo para un perfil o transecto dado con DSAS.	204
Figura 100. Ejemplo de cómo se calcula la tasa de cambio o LRR para un perfil o transecto dado con DSAS.	205
Figura 101. Tasa de cambio para todo el periodo estudiado. Cada punto del gráfico proviene de los datos calculados sobre cada perfil o transecto analizado. Abscisas: distancias desde el límite norte del término municipal (metros).	207
Figura 102. Mapa de tendencia evolutiva. La dimensión de la flecha muestra la magnitud del cambio, mientras que la dirección y el color de la misma designan si es positivo o negativo.	208
Figura 103. Mapa de tendencia evolutiva. La dimensión de la flecha muestra la magnitud del cambio, mientras que la dirección y el color de la misma designan si es positivo o negativo.	209
Figura 104. Comparación de las tasas de cambio del periodo 1984-2000 frente a las del periodo 1999-2009 (en metros).	211
Figura 105. Comparación de la magnitud del cambio máximo registrado en los dos subperiodos considerados (en metros).	212
Figura 106. Comparación de la variabilidad intra-anual de la línea de costa reflejada por el cambio máximo producido a lo largo de tres periodos o bloques de un año aproximadamente de duración. La explicación de los espacios recuadrados se hace en el texto. El vacío de información entre 7500 y 10000 m se asocia al sector no estudiado de las infraestructuras del puerto de Sagunt.	214
Figura 107. Representación de la evolución seguida por la playa en el segmento o perfil 102. En el eje de ordenadas: distancia a la línea de referencia, en metros. En el eje de abscisas: tiempo. La pendiente de la recta ajustada indica la tendencia del cambio. En concreto se indica una tendencia de cambio de 0,74 centímetros por día, o bien 2,7 m por año.	216
Figura 108. representación de la evolución seguida por la playa en el segmento o perfil 77. En el eje de ordenadas: distancia a la línea de referencia, en metros. En el eje de abscisas: tiempo. La pendiente de la recta ajustada indica la tendencia del cambio. En	

concreto se indica una tendencia de cambio de 0,0026 m por día o bien, 0,94 m por año.	217
Figura 109. Cada media y desviación de cada ROI sirve para ajustar la curva normal de cada pico en el histograma.	254
Figura 110. Localización de las zonas de estudio.....	259
Figura 111. Ajuste de histogramas. Imagen Landsat 7 ETM+ de 21 de noviembre de 2003. a) Modelo bi-gaussiano. b) modelo bi-normal.....	260
Figura 112. Divergencia de soluciones Gauss-Newton y Levenberg Marquardt	261
Figura 113. Correlación de estimadores de ajuste bi-gaussiano y bi-normal	263
Figura 114. Correlación de umbrales obtenidos por modelo bi-gaussiano y modelo bi-normal.	263
Figura 115. Divergencia de soluciones Gauss-Newton y Levenberg Marquardt	264
Figura 116. Generación de dos series para evaluación de correlación	288
Figura 117. Desplazamiento de series para evaluación de la correlación. a) Serie senoide con ruido aleatorio y desplazada. b) Dos series de datos desplazadas.	289
Figura 118. Comportamiento detallado de la correlación para detectar desplazamiento en una serie de datos	290
Figura 119. Zona de estudio.	358
Figura 120. Landsat7 ETM+ binarizada.....	359
Figura 121. Detalle de Landsat7 ETM+, y máscara asociada.....	360
Figura 122. Landsat7 ETM+ umbralizada y bordes de precaución.....	360
Figura 123. Landsat7 ETM+, y línea aproximada.....	361
Figura 124. Modelización matemática del vecindario.	361
Figura 125. Errores medios (en metros).	364
Figura 126. Errores Medios Cuadráticos (en metros).	365

Índice de tablas

Tabla 1. Características de las imágenes QuickBird analizadas.....	25
Tabla 2. Combinaciones de resolución, vecindario y factor de densificación de puntos empleados.....	31
Tabla 3. Errores medios obtenidos. Distancia media a la línea de referencia de cada línea de costa y sus respectivos parámetros de cálculo.	32
Tabla 4. Errores medios cuadráticos obtenidos (EMCs) de cada línea de costa y sus respectivos parámetros de cálculo.	35
Tabla 5. Distancias medias (errores medios) obtenidos entre las líneas detectadas y la de referencia.	49
Tabla 6. Errores medios cuadráticos (EMCs) obtenidos entre las líneas detectadas y la de referencia.	51
Tabla 7. Número de líneas analizadas en Pardo-Pascual et al. 2012 y en el presente capítulo.	85
Tabla 8. Niveles analizados para la distinción radiométrica.....	102
Tabla 9. Resumen estadístico. Errores de las líneas de costa antes (sin GR) y después de la georreferenciación (con GR).	107
Tabla 10. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 5. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Escolleras 2 y 3.	112

Tabla 11. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 5. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Análisis escollera 2.	112
Tabla 12. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 5. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Análisis escollera 3.	113
Tabla 13. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 7. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Escolleras 2 y 3.	114
Tabla 14. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 7. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Análisis escollera 2.	114
Tabla 15. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 7. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Análisis escollera 3.	115
Tabla 16. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 8. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Escolleras 2 y 3.	116
Tabla 17. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 8. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Análisis escollera 2.	116
Tabla 18. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 8. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Análisis escollera 3.	117
Tabla 19. Polinomios obtenidos para corregir el efecto radiométrico en líneas de Landsat 5.	132
Tabla 20. Polinomios obtenidos para corregir el efecto radiométrico en líneas de Landsat 7.	133
Tabla 21. Polinomios obtenidos para corregir el efecto radiométrico en líneas de Landsat 8.	133
Tabla 22. Polinomios obtenidos para corregir el efecto radiométrico en líneas de Landsat 7. Detalle de modelos para alta y baja ganancia de la banda 4.	134
Tabla 23. Polinomios obtenidos para corregir el efecto radiométrico en líneas de Landsat 7. Detalle de modelos para alta y baja ganancia de la banda 5.	134
Tabla 24. Polinomios obtenidos para corregir el efecto radiométrico en líneas de Landsat 7. Detalle de modelos para alta y baja ganancia de la banda 7.	135
Tabla 25. Estimadores de los modelos radiométricos. Separados y en conjunto.	138

II

Tabla 26. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 5. Escolleras 2 y 3.	142
Tabla 27. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 5. Análisis escollera 2.	142
Tabla 28. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 5. Análisis escollera 3.	143
Tabla 29. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 7. Escolleras 2 y 3.	144
Tabla 30. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 7. Análisis escollera 2.	144
Tabla 31. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 7. Análisis escollera 3.	145
Tabla 32. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 8. Escolleras 2 y 3.	146
Tabla 33. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 8. Análisis escollera 2.	146
Tabla 34. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 8. Análisis escollera 3.	147
Tabla 35. Fecha de adquisición de las imágenes Landsat del estudio, zona (A, B o C, ver Figura 82), el nivel del mar en el momento de registro de la imagen. Información relacionada con los temporales: duración (horas), máxima altura significativa (H_s), máxima altura de ola registrada (H_m), periodo de pico máximo (T_p), niveles medio y máximo del mar, marea meteorológica media y máxima durante el temporal.....	179
Tabla 36. Imágenes analizadas. L5: Landsat 5. L7: Landsat 7. H: Alta ganancia. L: baja ganancia.	201
Tabla 37. Combinaciones de resolución, vecindario y factor de densificación de puntos empleados.....	213
Tabla 38. Comparación de umbrales obtenidos.....	262
Tabla 39. Error medio por degradación, fecha y zona de evaluación.....	297
Tabla 40. Banda 4. Escollera 2.	302
Tabla 41. Banda 4. Escollera 3.	304
Tabla 42. Banda 5. Escollera 2.	306
Tabla 43. Banda 5. Escollera 3.	308
Tabla 44. Banda 7. Escollera 2.....	310
Tabla 45. Banda 7. Escollera 3.....	312

Tabla 46. Banda 4. Escollera 2.	314
Tabla 47. Banda 4. Escollera 3.	316
Tabla 48. AIV.2.2.1. Banda 5. Escollera 2.	318
Tabla 49. AIV.2.2.1. Banda 5. Escollera 3.	320
Tabla 50. AIV.2.2.1. Banda 7. Escollera 2.	322
Tabla 51. AIV.2.2.1. Banda 7. Escollera 3.	324
Tabla 52. Banda 5. Escollera 2.	326
Tabla 53. Banda 5. Escollera 3.	326
Tabla 54. Banda 6. Escollera 2.	327
Tabla 55. Banda 6. Escollera 3.	327
Tabla 56. Banda 7. Escollera 3.	328
Tabla 57. Banda 4. Escollera 2.	329
Tabla 58. Banda 4. Escollera 3.	331
Tabla 59. Banda 5 Escollera 2.	333
Tabla 60. Banda 5 Escollera 3.	335
Tabla 61. Banda 7 Escollera 2.	337
Tabla 62. Banda 7 Escollera 3.	339
Tabla 63. Banda 4. Escollera 2.	341
Tabla 64. Banda 4. Escollera 3.	343
Tabla 65. Banda 5. Escollera 2.	345
Tabla 66. Banda 5. Escollera 3.	347
Tabla 67. Banda 7. Escollera 2.	349
Tabla 68. Banda 7. Escollera 3.	351
Tabla 69. Banda 5. Escollera 2.	353
Tabla 70. Banda 5. Escollera 3.	353
Tabla 71. Banda 6. Escollera 2.	354
Tabla 72. Banda 6. Escollera 3.	354
Tabla 73. Banda 7. Escollera 2.	355
Tabla 74. Banda 7. Escollera 3.	355

IV

**Obtención de líneas de costa con precisión
sub-píxel a partir de imágenes Landsat
(TM, ETM+, OLI)**

Capítulo I

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

"La formulación de un problema es más importante que la solución"

Albert Einstein

1.1. Introducción

Los espacios costeros sufren la acción directa de la naturaleza y del hombre al tiempo que son reflejo de procesos complejos que interactúan a distintas escalas espaciales y temporales. El efecto producido por estos complejos procesos tiene cada vez un interés mayor. Gran parte de la actividad humana tiene lugar en los espacios costeros. Su actividad afecta a tales espacios y a sus variaciones. El mantenimiento de esta relación entre los espacios costeros y el ser humano se resume en el concepto de sostenibilidad y garantizarla implica conocer en cada momento el estado de las costas.

Cabe definir qué se considera un espacio costero y qué importancia tiene. Según Gens (2010) se define la zona de costa como el espacio ocupado entre la isobata a 200 m de profundidad y la curva de nivel a 200 m de altitud y su monitorización incluye multitud de disciplinas. Un parámetro clave para monitorizar la dinámica de las playas es la línea de costa: la línea en que la atmósfera, la litosfera y la hidrosfera se encuentran.

Los espacios costeros (y concretamente la delimitación de las líneas de costa) tienen importancia desde diversos puntos de vista. Kuleli et al. (2011) analiza la posición de la costa de humedales listados en el convenio de Ramsar por su implicación en la fauna y la

vegetación. Klinger et al. (2010) exponen la necesidad de monitorizar el perímetro de costa antártica por su influencia en el clima y su relación con el nivel oceánico global. Aún siendo dos ejemplos extremos, ciertos cambios alarmantes en zonas climáticamente sensibles están justificando y requiriendo mayores esfuerzos en la monitorización de los espacios costeros (Shah, 2011). En este sentido, las playas arenosas son espacios de alto interés por su vulnerabilidad -Deronde et al. (2004)-. Esta vulnerabilidad se observa en tres tipos de cambios morfosedimentarios: (a) efectos de muy corto plazo como pueda ser el efecto de temporales costeros, (b) cambios de corto plazo, referidos normalmente a evoluciones cíclicas intra-anales, dependientes del diferente comportamiento de las olas y corrientes en cada estación y, (c) cambios a largo plazo, detectables en el transcurrir de los años y debidos a la predominancia de los efectos de acumulación o erosión. Desde el punto de vista de la Dirección General de la Sostenibilidad de la Costa y el Mar (Pérez-González, 2008), este último tipo de cambio es de gran importancia dado que las tendencias a largo plazo pueden condicionar ciertos usos o poner en peligro la actividad alrededor de la costa. En muchas zonas, donde el turismo es un recurso económico (y éste depende de las playas) el control de su estado y la velocidad de cambio son una información estratégica para la toma de decisiones (Pérez-González. 2008, Deronde et al., 2004).

Así, para llevar a cabo la monitorización se ha de responder a dos cuestiones: cuál será la variable a medir y cómo medirla. En el caso de playas arenosas, los cambios se presentarán, por ejemplo, en la variación de su forma, del volumen de arena acumulado y en la anchura de la playa que queda señalado por la línea de costa. Los dos primeros aspectos responden a una variación en la tridimensionalidad de la playa y su medida suele estar mutuamente relacionada. En lo que a metodología se refiere, por un lado, un método muy extendido para analizar la morfología de la playa es la toma sistemática de perfiles perpendiculares a la línea de la costa (Thom and Hall, 1991; Morton, 2002; Armaroli et al., 2012; Trifonova et al., 2012). En ellos se suelen medir la pendiente, la disposición y morfología de las barras sumergidas (si el perfil se adentra en el agua) y la posición de la berma. Por otro lado, el volumen es fácilmente calculable a partir de la comparación de modelos digitales del terreno (Gervais et al., 2012), y su uso se está extendiendo gracias a la facilidad en la adquisición de información tridimensional masiva mediante GPS y LiDAR aeroportado (Krabill et al., 2000; Sallenger et al., 2003; Robertson et al., 2007). Perfiles y volúmenes se interrelacionan dado que, disponiendo de un modelo digital del terreno, es posible obtener perfiles (salvo en la parte subacuática) y los perfiles son susceptibles de ser empleados para cálculo de volúmenes.

No obstante, tanto las campañas GPS como la obtención de datos LiDAR presentan ciertos inconvenientes. A priori, la monitorización costera requiere de información precisa, con una serie temporal que abarque todo el periodo de estudio (aunque se puede considerar que cuanto más extensa, mejor) y con una frecuencia temporalmente equilibrada entre las sucesivas series de datos. Sin embargo, esta información no está siempre disponible, es necesaria una planificación y una inversión. Así pues, aunque las campañas GPS y vuelos LiDAR ofrecen información muy precisa, no son siempre asumibles económicamente, no se dispone de series temporales suficientemente

extensas ni temporalmente bien distribuidas y su gestión puede suponer un inconveniente añadido.

Una alternativa que ha venido ganando peso en los estudios de dinámica de playas debido a que facilita disponer de muchas mediciones de una playa a costes razonables es el empleo de la videomonitorización (Holland et al., 1997, Silva et al., 2009; Sancho-García et al., 2011). Estas técnicas de video-monitorización resuelven el problema de la cantidad y frecuencia de toma de información pero sólo es aplicable a zonas relativamente pequeñas y sólo registran información bidimensional.

La línea de costa, pese a ser un indicador bidimensional, es muy versátil en cuanto a fuentes de información. No sólo es adquirible mediante GPS (Pardo-Pascual et al., 2005) o LiDAR (Liu et al., 2007;; Stockdon et al., 2002; White y Wang, 2003; Robertson et al., 2004; Morton et al., 2005) sino que también, desde hace décadas, ha sido fotointerpretada a partir de imágenes aéreas o mapas topográficos (McCurdy, 1950; Smith y Stafford, 1971; MOPU, 1979; Leatherman, 1983; Zarrillo, 1990; Pardo-Pascual, 1991; Thieler y Danforth, 1994; Jiménez et al., 1997) o mapas topográficos (Weerakkody, 1987; Pardo-Pascual, 1991). En cuanto a las limitaciones: los trabajos GPS no siempre permiten tomar grandes extensiones aunque algunos estudios se han servido de vehículo de cuatro ruedas para agilizar el trabajo (Pardo-Pascual, 2005; Psuty y Silveira, 2011); por su lado, tanto la toma de imágenes aéreas o datos LiDAR implica la solicitud expresa del vuelo, su planificación y procesado y su toma continua es, en numerosas ocasiones, inviable económicamente. A la luz de estos hechos, la información registrada por diversos satélites es cada vez más relevante para la obtención de líneas de costa.

Las imágenes por satélite ofrecen diversas ventajas: gran número de registros, la periodicidad estable y el hecho de que un mismo satélite registre todo el planeta. Así, las imágenes multiespectrales de satélite son un recurso potencialmente útil para el análisis de tendencias a corto y medio plazo. En este sentido, las imágenes tomadas por los sensores TM, EMT+ y OLI (en las plataformas Landsat 5, 7 y 8), presentan la serie temporal más extensa de imágenes de resolución media. Aún más, desde 2008, el Servicio Geológico de los EEUU (USGS) proporciona gratuitamente todo su archivo de imágenes. Este hecho implica disponer de imágenes de un mismo sector, y a lo largo de todo el planeta cada 16 días (o incluso menos tiempo dada la alternancia de las series de satélites Landsat). Hasta ahora, esta información se ha empleado relativamente poco (Gens, 2010) debido a la resolución espacial de 30 m por píxel, insuficiente para detectar la mayoría de los cambios en la posición de la arena (Pardo-Pascual y Sanjaume, 2001). No obstante, sí han sido empleadas para analizar cambios grandes como los observados en el Delta del Nilo (White y El Asmar, 1999), el delta del Maritsa en el mar Egeo en Turquía (Ekercin, 2007) o del Río Amarillo en China (Chu et al., 2006). Las imágenes Landsat se han empleado también para el cartografiado de ambientes de llanuras intermareales, describir la naturaleza tridimensional de estas zonas así como definir varias líneas de costa según diversos puntos de vista (Ryu et al., 2002). También se ha empleado estas imágenes para localizar de los espacios con agua enclavados dentro de

grandes llanos de inundación como los del río Mississippi (Frazier y Page, 2000) y medir variaciones en el volumen de agua de embalses (Manavalan et al., 1997) o monitorizar los lagos naturales ubicados en el de Rift Valley en Kenia (Ouma y Tateish, 2006). En todos estos estudios se aceptaba la limitada resolución de Landsat TM/ETM+/OLI pero era suficiente frente a la dimensión de los cambios observados. Dada la gran cantidad de imágenes Landsat disponibles parece lógico tratar de encontrar solución a su principal limitación: su resolución geométrica. Ello se traduce en obtener líneas de costa con errores por debajo a sus 30 m de resolución.

La sola obtención de las líneas de costa puede no ser suficiente dado que la monitorización de la costa requiere la comparación entre líneas de fechas sucesivas y ello implica poder georreferenciar entre sí las sucesivas imágenes con tanta o mayor definición que las líneas obtenidas. De esta manera, la precisión de la línea obtenida y la georreferenciación permitirían el estudio evolutivo de las costas con nuevos niveles de precisión.

1.2. Objetivos

El objetivo general de esta tesis es la generación de una metodología automática de procesado y georreferenciación de imágenes Landsat (de cualquiera de los sensores TM/ETM+/OLI) para la obtención de líneas de costa a partir de imágenes con precisión sub-píxel que permitan su utilización en el análisis de la dinámica de los espacios de playa.

Este objetivo general se desglosa en los siguientes objetivos específicos:

En primer lugar, la propuesta, desarrollo y evaluación de un método para obtener la línea de costa con precisión sub-píxel dentro del espacio de cada imagen, esto es, independientemente de su nivel de georreferenciación. La precisión obtenida deberá asegurar coherencia y robustez en la extracción para otorgar fiabilidad a los análisis que se deriven. Por este motivo se profundizará en los factores que influyen sobre el error final y en qué medida.

En segundo lugar, desarrollar un método automático que garantice la georreferenciación de las líneas obtenidas con precisión sub-píxel de forma que puedan ser comparadas entre sí. Ello implica analizar los factores que afecten a los errores obtenidos y, con el fin de reducir su efecto y aumentar la eficiencia del proceso, realizar una caracterización de estos errores.

En tercer lugar, la búsqueda de la automatización tanto en los procesos de obtención de las líneas de costa como en la georreferenciación, aspecto fundamental para que la base de datos de imágenes Landsat pueda convertirse realmente en una nueva fuente de información para la caracterización de dinámica de playas. La automatización de los procesos metodológicos tiene por objeto reducir el componente subjetivo de las decisiones del usuario, aportar celeridad y coherencia en los procesos y análisis y, en definitiva, eficiencia.

En cuarto lugar, demostrar la aplicabilidad de la metodología propuesta. Se pretende, por una parte, verificar que los resultados o respuestas morfológicas señaladas por las líneas de costa obtenidas resultan coherentes según lo que la bibliografía sobre la dinámica de playas viene señalando y, por otra parte, comprobar que la disponibilidad de esta nueva fuente de información permite reconocer nuevos detalles o respuestas del sistema sedimentario costero que amplíen nuestro conocimiento sobre la dinámica de las playas.

1.3. Estructura de la tesis y planteamiento inicial

La tesis se estructura fundamentalmente en cuatro capítulos auto-concluyentes. En los tres primeros se evalúa cada paso que conformará el flujo de trabajo resultante para, en un cuarto capítulo, presentar la transcripción de diversas publicaciones desarrolladas en el seno del grupo de investigación CGAT y cuyas conclusiones han requerido disponer de las líneas obtenidas mediante la metodología propuesta. Concretamente:

El **CAPÍTULO II, Algoritmo de extracción de la línea de costa con precisión sub-píxel**, describe la obtención de las líneas de costa a partir imágenes de resolución media correspondientes al espectro infrarrojo cercano. En este capítulo se plantea la hipótesis de partida, los procedimientos a emplear y qué parámetros pueden afectar al resultado. Los experimentos se realizan sobre imágenes QuickBird multiespectrales (con resolución geométrica original de 2,4 m/píxel) remuestreadas a diversas resoluciones. Se compara entonces la línea fotointerpretada en las imágenes originales de alta resolución y aquella que el algoritmo obtiene de la versión degradada de la cada imagen. Así, los resultados no se ven afectados por problemas externos a la propia extracción. De los resultados se inducen diversos aspectos que afectan a la extracción y que condicionan qué parámetros serán empleados a posteriori. De entre todas las metodologías posibles que se están desarrollando actualmente, este capítulo nace de una idea inicial llevada a cabo en el proyecto fin de carrera del propio autor de esta tesis (Almonacid-Caballer, 2007) y que fue presentada en diversos congresos y de la que han derivado las siguientes publicaciones:

- Ruiz, L.A., Pardo, J.E., Almonacid, J., Rodríguez, B. (2007). Coastline automated detection and multi-resolution evaluation using satellite images. *Proceedings of Coastal Zone 07, Portland, Oregon (USA)*, 22-26 julio.
- Pardo, J.E.; Ruiz, L.A., Almonacid, J., Calaf, X., (2008). Detección de cambios de la línea de costa a partir de imágenes de satélite de resolución media. *Congreso Internacional sobre Ingeniería Geomática y Topográfica, TOP-CART 2008. Febrero 2008, Valencia*.

Dado que las líneas de costa han de servir para estudios multi-temporales, han de estar correctamente georreferenciadas con una precisión también más fina que la resolución de Landsat TM/ETM+/OLI. Para ello en el **CAPÍTULO III, Descripción y evaluación del método LUFT para la georreferenciación automática y de precisión sub-píxel**

de imágenes Landsat, se propone y evalúa un método de registro automático con precisión sub-píxel. La validación del método se apoya en una serie de ensayos sobre un número exhaustivo de georreferenciaciones controladas. Como resultado se deduce la precisión esperable y su comportamiento.

En el **CAPÍTULO IV, aplicación de la metodología de obtención de líneas de costa a imágenes de los sensores Landsat TM/ETM+/OLI**, se combinan y aplican las metodologías ya descritas (extracción de línea y georreferenciación) sobre imágenes Landsat. La validación se realiza sobre zonas cuya posición no ha variado a lo largo del tiempo. De los resultados en diversas áreas de estudio y empleando diferentes bandas infrarrojas se induce, por ejemplo, el efecto de la reflectancia de las diversas coberturas tiene en la posición de la línea de costa adyacente. Observando que los errores responden a factores asociados a la señal registrada en cada imagen, se genera un modelo estadístico que permite corregir cada línea de costa según su procedencia. Una vez aplicado este modelo corrector asociado a las características de las imágenes, se analiza en detalle el nivel de precisión que se puede alcanzar empleando las tres bandas del infrarrojo próximo y medio en las que se presupone que las diferencias en la respuesta radiométrica del agua y la tierra son más elevadas. Una primer exposición global de esta metodología ha sido publicada en:

- Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L.A., Palomar-Vázquez, J. (2012). Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with sub-pixel precision. *Remote Sensing of Environment*, 123, pp. 1-11

Para este trabajo no se emplearon escenas provenientes de Landsat 7 a partir de la avería sufrida en 1999 y que, como consecuencia, genera imágenes con franjas sin dato. Sin embargo, se ha realizado un estudio en que se demuestra que los fragmentos de línea de costa obtenidos a partir de las escenas de Landsat 7 tras dicha avería se obtienen con la misma fiabilidad que a partir de escenas previas a la avería y aquellas obtenidas a partir de Landsat 5. Este estudio ha sido publicado en:

- Almonacid-Caballer, J., Pardo-Pascual, J. E., Ruiz, L. A. (2013). Detección automática de la línea de costa con precisión sub-píxel en imágenes Landsat 7 con error de bandeo. *Actas del XV Congreso de la Asociación Española de Teledetección INTA, Torrejón de Ardoz (Madrid)*, pp. 270-273

En el **CAPÍTULO V, Aplicación de la metodología propuesta al análisis de la dinámica costera**, se aplica la metodología completa desarrollada anteriormente en dos casos de análisis geomorfológicos. La validez y el sentido de los resultados sirven como evaluación de la metodología propuesta desde el punto de vista de su aplicabilidad. El método propuesto y evaluado numéricamente en capítulos anteriores ha de servir para su fin último: el análisis evolutivo de las playas en relación con los factores climáticos, marítimos y geomorfológicos que controlan su dinámica. Estos trabajos no han quedado en una evaluación metodológica sino que han sido el fundamento metodológico de las distintas aplicaciones llevadas a cabo:

- Almonacid-Caballer, J., Pardo-Pascual, J.E., Ruiz, L.A., Palomar-Vázquez, J.M. (2011). Caracterización de los cambios de costa tras el temporal de noviembre de 2001 a partir de imágenes Landsat ETM+. *Actas de las VI Jornadas de Geomorfología Litoral, Tarragona*, pp. 19-22.
- Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J., Mislata-Cabo, R., Roselló-Soto, R. (2012b). Caracterización de la evolución reciente de las playas de Sagunt y Canet d'En Berenguer a partir de imágenes Landsat. *Anales del Instituto de Estudios Saguntinos*, 1, pp. 55-79.
- Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L.A., Palomar-Vázquez, J., Rodrigo-Aleman, R. (2014). Evaluation of storm impact in sandy beaches of the Gulf of Valencia using Landsat imagery. *Geomorphology*, 214, pp. 334-401

En el **CAPÍTULO VI, Conclusiones y líneas futuras de investigación**, se recogen las conclusiones globales de la tesis y algunas sugerencias de investigación futuras.

Capítulo II

ALGORITMO DE EXTRACCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA CON PRECISIÓN SUB-PÍXEL

"La ignorancia afirma o niega rotundamente; la ciencia duda"

Voltaire

2.1. Introducción y objetivo

El aprovechamiento de las escenas Landsat TM/ETM+/OLI para la monitorización de las costas en general, y playas en particular, implica necesariamente poder obtener líneas de costa con precisión suficiente. Esta precisión será suficiente dependiendo del uso que se vaya a realizar o de la propia naturaleza del fenómeno que se esté analizando. La limitación principal de las imágenes provenientes de los satélites Landsat es la resolución geométrica, 30 m/píxel, insuficiente para análisis de detalle que permitan estudios multi-temporales y evolutivos de las playas.

La literatura demuestra el esfuerzo llevado a cabo por los investigadores para obtener líneas de costa a partir de imágenes. Se han propuesto soluciones diversas como por ejemplo el empleo de clasificación supervisada (Hoeke et al., 2001; Pardo-Pascual et al., 2008; Espinosa y Rodríguez, 2009) o clasificación no supervisada (Guariglia et al., 2006; Ekercin, 2007;). Se han probado diversos métodos de umbralización (White y El Asmar, 1999; Jishuang y Chao, 2002; Liu y Jezec, 2004; Yamano et al., 2006; Bayram et al.,

2008; Maiti y Bhattacharya, 2009; Kuleli et al., 2011). Dado que estos métodos clasifican cada píxel de las imágenes, la precisión en la posición de la línea de costa depende del tamaño de píxel.

El desarrollo de una herramienta que garantice líneas de costa precisas, y especialmente si se pretende superar la limitación debida al tamaño de píxel, requiere resolver dos cuestiones: en primer lugar, cómo obtener tales líneas y, en segundo lugar, cómo evaluar su precisión. Este segundo paso es crucial puesto que, al buscar un resultado con precisión sub-píxel, no es posible una evaluación mediante fotointerpretación dado que también está limitada al tamaño de píxel. Dicho de otra manera: ¿Cómo detectar la línea de costa con precisión mejor que el tamaño de píxel? Y ¿Cómo asegurar que una línea coincide con la línea de costa real cuando no es posible ampliar la imagen e interpretarlo?

Foody et al (2005) proponen usar una clasificación difusa de modo que un píxel no se considere sólo tierra o mar sino que pueda contener una proporción de cada clase. Muslim et al (2006, 2007) han presentado trabajos sucesivos con objeto de determinar la probabilidad con que un píxel ha de ser clasificado como tierra o como mar. Para la evaluación de la metodología, los autores emplearon imágenes IKONOS para delimitar la posición de la línea de costa. Seguidamente, las imágenes fueron degradadas a resoluciones similares a SPOT-3 (20 m/píxel) (Foody et al., 2005; Muslim et al., 2006) o a Landsat TM (30 m/píxel). La evaluación se llevó a cabo en un segmento de 125 m de la costa de Indonesia. El error medio cuadrático (EMC) obtenido se encontraba entre 1,15 y 2,08 m o entre 1,71 y 5,11 m sobre imágenes de 16 y 32 m/píxel respectivamente (Muslim et al., 2007).

La presente tesis tiene como antecedente un trabajo fin de carrera (Almonacid-Caballer, 2007) y dos publicaciones (Ruiz et al., 2007; Pardo-Pascual et al., 2008) en que se proponía un método de extracción de líneas de costa con precisión sub-píxel. El método se evaluó fotointerpretando las líneas de costa en imágenes QuickBird de las que, tras ser degradadas a 28 m/píxel, se obtuvo líneas de costa por el método propuesto. En este capítulo se revisa dicho trabajo. El proceso de extracción se ha refinado y la evaluación se ha realizado con experimentos más pormenorizados y teniendo en cuenta más variables. Finalmente se ha profundizado en la capacidad explicativa de las líneas y en la conveniencia del uso de todas ellas para medir la precisión alcanzada.

2.2 Metodología

2.2.1 Descripción del algoritmo

Se parte de considerar que en una escena existirán "píxeles de tierra" y "píxeles de mar". Es previsible que ambas coberturas (tierra y mar) tengan un comportamiento diferenciado. En el espectro infrarrojo, la zona de tierra tendrá normalmente una mayor reflectancia que la zona acuática que, por la fuerte absorción del agua en la longitud de

onda del infrarrojo, tendrá unos niveles de intensidad menores. El cambio de la respuesta espectral entre tierra y mar (Figura 1) fundamenta en esta tesis la localización de la línea de costa.

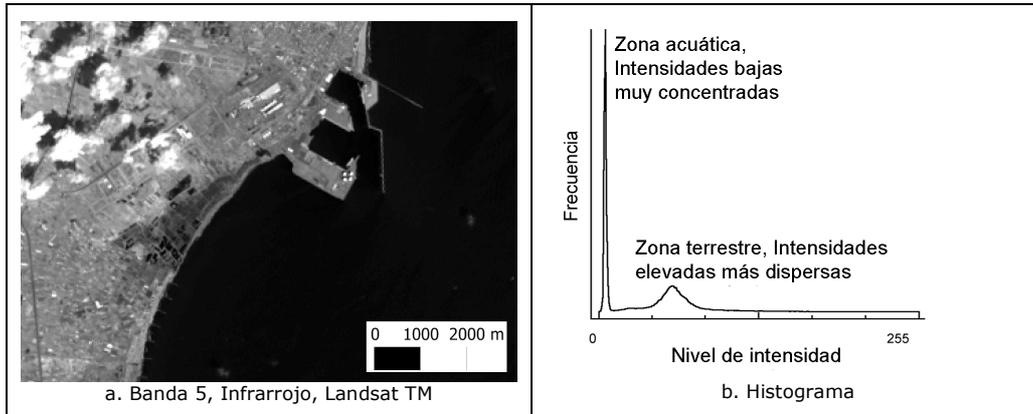


Figura 1. Imagen de la banda 5 de Landsat TM (a). En su histograma (b) se observa el comportamiento diferenciado de las zonas de agua y tierra.

La propuesta para la localización de la línea de costa implica dos pasos: **(1)** la detección de una línea de costa inicial con precisión limitada y **(2)** un proceso de refinamiento alrededor de la misma.

(1) El proceso de detección de la línea inicial se basa en la propiedad por la que el agua aparecerá con niveles de intensidad claramente inferiores. La detección de la interfaz entre tierra y agua ya se ha servido tradicionalmente de esta propiedad mediante una umbralización de la banda infrarroja dado que tiene una huella clara en el histograma como se observa en la Figura 1.b. Pese a ser una idea aparentemente sencilla, no es siempre fácil de aplicar y automatizar. En el Anejo I se desarrolla la posibilidad de modelizar el histograma asociado a una banda de la que se pretende extraer la línea de costa y su automatización. Así pues, en la Figura 2 se tiene como ejemplo un fragmento de una escena de Landsat 5, en concreto de la banda 5 sensible al infrarrojo cercano (Figura 2.a). Dado su histograma (Figura 2.b), se aprovecha el comportamiento claramente diferenciado entre tierra y mar: un nivel de intensidad ubicado entre los dos picos que se observan servirá para separar tierra y mar. Como consecuencia (Figura 2), el borde entre estas superficies delimitará el conjunto de puntos que formarán parte de la línea de costa aproximada (Figura 2.c)

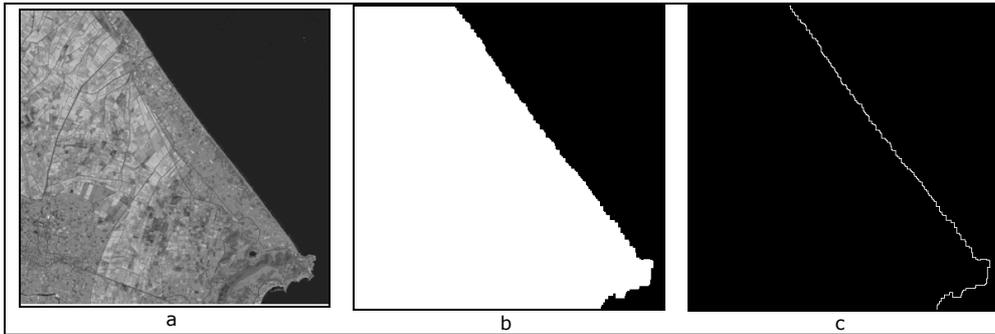


Figura 2. a) Imagen infrarroja (banda 4 de QB) . b) Imagen umbralizada distinguiendo tierra y mar. c) La línea del borde será considerada la línea de costa de partida.

(2) Para deducir la posición refinada se mantiene la idea de que tierra y mar tendrán un comportamiento espectral diferenciado. Por tanto, existe una condición que permite indicar dónde se pasa de una cobertura a otra y así delimitar la posición de la línea de costa que las separa. A esta condición espectral se ha de sumar la condición por la cual la línea de costa ha de tener continuidad.

Partiendo de una línea aproximada proponemos considerar que la línea de costa se encuentra en un punto de equilibrio alrededor de aquella y que diferenciará el comportamiento puramente terrestre y puramente acuático. Para ejemplificarlo, en la Figura 3, la línea discontinua representa un perfil hipotético formado por 7 píxeles y sus respectivos niveles de intensidad. En la parte izquierda del mismo se observan 3 píxeles que corresponderían a tierra (tomando valores de intensidad más elevados). Seguidamente, en el píxel central se da un valor de intensidad intermedio y es seguido por otros 3 de píxeles con valores de intensidad más bajos que simulan la fuerte absorción que estos píxeles sufrirían en el mar. La lógica nos dice que en el píxel central se está dando una mezcla espectral: bajo este píxel se da una absorción parcial debida al hipotético mar. El objetivo es obtener la posición exacta en que una cobertura da paso a la otra, es decir, aquel punto en que la tendencia de los píxeles terrestres da paso a los píxeles acuáticos. Nuestra propuesta es que tal punto se materializa como un *punto de inflexión* determinado.

Si tomamos esta idea de forma literal es posible recurrir al análisis de funciones. Para ello se proponen 2 pasos: **(1)** modelización y **(2)** deducción de la inflexión.

La modelización **(1)** consiste en obtener la curva (en forma de función polinómica) que describa mejor determinado perfil. En la Figura 3 se ha ajustado por mínimos cuadrados un polinomio de tercer grado dando lugar a la línea continua. Disponiendo de un polinomio es posible obtener literalmente el *punto de inflexión*. Siendo un punto de inflexión **(2)** aquel punto de una función en que se anula la curvatura, se resuelve encontrando los puntos que anulen la segunda derivada de la función original, es decir, en el polinomio que se ha ajustado previamente. Esta posición, obtenida de la función

ajustada, no está limitada a valores de píxel enteros sino que puede calcularse con decimales. Ello implica estar obteniendo una posición refinada con precisión sub-píxel.

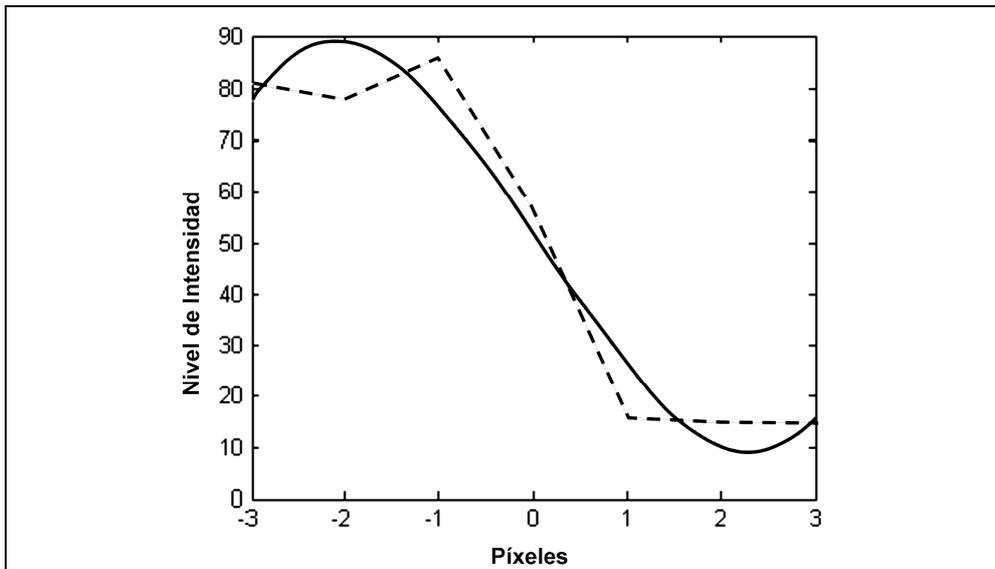


Figura 3. Perfil de píxeles de transición de tierra a mar (línea discontinua) y función ajustada (línea continua).

Efectivamente, tomar una línea de costa inicial, con precisión píxel y analizar un perfil a su alrededor en una dirección determinada puede dar por resultado una nueva posición con precisión sub-píxel. Sin embargo, es una solución incompleta por varias razones: **(i)** Trabajar mediante perfiles individuales en cada píxel aproximado lleva a que cada uno de ellos sea independiente del perfil vecino. Cada perfil es sensible a variaciones de los niveles de intensidad puntuales en un perfil concreto. Los puntos de inflexión concretos de cada perfil se ven muy afectados por las pequeñas variaciones puntuales (Almonacid-Caballer, 2007). Así, al unir las inflexiones de perfiles contiguos para formar la línea de costa, no se obtiene una línea continua como ha de ser una línea de costa. **(ii)** El perfil a analizar en cada píxel de costa aproximado depende de la tendencia que siga la línea aproximada y puede llevar a tomar perfiles en dirección incorrecta. **(iii)** Dado que se trabajaría a partir de cada píxel de la línea aproximada, y de cada uno se realizaría un refinamiento, se obtendrían puntos de mejor precisión pero tan sólo uno por cada píxel analizado, no se estaría aumentando la resolución de la línea de costa detectada.

Para resolver estas dificultades se propone ampliar los dos pasos de modelización y obtención de la inflexión del 'análisis de perfiles' al 'análisis de superficies'. Cada píxel de la línea aproximada sigue sirviendo como entrada para el análisis sub-píxel tomando ahora un vecindario a lo largo de las dos dimensiones alrededor de cada uno de ellos. Ahora el ajuste depende de dos parámetros: las posiciones x e y (Figura 4).

La Figura 4 representa el proceso de modelización. Así, el cuadro rojo en la Figura 4.a enmarca un pequeño vecindario alrededor de la línea de costa en una banda infrarroja. Siendo el cuadro del ejemplo de 7x7 píxeles, el nivel de intensidad de cada píxel puede representarse tridimensionalmente como una elevación en el eje Z (Figura 4.b) lo cual no deja de ser una 'superficie' dada por unos valores de x e y discretos.

En primer lugar, como en el ejemplo del perfil, se ha de encontrar la función matemática que represente de la mejor manera posible este vecindario. La expresión matemática ajustada modeliza los niveles de intensidad del vecindario y, siendo una expresión matemática, no tiene límite de resolución y es posible representarla para tantos valores de x e y como se desee (Figura 4.c). A partir del vecindario discreto y su 'superficie' se obtiene un polinomio ajustado y en consecuencia una 'superficie matemática'.

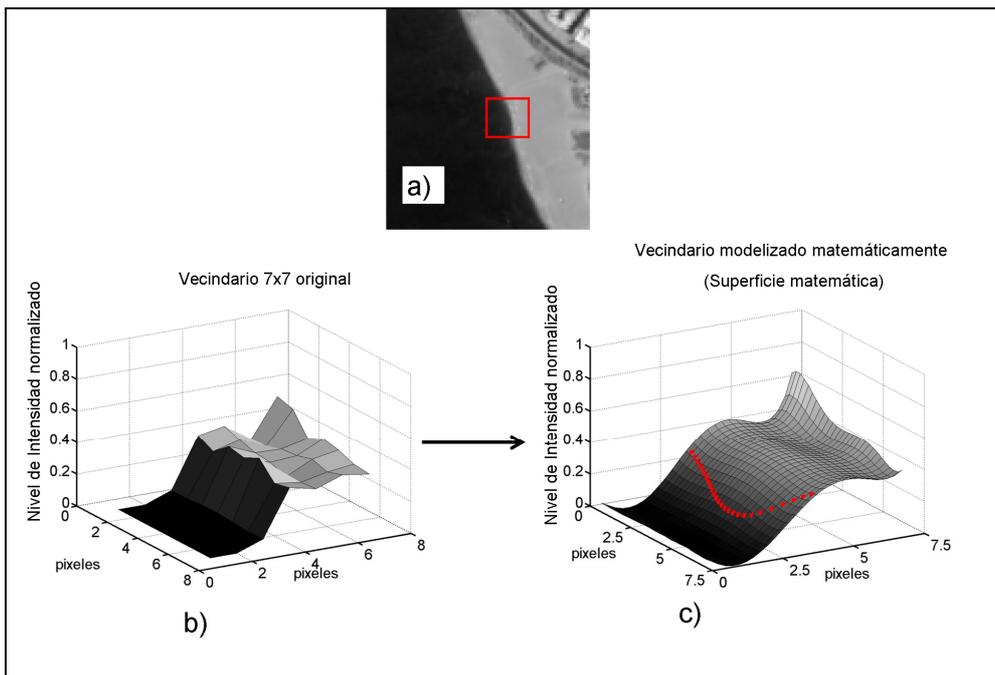


Figura 4. (a) Vecindario de 7x7 píxeles alrededor de 1 píxel de la línea de costa aproximada. (b) Representación tridimensional de los niveles de intensidad de un vecindario normalizados entre 0 y 1. (c) Superficie ajustada (superficie matemática) del vecindario y línea de máximo gradiente.

Se propone que la función matemática con que describir el vecindario alrededor de la línea de costa aproximada sea un polinomio ajustado mediante mínimos cuadrados. Para el ajuste mínimo-cuadrático de una función sobre el vecindario concreto, se dispondrá de un vecindario de $v \times v$ píxeles, en total n píxeles de valor conocido. Así, siguiendo un

modelo lineal, se tienen n ecuaciones y los parámetros del vecindario se resuelven de forma directa –ecuación (1)-:

$$\left. \begin{array}{l} z = a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot y + a_4 \cdot x \cdot y + \dots \\ \left(\begin{array}{ccccc} 1 & x_1 & y_1 & x_1 \cdot y_1 & \dots \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2 \cdot y_2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_n \cdot y_n & \dots \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ \vdots \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{array} \right) \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} A \cdot par = Z \\ par = (A^t \cdot A)^{-1} \cdot A^t \cdot Z \end{array} \quad (1)$$

En segundo lugar, al igual que en el ejemplo del perfil, una vez resueltos los parámetros a_i de la ecuación (1) se ha de encontrar la inflexión que define la línea de costa en el vecindario estudiado. Esta condición pasa por encontrar dónde se anula el laplaciano – ecuación (2)-:

$$\Delta f(x, y) = \frac{\delta^2 f}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 f}{\delta y^2} = 0 \quad (2)$$

Dependiendo del tipo de función o el grado del polinomio, esta condición puede llevar a varias soluciones. Es posible entender esta idea gráficamente. Partiendo de la función ajustada (superficie matemática en la Figura 4.c y Figura 5.b), se estará buscando la línea en que la curvatura y el laplaciano se anulan. Dado que el Laplaciano es también una función a lo largo de las dimensiones x e y , es posible representarlo gráficamente como superficie (Figura 5.a). La línea de inflexión buscada es, gráficamente, la intersección de la superficie laplaciano con el plano $Z = 0$. En la Figura 5.a. puede verse que tal plano intersecta con la superficie laplaciana en 3 líneas continuas rojas. De nuevo, de estas 3 líneas candidatas (y que se han superpuesto a la superficie matemática original del vecindario analizado, Figura 5.b), se busca aquella cuya pendiente (gradiente) sea mayor, aquí representada con la línea roja de mayor grosor (Figura 5.b):

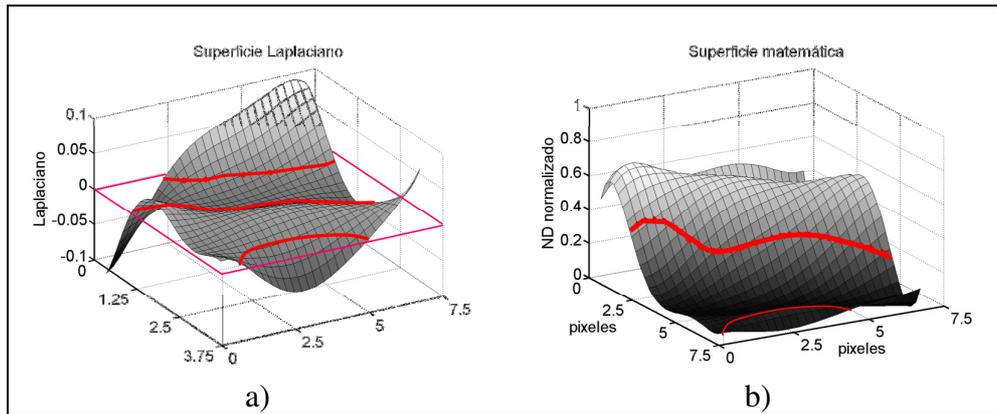


Figura 5. Líneas de inflexión (líneas rojas continuas) sobre (a) función laplaciano y sobre (b) la función ajustada de un vecindario concreto de 7x7 píxeles.

Concretamente, la distinción de qué puntos forman parte de la línea buscada se realiza mediante 2 criterios: máximo gradiente y formar parte de la transición agua-tierra. En las líneas anteriores (Figura 5) se observa que hay 3 líneas en que se da una inflexión y por tanto el laplaciano se anula, sin embargo, la pendiente (el gradiente) varía en los puntos que conforman tales líneas. La línea que queda más centrada en la Figura 5.b tiene una mayor pendiente, ese es el primer criterio mencionado. Por otro lado, una inflexión cualquiera no es indicativa de costa, la inflexión debe ubicarse en un paso tierra-mar. Esta condición se logra fijando una norma por la que que, en cada perfil de la superficie matemática, a lo largo de los ejes x ó y constantes $f(x = cte, y)$ o $f(x, y = cte)$, la función incluya valores por encima y por debajo del umbral obtenido inicialmente para la imagen. Esta condición obliga a que en el perfil se incluyan píxeles que hayan sido pre-clasificados como tierra y mar tras la umbralización (o binarización de la imagen). Los puntos seleccionados serán los puntos candidatos a definir la línea de costa definitiva (Figura 6).

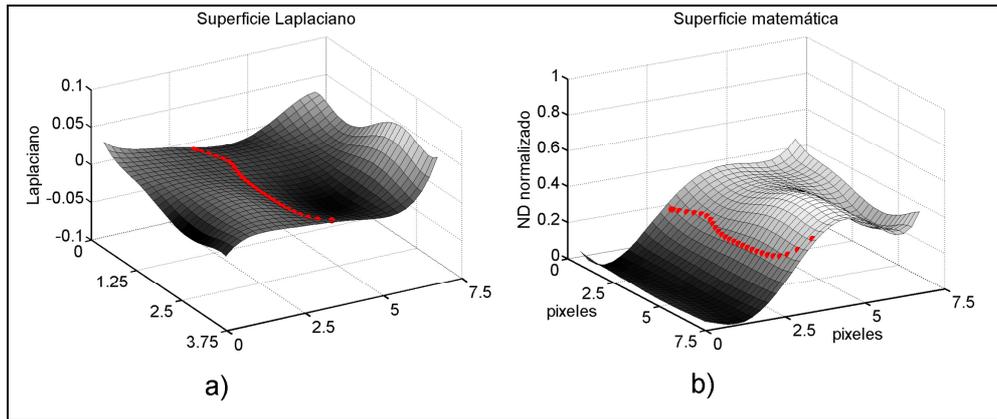


Figura 6. Líneas de inflexión (líneas rojas continuas) y además de máximo gradiente sobre (a) función laplaciano y sobre (b) la función ajustada de un vecindario concreto de 7x7 píxeles.

Este análisis debe ser realizado para cada píxel de la línea aproximada. Del análisis de cada vecindario se obtiene un fragmento de costa. En la Figura 7 se marca con una cruz roja el mismo píxel y se observa que el cuadro de análisis se mueve obteniendo en cada caso un fragmento de línea de costa. Dado que hay zonas en que se solapan distintas líneas de costa de diferentes vecindarios, la información es redundante. Es decir, en un mismo píxel, que ha formado parte de diferentes vecindarios, coexisten varias soluciones.

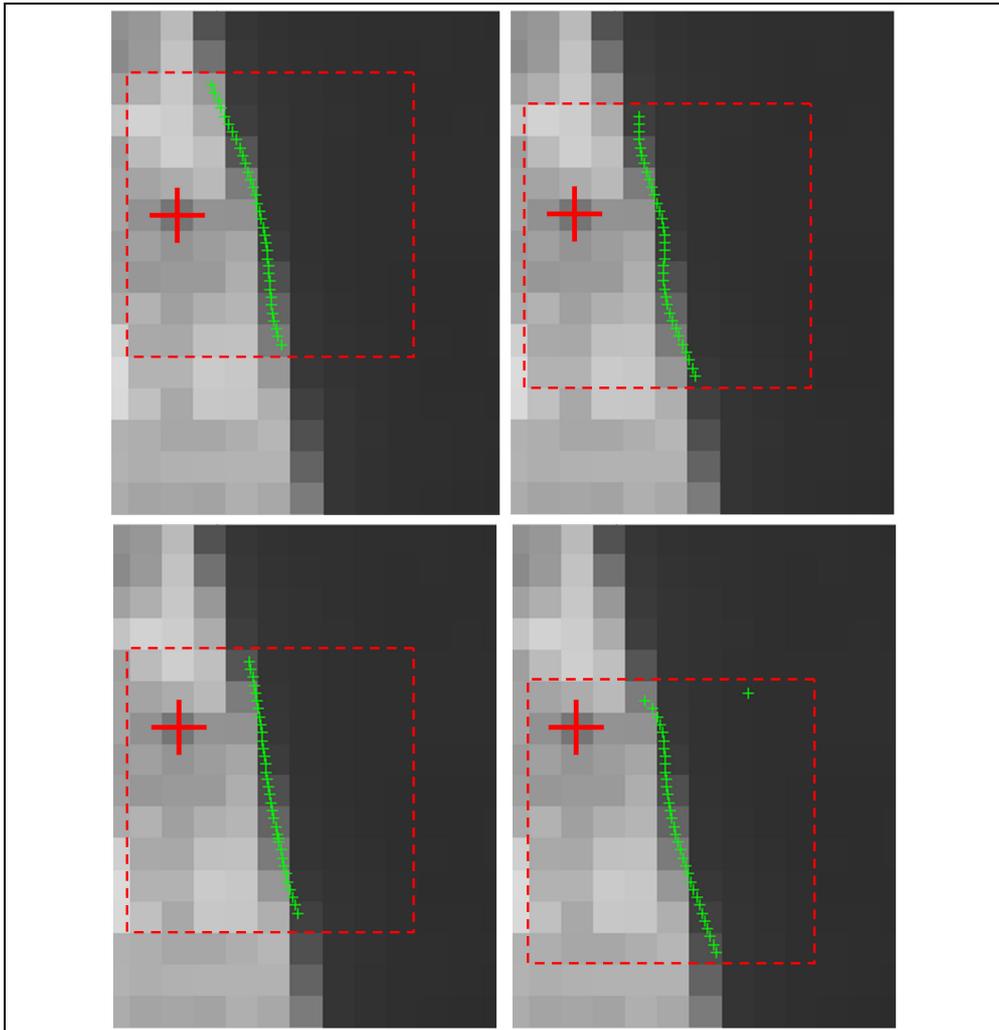


Figura 7. El recuadro en rojo discontinuo abarca 9x9 píxeles. Al analizar cada vecindario 9x9 se obtiene una línea de costa parcial (puntos verdes). La cruz roja indica el mismo píxel en todas las imágenes. Se observa que conforme se desplaza el vecindario 9x9, las líneas de costa se superponen. Ello implicará obtener posteriormente un promedio de tales líneas.

Para obtener una solución única a partir de todas las pequeñas soluciones solapadas, se realiza un promedio de todas ellas. Tal solución media será la línea de costa definitiva a nivel sub-píxel.

Esta forma de operar presenta dos ventajas que merecen ser destacadas. Por un lado, **(i)** la redundancia que ofrece el recorrer cada segmento de línea de costa en diversos

vecindarios aporta continuidad al trazado de la línea final deducida. Por otro lado, **(ii)** cada punto de segmento de costa que aporta cada vecindario (puntos verdes en la Figura 7 y la Figura 8) puede ser ponderado a la hora de obtener la línea media definitiva (línea rosa en la Figura 8). ¿Cómo realizar esa ponderación? Al ajustar una función, es previsible que la zona central del vecindario quede mejor representada por dicha función que las zonas externas. Por tanto, es previsible que los puntos (en verde en la Figura 8) tengan un comportamiento más real y lógico (para con la continuidad de la línea de costa real) cuando han sido deducidos en la parte central de su respectivo vecindario.

La Figura 8 resume el proceso seguido: tras obtener la línea aproximada a nivel de píxel (en línea azul discontinua), se ajusta cada vecindario para resolver su línea de máximo gradiente (en verde). Por último, se promedian las diversas soluciones del global de vecindarios analizados obteniendo la línea definitiva (en rosa).

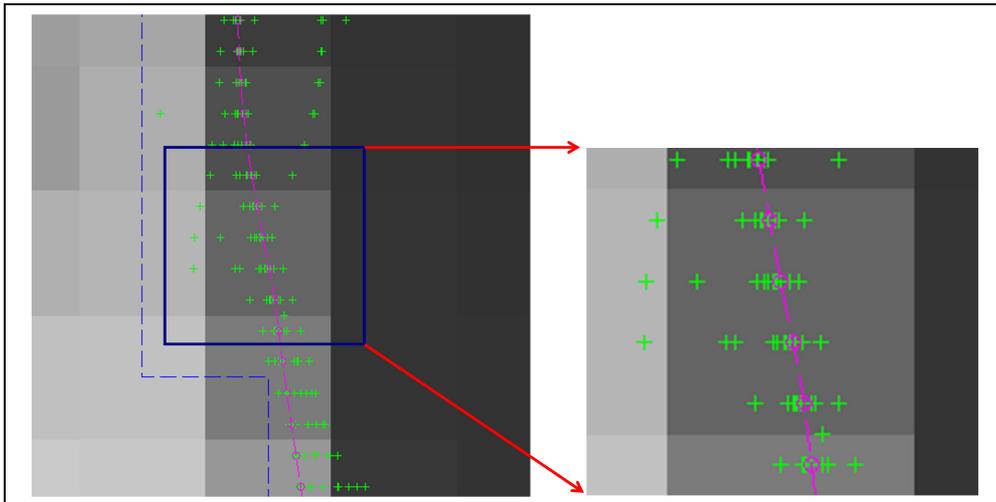


Figura 8. En azul discontinuo, línea uniendo el centro de los píxeles de línea aproximada. En verde, puntos de las líneas de cada vecindario analizado. En rosa, línea promedio, línea de costa sub-píxel definitiva.

Una vez descrito el algoritmo propuesto, podemos centrar la atención en el hecho de que existen 2 variables a disposición del usuario: el tamaño de ventana (vecindario) a analizar alrededor de cada píxel aproximado y la resolución geométrica (número de puntos a extraer por cada píxel inicial) con que representar la línea de costa resultante.

2.2.2. Procedimiento de evaluación

La dificultad para evaluar un resultado cuya precisión está por debajo del tamaño de píxel radica en que no es posible seguir un criterio de fotointerpretación. Es necesario

disponer de una información de referencia con tanta o mejor definición que aquella buscada en el resultado del algoritmo propuesto.

En la presente tesis se obtiene como resultado una línea de costa por cada escena analizada. Se propone aquí realizar la evaluación midiendo la distancia entre cada punto de la línea obtenida a otra línea que sirva como referencia. Ahora bien, es importante saber si el error se comete hacia tierra o hacia mar. En las aplicaciones de software comerciales existen herramientas para el cálculo de esta distancia pero, aunque aporten la distancia de cada punto a la línea de referencia y el azimuth de la línea en que se mide esa distancia no informan acerca de si esa alineación se da hacia el mar o hacia tierra. Esta forma de realizar el cálculo puede llevar a error.

Supongamos el litoral valenciano en que la tendencia principal de la costa es norte-sur. Se tendrá cierta seguridad de que todo error con azimuth hacia el este implicará un error mar adentro mientras que todo error con azimuth hacia el oeste implicará un error tierra adentro. Sería posible asignar un signo a cada distancia en función del azimuth. Sin embargo, no se trata de un criterio fiable si existen distintas orientaciones como en una isla o en un lago. Para solventar este problema y automatizar la evaluación se ha retomado la modelización matemática del vecindario de la banda infrarroja para cada punto analizado (Figura 9). De esta manera, el propio gradiente de la función ajustada alrededor de un punto de la costa indica la dirección tierra-mar. Un error positivo indica que el punto ha quedado mar adentro, y el error negativo indica que ha quedado tierra adentro.

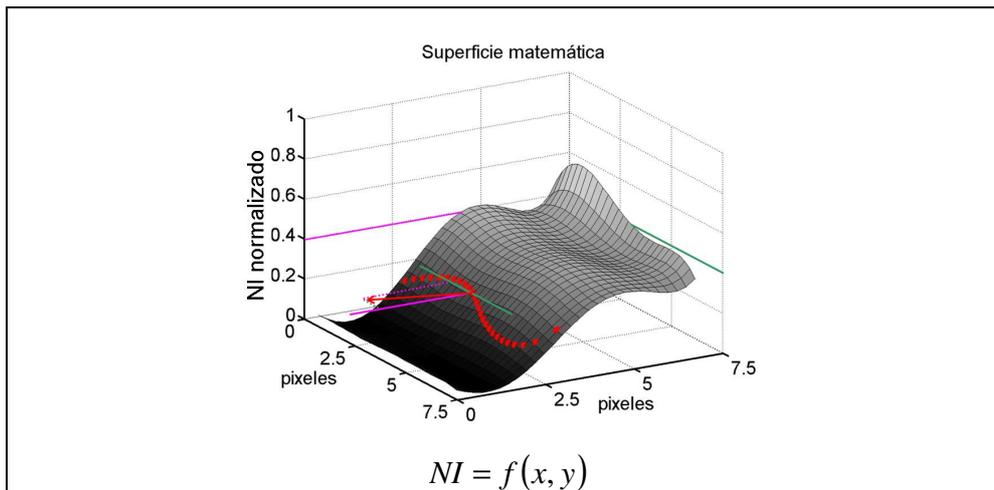


Figura 9. Superficie matemática de los niveles de intensidad de un vecindario analizado. En rosa líneas paralelas al eje de abscisas (x) y en verde, líneas paralelas al eje de ordenadas (y). El gradiente es la derivada direccional de la superficie por lo que tiene dos componentes. Estas dos componentes del gradiente sirven para indicar vectorialmente (flecha roja asociada a un punto de la

línea de inflexión) la dirección en que se encuentra la zona oscura e, interpretando su significado, la dirección que toma la línea de costa en ese punto.

El resultado de la evaluación es el cálculo de la distancia de cada punto de la línea obtenida hasta el punto más cercano de la línea de referencia en la dirección tierra-mar, así como el azimut definido por el gradiente en tal punto. Esta forma de trabajar permite realizar la evaluación automática para todas las direcciones posibles.

2.2.3. Aplicación de la metodología

Se podría pensar que, dado que el objetivo de la tesis es la obtención de líneas de costa a partir de imágenes de cualquier plataforma Landsat, que el procedimiento lógico sería aplicar el algoritmo a sus imágenes y evaluar el resultado con alguna línea de referencia. Ello presenta dos inconvenientes: por un lado, ¿cómo obtener o fotointerpretar líneas de referencia útiles para cualquier escena Landsat? Y, por otro lado, si las líneas obtenidas de imágenes Landsat han de compararse con líneas provenientes de otra fuente de información ¿con qué precisión están estas imágenes georreferenciadas? ¿es suficiente esta precisión?.

Las especificaciones técnicas de las imágenes Landsat provenientes por el Servicio Geológico de los EEUU (USGS) garantizan una precisión en la georreferenciación inferior a 0,44 píxeles, unos 13 m, como se verá en detalle en el capítulo IV. Esta precisión es una indeterminación que invalidaría la utilidad de las líneas de costa obtenidas aun cuando, dentro de cada imagen, las líneas alcanzaran mejores niveles de precisión. Además, la experiencia ha demostrado que, en ocasiones, el error en la georreferenciación de las escenas Landsat es mayor al esperado según las mencionadas indicaciones del USGS, llegando a ser visible a simple vista.

Por todo ello, es necesario realizar una evaluación del algoritmo de forma independiente a cualquier condicionante externo.

La aplicación concreta de las metodologías propuestas en este capítulo sigue la misma lógica seguida en Almonacid-Caballer (2007), presentada diversos congresos (Ruiz et al. 2007; Pardo-Pascual et al., 2008) y muy similar a la empleada en los trabajos de Muslim et al. (2006) y Foody et al (2005) quienes emplearon una imagen IKONOS de 1 m de resolución para degradarla hasta los 20 m simulando así una escena SPOT.

Así pues, el planteamiento ha sido emplear diversas escenas QuickBird como información de partida. La banda infrarroja de QuickBird equivale espectralmente a la banda 4 de Landsat 5 y 7 y a la banda 5 de Landsat 8. Sobre cada escena QuickBird, en su resolución original (2,4 m/píxel), se fotointerpreta la correspondiente línea de costa. Por otro lado, cada banda infrarroja es remuestreada a resoluciones menores simulando escenas de menor resolución. Concretamente, las escenas han sido remuestreadas a resoluciones iguales a 9,6, 14,4, 19,6, 24,0, 28,8 y 33,6 m/píxel.

Esta manera de proceder salva los inconvenientes planteados anteriormente dado que la línea fotointerpretada proviene de la misma escena sobre la que, en sus diferentes remuestreos, se aplicará el algoritmo de extracción de línea de costa. A su vez, disponer de diferentes degradaciones permite un análisis más profundo del comportamiento del algoritmo a diferentes resoluciones hasta alcanzar una resolución similar a la de las escenas Landsat.

2.3. Escenas analizadas y fotointerpretación de las líneas de referencia

Se ha empleado un total de 5 escenas QuickBird que abarcan un sector de playa arenosa al sur de Valencia. Concretamente las escenas toman desde la desembocadura del río Turia hasta un kilómetro al sur del cabo de Cullera (Figura 10). La razón de tomar esta zona es la tendencia rectilínea de su costa a lo largo de más de 25 kilómetros. Estas extensión y sencillez en el trazado de la línea de costa son convenientes, a priori, para una evaluación correcta de la metodología.

No es objeto de este capítulo el realizar un análisis geomorfológico de la zona sino evaluar el algoritmo de extracción de la línea de costa. Sin embargo, como información auxiliar será necesario mencionar las circunstancias y características aproximadas que se observen en las escenas. Respecto a las 5 escenas de la zona, presentan gran variedad de circunstancias que afectan a la posición de la línea de costa registrada en cada una de ellas (Tabla 1) y condicionan tanto la fotointerpretación como la idoneidad de las mismas para el proceso de evaluación.

Tabla 1. Características de las imágenes QuickBird analizadas.

Imagen QuickBird	Estado de la iluminación	Estado del mar
26 de octubre de 2004	Hora: 10:55 (GMT) Sin afección fuerte de nubes. El relieve no afecta a la zona costera salvo puntualmente al norte de la zona 3.	En calma. Escasas zonas de oleaje. No afectan a la fotointerpretación pero pueden afectar a la línea extraída. Indeterminación de área de mojado normalmente menor a 3 píxeles. Se interpretará la línea de costa como zona intermedia de mojado con un margen de 1 píxel. Altura significativa (H_S): 0,18 m
18 de julio de 2005	Hora: 11:06 (GMT) Sin afección de nubes ni relieve	En calma. Situación casi ideal. Sin existencia de zonas de oleaje. Alguna zona de turbidez o transparencia en la zona más meridional (zonas 1 y 2). Indeterminación de área de mojado normalmente menor a 3 píxeles. Se interpretará la línea de costa como zona intermedia de mojado con un margen de 1 píxel. Altura significativa (H_S): 0,42 m
4 de enero de 2006	Hora: 11:04 (GMT) Sin afección fuerte de nubes. El relieve no afecta a la zona costera salvo puntualmente al norte de la zona 3.	Oleaje con espuma. Amplias zonas de oleaje del orden de hasta 250 m mar adentro en todos los segmentos de playa. Fuerte indeterminación en la fotointerpretación en algunos espacios siendo el error cometido siempre tierra adentro. Altura significativa (H_S): 0,86 m
9 de abril de 2006	Hora: 11:13 (GMT) Sin afección de nubes ni relieve	En calma. Alguna zona de turbidez o transparencia en la zona más meridional (zonas 1 y 2). Presenta con asiduidad zonas de arena mojada tierra adentro; no suponen un problema para la interpretación de la línea agua/no agua. Indeterminación de área de mojado normalmente menor a 3 píxeles. Se da en ocasiones zonas de escasa pendiente en que la transición al mar transcurre en más de 3 píxeles, se toma la posición intermedia de esta transición. Altura significativa (H_S): 0,28 m

27 de noviembre de 2006	Hora: 10:52 (GMT) Afección de sombras de nubes en altura. Las nubes no aparecen en la escena pero sí su sombra.	Oleaje con espuma. Amplias zonas de oleaje del orden de hasta 350 m mar adentro en todos los segmentos de playa. Fuerte indeterminación en la fotointerpretación en algunos espacios siendo el error cometido siempre tierra adentro. Altura significativa (H_s): 1,44 m
-------------------------	--	--

Sobre cada una de las imágenes se ha fotointerpretado manualmente la línea de costa que será tomada como referencia. Tales líneas han sido divididas por tramos para identificar mejor comportamientos diferenciados (Figura 10).



Figura 10. Línea de referencia en la zona de análisis, desde el puerto de Valencia al norte al término de Cullera al sur. La numeración indica las diferentes zonas de análisis; en 0 se indican segmentos concretos excluidos por tratarse de espacios que no son playas sino estructuras artificiales.

El conjunto de imágenes engloba casos muy diversos tanto de espacios costeros como de características del momento de la toma. Todos los espacios analizados son zonas de playa a excepción de las zonas 0 y la zona 3. Las zonas numeradas con un 0 indican espigones y estructuras artificiales, la zona 3 (Figura 11) es una zona de acantilados.

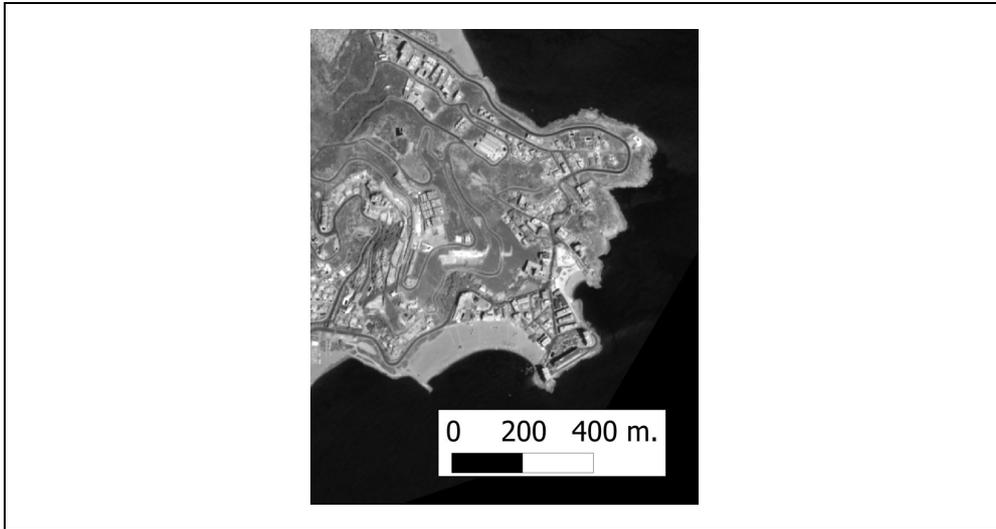


Figura 11. Detalle de la zona 3, correspondiente a Cullera. Zona acantilada y con inflexiones en el trazado de la línea de costa

Las características del momento de la toma también condicionan el trazado y fiabilidad de las líneas fotointerpretadas que han de servir como líneas de referencia. El caso idóneo se ha encontrado en escenas tomadas con lo que visualmente parece mar en calma, donde se distingue con claridad la posición del agua y una leve zona de mojado. La Figura 12 representa en rojo la línea de agua/arena y en naranja la de arena mojada/seca. En unas ocasiones ambas líneas quedan cerca y no es posible delimitar las dos líneas por separado. En otras ocasiones, si ambas líneas se separan lo suficiente como para ser fotointerpretadas como líneas separadas, la delimitación es más sencilla. Como respuesta a este hecho pueden darse 3 interpretaciones posibles de la línea de costa: **a)** la línea de agua/arena (o agua y zona seca en términos generales), **b)** la zona interfaz de arena seca/mojada si se interpreta que el contenido de agua en la arena es significativo, o bien, **c)** el punto intermedio entre ambas líneas.

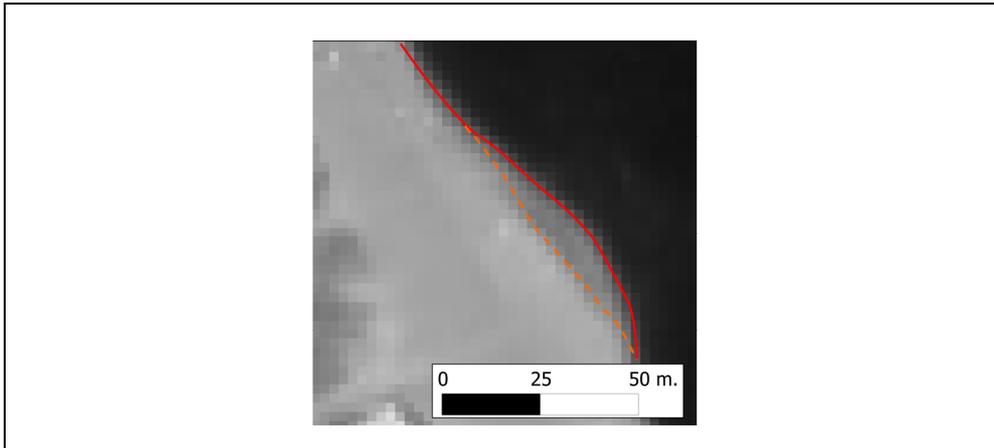


Figura 12. En rojo continuo, línea de agua/arena, margen de error en casos ideales ± 1 píxel. En naranja discontinuo, la separación de arena mojada/seca.

Esta duda interpretativa plantea dos cuestiones: ¿qué línea de costa es la que se desea detectar?, y ¿qué línea de costa se detecta por el método propuesto?

Durante el proceso de fotointerpretación se ha encontrado casos de duda. Por ejemplo cuando se ha observado que la arena adyacente a la línea de costa está mojada y el ancho de estas zonas de mojado varía a lo largo del área de estudio. Esto lleva a tener en cuenta que ciertos espacios costeros, aun en situación de aguas en calma tienen una pendiente muy baja pueden llevar a distintos anchos de zona de mojado como se ha observado visualmente. Cabe apuntar que, si bien no es objeto de esta tesis cuantificar la importancia de estas zonas, podrían abarcar decenas de metros aun tratándose de un muy escaso rango mareal. Esta llamada de atención habrá de ser tenida en cuenta en zonas meso y macro-mareales. Se ha observado también que el infrarrojo no siempre se descende de intensidad completamente en la cercanía de la costa. Es posible que la turbidez de las aguas arenosas tenga una reflectancia mayor que las aguas limpias y profundas.

Por otro lado, la diferencia de iluminación y sombras juega un papel importante en las zonas de análisis. Si se observa el norte de la zona 3 es claro el efecto de las sombras de una escena a otra. Las sombras pueden deberse a efectos del relieve o a la existencia de nubes (Figura 13).

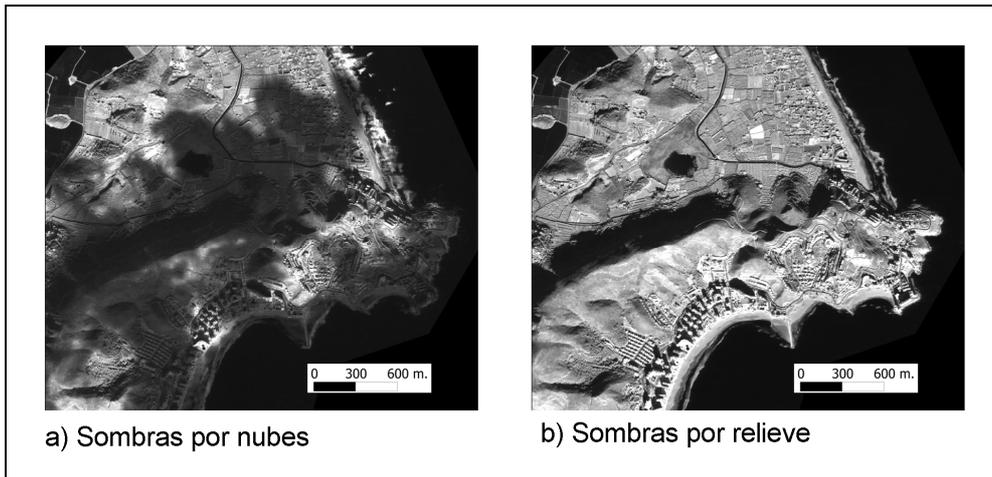


Figura 13. Doble origen de sombras observado en las imágenes. En la Figura 11 aparece un caso ideal de esta misma zona sin efecto de sombras u olas.

Este hecho, altera sustancialmente la reflectancia en ciertos espacios y puede afectar a la línea de costa deducida por el algoritmo. Por ello ha de cuestionarse si estas zonas han de formar parte de la calibración (Figura 14).

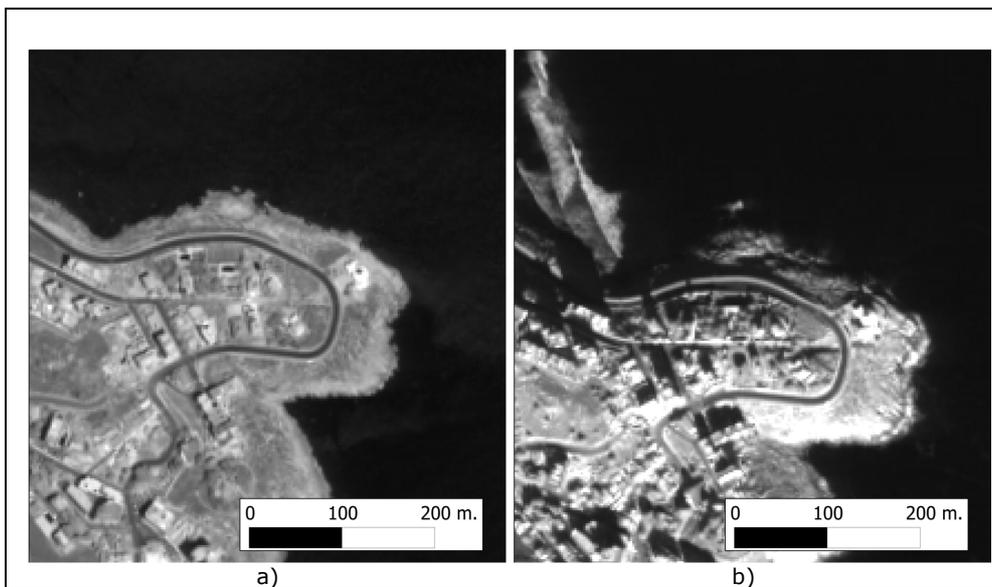


Figura 14. Norte de la zona 3 de estudio en fechas de 9 de abril (a) y 4 de enero de 2006 (b). El relieve produce sombras que afectan tanto a la fotointerpretación como al algoritmo que tomará estas imágenes como datos de entrada.

2.4. Aplicación y análisis de resultados

Recapitulando brevemente, la metodología ha sido la siguiente: Se ha digitalizado una línea de costa para cada imagen QuickBird en alta resolución (2,4 m). Cada una de ellas ha sido degradada a 6 resoluciones menores (9,6, 14,4, 19,6, 24,0, 28,8 y 33,6 m/píxel) sobre las que se han extraído las respectivas líneas de costa con el algoritmo propuesto. Se ha calculado la distancia de las líneas provenientes de las imágenes degradadas a sus correspondientes líneas de referencia.

La ejecución del algoritmo deja a disposición del usuario la modulación de dos parámetros (que en inglés se denominan parámetros *tuning*): **(i)** vecindario que se analiza alrededor de cada píxel de la línea aproximada y **(ii)** factor de densificación (cuántos puntos se extraen por cada píxel original). En concreto, las posibilidades analizadas para cada resolución se muestran en la Tabla 2. El tamaño de vecindario afecta al número de píxeles aunque el grado de polinomio a ajustar se mantiene constante. Por otro lado, a más densificación, más cercanos quedan entre sí los puntos de línea de costa obtenidos finalmente.

La selección de estos valores concretos ha sido consecuencia de la observación e interpretación directa de cada imagen. Por un lado se ha procurado que el vecindario tomado en cada resolución fuera suficiente para abarcar el cambio tierra-mar de forma significativa, ello implica la necesidad de tomar más píxeles en imágenes de menor tamaño de píxel. Por otro lado, tomar un vecindario mayor o menor afecta al número de ecuaciones disponibles para el ajuste mínimo cuadrático de la función. Como consecuencia, aunque a menores resoluciones no es necesario tomar un vecindario demasiado amplio para abarcar con seguridad zonas de tierra y mar, se ha observado que un ajuste correcto para un polinomio bidimensional de grado 5 requiere un mínimo vecindario de 7x7 píxeles, disponiendo así de al menos 49 ecuaciones con que resolver el sistema mínimo cuadrático.

En la Tabla 2 se resumen todas las combinaciones de parámetros a disposición del usuario empleadas para los resultados de este capítulo. Se observa un total de 14 combinaciones posibles. Cada una de ellas aplicada a cada una de las 5 escenas QuickBird, por lo que se dispone de un total de 70 líneas a analizar.

Tabla 2. Combinaciones de resolución, vecindario y factor de densificación de puntos empleados.

Resolución	Vecindario ($n \times n$)		Factor	Distancia entre puntos
	Píxeles	metros		
9,6	11	105,6	2	4,8
	15	144	1	9,6
14,4	11	158,4	2	7,2
	15	216	2	7,2
19,2	7	134,4	4	4,8
	11	211,2	2	9,6
	11	211,2	4	4,8
24,0	7	271,7	4	6
	11	264	2	12
	11	264	4	6
28,8	7	201,6	4	7,2
	11	316,8	4	7,2
33,6	7	235,2	4	8,4
	11	369,6	4	8,4

Pese a que el objetivo de este capítulo es métrico y pretende calibrar la precisión del algoritmo propuesto no se ha podido obviar que la fotointerpretación en cada imagen ha tenido sus particularidades y que éstas pueden afectar al comportamiento de la costa obtenida. Por ello se analiza en primer lugar el efecto de lo que se ha denominado "variables contextuales" como puedan ser la espuma de ruptura de olas, las sombras y el comportamiento diferenciado en cada segmento/zona de análisis. El efecto de estas variables se menciona pero no se cuantifica puesto que sólo se emplea para justificar por qué ciertas zonas o imágenes no son empleadas en la evaluación métrica final.

2.4.1. Análisis de variables contextuales

Se analizan seguidamente los errores que se han obtenido por cada línea, así como su dispersión. Los análisis siguientes siguen dos enfoques. En el primero se analiza el desplazamiento medio de toda la línea obtenida sin distinción de zonas. Se podrá tener una visión global de la resolución geométrica de cada imagen y la precisión alcanzada. En el segundo, se analiza el comportamiento de las líneas obtenidas en cada zona, pudiendo matizar la relación entre las condiciones en cada fecha y la respuesta de la línea según el espacio de costa.

Tras el análisis de contexto se considerará si todas las líneas, y en todos los espacios, son aptas para evaluar numéricamente la precisión del algoritmo.

2.4.1.1. Comportamiento medio por resolución y fecha

En principio, todas las zonas de estudio son válidas para el análisis salvo aquellas clasificadas con valor 0 (ver Figura 10) por ser zonas con inflexiones demasiado abruptas como para ser trazadas correctamente. Las distintas opciones de cálculo a disposición del usuario y escogidas para el procesado de las pruebas aquí realizadas quedan indicadas en la Tabla 2.

Las distancias del conjunto de puntos que forman parte de cada línea a sus respectivas líneas de referencia permiten realizar un análisis del error medio (Tabla 3 y Figura 15) y del error medio cuadrático (Tabla 4 y Figura 16) EMC.

Tabla 3. Errores medios obtenidos. Distancia media a la línea de referencia de cada línea de costa y sus respectivos parámetros de cálculo.

Características de imagen y cálculo			Error medio por fecha (metros)				
Resolución	Vecindario (nxn píxeles)	Factor	26_10_2004	18_07_2005	04_01_2006	09_04_2006	27_11_2007
9,6	11	2	0,554	1,496	27,845	0,982	72,266
	15	1	0,263	1,772	37,897	0,999	65,021
14,4	11	2	-0,215	0,197	39,350	-1,362	68,083
	15	2	0,862	1,078	39,227	-0,542	74,915
19,2	7	4	-2,330	0,441	44,972	-1,528	84,973
	11	2	0,083	0,808	42,872	-0,776	80,713
	11	4	1,396	0,369	46,342	-0,837	80,745
24,0	7	4	-2,220	0,782	50,277	-1,343	90,639
	11	2	3,033	1,414	42,661	0,080	109,428
	11	4	3,485	0,645	42,237	-0,605	112,760
28,8	7	4	-2,470	1,390	50,462	-0,866	99,090
	11	4	2,100	1,199	41,322	0,485	101,672
33,6	7	4	-1,773	1,312	50,417	-0,462	104,733
	11	4	6,180	1,734	42,124	2,631	132,209

La Figura 15 permite visualizar los datos numéricos de la Tabla 3. Representan la distancia media de todos los puntos de cada línea obtenida respecto a su referencia. Esta distancia media indica el desplazamiento medio de la línea obtenida y permite detectar comportamientos sistemáticos. Ha de destacarse que la variación de los errores medios

al modificar los parámetros de cálculo son menores a $\pm 3,5$ m salvo para las imágenes de 4 de enero de 2006 y del 27 de noviembre de 2007. Por tanto, en este primer análisis se considerará que los parámetros de cálculo no afectan significativamente a las líneas obtenidas.

Tanto la Figura 15 como la Figura 16 se componen de 6 gráficas, una por cada resolución geométrica de imagen con que se ha trabajado. En cada gráfica, a su vez, se observa una muestra de los resultados obtenidos al variar los parámetros con la que fue calculada (tamaño de vecindario y factor de densificación). Así, por ejemplo, la expresión "9.6_11x11_f2" indica haber trabajado con una imagen de 9,6 m/píxel de resolución empleando un vecindario de 11x11 píxeles y en cuyo resultado se han extraído 2 puntos por píxel.

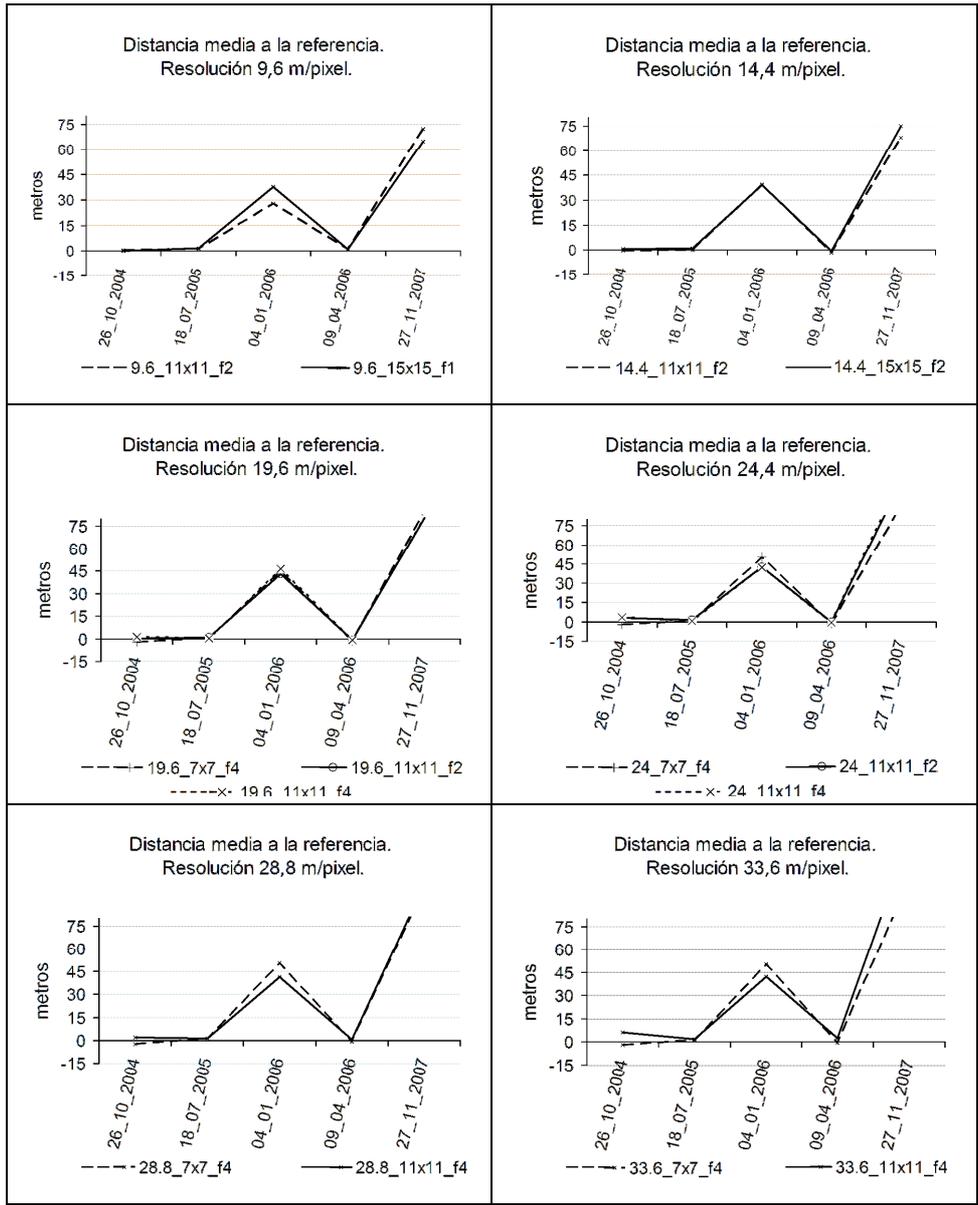


Figura 15. Distancias medias a las líneas de referencia de cada línea de costa y sus respectivos parámetros de cálculo.

Tabla 4. Errores medios cuadráticos obtenidos (EMCs) de cada línea de costa y sus respectivos parámetros de cálculo.

Características de imagen y cálculo			Error medio cuadrático por fecha (metros)				
Resolución	Vecindario (<i>n</i> x <i>n</i> píxeles)	Factor	26_10_2004	18_07_2005	04_01_2006	09_04_2006	27_11_2007
9,6	11	2	21,141	10,160	65,464	12,420	126,592
	15	1	10,137	9,132	70,488	11,165	132,241
14,4	11	2	21,920	4,176	69,837	4,276	123,522
	15	2	28,145	9,233	73,196	10,456	133,630
19,2	7	4	18,500	3,850	70,036	3,273	123,643
	11	2	26,769	5,039	71,364	6,503	126,939
	11	4	26,910	4,933	77,105	7,739	128,892
24,0	7	4	17,683	3,499	73,454	3,968	123,174
	11	2	29,929	8,032	72,947	8,208	146,407
	11	4	29,164	7,895	73,124	7,825	148,155
28,8	7	4	19,492	5,151	71,722	4,613	126,748
	11	4	32,414	7,886	72,883	9,474	124,877
33,6	7	4	22,915	5,513	74,094	5,175	122,404
	11	4	35,896	8,518	73,136	12,671	154,165

La Figura 16 permite visualizar los datos numéricos de la Tabla 4 y corresponde a los errores medios cuadráticos obtenidos.

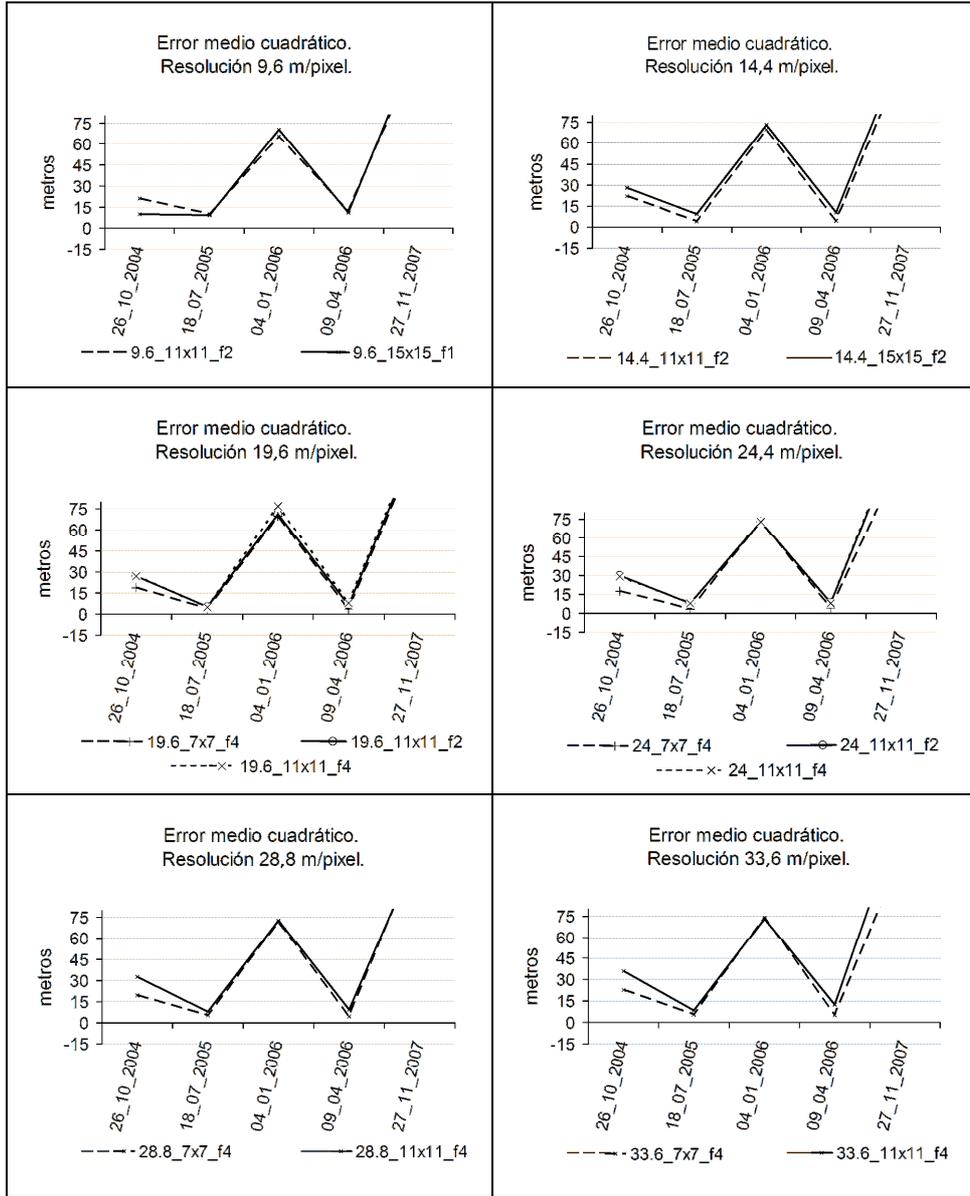


Figura 16. Errores medios cuadráticos obtenidos (EMCs) de cada línea de costa y sus respectivos parámetros de cálculo.

Se observa que las imágenes del 4 de enero de 2006 y 27 de noviembre de 2007 presentan errores medios muy elevados -superiores a los 30 m- así como un error medio cuadrático también elevado -alrededor de 60 m-. Aún más, este hecho se da para todas las resoluciones con que se ha trabajado.

La razón principal de este resultado es visible en la Figura 17. En ella se muestra un detalle de la imagen de 4 de enero de 2006 y se observa (al igual que en la de 27 de noviembre de 2007) en el mar la existencia de amplias manchas de espuma en la zona de rompientes. De hecho, abarca lo suficiente para ser perceptible a nivel píxel en la imagen ya degradada a 33,6 m/píxel. La espuma generada en el mar por la ruptura de olas tiene una reflectividad alta en la frecuencia infrarroja por lo que no se dan las condiciones para que la línea detectada coincida con la orilla.

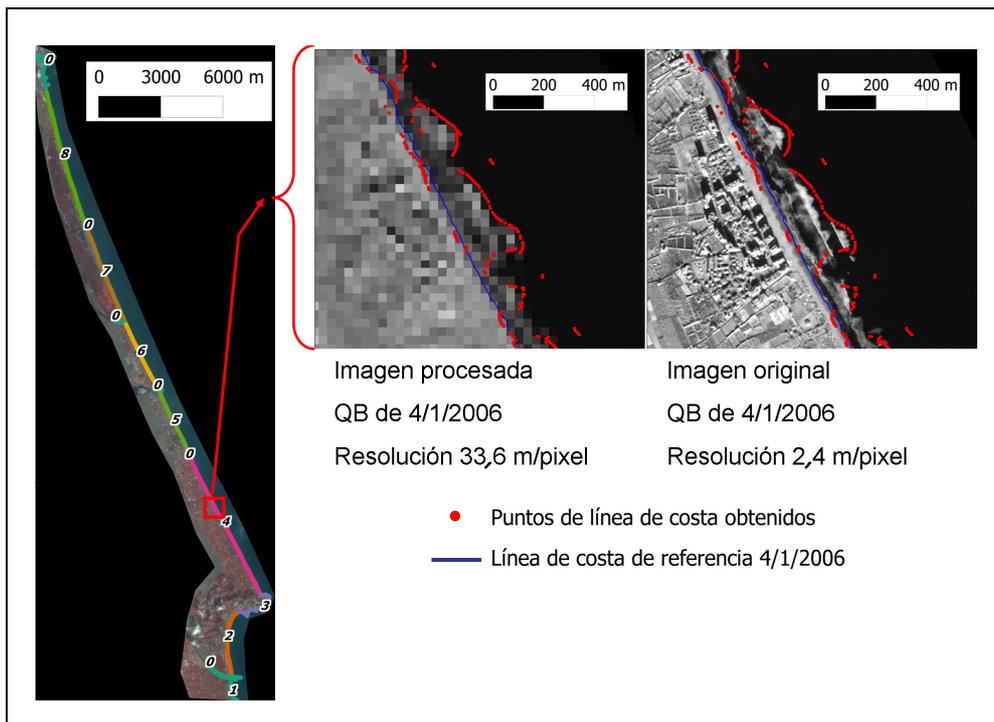


Figura 17. La espuma en la zona de ruptura de olas, pese a ser agua, presenta fuerte reflectividad en la frecuencia del infrarrojo y genera falsas líneas de costa.

La Figura 17 complementa las observaciones realizadas hasta ahora: se verifica que las olas desplazan la línea a aquella posición en que rompen, aunque ciertos puntos quedan también cerca de la orilla como causa de dobles gradientes (se detecta la interfaz espuma-mar y ocasionalmente la posición de la orilla).

2.4.1.2. Comportamiento diferenciado por segmento de estudio

Tras haber realizado un análisis general (Tabla 3 y Figura 15, Tabla 4 y Figura 16), conviene relacionar las diferentes respuestas del algoritmo con las características de las diversas zonas. Como ya se indicó, el hecho de variar los parámetros de cálculo para la obtención de la línea de costa en cada fecha y en cada resolución, no afecta significativamente a los resultados iniciales. Por ello, y sin riesgo de perder rigor, se analiza seguidamente un único resultado promedio por cada imagen y cada resolución.

En la Figura 18 (cuyos valores numéricos se encuentran en la Tabla 39) se observa el error medio cometido por el conjunto de líneas extraídas para las diferentes resoluciones y para las diferentes zonas en que se ha segmentado la zona de análisis. Cada recuadro corresponde a cada una de las imágenes/fechas analizadas.

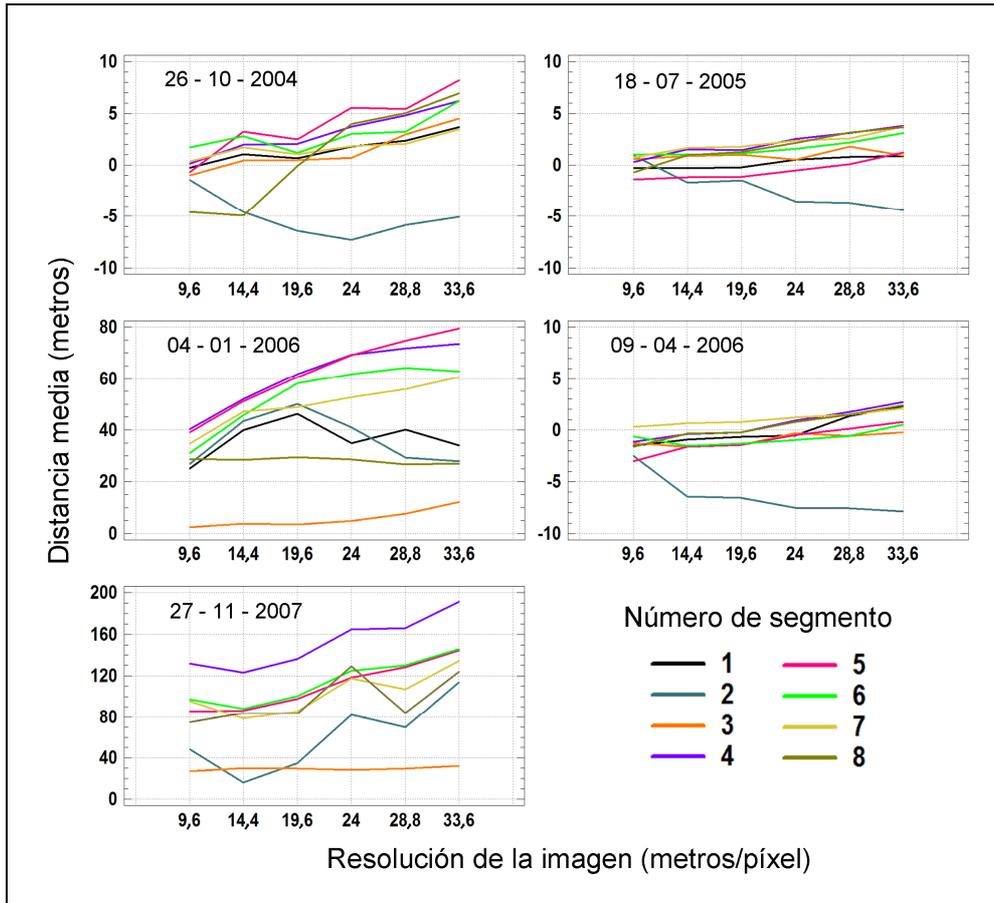


Figura 18. Errores medios cometidos en cada segmento de análisis en cada imagen analizada en sus diferentes resoluciones espaciales. El efecto de diferentes vecindarios y factores de densificación ha sido promediado. Obsérvese que el eje Y varía según la fecha dadas las elevadas diferencias.

En primer lugar, se observa que la imagen de 27 de noviembre de 2007 no tiene resultados para la primera zona de estudio. Esto se debe a que sobre dicha zona hay presencia de nubes y no es posible obtener una línea útil (ver Figura 19).

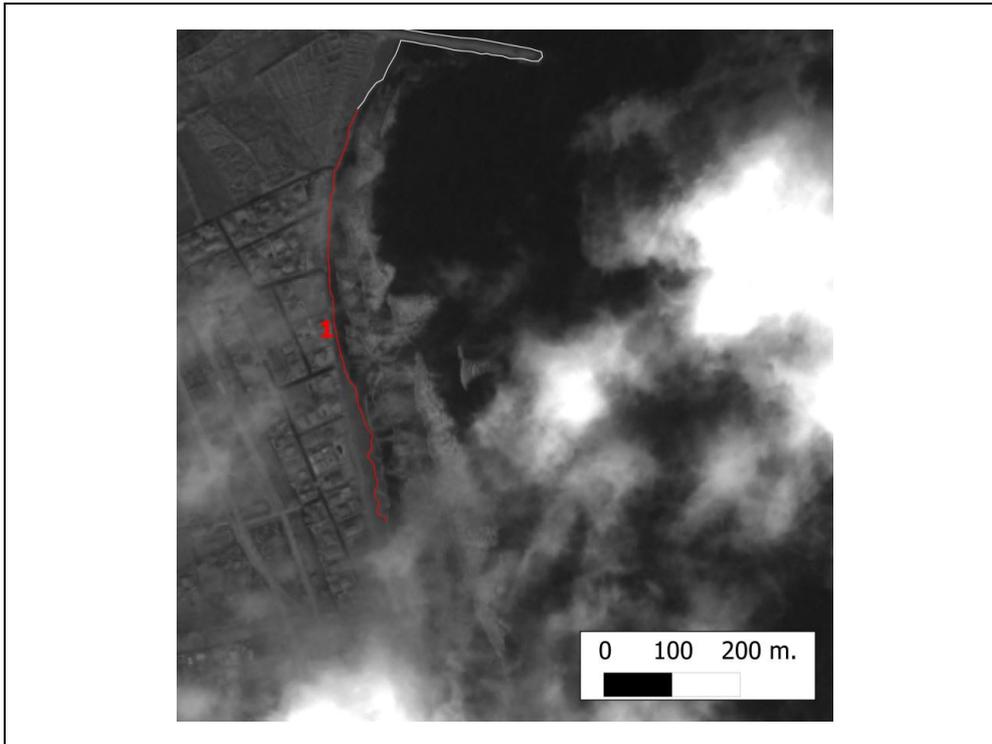


Figura 19. La zona 1 para 27 de noviembre de 2007 es inviable por la existencia de nubes, especialmente en las resoluciones más bajas.

En segundo lugar, se observa que los errores medios oscilan siempre entre -10 y +10 m para 3 de las 5 imágenes, mientras que en las otras dos es necesario dar unos márgenes mucho mayores, incluso alcanzando los 200 m. Las dos imágenes que generan este tipo de error lo hacen además en sentido siempre positivo, es decir, mar adentro. En tales casos, correspondientes a 4 de enero de 2006 y 27 de noviembre de 2007 existen fuertes oleajes (ver Figura 17). Pese a haber adelantado este efecto en los errores medios del apartado anterior, cabe aquí destacar la heterogeneidad del error cometido según la zona en que se haya medido este error.

En tercer lugar, se observa un comportamiento particular en la zona de estudio 3 (cabo de Cullera). Es posible observar en la Figura 18 cómo este segmento de costa mantiene valores de error prácticamente constantes, menores a los 10 m en todas las imágenes y todas las resoluciones. Si se extrae el comportamiento de esta zona en cada fecha y se visualiza conjuntamente (Figura 20), este comportamiento se confirma siempre salvo para la fecha 27 de noviembre de 2007 (en todas las resoluciones geométricas). En la zona 3 se encuentran los acantilados del norte de Cullera. Se trata de una zona que no se ve afectada en los temporales de igual manera que las zonas de playa. A su vez, la

falta de superficie de ruptura de olas indica que el acantilado tiene continuidad bajo el mar cayendo de forma directa a una profundidad significativa.

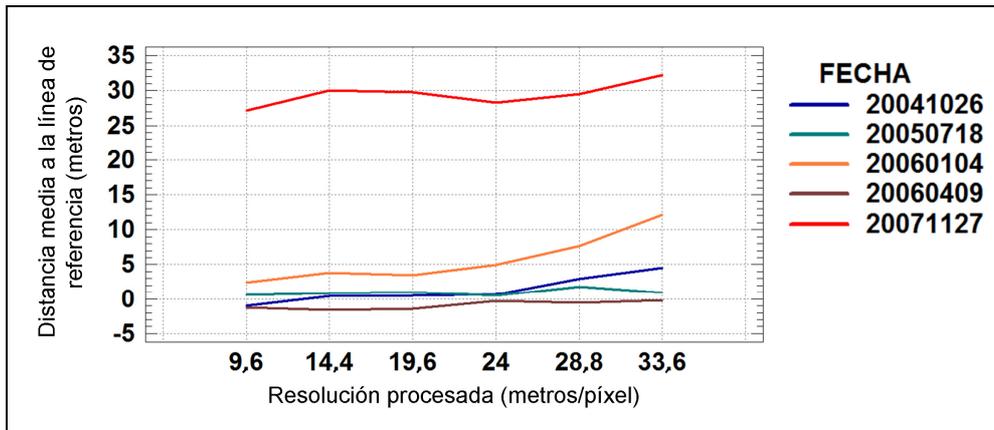


Figura 20. Detalle de errores medios del segmento de costa 3 (Cabo de Cullera) para las diferentes fechas y resoluciones.

No obstante, los rangos de error ya indicaban que la magnitud del oleaje de 27 de noviembre de 2007 era mayor que la del 4 de enero de 2006 (y se indicó en la Tabla 1). La violencia del oleaje de 2007 provoca una extensión de espuma significativa cercana a los acantilados, retranqueando la posición de la línea de costa entre 25 y 35 m en todas las resoluciones de imagen procesadas (Figura 21).

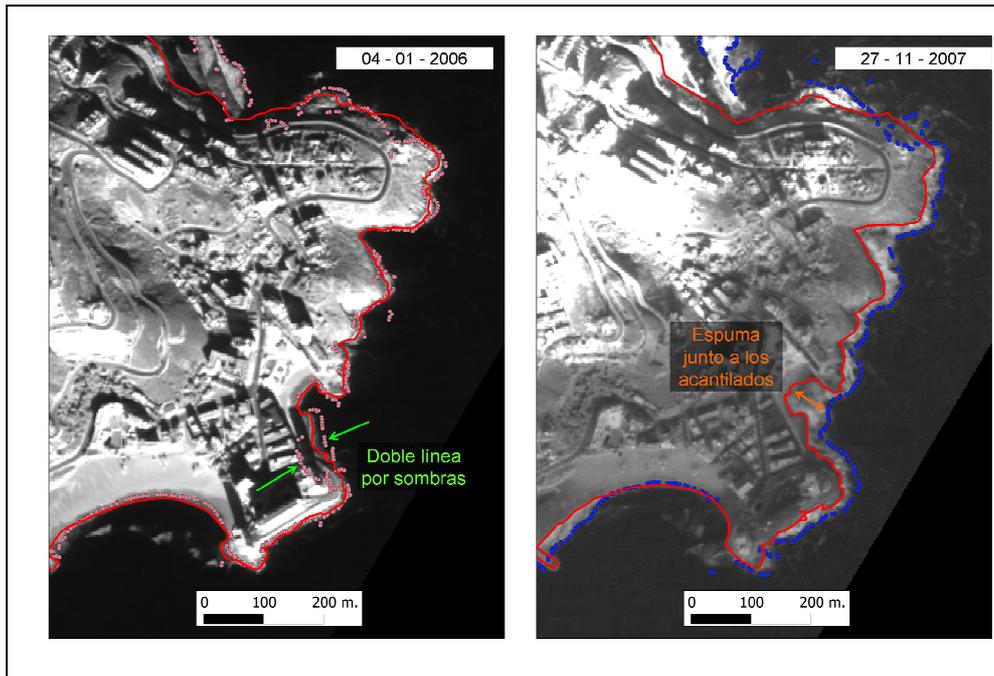


Figura 21. Segmento 3 de análisis para las imágenes con oleaje con espuma. La espuma de 4 de enero de 2006 no genera anomalías, en 27 de noviembre de 2007 la mayor extensión de la espuma es detectada como línea de costa generando su posición errónea. En la imagen de 2006 se observa un caso concreto de error: se detecta una serie de puntos correctos de línea de costa y otra costa falsa, tierra adentro por efecto de las sombras, ambas señaladas por las flechas verdes.

La **cuarta observación** corresponde al comportamiento que tiene el segmento de análisis 2 (Platja de Sant Antoni de Cullera). Como se observa en las tres imágenes de mejor comportamiento, aún cuando todas las líneas quedan en un margen menor a los ± 10 m de error medio, el comportamiento de esta segunda zona tiende a tomar signos negativos, tierra adentro, contrariamente a todas las demás zonas (ver Figura 18).

A lo largo de la Figura 22, la Figura 23 y la Figura 24 se observa la imagen de 26 de octubre de 2004 en sus diferentes degradaciones. En rojo se representa la línea digitalizada (línea de referencia). De cada imagen, y para cada resolución, se exponen los puntos obtenidos por el algoritmo propuesto. La línea de referencia y la línea calculada se exponen sobre dos imágenes, a la izquierda sobre la imagen en alta resolución y a la derecha sobre la imagen remuestreada con que se ha realizado el cálculo, siendo visible así la información de partida de donde cada línea ha sido extraída en cada caso.

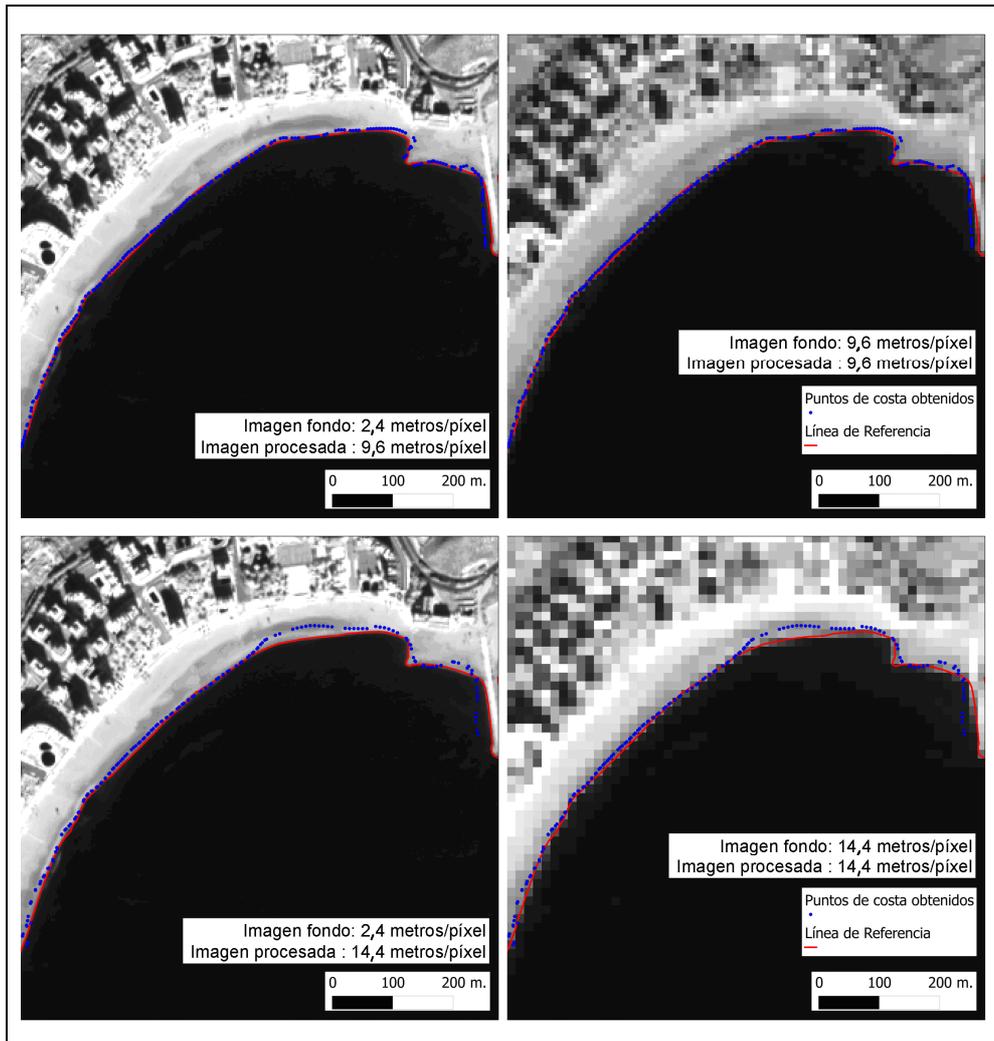


Figura 22. Líneas obtenidas para resoluciones 9,6 y 14,4 m/píxel. Visualización sobre la imágenes QuickBird original (2,4 m/píxel) y las propias resoluciones y sobre las imágenes procesadas. Fecha: 26 de octubre de 2004.

El primer cambio de ubicación de las líneas de costa obtenidas sobre imágenes de resolución 9,6 y 14,4 m/píxel ya es una clara muestra del comportamiento que en la zona 2 tienen las costas procesadas. Se observa cómo una zona ancha de la arena se mantiene húmeda y con baja reflectancia. Así, las líneas a menor resolución tienden a adentrarse en la tierra.

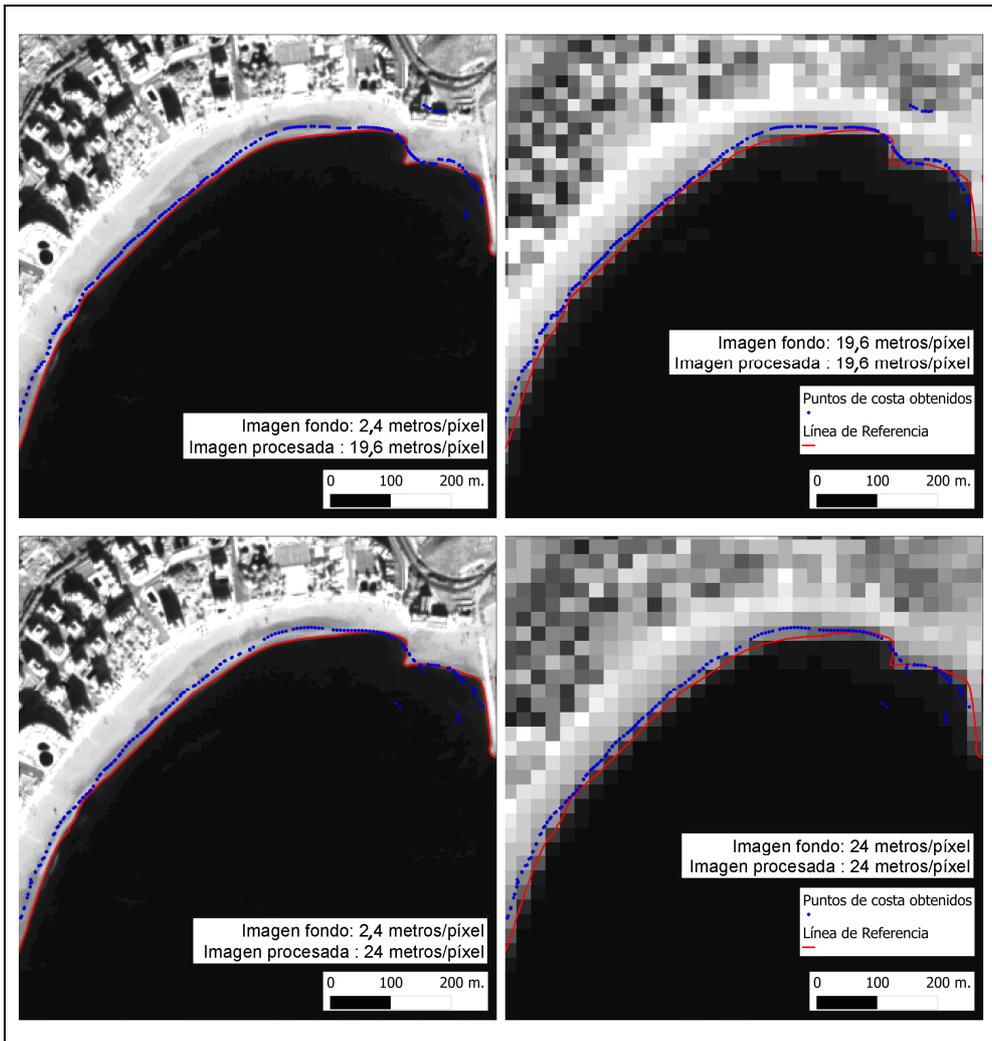


Figura 23. Imagen Líneas obtenidas para resoluciones 19,6 y 24 m/píxel. Visualización sobre la imagen QuickBird original (2,4 m/píxel) y las propias resoluciones y sobre las imágenes procesadas.
 Fecha: 26 de octubre de 2004.

Conforme se disminuye la resolución, no sólo la mayor anchura de la zona norte provoca que la línea se adentre en la tierra sino que, dado que en cada resolución se emplea un vecindario mayor, el global de la línea se ve afectado por la franja húmeda y sigue adentrándose en tierra.

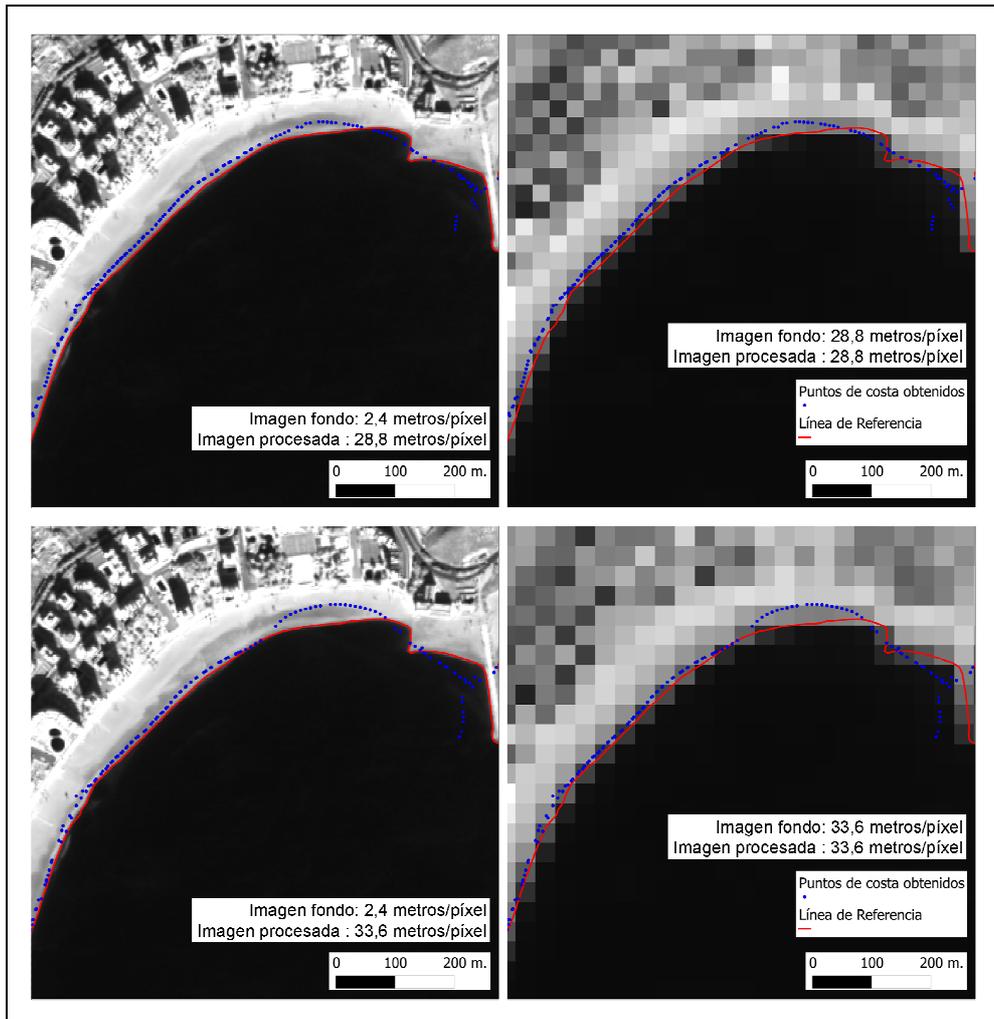


Figura 24. Líneas obtenidas para resoluciones 28,8 y 33,6 m/píxel. Visualización sobre la imagen QuickBird original (2,4 m/píxel) y las propias resoluciones y sobre las imágenes procesadas. Fecha: 26 de octubre de 2004.

Esta tendencia es menos clara al aumentar el tamaño del píxel dado que la franja húmeda abarca menos píxeles y la línea de costa tiende a tener una posición promedio por debajo de los 8 m de error.

Este mismo comportamiento en la zona 2 se ha observado en las imágenes de 18 de julio de 2005 y 9 de abril de 2006. Para el resto de las zonas analizadas, el comportamiento es el contrario puesto que no presenta esa zona amplia de arena mojada.

Por tanto, se establece por norma, a menores resoluciones la tendencia de la línea es a adentrarse en el mar, aunque como excepción, la zona 2 ha demostrado que la banda infrarroja aquí estudiada puede confundir el gradiente a detectar si existe una zona amplia de arena mojada.

Cabe destacar que el error cometido y la disminución de resolución no son proporcionales. En relación al tamaño de píxel, el algoritmo funciona proporcionalmente mejor conforme disminuye la resolución.

En **quinto lugar**, se observa en la Figura 18 que, aunque la tendencia de la línea es a adentrarse en el mar según se reduce la resolución de las imágenes, no es una tendencia uniforme en todas las zonas estudiadas ni en todas las escenas. Así, en 18 de julio de 2005 y 9 de abril de 2006 los errores medios respecto a la referencia en cada segmento se encuentran siempre por debajo de los 5 m, no así el 26 de octubre de 2004 que alcanza un error medio de 8,2 m para una resolución de 33,6 m/píxel, lo que implica un error por debajo del 25% del tamaño de píxel. Dicho error se da en la zona 5. En la Figura 18 se observa que dicho segmento es el de mayor disparidad de comportamiento entre 26 de octubre de 2004 y las otras dos fechas (18 de julio de 2005 y 9 de abril de 2006) en las que dicho segmento se comporta con mayor precisión.

Comparando el comportamiento observado sobre las respectivas imágenes (Figura 25) se observa que para el 26 de octubre de 2004 existe un conjunto de zonas en que la línea de costa se adentra levemente en el mar. En tales zonas, a escasos metros de la orilla, el nivel sumergido de arena asciende hasta acercarse a la superficie del agua (configuración morfológica de barras de cúspide) llevando a dos explicaciones posibles para el comportamiento observado en la línea de costa. Por un lado, es probable que la arena se encuentre suficientemente cerca de la superficie como para reflejar parcialmente el infrarrojo. Por otro lado, es posible que exista una ruptura leve de olas y se esté observando la reflectividad de la espuma resultado de tal ruptura.

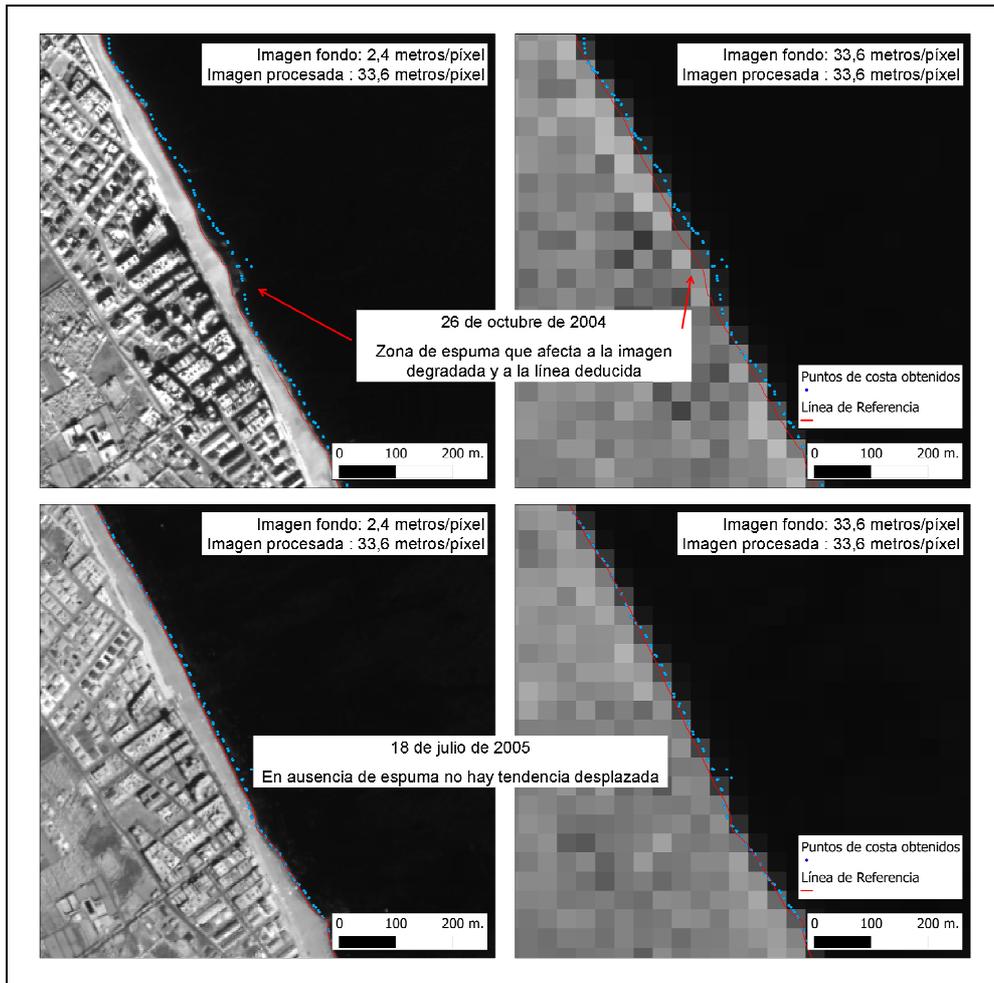


Figura 25. Comportamiento diferenciado del zona 5 (Mareny de Barraquetes) en 26 de octubre de 2004 y 18 de julio de 2005. El algoritmo parece responder a pequeños episodios de espuma en el mar.

Como síntesis de los aspectos contextuales, se ha visto que el estudio por segmentos/zonas permite analizar un comportamiento detallado de cómo cada condición de la imagen y de la costa tiene un reflejo en las líneas de costa obtenidas. **(i)** Las zonas que, por existencia de nubes, no permiten un análisis, ya han sido eliminadas en este estudio, de hecho, en aplicaciones reales, es una operación que el propio analista puede llevar a cabo. **(ii)** El análisis del segmento/zona 3, correspondiente a los acantilados de Cullera tiene un comportamiento relativamente constante en todas las imágenes y resoluciones en cuanto a precisión salvo en una única escena en que el oleaje es suficientemente fuerte como para crear espuma junto a tales acantilados y distorsionar la detección de la costa. Sin embargo, las zonas de acantilado pueden ser consideradas zonas rígidas y constantes, información que puede ser útil en el futuro. **(iii)** Se han observado excepciones al comportamiento esperado de tierra y mar, por ejemplo cuando la zona terrestre presenta absorción en la frecuencia del infrarrojo por estar mojada, o bien, cuando la espuma que se da en la ruptura de las olas produce una elevada reflectividad en zona acuática. Un caso extremo de este último hecho se da en dos imágenes donde los fuertes oleajes con espuma impiden la utilidad de las líneas extraídas. En estudios reales sin disponer de imagen de alta resolución, es probable que los casos oleajes con espuma puedan ser detectados con facilidad. No se puede tener la misma seguridad en las pequeñas olas o zonas de arena mojada.

2.4.2. Evaluación de los parámetros de cálculo

Tras el análisis contextual detallado anteriormente, se pretende estimar numéricamente qué valores de vecindario y factor de densificación llevan a mejores resultados. Para el cálculo de estos resultados sólo se analizan las 3 imágenes libres los problemas debidos a la espuma. A su vez, se ha eliminado del análisis el segmento/zona 3, de modo que se dispone de puntos para los que no se observan variaciones debidas a variaciones morfológicas de la costa o al momento de adquisición.

La Tabla 5 y la Figura 26 muestran los errores medios finales por cada línea procesada para cada resolución y parámetros de cálculo.

Tabla 5. Distancias medias (errores medios) obtenidos entre las líneas detectadas y la de referencia.

Características de imagen y cálculo			Error medio por fecha (metros)		
Resolución	Vecindario (<i>nxn</i> píxeles)	Factor	26_10_2004	18_07_2005	09_04_2006
9,6	11	2	0,469	-0,139	-1,569
	15	1	-0,157	0,618	-0,895
14,4	11	2	0,361	0,158	-1,478
	15	2	0,948	0,299	-1,547
19,2	7	4	-0,188	0,343	-1,497
	11	2	0,757	0,743	-1,087
	11	4	0,147	0,319	-1,426
24,0	7	4	0,495	0,769	-1,372
	11	2	1,769	1,233	-0,164
	11	4	1,590	0,351	-0,876
28,8	7	4	0,982	1,303	-0,824
	11	4	2,974	1,115	0,280
33,6	7	4	1,966	1,306	-0,313
	11	4	5,780	2,109	1,212

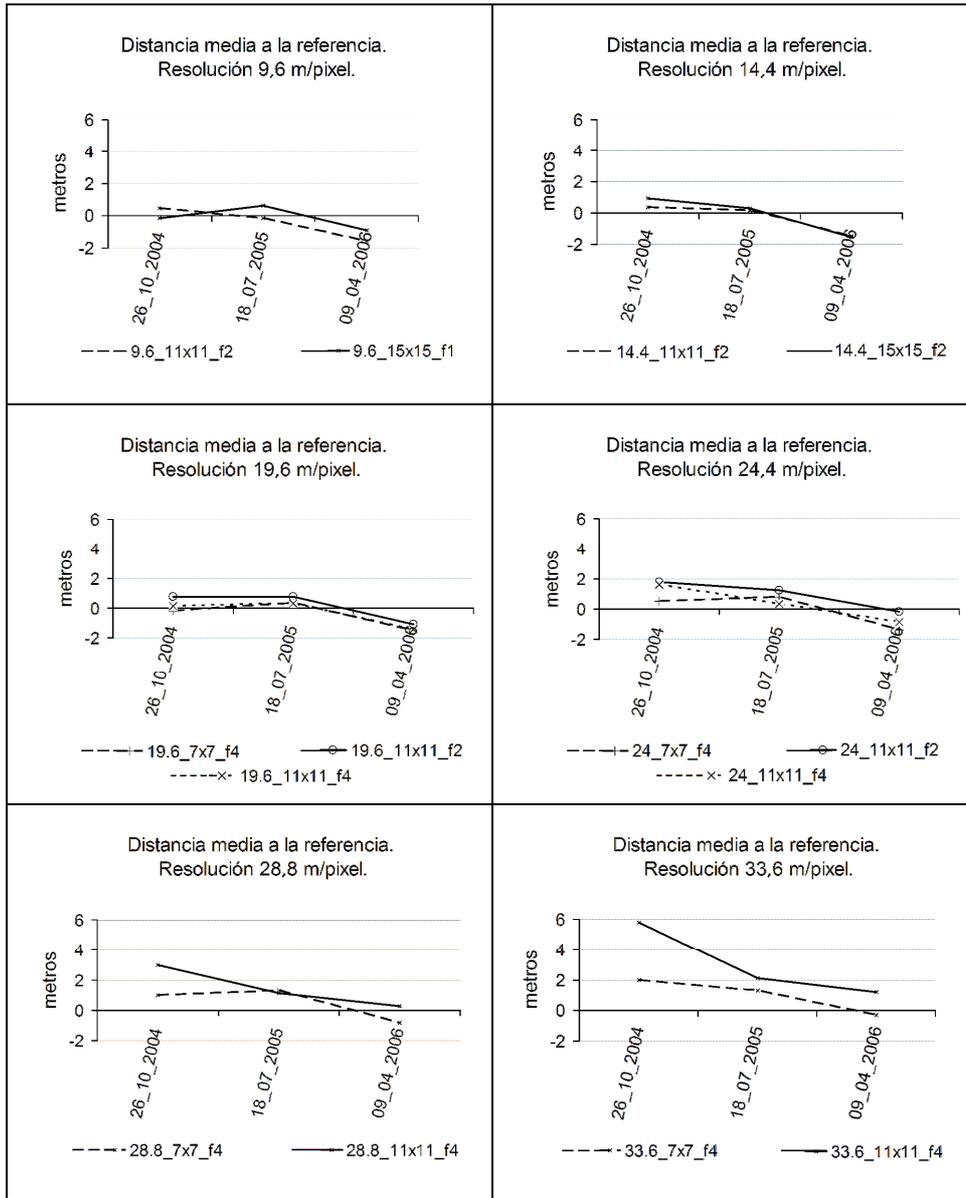


Figura 26. Distancias medias (errores medios) obtenidos entre las líneas detectadas y la de referencia.

Tan sólo en dos momentos se supera la barrera de los ± 2 m de error. Ambos casos para la imagen de 26 de octubre de 2004, lo cual es lógico según lo descrito en el apartado anterior y sólo observándose las peores resoluciones (28,8 y 33,6 m/píxel) y vecindarios de 11x11 píxeles. Esto lleva a tres consideraciones: **(i)** Es el primer aspecto que justifica el empleo de un vecindario de análisis de 7x7 frente a uno de 11x11 en resoluciones geométricas similares a Landsat TM/ETM+/OLI. **(ii)** Si se tiene en cuenta que la línea de referencia se digitalizó a una resolución de 2,4 m/píxel, se puede considerar poco significativo el error de 3 m obtenido para 28,8 m de resolución. **(iii)** No se trata de un caso general en el resto de imágenes analizadas por lo que tiene sentido justificar parcialmente este error como caso puntual de la imagen de 2004.

Por su lado, el error medio cuadrático (Tabla 6 y Figura 27) también se ha visto afectado por la eliminación de las zonas no aptas para la evaluación del método.

Tabla 6. Errores medios cuadráticos (EMCs) obtenidos entre las líneas detectadas y la de referencia.

Características de imagen y cálculo			Error medio por fecha (metros)		
Resolución	Vecindario (<i>n</i> x <i>n</i> píxeles)	Factor	26_10_2004	18_07_2005	09_04_2006
9,6	11	2	5,130	2,434	3,072
	15	1	4,296	3,032	3,165
14,4	11	2	4,758	2,963	3,296
	15	2	7,010	4,539	4,691
19,2	7	4	4,520	2,866	2,981
	11	2	6,355	4,453	4,452
	11	4	5,882	4,161	4,277
24,0	7	4	4,572	3,096	3,599
	11	2	7,897	5,576	5,288
	11	4	7,546	5,011	4,961
28,8	7	4	5,710	4,268	4,052
	11	4	7,918	6,039	5,756
33,6	7	4	6,814	4,742	4,412
	11	4	9,508	7,132	6,845

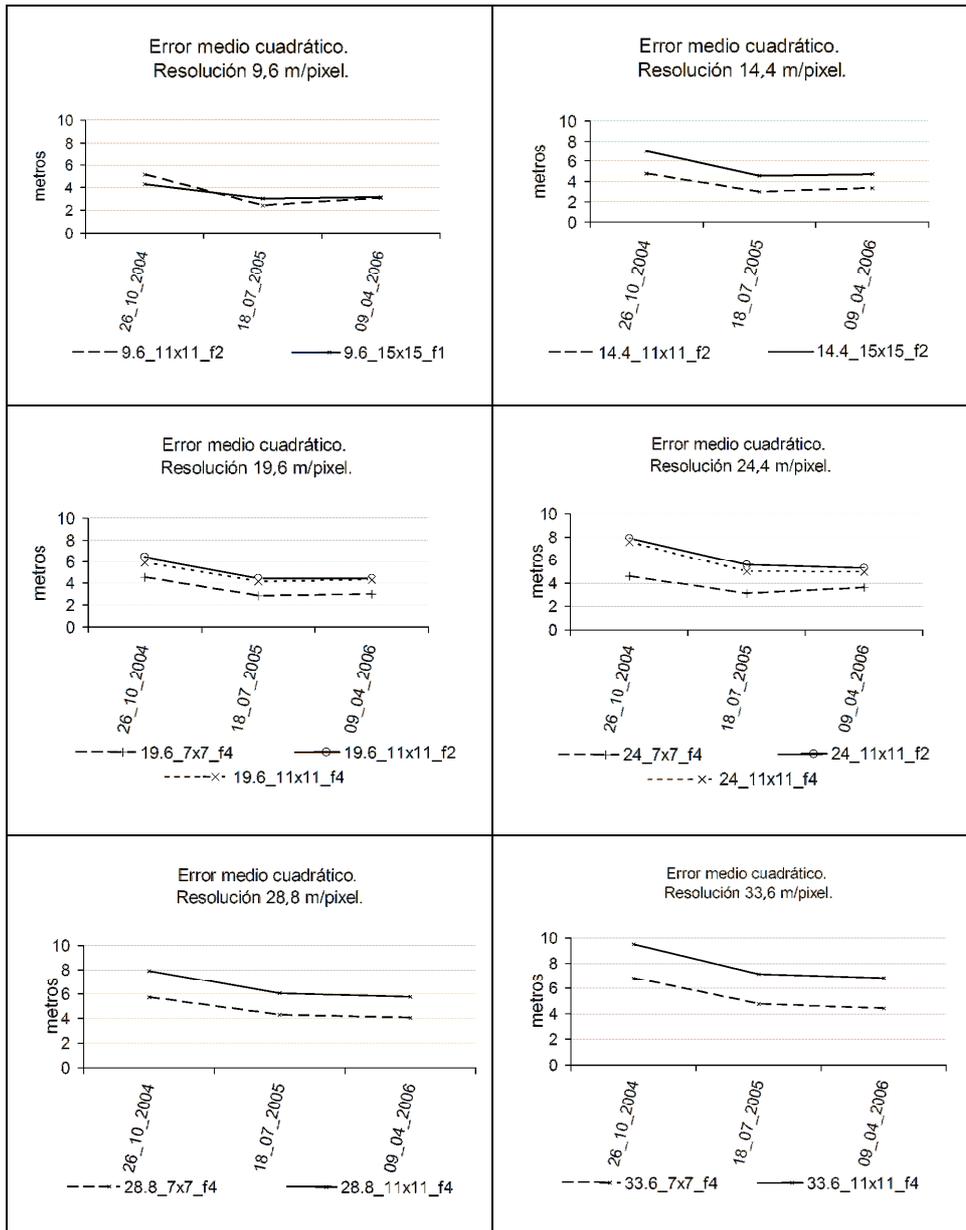


Figura 27. Errores medios cuadráticos (EMCs) obtenidos entre las líneas detectadas y la de referencia

El error medio cuadrático para 26 de octubre de 2004 sigue siendo más elevado que en el resto de imágenes.

No es posible extraer una conclusión clara de las distancias medias a la referencia por la que decidir si unos parámetros de cálculo (*'tuning'*) son mejores que otros, no así del error medio cuadrático que sí apunta hacia ciertas posibles conclusiones. De los errores medios cuadráticos obtenidos para resoluciones de 28,8 m/píxel y 33,6 m/píxel (que han sido procesadas con vecindarios de 7x7 y 11x11 píxeles) se deduce que los vecindarios excesivamente amplios pueden llevar a líneas extremadamente suavizadas que incrementan el error cuadrático medio. Para las resoluciones de 19,6 m/píxel y 24,0 m/píxel se observa que el vecindario influye más que el número de puntos que se extraen en la línea definitiva; en ambos casos, extraer 2 ó 4 puntos no varía significativamente el resultado.

El caso más desfavorable se sigue dando para la imagen de 26 de octubre de 2004. No obstante, un error medio cuadrático de 9,5 m en una resolución de 33,6 m implica una definición de 0,28 píxeles, lo que sigue siendo con claridad una precisión sub-píxel. Este valor de 9,5 m es relativo puesto que no se sabe realmente todos los factores que afectan a la detección de la línea de costa y a qué interpretación de línea de costa se acercaría más dicha línea.

2.5. Conclusiones

Se ha descrito un algoritmo para la detección de línea de costa con precisión sub-píxel y se ha evaluado el nivel de precisión que se alcanza para diferentes resoluciones geométricas (tamaño de píxel), según el valor de los parámetros de cálculo con que se aplique (el vecindario y el número de puntos que obtenemos por píxel) y según las características de la propia imagen.

En cuanto a la metodología propuesta, el algoritmo se basa en la realidad física de la diferente respuesta espectral del agua respecto a la tierra en la región del infrarrojo cercano. A partir de esta idea se desarrolla un procedimiento de análisis sobre un vecindario centrado en la posición de la orilla establecida a nivel de píxel. En este vecindario se toman los niveles de intensidad y se ajusta una función polinómica. Sobre dicha función matemática posteriormente se deducen, realizando perfiles transversales, las posiciones de máximo gradiente y se obtienen distintos puntos candidatos a determinar la posición de la orilla. Finalmente, se promedia la posición más probable y esa es la que se toma como posición de la línea de costa.

En cuanto al método de evaluación, para no introducir ruido en el análisis con otros factores de incertidumbre se han empleado imágenes QuickBird en las que se ha fotointerpretado la posición de la orilla en su resolución original (2,4 m) y, posteriormente, se han remuestreado a diferentes dimensiones de píxeles. En la evaluación se han considerado, además del tamaño de píxel, la dimensión del vecindario analizado en el algoritmo y el número de puntos que se han de obtener por cada píxel de la imagen original. De todo ello se desprenden las siguientes conclusiones:

(i) El número de puntos que se extraen por píxel afecta al error medio cometido. Hasta donde indican los resultados, un mayor número de puntos parece reducir el error medio, más cerca de 0. Por otro lado, el error medio cuadrático no se ve afectado por este factor.

(ii) En todas las pruebas realizadas, en cada imagen procesada se observa que el error medio cuadrático es sensiblemente menor al tomar vecindarios menores (Tabla 6 y Figura 27).

(iii) El algoritmo consigue reconocer la posición de la línea de costa a nivel sub-píxel con cualquiera de los tamaños de píxel con que se ha operado. Los errores medios (que oscilan entre -0,8 y 2 m) y errores medios cuadráticos (entre 4 y 6,8 m) obtenidos para resoluciones (28,8 y 33,6 m/píxel) cercanas a la resolución espacial de Landsat TM/ETM+/OLI (30 m/píxel) se dan al procesar vecindarios de 7x7 píxeles y extraer 4 puntos por píxel. Estos son los parámetros escogidos para procesar desde este momento las imágenes Landsat.

(iv) Otro resultado particularmente interesante que se obtiene en este capítulo es la verificación de que en situaciones de fuerte oleaje, donde existe mucha espuma sobre el mar, su apariencia blanca responde de forma singularmente distinta a la del resto del agua, provocando errores groseros en la determinación de la línea de costa, al menos con las imágenes infrarrojas de QB. Particularmente, la franja infrarroja de Quickbird se corresponde con la banda 4 del sensor TM y ETM+ de Landsat 5 y 7 y en la 5 del sensor OLI de Landsat 8. No podemos obviar que existen otras bandas del infrarrojo en los registros Landsat donde esta circunstancia debería ser comprobada.

(v) Se ha realizado un análisis de los efectos de las sombras y cómo afectan a las imágenes registradas. Este aspecto, dependiente del relieve en sí y de la hora de toma de la imagen habrá de ser analizado en la aplicabilidad a otros satélites.

(vi) No se ha profundizado en exceso en la configuración geomorfológica de las playas analizadas pero, a raíz del análisis visual de las zonas que les rodean (donde suelen coincidir las dificultades fotointerpretativas y ciertos comportamientos de las líneas de costa obtenidas) se desprende que la relación entre la apariencia de las playas, su morfología y las consecuencias sobre las líneas habrán de ser tenidas en cuenta en el futuro.

(vii) Se ha observado ciertos tipos de comportamiento que llevan a la línea detectada a adentrar en el mar o en tierra. Cabe prever que ésto se deba a la respuesta concreta de la banda infrarroja de QuickBird y que, trabajando con otras bandas, se obtenga comportamientos diferentes.

Capítulo III

DESCRIPCIÓN Y EVALUACIÓN DEL MÉTODO LUFT PARA LA GEORREFERENCIACIÓN AUTOMÁTICA Y DE PRECISIÓN SUB-PÍXEL DE IMÁGENES LANDSAT

"... Alain Aspect siempre se remonta al origen de un concepto o de un tema. Si desea entender el entrelazamiento, lee directamente a Schrödinger y no un análisis propuesto por algún físico posterior. Y si desea entender las objeciones de Einstein a la naciente teoría cuántica, busca y lee los artículos originales..."

Amir D. Aczel

3.1. Introducción y objetivo

Una vez se ha descrito el algoritmo con el que extraer la línea de costa con precisión sub-píxel en bandas infrarrojas, está en disposición de ser aplicada sobre imágenes Landsat.

Dado que el objetivo último de disponer de las líneas de costa es el estudio de tendencias costeras, detección de impactos de obras o temporales, es necesario que toda la información geográfica sea coherente y comparable en términos de posicionamiento. Dicho de otro modo, aunque cada línea de costa sea extraída con un error previsible máximo de 6,8 m, si el registro entre las imágenes es de menor precisión, el estudio

evolutivo no podrá ser preciso tampoco y las tendencias podrán no ser significativas. Toda la información requiere estar georreferenciada de forma coherente y precisa.

La georreferenciación es un tema crucial en sí mismo, especialmente en análisis multi-temporales. El análisis multi-temporal en teledetección tiene por objeto extraer información de imágenes de diferentes épocas para entender y monitorizar la evolución del territorio y aportar dimensión temporal a los fenómenos que en él se produzcan, sean antrópicos o naturales. Estas técnicas son relevantes para monitorizar procesos como la expansión urbana (Yuan et al., 2005; Hermosilla et al., 2012), evolución costera (Foody et al., 2005; Muslim, et al, 2006 y 2007), la dinámica forestal (Brumby et al., 2002) y los desastres naturales (Shaikh et al., 2005).

Dependiendo del objetivo de cada estudio, se requiere de imágenes de diferentes características siendo más o menos exigentes en aspectos como las resoluciones espacial, radiométrica y espectral o el ciclo de repetición de visita del satélite. Uno de los recursos más empleados en los últimos 30 años para análisis multi-temporales ha sido el uso de las imágenes Landsat (Shaikh et al., 2005; Kennedy et al., 2010; Cohen et al, 2010). Su popularidad se debe al conjunto de bandas multiespectrales que los sensores TM, ETM+ y OLI disponen con una resolución geométrica de 30 m/píxel y una cobertura prácticamente global cada 16 días desde 1984 (considerando a partir de Landsat 5). El anuncio de libre distribución de imágenes Landsat por parte del USGS en 2008 ha favorecido el desarrollo de estudios multi-temporales relacionados con la evolución del medio ambiente. Sin embargo, se encuentran ciertas limitaciones cuando el objetivo de un estudio específico requiere de una resolución espacial más detallada que la de Landsat, como es el caso que ocupa esta tesis.

La información geográfica debe estar georreferenciada de forma precisa para evitar resultados erróneos (Townshend et al., 1992; Jianya, et al., 2008). Si no es posible disponer de una buena georreferenciación, es necesario al menos un co-registro preciso de toda la información geográfica implicada. Si la información que ha de formar parte del análisis está constituida por imágenes, deben obtenerse las relaciones geométricas para registrarlas unas con otras y/o con una de referencia. En los métodos tradicionales de georreferenciación, la precisión alcanzada se obtiene por la relación de los puntos de control –GCPs, *Ground Control Points*- homólogos entre las imágenes implicadas y está afectada por el tamaño de píxel. Si la precisión requerida para el análisis multi-temporal exige un registro de una precisión más fina que el tamaño de píxel, será necesario garantizar un registro sub-píxel.

Así pues, dos son los aspectos cruciales en la labor de registro de imágenes: la automatización y la exactitud. Zitova y Flusser (2003) dividen dicha labor de registro en 4 pasos: (1) la detección de entidades, (2) obtención de homologías, (3) obtención de la transformación, (4) creación de la nueva imagen –en la que entran en juego los métodos de remuestreo-. Generalmente, la automatización se busca en los pasos de detección de entidades de cada imagen (1) y en la deducción de qué entidades de ambas imágenes son homólogas (2). Por otro lado, la exactitud se busca en (3) la resolución mínimo cuadrática con que suele deducirse el modelo de transformación (Kenney et al., 2003;

Netanyahu et al., 2004). A priori, si existe un número suficiente de entidades y están distribuidas de forma adecuada, la solución podrá llevar a resultados más precisos que el píxel.

Las entidades más empleadas por los paquetes informáticos comerciales son los puntos de control. A su vez, en estos programas, el indicador de precisión es el estimador de la desviación típica deducido del ajuste mínimo cuadrático con que se obtiene la transformación entre los puntos homólogos. Sin embargo, en la práctica real, además de la desviación típica, requiere especial atención el número de puntos y su distribución en la imagen. Un número reducido de puntos de control o una mala distribución pueden llevar, respectivamente, a una desviación poco realista y a una transformación falsa e imprecisa. En consecuencia, la solución ha de ser, además de automática, robusta.

Con objeto de lograr la automatización y la robustez, existen diversas metodologías como las imágenes piramidales (Hu y Acton, 2000; Zhang et al., 2000), algoritmos genéticos (Chalerrmwat, et al., 2001) o correlación cruzada basada en la transformada de Fourier (Guizar-Sicairos et al., 2008). No todas estas soluciones suelen aparecer en los programas de tratamiento digital de imágenes comerciales y no es una solución siempre conocida. Esta última solución (correlación cruzada basada en la transformada de Fourier) tiene como atractivo principal el hecho de ser una solución rápida y automatizable (Srinivasa-Reddy et al., 1996; Xie et al., 2003). Sin embargo, esta misma solución no suele emplearse cuando el registro es un mero paso intermedio para otros fines y no un fin en sí mismo, probablemente por dos razones. En primer lugar, **(i)** porque convergen en ella conceptos que, a priori, no se habrían de entremezclar: por un lado, el concepto de 'correlación cruzada' como concepto estadístico y, por otro, que aparezca expresado mediante el uso de la 'transformada de Fourier'. Aunque la correlación es estadísticamente conocida, no siempre se conoce su formulación en el espacio de frecuencias y lleva a la falta de atractivo y uso por parte de diversos usuarios. En segundo lugar, **(ii)** no ofrece un error en forma de desviación típica, o en términos de mínimos cuadrados, que es la manera más extendida y tradicional de dar una medida de precisión de la georreferenciación.

La correlación cruzada opera calculando la correlación, propiamente dicha, entre dos imágenes (ver anejo III) asociada a un desplazamiento píxel a píxel. El resultado es una imagen de igual tamaño que las imágenes '*cruzadas*' y que contiene las correlaciones entre ambas en relación con un desplazamiento determinado. El píxel en que se localice la correlación máxima indicará, gracias precisamente a su posición, la traslación que relaciona las dos imágenes '*cruzadas*'. Sin embargo, la exactitud del proceso así descrito está limitado por la resolución del píxel y sólo podrá detectar traslaciones enteras (valores enteros de 30 en 30 m para el caso de Landsat TM/ETM+/OLI).

Si bien para comprender el registro mediante correlación cruzada no es preciso expresarlo mediante la transformada de Fourier, el hecho de hacerlo así lleva a nuevos caminos que añaden atractivo a este método: **(a)** la distinción entre correlación cruzada tradicional y la correlación de fase para un resultado más robusto, **(b)** la posibilidad de extender la transformada de Fourier a la transformada Fourier-Mellin y poder obtener los

parámetros de transformación de giro y escala de forma automática, **(c)** la existencia de diferentes soluciones para alcanzar precisiones sub-píxel.

(a) La correlación de fase (en inglés '*phase correlation*') lleva a una solución más robusta en el sentido de que el máximo de correlación queda localizado de forma más clara, es más resistente al ruido o cambios de iluminación de la escena. De hecho, se supone que el máximo en la correlación de fase se ajusta a una función δ -Dirac (Kuglin et al., 1975; Foroosh et al., 2002). Pese a todo, éste método aporta todavía una precisión píxel.

(b) Es sabido que al girar una imagen, su transformada de Fourier lo hace igualmente. La transformada Fourier-Mellin se sirve de esta propiedad para poder obtener el giro y la escala que relaciona dos imágenes (Chen et al. 1994; Srinivasa-Reddy et al., 1996; Derrode et al., 2001; Xiea et al., 2003). Si bien no ha sido de aplicación directa en esta tesis, sí ha permitido comprender de forma práctica el concepto de correlación cruzada. Aún más, la potencial utilidad de la transformada Fourier-Mellin en el futuro ha sido razón añadida para optar por el método de correlación cruzada.

(c) Se ha mencionado la mayor robustez de la correlación de fase (*Phase Correlation*, PC) aunque el resultado es también una matriz de iguales dimensiones que las dos imágenes '*cruzadas*' y que limita el resultado a valores enteros de píxel. Para mejorar esta exactitud existen diversas soluciones que parten, precisamente, de que el máximo de correlación sigue una δ -Dirac (Kuglin et al., 1975; Foroosh et al., 2002). Algunas soluciones para alcanzar una definición sub-píxel de la traslación están basadas en el tratamiento de señales (Shekarforoush et al., 1996; Stone et al., 2001), otras siguen un criterio geométrico y buscan definir una función matemática alrededor del máximo de correlación y encontrar de forma precisa dicho máximo en la función matemática ajustada (Jingying et al., 2002). El método, denominado por Guizar-Sicarios et al. (2008) como single-step-FFT (FFT de paso único), y por Wang et al. (2011) como LUFT (*local upsampling of Fourier transform*, sobremuestreo local de la transformada de Fourier) se basa en el aumento o disminución de la resolución (*upsampling* y *downsampling*, respectivamente) de la matriz de correlación cruzada (CC) ofreciendo, a priori, resultados eficientes, robustos y con exactitudes mejores al tamaño de píxel.

Todo este conjunto de hechos (disponer de un esquema claro de automatización, la posibilidad de obtener resultados robustos, la existencia de soluciones para la obtención de precisión sub-píxel y el potencial trabajo futuro de extrapolar lo aprendido a la transformada de Fourier-Mellin para obtener giros y escalas) que solventan las primeras limitaciones del método de correlación cruzada, son las razones por las que se ha decidido profundizar en la correlación cruzada mediante transformadas de Fourier para realizar el registro de imágenes Landsat necesario en esta tesis. Cabe destacar que las imágenes Landsat ETM+, concretamente, se aportan con una georreferenciación con precisión aproximada de 0,44 píxeles (unos 13 m) y en un mismo sistema de referencia por lo que el proceso de registro que interesa conseguir es realmente un refinamiento de dos traslaciones, una por cada eje. Se ha optado por el método LUFT como algoritmo de obtención de la precisión sub-píxel porque aprovecha la realización de la transformada de Fourier en su notación matricial y es una de las soluciones expuestas con mayor claridad.

Además, es posible verificar en la literatura –Guizar-Sicarios et al. (2008)- que los diversos métodos de correlación sub-píxel no difieren excesivamente en precisión y no es objeto de esta tesis realizar una comparación entre ellos.

Finalmente, entendemos que es útil aclarar los dos aspectos que, como se mencionó, tienden a alejar estas técnicas y la teledetección aplicada. **(i)** En el Anejo III (por no desviar el discurso de la tesis de su objetivo principal) se presenta como se llega del concepto estadístico de 'correlación' a una única expresión mediante transformada de Fourier. Por otro lado, **(ii)** a lo largo de este capítulo se evaluará empíricamente la naturaleza y la magnitud para determinar el error esperable.

Para evaluar la exactitud que se puede alcanzar con este algoritmo se requiere de imágenes de traslación conocida. En caso de las traslaciones esto puede lograrse mediante la introducción de traslaciones conocidas (Persons et al., 2002); sin embargo, la bibliografía no suele describir cómo se generan exactamente tales imágenes para los experimentos. En general, la mayoría de artículos están enfocados a casos concretos y no suelen estar acompañados de una evaluación extrapolable a otros casos. En ocasiones se mencionan limitaciones pero sin acompañarlas de datos numéricos o estadísticos.

La aportación particular en este capítulo es la evaluación/calibración del algoritmo LUFT y el estudio de los factores experimentales involucrados. Se incluye un sustento numérico a los efectos de las variables implicadas y, finalmente, se aporta una calibración precisa y consistente. Esta calibración global y el estudio de cómo afecta cada factor al resultado permiten la comprensión, capacidad de extrapolación y aplicabilidad del método.

3.1.1. El método de correlación cruzada a nivel sub-píxel

El índice de correlación de Pearson (ρ) es un conocido término estadístico que indica la relación de una serie de datos con otra. Estos datos suelen presentarse en forma de dos listados de igual dimensión y mediante la expresión (3) se cuantifica su relación.

$$\rho_{AB} = \frac{S_{AB}}{\sigma_A \cdot \sigma_B} \quad (3)$$

dónde S_{AB} es la covarianza entre las dos series, y σ_A , σ_B son las desviaciones típicas de A e B, respectivamente.

Los dos conjuntos de datos comparados son dos vectores, en caso de disponer los datos en una sola dimensión, o dos matrices si se están dispuestos en dos dimensiones.

La correlación cruzada (*Cross Correlation*, CC) es un vector o matriz que representa la correlación en relación con un determinado desplazamiento. En este contexto, dos imágenes de igual tamaño son los datos de entrada para la CC. El resultado es una matriz de iguales dimensiones que las dos implicadas y que contiene los valores de correlación entre ambas tras desplazar una de ellas píxel a píxel. Así, el primer píxel [0,0] de la matriz de CC contiene la correlación entre las dos imágenes originales, el píxel [1,0] contiene el valor de correlación entre ambas imágenes una vez que el origen de la segunda se ha desplazado 1 píxel en el eje 'X'. Así, la posición del máximo de correlación indica qué desplazamiento requiere aplicarse a la segunda imagen para quedar registrada con la primera.

Para completar esta matriz de CC sería necesario obtener el índice de correlación tras aplicar cada traslación a la segunda imagen. Sin embargo, en tratamiento de señales se suele trabajar con una única operación que ofrece el mismo resultado –ecuación (4)-, y que se sirve de la transformada de Fourier.

$$\rho_{AB}(c, f) = F^{-1}(F^* \{A\} \cdot F \{B\}) \quad (4)$$

Al realizar la transformada de Fourier a una imagen, ésta tiene dos partes: fase y módulo. En la literatura (Kuglin et al., 1975; Foroosh et al., 2002; Guizar-Sicairos et al., 2008) se recomienda, por su mayor robustez, realizar la correlación de fase (*phase correlation*, PC) calculable también en un solo paso –ecuación (5)-

$$\rho_{AB}(c, f) = F^{-1} \left(\frac{F^* \{A\} \cdot F \{B\}}{|F \{A\}| \cdot |F \{B\}|} \right) \quad (5)$$

Donde A y B son los respectivos vectores o matrices (como puede ser una imagen) a comparar, F se refiera a la transformada de Fourier directa, F^{-1} se refiere a la transformada inversa y F^* representa la conjugada de la transformada.

A partir de este momento tanto correlación cruzada (CC) como correlación de fase (PC) se referirán indistintamente a esta última.

La CC, tal y como se ha descrito, presenta la ventaja de una gran posibilidad de automatizar y rapidez de procesado pero una limitación en cuando a la precisión. Localizar el píxel en que se encuentra la correlación máxima en la matriz de CC implica conocer la traslación entre ambas imágenes píxel a píxel, lo que en el caso de imágenes de sensores Landsat TM/ETM+/OLI implica saltos de 30 m.

El refinamiento de la posición de tal máximo de correlación ha sido propuesto por varios autores. Kuglin et al. (1975) indican que la PC se comporta como una δ -Dirac y la localización refinada del pico puede ser obtenida siguiendo criterios bien geométricos o bien de tratamiento de señales. En Jingying et al. (2002) se propone una aproximación geométrica ajustando una función parabólica alrededor del máximo de correlación, posteriormente el máximo de la función ajustada proporciona la posición sub-píxel buscada. En cambio, en Shekarforoush et al. (1996) se analizan los efectos que sufre el máximo de correlación por causa de los desplazamientos sub-píxel.

Para este trabajo se ha optado por incrementar la resolución del máximo de correlación. Tradicionalmente, el hecho de cambiar la resolución de una imagen implica un remuestreo. Si se desea una imagen de menor resolución se realiza un degradado (o *downsampling* en inglés): emplear varios píxeles de la resolución original para obtener cada uno de la nueva imagen. Si se desea una mayor resolución (*upsampling* en inglés) se suele recurrir a métodos de interpolación.

Para realizar el *upsampling* del máximo de correlación se ha empleado un método que no requiere interpolación y opera en el espacio de frecuencias. Este método (Fienup, 1997), busca la localización refinada del máximo de correlación ampliando el tamaño de la matriz de correlaciones. Para ampliar una imagen en el espectro de frecuencias primero se realiza su transformada, seguidamente se 'incrustan' estos valores en una matriz de mayor tamaño y al realizar la transformada inversa se obtiene una imagen ampliada pero con la información espectral de la imagen pequeña -ver Figura 28-.

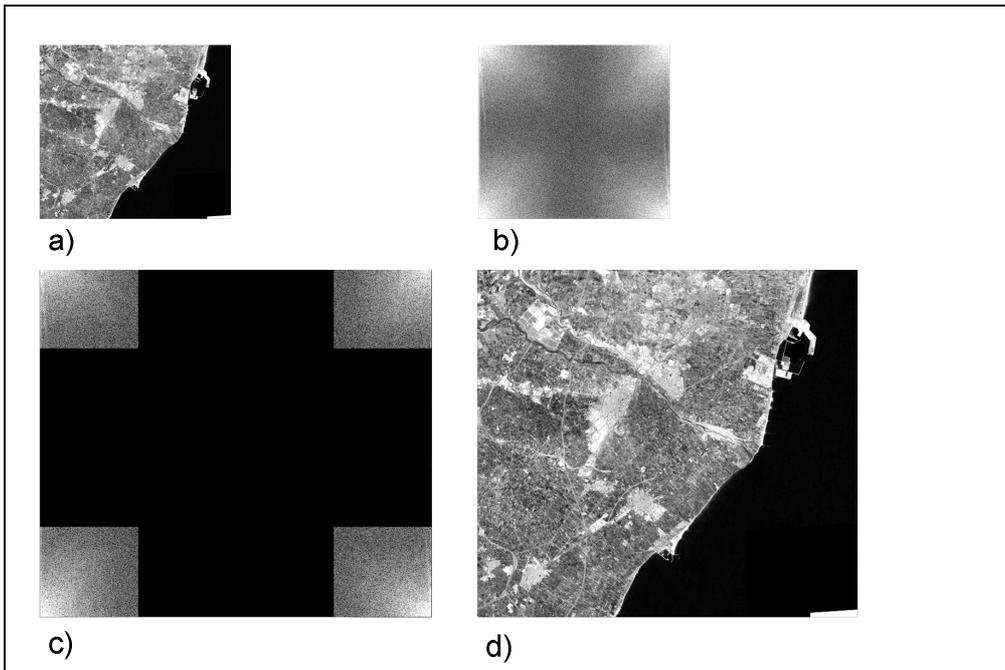


Figura 28. (a) Imagen original; (b) transformada de Fourier de (a); (c) transformada de Fourier 'incrustada' en una matriz mayor; (d) transformada inversa, *upsampling* de la imagen original.

Para aplicar este *upsampling* al máximo de correlación se realizan los siguientes pasos:

1- Calcular la matriz
$$\left(\frac{F^* \{A\} \cdot F \{B\}}{|F \{A\}| \cdot |F \{B\}|} \right)$$

2- Incrustar la matriz en otra del tamaño deseado

3- Realizar la transformada inversa de la nueva matriz

Tras esta operación, el máximo de correlación es localizable en una resolución mayor que la original. Al realizar la ampliación del fragmento de matriz en un factor f , el único píxel que contenga el máximo en la resolución original ocupará ahora fxf píxeles. En consecuencia, si se determina un único máximo de entre esos fxf , la posición del pico tendrá una exactitud de $1/f$ respecto a la resolución original. Por ejemplo, para un factor igual a 2, el píxel que contenía el máximo de correlación queda dividido en 4 (2×2). Localizar en cual de estos cuatro nuevos píxeles se encuentra el máximo de correlación implica una precisión de 0,5 píxeles de la resolución original.

La limitación de este método de *upsampling* es el tamaño que puede llegar a alcanzar la matriz ampliada y que impide su operabilidad. Para resolver este problema se presenta en Guizar-Sicarios et al (2008) un método, que denomina *single-step DFT*, basado en la realización de transformadas de Fourier mediante multiplicación de matrices, por el cual

se obtiene sólo una ampliación local del máximo de correlación. Este mismo fundamento se sigue en Wang et al. (2011) quienes lo denominan LUFT (*Local Upsampling Fourier Transform*).

Esta solución resulta especialmente sugerente para objetivos como los que aquí se han planteado pero en su aplicación surgen algunas dudas que deben ser tenidas en cuenta:

(1) La ampliación local de la matriz se establece fijando un factor f que es el que permitirá mejorar la localización de la máxima correlación cruzada con un nivel de exactitud de escala sub-píxel. Pero ¿hasta qué límite de ampliación los resultados serán coherentes? ¿Hasta qué nivel podemos aplicar el sobre-muestreo (*upsampling*) y esperar resultados correctos? Necesitamos reconocer el límite de exactitud que podemos acotar aplicando un factor f más o menos grande.

(2) Otra cuestión clave es ¿qué dimensión de imagen ha de usarse? o quizá mejor, ¿qué dimensión mínima ha de tener la imagen con que se aplica el método para que el resultado alcance su máxima potencialidad de exactitud?

(3) Otra cuestión significativa es averiguar hasta qué punto las características de la imagen que se está tratando de registrar (es decir, su homogeneidad o heterogeneidad) puede afectar al resultado.

(4) También es importante evaluar si los resultados se pueden ver alterados si se trabaja con registros adquiridos en bandas espectrales diferentes.

Para resolver todas estas cuestiones se plantearán varios experimentos partiendo de modelos de imágenes diseñadas de tal manera que se puedan controlar las variables que se evalúen y se pueda cuantificar el nivel de acierto que se alcanza.

3.2. Metodología

3.2.1. Generación de imágenes para la evaluación

Para la realización de la calibración y evaluación del método se requiere la comparación entre unos valores de referencia y aquellos que se obtengan mediante cualquier método propuesto. Evaluar los resultados de un método de registro con precisión sub-píxel requiere de unos datos de referencia con igual o mejor precisión. Aunque el objetivo último de este capítulo es registrar imágenes Landsat, y es la precisión de su georreferenciación la que se pretende evaluar, no es lógico que se empleen como datos de referencia para calibrar el propio proceso de registro. En su lugar, para este proceso de calibración se ha creado un banco de pruebas consistente en un conjunto de imágenes sintéticas desplazadas entre sí de forma controlada.

Se ha partido de dos ortoimágenes de 0,5 m/píxel de resolución del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, PNOA, de España (<http://www.ign.es/PNOA/>). Con ellas se ha creado un mosaico de 19 Km en la dirección este-oeste y 17 Km de ancho en la dirección norte-sur. El área tomada abarca el litoral entre Castelló de la Plana y Borriana, en la costa norte valenciana.

La creación de estas imágenes sintéticas es un aspecto crucial. Cada imagen simulará la resolución de imágenes Landsat TM/ETM+/OLI. Cada píxel de cada "Landsat" creada sintéticamente equivale a un cuadro de 60x60 píxeles de la ortofotografía. El método tradicional para esta degradación (*downsampling*) es el promedio de tales 60x60 píxeles, obteniendo así la primera imagen sintética tipo "Landsat". Para generar una imagen desplazada 1 m, el origen de la degradación se desplaza 2 píxeles en la ortofotografía original en la dirección este-oeste; el resultado es una imagen artificial tipo "Landsat" que simula aquello que el sensor habría tomado al desplazarse 1 m. De esta manera se crean imágenes de resolución 30 m/píxel y con una traslación controlada metro a metro.

Dada la dificultad de simular realmente las imágenes Landsat partiendo de ortofotografías de 0,5 m de resolución y con características radiométricas y espectrales distintas, se ha considerado conveniente crear las imágenes sintéticas mediante dos procedimientos distintos. El primero de ellos se llevó a cabo conforme a la descripción anterior, las imágenes así obtenidas se han denominado "ABD", *Average Based Downsampling*. En el segundo procedimiento se ha intentado imitar, en lo posible, el proceso real de captación de la imagen por un sensor Landsat (la banda 5 de Landsat TM, concretamente, como se verá a continuación). Para ello se pondera la aportación de cada píxel de alta resolución al generar cada píxel de baja resolución. Esta ponderación depende de la distancia al centro de cada píxel y para ello se ha estudiado la función de dispersión (*Point Spread Function*, PSF) propia del sensor Landsat TM descrita por Markham (1985). Este modelo de dispersión, de hecho, ha sido empleado en sentido contrario para corregir precisamente la dispersión de los píxeles de las imágenes Landsat

TM (García-Haro, 2005) en nuestro caso, sin embargo, lo utilizamos para simular con mayor realismo las imágenes Landsat TM. A las imágenes sintéticas así obtenidas las llamaremos "PSFD", *Point Spread Function Downsampling*.

Así pues, se han generado dos grupos de imágenes que contienen 121 imágenes cada uno hasta abarcar traslaciones entre -2 y +2 píxeles de resolución Landsat, es decir entre -60 y +60 m, metro a metro. Cada imagen tiene dimensiones de 1000x1000 píxeles. Ello completa 120 imágenes y si se tiene en cuenta la imagen central que será tomada como referencia, se tienen las 121 imágenes nombradas por grupo. De cada una de ellas se conoce con seguridad la magnitud exacta de la traslación de la misma respecto a las demás. La notación que de ahora en adelante se dará a estas traslaciones conocidas será T_{IN} .

3.2.2. Descripción de los experimentos

Como se observa en el flujo de trabajo de la Figura 29, el registro por LUFT se ha aplicado a ambos conjuntos de imágenes sintéticas. Considerando el valor obtenido (T_{OUT}) y el de referencia (T_{IN}) con que cada imagen fue creada, el error puede estimarse como $\varepsilon = T_{IN} - T_{OUT}$.

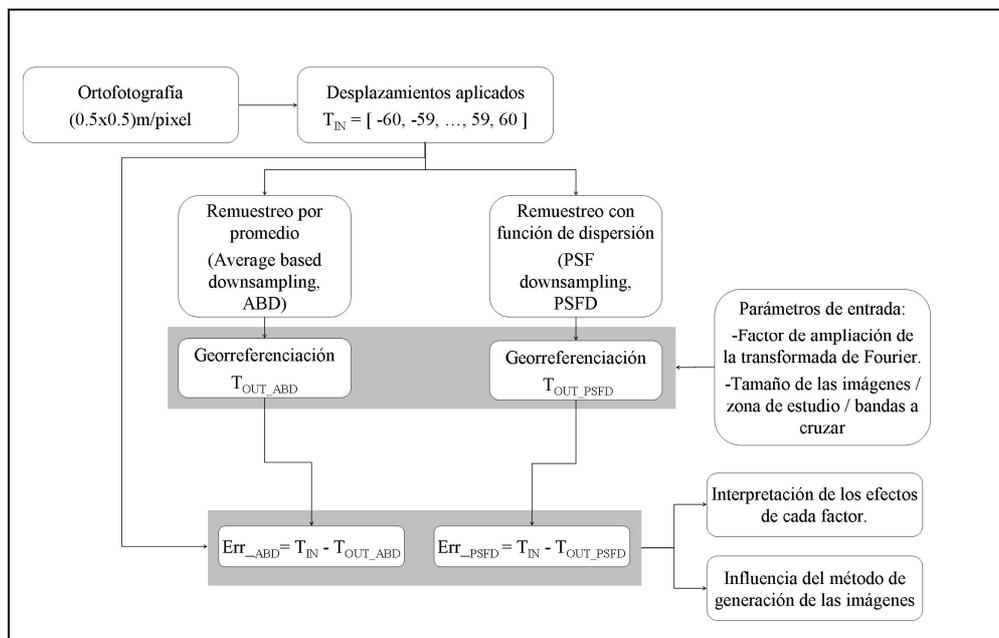


Figura 29. . Flujo de trabajo. Los principales factores analizados son los dos grupos de imágenes, los parámetros que afectan al registro y su interacción.

Como se indicó anteriormente, se han diseñado 2 experimentos para evaluar los parámetros propios del algoritmo (factor de upsampling del pico de CC) y variables ajenas a él (tamaño de imágenes a cruzar, textura o características de las imágenes cruzadas, bandas empleadas).

Para el análisis de resultados se distinguirá entre **precisión** y **exactitud**, (en inglés, *precision* y *accuracy* respectivamente). La precisión la entendemos como la cercanía o semejanza de ciertos resultados entre sí. La exactitud se refiere a la cercanía de tales resultados a un valor real, considerado como referencia. En cierto sentido, precisión y exactitud se asemejan a lo que, en análisis de distribución normal serían la desviación típica y error medio cuadrático.

3.2.2.1. Experimento 1: Efecto del factor de 'upsampling' f

La imagen con $T_{IN} = 0$ es utilizada como referencia frente a la que registrar las restantes en cada grupo. El tamaño de las imágenes empleadas ha sido de 1000 x1000 píxeles lo que, al tratar de registrar entre ± 2 píxeles (± 60 m), garantiza un 99,8% de área común en todas las correlaciones. Los factores f de ampliación empleados han sido [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000]. Conforme se explicó al describir el método de CC, esto debería hacer posible detectar desde resoluciones de solamente 1 píxel ($f = 1$) a una 0,001 parte de píxel ($f = 1000$). En términos métricos implica una definición de entre 30 y 0,03 m de exactitud respectivamente, con píxeles "Landsat".

Dado que las imágenes disponen de 3 bandas, para cada traslación de referencia (T_{IN}) se dispone de 9 resultados (T_{OUT}). Ello permitirá evaluar una traslación media ($\epsilon_T = T_{IN} - \mu_T$) y una desviación típica debida a tal cruce de bandas.

3.2.2.2. Experimento 2: Efecto del tamaño de píxel y características internas de las imágenes cruzadas

En este segundo experimento el factor de ampliación se mantiene constante y con un valor sobradamente elevado ($f=1000$) para que los resultados no dependan de él. Este segundo experimento tiene por objeto analizar 3 parámetros:

- (i)** La influencia del tamaño de las sub-imágenes cruzadas.
- (ii)** Determinar si realizar la correlación en diferentes zonas, pero con igual tamaño de imagen, afecta al resultado.
- (iii)** Determinar si usar diferentes bandas espectrales afecta al resultado.

Evidentemente no son factores independientes puesto que el comportamiento de error asociado a un tamaño de imagen se ve afectado por las otras dos variables.

Se ha evaluado un amplio grupo de tamaños de sub-imagen $s \times s$ píxeles donde s ha tomado valores $s = 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 40, 60, 80, 100, 200, 300, 400, 500$

y 1000. Así, se ha seguido la misma lógica, cruzar cada imagen de T_{IN} conocido con la imagen de referencia $T_{IN} = 0$ y evaluar con él cada traslación T_{OUT} obtenida.

Disponiendo de las imágenes sintéticas de T_{IN} conocido, se toma una sub-imagen del tamaño que se desee evaluar. Como se observa en la Figura 30, es posible tomar diferentes sub-imágenes en diferentes zonas; lógicamente cuanto menor sea el tamaño de sub-imagen analizado, mayor número de sub-imágenes podrá tomarse.

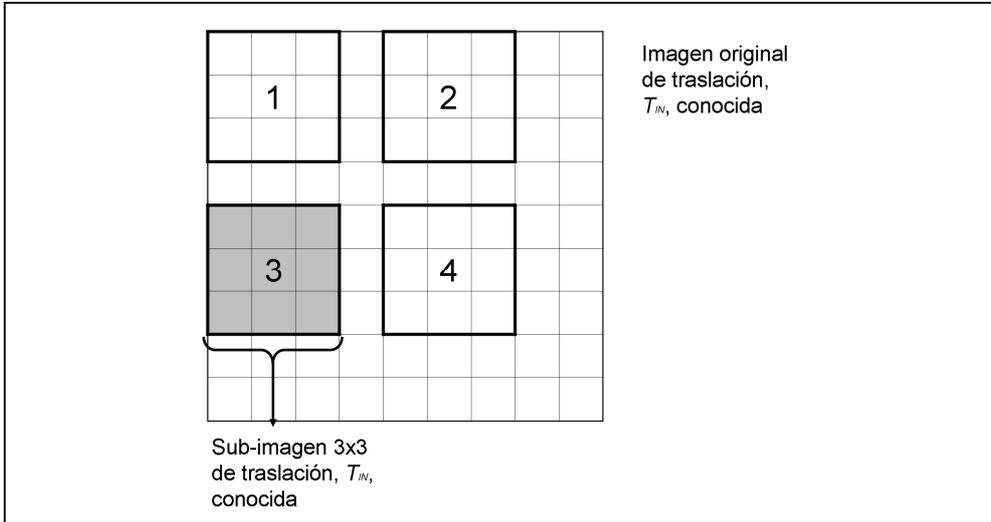


Figura 30. Extracción de sub-imágenes para evaluación del efecto de características internas en la CC.

Para una misma traslación T_{IN} será posible tener multitud de resultados T_{OUT} y disponer de un valor medio $\mu_{T(s,T_{IN})}$ y una desviación $\sigma_{T(s,T_{IN})}$. Esta última desviación típica se debe a los diferentes resultados obtenidos por el hecho de tomar sub-imágenes en diferentes lugares y, por tanto, observar, para un mismo tamaño de imagen, si las características internas de la imagen analizada (textura, rugosidad, heterogeneidad, etc) de la misma han afectado al resultado.

Por último, dado que cada imagen está formada por 3 bandas no sólo se obtendrá una traslación media $\mu_{T(s,T_{IN})}$ y una desviación $\sigma_{T(s,T_{IN})}$ para cada T_{IN} tamaño s analizado, sino 9 (i de 1 a 3 para una imagen y j de 1 a 3 para la segunda, ver ecuación (6)):

$$\begin{aligned}
& (\mu_{T(\text{rojo_rojo},s,T_{IN})}, \sigma_{T(\text{rojo_rojo},s,T_{IN})}) \\
& (\mu_{T(\text{rojo_verde},s,T_{IN})}, \sigma_{T(\text{rojo_verde},s,T_{IN})}) \\
& (\mu_{T(\text{rojo_azul},s,T_{IN})}, \sigma_{T(\text{rojo_azul},s,T_{IN})}) \\
& (\mu_{T(\text{verde_rojo},s,T_{IN})}, \sigma_{T(\text{verde_rojo},s,T_{IN})}) \\
& (\mu_{T(\text{verde_verde},s,T_{IN})}, \sigma_{T(\text{verde_verde},s,T_{IN})}) \\
& \vdots \\
& (\mu[\mu_{T(i_j,s,T_{IN})}], \sigma[\mu_{T(i_j,s,T_{IN})}]) , (\mu[\sigma_{T(i_j,s,T_{IN})}], \sigma[\sigma_{T(i_j,s,T_{IN})}])
\end{aligned} \tag{6}$$

El análisis de estos 9 pares de datos $(\mu_{T(i_j,s,T_{IN})}, \sigma_{T(i_j,s,T_{IN})})$, como se deduce lleva a 4 parámetros con un significado a interpretar cada uno.

- $\mu[\mu_{T(i_j,s,T_{IN})}] \rightarrow$ traslación media obtenida. Permite evaluar el grado de exactitud general para cada tamaño s analizado, primero de los parámetros descritos anteriormente (i).
- $\sigma[\mu_{T(i_j,s,T_{IN})}] \rightarrow$ desviación de las traslaciones medias. Permite evaluar la precisión sobre la traslación media detectada al cruzar bandas diferentes, se corresponde con la tercera de las variables (iii) anteriormente nombradas.
- $\mu[\sigma_{T(i_j,s,T_{IN})}] \rightarrow$ desviación media. Permite evaluar la precisión del método por causa de que diferentes texturas o distribución de los elementos de diferentes sub-imágenes afecten a la traslación detectada, lo que corresponde a la segunda de las variables (ii) descritas.
- $\sigma[\sigma_{T(i_j,s,T_{IN})}] \rightarrow$ desviación de las desviaciones. Permite evaluar el grado de precisión de cruzar las diferentes bandas en la propia precisión por tomar diversos vecindarios. Concentra el efecto conjunto de cruzar diferentes bandas y diferentes vecindarios.

3.3. Análisis de resultados

3.3.1. Experimento 1: Efecto del factor de ampliación f

La Figura 31 representa los errores obtenidos para cada traslación de referencia y para diferentes factores aplicados. Cada error ha sido calculado como $\varepsilon_T = T_{IN} - \mu_T$, donde T_{IN} es la traslación conocida con que cada imagen fue creada (y que es también el valor de referencia), y T_{OUT} se refiere a las traslaciones obtenidas por LUFT. La media de los 9 errores se representa punteada en negro y sus respectivas desviaciones típicas mediante barras rojas verticales.

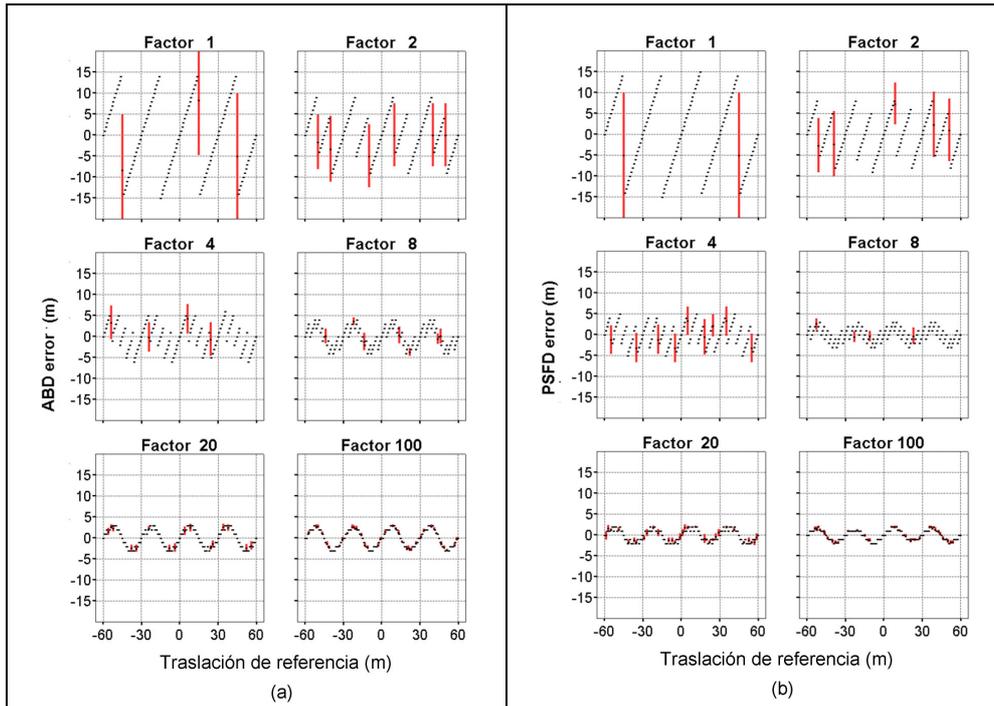


Figura 31. Cada imagen con traslación conocida (T_{IN}) ha sido cruzada con la correspondiente imagen de referencia ($T_{IN} = 0$) de cada grupo de imágenes sintéticas (ABD o PSFD), empleando diferentes factores de *upsampling*. Considerando 3 bandas por imagen, se obtiene 9 resultados (T_{OUT}); la media de los 9 valores se representa en puntos negros y su desviación típica en líneas rojas verticales. La aparición de las desviaciones no es aleatoria, a su vez, su valor decrece con rapidez al aumentar el factor de *upsampling*.

Los resultados proporcionan información sobre diferentes aspectos:

(i) Las barras rojas de desviación típica están relacionadas con el efecto que tengan los 9 resultados debidos a la combinación de bandas. Es un factor que influye en la precisión.

(ii) La estabilización de la solución al incrementar el tamaño de imagen, hecho que se relaciona con la exactitud alcanzable.

(iii) La comparación de los errores obtenidos entre ambos grupos de imágenes (ABS y PSFD) dado que el resultado del experimento no está exento del efecto de cómo las imágenes sintéticas han sido generadas.

3.3.1.1. Comportamiento de la precisión

La desviación estándar (líneas rojas de la Figura 31) se deriva de los valores obtenidos al aplicar LUFT entre bandas espectrales diferentes. Como se puede observar, la magnitud de estas líneas rojas decrece conforme el factor de *upsampling* aumenta.

Es crucial percatarse de que la aparición de estas líneas no es aleatoria. Para comprender mejor el comportamiento observado se analiza seguidamente el caso concreto para el *factor=1*. En tal caso, el tamaño de píxel con que se va a trabajar es 1, es decir, se trabaja a resolución de 1 píxel (en este caso equivalente a 30 m). Cuando el desplazamiento real a detectar es menor que medio píxel, el máximo de correlación se encuentra –para las nueve combinaciones de bandas- en el píxel $T = 0$; ello implica que no existe desviación típica. Cuando el desplazamiento real a detectar es superior a medio píxel, el máximo de correlación se encuentra –para las 9 combinaciones de bandas- en el píxel $T = 1$; ello, nuevamente, implica que no exista desviación típica. Sin embargo, si el desplazamiento real a detectar es exactamente de medio píxel (lo que se da, en este caso, para imágenes desplazadas exactamente 15 m) los valores de los dos primeros píxeles en la matriz de correlación cruzada son similares y el máximo se ubica aleatoriamente entre $T=0$ y $T=1$ lo que implica un error de +15 ó -15 m; las nueve soluciones posibles no coinciden y, por tanto, aparece la barra roja de desviación típica que adquiere más un papel de indicador que de medida de desviación.

El mismo comportamiento se observa al aplicar un *factor = 2* (que implica una resolución de 15 m para la detección de la traslación). Cuando la traslación a detectar es menor o mayor estrictamente que 0,5 píxeles, las nueve soluciones -por combinación de bandas- llevan al mismo resultado. Ahora bien, cuando la traslación a detectar es exactamente de medio píxel, 7,5 m en este caso, la ubicación del máximo de correlación vuelve a ser dudosa entre dos posiciones y genera la aparición de las líneas rojas de desviación.

A raíz de las observaciones anteriores es posible definir dos variables empíricas para describir la discordancia de las nueve posibles soluciones: la mínima y la máxima desviación (*min_Dev* y *max_Dev*). Para factores 1 y 2, la *min_Dev* es 0, y la *max_Dev* es 15 y 7,5 respectivamente. La *min_Dev* se da por el hecho de existir traslaciones que son detectadas independientemente de la combinación de bandas. La *max_Dev* depende de la incoherencia entre tal combinación de bandas, a priori, en casos concretos.

Este valor de max_Dev parece seguir un comportamiento predecible por el valor teórico que se denominará ahora Desviación Potencial Máxima (*Maximum Potencial Deviation*, MPD), expresada en la ecuación (7):

$$MPD = 0,5 \cdot \frac{pixel_size}{f} \quad (7)$$

La Figura 32 muestra que la máxima desviación obtenida empíricamente (max_Dev) sigue el comportamiento del valor teórico de MPD hasta el factor=60. La parte exacta que dicho factor procura detectar es (1/60 píxeles) de 0,5 m, el tamaño de píxel de la ortofotografía de referencia con que se generaron las imágenes. A partir de este factor y para valores mayores a él, las desviaciones máximas y mínimas se estabilizan en un rango de variación muy estrecho. Para el conjunto de imágenes sintéticas ABD, las desviaciones máximas y mínimas se estabilizan en rangos de 0,24~0,30 m y 0,050~0,075 m, respectivamente. Para el conjunto de imágenes sintéticas PSFD, las desviaciones máximas y mínimas se estabilizan en un rango de valores de 0,225~0,250 m y 0,075~0,099 m, respectivamente. Es posible concluir que el comportamiento de la precisión reflejado en la máxima desviación (max_Dev) es predecible en función del factor f aplicado.

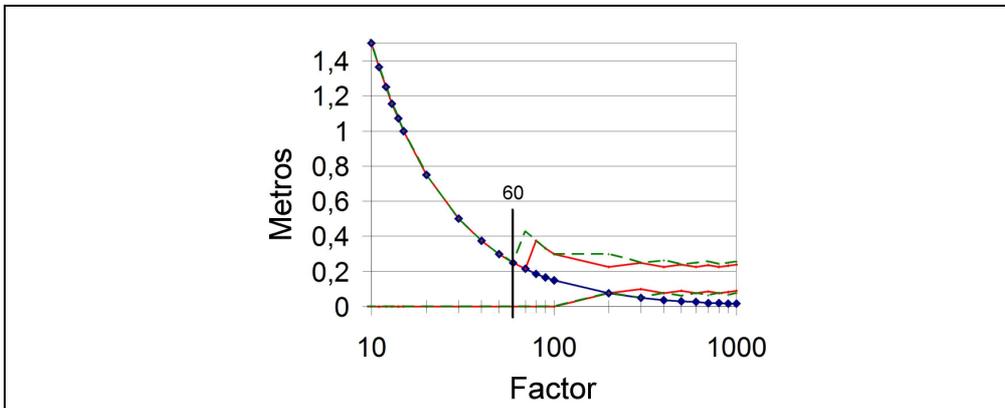


Figura 32. Comparación entre el valor teórico MPD (Desviación Potencial Máxima) y los valores medidos de mínima y máxima desviaciones obtenidas para cada factor a lo largo de todos los desplazamientos evaluados.

3.3.1.2. Comportamiento de la exactitud

Una vez que la coherencia interna del método ha sido evaluada, se analiza el error cometido realmente. El hecho de que diversas soluciones a la hora de detectar determinada traslación estén concentradas (precisión) no implica que el conjunto esté igualmente cerca de la traslación real a detectar (exactitud).

Como se observa en la Figura 31, el error cometido se estabiliza siguiendo una forma sinusoidal con una amplitud visible aun cuando las barras de desviación se hacen imperceptibles. El comportamiento sinusoidal de los errores alrededor de 0 implica precisamente que el error sea insesgado, su valor medio es 0.

El rango entre los errores máximo y mínimo equivale a la amplitud de la onda. Las amplitudes en cualquiera de los dos grupos de imágenes sintéticas alcanzan su mínimo (se estabilizan) cerca del factor $f = 20$. A partir de ese punto, aumentar el factor f de *upsampling* no reduce el error cometido (Figura 33).

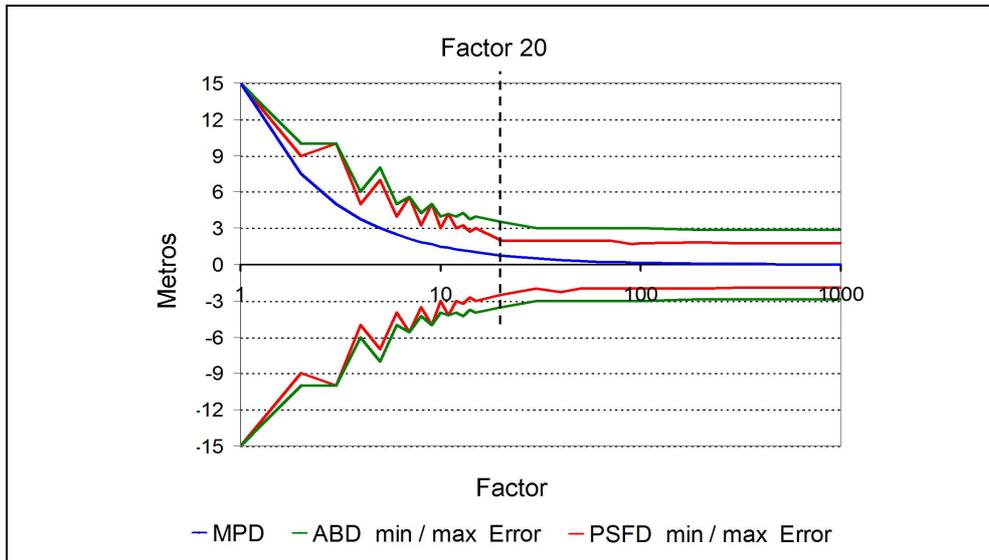


Figura 33. Errores máximos y mínimos obtenidos para cada factor a lo largo de todas las traslaciones. En verde el rango de errores para el grupo de imágenes ABD, en rojo para el grupo PSFD. El valor teórico MDP en azul.

Los resultados muestran que los diferentes métodos de remuestreo con que se generó cada conjunto de imágenes tiene un efecto evidente en la exactitud alcanzada. El rango de errores para las imágenes ABD es menor a ± 3 m, mientras que para el conjunto de imágenes PSFD es menor a ± 2 m.

3.3.1.3. Comportamiento diferencial entre precisión y exactitud

Es evidente que la precisión y la exactitud se comportan de manera diferente, que se estabilizan para factores distintos $f = 20$ y $f = 60$, respectivamente. Puede observarse que la precisión se estabiliza en valores menores a 0,3 m mientras que la exactitud lo hace en valores mayores (± 3 m para el conjunto de imágenes ABD y ± 2 m para el conjunto de imágenes PSFD). Esta diferencia permite concluir que la exactitud se ve claramente afectada por el método de submuestreo (*downsampling*) empleado en cada conjunto de imágenes.

3.3.2. Experimento 2: Efecto del tamaño de píxel y características internas de las imágenes cruzadas

Como se describió en la metodología, el número de variables implicadas en el experimento lleva no sólo a gran cantidad de resultados, sino a que dichos resultados dependan de diversas variables íntimamente relacionadas. Se dispone del error medio y de la desviación típica por cada traslación de referencia. Cada uno de tales conjuntos se encuentra, a su vez, duplicado para cada conjunto de imágenes sintéticas (ABD y PSFD), ver expresión (8):

$$\left(\varepsilon_{\mu_{T(bands_i_j,s,T_{IN})}} , \sigma_{T(bands_i_j,s,T_{IN})} \right)_{ABD,PSFD} \quad (8)$$

En particular, por cada traslación de referencia (T_{IN}) por cada tamaño de sub-imagen s analizado y por cada posible combinación de bandas al usar la LUFT, $bands_i_j$, se obtiene un valor de error medio ε_{μ_T} diferente.

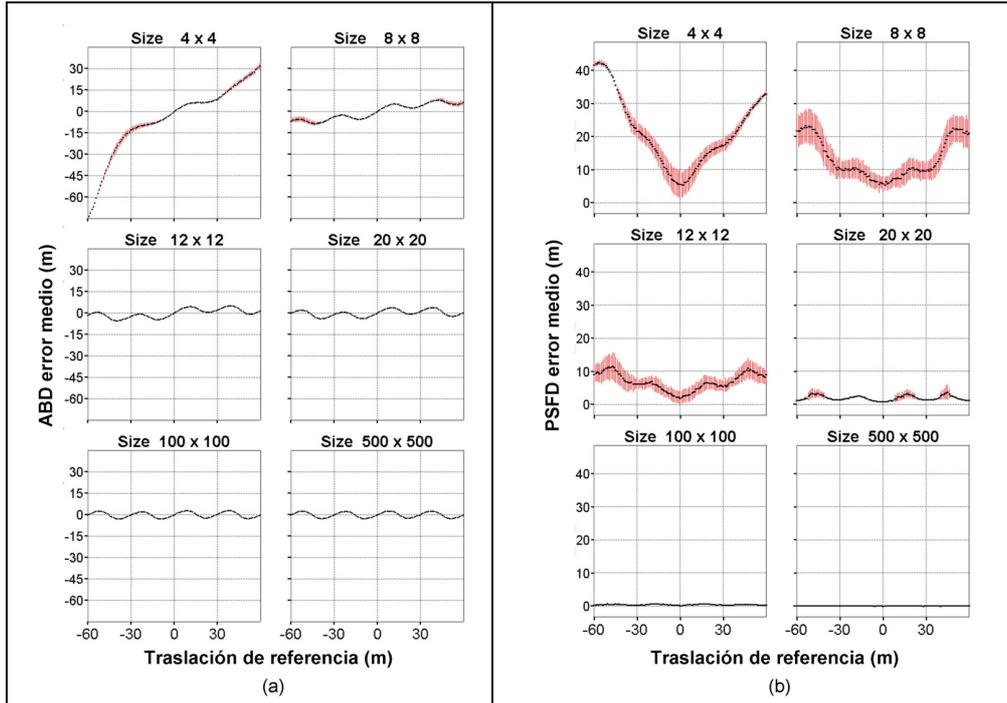


Figura 34. Comportamiento del error para tamaños específicos de sub-imágenes cruzadas. Cada tamaño de imagen permite obtener multitud de vecindarios para un mismo tamaño en diferentes zonas. Los gráficos representan el promedio de tales soluciones (a) y su desviación típica (b) debida al efecto de la textura interna de las imágenes cruzadas. Dado que cada media y desviación se ha obtenido en 9 ocasiones por el hecho de cruzar diferentes bandas se representa en rojo las desviaciones de las propias medias y desviaciones.

La Figura 34 muestra resultados correspondientes al grupo de imágenes ABD. Los resultados para el grupo PSFD son similares, las diferencias numéricas serán comentadas más adelante. La traslación de referencia, T_{IN} , está representada en el eje horizontal. Para cada imagen trasladada es posible tomar diferentes tamaños de sub-imagen para realizar la CC, en la gráfica se representan sólo ciertos casos $s \times s$ particulares ($s = 4, 8, 12, 20, 100, 500$).

Por tanto, si se retoman los parámetros que durante la metodología se indicó que serían analizados, se dispone de una representación gráfica (Figura 34) de los siguientes parámetros:

$$\mu \left[\mu_{T(i-j, s, T_{IN})} \right] \rightarrow \text{Puntos negros de la Figura 34.a}$$

$$\sigma \left[\mu_{T(i-j, s, T_{IN})} \right] \rightarrow \text{Barras rojas de desviación de la Figura 34.a}$$

$\mu[\sigma_{T(i-j,s,T_{IN})}] \rightarrow$ Puntos negros de la Figura 34.b

$\sigma[\sigma_{T(i-j,s,T_{IN})}] \rightarrow$ Barras rojas de desviación de la Figura 34.b

Así, para leer la información aportada por la Figura 34, si la traslación real a detectar es +30 m y el registro por CC se ha realizado con un tamaño de sub-imagen de 4x4 píxeles, el error medio cometido ha sido de +7,5 m (Figura 34.a) y la desviación típica ha sido de 18 m (Figura 34.b).

3.3.2.1. Comportamiento de la precisión

La precisión se refiere al grado de compacidad de las traslaciones obtenidas.

De los cuatro parámetros descritos para este análisis se han nombrado dos que determinan la dispersión de las soluciones: las desviaciones por emplear diversas bandas ($\sigma[\mu_{T(i-j,s,T_{IN})}]$) y las desviaciones por tomar las sub-imágenes en diferentes zonas. Valores que están representados en las barras rojas verticales de la Figura 34.a, y en los puntos negros de la Figura 34.b.

El efecto más llamativo es la forma en "V" de las desviaciones (Figura 34.b) por efecto de emplear diferentes sub-imágenes. La desviación típica de los errores decrece conforme la traslación real de la imagen se aproxima a 0. La correlación cruzada que subyace en el método LUFT se basa en la similitud de las imágenes correladas, por tanto, si no existe suficiente información común (como sucede cuando el desplazamiento es de 2 píxeles y el tamaño de sub-imagen es de 4x4 píxeles, dejando sólo 2 píxeles para la correlación), los errores y sus desviaciones típicas aumentan fuertemente conforme aumenta la traslación llegando a alcanzar los 40 m, siendo el resultado igualmente desechable para ambos conjuntos de datos ABD y PSFD. El hecho de que tales desviaciones no sean nulas significa que, además del tamaño de sub-imagen empleado, existen otras variables afectando a los errores. Se demuestra que la textura, elementos geográficos incluidos y su distribución espacial afectan a los valores de correlación y por lo tanto a la localización adecuada de la traslación.

El efecto de cruzar diferentes bandas, en lo que se refiere a la precisión, se observa en la desviación típica representada como barras rojas verticales en la Figura 34.a. La máxima diferencia entre las nueve soluciones posibles es 9,44 m y 8,25 m para los conjuntos de datos ABD y PSFD, respectivamente. Esta diferencia ocurre en un tamaño de imagen de 6x6 píxeles al tratar de detectar una traslación real de 2 píxeles (60 m). Esta diferencia máxima decrece rápidamente hasta ser menor a 1 m para imágenes de tamaño igual o mayor a 14x14 píxeles.

La falta de coincidencia de las soluciones por causa de cruzar diferentes bandas es menor que la desviación provocada por cruzar sub-imágenes en diferentes partes de la escena.

Ambos efectos están combinados. En la Figura 34.b, la desviación típica (por combinar las 9 bandas) de los nueve valores de desviación (por tomar diferentes vecindario), $\sigma[\sigma_{T(i_{-j,s},T_N)}]$, está representada en las barras rojas verticales. Para cada uno de los conjuntos de datos ABD y PSFD, las diferencias máximas entre tales nueve resultados son de 16,79 y 11,59 m, respectivamente; dándose para un tamaño de sub-imagen de 8x8 píxeles. Esta variabilidad en las desviaciones resulta menor a 1 m a partir de un tamaño de imagen de 40x40 píxeles.

Por tanto, el empleo de diferentes bandas sigue sin ser distinguible del efecto de tomar diferentes vecindarios. Así, para que todas las soluciones tengan una desviación menor a los 3 m basta utilizar un tamaño de sub-ímagenes igual o superior a los 20x20 píxeles.

3.3.2.2. Comportamiento de la exactitud

Además de los niveles de precisión obtenidos para cada tamaño de imagen, es necesario establecer la exactitud final esperada al aplicar el registro por LUFT. En este sentido, conforme el tamaño de imagen cruzado aumenta, el error real cometido decrece (Figura 34.a) y la desviación típica de los errores también. Sin embargo, mientras que la desviación típica tiende a 0 (como se observa para tamaños de imagen mayores a 100x100 píxeles), el error medio se estabiliza en forma sinusoidal como se observó en el apartado anterior.

Para parametrizar el rango de exactitud real esperable se ha analizado el rango de error cometido para cada tamaño de imagen. La Figura 35 muestra el rango de error para tamaños de imagen entre 10x10 y 1000x1000 píxeles, distinguiendo a su vez entre los conjuntos de datos (ABD y PSFD). Cuando las imágenes cruzadas son iguales o mayores a 100x100 píxeles se estabilizan las respectivas soluciones en errores de $\pm 2,88$ m en imágenes ABD y $\pm 1,9$ m en imágenes PSFD (iv).

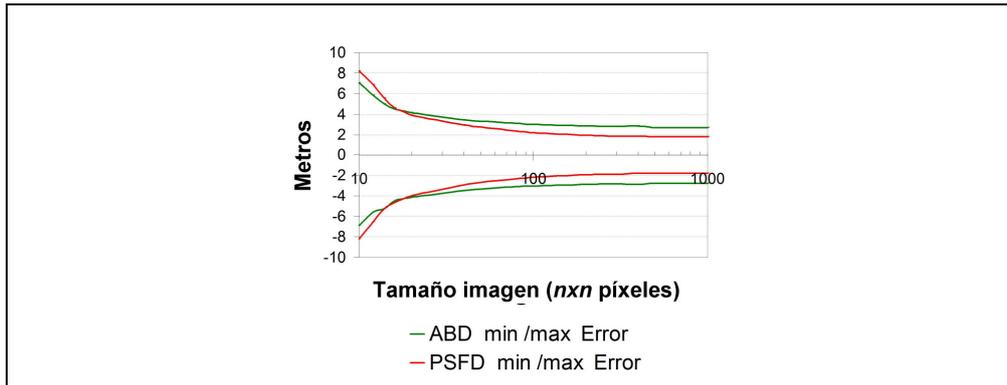


Figura 35. Comportamiento del rango de errores en función del tamaño de sub-imagen empleado en la CC.

3.3.3. Comportamiento global de la exactitud

Se ha analizado de forma independiente tanto el factor de ampliación del pico como el tamaño de las imágenes a cruzar y se ha distinguido en cada caso su influencia sobre la precisión y exactitud. La precisión mejora, como es lógico, al emplear factores y tamaños de imagen mayores. En ambos casos, la precisión alcanza valores menores que la exactitud y los alcanza con mayor rapidez. A su vez, mientras que la precisión tiende a 0 –las diversas soluciones dependientes de varias variables se concentran extraordinariamente- la exactitud alcanzada se estabiliza en la comentada forma sinusoidal.

La convergencia de la solución en su comportamiento sinusoidal se observa en la Figura 31 y la Figura 34.a. La Figura 36 muestra los errores –medida de exactitud- aplicando las mejores condiciones tanto de factor ($f=1000$) como de imagen ($s=1000 \times 1000$ píxeles) en ambos grupos de imágenes (ABD y PSFD)

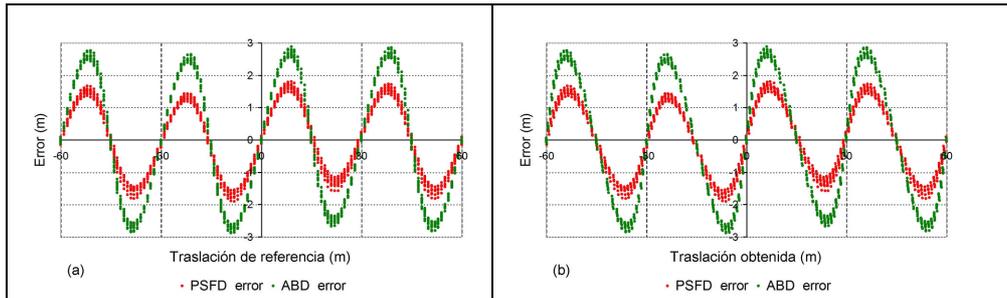


Figura 36. a) Errores cometidos frente a la traslación real de la imagen T_{IN} . b) Errores cometidos frente a la traslación obtenida, T_{OUT} . En rojo los resultados para el grupo PSFD, en verde para el grupo de imágenes ABD.

La Figura 36 muestra los errores obtenidos frente a cada desplazamiento real. Siguen un comportamiento sinusoidal, esto implica que los errores no pueden considerarse aleatorios ni que se ajusten a una distribución normal, por ello no es correcto expresar los resultados en términos de desviación típica o error medio cuadrático.

Otro aspecto reseñable está relacionado con la diferencia en los resultados obtenidos para cada conjunto de imágenes (ABD y PSFD). Las curvas alcanzan amplitudes diferentes $-2,88$ m para ABD y $1,99$ m para PSFD- lo cual evidencia la importancia del método de generación de las imágenes sintéticas en la generación del banco de pruebas para los experimentos.

Las gráficas *a* y *b* de la Figura 36 poseen una diferencia destacable. Durante la realización real de una georreferenciación no se conocen las traslaciones reales y no es posible evaluar el error cometido para la traslación real (T_{IN}) tal y como se dibuja en la Figura 36.a. Sin embargo, si se expresa el error en función de la propia traslación obtenida (T_{OUT}) como se representa en la Figura 36.b se extraen conclusiones prácticas. En primer lugar, es posible saber que el signo del error cometido depende del semi-píxel en que caiga la traslación detectada. Entre $-0,5$ y 0 píxeles (de -15 a 0 m en las imágenes Landsat), los errores de registro serán negativos. Entre 0 y $+0,5$ píxeles (de 0 a 15 m en imágenes Landsat), los errores serán positivos. La única incógnita para la aplicación real sería conocer qué amplitud tendría la onda de error para cada tipo de imagen. Este resultado permite concluir que la exactitud al emplear el registro mediante LUFT en imágenes Landsat TM/ETM+/OLI es muy elevada como se muestra en los resultados del grupo de imágenes PSFD con un rango de $\pm 1,99$, en que además el signo del mismo será conocido según la traslación obtenida.

3.4. Conclusiones

Se ha demostrado la aplicabilidad del método de ampliación local del máximo de correlación (LUFT) para el registro de imágenes con resolución geométrica igual a las imágenes Landsat TM/ETM+/OLI con un alto nivel de exactitud.

A priori, cuanto más se amplíe la resolución del vecindario alrededor del máximo de correlación mejores resultados cabría esperar. Sin embargo, esta afirmación ha de ser matizada: **(i)** si se emplea un factor de *upsampling* de 1000 (con lo que esperaríamos una exactitud de 0,001 píxeles, 0,03 m en imágenes Landsat TM/ETM+/OLI) los errores reales son de alrededor de 0,1 píxeles (3 m). **(ii)** Se ha demostrado los resultados se ven afectados por la textura y la distribución de los elementos geográficos de las imágenes cruzadas así como por el hecho de cruzar diferentes bandas de una misma imagen; sin embargo, no se han podido separar sus respectivos efectos. **(iii)** Se ha podido mostrar un comportamiento intra-píxel de los errores que, no siendo aleatorios, siguen una forma sinusoidal. **(iv)** Esta forma ondulatoria no sólo aparece al relacionar el error cometido frente a la traslación que habría de haberse obtenido (Figura 36.a) sino que también lo hace al relacionar el error frente a la traslación obtenida (Figura 36.b), de este modo, aunque una vez obtenida una traslación no podamos saber el error cometido sí podemos asegurar si ese error habrá sido positivo o negativo; si la traslación detectada queda entre 0 y +0,5 píxeles, no sabemos qué error estaremos cometiendo pero sabemos que será un error positivo, si la traslación queda entre 0 y -0.5 píxeles sabemos que el error cometido será negativo. **(v)** Por último, el algoritmo ha sido evaluado usando dos conjuntos de imágenes diferenciados por el método de degradación y se ha demostrado que este hecho tiene consecuencias numéricas visibles en los errores.

Esta última observación tiene dos consecuencias. La primera se refiere al método de evaluación: el diseño del experimento y la forma en que se generen los datos afectan a los resultados. Es decir, la evaluación no se ve afectada únicamente por el método evaluado. La segunda se refiere a la aplicabilidad del método expuesto para la finalidad de la tesis: el grupo de imágenes que ha procurado simular con mayor exactitud un sensor Landsat TM (grupo de imágenes PSFD) lleva a un mejor resultado y otorga una fuerte confianza a su aplicabilidad en imágenes Landsat TM/ETM+/OLI reales. *Por tanto, el proceso de georreferenciación puede ser añadido al proceso metodológico de extracción de líneas de costa con precisión sub-píxel objeto de esta tesis.*

Capítulo IV

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DE LÍNEAS DE COSTA A IMÁGENES PROCEDENTES DE LANDSAT TM, ETM+ Y OLI.

"Por supuesto, si uno ignora las observaciones contradictorias, puede proclamar que tiene una teoría 'elegante' y 'robusta'. Pero eso no es ciencia"

Arp y Block, 1991

4.1. Introducción

En el capítulo II se ha propuesto una metodología para la obtención de líneas de costa con precisión sub-píxel partiendo de la banda infrarroja de un satélite de resolución media; por supuesto, con la clara intención de poder aplicarla sobre imágenes procedentes de los sensores Landsat TM/ETM+/OLI. Seguidamente, dada la necesidad de asegurar la precisión en la georreferenciación de tales imágenes, en el capítulo III se ha descrito el proceso de registro con precisión sub-píxel. En cada uno de tales capítulos se han evaluado los resultados de forma independiente. Así, el algoritmo de extracción de líneas de costa cifraba un error medio por debajo de los 2 m y error medio cuadrático del orden de los 5 m. La metodología de georreferenciación ha sido evaluada sin interacción

con el proceso de extracción de la línea de costa mostrando un error esperable por debajo de los 3 m.

Este capítulo parte de la aplicación conjunta de ambos capítulos para conformar un flujo de trabajo con que procesar líneas de costa a partir de imágenes Landsat TM/ETM+/OLI.

El objetivo último de este capítulo es la culminación del objetivo planteado para la presente tesis: la creación y evaluación de una metodología de trabajo para la obtención de líneas de costa con precisión sub-píxel a partir de imágenes Landsat TM/ETM+/OLI.

Los resultados de este capítulo es una ampliación sustancial del artículo publicado en *Remote Sensing of Environment* (Pardo-Pascual et al., 2012). Allí se concluyó que la metodología desarrollada permitía obtener la línea de costa con errores medios entre 1,22 y 1,63 m y errores medios cuadráticos entre 4,69 y 5,47 m. Esta valoración del error medio cuadrático venía justificada tras comprobar que los errores seguían una distribución normal con un 95% de probabilidad. Los datos empleados en aquel momento se obtuvieron a partir de un análisis de 45 Imágenes Landsat 5 y 7. El presente capítulo amplía la cantidad de datos, su procedencia y la metodología de análisis. Las diferencias afectan a diversos aspectos:

En Pardo-Pascual et. al. (2012) se menciona el mejor resultado que la banda 5 había arrojado hasta el momento y los análisis se centraron en tal banda. En este capítulo el análisis se extiende a las demás bandas infrarrojas 4 y 7 de los sensores TM y ETM+. Además se han incorporado las escenas de Landsat 8 disponibles hasta junio de 2013. El total de líneas analizadas en el artículo fue de 45, mientras que este capítulo se analizan las 348 líneas (Tabla 7).

Tabla 7. Número de líneas analizadas en Pardo-Pascual et al. 2012 y en el presente capítulo.

-Sensor-	-Banda-	Líneas analizadas en Pardo-Pascual et al., 2012		Escenas en el presente capítulo	
Landsat 5	4				59
	5		28		59
	7				59
Landsat 7	4			47	<i>Ganancia baja 27</i> <i>Ganancia alta 20</i>
	5	17	<i>Ganancia baja 7</i> <i>Ganancia alta 10</i>	47	<i>Ganancia baja 11</i> <i>Ganancia alta 36</i>
	7			47	<i>Ganancia baja 11</i> <i>Ganancia alta 36</i>
Landsat 8	5				10
	6				10
	7				10

La breve reseña que justifica el empleo de la banda 5 frente a las bandas 4 y 7 (renumeradas como 5, 6 y 7 en Landsat 8) desaparece aquí para dar lugar a un análisis con igual peso a las 3 bandas, independientemente de concluir la conveniencia de la banda 5.

En Pardo-Pascual et al. (2012) se realiza una exposición de la metodología completa desde el principio; incluida la modelización radiométrica. Sin embargo, en este capítulo se muestra con mayor detalle cómo las propias líneas de costa y su comportamiento llevan a la necesidad de tal modelización radiométrica. Para ello, se expondrán dos bloques de resultados: previa y posteriormente a la aplicación de este modelo estadístico.

En Pardo-Pascual et al. (2012) se generó el modelo radiométrico a partir de una parte de las líneas disponibles y se evaluó aplicándolo a todas las líneas. En el presente caso, los modelos han sido recalculados empleando todas las líneas disponibles y la evaluación se realiza sobre los residuos finales.

Todo ello ha llevado a que varias consideraciones hechas en la publicación de 2012 hayan sido actualizadas e incluso hayan requerido cambiar la manera de plantear los análisis. Sin embargo, dado que se ha gestionado un número mayor de datos, los resultados que aquí se exponen presentan una mayor robustez y fiabilidad.

4.2. Las imágenes Landsat

4.2.1. La misión Landsat

Referirse al programa Landsat implica referirse a uno de los sistemas de observación de la Tierra más empleados globalmente, prueba de ello es el esfuerzo realizado en el lanzamiento de nuevos sensores (ver Figura 37) materializado en la misión de continuidad o Landsat 8 –lanzado en febrero de 2013-. La serie de satélites Landsat cubren una órbita en aproximadamente 99 minutos y desde el lanzamiento de Landsat 8, las escenas son procesadas en apenas 24 horas. De entre sus usos destacan el seguimiento de usos del suelo, evolución de costas, glaciares, etc. En el propio texto *“Landsat 7 Science Data Users handbook”* (United States Geological Survey, 2006) distribuido por la agencia NASA se puede leer (página 7): *“El objetivo de la misión Landsat 7 es proporcionar periódicamente imágenes de alta calidad tanto en el espectro visible como infrarrojo de las zonas emergidas y cercanas a la costa, actualizando continuamente la base de datos existente. Los datos serán suficientemente consistentes con los datos previos en geometría, calibración, cobertura y características espectrales para permitir global y regionalmente la detección de cambios y su caracterización”*

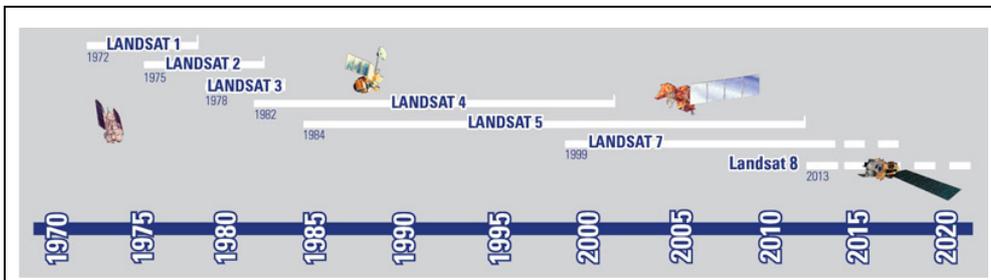


Figura 37. Cronología de los sensores Landsat.
(http://landsat.usgs.gov/about_mission_history.php)

En esta tesis se utilizan imágenes de Landsat TM, ETM+ y OLI. Ello implica mucha información dado el importante punto de inflexión que marcó el hecho de que, en 2008, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) comenzara a distribuir de forma libre las imágenes Landsat. Globalmente la importancia de este hecho se puede observar en el número de descargas de escenas Landsat desde entonces (ver Figura 38).

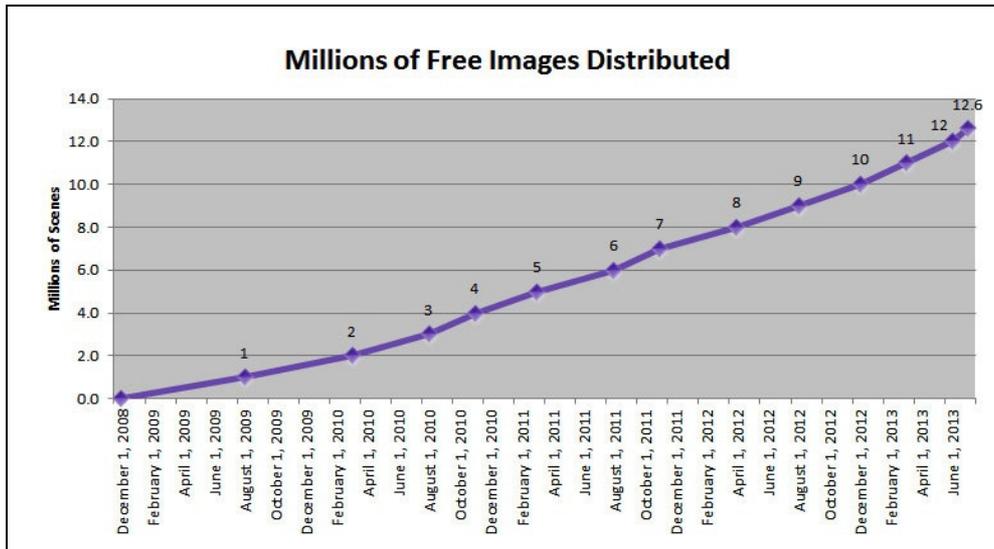


Figura 38. Descarga de escenas Landsat desde su distribución gratuita.

(http://landsat.usgs.gov/Landsat_Project_Statistics.php)

En cuanto a la completitud de la serie temporal de los datos a emplear en este capítulo, comienza con Landsat 5, lanzado el 1 de marzo de 1984 y en activo hasta el 21 de diciembre de 2012. El 15 de abril de 1999 se lanzó Landsat 7, que sigue en activo y capturando imágenes. No obstante, el 31 de marzo de 2003 Landsat 7 sufrió una avería y el *Scan Line Corrector* dejó de funcionar. El *Scan Line Corrector* es el mecanismo que mueve el sensor para que cada barrido sea tomado sin sufrir el efecto del avance del satélite. Sin este mecanismo, las franjas tomadas sufren un efecto de zig-zag dejando cuñas sin información (ver Figura 39) aunque toda escena es acompañada con una máscara que informa de los píxeles que se pueden considerar correctos.

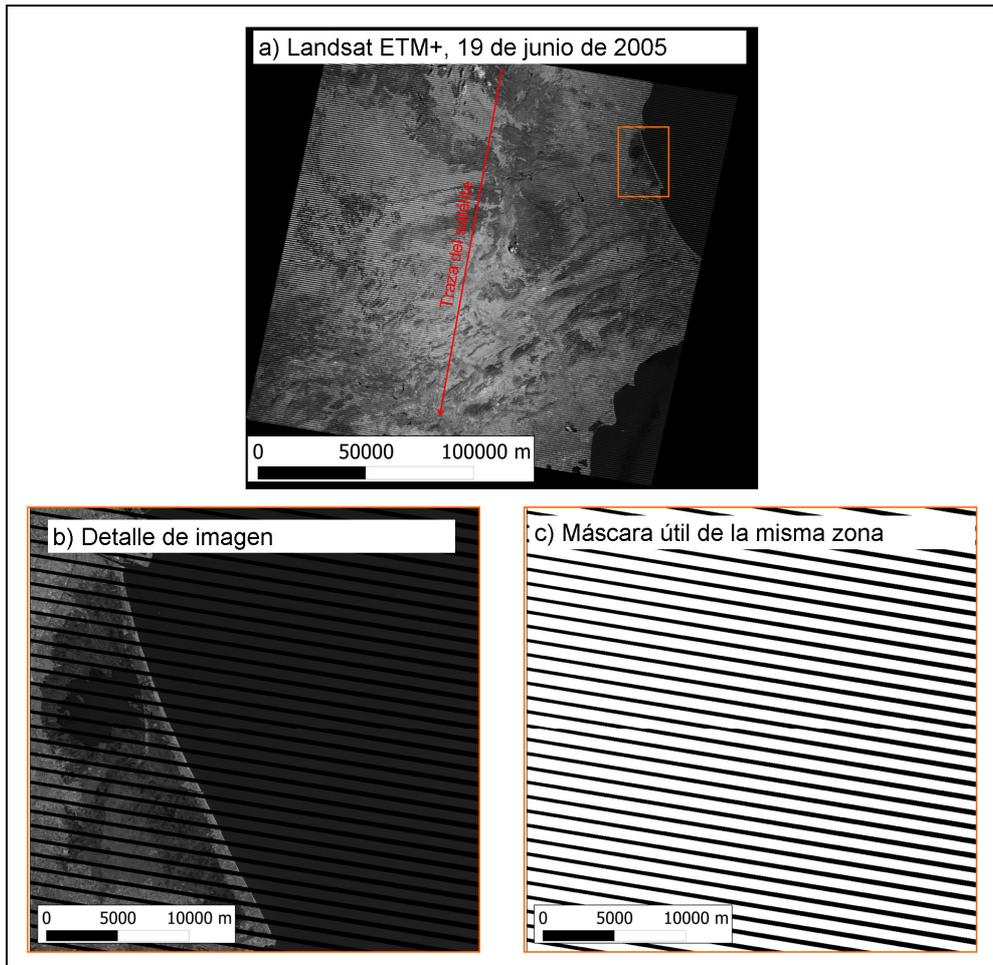


Figura 39. a) Banda 5 de la escena de Landsat 7 del 19 de junio de 2005, afectada por el error SCL-off. A lo largo de la traza del satélite no existen errores, pero aparecen y aumentan al alejarse de ella. b) y c) corresponden al mismo detalle sobre la Albufera de Valencia. b) El efecto zig-zag se presenta como franjas sin dato. c) Junto a las escenas descargadas se aporta una máscara que informa de los píxeles útiles.

Entre 2003 y 2012, fecha en que deja de funcionar Landsat 5, es precisamente éste el que aporta la mayor y más completa información. Ahora bien, en el lapso entre el cese de Landsat 5 (16 de febrero de 2012) y el 14 de abril de 2013, fecha en que se aporta la primera imagen útil de Landsat 8 de nuestra área de estudio, es Landsat 7 con error SCL-off el que permitiría completar la serie temporal.

Para este capítulo no se han empleado imágenes con error SCL-off pero en el Anejo VI se añade un estudio que justifica que los fragmentos de línea obtenidos de sensor serían tan válidos como aquellas líneas de imágenes sin el mencionado error. Este resultado ha sido publicado en Almonacid-Caballer et al. (2013).

La misión de continuidad, ya materializada en Landsat 8, sustenta dos nuevas bandas, una para el análisis de los cirros y otra, muy estrecha y de onda más corta que el azul, especialmente orientada a la observación del litoral y los aerosoles.

Evidentemente, sin la importancia que han tenido las misiones anteriores de Landsat no se habría podido justificar el esfuerzo por su continuidad. Aún más si cabe, en Europa se está preparando el satélite SENTINEL-2 de resolución espacial y espectral similar al propio Landsat TM/ETM+ y que permitiría una complementariedad entre ambos, especialmente si, conforme se prevé, también se podrá disponer gratuitamente de estas imágenes.

4.2.2. Características generales de los sensores TM, ETM+, OLI y TIRS

El éxito de las imágenes Landsat radica en el equilibrio entre sus resoluciones espacial (30 m/píxel), espectral, radiométrica y temporal. En la Figura 40 (Tomada de la presentación de Xavier Pons "Landsat 8. Novedades y posibilidades" Presentación en el Instituto Geográfico Nacional del 23 de mayo de 2013. http://blogpnt.files.wordpress.com/2009/06/xavierpons_sistema_landsat8.pdf) se presenta la evolución de las resoluciones espaciales y espectrales de las diferentes misiones Landsat.

Existe un claro salto entre el sensor MSS (Multispectral scanner) y los TM/ETM+ (Thematic Mapper, Enhanced Thematic Mapper plus), cuyo camino continúa con OLI/TIRS (*Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor*)

La resolución espacial se refiere al espacio ocupado en el terreno por la huella virtual de cada píxel. Las resoluciones espaciales se mantienen prácticamente constantes entre Landsat 5/7 y Landsat 8. Aunque a priori las bandas infrarrojas del sensor TIRS de Landsat 8 poseen una resolución de 100 m/píxel, el USGS las ofrece remuestreadas y geográficamente coincidentes con las bandas multiespectrales a 30 m/píxel.

La resolución espectral se refiere al número de bandas o canales, si bien es interesante cuestionar el ancho de banda de cada una de tales bandas. En cuanto a las ventanas espectrales, las bandas de los sensores TM/ETM+ son de iguales características frente a los dos sensores OLI (*Operational Land Imager*) y TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) de Landsat 8. Se observa que en el nuevo Landsat 8 las ventanas espectrales son más reducidas y destaca especialmente que la banda pancromática ya no es sensible al infrarrojo cercano. Aunque se hayan incorporado imágenes Landsat 8 para esta tesis, es una aproximación preliminar que tendrá continuidad en estudios futuros dado el todavía escaso número de imágenes de las zonas de test disponibles para ser analizadas. La cantidad de datos y las posibilidades de retrospcción obligan, por tanto, a centrar las conclusiones de mayor envergadura en los satélites Landsat 5 y Landsat 7.

La distribución de bandas del sensor Landsat OLI/TIRS (Landsat8) ha variado respecto a sus antecedentes Landsat TM (Landsat 5) y Landsat EMT+ (Landsat 7). La distribución queda:

- 1) Infrarrojo cercano (NIR, *Near InfraRed*). Violeta en la Figura 40. Banda 4 en Landsat 5 y 7. Banda 5 en Landsat 8. Alrededor de 900 nanómetros de longitud de onda.
- 2) Infrarrojo de onda corta (SWIR, *Short Wavelength Infrared*) queda cubierto en 2 bandas por cada sensor:
 - a. SWIR 1. Naranja en la Figura 40. Banda 5 en Landsat 5 y 7. Banda 6 en Landsat 8. Alrededor de 1700 nanómetros de longitud de onda.
 - b. SWIR 2. Gris en la Figura 40. Banda 7 en los tres satélites Landsat. Alrededor de 2300 nanómetros de longitud de onda.

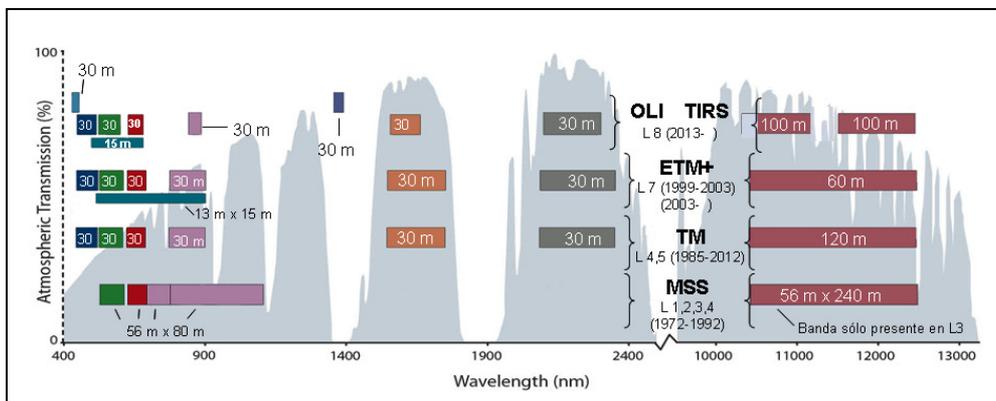


Figura 40. Evolución de las resoluciones espacial y espectral de las imágenes a lo largo de las misiones Landsat. Infrarrojo cercano (Near Infrared, NIR) en violeta alrededor de los 900 nanómetros (banda 4 de Landsat 5 y 7, banda 5 de Landsat 8). Infrarrojo de onda corta 1 (Short Wave Infrared, SWIR1) en naranja alrededor de 1700 nanómetros (banda 5 de Landsat 5 y 7, banda 6 de Landsat 8). Infrarrojo de onda corta 2 (Short Wave Infrared, SWIR2) en gris alrededor de 2300 nanómetros (banda 5 de Landsat 5 y 7, banda 6 de Landsat 8). Tomado de la presentación de Xavier Pons "Landsat 8. Novedades y posibilidades" Presentación en el Instituto Geográfico Nacional del 23 de mayo de 2013. (http://blogpnt.files.wordpress.com/2009/06/xavierpons_sistema_landsat8.pdf).

La resolución radiométrica se refiere al número de niveles que es posible almacenar en cada píxel de cada banda. La principal diferencia es aportada por Landsat 8 que tiene una profundidad de píxel de 16 bits en vez de los 8 bits de las Landsat 5 y 7 previas. Ello implica que es capaz de discernir 65536 niveles de gris frente a los 256 de sus predecesores.

La resolución temporal se refiere a la frecuencia de paso del satélite sobre un mismo lugar. Landsat 5, 7 y 8 tienen una frecuencia de paso de 16 días. Evidentemente ya no se dispone de las escenas de Landsat 5 pero es posible aprovechar la complementariedad temporal derivada del tiempo en actividad que compartió con Landsat 7, así como la que a partir de ahora habrá entre Landsat 7 y Landsat 8. Además de esta complementariedad entre satélites, sucede que las sucesivas pasadas de cada uno de estos sensores tienen cierto solape con las pasadas adyacentes. Ciertas zonas serán tomadas en sucesivos pasos del satélite por lo que zonalmente, como sucede en la Albufera de Valencia (Figura 41), se dispondrá de dos imágenes y no sólo una, cada dieciséis días. En las mejores condiciones se está considerando que ciertas zonas podrán disponer de hasta cuatro escenas cada dieciséis días contando con ambos satélites.

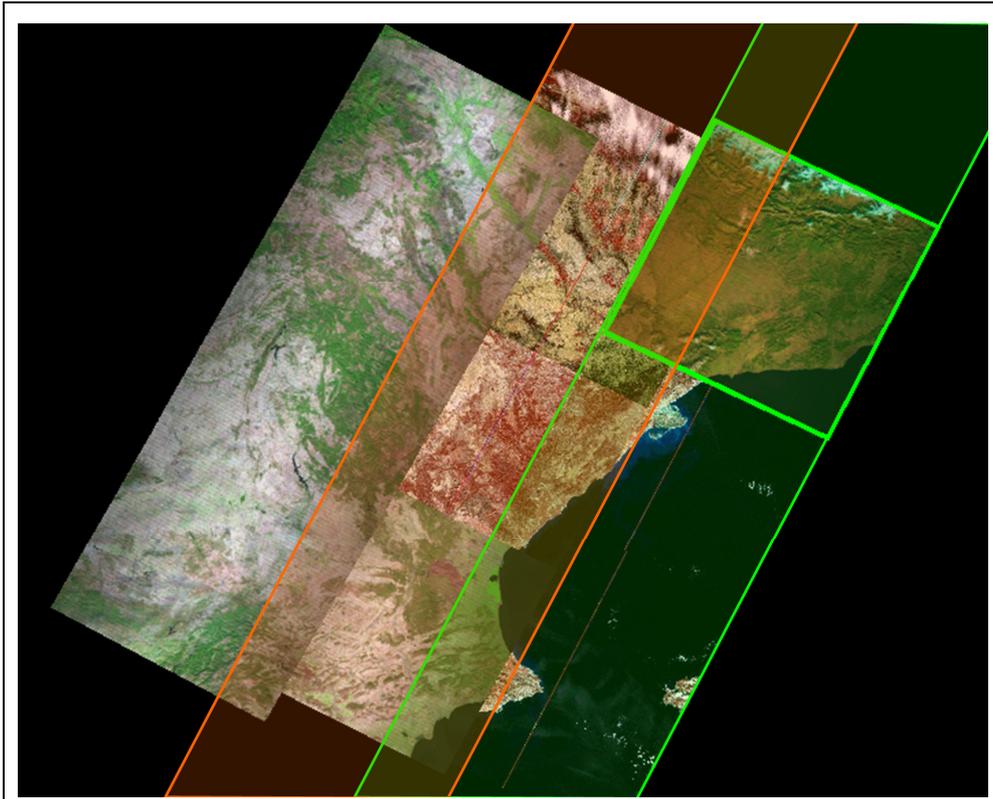


Figura 41. Solapamiento entre escenas Landsat. En verde se observa el "path" 198 y en naranja el "path" 199. Se observa que, en ciertas zonas, como sucede en la albufera de Valencia, el solape hace posible disponer de más de una sola escena cada dieciséis días.

4.2.3. Niveles de procesado de las imágenes Landsat por parte del USGS

Las imágenes Landsat pueden tener varios niveles de procesado en dos aspectos: radiometría y geometría. La radiometría consiste en la respuesta recibida y almacenada por cada píxel mientras que la geometría se refiere a la ubicación geométrica de los píxeles de la imagen. La propia NASA, encargada de su procesamiento, distingue varios niveles de productos según el grado de preprocesado al que hayan sido sometidas. Atendiendo a la nomenclatura de la NASA (2006), cabe distinguir:

- 1) L0R, o RAW. Se trata de las imágenes sin tratamiento ninguno.
- 2) L1G (*Systematic Correction*). Proporciona una imagen con correcciones sistemáticas de radiometría y geometría. La parte radiométrica es corregida mediante parámetros propios del sensor. La parte geométrica, referida a la georreferenciación es calculada de los datos de efemérides del sensor. En ellas no se ha corregido el desplazamiento de los píxeles en función de la altitud del terreno, por lo que la precisión oscila en el entorno de los 250 m.
- 3) L1Gt (*Systematic Terrain Correction*). Proporciona las correcciones radiométricas y geométricas sistemáticas descritas en L1G pero añadiendo el empleo de un modelo digital de elevaciones (MDE) para corregir respecto a la topografía. El MDE empleado es el Radarsat Antarctic Mapping Digital Elevation Model version 2 (RAMP v2).
- 4) L1T (*Standard Terrain Correction*). La corrección radiométrica sigue siendo sistemática con valores nominales del sensor. La corrección geométrica experimenta una mejora considerable al emplear puntos de control y mejores modelos digitales de elevación para la corrección topográfica. La precisión depende de la cantidad y distribución de los puntos de control.

Las imágenes ofrecidas por USGS se encuentran, a priori, con nivel de procesado L1T. Los demás niveles de procesado han sido empleados para su procesado por otras entidades a lo largo del tiempo y para fines diversos.

Otra cuestión clave, una vez determinada la corrección geométrica, es la aplicación de un sistema de remuestreo de la imagen para su posicionamiento final. Esta cuestión no es baladí en un trabajo como el que aquí se afronta. De hecho, en los ensayos iniciales del algoritmo de extracción de la línea de costa se pudo comprobar que los resultados finales quedaban muy influidos por el tipo de remuestreo aplicado. El uso de imágenes que hubiesen sido remuestreadas utilizando el algoritmo del vecino más próximo impedía la obtención de una solución sub-píxel y provocaban la obtención de líneas de costa

afectadas por el efecto de 'diente de sierra' o 'dentado'. Así, toda imagen empleada para la tesis procede del USGS y, en todas ellas, los píxeles han sido generados mediante convolución cúbica (*Cubic Convolution*).

El Servicio Geológico de los EEUU ha empleado dos sistemas de procesado denominados: LPSG (*Level 1 Product Generation System*) y NLAPS (*National Land Archive Production System*)¹. Son muy escasas las imágenes de Landsat 4 y 5 procesadas mediante NLAPS, el resto es coherente y procesado mediante LPSG. La principal consecuencia es la diferente posición de los píxeles de las bandas de diferentes resoluciones (térmicas, multiespectrales y pancromáticas) de cada escena –ver Figura 42–.

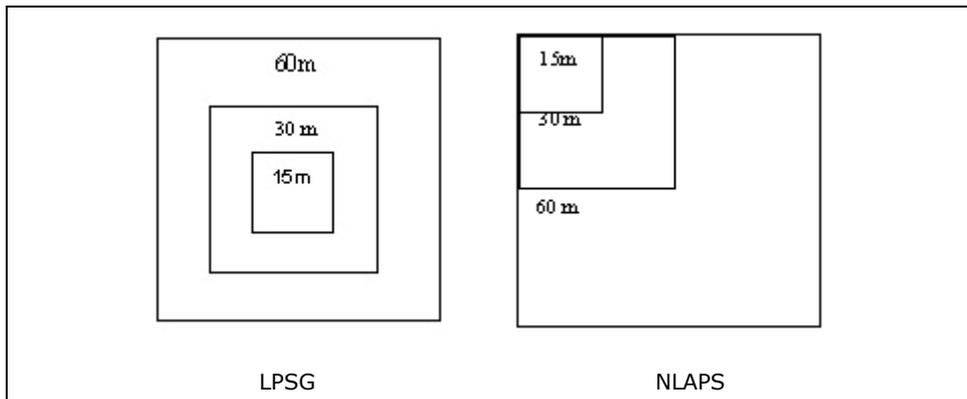


Figura 42. Diferencia visual de procesamiento de las bandas Landsat mediante sistemas LPSG y NLAPS. Se observa dónde se ubica la 'huella' de las bandas de diferente resolución según el método de procesado. (http://landsat.usgs.gov/products_IP_LPGSvsNLAPS.php)

Radiométricamente existe una particularidad en las imágenes del sensor ETM+ de Landsat 7. El sensor permite tomar las imágenes en dos modos de ganancia: alta y baja. Esta diferencia se muestra en la Figura 43.

¹ La documentación referente al procesado Landsat se encuentra de forma no impresa en los documentos *.pdf y/o en la propia página del USGS (Landsat.usgs.gov). La documentación referente a la diferencia entre LPSG y NLAPS ha podido ser encontrada en <http://landsat7.usgs.gov/lpgsnlaps.html> o bien en http://landsat.usgs.gov/products_IP_LPGSvsNLAPS.php.

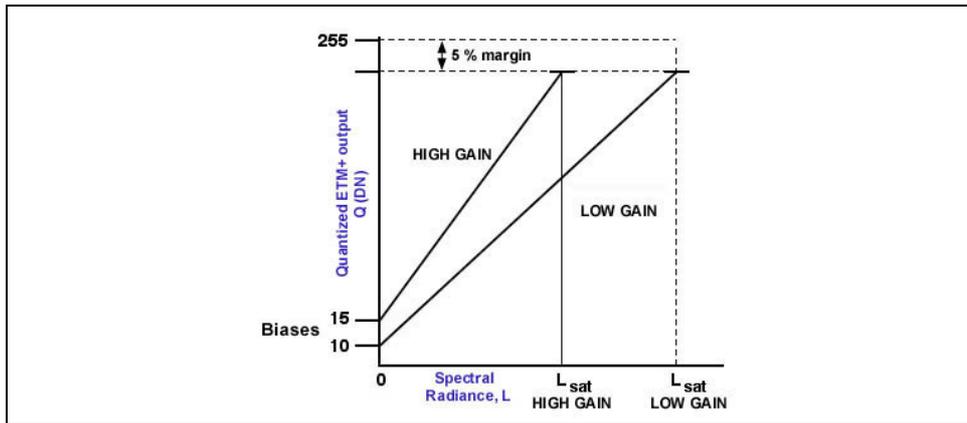


Figura 43. Pendientes de las transformaciones que implica la toma de las imágenes en alta o baja ganancia según las especificaciones técnicas de Landsat 7 (Landsat 7 Handbook, on line, NASA, 2006). http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf

A priori, el tratamiento radiométrico se gestiona desde las estaciones de control previendo el comportamiento de 6 tipos de cobertura: terrestre, desierto, hielo-nieve, agua, hielo-marino, noche/volcanes.

- 1) Tierra (sin desierto ni hielo).
 - a. Bandas 1 a 3 en alta ganancia.
 - b. Banda 4: alta ganancia salvo elevaciones solares mayores a 45° . Esto se debe a la consecuente reflectancia en cubiertas vegetales que a mayores ángulos que 45° saturan el sensor.
 - c. Bandas 5 y 7 en alta ganancia.
 - d. Banda 8 en baja ganancia.
- 2) Desierto
 - a. Bandas 1 a 3 en alta ganancia salvo elevaciones solares mayor a 28° .
 - b. Banda 4: alta ganancia salvo elevaciones solares mayores a 45° .
 - c. Bandas 5 y 7 en alta ganancia salvo para elevaciones solares mayores a 38° .
 - d. Banda 8 en baja ganancia.
- 3) Hielo-Nieve.
 - a. Bandas 1 a 3 en alta ganancia salvo elevaciones solares mayor a 19° .
 - b. Banda 4: alta ganancia salvo elevaciones solares mayores a 31° .

- c. Bandas 5 y 7 en alta ganancia.
 - d. Banda 8 en baja ganancia.
- 4) Agua, arrecifes de coral.
- a. Bandas 1 a 5 y 7 en alta ganancia.
 - b. Banda 8 en baja ganancia.
- 5) Noche, volcanes.
- a. Bandas 1 a 4 en alta ganancia.
 - b. Bandas 5 y 7 en baja ganancia.
 - c. Banda 8 en baja ganancia.

4.3. Metodología de procesamiento y evaluación

A priori, la extracción de las líneas de costa y su georreferenciación constituyen un único flujo de trabajo. Sometiendo dicho flujo de trabajo a evaluación es posible alcanzar ciertos resultados numéricos y derivar de ellos una serie de conclusiones.

Sin embargo, esta tesis no pretende únicamente tomar una metodología propia o ajena y evaluarla a un caso concreto. Aquí se pretende proponer la metodología en sí misma y, dado que esta metodología nace aquí, es posible modificarla en función de los resultados que se obtengan mientras se desarrolla.

Dicho de otro modo, cuando lo que se pone en duda es tal flujo de trabajo en sí mismo, existe el riesgo de entrar en un proceso cíclico de tres pasos: 1º, proponer el flujo de trabajo, 2º, evaluarlo, observando deficiencias o nuevas necesidades y, 3º, proponer mejoras. Tras el tercer paso se reiniciaría el proceso evaluando el flujo de trabajo con las modificaciones oportunas.

Estos tres pasos son, en sí mismos, la metodología de evaluación para alcanzar una buena metodología. Así sucede en el presente capítulo puesto que de unos resultados preliminares será posible proponer una mejora con que se alcanzará la metodología completa para obtener líneas de costa con precisión sub-píxe.

4.3.1. Flujo de trabajo propuesto para la extracción de líneas de costa en imágenes Landsat

Tras la exposición de los dos primeros capítulos se está en disposición de crear una metodología que aplicar sobre imágenes Landsat TM/ETM+/OLI (Figura 44).

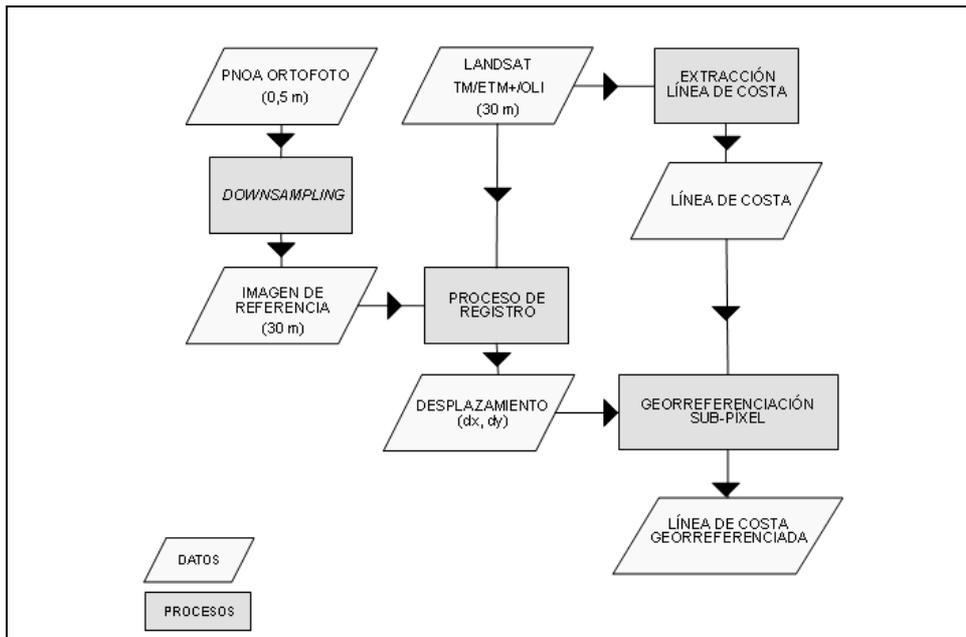


Figura 44. Flujo de trabajo: integración de la extracción de la línea de costa y la georreferenciación.

Concretamente, la propuesta consiste en dos pasos: extraer las líneas de costa y georreferenciarlas respecto a una imagen de referencia. Por un lado, se obtiene una línea por cada escena Landsat. Por otro lado, se toma una imagen de referencia para la georreferenciación. En este caso se ha optado por una ortofotografía con resolución geométrica de 0,5 m/píxel que garantiza gran precisión en su posicionamiento. Dadas las características del proceso de georreferenciación propuesto, se ha de remuestrear esta imagen a una resolución igual a la de las imágenes Landsat TM/ETM+/OLI. Normalmente, la georreferenciación de una imagen implica remuestrearla para crear una versión de la misma localizada geográficamente en el lugar correcto. Este proceso de remuestreo implica una modificación en los niveles de intensidad de las imágenes resultantes y, si el algoritmo de extracción de la línea de costa se aplicara sobre ellas, podría afectar a la posición de la línea de costa resultante. Dada esta potencial fuente de error, se propone que se obtenga, del registro de cada imagen Landsat frente a la imagen de referencia, las dos traslaciones necesarias para la georreferenciación (dx , dy). Sumando estas traslaciones a las coordenadas de los puntos que conforman las líneas de costa que se obtienen de cada escena, se habrá realizado la georreferenciación de esas líneas de costa.

En resumen, cada escena Landsat permite llegar a una línea de costa por un lado y calcular unos parámetros de georreferenciación por otro. Cada línea de costa es posteriormente georreferenciada mediante tales correcciones y ambos procesos se mantienen independientes entre sí.

4.3.2. Procedimiento particular de evaluación

El proceso de evaluación de las líneas de costa también es particular en la presente tesis. El procedimiento de evaluación consiste en la comparación de cada línea de costa obtenida frente a una línea de referencia. En el capítulo II, cada imagen QuickBird servía a la vez para fotointerpretar una línea de referencia con resolución de 2,4 m y evaluar las líneas obtenidas tras remuestrear las mismas imágenes a una resolución similar a la de Landsat TM/ETM+/OLI. Este proceso es inviable en el presente caso puesto que no se dispone de una imagen de alta resolución que coincida temporalmente con cada imagen Landsat TM/ETM+/OLI.

La adaptación del procedimiento de evaluación para el presente capítulo consiste en encontrar las líneas adecuadas para servir como referencia.

El requisito principal para la selección de áreas de evaluación ha sido asegurarse de que no se hubieran producido cambios en la posición de la línea de costa durante el período de adquisición de las imágenes Landsat utilizadas (1984-2013). Dado que el objetivo de esta tesis es aportar información útil, entre otras cuestiones, para el análisis de la dinámica de las playas, lo lógico sería haber tomado alguna playa como área de control. Sin embargo, el propio dinamismo de los espacios de playa hace imposible usar estos ambientes para la evaluación, siendo necesario tomar áreas completamente estabilizadas –a la escala temporal que aquí se plantea– como son aquellas formadas por materiales rocosos. Las áreas acantiladas cumplen la condición de estabilidad pero habitualmente presentan una configuración –menos lineal, más rugosa– muy distinta a las playas, por lo que no resultaba conveniente. La solución elegida ha sido el empleo de segmentos de zonas artificialmente estabilizadas.

El sector escogido tiene 20 km de largo y se encuentra en la costa mediterránea española, extendiéndose al sur del puerto de Castelló de la Plana y del puerto de Borriana (Figura 45).

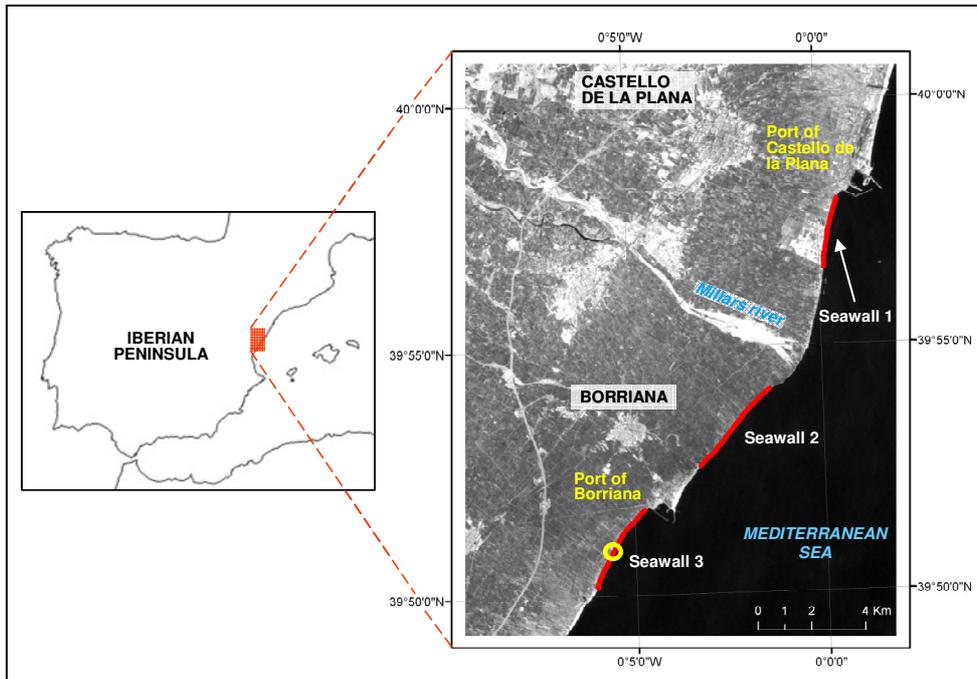


Figura 45. Escolleras (líneas rojas) del área de estudio. Círculo amarillo explicado en el texto. De fondo imagen Landsat 5.

Se trata de una costa micro-mareal, el rango de la marea astronómica media es de menos de 25 cm y las variaciones máximas del nivel del mar durante un año no exceden los 80 cm (Puertos del Estado, 2009). El oleaje medio que afecta al sector en estudio tiene niveles de energía relativamente bajos (la altura media de las olas es de 0,7 m y del período de pico de la ola media es de 4,2 segundos). Sin embargo, la altura de las olas durante las tormentas puede alcanzar hasta 5 m y el período se puede extender hasta los 15 segundos (datos sobre el oleaje obtenidos de la base de datos de Puertos del Estado²). En los últimos 50 años se han construido diversas defensas longitudinales de escollera para detener la erosión que se produce tras los diques portuarios y espigones aguas abajo de la dirección del transporte litoral y, por lo tanto, estabilizar la línea de costa. De hecho, aproximadamente 11 km de los 20 km de costa utilizados han sido protegidos artificialmente con piedra de escollera (Figura 45).

El primer segmento, denominado escollera-1, se localiza inmediatamente al sur del puerto de Castelló de la Plana y tiene una extensión de 2,9 km. Sin embargo, en este puerto se realizó una ampliación en 2005 y parte de esta escollera quedó integrada en el puerto. Por otra parte, dentro de la escollera había algunas pequeñas instalaciones para la descarga de líquidos que conectaban directamente con industrias adjuntas al puerto.

² http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/redes_de_medida/index.html

Dichas instalaciones industriales se encuentran en la costa por lo que, en ese segmento, la línea de costa presenta inflexiones en su configuración que la hacen sustancialmente distinta a las playas.

El segundo segmento -que llamamos escollera 2-, es de 4 km de longitud y se encuentra en un medio agrícola, dominado por campos de naranjos. Este segmento se estabilizó artificialmente en distintas fases, sin embargo, para los intereses de este trabajo cabe señalar que la zona norte (Figura 46) estaba ya estabilizada artificialmente en 1981, mientras que la zona sur se estabilizó entre 1981 y 1986. Es por ello que este sector meridional no ha sido tomado en consideración para hacer las pruebas de evaluación con registros anteriores a 1986.

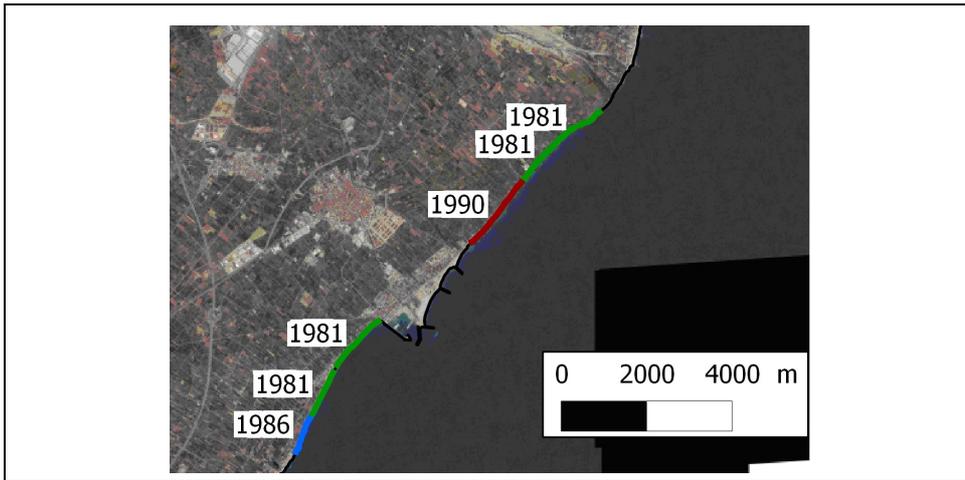


Figura 46. Año de construcción de las diversas escolleras. De fondo, ortofotografía del PNOA (2008). Detalle de las escolleras 2 y 3.

El tercer segmento es de 2,73 km de longitud y se inicia inmediatamente al sur del puerto de Borriana, lo que llamaremos escollera 3. La costa aquí es prácticamente rectilínea y en la zona interior hallamos el predominio de espacios urbanos en la parte norte y campos de naranjos en el sur. La mayor parte de este sector estaba ya estabilizado artificialmente en 1981 (Figura 46), excepto un pequeño segmento en el que se construyó la escollera entre 1981 y 1986. Obviamente, las evaluaciones llevadas a cabo se han hecho únicamente sobre aquellos segmentos en los que se sabía que la línea de costa ya estaba completamente estabilizada. En 2005 se construyó un espigón exento permitiendo la creación de una pequeña playa (indicada con un círculo amarillo en la Figura 45) por lo que desde ese momento no se ha empleado esta zona en la evaluación.

Estructuralmente, la forma de la defensa longitudinal no es igual a lo largo de todo el espacio costero utilizado como zona de evaluación. La mayor parte de la zona de estudio se ha rigidizado mediante un sistema constructivo que asegura un borde agua/no agua

nítido (Figura 47 b). Sin embargo, en ciertas zonas de la escollera 2 se ha realizado mediante la ubicación de grandes bloques de piedra que permiten el paso limitado del agua en momentos de temporal (Figura 47 a).

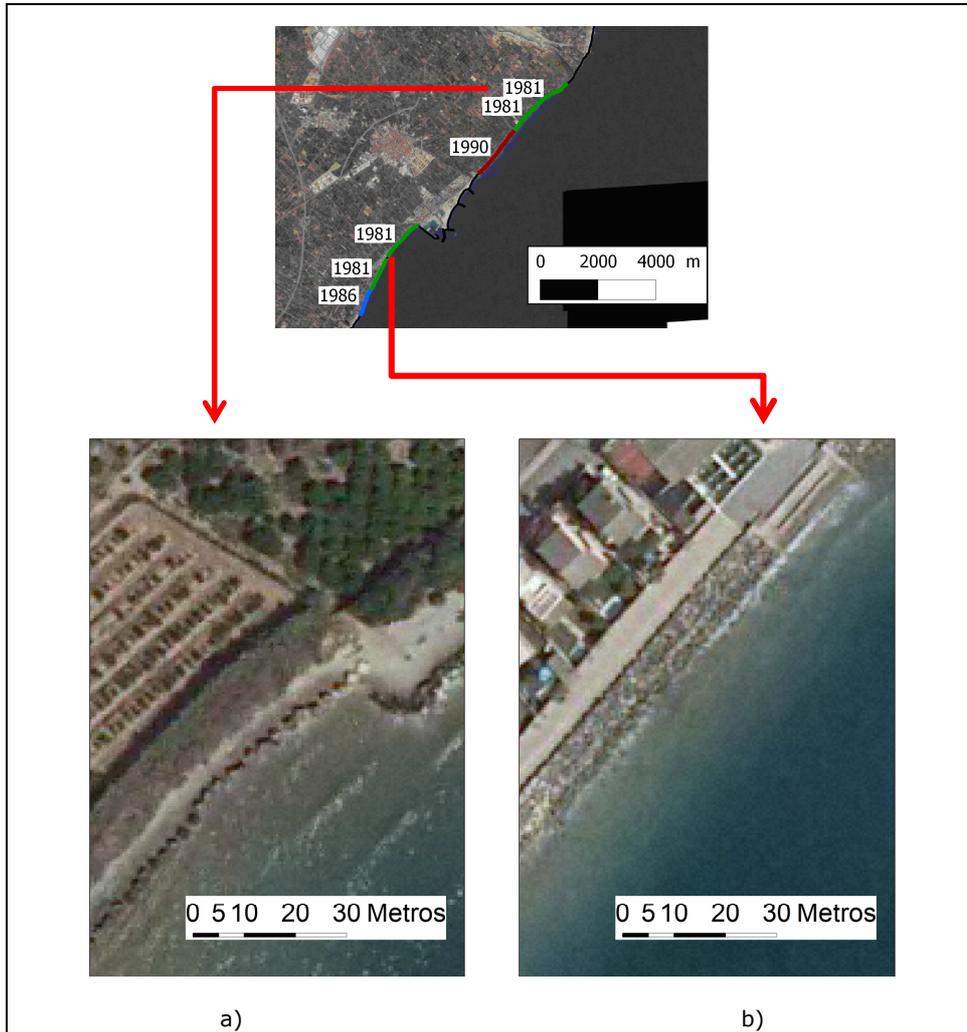


Figura 47. Detalle constructivo de a) extremo norte de la escollera 2 y b) resto de la escollera 2 y toda la escollera 3.

4.3.3. Factores potenciales de error y estadísticos para su cuantificación.

Todas las líneas analizadas están compuestas por puntos. La obtención de su error (o distancia a la línea de referencia) ya ha sido descrita. Ahora bien, estas distancias

medidas son las magnitudes con que hemos de comprender el comportamiento del algoritmo, son el equivalente a un microscopio para observar lo que no se puede fotointerpretar a simple vista.

Evaluar la precisión de las líneas obtenidas requiere tener en cuenta principalmente 2 factores: la geometría de la línea de costa y la radiometría o respuesta espectral alrededor de la misma.

La **geometría** se refiere a la limitación inherente al propio método de detección de la línea de costa por la resolución y método de ajuste. Si existe un accidente geográfico (espigón, bahía, etc) cuya inflexión o tamaño son pequeños y no pueden ser observados en la imagen, la línea resultante sufrirá una inflexión suave alrededor de tal accidente pero su contorno no será detalladamente trazado. El algoritmo es capaz de encontrar una inflexión sub-píxel cuando se trata de una línea de costa de cierta continuidad (recordemos que, dadas las conclusiones del Capítulo II se va a procesar con un vecindario de 7x7 píxeles). Por este mismo hecho, el ajuste de la función interactúa con la continuidad de la línea de costa afectando geoméricamente al resultado.

La **respuesta radiométrica diferente** se refiere a la influencia que la respuesta espectral de cada cobertura adyacente a la playa tiene sobre la línea detectada. Por ello se propone prestar atención a tres niveles de análisis (Tabla 8). El primer nivel, el más obvio, lleva a distinguir entre los 3 diferentes sistemas analizados: Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8. El segundo nivel implica distinguir las 3 bandas que cada sensor aporta: un infrarrojo cercano (banda 4 para Landsat 5 y Landsat 7, banda 5 en Landsat 8), un infrarrojo medio (banda 5 en Landsat 5 y Landsat 7, banda 6 para Landsat 8) y un infrarrojo medio de onda larga (banda 7 para todos los Landsat). El tercer nivel afecta sólo a Landsat 7; en este sensor se ha dividido el conjunto de líneas obtenidas en cada una de sus 3 bandas en 2 grupos según el sensor tomara respectivamente las imágenes con alta o baja ganancia.

Tabla 8. Niveles analizados para la distinción radiométrica.

Nivel 1 -Sensor-	Nivel 2 -Banda-	Nivel 3 -Ganancia-
Landsat 5	4	
	5	
	7	
Landsat 7	4	<i>Baja</i>
		<i>Alta</i>
	5	<i>Baja</i>
		<i>Alta</i>
	7	<i>Baja</i>
		<i>Alta</i>
Landsat 8	5	
	6	
	7	

Estos 3 niveles implican diferencias en los valores de intensidad debido a las distintas respuestas espectrales de cada cobertura. Esta variación de las respuestas en las diferentes coberturas afecta a la superficie matemática ajustada con que se obtiene la línea de costa y, en consecuencia, a la ubicación de la línea de inflexión y línea de costa deducidas.

El análisis de errores en función de los 3 niveles de distinción radiométrica rige la mayor parte del capítulo por lo que conviene estructurar su exposición. Los análisis se disponen en 3 pasos, cada uno de ellos más detallado que el anterior:

- 1) Análisis global de histogramas.
- 2) Análisis de medias por fecha.
- 3) Análisis de dispersiones por línea.

4.3.3.1. Análisis global de histogramas

Dada la cantidad de información realizada, la forma más directa de realizar un análisis inicial es a través del histograma de frecuencias de todas las distancias/errores medidos en todos los puntos de todas las líneas analizadas para cada tipo de sensor y cada zona de análisis.

Es importante aclarar qué estadísticos van a emplearse. Las tablas dispondrán de 3 bloques de análisis. **1)** El primero simplemente informa del número de puntos utilizados para la evaluación y el rango de errores. **2)** El segundo bloque aporta estadísticos significativos si se presupone una distribución normal de los errores. **3)** En el tercero, aparece un bloque de estadísticos descriptivos útiles para hacer una correcta descripción de la muestra independientemente de que los datos sigan o no una distribución normal.

Si desglosamos con un poco más de detalle la información aportada en cada bloque tenemos:

- 1) Información general:
 - a. Recuento (n): número de puntos que han intervenido en determinado análisis.
 - b. Mínimo/máximo/rango. Se refiere a las distancias extremas con signo negativo o positivo en cada análisis.
- 2) Distribución normal. Aquella información que presupone la normalidad de la muestra analizada.
 - a. Promedio (μ). Media aritmética de las distancias obtenidas.
 - b. Desviación estándar, (σ). Cuantifica la precisión de una medida. En el caso de que una muestra idea que siga una distribución normal indica que el 68% de los valores de la muestra se encuentra en el intervalo $\mu \pm \sigma$
 - c. Error estándar $\left(e.e = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$. Se emplea para intervalos de confianza del valor promedio. El 95% de las veces, dada una muestra de n valores, el promedio estará contenido en el intervalo $\mu \pm 1.96 \cdot e.e$.
 - d. Coeficiente de asimetría (*skewness*). En distribuciones similarmente normales, su valor negativo indica que existe una cola de datos a la derecha (existe un sesgo a la izquierda o hacia el mar), su valor positivo indica que existe una cola de datos a la izquierda (existe sesgo a la derecha o hacia tierra).
 - e. Curtosis. En distribuciones normales indica el nivel de aplanamiento de la curva ajustada.
- 3) Distribución general.
 - a. Mediana. Dato cuya posición marca la centralidad de la muestra analizada, equivale al percentil 50. Su diferencia con el promedio indica falta de simetría.
 - b. Cuartil inferior/Cuartil superior/rango intercuartil. El cuartil inferior es aquel valor tal que todos los valores menores a él implican el 25% de los datos. Simétricamente, el cuartil superior es aquel valor tal que todos los valores mayores a él implican el 25% de los datos. Por tanto,

el rango intercuartílico indica la distancia (o intervalo) en que se encuentra el 50% de los datos.

- c. Sextil inferior/Sextil superior/rango intersextílico. El sextil inferior es aquel valor tal que todos los valores menores a él implican la sexta parte (16,6%) de los datos. Simétricamente, el sextil superior es aquel valor tal que todos los valores mayores a él implican la sexta parte (16,6%) de los datos. Por tanto, el rango intersextílico indica la distancia (e intervalo) en que se encuentran 4/6 de los datos (66,6%).

4.3.3.2. Análisis de medias por fecha

Todas las distancias respecto a la referencia de los puntos de una línea obtenida en una escena determinada son promediadas y representadas gráficamente. Esto permite comparar el error cometido por las líneas de una misma fecha obtenidas con las tres bandas infrarrojas de una misma escena Landsat. A su vez, este análisis queda libre del efecto de promediar todos los errores de una misma tipología de imagen. Dado que permite comprobar el comportamiento diferenciado de los errores según la zona de evaluación, hace posible relacionar el error cometido con la naturaleza de la propia zona.

4.3.3.3. Análisis de dispersiones por línea

Se trata de un análisis complementario al anterior. Dado que cada línea, en cada fecha, se compone de diversos puntos, el promedio estará acompañado de una dispersión también diferente. Se entiende que, analizando la dispersión además del error promedio, se estará detallando el comportamiento interno de los puntos que componen cada línea.

4.4. Importancia de la georreferenciación sobre la exactitud de las líneas de costa

El capítulo de georreferenciación tuvo su razón de ser en la duda razonable sobre la precisión con que cada escena Landsat podía estar georreferenciada a priori. Esta duda viene dada por ciertas experiencias iniciales y errores groseros puntuales (detectables a simple vista) de ciertas imágenes.

Disponiendo de zonas de evaluación, es posible comparar la exactitud de la posición de las líneas de costa sub-píxel antes y después del proceso de georreferenciación. En la Figura 48 se muestra la comparación de los histogramas de tales errores cometidos. Cada par de histogramas representa en la parte superior e inferior el histograma de errores antes y después de la georreferenciación, respectivamente. Los histogramas se han realizado teniendo en cuenta todo el conjunto de líneas para cada uno de los 3 satélites.

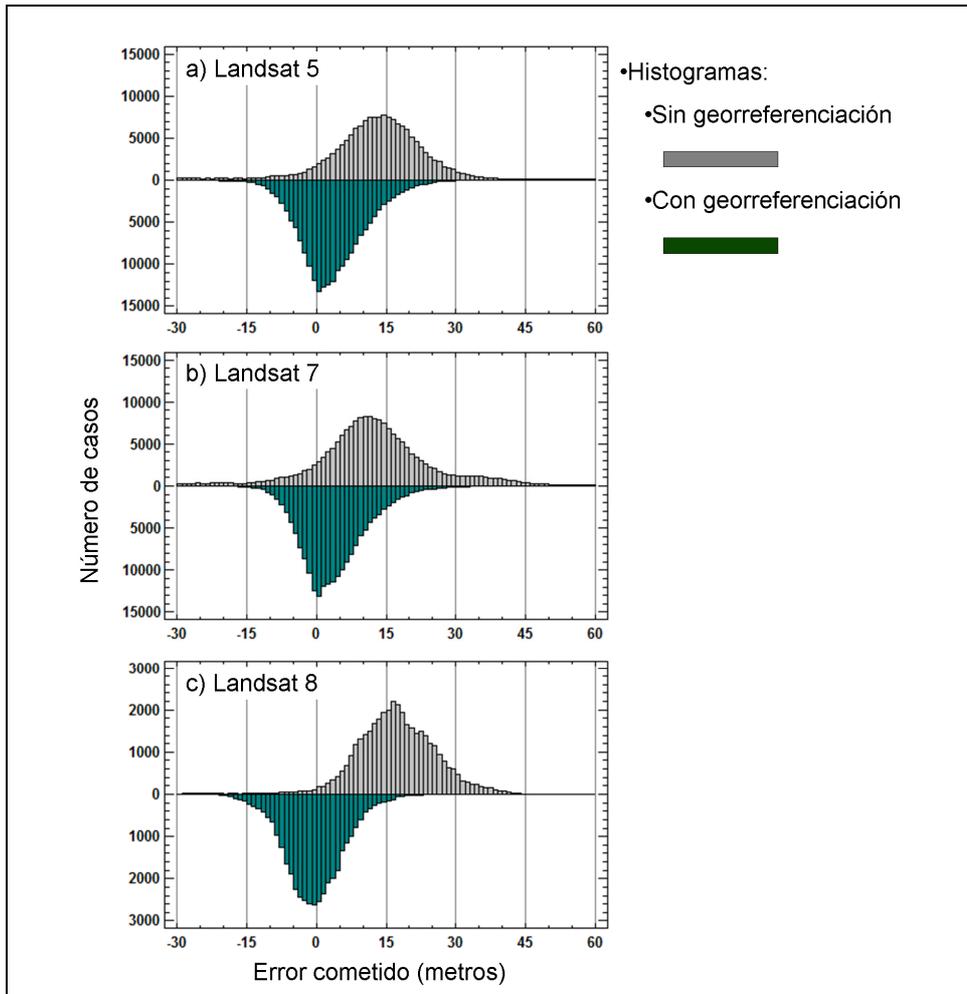


Figura 48. Histogramas de las distancias a las líneas de referencia antes y después de la georreferenciación sub-píxel. a) Landsat 5, b) Landsat 7, c) Landsat 8. El eje Y de la figura c) es diferente dado el número sustancialmente menor de imágenes disponibles de Landsat 8.

Se dan tres aspectos destacables. En primer lugar, los rangos de los errores se reducen drásticamente (Tabla 9), lo cual es indicativo de que determinados errores groseros son debidos principalmente a la georreferenciación inicial de las imágenes, especialmente en Landsat 5 y 8.

Tabla 9. Resumen estadístico. Errores de las líneas de costa antes (sin GR) y después de la georreferenciación (con GR).

	<i>Landsat 5</i>		<i>Landsat 7</i>		<i>Landsat 8</i>	
	<i>Sin GR</i>	<i>Con GR</i>	<i>Sin GR</i>	<i>Con GR</i>	<i>Sin GR</i>	<i>Con GR</i>
<i>Recuento de imágenes</i>	59	59	47	47	10	10
<i>Recuento de puntos</i>	200493	200493	189972	189972	38897	38897
<i>Promedio (m)</i>	76,421	3,615	12,982	3,753	16,950	-0,548
<i>Desviación Estándar (m)</i>	207,667	7,050	15,326	7,015	9,015	6,334
<i>Mínimo (m)</i>	-669,175	-25,697	-72,158	-29,096	-30,849	-25,664
<i>Máximo (m)</i>	1148,114	37,950	89,001	43,710	54,063	28,953
<i>Rango (m)</i>	1817,289	63,647	161,159	72,806	84,912	54,617

En segundo lugar se observa que la aportación de la georreferenciación es inferior al tamaño de píxel de las imágenes (30 m/píxel) pero estadísticamente significativa en tanto que todas las líneas pierden el sesgo positivo. El hecho de disminuir la desviación típica es debido a que el análisis tiene en cuenta muy diversas escenas y la georreferenciación sirve como proceso de homogeneización.

En tercer lugar. Las correcciones han quedado, en su mayoría, en valores por debajo del píxel y las líneas han quedado ubicadas en rangos de error medio y desviación de apenas la quinta parte del píxel. Es decir, aunque no fuera perceptible el desplazamiento de las imágenes entre sí, existe y es detectable en el error de las líneas de costa. Sin embargo, cabe observar el error medio de 76,421 m mar adentro que presentan las líneas de Landsat 5 antes de realizar la georreferenciación. En la Figura 48 sólo se muestra ± 60 m, por lo que no se alcanza dicho valor. La razón de este valor tan elevado es un conjunto de imágenes con errores groseros de georreferenciación, principalmente provenientes de escenas Landsat TM de la década de los 80 y no por ampliar la Figura 48 se habría observado ningún comportamiento especial aunque numéricamente sí tienen un efecto claro.

4.5. Aplicación inicial de la metodología de extracción de la línea de costa sobre una serie de imágenes Landsat

Tras verificar el papel de la georreferenciación, se analiza seguidamente el comportamiento detallado de los errores de las líneas georreferenciadas.

4.5.1. Evaluación de errores por geometría

Se concluyó en el Capítulo II que los parámetros óptimos para la extracción de la línea de costa son: el empleo de vecindarios de 7x7 píxeles, y la extracción de 4 puntos por píxel (un equi-espaciado de extracción de 7,5 m). La hipótesis con que se trabaja y que rige el algoritmo parte de considerar que, **(i)** en cada vecindario analizado sólo se dan dos coberturas (tierra y mar), **(ii)** que cada una se encuentra unida y sólo una línea marca la división entre ambas dentro de tal vecindario, **(iii)** y que tal línea de separación sigue un trazado suave y sin inflexiones bruscas.

¿Por qué recordar esta idea? Por el conjunto de excepciones observadas.

En la Figura 49 se observa cómo se comporta cierto grupo de líneas extraídas al encontrar una inflexión pronunciada en el trazado de la línea de costa. Las líneas tienden a seguir un comportamiento suavizado alrededor de las inflexiones; no es posible cerrar una curva que a 30 m/píxel es imperceptible y en consecuencia se produce una ondulación errónea a su alrededor.

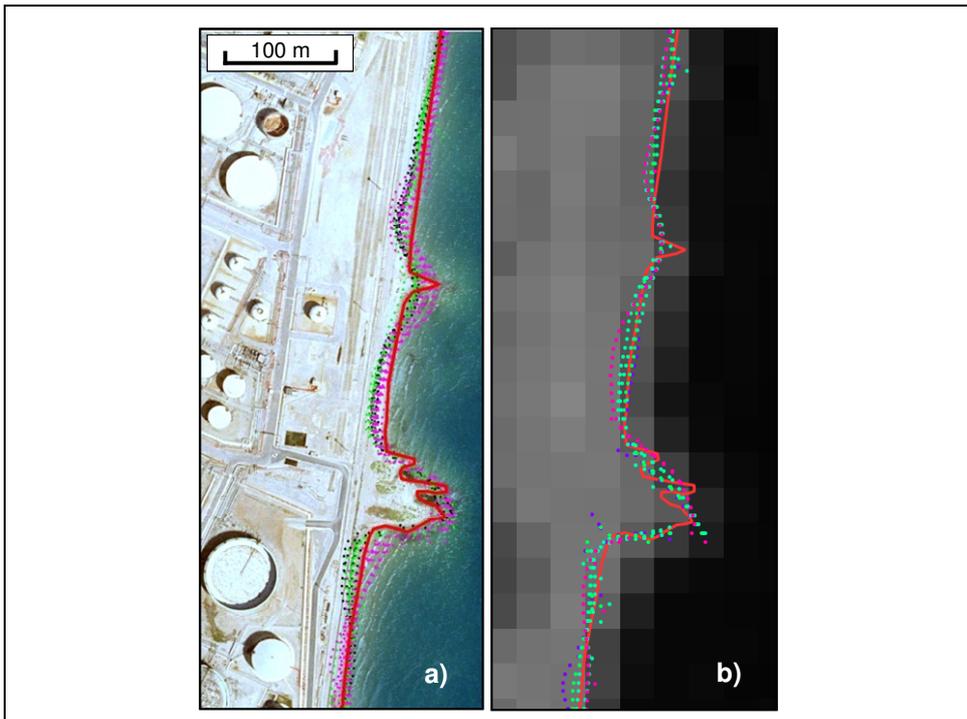


Figura 49. Comportamiento anómalo de las líneas detectadas en inflexiones pronunciadas. a) líneas extraídas superpuestas a una ortofotografía de 0,5 m/píxel. b) líneas superpuestas a una imagen Landsat.

Esta limitación es todavía más evidente cuando dentro del vecindario analizado aparecen disposiciones agua/tierra/agua, como se aprecia en las posiciones B de la Figura 50. En ella se observa una parte del puerto de Barcelona sobre la que se ha superpuesto a la ortofotografía 2 mallas que se corresponderían a un vecindario de análisis de nuestro algoritmo mostrando el tamaño del píxel de las imágenes Landsat TM/ETM+/OLI. Cuando se analiza un segmento de costa con configuración simple (tierra/agua) (vecindario tipo A) con un vecindario 7x7, la línea que se obtiene se ajusta de forma bastante precisa a la orilla real. En cambio, si con el mismo vecindario, se analiza un segmento costero con una disposición compleja (agua/tierra/agua), vecindario tipo B, el resultado obtenido es francamente impreciso e incorrecto.

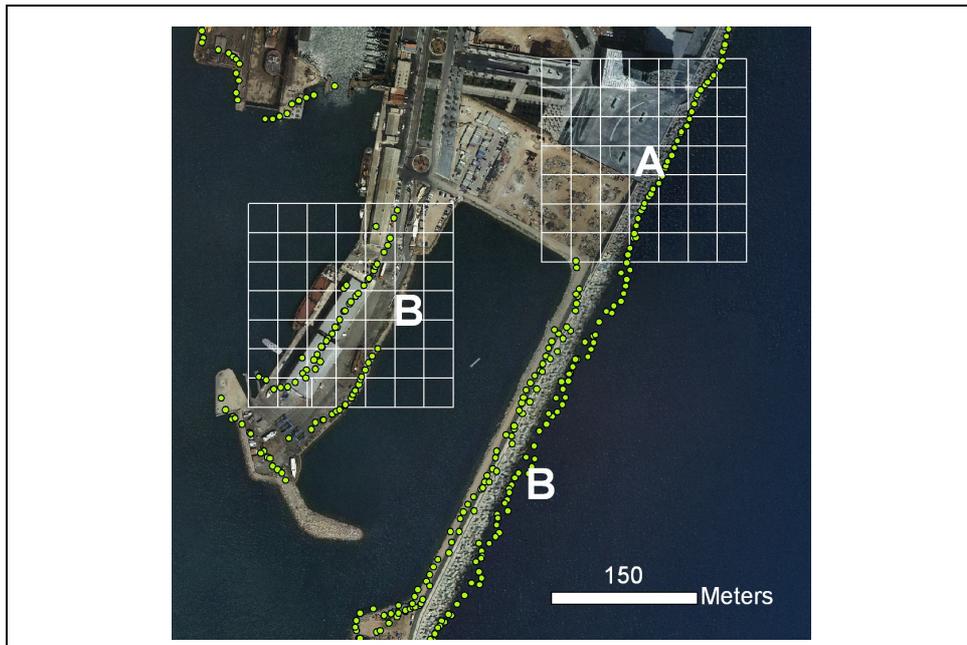


Figura 50. Comportamiento de las líneas de costa provenientes de imágenes Landsat. Las cuadrículas representan vecindarios 7x7 de resolución Landsat. A) tipología idónea de vecindario, B) vecindarios con doble vertientes y curvaturas exageradas.

Este comportamiento ha sido observado en la escollera 1 de las tres escolleras de análisis por lo que no se ha tenido en cuenta para análisis posteriores. Ahora bien, más allá de este caso particular, estas observaciones fijan uno de los límites básicos para aplicar la metodología que se está presentando. El hecho de que este modelo de error se deba a la propia manera de funcionar el algoritmo, que necesita de un vecindario tan amplio, implica que esta metodología no se pueda aplicar sobre segmentos de playa muy pequeños (de longitud inferior a 210 m), ni en sectores donde junto a la playa (a menos de 210 m) aparezcan manchas de agua (albuferas, lagunas costeras, puertos, desembocaduras de ríos, etc) En caso de aplicarse, habrá de aceptarse que presenten niveles de exactitud sustancialmente inferiores a los que se hallarán en el resto de playas largas en las que no aparezcan inflexiones significativas en su morfología longitudinal.

4.5.2. Análisis global de histogramas de distancias.

Del análisis geométrico se ha concluido eliminar la escollera 1 como zona de evaluación por lo que, en todos los análisis del capítulo que se presenten a continuación no será tomada en cuenta y se centrarán en las escolleras 2 y 3.

Se ha realizado un histograma de estas distancias distinguiendo entre imágenes de Landsat 5 (Figura 51), Landsat 7 (Figura 52) y Landsat 8 (Figura 53) así como sus

respectivas tres bandas infrarrojas. A su vez, se ha distinguido el diferente comportamiento que las líneas han tenido sobre la escollera 2 y sobre la escollera 3.

Tabla 10. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 5. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Escolleras 2 y 3.

		Banda 4	Banda 5	Banda 7
	Recuento	66924	67283	66286
	Mínimo	-24,132	-25,553	-25,697
	Máximo	32,791	37,950	37,549
	Rango	56,923	63,504	63,247
Distribución normal	Promedio	1,668	4,254	4,934
	Desviación Estándar	6,335	6,567	7,751
	Error Estándar	0,024	0,025	0,030
	Asimetría	9,870	6,669	11,366
	Curtosis	0,529	0,895	0,412
Distribución general	Mediana	1,152	3,638	4,290
	Cuartil Inferior	-2,573	0,011	-0,224
	Cuartil Superior	5,590	8,191	9,746
	Rango Intercuartílico	8,163	8,180	9,970
	1/6 sextil	-4,249	-1,518	-2,020
	5/6 sextil	7,659	10,364	12,418
	Rango Intersextil	11,908	11,882	14,438

Tabla 11. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 5. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Análisis escollera 2.

		Banda 4	Banda 5	Banda 7
	Recuento	35595	35603	34627
	Mínimo	-24,132	-25,553	-25,697
	Máximo	32,791	37,950	37,549
	Rango	56,923	63,504	63,247
Distribución normal	Promedio	3,225	6,599	8,169
	Desviación Estándar	6,818	7,218	8,265
	Error Estándar	0,036	0,038	0,044
	Asimetría	0,262	-0,121	-0,274
	Curtosis	0,310	0,855	0,595
Distribución general	Mediana	2,885	6,666	8,349
	Cuartil Inferior	-1,443	2,077	3,154
	Cuartil Superior	7,587	11,110	13,598
	Rango Intercuartílico	9,031	9,033	10,444
	1/6 sextil	-3,213	0,208	0,763
	5/6 sextil	9,680	13,036	15,895
	Rango Intersextil	12,893	12,828	15,132

Tabla 12. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 5. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Análisis escollera 3.

		Banda 4	Banda 5	Banda 7
	Recuento	31329	31680	31659
	Mínimo	-21,041	-16,519	-22,691
	Máximo	19,515	20,209	24,646
	Rango	40,555	36,728	47,336
Distribución normal	Promedio	-0,100	1,619	1,395
	Desviación Estándar	5,201	4,464	5,206
	Error Estándar	0,029	0,025	0,029
	Asimetría	0,168	0,065	-0,084
	Curtosis	0,154	0,325	0,342
Distribución general	Mediana	-0,262	1,470	1,356
	Cuartil Inferior	-3,542	-1,191	-1,816
	Cuartil Superior	3,180	4,440	4,809
	Rango Intercuartílico	6,722	5,631	6,625
	1/6 sextil	-5,116	-2,520	-3,364
	5/6 sextil	4,833	5,845	6,350
	Rango Intersextil	9,950	8,365	9,714

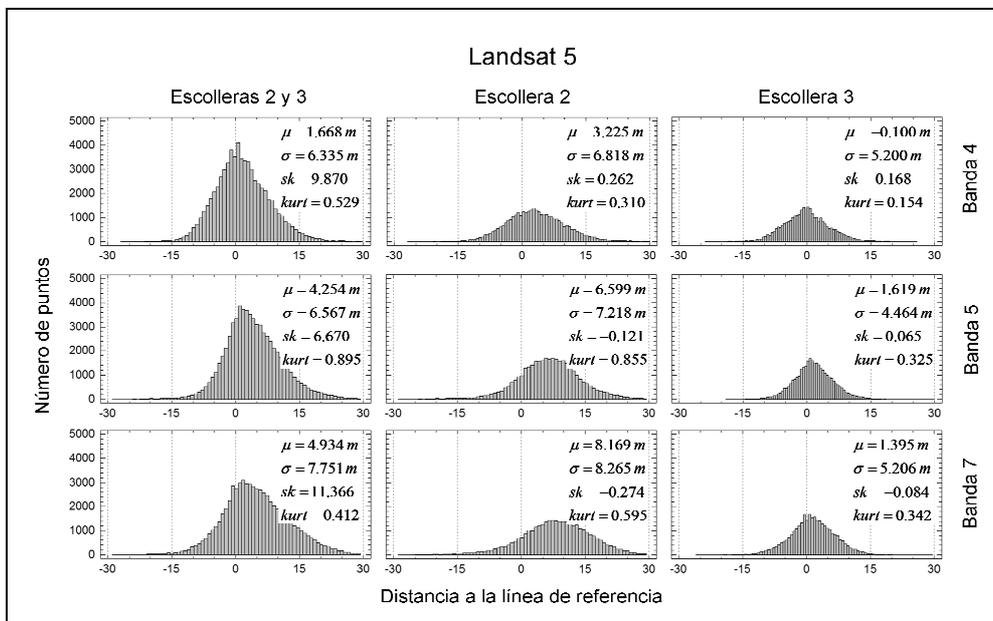


Figura 51. Histogramas de distancias de los puntos de línea sub-píxel a las líneas de referencia. Caso: Landsat 5

Tabla 13. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 7. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Escolleras 2 y 3.

		Banda 4	Banda 5	Banda 7
	Recuento	63037	63588	63347
	Mínimo	-29,096	-24,696	-25,670
	Máximo	42,119	43,675	43,710
	Rango	71,216	68,372	69,380
Distribución normal	Promedio	2,115	4,365	4,769
	Desviación Estándar	6,213	6,738	7,715
	Error Estándar	0,025	0,027	0,031
	Asimetría	-8,613	-8,706	-8,171
	Curtosis	1,527	0,923	0,846
Distribución general	Mediana	1,470	3,775	3,834
	Cuartil Inferior	-1,937	-0,274	-0,433
	Cuartil Superior	5,517	8,354	9,265
	Rango Intercuartílico	7,454	8,628	9,698
	1/6 sextil	-3,419	-1,730	-2,120
	5/6 sextil	7,459	10,495	12,082
	Rango Intersextil	10,878	12,225	14,202

Tabla 14. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 7. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Análisis escollera 2.

		Banda 4	Banda 5	Banda 7
	Recuento	35370	35283	35096
	Mínimo	-29,096	-24,696	-25,670
	Máximo	42,119	43,675	43,710
	Rango	71,216	68,372	69,380
Distribución normal	Promedio	4,035	7,453	8,444
	Desviación Estándar	6,448	6,606	7,663
	Error Estándar	0,034	0,035	0,041
	Asimetría	0,619	0,356	0,250
	Curtosis	1,329	1,183	1,038
Distribución general	Mediana	3,407	7,040	7,856
	Cuartil Inferior	-0,244	3,146	3,414
	Cuartil Superior	7,499	11,264	13,177
	Rango Intercuartílico	7,743	8,118	9,762
	1/6 sextil	-1,682	1,468	1,632
	5/6 sextil	9,767	13,380	15,502
	Rango Intersextil	11,449	11,912	13,870

Tabla 15. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 7. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Análisis escollera 3.

		Banda 4	Banda 5	Banda 7
	Recuento	27667	28305	28251
	Mínimo	-18,120	-18,011	-19,302
	Máximo	31,157	17,780	19,096
	Rango	49,277	35,791	38,398
Distribución normal	Promedio	-0,339	0,515	0,205
	Desviación Estándar	4,907	4,569	4,786
	Error Estándar	0,030	0,027	0,028
	Asimetría	0,386	0,019	-0,043
	Curtosis	1,360	0,160	0,214
Distribución general	Mediana	-0,537	0,359	0,211
	Cuartil Inferior	-3,462	-2,436	-2,798
	Cuartil Superior	2,563	3,491	3,286
	Rango Intercuartílico	6,025	5,927	6,084
	1/6 sextil	-4,776	-3,765	-4,200
	5/6 sextil	4,133	4,955	4,769
	Rango Intersextil	8,909	8,721	8,969

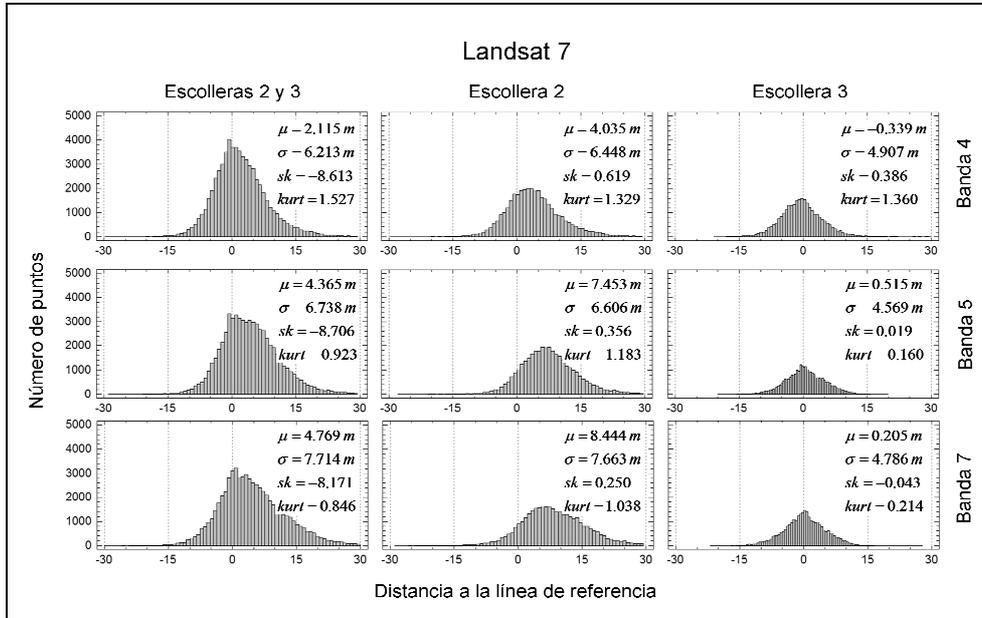


Figura 52. Histograma de distancias de los puntos de línea sub-píxel a las líneas de referencia. Caso: Landsat 7

Tabla 16. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 8. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Escolleras 2 y 3.

		Banda 5	Banda 6	Banda 7
	Recuento	13044	12993	12860
	Mínimo	-22,768	-20,462	-25,664
	Máximo	27,825	27,488	28,953
	Rango	50,593	47,950	54,618
Distribución normal	Promedio	-3,630	0,565	1,451
	Desviación Estándar	5,426	5,666	6,647
	Error Estándar	0,048	0,050	0,059
	Asimetría	0,445	-0,280	0,021
	Curtosis	1,777	0,734	0,771
Distribución general	Mediana	-3,905	0,755	1,383
	Cuartil Inferior	-6,635	-2,571	-2,721
	Cuartil Superior	-0,832	4,152	5,470
	Rango Intercuartílico	5,803	6,723	8,191
	1/6 sextil	-7,944	-4,290	-4,378
	5/6 sextil	0,744	5,634	7,390
	Rango Intersextil	8,689	9,924	11,768

Tabla 17. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 8. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Análisis escollera 2.

		Banda 5	Banda 6	Banda 7
	Recuento	7428	7416	7318
	Mínimo	-22,768	-20,462	-25,664
	Máximo	27,825	27,488	28,953
	Rango	50,593	47,950	54,618
Distribución normal	Promedio	-4,098	0,842	2,577
	Desviación Estándar	6,044	6,754	7,895
	Error Estándar	0,070	0,078	0,092
	Asimetría	0,557	-0,388	-0,304
	Curtosis	1,649	0,060	0,192
Distribución general	Mediana	-4,471	1,794	3,404
	Cuartil Inferior	-7,282	-3,195	-2,314
	Cuartil Superior	-1,365	5,362	7,685
	Rango Intercuartílico	5,916	8,556	9,999
	1/6 sextil	-8,767	-6,070	-5,229
	5/6 sextil	0,589	7,006	9,772
	Rango Intersextil	9,356	13,076	15,001

Tabla 18. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 8. Los valores positivos indican una desviación hacia el mar y los negativos hacia tierra adentro. Análisis escollera 3.

		Banda 5	Banda 6	Banda 7
	Recuento	5616	5577	5542
	Mínimo	-17,137	-12,883	-12,265
	Máximo	16,280	16,798	16,965
	Rango	33,417	29,681	29,230
Distribución normal	Promedio	-3,010	0,198	-0,035
	Desviación Estándar	4,404	3,729	4,044
	Error Estándar	0,059	0,050	0,054
	Asimetría	0,401	0,102	0,128
	Curtosis	1,058	0,341	0,002
Distribución general	Mediana	-3,191	0,085	-0,148
	Cuartil Inferior	-5,816	-2,192	-2,857
	Cuartil Superior	-0,404	2,648	2,674
	Rango Intercuartílico	5,412	4,839	5,531
	1/6 sextil	-6,915	-3,173	-3,937
	5/6 sextil	0,905	3,818	3,840
	Rango Intersextil	7,820	6,992	7,778

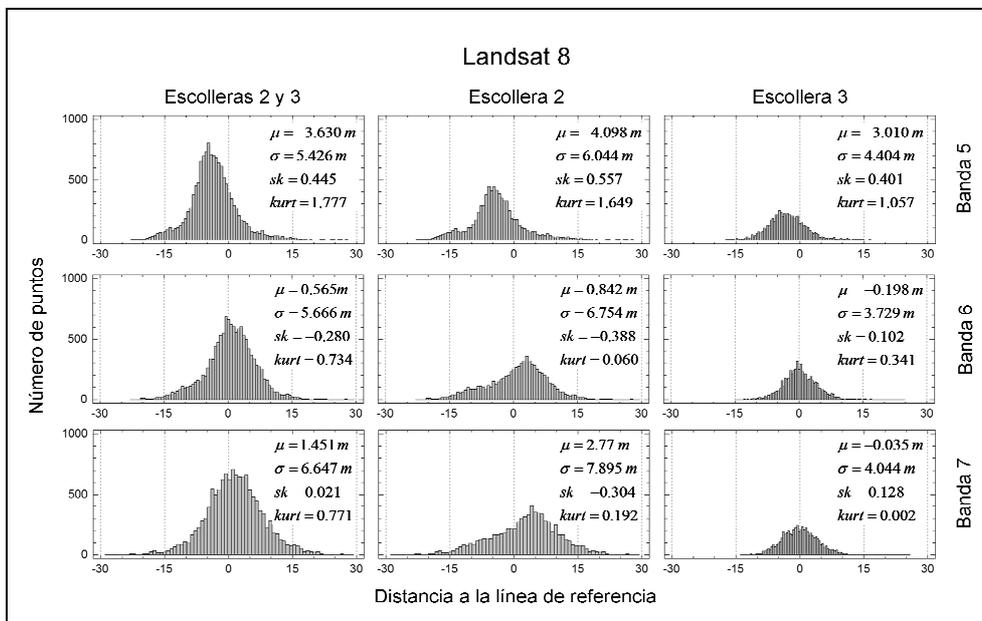


Figura 53. Histograma de distancias de los puntos de línea sub-píxel a las líneas de referencia. Caso: Landsat 8.

El número de líneas analizadas en Landsat 8 es menor que para Landsat 5 y 7 dada su menor disponibilidad. Así, el análisis tiene mayor peso sobre estos últimos. No obstante, resulta llamativo que la aplicación del método propuesto sobre las nuevas imágenes que proporciona Landsat 8 ofrezca mejores resultados que para Landsat 5 y 7. Ello, probablemente se relacione con la menor anchura espectral de las bandas del nuevo satélite (Figura 40).

4.5.2.1. Comportamiento global

En cuanto al comportamiento global de cada banda y para cada sensor, en los resultados globales (primera columna de las figuras Figura 51, Figura 52 y Figura 53), se observa que se ajustan mejor a una función gaussiana/distribución normal. Las distancias medias a la línea de referencia se mantienen más cercanas a 0 –plena coincidencia con la línea de referencia- en la banda NIR (banda 4) que en las SWIR (bandas 5 y 7) en las imágenes procedentes de los satélites Landsat 5 y 7. Sin embargo, en el caso del Landsat 8 se observa, prácticamente, un resultado inverso: las bandas SWIR se centran mejor que la banda NIR.

Este comportamiento sesgado entre las bandas NIR y SWIR de los 3 sensores no se observa con tanta claridad en los valores de desviación típica. Se observa que las desviaciones aumentan con el orden de las bandas teniendo siempre una menor desviación en las bandas NIR. Aun así, las diferencias en desviación típica entre las 3 bandas no superan los 1,5 m, inferior a los márgenes de error previstos en la extracción y la georreferenciación por lo que cabe dudar de si se trata de un valor significativo.

Se observa visualmente que los errores no se comportan de forma simétrica salvo, de forma aproximada, en las bandas NIR. Este hecho se puede observar en el coeficiente de asimetría (*skewness*) y en el hecho de que los cuartiles inferior y superior (así como los sextiles inferior y superior) no se encuentren equidistantes del 0, lo que habría indicado la misma probabilidad de cometer errores positivos y negativos.

La razón de este comportamiento general alejándose de la distribución normal, es un indicador de peso para la distinción del comportamiento de las líneas obtenidas en las dos diferentes escolleras.

4.5.2.2. Comportamiento en cada escollera

Si se analizan los datos de forma separada en cada una de las escolleras de referencia, se aprecia que el comportamiento de las líneas obtenidas es claramente diferente en cada una de ellas. En todos los casos, el comportamiento de los errores es peor en la escollera 2 que en la escollera 3 como se observa en el valor medio, la desviación típica y la asimetría. La distancia media indica que las líneas de costa quedan siempre más cercanas la línea de referencia en la escollera 3 que en la escollera 2. Las desviaciones son mayores en la escollera 2, indicando un comportamiento menos preciso de todo el conjunto de puntos analizado en tal zona. La asimetría, observable tanto en el valor de

asimetría (*skewness*) como en los intervalos intercuartílicos e intersextilicos, es más exagerada en la escollera 2, siendo indicativo de un comportamiento anómalo.

Analizando la **escollera 3**, incluyendo el peor caso (banda 5 NIR de Landsat 8 con $\mu = -3,010$ m), ningún valor medio excede los márgenes de error observados en los procesos independientes de extracción de la línea de costa y georreferenciación. A su vez, las desviaciones alrededor de esta escollera, siempre inferiores a $\sigma = 5,206$ m, concuerdan con los resultados obtenidos en las pruebas expuestas en el Capítulo II que hacía prever valores cercanos a los 5 m. En Landsat 7 se observa la casi total coincidencia de los errores medios de sus bandas, siempre por debajo del metro, mientras que Landsat 8 destaca por contener las menores desviaciones típicas. Hasta aquí no es posible recomendar el empleo de una banda frente a las demás salvo por el sesgo producido en la banda 5 (NIR) de Landsat 8.

El comportamiento de los errores sobre la escollera 3 es cercano a la distribución normal aunque ningún test lo ha podido corroborar por los problemas que conlleva un exceso de puntos. Además, la lejanía a la distribución normal no es necesariamente negativa. La forma apuntada de sus distribuciones, no propiamente normales, no es un aspecto negativo en este estudio puesto que indica mayor cantidad de datos cercanos a la referencia. De todas maneras, dado que alrededor de la escollera 3 se tiene un comportamiento aparentemente normal, la falta de normalidad de los errores en el análisis global ha de ser buscado alrededor de la escollera 2.

Analizando la **escollera 2** se vuelve a observar el comportamiento diferenciado entre las líneas provenientes de Landsat 5 y 7 frente a Landsat 8. Para Landsat 5 y 7 sólo el error medio de las respectivas bandas 4 NIR queda por debajo de 5 m, pero dada la cantidad de datos gestionada se puede considerar significativos ambos desplazamientos ($\mu = 3,225$ y $\mu = 4,035$ metros respectivamente). Para Landsat 8, la banda 5 NIR tiene un comportamiento sesgado en sentido contrario ($\mu = -4,098$ m). En los tres sensores, las respectivas bandas SWIR generan un error medio sesgado hacia el mar (toma valores positivos mayores) mayor que las NIR.

4.5.3. Análisis de medias por fecha.

La relación de posición media de cada banda puede ser efecto de promediar información de diferente fecha y origen, se analiza aquí el comportamiento medio que las tres bandas de cada sensor tienen para cada fecha/escena analizada.

En general se observa que si existe una banda que se comporta de forma distinta a las otras dos, es la banda del infrarrojo cercano (NIR) (Figura 54). Este efecto se observa con claridad en la práctica totalidad de líneas evaluadas en la escollera 2 donde las bandas NIR quedan siempre en valores más bajos (tierra adentro) que las bandas SWIR. En la escollera 3, todas las líneas tienden a un comportamiento semejante, salvo en la banda 5

de Landsat 8. Probablemente, la menor ventana espectral del nuevo sensor (así como trabajar con 16 bits en vez de 8) lleva a un mayor potencial para distinguir comportamientos diferenciados entre los respectivos infrarrojos. Se evidencia que el diferente comportamiento de los errores en la escollera 2 es un hecho repetido en cada escena.

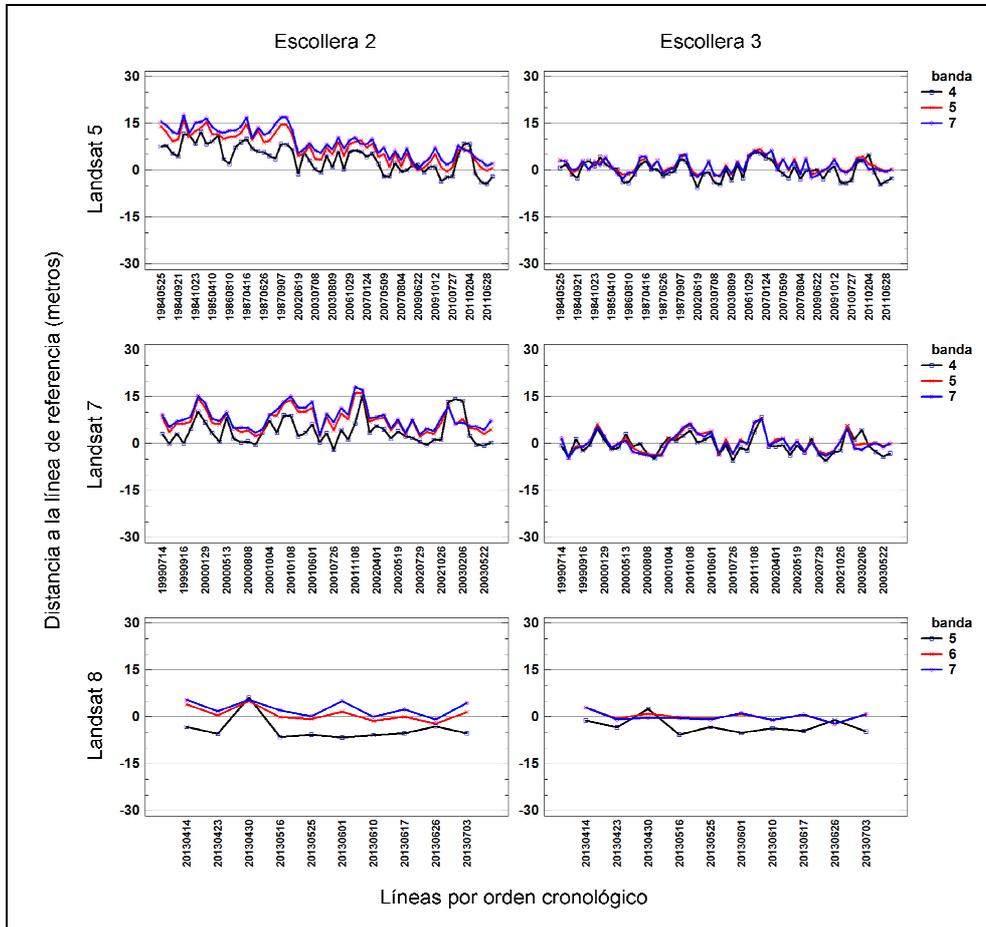


Figura 54. Distancias/errores medios de las líneas sub-píxel para cada sensor y banda frente a las dos escolleras de referencia. No se indica la fecha de todas las imágenes pero se ha mantenido el orden cronológico de las mismas. Obsérvese que la escala horizontal (fechas) cambia para cada satélite. Para observar los valores numéricos aquí resumidos: Anejo V

De los estadísticos generales se observaba que la desviación típica alrededor de la escollera 2 es siempre superior a 6 m, e inferior a esta cifra en la escollera 3. Se observa cómo esta dispersión es visible en el comportamiento de las medias (Figura 54).

Sin embargo, las estadísticas generales provienen del conjunto de puntos, el hecho de que cada línea haya arrojado medias alejadas de la referencia no implica que los puntos

de cada línea se encuentren dispersos. Para aclarar este punto seguidamente se analizan las dispersiones.

4.5.4. Análisis de dispersiones por línea.

La falta de centralidad y normalidad observadas en los histogramas globales de los errores para las líneas obtenidas a partir de Landsat 5 (Figura 51), Landsat 7 (Figura 52) y Landsat 8 (Figura 53), no sólo se observa en el comportamiento medio de cada línea en cada fecha (Figura 54) sino también en la dispersión que en ambas escolleras presenta el conjunto de puntos. Para mayor claridad, es posible analizar este efecto por separado en los casos específicos de Landsat 5 (Figura 55), Landsat 7 (Figura 56) y Landsat 8 (Figura 57). Se observa, además del comportamiento anómalo de la media, la menor centralidad de los puntos, visible en la extensión de las cajas.

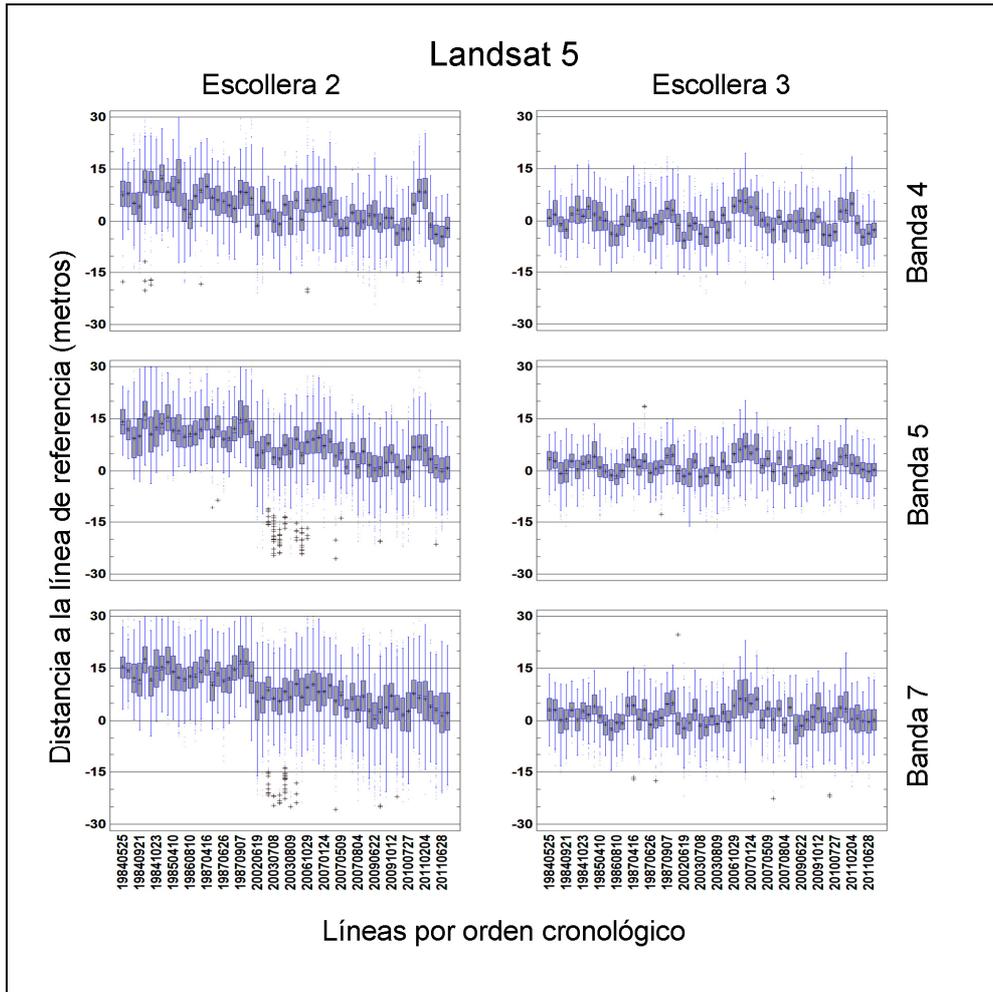


Figura 55. Distancias/errores medios y dispersión por cada línea sub-píxel de cada banda frente a las dos escolleras de referencia, para escenas de Landsat 5. En el eje de abscisas de cada gráfica no se explicitan todas las fechas analizadas pero sí se han representado todas las líneas dispuestas de forma cronológica. La barra dentro de la caja marca la mediana, cercana a la media, dibujada con el punto negro. Los márgenes de la caja marcan los percentiles 25 y 75. Los bigotes engloban el 99% de los datos. Para observar los valores numéricos aquí resumidos ver ANEJO VI

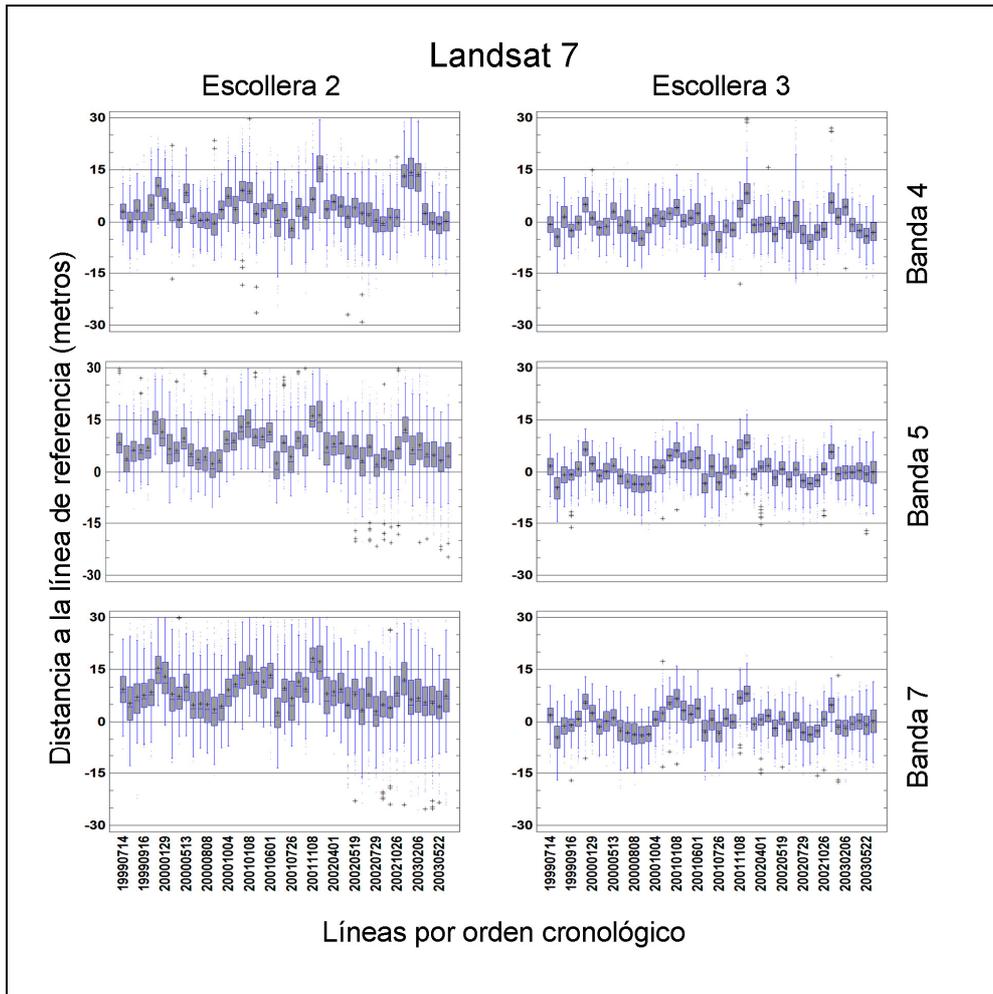


Figura 56. Distancias/errores medios y dispersión por cada línea sub-píxel de cada banda frente a las dos escolleras de referencia, para escenas de Landsat 7. En el eje de abscisas de cada gráfica no se explicitan todas las fechas analizadas pero sí se han representado todas las líneas dispuestas de forma cronológica. La barra dentro de la caja marca la mediana, cercana a la media, dibujada con el punto negro. Los márgenes de la caja marcan los percentiles 25 y 75. Los bigotes engloban el 99% de los datos. Para observar los valores numéricos aquí resumidos ver ANEJO VI

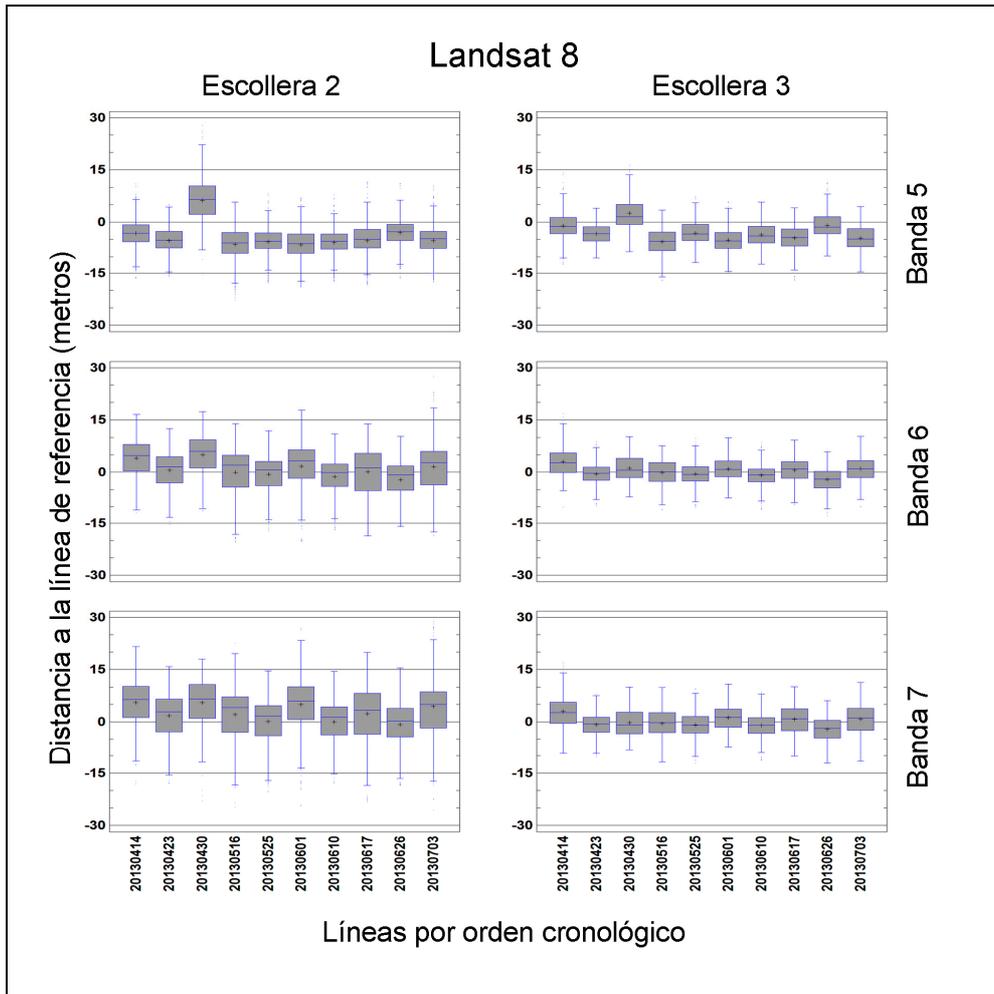


Figura 57. Distancias/errores medios y dispersión por cada línea sub-píxel de cada banda frente a las dos escolleras de referencia, para escenas de Landsat 8. En el eje de abscisas de cada gráfica no se explicitan todas las fechas analizadas pero sí se han representado todas las líneas dispuestas de forma cronológica. La barra dentro de la caja marca la mediana, cercana a la media, dibujada con el punto negro. Los márgenes de la caja marcan los percentiles 25 y 75. Los bigotes engloban el 99% de los datos. Para observar los valores numéricos aquí resumidos ver ANEJO VI

El efecto de dispersión es menos patente en Landsat 8 pese a haberse observado con claridad en la posición media de las líneas (Figura 54), probablemente debido a la menor disponibilidad de datos.

Alrededor de la escollera 2 se observa que el comportamiento de los puntos está menos concentrado que alrededor de la escollera 3. Tal y como hacía prever el análisis general (Figura 51, Figura 52 y Figura 53), la mayor parte de puntos no exceden los 5 m de desviación pese a que puntualmente alguna línea quede descentrada. La escollera 2

presenta mayores dudas tanto por el desplazamiento medio de las costas como por la dispersión de los puntos que las componen.

4.5.5. Interpretación de resultados.

A la vista de los resultados expuestos se podrían destacar dos aspectos:

En primer lugar. Existen comportamientos anómalos –singularmente erróneos– de carácter puntual en alguna fecha determinada, y que se aprecian en ambas escolleras, aunque con más claridad en la escollera 2.

En segundo lugar. Las líneas de la escollera 2 quedan desplazadas sistemáticamente unos 15 m mar adentro en fechas previas a 2002, cosa que no se observa en los errores en la escollera 3.

El primer efecto sería indicador de cómo un aspecto que afecta globalmente a la imagen se manifiesta en el global de las líneas deducidas (independientemente de que se exagere más o menos alrededor de cada escollera). El segundo efecto sería indicador de características propias e independientes de cada zona.

En concreto, para visualizar el primer efecto podemos tomar la escena de Landsat 7 alrededor del 26 de octubre de 2002. En la Figura 56 se observan 3 líneas entre 26 de octubre de 2002 (20021026) y 6 de febrero de 2003 (20030206) cuyas cajas se alejan hacia el mar tomando valores positivos de aproximadamente 13 m. En concreto se trata de las líneas obtenidas el 14 de enero de 2003 (20030114), el 21 de enero de 2003 (20030121) y el 6 de febrero de 2003 (20030206). Sin embargo, este desplazamiento en dichas fechas sólo se observa en la escollera 2, no así en la escollera 3 (los valores numéricos exactos se encuentran en la Tabla 46 y la Tabla 47).

En la Figura 58 se relaciona el error cometido (distancia media de los puntos a la correspondiente escollera) entre las escolleras 2 y 3 para cada escena analizada, pudiendo observar analíticamente el primer efecto comentado.

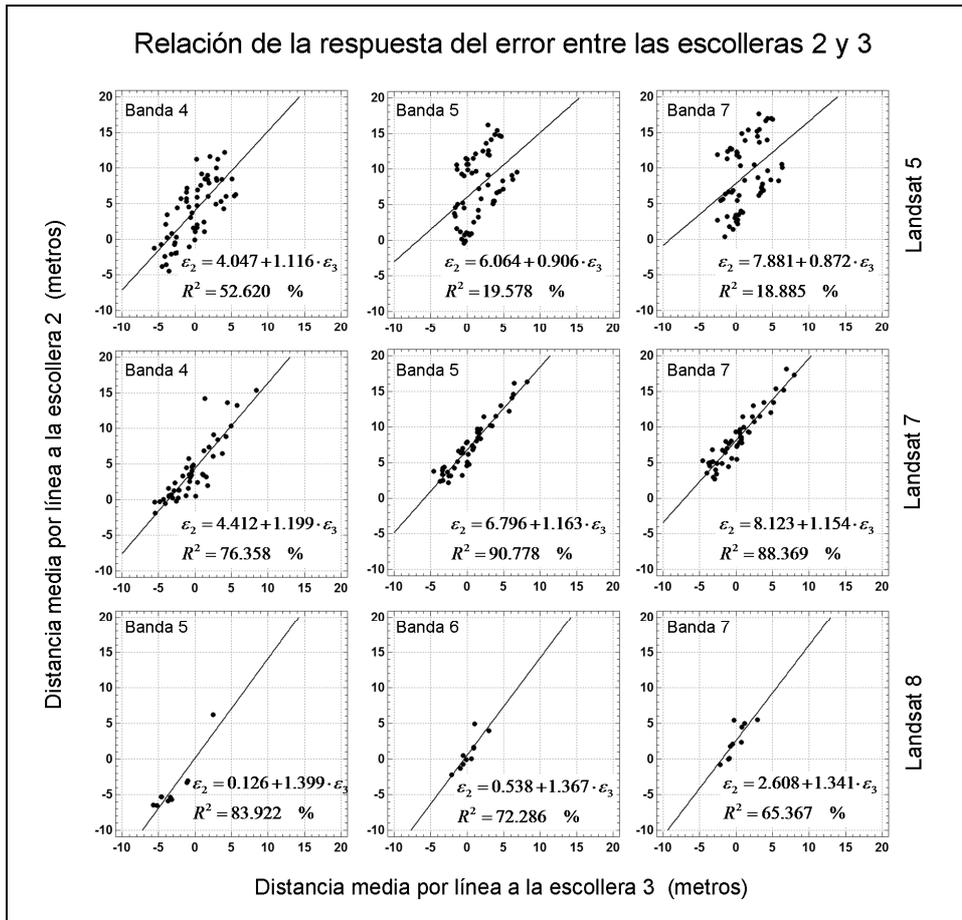


Figura 58. Correlación entre los errores (distancias medias a la línea de referencia por cada línea obtenida) en las escolleras 2 y 3.

El hecho de que tengan relación los errores observados en las escolleras 2 y 3 en una misma escena, tiene sentido. ¿Cómo habrían de comportarse estos errores?, si ambos errores tuvieran un comportamiento idéntico, el término independiente tendería a 0 y la pendiente a 1. En el caso de Landsat 7 se observa (en el término independiente) cómo el desplazamiento medio de las líneas en la escollera 2 está entre 4,412 y 8,123 m y es superior que en la escollera 3, se encuentra más adentrado en el mar. En Landsat 8 este hecho es menos patente salvo en la banda 7.

La pendiente es de especial importancia pues se relaciona específicamente con el primer efecto que se está desglosando. Efectivamente, en Landsat 7 se observan pendientes entre 1,199 y 1,163 lo que implica que, aproximadamente, cuando se observa un error en la escollera 3, se observará ampliado un 20% en la escollera 2. Este efecto, aún con menor cantidad de datos, se aprecia en las pendientes observadas que son aún mayores en Landsat 8.

El caso de Landsat 5 conviene analizarlo de forma independiente porque se observan de forma simultánea los dos efectos anunciados. En el global de datos, los errores entre ambas escolleras no tienen relación, como demuestran los R^2 de apenas el 20%. Sin embargo, distinguiendo las líneas obtenidas antes y después de 2002 -Figura 59- esta relación entre los errores de ambas escolleras sí toma relevancia. Es crucial observar como el hecho de separar las líneas en 2 fechas implica un incremento en el valor de R^2 reforzando estadísticamente el segundo tipo de efecto observado, es decir, existe un factor que ha variado a lo largo del tiempo y ha afectado de forma diferente a cada escollera.

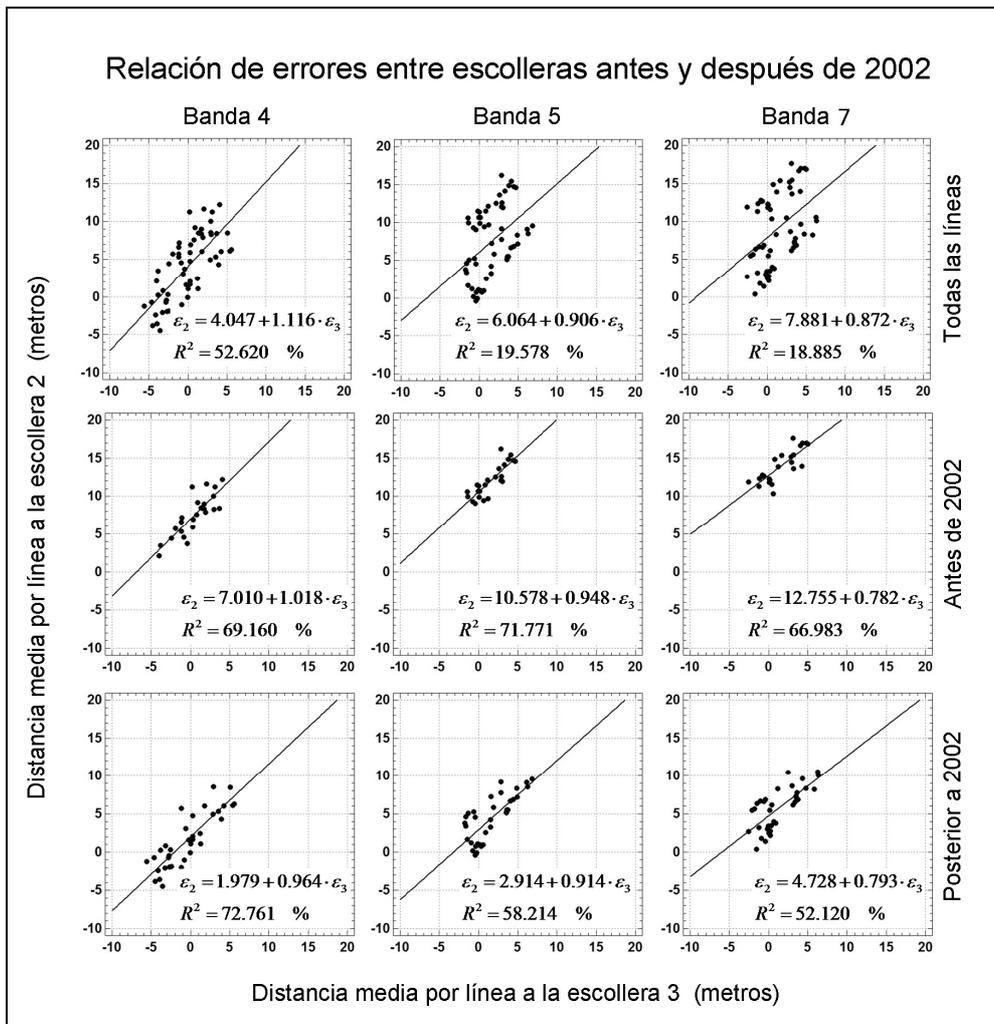


Figura 59. Correlación entre los errores (distancias medias a la línea de referencia por cada línea obtenida) en las escolleras 2 y 3. Caso particular de Landsat 5, antes y después de 2002.

Queda claro que existe algún hecho cerca de 2002 que marca un comportamiento diferenciado en la definición de las líneas.

De cara al segundo efecto, alrededor de la escollera 2 se observa cómo antes y después de 2002 hay un cambio en el agrupamiento de las líneas -Figura 60-. Se observa que el efecto causante del comportamiento diferenciado previa y posteriormente a 2002 es un cambio en la cobertura terrestre que rodea la línea de costa en la escollera 2 (Figura 60, a, c y d).

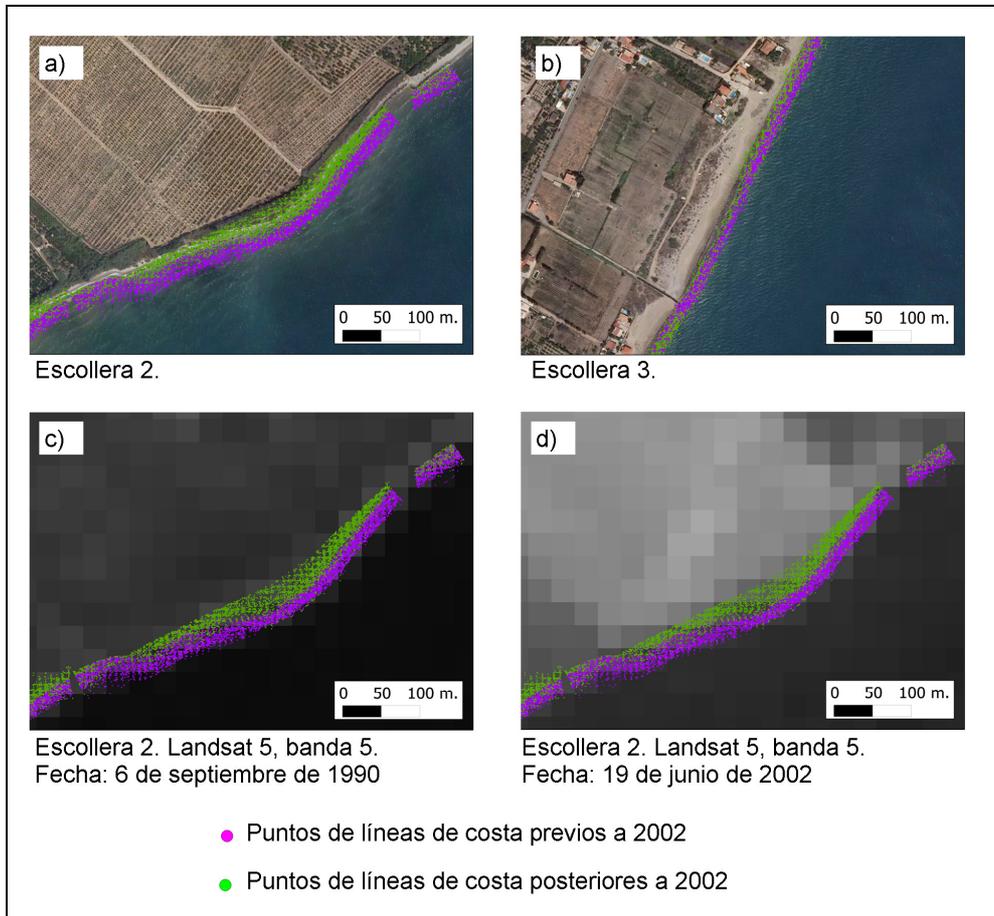


Figura 60. a) Detalle de la escollera 2, se observa el comportamiento diferenciado de 2 conjuntos de líneas. b) Detalle de la escollera 3, ambos conjuntos de línea para las mismas fechas no presentan anomalías. c) y d) muestran el cambio visible en la cobertura de tierra cercana a la costa en la zona de la escollera 2, causa probable del comportamiento anómalo.

Este hecho sugiere que el algoritmo es sensible a las diferencias en la señal radiométrica de la zona inmediata a la línea de costa. La transformación agraria del sector adjunto a la zona observada provoca un cambio mantenido en el tiempo y ello explica la existencia de

las dos familias de errores diferenciados. Aún más, si las diferencias entre los conjuntos de líneas previos y posteriores a 2002 vienen dados por un cambio de cobertura pudiendo explicar el segundo efecto por cuestión de respuesta espectral, parece lógico pensar que el primer efecto (por el que los errores se ven más exagerados en la escollera 2 que en la 3) pueda ser explicado también a través de la diferente respuesta espectral de cada zona.

Así, ¿qué diferencias se dan entre ambas zonas de referencia? El modelo constructivo de las escolleras 2 y 3 puede explicar parte de las diferencias en los errores. En la Figura 61 se aprecia un detalle de ambas estructuras y permite observar que, en el caso de la escollera 2, el volumen de piedra de escollera vertida es muy inferior a lo que hay en la escollera 3 y que la pendiente entre el agua y el terreno adyacente es relativamente pequeña, frente al salto que se aprecia en la escollera 3. Este hecho puede provocar que exista mayor turbidez en las aguas inmediatas a la escollera 2 (Figura 61 a) ya que, al ser una playa con menos pendiente, las olas podrán romper a cierta distancia de la orilla, o incluso adentrarse en tierra a través de los bloques. También, al romper las olas se da mayor probabilidad de tener espuma. En la escollera 3 no hay posibilidad de que las olas se adentren tierra adentro, ni es probable la aparición de grandes extensiones de espuma, salvo en casos de temporales especialmente fuertes (Figura 61 b).

Las características propias de cada zona implican distintos valores de intensidad que pueden afectar a la posición de la línea de costa extraída. La solución a ello sería poder prever qué comportamiento seguirá la línea de costa en cada espacio y tener la capacidad de corregirlo.



Figura 61. Detalle sobre la ortofotografía del PNOA y en campo de a) la escollera 2 en su tramo de construcción por bloques y b) la escollera 3.

4.6. Modelización radiométrica

Como se ha descrito y observado anteriormente, los valores de intensidad de los píxeles que rodean la línea de costa afecta al posicionamiento de la línea definitiva obtenida.

El objetivo actual es poder parametrizar el error cometido en función de variables que describan la distribución de valores de intensidad de cada vecindario 7x7 alrededor del que se ajustó cada punto de línea de costa. Este objetivo se expresa matemáticamente en la ecuación (9).

$$\varepsilon = f(\mu, \sigma, sk, k) \quad (9)$$

Siendo ε es el error cometido en cada punto (distancia del punto a la línea de referencia). El resto de parámetros son variables descriptivas del vecindario 7x7 del propio punto: μ es la media aritmética de los valores de intensidad, σ es la desviación estándar, sk , representa el *skewness* (coeficiente de asimetría) y k la *curtosis*.

Así, por cada punto con error conocido se dispone de una ecuación que relaciona tal error con las estadísticas descriptivas de su vecindario. Siendo la ecuación (9) la forma general de expresar el modelo, se ha empleado concretamente la expresión polinómica de tercer grado de la ecuación (10).

$$\begin{aligned} \varepsilon = & a_0 + a_1 \cdot \mu + a_2 \cdot \sigma + a_3 \cdot sk + a_4 \cdot k + \\ & + a_5 \cdot \mu \cdot k + a_6 \cdot \mu \cdot sk + a_7 \cdot \sigma \cdot k + a_8 \cdot \sigma \cdot sk + \\ & + a_9 \cdot \mu^2 + a_{10} \cdot \mu \cdot \sigma + a_{11} \cdot \sigma^2 + \\ & + a_{12} \cdot \mu^3 + a_{13} \cdot \mu^2 \cdot \sigma + a_{14} \cdot \mu \cdot \sigma^2 + a_{15} \cdot \sigma^3 \end{aligned} \quad (10)$$

Por claridad en la exposición, los polinomios obtenidos se presentan en forma de tabla. Para cada término previsto para el polinomio se incorporan los términos que en el proceso de regresión paso a paso hacia delante han sido obtenidos. El proceso de ajuste paso a paso tiene dos opciones, hacia delante (mediante la inclusión sucesiva de las variables explicativas que explican mayor cantidad de información en cada iteración) y hacia atrás (que analiza, a partir de la inclusión de todas las variables, cuáles pueden ser eliminadas de forma sucesiva por no ser significativas). Se ha decidido trabajar 'hacia

delante' por el hecho de que el ajuste inicial que incluye todas las variables en el proceso 'hacia atrás' no es siempre resoluble (la inclusión de todas las variables genera combinaciones lineales que impiden resolver el sistema mínimo cuadrático). Se adjunta igualmente el R^2 y la desviación estándar de los residuos del ajuste mínimo cuadrático definitivo.

Dado que el efecto a modelizar tiene una naturaleza radiométrica, y esta respuesta varía según el sensor, la banda espectral y la ganancia empleada (ver Tabla 8) se han desarrollado modelos independientes. En total se han realizado 15 regresiones.

En un primer análisis se dispone de 3 tablas, correspondientes a Landsat 5 (Tabla 19), Landsat 7 (Tabla 20) y Landsat 8 (Tabla 21). Cada una de estas tablas contiene 3 modelos que corresponden a cada una de las 3 bandas de cada sensor.

En un segundo análisis se dispone de otras 3 tablas, esta vez centradas en la banda 4 (Tabla 22), la banda 5 (Tabla 23) y la banda 7 (Tabla 24) del sensor Landsat 7. Cada tabla contempla 3 polinomios, tomando todo el conjunto de puntos de la muestra y distinguiendo un modelo diferente para baja y alta ganancia.

Tabla 19. Polinomios obtenidos para corregir el efecto radiométrico en líneas de Landsat 5.

Parámetros		Landsat 5		
		Banda 4	Banda 5	Banda 7
Constante	α_0	9,918	3,620	-2,783
Media	α_1	0,485	0,261	0,852
Destip	α_2	-1,731	-0,466	-1,305
Skew	α_3	12,281	15,924	22,699
Kurt	α_4	1,878	-1,973	-4,754
Media*kurt	α_5		-0,072	0,174
Media * skew	α_6	-0,222	0,119	-0,935
DesTip*kurt	α_7	-0,205	-0,412	
DesTip*skew	α_8			
Media^2	α_9	-0,023	-0,023	-0,074
media*DesTip	α_{10}	0,048	0,046	0,125
DesTip^2	α_{11}	0,009	-0,016	-0,012
Media^3	α_{12}	0,000	0,000	0,001
media^2*DesTip	α_{13}	-0,001	0,000	-0,001
media*DesTip^2	α_{14}	0,000	-0,001	-0,001
DesTip^3	α_{15}	0,000	0,000	0,001
<i>R cuadrado</i>		19,768	32,663	38,347
<i>Desviación estandar</i>		5,659	5,367	6,027
<i>Numero de puntos</i>		66903	67262	66265

Tabla 20. Polinomios obtenidos para corregir el efecto radiométrico en líneas de Landsat 7.

Parámetros		Landsat 7		
		Banda 4	Banda 5	Banda 7
Constante	α_0	87,037	20,570	0,974
Media	α_1	0,742	1,438	2,531
Destip	α_2	-7,080	-3,403	-4,086
Skew	α_3	-17,980	11,755	18,487
Kurt	α_4	19,947		-3,513
Media*kurt	α_5	-0,325		
Media * skew	α_6	0,212	-0,140	-0,137
DesTip*kurt	α_7	-0,174		0,160
Destip*skew	α_8	0,454		-0,275
Media^2	α_9	-0,063	-0,044	-0,104
media*DesTip	α_{10}	0,122	0,062	0,165
Destip^2	α_{11}	0,105	0,032	
Media^3	α_{12}	0,001	0,001	0,001
media^2*DesTip	α_{13}	-0,002	-0,002	-0,003
media*DesTip^2	α_{14}	0,003	0,002	0,003
Destip^3	α_{15}	-0,003	-0,001	-0,001
R cuadrado		20,198	33,809	45,604
Desviación estandar		5,513	5,482	5,690
Numero de puntos		63016	63568	63326

Tabla 21. Polinomios obtenidos para corregir el efecto radiométrico en líneas de Landsat 8.

Parámetros		Landsat 8		
		Banda 5	Banda 6	Banda 7
Constante	α_0	250,579	103,866	267,176
Media	α_1	0,038		-0,073
Destip	α_2	-0,232	-0,017	0,025
Skew	α_3	-20,858	-51,936	-43,187
Kurt	α_4		26,685	20,628
Media*kurt	α_5		-0,002	-0,002
Media * skew	α_6		0,005	0,006
DesTip*kurt	α_7		-0,001	
Destip*skew	α_8	0,005		-0,003
Media^2	α_9	-8,872E-06	-7,351E-07	8,379E-06
media*DesTip	α_{10}	2,877E-05	-1,935E-06	-1,325E-05
Destip^2	α_{11}	8,796E-06	4,635E-06	1,157E-05
Media^3	α_{12}	3,655E-10		-3,929E-10
media^2*DesTip	α_{13}	-1,021E-09	2,680E-10	1,135E-09
media*DesTip^2	α_{14}	-1,846E-10	-3,946E-10	-1,321E-09
Destip^3	α_{15}	-4,601E-10		1,690E-10
R cuadrado		24,345	28,200	39,227
Desviación estandar		4,722	4,803	5,5,1848
Numero de puntos		13043	12992	12859

Tabla 22. Polinomios obtenidos para corregir el efecto radiométrico en líneas de Landsat 7. Detalle de modelos para alta y baja ganancia de la banda 4.

Parámetros		Landsat 7 Banda 4		
		Global	Ganancia baja, L	Ganancia alta, H
Constante	α_0	87,037	129,823	134,919
Media	α_1	0,742		-2,900
Destip	α_2	-7,080	-15,372	-4,077
Skew	α_3	-17,980		-30,038
Kurt	α_4	19,947	7,916	22,619
Media*kurt	α_5	-0,325	-0,271	-0,264
Media * skew	α_6	0,212	0,127	0,414
DesTip*kurt	α_7	-0,174	0,096	-0,217
Destip*skew	α_8	0,454		0,276
Media^2	α_9	-0,063	-0,026	0,027
media*DesTip	α_{10}	0,122	0,082	0,030
Destip^2	α_{11}	0,105	0,541	0,091
Media^3	α_{12}	7,494E-04	8,050E-04	-1,032E-04
media^2*DesTip	α_{13}	-2,328E-03	-4,083E-03	-4,159E-04
media*DesTip^2	α_{14}	2,888E-03	6,403E-03	7,403E-04
Destip^3	α_{15}	-3,143E-03	-1,114E-02	-1,645E-03
R cuadrado		22,433	15,6456	34,684
Desviación estandar		5,472	5,177	5,226
Numero de puntos		63016	36086	26909

Tabla 23. Polinomios obtenidos para corregir el efecto radiométrico en líneas de Landsat 7. Detalle de modelos para alta y baja ganancia de la banda 5.

Parámetros		Landsat 7 Banda 5		
		Global	Ganancia baja, L	Ganancia alta, H
Constante	α_0	20,570	-9,274	25,292
Media	α_1	1,438	5,722	0,652
Destip	α_2	-3,403	-8,676	-2,805
Skew	α_3	11,755	34,138	13,891
Kurt	α_4		-3,113	-3,078
Media*kurt	α_5		0,246	0,049
Media * skew	α_6	-0,140	-1,464	-0,202
DesTip*kurt	α_7		-0,420	
Destip*skew	α_8		1,234	
Media^2	α_9	-0,044	-0,147	-5,207E-03
media*DesTip	α_{10}	0,062	0,189	1,748E-03
Destip^2	α_{11}	0,032	0,069	0,054
Media^3	α_{12}	6,395E-04	1,007E-03	-3,505E-04
media^2*DesTip	α_{13}	-1,949E-03	-1,276E-03	
media*DesTip^2	α_{14}	2,273E-03		
Destip^3	α_{15}	-1,360E-03	-1,027E-03	
R cuadrado		35,454	35,575	42,926
Desviación estandar		5,413	4,892	5,160
Numero de puntos		63568	14775	48791

Tabla 24. Polinomios obtenidos para corregir el efecto radiométrico en líneas de Landsat 7. Detalle de modelos para alta y baja ganancia de la banda 7.

Parámetros		Landsat 7 Banda 7		
		Global	Ganancia baja, L	Ganancia alta, H
Constante	α_0	0,974	-40,338	6,985
Media	α_1	2,531	8,804	1,294
Destip	α_2	-4,086	-9,799	-2,756
Skew	α_3	18,487	37,274	18,267
Kurt	α_4	-3,513	-6,453	-4,077
Media*kurt	α_5		0,221	-0,051
Media * skew	α_6	-0,137	-1,290	
DesTip*kurt	α_7	0,160	-0,142	0,261
Destip*skew	α_8	-0,275	0,690	-0,531
Media^2	α_9	-0,104	-0,388	-0,050
media*DesTip	α_{10}	0,165	0,580	0,082
Destip^2	α_{11}		-0,106	0,022
Media^3	α_{12}	1,323E-03	5,778E-03	3,824E-04
media^2*DesTip	α_{13}	-3,263E-03	-1,265E-02	-5,705E-04
media*DesTip^2	α_{14}	2,766E-03	8,982E-03	-2,399E-04
Destip^3	α_{15}	-1,389E-03	-3,384E-03	
<i>R cuadrado</i>		46,956	44,668	52,416
<i>Desviación estandar</i>		5,619	5,257	5,383
<i>Numero de puntos</i>		63326	14655	48690

El análisis de estas regresiones permite extraer dos ideas fundamentales:

En primer lugar, la R^2 de estas regresiones demuestra la importancia que la diferente respuesta espectral tiene sobre las líneas de costa obtenidas y justifica el último paso de la metodología global de esta tesis.

En segundo lugar, la aplicación de estos modelos supone una mejora sustancial en la localización de la línea de costa. De hecho, la desviación estándar de los ajustes ya resume el comportamiento global de los residuos que serán analizados con detalle en el siguiente apartado.

Conviene ahora centrar nuestra atención en la explicación de la relación estadística observada. El término R^2 indica el porcentaje de información que el modelo ha sido capaz de explicar. Independientemente de la menor o mayor magnitud de este indicador, el hecho de que para cada sensor y banda tenga valores diferentes confirma que la radiometría afecta a las líneas de forma diferente. Aún más, no se trata de un comportamiento aleatorio (datos de la Tabla 19, la Tabla 20 y la Tabla 21 resumidos en la Figura 62) dado que la información explicada siempre es menor para las bandas NIR (banda 4 en Landsat 5 y 7, banda 6 en Landsat 8) que para las SWIR (bandas 5 y 7 en Landsat 5 y 7, bandas 6 y 7 en Landsat 8) de los respectivos sensores, siendo especialmente llamativo el caso de Landsat 7.

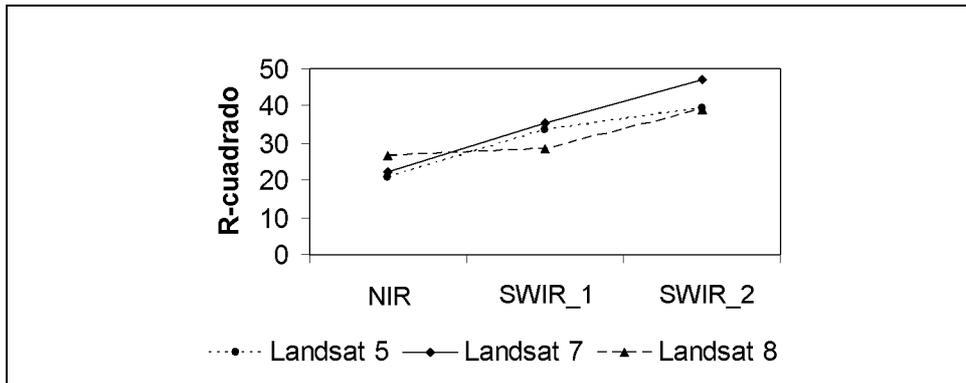


Figura 62. R-cuadrado ajustado para cada banda de las escenas Landsat analizadas. NIR: banda 4 de Landsat 5 y Landsat 7, banda 5 de Landsat 8. SWIR_1: banda 5 de Landsat 5 y Landsat 7, banda 6 de Landsat 8. SWIR_2: banda 7 de Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8.

Por otro lado, se desglosa el efecto de la ganancia sobre las líneas obtenidas a partir Landsat 7 para las bandas 4 (Tabla 21), 5 (Tabla 22) y 7 (Tabla 24). En todos los casos, cuando la imagen se ha adquirido con alta ganancia se observa que la línea se ve más afectada por la radiometría. Por tanto, la distinción de ganancia alta o baja también ha de tenerse en cuenta en la modelización de errores de las líneas obtenidas a partir de Landsat 7.

Haciendo un punto y aparte en este apartado, se añade un último análisis que conviene justificar. Se ha obtenido un conjunto de polinomios que se comportan de forma determinada en cada uno de sus casos particulares, para sus respectivos sensores, bandas y ganancias. Ello ha arrojado una valoración de la cantidad de información explicada por cada modelo en el término R^2 . Sin embargo, hay dos aspectos a tener en cuenta. Por un lado, este valor se ve afectado por la cantidad de puntos con que se realizó cada ajuste y es un factor dependiente de en cuantos grupos se decida dividir el total de imágenes. Por otro lado, se dispone de 9 ajustes para las líneas de Landsat 7: 3 ajustes básicos distinguiendo meramente las 3 bandas, y 6 ajustes más, teniendo en cuenta la alta y la baja ganancia. ¿Cuánto ha podido aportar esta distinción?

La comparación directa de los R^2 de los ajustes no resulta una opción correcta por la diferencia en el número de puntos en la muestra. Parece lógico tratar de encontrar un indicador que permita comparar en igualdad de condiciones cuánta información ha sido posible modelizar mediante el empleo de tres o de seis modelos.

Para cada sensor se ha realizado un único ajuste integrando tres (uno por cada banda) o seis modelos (en el caso particular de Landsat 7). Ahora bien, este modelo conjunto ha de ser obligado a mantener los mismos valores que fueron obtenidos anteriormente; en caso contrario se estaría realizando un ajuste independiente mezclando tipologías de imágenes. Para unificar modelos independientes en un solo ajuste se han empleado variables *dummy* (categóricas o ficticias) que permiten particularizar qué variable estará presente para cada observable. Por ejemplo, tomando Landsat 5, existirán tres grupos de

puntos provenientes de las bandas 4, 5 y 7 respectivamente, sin embargo, mediante variables *dummy* será posible obligar a que cada punto sea 'modelizado' por las variables que le corresponden y no afecte al resto.

¿Cómo funciona exactamente el empleo de variables *dummy*? Simplificando el polinomio explicativo (10) hasta tener sólo los términos de media y desviación, el ajuste de Landsat 5 con sus 3 bandas implicará 3 términos por cada banda, ver ecuación (11)

$$\begin{aligned} \varepsilon = & a_0 \cdot (banda = 4) + a_1 \cdot \mu \cdot (banda = 4) + a_2 \cdot \sigma \cdot (banda = 4) + \\ & a_4 \cdot (banda = 5) + a_6 \cdot \mu \cdot (banda = 5) + a_7 \cdot \sigma \cdot (banda = 5) + \\ & a_8 \cdot (banda = 7) + a_9 \cdot \mu \cdot (banda = 7) + a_{10} \cdot \sigma \cdot (banda = 7) \end{aligned} \quad (11)$$

Dado que se conoce en qué banda se calculó cada punto, sólo aporta valores para resolver en su caso particular. En los coeficientes a_0 , a_4 , a_8 se obtienen los términos independientes iguales a los 3 términos independientes que fueron obtenidos en los ajustes por separado. La peculiaridad de este ajuste es poder aportar un R^2 y una desviación estándar separada y conjunta de todo el ajuste (ver Tabla 25).

Se observa que, teniendo en cuenta el global de cada sensor, los polinomios llegan a alcanzar un poder explicativo del 56% (aplicando los modelos de Landsat 7). En Landsat 8 se encuentra el menor poder explicativo del polinomio. La importancia de tener en cuenta el tipo de ganancia en Landsat 7 (ETM+) queda patente puesto que cuando se aplica, su desviación es similar a la de Landsat 5, resultando coherentes entre sí.

Del análisis de los resultados mostrados en la Tabla 25 se deducen diferentes aspectos

Tabla 25. Estimadores de los modelos radiométricos. Separados y en conjunto.

Sensor	Banda	Ganancia
Landsat 5 → $\begin{cases} R^2 = 47.903 \\ \sigma = 5.20 m \end{cases}$	4 → $\begin{cases} R^2 = 19.768 \\ \sigma = 5.689 m \end{cases}$	
	5 → $\begin{cases} R^2 = 32.677 \\ \sigma = 5.366 m \end{cases}$	
	7 → $\begin{cases} R^2 = 38.472 \\ \sigma = 6.027 m \end{cases}$	
Landsat 7 Unión 3 modelos: → $\begin{cases} R^2 = 50.906 \\ \sigma = 5.575 m \end{cases}$ Unión 6 modelos: → $\begin{cases} R^2 = 56.719 \\ \sigma = 5.235 m \end{cases}$	4 → $\begin{cases} R^2 = 20.198 \\ \sigma = 5.551 m \end{cases}$	Baja → $\begin{cases} R^2 = 15.646 \\ \sigma = 5.177 m \end{cases}$
		Alta → $\begin{cases} R^2 = 34.684 \\ \sigma = 5.225 m \end{cases}$
	5 → $\begin{cases} R^2 = 33.809 \\ \sigma = 5.482 m \end{cases}$	Baja → $\begin{cases} R^2 = 35.575 \\ \sigma = 4.892 m \end{cases}$
		Alta → $\begin{cases} R^2 = 42.926 \\ \sigma = 5.160 m \end{cases}$
	7 → $\begin{cases} R^2 = 45.604 \\ \sigma = 5.690 m \end{cases}$	Baja → $\begin{cases} R^2 = 44.267 \\ \sigma = 5.278 m \end{cases}$
		Alta → $\begin{cases} R^2 = 52.158 \\ \sigma = 5.398 m \end{cases}$
Landsat 8 → $\begin{cases} R^2 = 40.517 \\ \sigma = 4.906 m \end{cases}$	5 → $\begin{cases} R^2 = 24.345 \\ \sigma = 4.722 m \end{cases}$	
	6 → $\begin{cases} R^2 = 28.200 \\ \sigma = 4.803 m \end{cases}$	
	7 → $\begin{cases} R^2 = 39.227 \\ \sigma = 5.185 m \end{cases}$	

La unificación de todos los modelos para cada sensor lleva siempre a mejores valores de R^2 . Eso se debe muy probablemente al hecho del empleo de las variables *dummy*, que han separado el efecto de las diferentes bandas y ganancias. La única salvedad es que, aunque mediante la realización de tres ajustes se estaba realizando un ajuste equivalente en todos los sentidos, el ajuste global es capaz de valorar lo acertado de haber distinguido las diferentes tipologías.

Concretamente, es posible comparar el efecto de un ajuste que aúne los tres modelos (uno por banda) de Landsat 7 frente a aquel que aúne los seis modelos (cuando se distingue con mayor detalle la alta y baja ganancia). En tal caso, el número de puntos implicado en ambos ajustes es el mismo. El mayor valor que arroja R^2 al tener en cuenta las ganancias indica que las imágenes están afectadas por variables cualitativas y no meramente cuantitativas, y ello afecta a las líneas obtenidas. También cabe tener en cuenta que integrar seis modelos implica un mayor número de variables y, por defecto, una mayor capacidad explicativa.

Por otro lado, el aumento de R^2 indica que cada tipología de banda/ganancia empleada se comporta realmente de forma diferente. Aunque este hecho ya ha sido observado de forma continua a lo largo de todo el capítulo, en ningún momento se había abierto la nueva expectativa que el análisis conjunto ha arrojado: la potencial sinergia que la distinción de cada banda a un resultado único, conjunto y de mayor precisión. Es posible realizar dos reflexiones de forma directa:

- i) Dado que cada banda se comporta de forma independiente al resto en un mismo sensor, es lícito pensar que la corrección a aplicar a un punto determinado no dependa sólo de la banda con que fue calculado sino por el conjunto de las tres bandas infrarrojas.
- ii) Es posible que esta sinergia pueda materializarse mediante la obtención de una banda sintética, combinación de las tres bandas infrarrojas y cuya línea de costa tenga por definición una inflexión más clara entre tierra y mar, así como una sinergia adecuada con el modelo a partir del cual se deduzca la línea de costa.

Estas posibilidades, no han sido exploradas con detenimiento en el marco de esta tesis y pueden considerarse como vías abiertas que merecerán ser exploradas con detenimiento en un futuro, esperemos que próximo.

4.7. Aplicación y evaluación de la metodología definitiva

En la Figura 44 se mostró la metodología de obtención de las líneas de costa integrando su extracción y georreferenciación, ambas con precisión sub-píxel. Tras las consideraciones recién realizadas, el proceso de modelización radiométrica ha de formar parte de la metodología definitiva como se representa en la Figura 63.

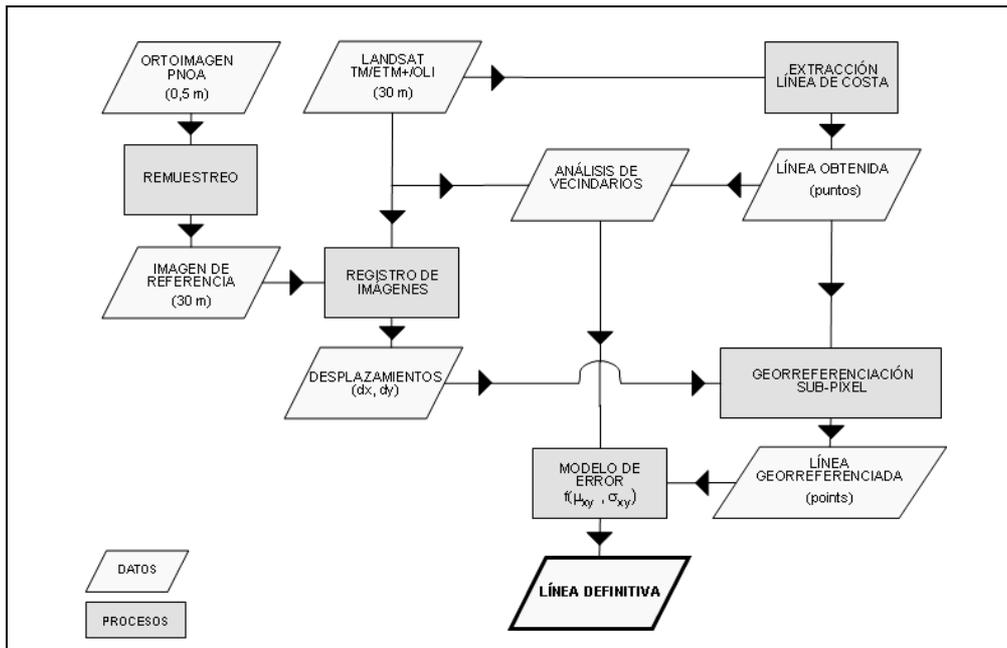


Figura 63. Flujo de trabajo definitivo.

La lectura del flujo de trabajo definitivo es, a su vez, un mapa de situación para integrar cada capítulo de la presente tesis. En un pre-proceso independiente se degrada la resolución geométrica de una ortoimagen de alta resolución que servirá de referencia para la georreferenciación. De forma paralela se siguen dos caminos: la extracción de la línea de costa en cada imagen y la georreferenciación. El resultado de la extracción de línea de costa es un conjunto de puntos que definen la línea de costa sub-píxel en el espacio de cada imagen. De la georreferenciación se obtiene un par de traslaciones (en x y en y), aquellos valores de alta precisión que requiere cada imagen para estar georreferenciada sobre la ortofotografía. Ambos procesos se unen en el momento en que las coordenadas de los puntos de línea de costa obtenidos son corregidas por los valores

obtenidos en la georreferenciación. Se dispone entonces de líneas de costa georreferenciadas sobre la ortofotografía. En los espacios rígidos de costa se relaciona la radiometría que envuelve a cada punto obtenido y el error cometido. Este modelo es extrapolable a cualquier punto de línea de costa que haya sido obtenido con o sin línea de referencia.

Se obtienen así las líneas de costa sub-píxel, georreferenciadas y corregidas cuyas precisiones se analizan a continuación.

4.7.1. Análisis global de histogramas de distancias

Se recogen seguidamente las estadísticas generales e histogramas obtenidos utilizando todos los puntos de todas las líneas correspondientes a cada banda y sensor. A su vez, se desglosan los resultados en cada escollera tal y como se hizo en la aplicación previa a la modelización radiométrica, pudiendo comparar así ambos resultados.

Tabla 26. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 5. Escolleras 2 y 3.

		Banda 4	Banda 5	Banda 7
	Recuento	66924	67283	66286
	Mínimo	-24,808	-30,342	-31,014
	Máximo	32,549	28,538	32,482
	Rango	57,356	58,880	63,496
Distribución normal	Promedio	0,000	0,000	0,000
	Desviación Estándar	5,677	5,390	6,075
	Error Estándar	0,022	0,021	0,024
	Asimetría	13,406	2,835	-3,475
	Curtosis	0,906	0,982	0,751
Distribución general	Mediana	-0,478	-0,105	0,072
	Cuartil Inferior	-3,832	-3,383	-3,791
	Cuartil Superior	3,336	3,245	3,870
	Rango Intercuartílico	7,168	6,629	7,662
	1/6 sextil	-5,226	-4,906	-5,495
	5/6 sextil	5,169	4,767	5,491
	Rango Intersextil	10,395	9,673	10,985

Tabla 27. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 5. Análisis escollera 2.

		Banda 4	Banda 5	Banda 7
	Recuento	35595	35603	34627
	Mínimo	-22,678	-30,342	-31,014
	Máximo	32,549	28,538	32,482
	Rango	55,227	58,880	63,496
Distribución normal	Promedio	1,371	1,152	1,180
	Desviación Estándar	6,179	5,979	6,751
	Error Estándar	0,033	0,032	0,036
	Asimetría	0,429	-0,044	-0,265
	Curtosis	0,536	0,878	0,646
Distribución general	Mediana	0,924	1,163	1,515
	Cuartil Inferior	-2,886	-2,467	-2,955
	Cuartil Superior	5,146	4,757	5,499
	Rango Intercuartílico	8,032	7,224	8,453
	1/6 sextil	-4,406	-4,195	-4,974
	5/6 sextil	7,125	6,455	7,276
	Rango Intersextil	11,531	10,649	12,251

Tabla 28. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 5. Análisis escollera 3.

		Banda 4	Banda 5	Banda 7
	Recuento	31329	31680	31659
	Mínimo	-24,808	-21,274	-25,893
	Máximo	20,978	17,900	18,409
	Rango	45,785	39,173	44,303
Distribución normal	Promedio	-1,557	-1,295	-1,290
	Desviación Estándar	4,573	4,284	4,923
	Error Estándar	0,026	0,024	0,028
	Asimetría	0,209	-0,106	-0,248
	Curtosis	0,432	0,153	0,441
Distribución general	Mediana	-1,741	-1,242	-1,130
	Cuartil Inferior	-4,603	-4,087	-4,416
	Cuartil Superior	1,340	1,642	2,003
	Rango Intercuartílico	5,943	5,729	6,420
	1/6 sextil	-5,868	-5,423	-5,908
	5/6 sextil	2,782	2,848	3,427
	Rango Intersextil	8,650	8,271	9,335

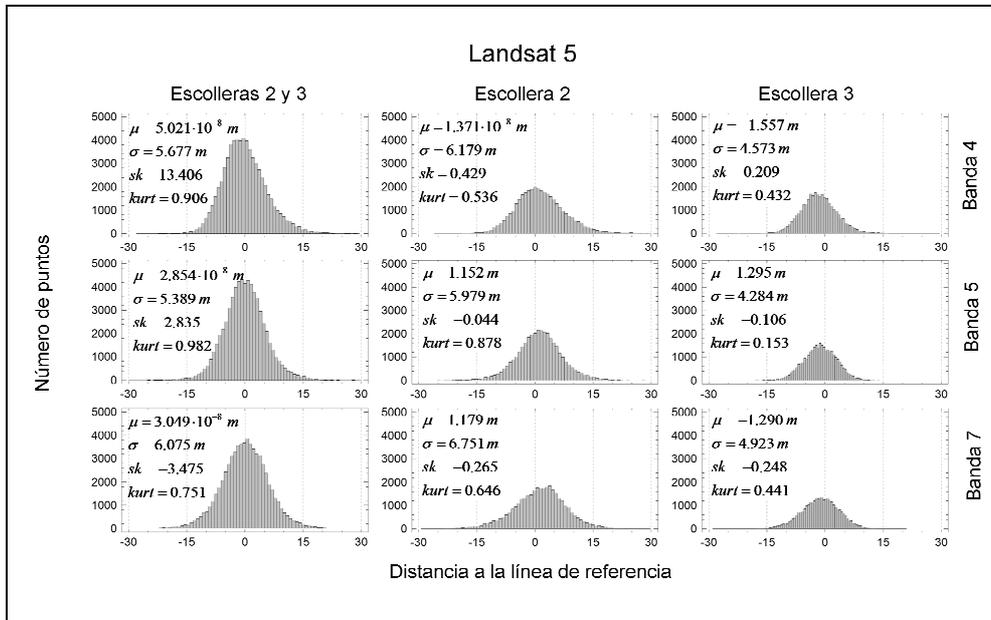


Figura 64. Histograma de distancias de los puntos de línea sub-píxel a las líneas de referencia. Caso: Landsat 5.

Tabla 29. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 7. Escolleras 2 y 3.

		Banda 4	Banda 5	Banda 7
	Recuento	63037	63588	63347
	Mínimo	-27,317	-24,778	-33,811
	Máximo	29,722	28,965	28,647
	Rango	57,039	53,742	62,457
Distribución normal	Promedio	0,000	0,000	0,000
	Desviación Estándar	5,197	5,134	5,369
	Error Estándar	0,021	0,020	0,021
	Asimetría	-5,588	-2,350	-0,802
	Curtosis	1,049	0,691	0,935
Distribución general	Mediana	-0,328	-0,065	-0,032
	Cuartil Inferior	-3,437	-3,305	-3,367
	Cuartil Superior	3,096	3,245	3,369
	Rango Intercuartílico	6,533	6,550	6,736
	1/6 sextil	-4,782	-4,746	-4,870
	5/6 sextil	4,674	4,729	4,895
	Rango Intersextil	9,456	9,475	9,764

Tabla 30. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 7. Análisis escollera 2.

		Banda 4	Banda 5	Banda 7
	Recuento	35370	35283	35096
	Mínimo	-27,317	-24,778	-33,811
	Máximo	26,329	28,965	28,647
	Rango	53,647	53,742	62,457
Distribución normal	Promedio	1,795	1,876	1,484
	Desviación Estándar	5,177	4,969	5,572
	Error Estándar	0,028	0,026	0,030
	Asimetría	0,303	0,111	-0,131
	Curtosis	1,090	1,160	1,383
Distribución general	Mediana	1,577	1,764	1,524
	Cuartil Inferior	-1,544	-1,225	-1,872
	Cuartil Superior	4,823	4,909	4,885
	Rango Intercuartílico	6,367	6,133	6,757
	1/6 sextil	-2,862	-2,597	-3,364
	5/6 sextil	6,342	6,352	6,420
	Rango Intersextil	9,203	8,949	9,784

Tabla 31. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 7. Análisis escollera 3.

		Banda 4	Banda 5	Banda 7
	Recuento	27667	28305	28251
	Mínimo	-21,684	-20,343	-22,611
	Máximo	29,722	12,401	13,970
	Rango	51,406	32,744	36,581
Distribución normal	Promedio	-2,295	-2,338	-1,843
	Desviación Estándar	4,229	4,310	4,465
	Error Estándar	0,025	0,026	0,027
	Asimetría	0,451	-0,136	-0,128
	Curtosis	2,098	0,083	0,106
Distribución general	Mediana	-2,396	-2,169	-1,779
	Cuartil Inferior	-4,996	-5,086	-4,695
	Cuartil Superior	0,241	0,525	1,203
	Rango Intercuartílico	5,237	5,611	5,898
	1/6 sextil	-6,113	-6,489	-6,095
	5/6 sextil	1,442	1,763	2,420
	Rango Intersextil	7,555	8,252	8,515

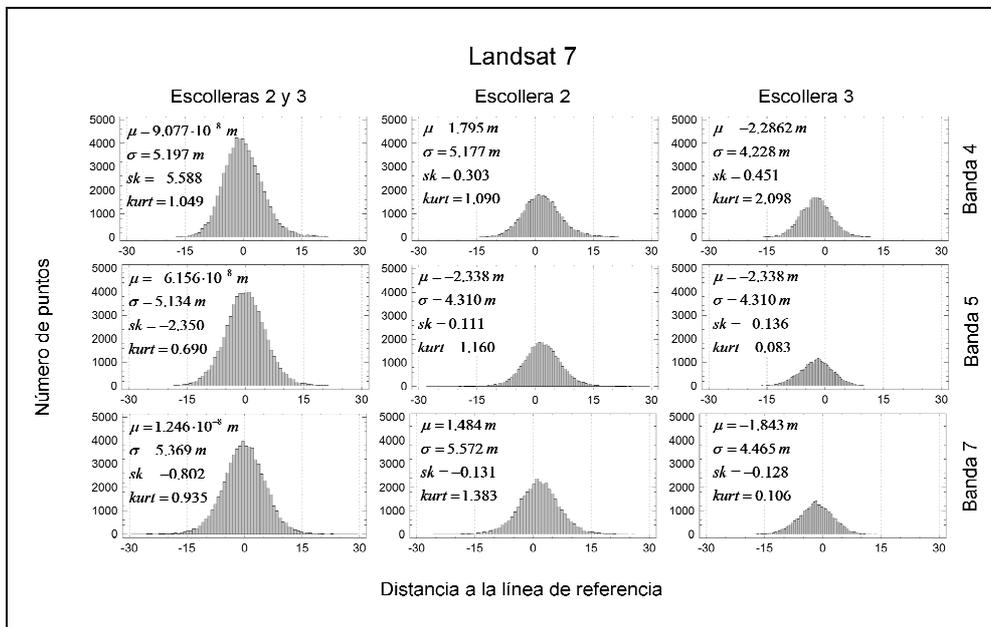


Figura 65. Histograma de distancias de los puntos de línea sub-píxel a las líneas de referencia. Caso: Landsat 7.

Tabla 32. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 8. Escolleras 2 y 3.

		Banda 5	Banda 6	Banda 7
	Recuento	13044	12993	12860
	Mínimo	-19,863	-22,590	-27,266
	Máximo	22,589	16,670	17,202
	Rango	42,451	39,260	44,468
Distribución normal	Promedio	1,368E-07	-3,309E-08	-7,702E-08
	Desviación Estándar	4,720	4,801	5,182
	Error Estándar	0,041	0,042	0,046
	Asimetría	-0,112	-0,796	-0,768
	Curtosis	1,184	1,080	1,408
Distribución general	Mediana	0,029	0,643	0,609
	Cuartil Inferior	-2,529	-2,435	-2,811
	Cuartil Superior	2,819	3,210	3,524
	Rango Intercuartílico	5,348	5,645	6,334
	1/6 sextil	-3,878	-4,111	-4,532
	5/6 sextil	4,146	4,243	4,604
	Rango Intersextil	8,024	8,355	9,136

Tabla 33. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 8. Análisis escollera 2.

		Banda 5	Banda 6	Banda 7
	Recuento	7428	7416	7318
	Mínimo	-19,863	-22,590	-27,266
	Máximo	22,589	14,620	16,487
	Rango	42,451	37,210	43,753
Distribución normal	Promedio	-0,538	-0,796	-0,656
	Desviación Estándar	5,225	5,521	5,996
	Error Estándar	0,061	0,064	0,070
	Asimetría	0,038	-0,656	-0,684
	Curtosis	1,041	0,190	0,580
Distribución general	Mediana	-0,479	0,111	0,310
	Cuartil Inferior	-3,242	-3,946	-4,261
	Cuartil Superior	2,363	3,186	3,639
	Rango Intercuartílico	5,606	7,132	7,900
	1/6 sextil	-4,877	-6,439	-6,535
	5/6 sextil	3,944	4,254	4,791
	Rango Intersextil	8,821	10,693	11,326

Tabla 34. Estadísticos generales Líneas Georreferenciadas de Landsat 8. Análisis escollera 3.

		Banda 5	Banda 6	Banda 7
	Recuento	5616	5577	5542
	Mínimo	-14,970	-12,159	-10,931
	Máximo	14,760	16,670	17,202
	Rango	29,730	28,829	28,134
Distribución normal	Promedio	0,711	1,058	0,866
	Desviación Estándar	3,840	3,348	3,679
	Error Estándar	0,051	0,045	0,049
	Asimetría	-0,139	0,062	0,091
	Curtosis	0,540	0,196	0,052
Distribución general	Mediana	0,735	1,085	0,888
	Cuartil Inferior	-1,674	-1,140	-1,672
	Cuartil Superior	3,227	3,227	3,323
	Rango Intercuartílico	4,902	4,367	4,995
	1/6 sextil	-2,752	-2,158	-2,721
	5/6 sextil	4,331	4,227	4,361
	Rango Intersextil	7,083	6,385	7,082

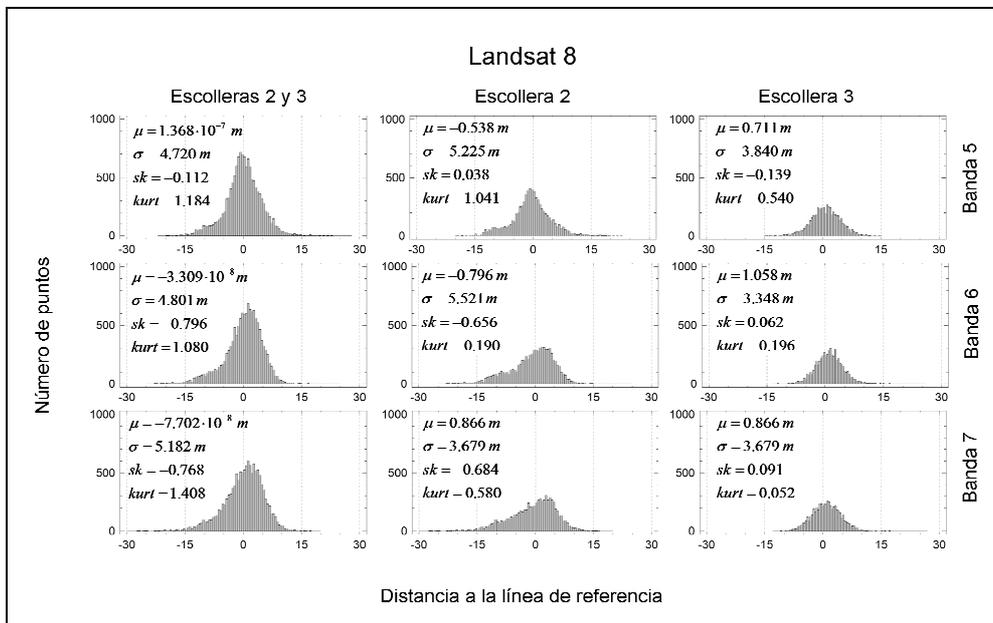


Figura 66. Histograma de distancias de los puntos de línea sub-píxel a las líneas de referencia. Caso: Landsat 8.

4.7.1.1. Comportamiento global

Comencemos por un análisis global de los resultados. Estos resultados provienen del análisis de residuos de las distancias de cada punto a la referencia, aquello que el modelo radiométrico no ha podido explicar. Por definición, la media aritmética de los residuos tiende a 0, y así se observa en las medias de las distancias cuando se calculan al conjunto de las escolleras 2 y 3. Por tanto, el error medio cometido es nulo si se tiene en cuenta el global de líneas analizado independientemente del sensor y la banda. A su vez, en el global de ambas escolleras, la desviación típica desciende en todos los casos tras aplicar el polinomio de corrección, quedando en valores entre 4,7 m (Landsat 8 Banda 5) y 6 m (Landsat 5, Banda 7). A ello hay que añadir el hecho de que las menores desviaciones corresponden a la banda 5 de Landsat 5 y 7. En Landsat 8, el comportamiento equivalente habría sido obtener la menor desviación en la banda 6 pues presenta un valor de 4,8 m, menos de 8 centímetros de diferencia respecto a la banda 5 que, en este caso, tiene la menor desviación.

Para ser coherentes en los 3 sensores, la banda óptima parece ser la banda 5 para Landsat 5 y 7 y, su equivalente en Landsat 8, la banda 6.

Se observa que todos los valores de asimetría (*skewness*) descienden tras la aplicación de la modelización radiométrica, indicando que los errores tienden a ser más simétricos. Es llamativo que la banda 7 de Landsat 7 se reduce el valor de asimetría de -8,2 a -0,8. El descenso es menos perceptible pero patente en sus bandas 5. Landsat 8 vuelve a ser una excepción: si bien reduce la asimetría en la banda 5, lo aumenta en las bandas 6 y 7, eso sí, sin sobrepasar la unidad (los valores se pueden considerar simétricos antes y después del ajuste).

Se puede observar otra excepción, el incremento de *skewness* de 9,870 a 13,406 que se da en la banda 4 de Landsat 5. Este valor indicaría una falta de similitud con la distribución normal, lo cual contrasta con lo que se observa visualmente. La razón más probable se encuentra en el modo de cálculo de la propia asimetría (*skewness*). Para su cálculo se eleva al cubo la distancia a la media lo cual, debido al exceso de datos, distorsiona el valor resultante. El exceso de datos entra en conflicto con el comportamiento de los mismos como distribución normal. Tanto es así que ningún test ha mostrado que los residuos cumplan la condición de normalidad. Los tests de normalidad son extremadamente restrictivos conforme se aumenta el número de datos. Aún así, todo ello no es necesariamente un aspecto negativo, simplemente indica que los errores no han seguido un comportamiento propio de la distribución normal.

Por esa razón se ofrece un conjunto de descriptores generales basados en percentiles. Tiene especial importancia el rango intersextil; por definición, es el rango en que quedan incluidos el 66% de los datos, valor muy semejante al intervalo definido por la desviación típica (68%). La mitad del rango intersextil puede ser comparado de forma directa con la desviación típica e , independientemente del resultado de los tests, comprobando un comportamiento homogéneo y equivalente entre ambos, pudiendo hacer una equiparación con la distribución normal independientemente del resultado de los tests.

El efecto global de mejora tras la modelización radiométrica se puede observar en la distribución empírica de los errores aportada por los cuartiles, sextiles y mediana para Landsat 5 (Figura 67, con datos de la Tabla 10), Landsat 7 (Figura 68 con datos de la Tabla 11) y Landsat 8 (Figura 69 con datos de la Tabla 12). El rango intersextil, el espacio que queda entre las líneas discontinuas es análogo a la desviación típica y lo consideramos equivalente.

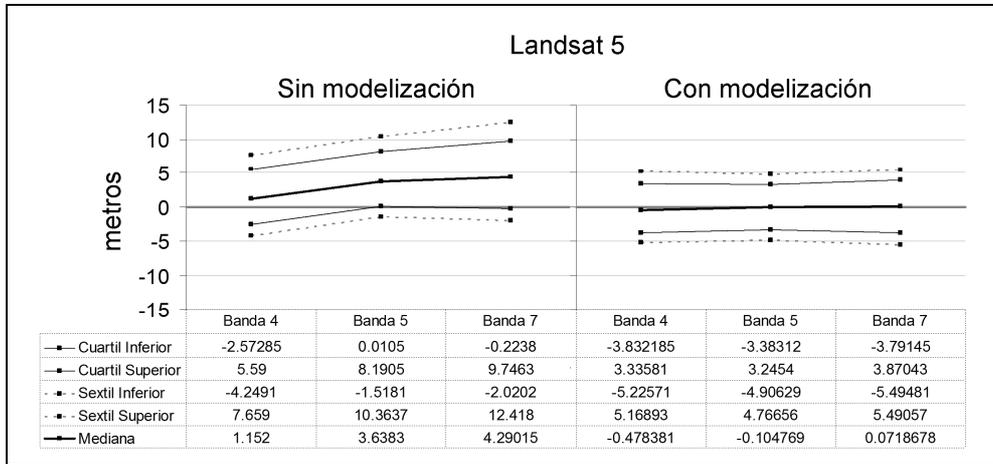


Figura 67. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 5.

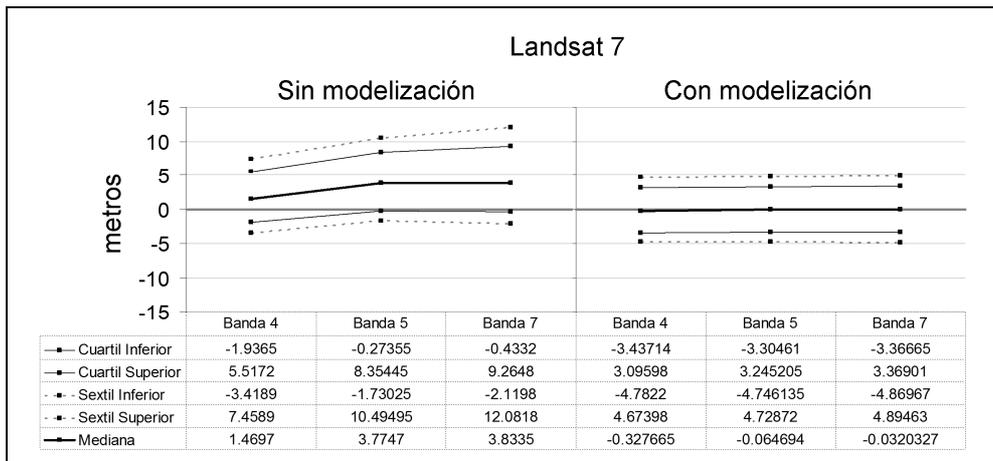


Figura 68. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 7.

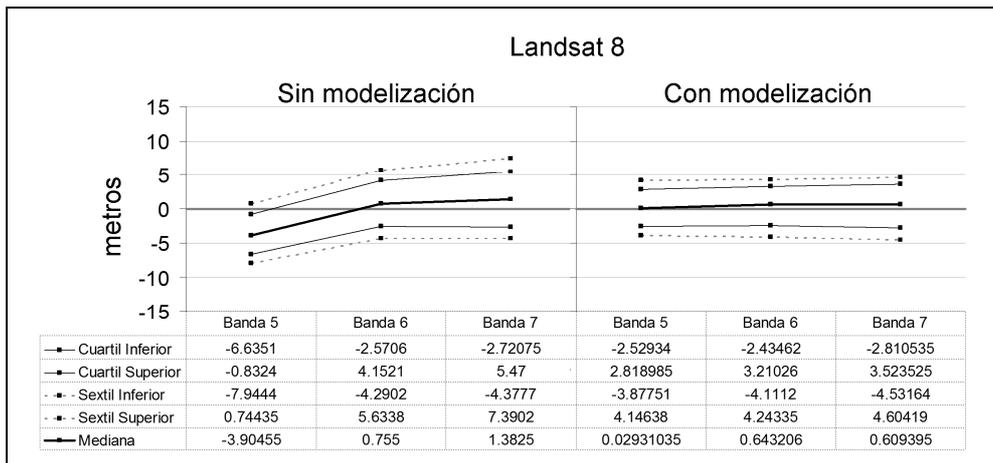


Figura 69. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 8.

La mediana del error cometido se ubica prácticamente en el valor 0 que, por condición de mínimos cuadrados, equivale al valor medio de los errores cometidos. Esta coincidencia es un nuevo indicador de centralidad. El 66% de los valores se encuentran en un intervalo siempre por debajo de los 5,5 m.

Sin la corrección, parece que las respectivas bandas NIR se comportan mejor, pero también es evidente el efecto corregido al tener en cuenta la radiometría pues si no existiera tal dependencia no se habría obtenido esta equiparación entre bandas.

4.7.1.2. Comportamiento en cada escollera

Si se analizan por separado los resultados de las dos escolleras, se sigue pudiendo distinguir el comportamiento entre ambas escolleras. Tras la modelización radiométrica en Landsat 5 y 7, se observa una mayor centralidad de los datos y una mayor simetría, no así en Landsat 8 que sigue presentando una fuerte asimetría en la escollera 2. En efecto, el rango de errores medios para la escollera 2 queda entre $\mu = -0,495$ m. (Landsat 8, banda 6) y $\mu = 1,876$ m (Landsat 7, banda 5), mientras que para la escollera 3 quedan entre $\mu = -2,338$ m (Landsat 7, banda 5) y $\mu = 1,058$ m. (Landsat 8, banda 6). Llama la atención que sean las mismas bandas las que marcan los valores extremos aunque en ningún caso se sobrepasa ni la desviación previsible del método de extracción ni la de georreferenciación.

Pese a la confirmación de cómo la modelización ha aportado una mejora sustancial en los resultados, cabe distinguir el efecto en cada una de las dos escolleras para Landsat 5 (Figura 70 y Figura 71), Landsat 7 (Figura 72 y Figura 73) y Landsat 8 (Figura 74 y Figura 75).

En todos los casos, el comportamiento descentrado y disperso alrededor de la escollera 2 queda corregido en gran medida en todos los sensores. En todos los casos se homogeneiza el comportamiento de las tres bandas, aunque con una ligera asimetría positiva, mar adentro, siempre por debajo de los 3 m. Los cambios en la escollera 3 indican, a priori, un empeoramiento de los resultados. Aunque menos exagerado que en la escollera 2, todos los intervalos intersextilicos decrecen tras la aplicación del modelo, los resultados se encuentran más compactos. El empeoramiento aparente se da por la aparición de un desplazamiento que aleja la mediana de los puntos unos 2 m tierra adentro en el caso de Landsat 5 y 7 y unos 1,5 m mar adentro en Landsat 8.

En Landsat 5 y 7 se ha observado un incremento de la simetría en los histogramas, por tanto, con cierta lógica, la precisión que se obtenía a priori en la escollera 3 queda sesgada levemente tierra adentro unos 2 m, consiguiendo por el contrario que todo el espacio analizado sea susceptible de alcanzar precisiones útiles. Landsat 8, por el contrario, presenta una distribución más caótica y no parece compensar los errores positivos y negativos entre ambas escolleras.

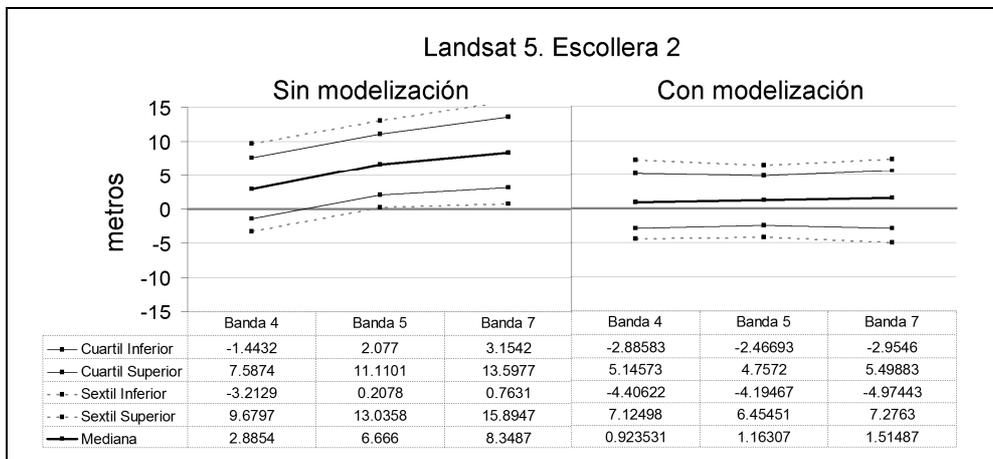


Figura 70. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 5, escollera 2.

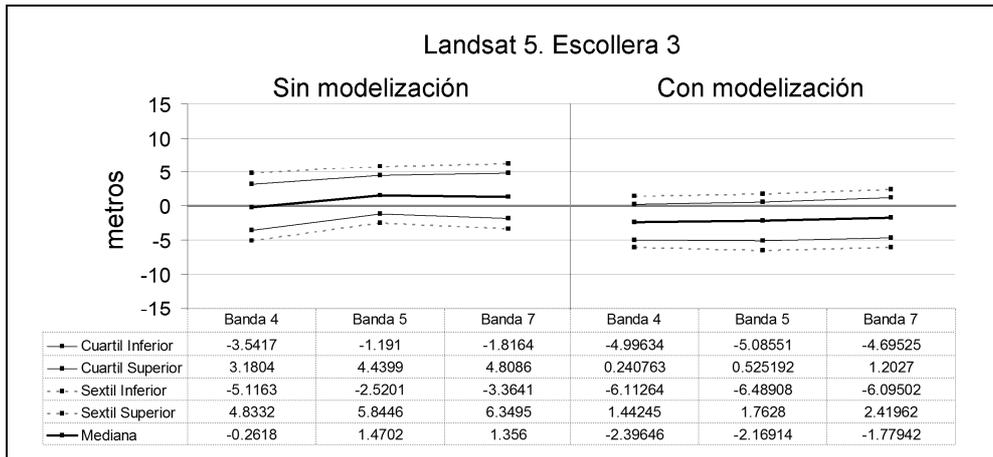


Figura 71. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 7, escollera 3.

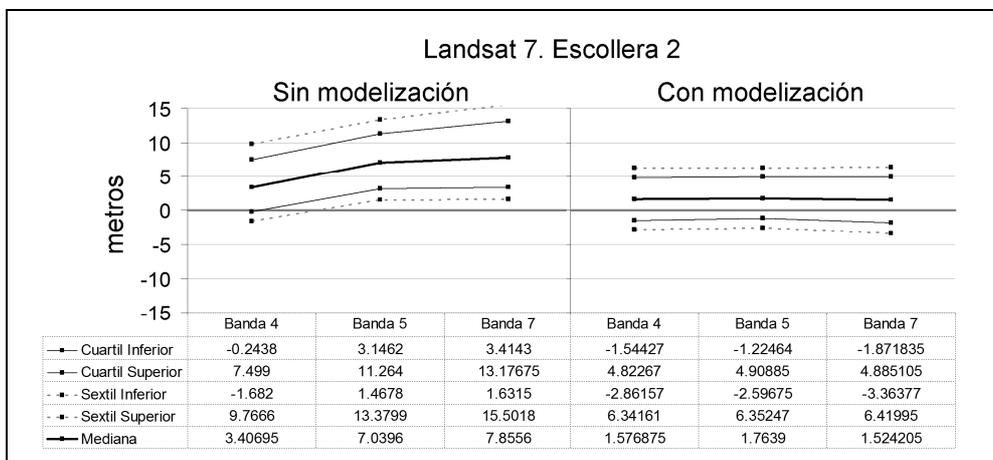


Figura 72. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 7, escollera 2.

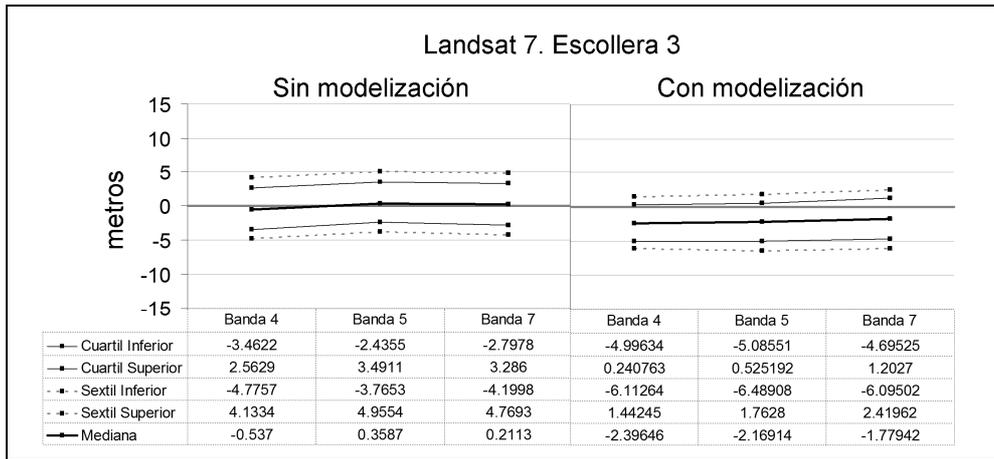


Figura 73. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 7, escollera 3.

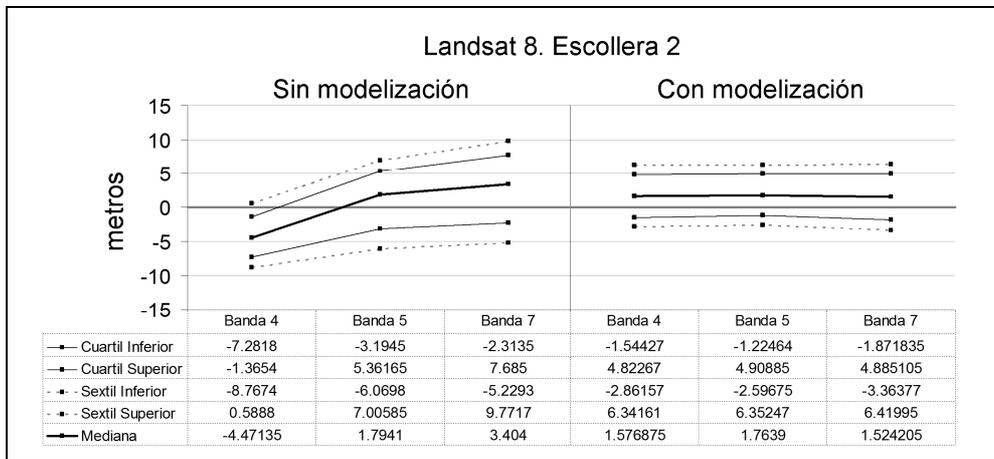


Figura 74. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 8, escollera 2.

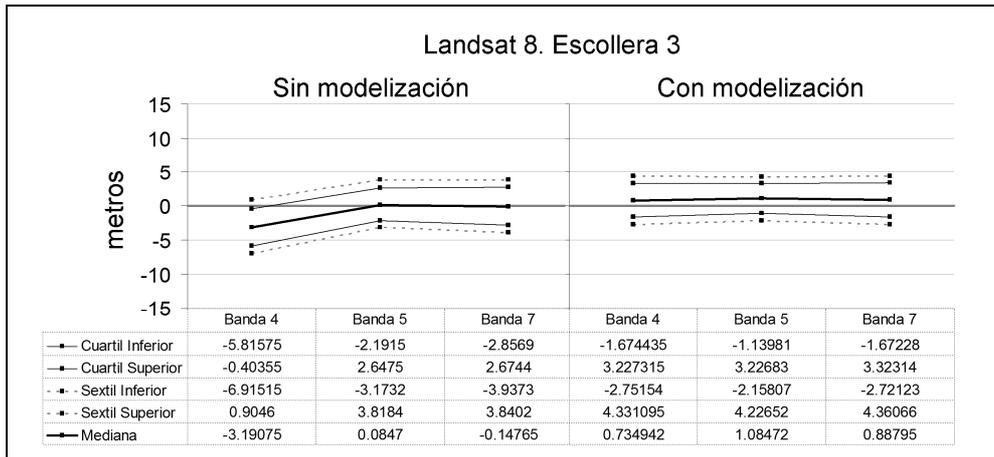


Figura 75. Distribución de los errores antes y después de la modelización radiométrica, para Landsat 8, escollera 3.

4.7.2. Análisis de medias por fecha

Se ha observado un comportamiento diferente alrededor de las dos escolleras analizadas. El hecho de haber podido modelizar y corregir los errores en el global de las líneas no implica haber eliminado las particularidades propias de cada escollera. Comparando la Figura 76 con la Figura 54 se observa que, tras la aplicación del polinomio de corrección, todas las bandas ofrecen resultados similares.

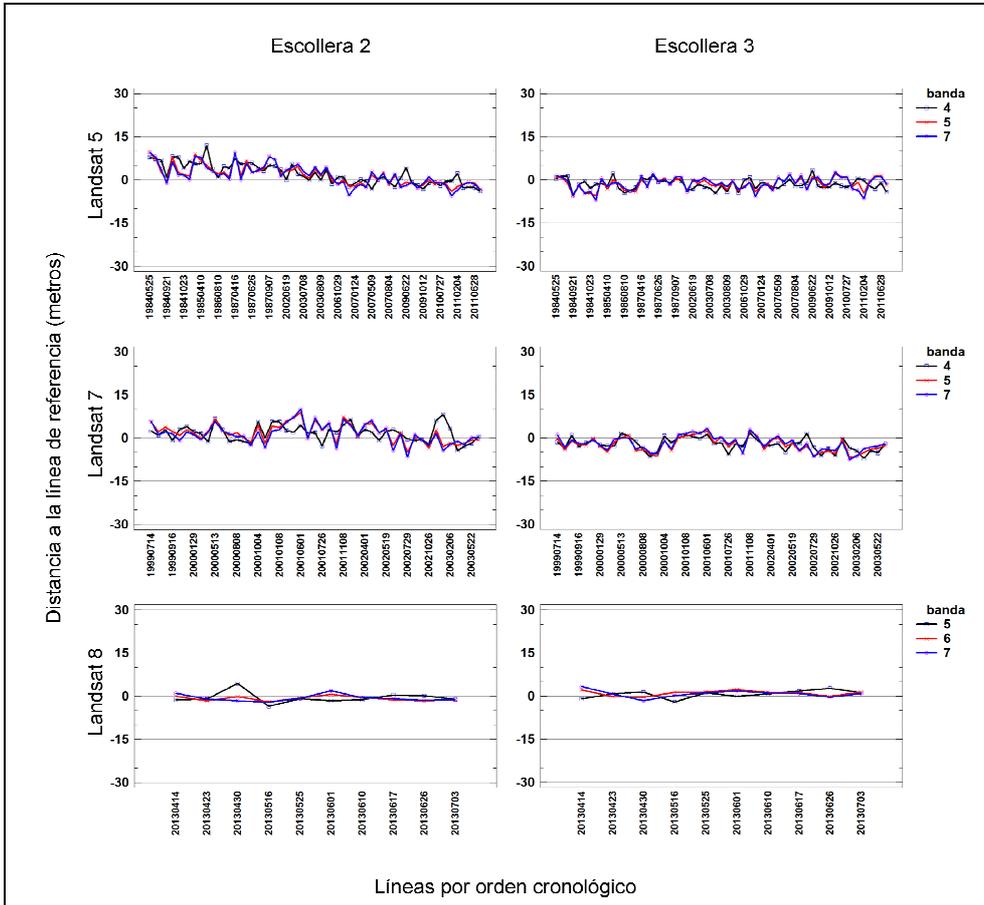


Figura 76. Distancias/errores medios de las líneas sub-píxel para cada sensor y banda frente a las dos escolleras de referencia. No se indica la fecha de todas las imágenes pero se mantiene el orden cronológico.

Se ha observado que en la escollera 3, como término medio, las líneas se adentran en tierra. Si se observa en detalle, existen bloques de líneas que han quedado desplazadas tierra adentro mientras otras se mantienen centradas en el valor 0 (esta conclusión se

refuerza con la gráfica de dispersiones de las figuras del apartado siguiente: Figura 77, Figura 78 y Figura 79).

Es patente que el salto que se observaba antes y después de 2002 ha quedado solventado en buena medida tras la modelización. El comportamiento de Landsat 7 alrededor de la escollera 2 es todavía aleatorio, pero homogéneo en todas las bandas.

Dado que la modelización se ha hecho con todos los puntos disponibles es normal que el error medio global haya sido nulo. Ahora bien, eso no significa poder garantizar error nulo para cada línea obtenida a partir de cada imagen.

Para analizar este hecho podemos observar el error medio de las líneas. Cabe prestar atención a esto: por un lado se tiene el error medio cometido en el global de todos los puntos analizados, que es nulo; por otro lado, cada línea tiene un error medio que proviene de sus propios puntos. Éste último es el que interesa analizar ahora. Si desglosamos los cambios que ha habido en el error medio por cada escena procesada tenemos:

a) Landsat 5

i) Banda 4.

- (1) En las imágenes previas a 2002, los errores medios de las líneas descienden de 7 m a 5 m en la escollera 2 y ascienden de 0 m a 2 m en la escollera 3. Este efecto se debe a que el polinomio compensa los errores de ambas escolleras. Los errores medios de las líneas quedan pues entre -5 y +8 m .
- (2) En las imágenes posteriores a 2002, los rangos de error medio quedan entre de -5 m y +5 m de media en cualquiera de ambas escolleras.
- (3) Cabe destacar que la escena del 22 de mayo de 1986 mantiene el error máximo en unos 12 m y que este error es sólo apreciable su registro en la escollera 2. Cabría preguntarse la razón de no verse afectada por el polinomio de corrección aunque no se ha observado ningún efecto raro en esta imagen. En dicho día, la altura significativa de ola era de 0,88 m que, sin ser un gran oleaje, es posible que produjese espuma, sobre todo en una zona con menor pendiente de playa, como sucede en la escollera 2 (ver fig. 63). Si bien no tenemos forma de demostrarlo, resulta sugerente que este mismo efecto no se haya percibido en el resto de las bandas analizadas, lo que sugeriría que dicha espuma no se captaría con tanta nitidez en ellas.

ii) Banda 5.

- (1) En las imágenes previas a 2002, los errores medios de las líneas descienden de 12 m a 5 m en la escollera 2 y se mantienen en 3 m en la escollera 3. Los errores medios de las líneas quedan entre -6 y +9m,

aunque es llamativo que en la escollera 3 ese rango es menor: entre -6 y +1 m

(2) En las imágenes posteriores a 2002, los rangos de error medio quedan entre de -5 m y +5 m de media en cualquiera de ambas escolleras.

iii) Banda 7.

(1) En las imágenes previas a 2002, los errores medios de las líneas descienden de 13 m a 5 m en la escollera 2 y se mantienen en 3 m en la escollera 3. Los errores medios de las líneas quedan entre -7 y +9 m , aunque es llamativo nuevamente que en la escollera 3 ese rango es menor: entre -6 y +1m.

(2) En las imágenes posteriores a 2002, los rangos de error medio quedan entre de -7 m y +7 m de media en cualquiera de ambas escolleras.

b) Landsat 7

i) Banda 4. Los rangos de errores medios por línea se encuentran siempre entre -6 m y +7 m.

ii) Banda 5. Se da un caso de error de 9 m el 1 de junio de 2001 y otro caso de -8 m para el 21 de enero de 2003. Obviando estos dos casos los errores se encuentran entre -6 y +7 m.

iii) Banda 7. Se comporta en los mismos rangos de error y con las mismas excepciones que la banda 5. Se da un caso de error de 9 m el 1 de junio de 2001 y otro caso de -8 m para el 21 de enero de 2003. Obviando estos dos casos los errores se encuentran entre -6 y +7 m.

c) Landsat 8.

i) Banda 5. El rango de errores medios queda entre -2 m y +4 m en todo el espacio analizado.

ii) Banda 6. El rango de errores medios queda entre -2 m y +2 m.

iii) Banda 7. El rango de errores medios queda entre -3 m y +3 m.

4.7.3. Análisis de dispersiones por línea

El primer hecho patente tras la aplicación del modelo de corrección radiométrica es la reducción de la aleatoriedad en los resultados. Si se compara la Figura 77 con la Figura 55 se observa cómo la banda 4, no presenta saltos aleatorios. Sin embargo, parece existir una tendencia temporal. Si tal tendencia temporal es cierta o no, o si responde a

algún efecto no tenido en cuenta no será analizado en esta tesis, pero es evidente que la modelización elimina ruido y anomalías.

El gráfico de cajas y bigotes engloba en la caja los márgenes del 50% de datos. Tan solo la imagen del 22 de mayo de 1986 en la escollera 2 de Landsat 5 (TM) en su banda 4 presenta un valor que supera parcialmente el error de medio píxel. Todos los demás casos existentes antes de la modelización han sido corregidos.

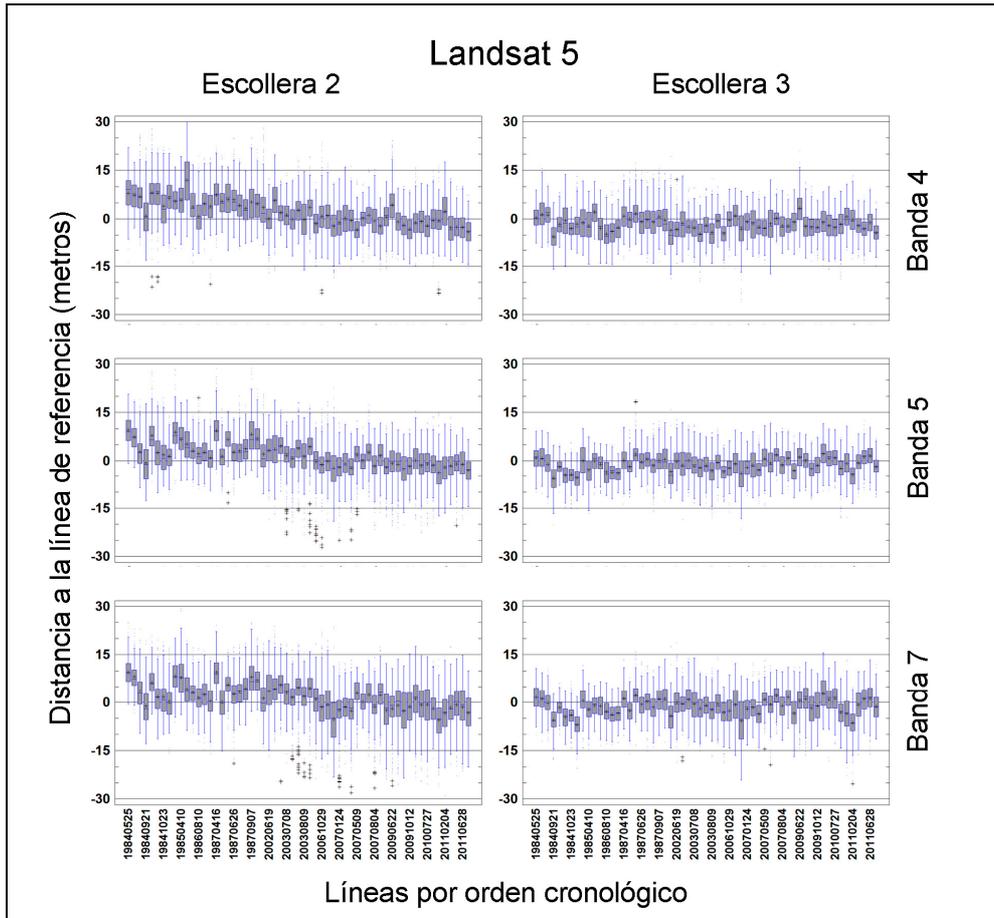


Figura 77. Distancias/errores medios y dispersión por cada línea sub-píxel respectivas a cada banda frente a las dos esolleras de referencia. No se plasma la fecha de todas las imágenes pero se ha mantenido el orden cronológico de las mismas. Caso Landsat 5.

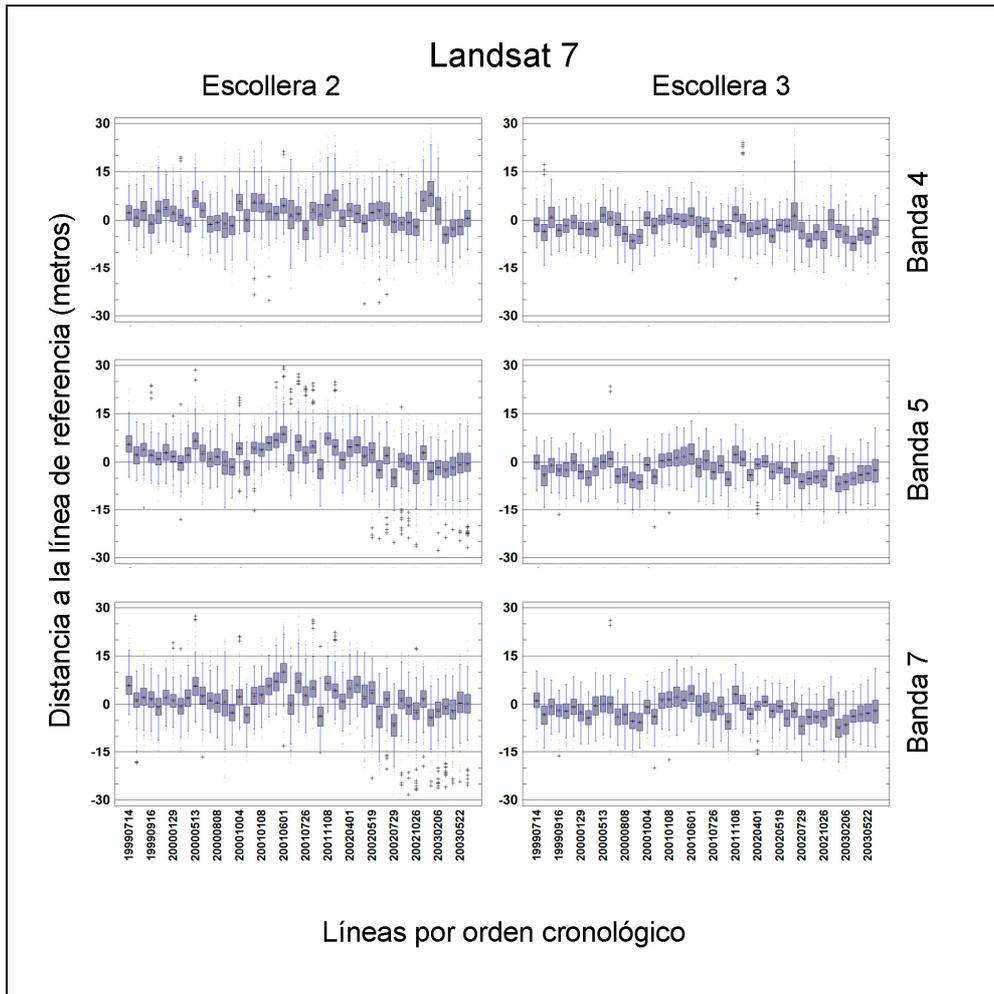


Figura 78. Distancias/errores medios y dispersión por cada línea sub-píxel respectivas a cada banda frente a las dos escolleras de referencia. No se plasma la fecha de todas las imágenes pero se ha mantenido el orden cronológico de las mismas. Caso Landsat 7.

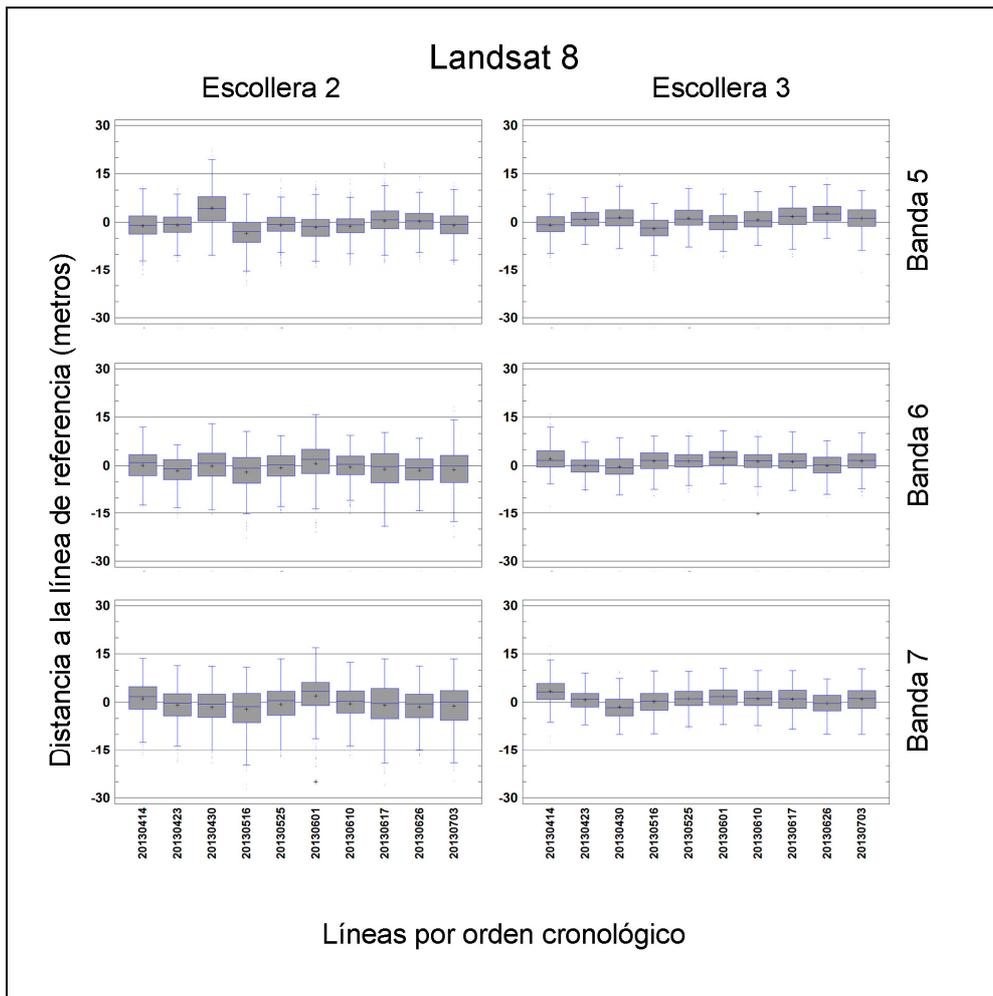


Figura 79. Distancias/errores medios y dispersión por cada línea sub-píxel respectivas a cada banda frente a las dos escolleras de referencia. No se plasma la fecha de todas las imágenes pero se ha mantenido el orden cronológico de las mismas. Caso Landsat 8.

El análisis de medias previo a la modelización radiométrica llevó a considerar el efecto de una anomalía antes y después de 2002 pero también al aparente hecho de que los errores eran más exagerados en la escollera 2 que en la 3. Es posible comparar los resultados previos (Figura 58 y Figura 59) y posteriores (Figura 80 y Figura 81) a la modelización radiométrica.

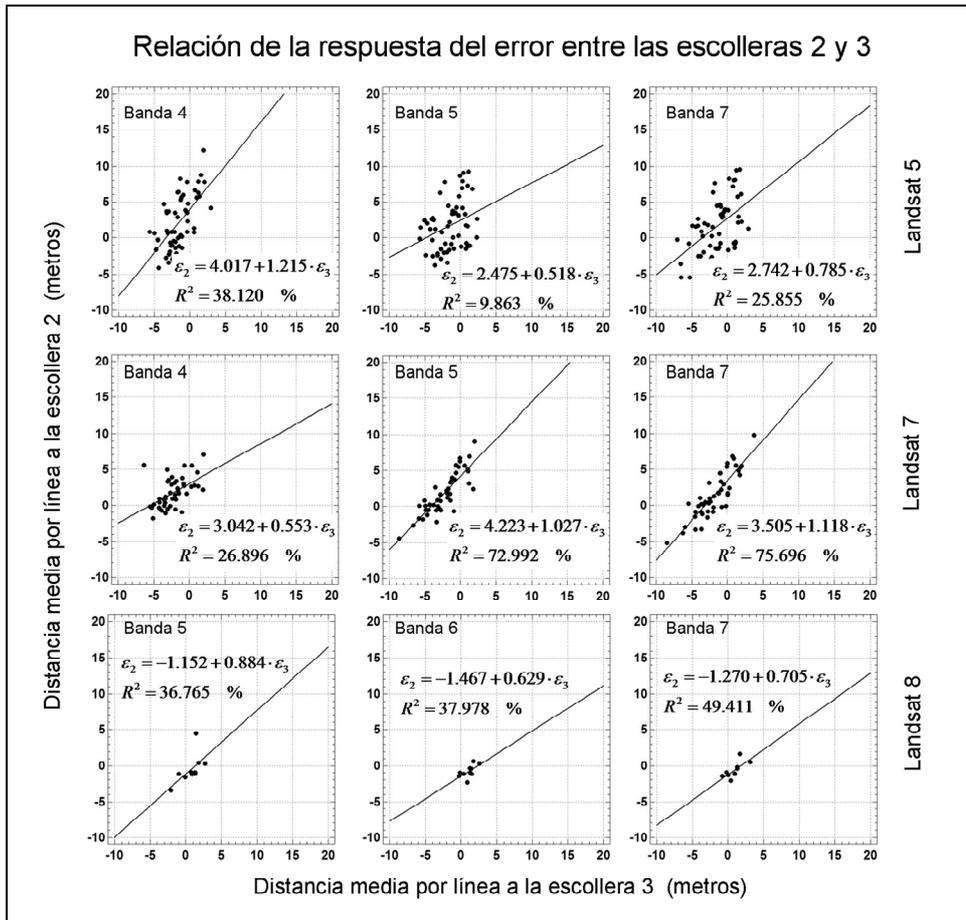


Figura 80. Correlación entre los errores (distancias medias a la línea de referencia por cada línea obtenida) en las escolleras 2 y 3.

En el análisis de las bandas sin distinción de fecha se observa que salvo en las bandas 5 y 7 de Landsat 5, aquellas en que se observaba el doble comportamiento previo y posterior a 2002, todos los R^2 se han visto reducidos. En la Figura 58 se observó cómo las bandas NIR (4 y 5, según el sensor) presentaban una fuerte correlación, aunque por pocos puntos (en Landsat 8, banda 5, apenas un punto); se puede considerar que ese valor elevado de R^2 se debía a un efecto *leverage* (efecto palanca) que ha sido minimizado. El efecto *leverage* suele inducir a error en las interpretaciones mínimo cuadráticas y su minimización hace pensar que la modelización radiométrica homogeneiza y da un sentido más lógico a los resultados. Por el contrario, en las bandas 5 y 7 de Landsat se mantiene una fuerte correlación, pero con un valor de pendiente cercano a 1; es decir, ambas escolleras tienden a comportarse igual.

El comportamiento de doble tendencia previo y posterior a 2002 que se observaba en las bandas 5 y 7 de Landsat 5 ha sido minimizado en gran medida hasta el punto de hacer desaparecer la correlación entre ambas escolleras. Sin embargo, al analizar los dos intervalos temporales por separado se observa cómo, durante todo el periodo previo a 2002, se mantiene una fuerte correlación, eso si, con una pendiente tendente a la unidad. Nuevamente, la corrección radiométrica ha homogeneizado el comportamiento entre ambas escolleras. Queda pendiente la interpretación de por qué tras 2002 este comportamiento igual entre ambas escolleras desaparece.

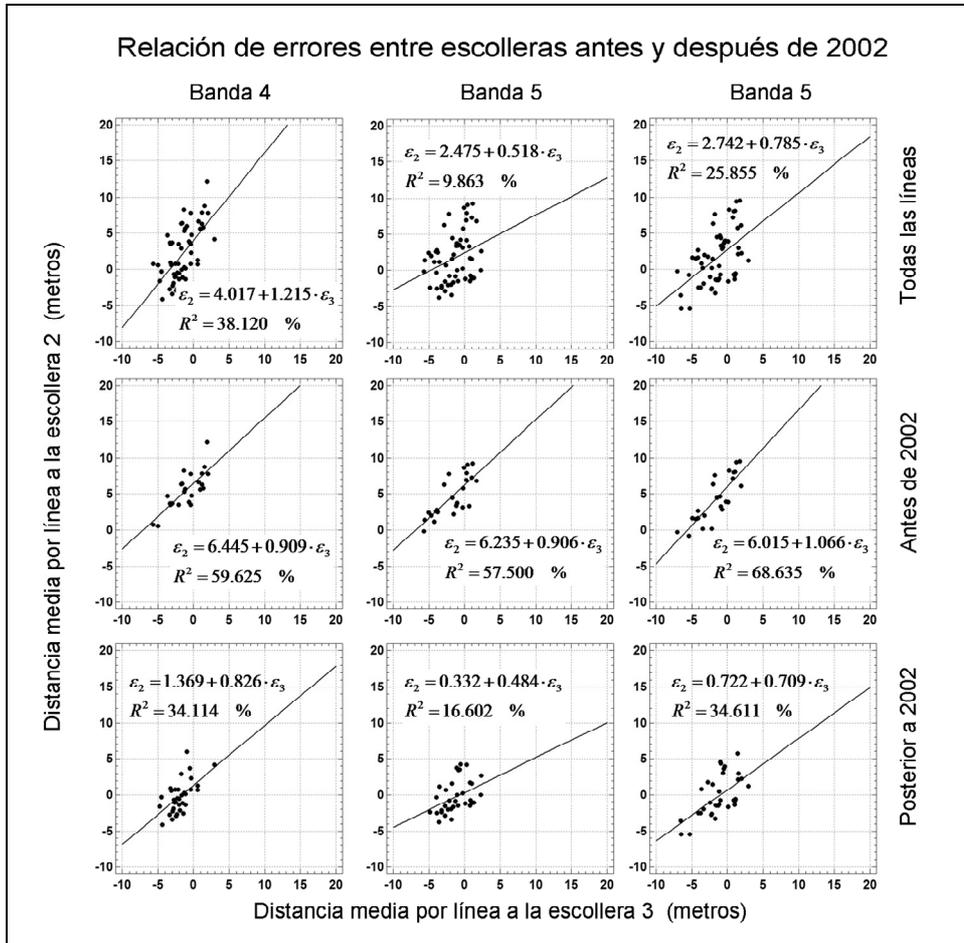


Figura 81. Correlación entre los errores (distancias medias a la línea de referencia por cada línea obtenida) en las escolleras 2 y 3. Caso particular de Landsat 5, antes y después de 2002.

4.8. Conclusiones

En este capítulo se ha mostrado la aplicación de la extracción de línea de costa con precisión sub-píxel propuesta en el capítulo II y georreferenciación también sub-píxel desarrollada en el capítulo III a imágenes Landsat TM/ETM+/OLI. A partir de ello, son de interés dos aspectos: el procedimiento de evaluación y las consecuencias inducidas.

La peculiaridad del procedimiento de evaluación ha sido considerar qué condiciones debe cumplir una línea para ser considerada como referencia y cómo localizar las zonas adecuadas. Se ha trabajado con tres zonas, nombradas 'escolleras' como término genérico. De cada una ha sido posible observar comportamientos diferenciados de las que se han obtenido conclusiones de tipo geométrico y radiométrico. En la escollera 1, se han podido describir las limitaciones geométricas del algoritmo. Se ha mostrado cómo el algoritmo no ajusta completamente la línea de costa en zonas de espigones y diques que, o bien impliquen una curvatura exagerada (prácticamente de ángulo recto) en el trazado, o bien que no puedan ser observados correctamente por la propia resolución del sensor. Tras ello, las líneas a calibrar en la escollera 1 fueron desechadas.

Por otro lado, el comportamiento claramente distinto de las líneas en la escollera 2 antes y después a 2002 ha llevado a formular la hipótesis según la cual los niveles de intensidad de cada vecindario tendrían relación con pequeños desplazamientos de las líneas deducidas. Esta observación se ve reforzada al demostrar que los desplazamientos en la escollera 2 aumentaban proporcionalmente un 20% los errores de la escollera 3 para una misma fecha. Si esta relación entre error y valores de intensidad se confirmara, se podrían modelizar dicha relación para ser prevista en el futuro. De hecho, al realizar la modelización por mínimos cuadrados se ha respondido estadísticamente a la existencia de esta relación.

Para la obtención de modelos de corrección válidos se ha debido tener en cuenta la propia naturaleza de adquisición de las imágenes: sensor, banda y ganancia concretas de cada escena. Se ha demostrado que Landsat 8 aporta resultados más independientes a la radiometría que el resto de sensores dado que la modelización apenas explica un 40% de los errores. Se ha demostrado que, dentro de cada sensor, la banda 4 es la más independiente a la radiometría, pudiendo ser modelizado sólo el 25% de los errores. En el resto de bandas (y en Landsat 7, especialmente con ganancia alta) se ha demostrado la implicación de la radiometría del vecindario de cada punto en su error cometido, alcanzando una explicación global para Landsat 7 del 56%.

El hecho de que los modelos puedan explicar aproximadamente el 50% de los datos es coherente dado que la variación radiométrica se presenta en la mitad de los datos analizados. Es decir, para obtener un buen ajuste es necesario que los datos sean muestra del efecto que se pretende modelizar, en este caso ocurre principalmente en la mitad de los datos, en la escollera 2. En ella se concentra la mayor aleatoriedad y es más necesaria la modelización para corregir la posición de la línea de costa. Sin embargo, aunque parezca escaso el poder explicativo de la modelización radiométrica, tiene unas

consecuencias de primer orden. Se ha demostrado que sin ella no es posible la homogeneización del comportamiento de errores en todas las zonas de estudio.

Como conclusión, el algoritmo aporta, tras el ajuste radiométrico, un error medio nulo. La mediana de tal desplazamiento en el global del estudio se encuentra en el intervalo entre -0,5 y 0,6 m. Igualmente, en el global de líneas estudiadas, el peor caso se encuentra en la banda 7 de Landsat 7, donde la desviación típica es de 6 m, ahora bien, este valor es una estimación que sólo se cumpliría suponiendo que los errores siguieran una distribución normal. Dado que se dispone de más de 66000 puntos en ese estudio, los percentiles tienen un carácter igualmente probabilístico y se puede concluir que en este, siendo el peor caso, las desviaciones se encuentran en el intervalo de $\pm 5,5$ m en un 66% de los casos. Sin embargo este es el error asociado al global del ajuste, unas líneas tendrán un desplazamiento promedio mar adentro y otras tierra adentro pero ¿qué error ofrece como promedio una línea calculada? En este sentido se ha de prescindir de las escenas previas a 2002 en el caso de Landsat 5 puesto que desde esa fecha el comportamiento de las líneas es distinto. A partir de entonces todas las líneas calculadas han tenido errores promedio que quedan entre -7 m y +7 m, siendo estos prácticamente excepciones. Es altamente llamativo el hecho de que las líneas obtenidas a partir de Landsat 8 hayan quedado siempre en errores promedio por debajo de -3 y +4; concretamente, ninguna línea de la banda 6 supera los ± 2 m.

La homogeneización ofrecida por la corrección radiométrica hace prácticamente equiparables las precisiones de todas las bandas pero destaca por un comportamiento menos aleatorio y unos márgenes de error ligeramente mejores en la banda 5 para los sensores Landsat 5 y 7, y concuerda con el trabajo inicial descrito en Pardo-Pascual et al. (2012), si bien los nuevos resultados obligan a no olvidar la existencia de las tres bandas de infrarrojo existentes, previendo una potencial sinergia entre las tres líneas aportadas para una misma fecha.

Capítulo V

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA AL ANÁLISIS DE LA DINÁMICA COSTERA

"La ciencia se compone de errores que, a su vez, son los pasos hacia la verdad"

Julio Verne

5.1. Introducción

El desarrollo de la tesis ha descrito y evaluado los tres pasos que componen la metodología propuesta para obtener líneas de costa con precisión sub-píxel a partir de imágenes Landsat TM/ETM+/OLI. Tales tres pasos son: la extracción de una línea por cada imagen, la georreferenciación necesaria para que todas las líneas puedan ser comparadas entre sí de forma coherente y, por último, la corrección de las líneas por radiometría a aplicar a cada una de ellas. Globalmente el error medio esperable es nulo, con una desviación típica de 5,5 m. Desde el punto de vista práctico, cada paso es automático y no requiere más interacción por parte del usuario que la revisión de los umbrales que sirven para la umbralización de las imágenes al principio del proceso.

Conviene recordar que la evaluación de cada parte del flujo de trabajo ha sido realizada en cada capítulo comparando y discutiendo el resultado de cada proceso con una información de referencia contrastada. El flujo de trabajo integrado fue evaluado en el capítulo IV donde se compararon todas las líneas obtenidas de multitud de escenas Landsat TM/ETM+/OLI frente a espacios costeros estabilizados y que, por tanto, mantenían su posición estable durante todo el periodo de análisis. Ahora bien, habiendo contrastado el método en lugares en que la posición de la línea de costa es conocida, se plantean varias cuestiones:

- ¿Qué utilidad tiene detectar líneas en espacios que no varían? En sí mismo, como medio de calibración. Ahora bien, habiendo verificado métricamente la precisión de las líneas de costa en espacios estabilizados cabe esperar que, de existir un cambio, será reflejado en las líneas. De hecho, cabe recordar que, en el capítulo IV, una de las zonas fue eliminada por los accidentes geográficos. Aunque estos accidentes, si no alcanzan una magnitud mayor al píxel, no puedan ser trazados con detalle, sí crean inflexiones y anomalías detectables.
- ¿Es aplicable esta metodología a otras zonas? Sí, y de hecho es la razón de ser de esta tesis: cartografiar la evolución y comportamiento de espacios costeros dinámicos, con interés especial en los espacios de playa arenosa.
- ¿Qué precisión o comportamiento cabe esperar entonces? Esta es una cuestión crucial. El distinto comportamiento que las líneas de costa presentaron en las dos zonas de calibración del capítulo IV invita a pensar que así pueda suceder en otros espacios. Este capítulo procurará dar una respuesta a esta cuestión.

Para saber si la precisión en espacios no rigidizados es equivalente a los presentados hasta ahora, sería necesario evaluar el comportamiento de las líneas de costa en tales espacios. Ello implica serias dificultades por lo dinámico de las playas. Por ejemplo, en las playas arenosas, dependiendo de las olas y las pendientes, puede haber respuestas heterogéneas en el espectro infrarrojo (como se vio en el capítulo II). Ello implica nuevas cuestiones, en primer lugar: **(i)** ¿Qué se entiende por línea de costa? ¿Qué línea se detecta por el algoritmo propuesto en cada una de las bandas infrarrojas de Landsat TM/ETM+/OLI? En segundo lugar **(ii)**, si las líneas Landsat han de ser calibradas, se requiere de líneas precisas de referencia y coincidentes con el momento de toma de la imagen: ¿disponemos de esta información? Las respuestas a estos dos grupos de cuestiones están relacionadas y, de hecho, conviene responder primero a la segunda. Así, sabiendo dónde se ha decidido tomar las líneas de alta precisión, se podría comprender cómo responde cada banda infrarroja ante la naturaleza de las playas, resolviendo así las primeras cuestiones.

En el momento en que esta tesis se redacta, no se dispone de líneas de costa de alta precisión coincidentes con el paso de los satélites Landsat sobre zonas de playa conocidas y, por tanto, las cuestiones anteriores no pueden ser resueltas. De hecho, la creación de herramientas que permitan disponer de esta información en el futuro es una

de las principales vías de investigación que, ya fuera del entorno de esta tesis, se está desarrollando en el equipo de investigación.

Sin embargo, se plantea aquí un análisis alternativo a partir de estudiar la evolución mostrada por líneas obtenidas, para observar si resultan coherentes con los principios y fundamentos de la morfodinámica de playas. Las líneas de costa obtenidas por el método propuesto indicarán evoluciones, tendencias y comportamientos de los sistemas costeros. Así, el hecho de que tales comportamientos sean lógicos desde un punto de vista geomorfológico tendrán una doble consecuencia: en primer lugar, demostrar la utilidad geomorfológica de las líneas obtenidas y, en segundo lugar, evaluar (aunque no sea numéricamente) el sentido y validez de las líneas en espacios de playa.

5.2. Las playas arenosas y su estudio

Las playas son espacios naturales formados por depósitos acumulados por el mar en un segmento determinado de su borde con el continente. Se trata, normalmente, de espacios en los que, durante cientos de años, se ha ido produciendo una sedimentación de materiales. Quizá el rasgo más llamativo de los espacios costeros es su gran dinamismo, especialmente en las playas arenosas. La acción del oleaje y de las corrientes produce un transporte de materiales sueltos y provoca la constante modificación de las playas. Se trata de sistemas complejos, con multitud de variables interviniendo y que, por tanto, requieren seguir siendo estudiados para su comprensión.

El interés alrededor de las costas viene también por el hecho de que a su alrededor se ha asentado gran parte de la vida del ser humano. De hecho, a lo largo del siglo XX, los espacios de playa se han ido convirtiendo en un recurso socioeconómico básico dado su uso para el ocio, recreo y disfrute, hecho que ha llevado al desarrollo de un importante flujo de interrelaciones sociales y económicas.

Por tanto, son varios los puntos de vista que confluyen en el interés por los espacios de playa y su monitorización, sea para la profundización en el conocimiento de las variables que intervienen en ellos y cómo se relacionan, sea por el interés en mantener ciertos espacios a lo largo del tiempo y poder seguir haciendo un uso sostenible.

Para poder realizar los estudios necesarios (dado que son muchos y complejos los procesos y modalidades de cambio los que entran en juego en los cambios morfológicos) se debería comenzar por fijar una escala de análisis (Pardo-Pascual y Sanjaume, 2001). Así se debería fijar la extensión geográfica del estudio, concretar el lapso de tiempo a analizar y el nivel de detalle. Por ejemplo, es probable que en el análisis de cambios repentinos no sea necesario contemplar cambios a largo plazo pero, tal vez, sí sea necesario tener en cuenta procesos que se repitan estacionalmente en el periodo de un año. Sin embargo, en procesos extendidos en el tiempo, como pueda ser durante decenas de años, puede ser necesario distinguir entre procesos a más largo plazo (generalmente relacionados con el balance sedimentario local), procesos estacionales

(relacionados con alteraciones estacionales en el régimen de vientos y oleajes) y aquellos repentinos o puntuales (relacionados con el impacto de los temporales).

Para medir y caracterizar estos distintos tipos de cambios conviene establecer una metodología de análisis y, primeramente, decidir qué información es necesario adquirir. Para la monitorización costera existen distintas fuentes de información:

- Las técnicas GPS-RTK presentan gran versatilidad. Mediante estas técnicas es posible realizar perfiles en las zonas emergidas, tomar nubes de puntos para generar modelos o bien cartografiar la línea de costa. Este método tiene por ventaja su simplicidad. Por ejemplo, puede instalarse equipos GPS-RTK sobre vehículos de cuatro ruedas (Pardo-Pascual et al., 2005), técnica ya empleada en algunos estudios (Pardo-Pascual et al., 2011; Psuty y Silvera, 2011).
- Análisis de datos LiDAR (Light Detection and Ranging) aerotransportado (Krabill, et al., 2000; Sallenger, et al, 2003; Robertson et al., 2007). Se trata de una alternativa, a priori, eficiente, rápida y precisa para la caracterización de la playa. A partir de la nube de puntos es posible realizar perfiles de las zonas emergidas, generar MDTs para cálculos volumétricos o trazar líneas de costa bajo algún criterio altimétrico. Ahora bien, siendo una tecnología relativamente nueva y cara, difícilmente se puede contar con mediciones de hace décadas ni con un nivel de repetitividad demasiado elevado, sobre todo para poder hacer análisis de medio y largo plazo.
- Las técnicas de video-monitorización pueden resolver parcialmente las limitaciones de repetitividad proporcionando imágenes de forma continua de una misma área (Silva et al., 2009; Sancho-García et al. 2011). Se trata del análisis de imágenes tomadas con videocámaras posicionadas, normalmente, en azoteas. La principal ventaja de este método es la alta periodicidad mientras que la principal limitación es lo reducido del espacio fotografiable. Además, al contrario que el LiDAR o de los levantamientos con técnicas GNSS, sólo permite detectar cambios bidimensionales como puede ser el ancho de playa.
- Técnicas de análisis de imágenes. Se trata de un campo muy amplio. Los vuelos fotogramétricos permiten obtener tridimensionalidad con que, al igual que con LiDAR, generar modelos, perfiles, etc. Sin embargo, el uso más extendido de las imágenes aéreas, en lo que a monitorización de costas se refiere, es para la fotointerpretación de las líneas de costa. Dado que resulta sencillo determinar la orilla detectada en un instante dado ha sido la fuente de información más ampliamente utilizada desde hace décadas (McCurdy, 1950; Stafford, 1971; MOPU, 1979; Leatherman, 1983; Smith y Zarrillo, 1990; Pardo-Pascual, 1991; Thieler y Danforth, 1994) resultando especialmente útil en áreas micromareales (MOPU, 1979; Pardo-Pascual, 1991; López-García y Pardo-Pascual, 1995). Un uso equivalente es posible a partir de imágenes de satélites. En todos estos casos interviene la resolución de las imágenes y la metodología de obtención de las líneas de costa. En este último aspecto, los vuelos aéreos con banda infrarroja y los

satélites multiespectrales permiten la proliferación de métodos automáticos y es precisamente donde se enmarca esta tesis.

La obtención de la línea de costa a partir de imágenes aéreas y fotointerpretación presenta limitaciones dependiendo de la cantidad de imágenes disponibles y su periodicidad que, aunque ha aumentado recientemente, a veces no es más que una imagen por año. De ahí la importancia de las imágenes tomadas por satélite puesto que pueden solventar estas limitaciones. Si a ello se añade el coste de adquirir cada imagen, se vuelve a encontrar motivos para emplear imágenes Landsat TM/ETM+/OLI.

5.3 Planteamiento del capítulo

Habiendo aclarado la importancia de los espacios de playas arenosas, las principales metodologías existentes y, especialmente, el papel de la línea de costa como indicador de la evolución de tales playas, se va a exponer dos estudios concretos. Se distinguen entre sí en la naturaleza de la evolución que analizan.

En la primera parte, más amplia, se analizará el impacto de una serie de seis temporales (de distintas magnitudes) sobre diferentes playas con características geomórficas y condicionantes de suministro sedimentario diferentes y la forma en que se ha producido el proceso de recuperación de la playa tras estas situaciones de alta energía partiendo de doce líneas de costa obtenidas por el procedimiento propuesto en los capítulos anteriores desde imágenes Landsat 5 y 7 registradas entre noviembre de 2001 y diciembre de 2002. El estudio se centra en las playas de la parte meridional del golfo de Valencia, cubriendo un segmento costero de más de 100 km de longitud.

La segunda parte del capítulo se centra en el estudio de la tendencia a medio plazo (décadas) sobre un segmento costero más detallado como son los términos municipales de Sagunt y Canet d'En Berenguer, en la parte central del golfo de Valencia. En este caso, se pretende reconocer tanto la tendencia evolutiva a lo largo de estos casi 30 años con registros de imágenes Landsat, si se han producido cambios en la dinámica evolutiva a lo largo del periodo estudiado y su variabilidad intranual.

Cada uno de estos bloques proviene de las siguientes publicaciones y las figuras que aparecen corresponden a cada una de ellas respectivamente:

- Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L.A., Palomar-Vázquez, J., Rodrigo-Aleman, R. (2014). Evaluation of storm impact on sandy beaches of the Gulf of Valencia using Landsat imagery. *Geomorphology*, 214, pp. 334-401
- Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J., Mislata-Cabo, R., Roselló-Soto, R. (2012b). Caracterización de la evolución reciente de las playas de Sagunt y Canet d'En Berenguer a partir de imágenes Landsat. *Anales del Instituto de Estudios Saguntinos*, 1, pp. 55-79.

5.4. Evaluación del impacto de una serie de temporales costeros sobre playas arenosas en el golfo de Valencia

El impacto de los temporales en las playas produce diversas respuestas morfodinámicas que modifican significativamente el paisaje costero (Jiménez et al., 2012). La magnitud de estos procesos y sus cambios resultantes están controlados por la combinación de las características de los temporales y la geomorfología costera (Morton, 2002). El tipo de respuesta es variable dependiendo de las características de la playa, incluso en zonas aparentemente similares. El impacto de temporales particularmente agresivos puede estar relacionado con la actividad humana (Leatherman, 1984; Rosati y Ebersole, 1997; Campbell y Jenkins, 2003; Bender y Dean, 2003) o darse sin que la acción humana sea relevante (Dolan et al., 1978; Guillén et al., 1999; Schwab et al., 2000; Stive et al., 2002). Dado que estos sucesos implican a menudo un daño considerable sobre las zonas costeras, existe un interés general en investigar los factores que determinan su impacto.

Para su estudio, es necesario una adecuada descripción de los temporales, y eso implica determinar la altura y energía de las olas (Sénéchal et al., 2009) así como el nivel máximo del agua (Sallenger, 2000). En ocasiones, cuando no se disponen de datos registrados directamente por las boyas oceanográficas -ya sea por no haber datos cercanos o porque se analizan periodos históricos sin registros directos- se han de utilizar modelos de análisis retrospectivos (*hindcast modelling*) basados en datos meteorológicos que posteriormente pueden extenderse a lo largo del tiempo y aplicarse en zonas de donde no se disponen medidas directas (Rangel-Buitrago y Anfuso, 2011; Jiménez et al., 2012; Gervais et al., 2012; Del Río, et al., 2012). Además de datos sobre el temporal, se requiere hacer una correcta caracterización de su impacto morfológico, si bien no hay un único método para hacer esto. De hecho, existen al menos dos grandes formas de caracterizar el impacto:

(i) Por un lado, aplicando modelos teóricos de erosión del perfil de playa como el SBEACH (Larson y Kraus, 1989; Wise et al., 1996; Mendoza y Jiménez, 2008), X-BEACH (Roelvink et al., 2009; Plomaritis et al., 2011), GEOSTORM (Almeida et al., 2011) con los que se estima el volumen perdido de playa, retroceso de la línea de costa y/o la inundación máxima durante el temporal. Lógicamente, para aplicar estos modelos se necesita disponer de información parametrizada tanto de las características del temporal como de la morfología de la playa en la que se aplica y, las más de las veces, se evalúa su nivel de credibilidad con mediciones reales, por ejemplo mediante la realización de perfiles de la playa emergida y sumergida (Trifonova et al., 2012; Armaroli et al., 2012) o mediante modelos digitales del terreno obtenidos de las zonas emergidas y sumergidas de la playa (Gervais et al., 2012).

(ii) La segunda manera de evaluar el impacto de un temporal consiste en medir los cambios morfológicos en segmentos costeros. Para ello se han de monitorizar los cambios entre antes y después del temporal cuantificando y cartografiando las pérdidas de playa y la recuperación subsiguiente (McLean y Shen, 2006). Se han empleado diversas técnicas para ello como, por ejemplo, la realización de perfiles topo-batimétricos (Thom y Hall, 1991; Morton, et al., 2002). Esta técnica es efectiva para la estimación del cambio de volumen, pero su uso es limitado por su alto coste económico. Cuando se aplica a extensos segmentos costeros la distribución de los perfiles tiende a separarse para reducir costes y, en consecuencia, es más difícil registrar las variaciones a lo largo de la costa (Robertson et al., 2007).

Una alternativa más económica es registrar de forma sucesiva la posición de la línea de costa (Dolan et al., 1978; Leatherman, 1983; Morton, 1991; Moore, 2000). Tradicionalmente, la línea de costa está definida por la línea instantánea de agua o por la línea de mojado. Sin embargo, los indicadores de línea de costa pueden llegar a ser muchos y muy variados (Boak y Turner, 2005). Una definición bastante extendida de línea de costa es la denominada *datum-based shoreline*, o línea de costa basada en el datum; ésta se define como la intersección del terreno con un valor de altitud específico que suele definirse, a su vez, como MHW (*mean high water*), altitud media de una zona a lo largo de un periodo de tiempo y cuyos valores suelen provenir de registros de mareógrafos. List et al. (2006) ponen de manifiesto que estas líneas *datum-based shorelines* son de mayor utilidad que las líneas fotointerpretadas dado que son líneas que sólo varían a razón de la posición de los sedimentos. Farris y List (2007) concluyeron que el uso de los cambios en estas líneas de costa es una buena aproximación para medir el cambio de volumen de playa emergida; este método tiene por ventaja su simplicidad dado que puede llevarse a cabo mediante sensores GPS-RTK instalados sobre vehículos de 4 ruedas (Pardo-Pascual et al., 2005), técnica ya empleada en algunos estudios (Pardo-Pascual et al., 2011; Psuty y Silvera, 2011). No obstante, otros autores enfatizan que la línea de costa no siempre es un buen indicador del volumen de playa emergida. Concretamente, Robertson et al. (2007) estudió el impacto del huracán Ivan (septiembre de 2004) y la recuperación posterior a lo largo de 25 Km cerca de la ciudad de Panamá city (Florida); en este estudio comparó las variaciones en el ancho de playa y el cambio de volumen de playa emergida. El retroceso de la línea de costa medido tras el huracán fue de -16,5 m y la pérdida de volumen fue de -30,9 m³/m. Veinte días después, la línea de costa había recuperado 10,1 m mientras que el volumen recuperado fue únicamente de 2,7 m³/m. Una nueva medida, transcurridos 74 días, mostró que la línea de costa había recuperado 5,1 m (respecto a la medida de septiembre) y el volumen recuperado fue de 8,4 m³/m. Por lo tanto, concluyen que el uso de la línea de costa de sólo una fecha no es suficiente para caracterizar el proceso de recuperación de la costa.

Una alternativa a priori eficiente, rápida y precisa para la caracterización de la playa es el uso de LiDAR (Light Detection and Ranging) aerotransportado (Krabill, et al., 2000; Sallenger, et al, 2003; Robertson et al., 2007). Ahora bien, la escasa frecuencia de datos a lo largo del tiempo es una limitación para su uso. Además, suele ser difícil obtener medidas en pleno temporal, así como disponer de suficientes medidas post-temporal

para monitorizar adecuadamente la recuperación de la playa. Las técnicas de video-monitorización pueden resolver parcialmente estas limitaciones proporcionando imágenes de forma continua de una misma área (Silva et al., 2009; Sancho-García et al. 2011). Estas técnicas pueden aplicarse sólo a zonas muy limitadas y sólo permiten detectar cambios bidimensionales, como puede ser el ancho de playa.

Todas las aproximaciones a la monitorización de la costa –basadas en medidas en campo, GPS, LiDAR o video monitorización- proporcionan información útil y precisa pero no son aplicables de forma práctica para registrar la respuesta y recuperación de la playa en grandes extensiones de costa debido a su alto coste. En este apartado, se propone el empleo de líneas de costa obtenidas de imágenes Landsat cuyo desarrollo ha sido expuesto en los capítulos anteriores. Con ellas se evaluará el impacto de seis temporales a lo largo de un amplio segmento costero (100km) y el proceso de recuperación de las playas.

Dos son los objetivos del presente estudio: el primero, valorar la capacidad de estudiar el impacto de los temporales sobre espacios de playa así como su posterior recuperación, todo ello mediante el estudio de líneas de costa obtenidas de escenas Landsat. Para ello se trata de discernir sobre las líneas de costa obtenidas, los diferentes comportamientos y respuestas, incluyendo en la interpretación los factores que controlan los procesos geomorfológicos. El segundo objetivo, se centrará en mejorar el conocimiento de la respuesta de los espacios de playa ante seis temporales concretos que tuvieron lugar en el golfo de Valencia entre seis de noviembre de 2002 y mayo de 2002.

5.4.1. Área de estudio y datos

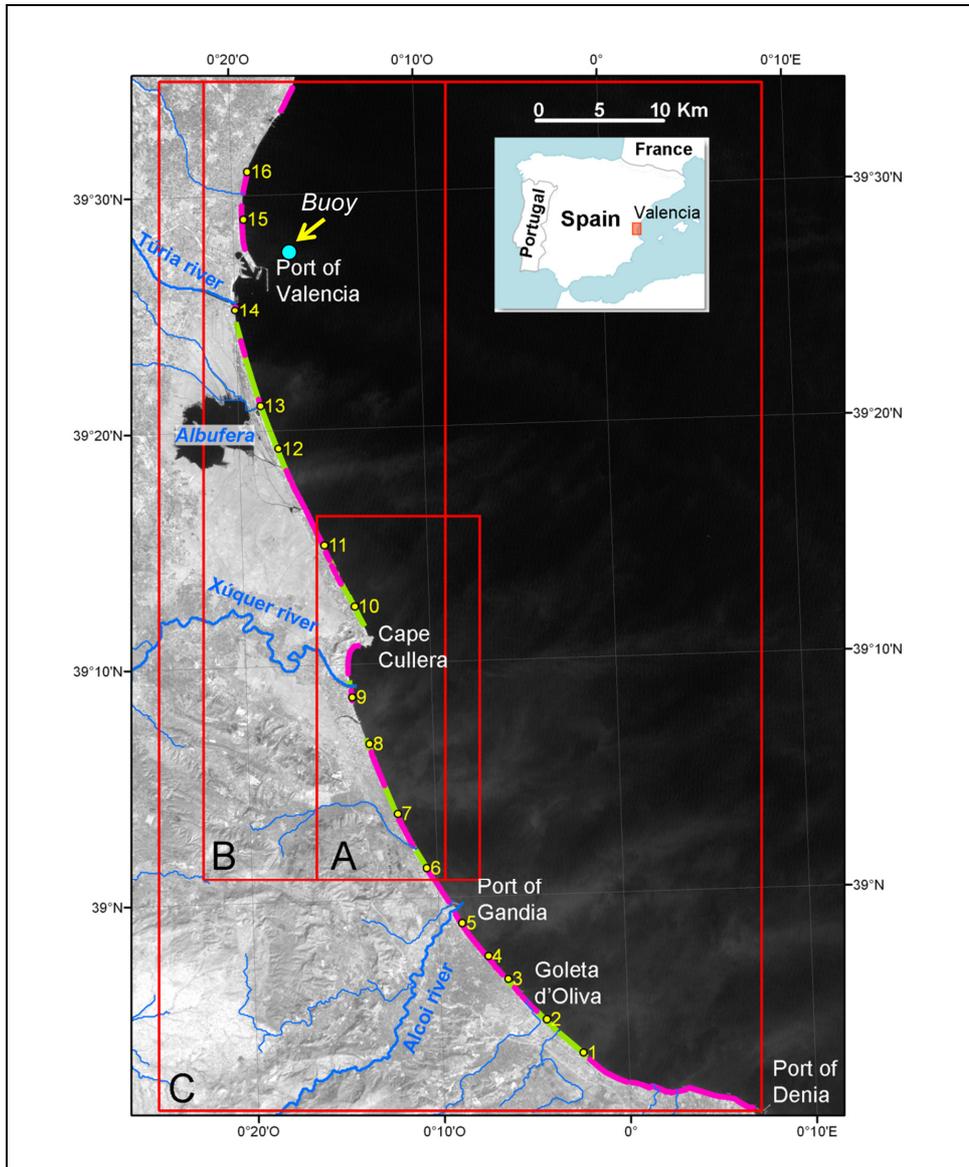


Figura 82. Zonas de estudio. En verde se muestran las playas con frentes dunares cercanos. En rosa se muestran playas circundadas por zonas construidas. La numeración indica la ubicación de los perfiles sumergidos tomados en diciembre de 2007. A, B y C indican las zonas cubiertas por diferentes imágenes Landsat (Tabla 35).

El área de estudio está localizada en la zona central y meridional del Golfo de Valencia (Figura 82), con una extensión de unos 100 Km a lo largo de la costa mediterránea española. Este sector se caracteriza por mareas astronómicas pequeñas con rangos de 0,18 m si bien debido a los factores meteorológicos los cambios en el nivel del mar pueden ser sustancialmente mayores, de hecho en 2009 el cambio máximo en el nivel del mar alcanzó los 0,73 m según REDMAR (2009). Los registros del oleaje procede de una boya ubicada fuera del puerto de Valencia (39 ° 46 'N, 0 ° 28'W) anclada a una profundidad de 21 m. En la zona predominan las olas de escasa altura y con períodos también cortos: Para el período de 1985 a 2005 la altura media de ola fue de 0,78 m y tuvo un período de pico medio de 5,97 segundos (http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/redes_de_medida/index.html).

Durante los temporales se dieron olas mucho mayores, asociadas a las bajas presiones asociadas al flujo zonal de las latitudes medias y reactivadas en el Mediterráneo. Los mayores temporales que afectan la costa valenciana proceden de bajas presiones centradas en el Golfo de León, si bien también existen fuertes temporales con el centro de la baja presión situado en el mar de Alborán, cerca de Gibraltar (Pardo-Pascual, 1991). La dirección del transporte longitudinal del golfo de Valencia tiene tendencia de norte a sur. Sin embargo, debido a la orientación de la costa y el ángulo con que se aproximan las olas, el transporte hacia el sur es más efectivo cuando la costa está orientada hacia el noreste. Por lo tanto, el transporte longitudinal costero hacia el sur es más fuerte al norte del puerto de Valencia y en un pequeño segmento al sur del cabo de Cullera y hasta la desembocadura del río Xúquer. Asociado con el cambio de orientación de la costa al sur de la zona de estudio, el transporte longitudinal prácticamente desaparece a partir de la Goleta de Oliva (Figura 82).

Desde el punto de vista geomorfológico, este sector está dominado por una gran variedad de formaciones: abanicos aluviales, llanuras de inundación, dunas y playas. A lo largo del centro y sur del golfo de Valencia predominan las playas arenosas con esporádicas playas formadas por grava y cantos (Sanjaume, 1985). La formación de restingas ha cerrado albuferas que se encuentran como un continuo a lo largo de la costa: la mayoría son zonas de marjal, tan sólo la Albufera de Valencia, al sur de esta ciudad, puede considerarse una albufera activa, si bien ha sufrido una reducción considerable de su superficie durante el último siglo como consecuencia de la acción del hombre (Sanjaume, 1985).

El segmento costero analizado en este estudio se puede dividir en 3 tipos: (i) playas arenosas, (ii) costas estabilizadas artificialmente, y (iii) un pequeño acantilado natural cerca del cabo de Cullera. Las playas arenosas ocupan la mayor parte de la zona de estudio (80% de la zona estudiada). Aproximadamente 50 Km de las playas tienen edificios y construcciones cercanas a la línea de costa –siendo principalmente residencias de verano-, y el resto (30 km) disponen dunas paralelas a la línea de costa (Figura 82). La mayor extensión dunar se encuentra en el campo de dunas de la Devesa del Saler y

se extiende sobre 850 hectáreas (Sanjaume y Pardo-Pascual 2011a). Entre Xeraco y Gandía se encuentran dos alineaciones dunares de menores dimensiones a la del Saler.

La parte sumergida de la playa presenta diferencias significativas relacionadas con la pendiente y la posible existencia de barras sumergidas. Se ha analizado un conjunto de perfiles sumergidos realizados por la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar de Valencia durante diciembre de 2007, calculándose la pendiente entre la línea de costa y la isobata ubicada a 5 m de profundidad (Figura 83). Las pendientes suaves se dan en las playas de comportamiento acumulativo cerca de los puertos de Valencia o Gandia, así como al norte del cabo de Cullera. Inmediatamente al sur de estas trampas sedimentarias (artificiales o naturales) se dan las mayores erosiones (como en la playa de Pinedo, Estany Gran, Brosquil) así como pendientes más pronunciadas.

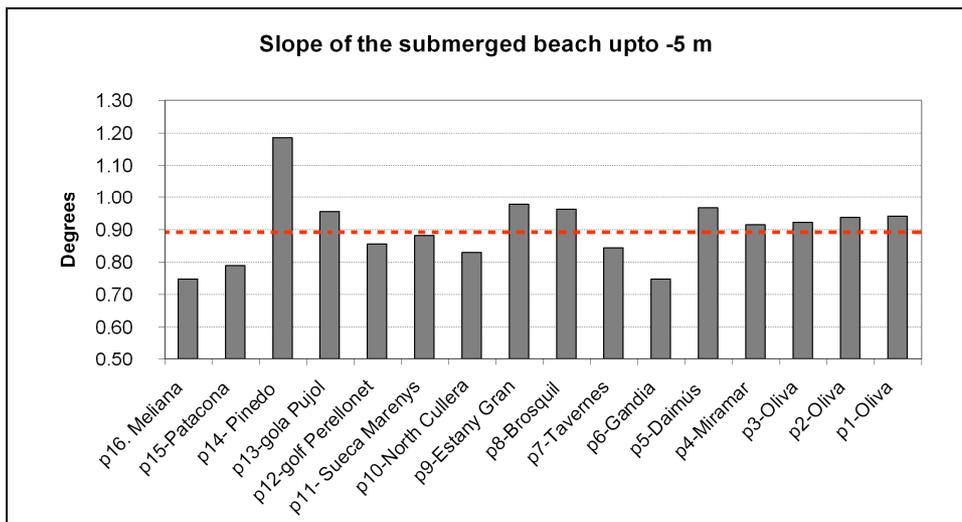


Figura 83. Pendientes observadas en cada perfil entre las cotas 0 y -5 m en diferentes zonas estudiadas en 2007. La línea roja indica la pendiente media. En la Figura 82 se observa la localización de estos perfiles.

5.4.2. Imágenes analizadas

Para este estudio ha sido necesario recopilar las imágenes Landsat disponibles en el Servicio Geológico de los EEUU (USGS), libres de nubes y catalogadas como producto L1T (referente al nivel de procesado de las propias imágenes, ver capítulo V). En total se han empleado 12 imágenes (Tabla 35) aunque sólo 7 cubren completamente la zona (área C de la Figura 82), otras 4 cubren la parte norte –de unos 66 Km- (área B de la Figura 82) y una de ellas cubre la zona A, de unos 30 km de longitud en la parte central.

Tabla 35. Fecha de adquisición de las imágenes Landsat del estudio, zona (A, B o C, ver Figura 82), el nivel del mar en el momento de registro de la imagen. Información relacionada con los temporales: duración (horas), máxima altura significativa (*Hs*), máxima altura de ola registrada (*Hm*), periodo de pico máximo (*Tp*), niveles medio y máximo del mar, marea meteorológica media y máxima durante el temporal.

Imagen			Durante los temporales							
Fecha	Zona	Nivel del mar (m)	Duración(h)	Hs(m)	Hmax(m)	Tp(m)	Nivel medio del mar (m)	Max. nivel del mar (m)	Marea meteorológica media (m)	Máxima marea meteorológica (m)
08/11/2001	C	-0,02								
10/11/2001			49	4,3	8	11,6	0,22	0,35	0,2	0,32
14/11/2001			42	3,5	6,6	11,6	0,32	0,48	0,21	0,5
14/12/2001			33	3,2	5	11,1	0,03	0,14	0,04	0,1
26/12/2001	C	-0,04								
19/02/2002	B	-0,18								
28/03/2002			39	3,4	7,1	8,1	0,08	0,13	-0,09	0,06
02/04/2002			17	2,8	5,6	8	0,06	0,16	0,01	0,06
17/04/2002	C	-0,03								
24/04/2002	B	-0,15								
06/05/2002			41	3	5,6	8,1	0,16	0,27	0,043	0,12
19/05/2002	C	-0,16								
26/05/2002	B	-0,04								
28/06/2002	C	-0,07								
29/07/2002	A	0,01								
08/09/2002	C	0,14								
10/26/2002	C	0,08								
12/29/2002	B	-0,08								

5.4.3. Características de los temporales

Las características de los temporales fueron obtenidas por los datos procedentes de la boya situada cerca del puerto de Valencia (Figura 82). En este contexto se entiende un temporal según la definición de Jiménez et al (2012) para la costa de Cataluña: aquel estado del mar en que se exceda un umbral de altura significativa de ola (H_s) de unos 2 m para un periodo mínimo de 6 horas. Este valor ha sido recomendado por Mendoza y Jiménez (2008) para definir un temporal, en términos de su impacto morfodinámico, como las condiciones mínimas necesarias para afectar al perfil de las playas de forma significativa. Durante los 13 meses analizados hubo un total de 6 temporales: dos de ellos en noviembre de 2001, uno en diciembre de 2001, uno en febrero de 2002, uno en marzo de 2002 y uno en mayo de 2002. El más fuerte de estos episodios (Figura 84) fue el primero, entre el 10 y el 11 de noviembre, que alcanzó los 4,4 m de altura significativa con una altura máxima de 8 m. Otro temporal comenzó el 14 de noviembre y dos días después alcanzó los 3,5 m de altura significativa. El resto de episodios no alcanzaron estos valores.

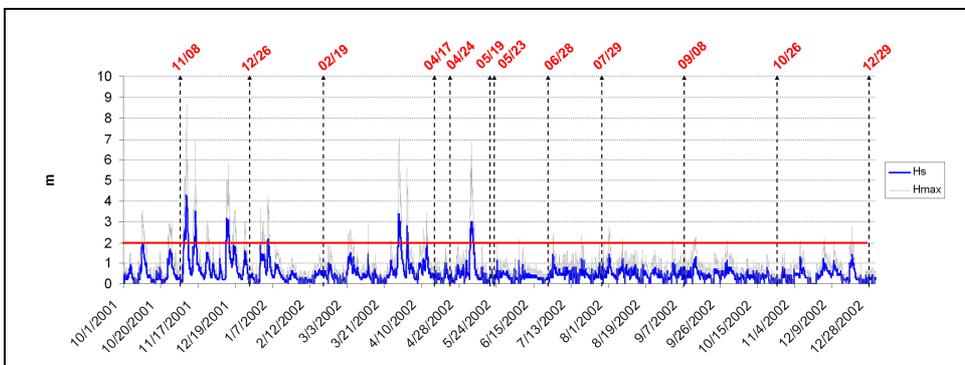


Figura 84. Altura significativa de ola (H_s) y altura máxima de ola (en gris) durante el periodo de estudio, de octubre de 2001 a diciembre de 2002. La fecha de adquisición de cada imagen Landsat en rojo (mes/día/año). Se ha trazado en rojo la altura significativa igual a 2 m, valor recomendado por Mendoza y Jiménez para definir un temporal.

Respecto a las imágenes analizadas:

La primera imagen (8/11/2001) fue registrada el 8 de noviembre, 2 días antes del comienzo del primer temporal y de la que se ha obtenido la información de referencia pre-temporal. Las siguientes 11 imágenes se adquirieron entre diciembre de 2001 y diciembre de 2002 (ver Figura 84 y Tabla 35).

Como se mencionó anteriormente, el rango mareal de esta zona de estudio concreta es pequeño. La Figura 85 muestra la variación de la posición del nivel del mar medida en la fecha y hora del registro de cada imagen Landsat. También se adjunta el nivel máximo de agua durante cada temporal. Esta información es útil para el análisis de cambios en la

línea de costa dado que pequeñas variaciones en el nivel del mar pueden implicar cambios horizontales significativos en la línea de costa cuando la pendiente es muy suave

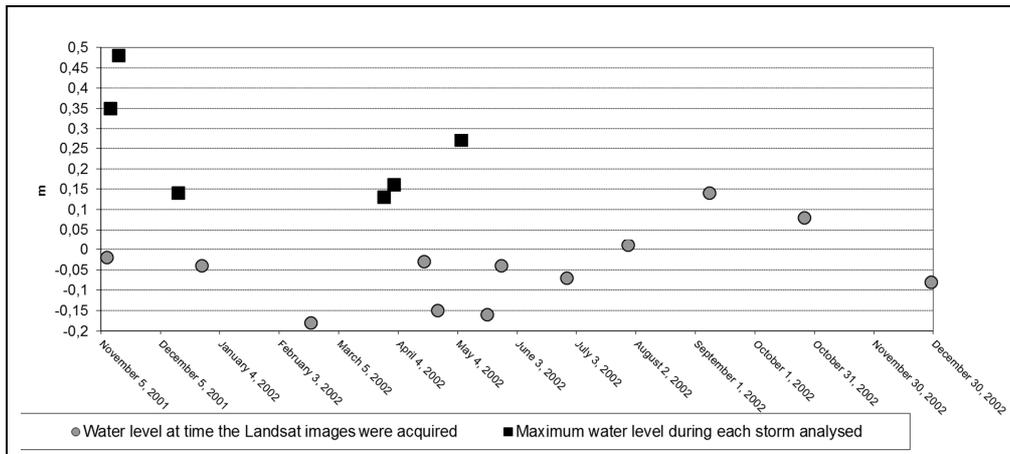


Figura 85. Cambio del nivel del mar respecto al de la fecha de adquisición de la primera imagen Landsat, y máximo nivel del mar observado en cada temporal.

5.4.4. Metodología

En la Figura 86 se muestra el flujo de trabajo global. En él se pueden observar 3 pasos: **(1)** La obtención de la línea de costa propia de cada imagen según la metodología propuesta en esta tesis. **(2)** Preparación y procesado de las líneas de costa mediante una herramienta analítica creada expresamente, el SDL (Shoreline delineation Software). **(3)** Obtención de estadísticos evolutivos de las líneas de costa mediante DSAS, *Digital Shoreline Analysis System*, (Thieler et al, 2009).

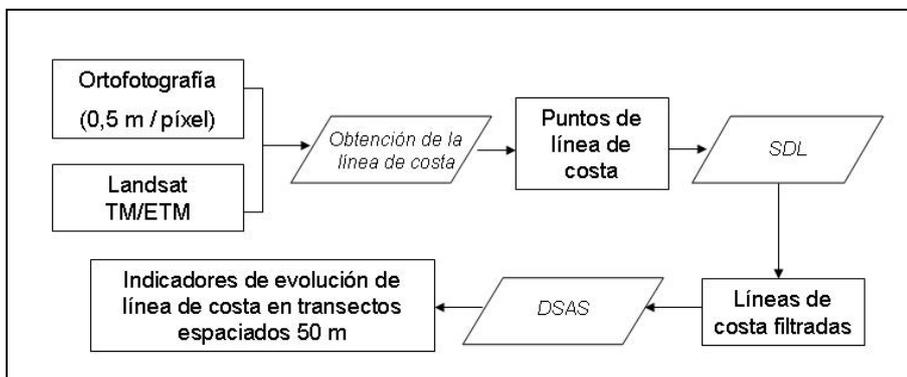


Figura 86. Flujo de trabajo empleado para la extracción y procesado de las líneas de costa.

(1) El proceso de obtención de las líneas de costa de las imágenes Landsat sigue la metodología expuesta en esta tesis. Por tanto, dado un conjunto de imágenes Landsat, se han extraído sus respectivas líneas de costa, han sido georreferenciadas respecto a una ortofotografía de referencia y han sido corregidas del efecto radiométrico que fue descubierto a lo largo de los procesos de calibración de la metodología.

(2) Mediante la herramienta SDL (*Shoreline Delineation Software*), desarrollada en el grupo de investigación CGAT se pretende preparar las líneas para los procesos de análisis. Ello implica filtrar los puntos potencialmente erróneos de línea de costa obtenidos y convertirlos a formato lineal. Tras el proceso de obtención de las líneas de costa quedan puntos residuales de falsos gradientes o zonas que puedan ser lagunas interiores y que no sean de interés y que, por tanto, habrán de ser filtrados. En la Figura 87 se muestran los tres pasos del tratamiento. **a)** A partir de una línea aproximada de apoyo, se analiza un área de influencia a su alrededor y se elimina todo punto que haya podido quedar excesivamente lejos y que, evidentemente, no pertenezca a la línea de interés. **b)** Con los puntos no eliminados se analiza que el ángulo que forma la alineación de cada punto con sus puntos anterior y posterior no sea demasiado pequeño dado que se parte de la hipótesis de que la línea de costa es eminentemente rectilínea. Finalmente, **c)** con objeto de evitar cambios bruscos en la tendencia de la línea, se realiza un suavizado (Figura 87. c). El proceso completo es automático.

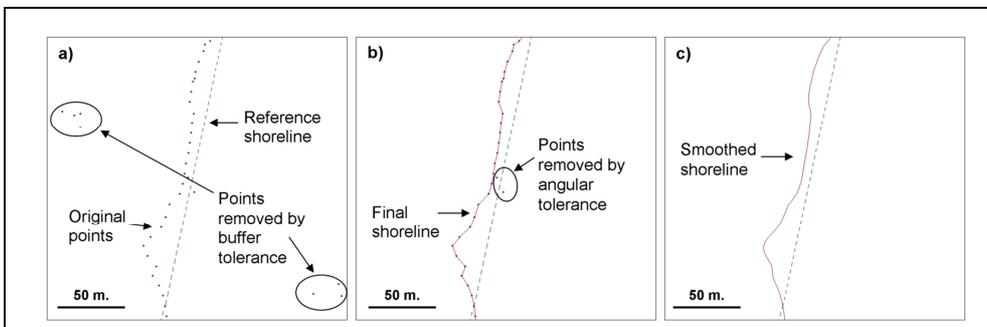


Figura 87. Principales pasos de la herramienta SDL: a) Eliminación de puntos anómalos, b) unión de puntos bajo criterios angulares y de distancia; c) suavizado lineal de la línea de costa

(3) Una vez se ha dispuesto de las líneas en el formato adecuado se ha empleado para el análisis de los cambios el software DSAS. Mediante DSAS se obtienen mediciones automáticas para el cambio de posición en la línea de costa en función de la fecha asociada a cada línea. Esta herramienta analiza la intersección de las líneas de costa con sucesivos transectos (líneas virtuales perpendiculares a la línea a modo de perfiles), en este caso separados 50 m.

Finalmente, de forma paralela se ha procesado un conjunto de datos LiDAR tomados en agosto de 2009 y se ha obtenido la pendiente específica de la playa en cada uno de los transectos. Para ello se ha tomado la altitud correspondiente a cada línea de costa y la altitud correspondiente en cada transecto a lo largo del transecto 5 m tierra adentro. La decisión de elegir esta distancia se tomó tras múltiples pruebas para evaluar la relación

entre la variabilidad intranual de las líneas de costa y la pendiente medida de distintas formas (Mislata-Cabo y Roselló-Soto, 2012). Con estos dos datos altitudinales se han estimado las respectivas pendientes.

5.4.5. Resultados

Todas las líneas de costa han sido comparadas en los sucesivos transectos midiendo las diferencias con la línea pre-temporales de 8 de noviembre de 2001.

En un análisis inicial, se han estimado los cambios medios detectados durante el periodo usando todos los datos registrados por las 8 líneas de costa que cubren el área completa (área C de la Figura 82). La Figura 88 muestra que el 26 de diciembre la línea de costa había retrocedido un promedio de 10 m. La línea de costa del 19 de abril de 2002 sigue una tendencia negativa. El mayor retroceso fue registrado el 26 de mayo de 2002, justo después de la serie de cinco temporales. Posteriormente, como consecuencia de la mejora de las condiciones de oleaje, el ancho de la playa se recupera aunque sin alcanzar las dimensiones originales (previas a los temporales).

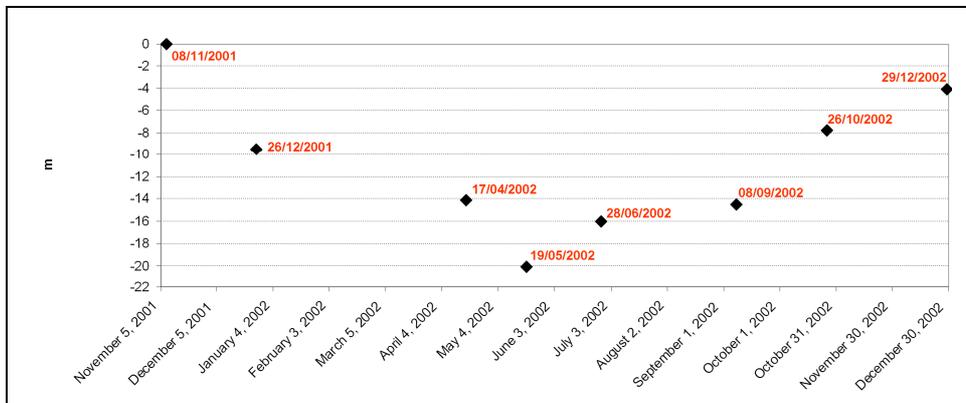


Figura 88. Variación media respecto al 8 de noviembre de 2001 en el global del área de estudio para las respectivas fechas de cada imagen Landsat.

Como segundo análisis se han desglosado en detalle ciertas particularidades observadas a lo largo de los 100 Km de costa analizados. Para poder realizar un estudio más focalizado se ha dividido el territorio en 25 zonas de diferentes dimensiones (Figura 89). A priori, cada zona se define como un segmento de 5 Km de longitud aunque diversas zonas han sido modificadas para adaptarse a las inflexiones que, a lo largo de la costa, pueden afectar a la dinámica costera.

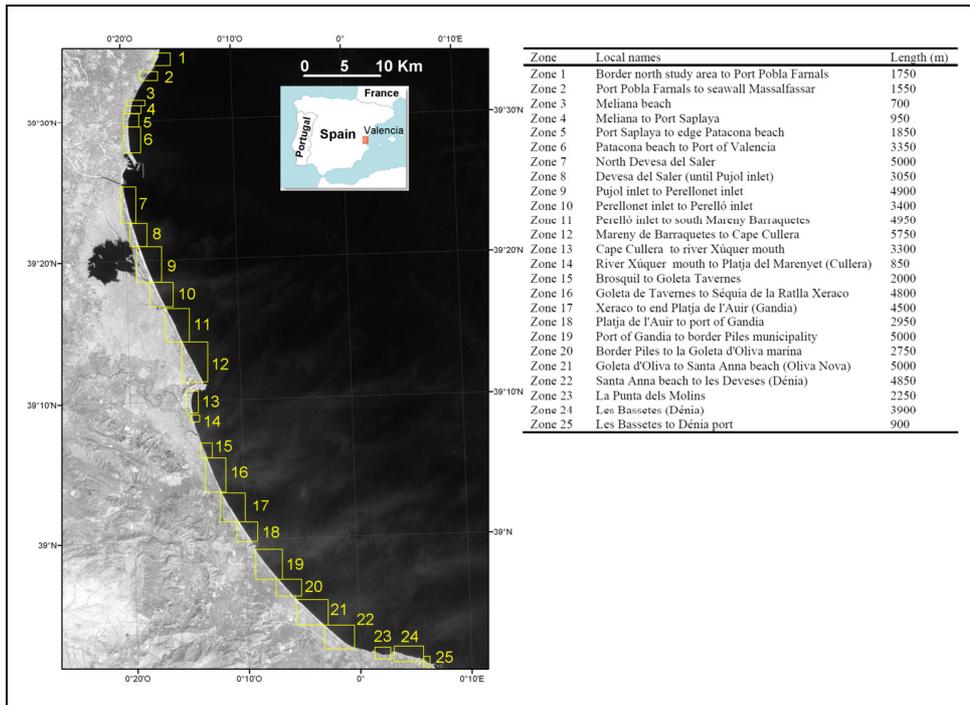


Figura 89. Distribución de las zonas de estudio, nombres particulares y longitudes de costa respectivas.

Para cada zona, se ha calculado la posición de cada línea de costa respecto al 8 de noviembre de 2001. Así, para cada fecha y por cada transecto se dispone del cambio observado respecto a esta fecha. Esta medida de cambio a lo largo de cada zona es la información empleada para su caracterización y permite un equilibrio entre la un análisis excesivamente general (si se tomara toda la zona de estudio) y un exceso de focalización (si se analizara cada perfil de forma independiente).

En la Figura 90 se presenta un gráfico Hovmöller en el que se muestran las variaciones en la posición de la línea de costa a lo largo de la zona estudiada (eje Y definido por la latitud) y a lo largo del periodo estudiado (fechas en el eje X). Se ha indicado la posición de las 25 zonas estudiadas, si bien las tres últimas (23-25), al seguir la costa una orientación este-oeste (ver Figura 89) quedan peor representadas.

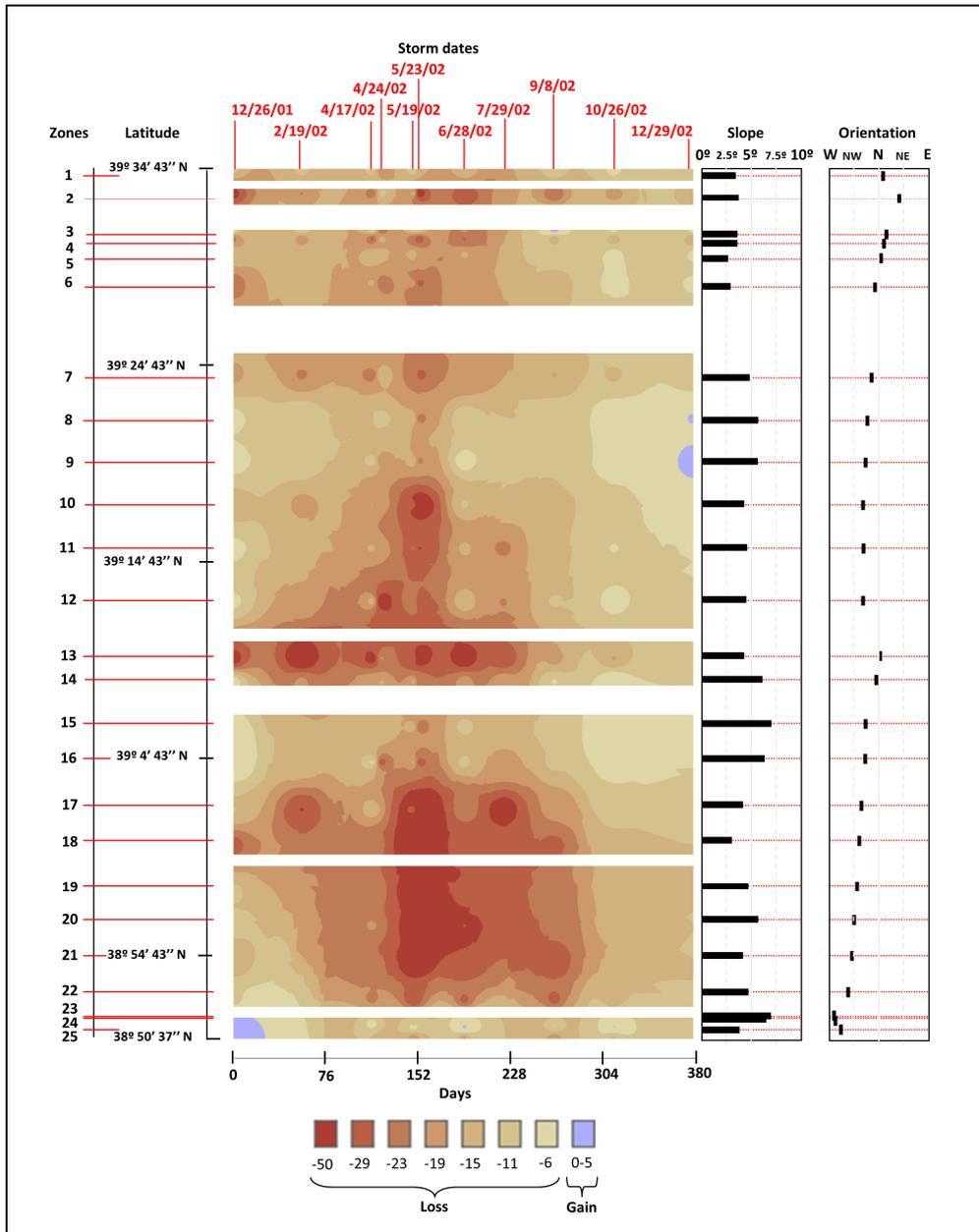


Figura 90. Gráfico Hovmoeller. Indica las variaciones para cada zona (separadas según su latitud) a lo largo del periodo de estudio. A ambos lados: la pendiente y orientación medias de cada sector.

Se presentan dos columnas a la derecha el gráfico que expresan la pendiente media y la orientación media de la costa. Respecto a la orientación, se ha tomado el azimuth medio de los diferentes segmentos de línea que quedan dentro de cada zona. Respecto a la pendiente, ha sido calculada a partir del levantamiento LiDAR realizado en agosto de

2009. Se es consciente de la limitación que implica asociar una pendiente calculada a partir de un modelo puntual de agosto de 2009 y que las líneas de costa correspondan a la situación de las playas en 2001 y 2002. No obstante, a pesar de que la variabilidad natural de las zonas y las aportaciones artificiales de arena han podido causar diferencias sustanciales entre la pendiente de 2009 y aquella que hubiera en la época de los temporales, la caracterización global ha sido satisfactoria. Como excepción, las zonas 1 y 6 sufrieron varias aportaciones de arena entre 2002 y 2009 por lo que no han sido empleadas para los análisis de relación entre cambio de línea de costa y pendiente.

5.4.6. Discusión

Los dos objetivos de este capítulo (evaluar la utilidad de las imágenes Landsat para análisis costeros y el análisis del impacto de los temporales acaecido entre 2001 y 2002 en el Golfo de Valencia) se encuentran interrelacionados puesto que, para el análisis geomorfológico, las líneas Landsat han de arrojar información lógica e interpretable.

Es importante revisar las ventajas y desventajas de la metodología propuesta para la caracterización de temporales en espacios de playa, así como su proceso de recuperación. ¿Son los resultados obtenidos relevantes para evaluar el impacto de los temporales costeros? ¿En qué medida? Para responder a estas cuestiones es necesario relacionar los resultados con las propiedades de las playas y los temporales que las afectaron.

5.4.6.1. Principales factores que intervienen en los cambios morfológicos

La evolución global de la zona estudiada (Figura 88) muestra que el retroceso de las líneas de costa se relaciona más con el efecto acumulado de los diversos temporales que con la energía de las olas o duración de los temporales de forma puntual. Sin embargo, tras hacer un análisis pormenorizado (Figura 90) es posible remarcar algunos aspectos sobre el comportamiento morfodinámico:

- i. Influencia de las condiciones morfodinámicas de las playas
- ii. Diferente impacto del temporal de noviembre de 2001 sobre cada playa
- iii. Diferente comportamiento de impacto y recuperación de cada playa en los sucesivos temporales
- iv. Influencia de la variación del nivel del mar.

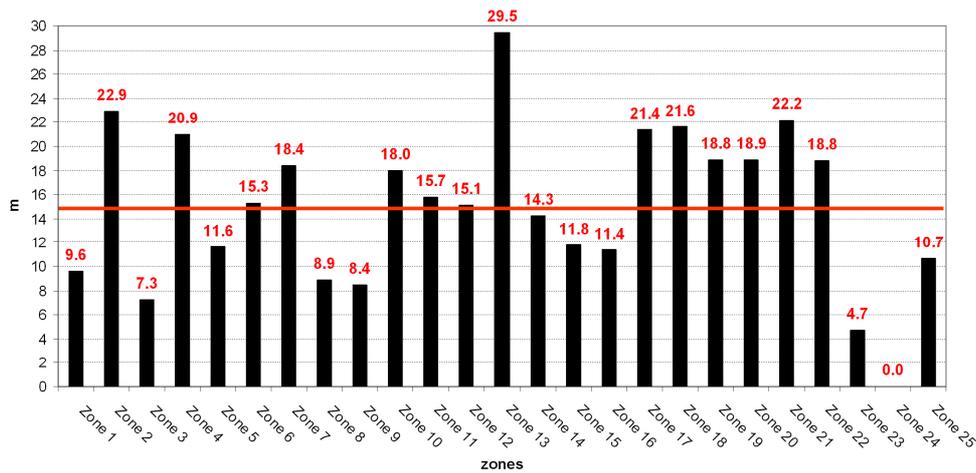


Figura 91. Retroceso medio de cada segmento. En rojo el retroceso medio global.

5.4.6.1.1. Influencia de las condiciones morfodinámicas de las playas

Dependiendo de las condiciones geomórficas de la playa es posible observar gran variedad de impactos en cada zona estudiada. En la Figura 91 se muestra el retroceso medio tras los temporales de noviembre y diciembre de 2001. Esto permite identificar zonas con un fuerte retroceso medio (zonas 2, 4, 7, 10, 13, y de la 17 a la 22) frente a otras menos afectadas (zonas 1, 3, 8, 9, 15, 16, 23 y 24).

Es sabido que factores como el tipo de playa, la pendiente de la misma o la granulometría de los sedimentos afectan a la respuesta de la propia playa (Reyes et al., 1999; Morton, 2002; Haerens et al., 2012). Así se confirma en este caso (Figura 92): se da una relación inversa ($r=-0,71$, $p<0,001$) entre la pendiente media de la playa y el cambio medio medido en cada línea de playa, demostrando que la pendiente afecta a la magnitud del cambio.

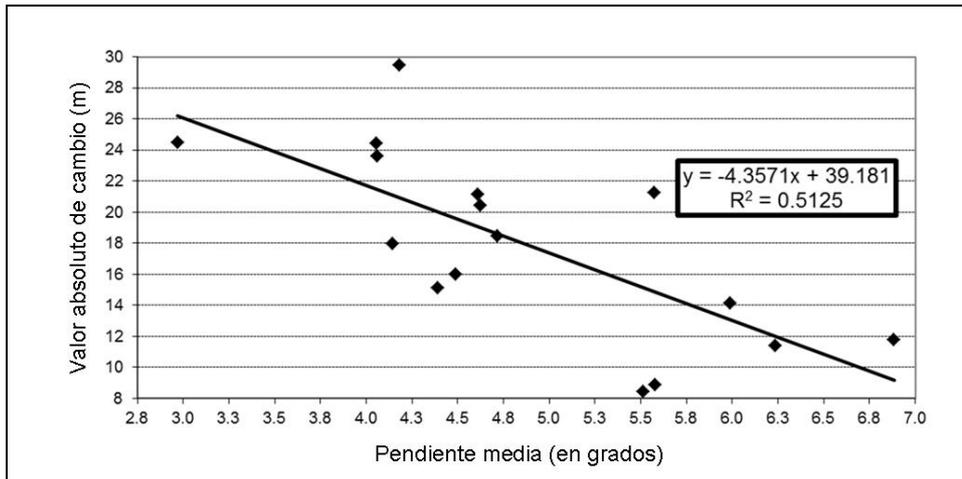


Figura 92. Relación entre la pendiente media de cada sector y su retroceso medio observado. El estudio analiza el 78,5% de la longitud de costa global de estudio. No se incluyen ciertas zonas cuya pendiente puede haber variado entre 2002 y 2009 por aportaciones artificiales de arena.

Sin embargo, no todas las variaciones pequeñas se relacionan con la pendiente. Por ejemplo dentro de la restinga que cierra la Albufera de Valencia se encuentran tanto las zonas 8 y 9. Estas dos zonas presentan cambios de 8,5 m. Las zonas 10 y 11 presentan cambios de 15,5 m. Estas cuatro zonas presentan texturas y pendientes similares, si bien las zonas 8 y 9 presentan dunas bien desarrolladas mientras que las zonas 10 y 11 que contienen paseos marítimos y edificaciones. La base de las dunas de las zonas 8 y 9 se encuentran a 2,5 m sobre el nivel del mar. En ocasiones, durante un temporal el nivel del mar puede superar dicha cota y erosionar grandes volúmenes de arena (Edelman, 1968; Pye y Blott, 2008). De esta manera el sistema dunar devuelve arena al sistema litoral de forma que reduce el retroceso de la playa (Davidson-Arnott, 2010). Para evaluar esta posibilidad, se midieron dos parámetros: el nivel de agua observado (medido en el mareógrafo situado en el Puerto de Valencia) y la altura asociada al *run-up* de las olas (Heathfield et al, 2013). Con el fin de estimar el *run-up* de la ola se ha utilizado la siguiente expresión propuesta por Ruggiero et al. (2001) para playas disipativas:

$$R_{2\%} = 0.27 (SH_s L_0)^{1/2} \quad (12)$$

Donde $R_{2\%}$ es la sobreelevación máxima del nivel del agua (el 2% de las situaciones de mayor nivel) sobre el nivel medio del mar (*Mean Water Height*) provocado por el *run-up*, S es la pendiente de la playa (calculada según se describió anteriormente), H_s es la altura significativa de ola (medida en la boya de Valencia) y L_0 es la longitud de onda (deducida a partir de los datos del periodo de onda medidos en la boya). Las playas de las zonas 8

y 9 en nuestra área de estudio también son disipativas (Pardo-Pascual y Sanjaume, 1995) por lo que es razonable aplicar la ecuación propuesta por Ruggiero et al. (2001).

Por este método se ha obtenido una altura del agua para el 12 de noviembre, fecha del primer temporal, de 2,88 m en la zona 8 y 2,87 en la zona 9. Dos días después, durante la segundo temporal, el agua alcanzó los 2,76 y 2,75 m , respectivamente. Por lo tanto, dado que el pie de duna se encuentra a unos 2,5 m , éste se vio afectado durante ambos episodios. Este hecho habría provocado que las dunas aportaran arena al frente de playa. Es destacable que, aunque el retroceso de la costa en las zonas 8 y 9 fuera mínimo, el frente de duna sí sufrió un retroceso de varios metros (Sanjaume y Pardo-Pascual, 2011b). Este hecho se pudo verificar gracias a la comparación de diversos modelos digitales de elevaciones de la Devesa del Saler correspondientes a 2001, 2003 y 2005. De forma similar, en la zona 12, que queda flanqueada por dunas en un 70% de su extensión, la línea de costa sufrió un retroceso menor que las zonas 10 y 11, inmediatamente contiguas hacia el norte. Sin embargo, otros sectores (como del 19 al 22) no han presentado el mismo comportamiento o, al menos, no se ha evidenciado en el retroceso de las línea de costa.

5.4.6.1.2. Diferente impacto del temporal de noviembre de 2001 sobre cada playa

El impacto de los mayores temporales -noviembre de 2001- tuvo un efecto diferente en cada zona (Figura 90). Las zonas más meridionales se vieron menos afectadas dado el mayor alejamiento del foco del temporal. Esto concuerda con estudios que ya indican la relación entre el impacto de un temporal y la distancia a su centro (Morton, 2002; Haerens et al., 2012). Este efecto se observa con claridad aunque con alguna excepción. Las zonas 13 y 18 sufren un fuerte retroceso pese a la distancia al foco del temporal. Un factor que puede explicar este impacto es la orientación de la línea de costa. La zona 13 (así como de la 1 a la 6) tiene una orientación norte-sur mientras que el resto de zonas tiene orientación noroeste-sureste. La orientación de la costa determina la eficiencia del transporte longitudinal y puede ser significativa en su relación con los temporales, tal y como sugieren Pye y Blott (2008) y Gervais et al (2012). Dado que en este sector costero la deriva litoral es muy remarcada (Sanjaume y Pardo-Pascual, 2005), puede ser la razón del efecto comentado.

La orientación de la costa es también el efecto diferenciador en las zonas 23 a 25 (puerto de Denia), que sigue un comportamiento contrario al general del resto de las zonas (Figura 93).

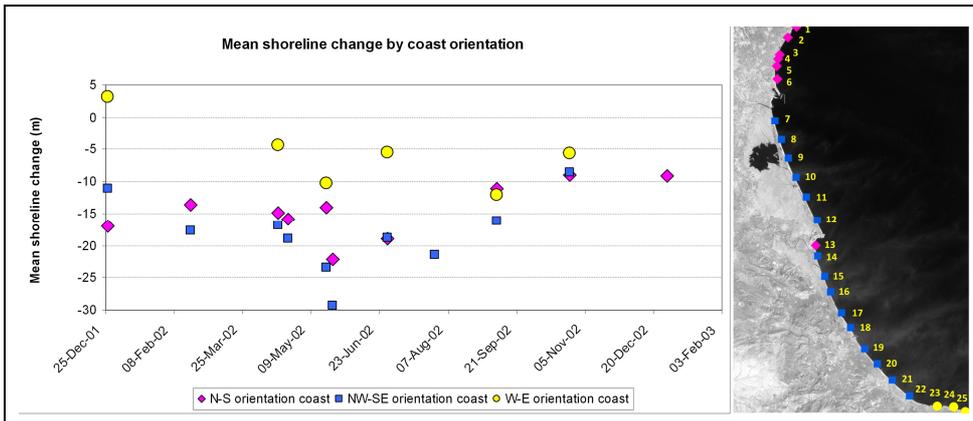


Figura 93. Cambios observados en la posición de playa a lo largo del periodo, distinguiendo las 3 direcciones principales.

Sin embargo, el factor de la orientación, por sí solo, tampoco permite explicar por completo el comportamiento de los impactos de temporales. La zona 18, orientada noroeste-sureste sufrió un retranqueo de más de 25 m de media en el primer temporal. Un análisis del retroceso de la costa entre el 8 noviembre y el 26 diciembre en el punto ubicado 8 km al norte del puerto de Gandía (Figura 94) muestra una respuesta diferente en la posición de la costa. Esta diferencia está probablemente relacionada con la diferencia de pendiente del perfil de playa debido a los efectos acumulados de la estructura de los diques portuarios que actúan como trampas de sedimentos (por ejemplo, el caso se observa en la Figura 94, donde el perfil 6, medido al norte del puerto de Gandia, presenta una pendiente de $0,75^\circ$, mientras que el perfil 7, a 8 Km al norte del puerto, presenta mayor pendiente, $0,85^\circ$).

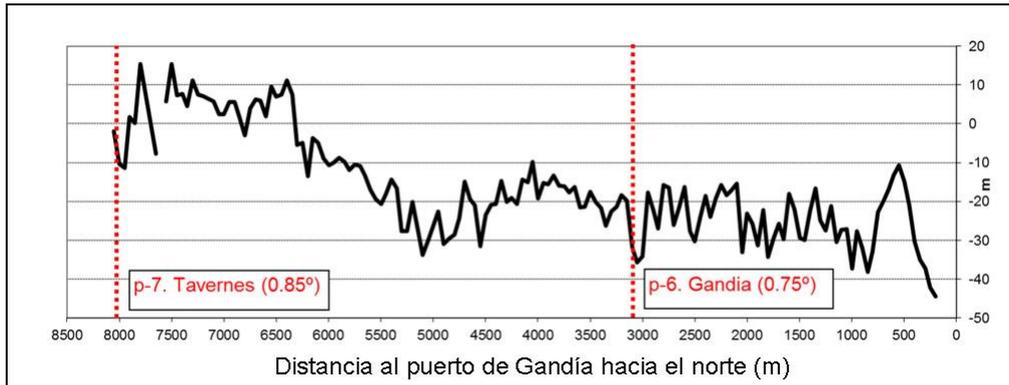


Figura 94. Detalle del cambio registrado entre el 8 de noviembre y 26 de diciembre de 2001, entre 3 y 8 kilómetros al norte del puerto de Gandía. Las líneas verticales punteadas indican la posición de los perfiles hechos en 2007 por la DGC. En paréntesis se representa la pendiente de la playa sumergida medida en los perfiles de 2007 (ver Figura 83).

Por último, confirmando tanto el efecto de la distancia al foco de la tormenta como el de la orientación se puede observar las zonas 23 a 25 (cerca del puerto de Denia), que siguen un comportamiento contrario al general del resto de las zonas (Figura 93).

5.4.6.1.3. Comportamiento del impacto y la recuperación de cada playa en los sucesivos temporales

La sucesión de temporales (Figura 90), pese a que ninguno tenga un efecto tan marcado como el primero, tiene un mayor efecto global que considerando sólo el primer temporal. Este efecto acumulativo finaliza tras la mejora de las condiciones meteorológicas en junio de 2002, asociado probablemente al inicio del dominio del régimen de brisas costeras. Este hecho general tiene su excepción en las zonas 23, 24 y 25 donde no se observa una erosión clara durante la primera parte del año.

Según Del Río et al. (2012) las playas erosionadas, al quedarse aplanadas, pueden dar lugar a una mayor disipación de la energía de las olas y por lo tanto sufrir menos en los temporales.

Es posible observar dos respuestas a los temporales:

(a) En los sectores orientados norte-sur (zonas 1-6 y 13) se sufre el impacto del primer temporal para después mantenerse estables y tender a una recuperación hacia junio de 2002. Un proceso similar es descrito por Del Río et al (2012) para el caso del Golfo de Cádiz.

(b) Los sectores de orientación noroeste-sureste (zonas 8 a 23, a excepción de la 13), el efecto de los temporales es acumulativo llevando a un retroceso continuo hasta mayo de 2002. Este segundo modelo muestra cómo varios temporales de magnitud media pueden tener un impacto acumulativo en la costa alcanzando el máximo efecto en el último temporal como ya ha sido expuesto por Lee et al. (1998) o Ferreira (2005).

La zona 7 debería ser clasificada como una transición entre los casos a y b. La zona meridional del estudio, donde el impacto de los temporales fue más limitado, no sigue ningún patrón de comportamiento en particular.

Los resultados y observaciones son coherentes con los estudios hechos sobre el golfo de Cádiz (Benavente, et al., 2000; Del Río, et al., 2012) en que no se observa recuperación en periodos de calma entre temporales hasta que llegan los meses de verano.

Llama la atención que ocho de las zonas estudiadas (2, 4, 7, 13, 18, 19, 20 y 21) siguen un comportamiento común pese a no estar aparentemente relacionadas por variable alguna de pendiente, ni orientación, en todas ellas se da un retroceso superior a 25 m y la recuperación es menor al 70%. Las ocho zonas tienen en común un escaso transporte longitudinal aunque las razones de este escaso transporte sean distintas:

-Zonas 2 y 4: están ubicadas entre espigones y diques, que dificultan el aporte longitudinal de arena dificultando la realimentación de este segmento de playa.

-Zona 7: ubicada directamente al sur del puerto de Valencia, que actúa como una trampa muy fuerte de sedimentos procedentes del norte produciendo un desabastecimiento sedimentario al sur.

-Zona 13 : Ubicada al sur del cabo de Cullera, sufre un efecto similar a la zona 7. El cabo de Cullera actúa como trampa de sedimentos en la zona norte salvo durante temporales muy fuertes. Suele, por tanto, recibir muy poco aporte de arena por el transporte longitudinal.

-Zonas 18 a 21 : aquí la razón del escaso aporte longitudinal se relaciona con la progresiva variación en la dirección de la costa, hecho que provoca una menor efectividad de las corrientes longitudinales (Pardo-Pascual, 1991; Sanjaume y Pardo-Pascual, 2005).

Este comportamiento es coherente con la conclusión principal expuesta por Morton et al. (1994) quien indica que la recuperación completa de la playa depende de la disponibilidad de arena. Si el temporal causa un daño extremo se dificulta la recuperación y se produce un retroceso a largo plazo (Kish y Donoghe, 2013).

5.4.6.1.4. Influencia de la variación del nivel del mar

En la mayoría de las zonas, el mayor cambio registrado se ha dado entre el 19 y el 26 de mayo de 2002, con un retroceso medio de 10 m en las zonas con datos disponibles. Sin embargo, en esos siete días no se produjo ningún temporal. La línea de costa retrocedió entre esas dos fechas en todas las zonas, pero con importantes diferencias: en la zonas

17 y 2 el retroceso fue de 25 y 20 m de media, respectivamente. En las zonas 8, 9, 15 y 17 fueron de más de 10 m. En el resto de las zonas de las que (zonas entre 1 y 18) el retranqueo fue de menos de 10 m ¿Cómo puede explicarse? Un análisis del nivel del agua (Figura 85 y Tabla 35), muestra una subida de 12 cm entre las dos fechas. Este fuerte impacto únicamente puede ser explicado si la playa presenta una pendiente muy suave. Tras seis temporales, el último de los cuales que se inició el 6 de mayo con altura significativa de ola de 3,3 m y una sobre-elevación del nivel del mar respecto a su valor medio de 0,27 m (Tabla 35 y Figura 86), el frente de playa debía presentar un gradiente muy pequeño. Las diferencias, por tanto, se explicarían por las diferencias en la pendiente del frente de playa generadas por el temporal de mayo. Contrastan, sin embargo, la diferencias observadas a lo largo del mes de mayo del 2002 respecto a las que se aprecian entre el 17 y el 24 de abril, también con temporales precedentes –en marzo y abril– con alturas de olas similares al de mayo, pero con menor sobre-elevación del nivel del mar (Figura 85 y Tabla 35) ya que en ese caso (del 17 al 24 de abril) el retroceso medio fue únicamente de 3 m, a pesar de que la cota del nivel del mar en el momento en que se tomaron las imágenes, descendió 12 cm. Tras los temporales del 28 de marzo y el 12 de abril, las playas debieron estar sustancialmente más inclinadas que tras el temporal de mayo, ya que de otra forma no podrían ser explicados los cambios registrados.

En consecuencia, dependiendo de los cambios en la pendiente de la playa, pequeños cambios en el nivel del mar pueden suponer cambios sustanciales en la posición de la línea de costa. Esto significa que considerar únicamente una única posición de la línea de costa, puede llevarnos a realizar deducciones incorrectas sobre la evolución de las playas, como sugieren Robertson et al. (2007). Más aún, si esta metodología se aplica a costas con mayores rangos mareales, la robustez de las deducciones será probablemente menor. Por tanto, para confirmar o desmentir esa suposición se deberían realizar más ensayos en múltiples escenarios

5.4.6.2. Potencial y limitaciones

Como se ha expuesto anteriormente, existen diversos métodos y procedimientos para caracterizar el impacto de los temporales y los procesos de recuperación de las playas. Sin embargo, la mayoría presentan como principal limitación su dificultad para realizar el seguimiento de grandes áreas costeras durante largos periodos. Aquí proponemos una solución que permite caracterizar con elevada frecuencia un indicador morfológico, como es la posición de la línea de costa, a lo largo de grades segmentos costeros. La línea de costa es susceptible a los sucesos puntuales y se reflejan en ella las tendencias de medio y largo plazo. Este hecho puede ayudar a los especialistas en dinámica costera a identificar los factores más relevantes que afectan a los cambios morfológicos.

Este potencial analítico de las líneas de costa es el que se ha procurado encontrar en las aquellas obtenidas de imágenes Landsat TM/ETM+/OLI puesto que la serie temporal disponible y su extensión resuelven dos de las limitaciones principales comentadas. Sin

embargo, éstas tienen ciertas limitaciones que pueden desglosarse de forma comprensible en 3 aspectos.

(i) La precisión de las líneas de costa. Se ha evaluado la precisión de las líneas de costa en un error medio cuadrático de alrededor de 5 m. Sin embargo, en espacios costeros de fuerte pendiente (playas de gravas y cantos), que en general presentan escasa variabilidad, esta precisión puede resultar insuficiente para identificar los cambios.

(ii) La naturaleza del indicador obtenido. Es decir, la propia línea de costa. En zonas de escollera está clara la división entre agua y tierra, sin embargo queda pendiente analizar a qué es exactamente sensible la radiación infrarroja. ¿Dónde ubica la línea de costa exactamente el algoritmo al aplicarse sobre playas naturales? ¿Detecta la zona mojada por el run-up o el límite agua/no agua? ¿Cómo le afecta la mayor o menor turbidez en la zona de swash?

(iii) La instantaneidad de la línea observada. Las plataformas Landsat 5 y Landsat 7 tienen su propia frecuencia de paso, independiente del momento en que se da un temporal. Ello puede llevar a disponer de una línea tras demasiado tiempo respecto al temporal estudiado y el impacto registrado quizá no se observe con la precisión adecuada (Masselink et al., 2006; Quartel et al., 2008; Gervais, et al., 2012), especialmente si la playa tiene una fuerte capacidad de recuperación. En este caso se ha trabajado con líneas obtenidas 45 días tras determinado temporal y los efectos seguían presentes. ¿Cuánto se considera que es demasiado tiempo tras un determinado suceso, sea un temporal como en este caso o no? la frecuencia actual de distribución de las imágenes Landsat, se dispone de una escena cada 16 días, o incluso más en zonas de solape. Se puede considerar que, en la actualidad, Landsat 7 y Landsat 8 están activos y existe una complementariedad de información y frecuencia de toma. Un factor limitante se da en el sensor Landsat 7 que desde 2003 presenta un error en el escaneo (SLC-off) pero este hecho afecta sólo en tanto que dejaría huecos sin datos, pero la parte con imagen sí permitiría detectar la línea de costa con niveles de precisión parecido a la obtenida sobre imágenes no afectadas por este error (Almonacid-Caballer et al., 2013) . La frecuencia temporal y el bandeo de Landsat 7 pueden ser factores limitantes si los episodios de temporal o las recuperaciones tienen periodos más cortos que esta frecuencia de paso.

Por lo tanto, los cambios registrados usando las líneas de costa extraídas de las imágenes Landsat pueden darnos información clave para la comprensión de la respuesta de las playas ante situaciones diversas como puedan ser los temporales. Sin embargo, el empleo de muy pocas líneas de costa como indicador de un impacto costero o medida de la recuperación subsiguiente puede llevar a resultados incorrectos. Se reconoce la tendencia coherente cuando se utilizan muchos registros, como se observa en nuestra área de estudio, y el proceso de recuperación puede ser correctamente caracterizado. Por lo tanto, al comparar varias líneas de costa en períodos cortos de tiempo, se observa una alta coherencia espacial entre las posiciones y la tendencia general de cambio se caracteriza adecuadamente.

5.4.7. Conclusiones sobre impacto de temporales

Se ha revisado la interacción entre un conjunto de seis temporales seguidos de un largo periodo de calma y doce imágenes Landsat disponibles en un periodo de catorce meses y para una extensión de unos 100 Km.

Se ha observado que la respuesta de la playa es muy diversa y depende de numerosos factores como su localización, morfología, la pendiente y la existencia de dunas, la facilidad con que se abastece sedimentariamente la playa, sobre todo por el transporte longitudinal (lo que a su vez está directamente relacionado con la orientación general de la playa y con la existencia de infraestructuras artificiales u obstáculos naturales al transporte).

Desglosando el área de estudio en 25 zonas claras se ha podido distinguir el comportamiento en función de diversos aspectos:

-i- Cuanto mayor sea la pendiente del frente de playa, menor es el efecto que sufre la playa ante el impacto de un temporal.

-ii- La existencia de alineaciones dunares tras la playa mitigan el efecto de los temporales, alimentan la playa en sí y se atenúa el retroceso de la línea de costa.

-iii- La orientación de cada segmento costero implica variaciones en el impacto costero. En concreto, para el caso estudiado las playas de orientación norte-sur han sufrido un mayor impacto que aquellas de orientación noroeste-sureste, llegando al extremo en que las playas de orientación este-oeste no sufren un retroceso significativo. La orientación de las playas afecta a la forma en que reciben los temporal y al transporte longitudinal que lleva a una más rápida o lenta recuperación.

-iv- La eficiencia del transporte longitudinal influye en los procesos de recuperación de la playa, y esos procesos son más lentos cuando el transporte de sedimentos queda limitado por infraestructuras (espigones, diques, puertos), trampas de sedimento naturales o simplemente porque se debilita la deriva por la orientación de la costa y el régimen de oleaje.

-v- Se ha observado un comportamiento en cuanto a la respuesta de cada sector frente al primer temporal y los siguientes. En aquellas zonas donde el primer temporal causó mayor retroceso, la serie de temporales siguiente simplemente mantuvo dicho retranqueo de la costa hasta el verano de 2002. En aquellas zonas en que el primer impacto fue menor, se observa que los temporales subsiguientes incrementan el retroceso que, igualmente, cesa en verano de 2002.

Se ha analizado el comportamiento de un extenso sector costero de 100 Km ante un conjunto de temporales -su retroceso y recuperación posterior- en playas principalmente arenosas en espacios micro-mareales. Ello es, en sí mismo, uno de los objetivos. En consecuencia, haber alcanzado dicho objetivo da por alcanzado el otro: la validación de

las propias líneas Landsat como herramienta para la interpretación de sucesos antrópicos o naturales que se den en la costa.

Lo resultados demuestran que las líneas de costa Landsat ofrecen una nueva fuente de información sumamente útil. La perspectiva se hace más interesante desde el momento en que se pueden realizar estudios retrospectivos de sucesos acaecidos hace 30 años.

5.5. Caracterización de la evolución reciente de las playas de Sagunt y Canet d'En Berenguer a partir de imágenes Landsat TM

En este apartado se analizarán los cambios en las playas de los términos municipales de Sagunt y de Canet d'en Berenguer, un sector de 14 Km de longitud situados en la parte central del golfo de Valencia. La particularidad de este estudio es la escala temporal dado que se pretende abarcar 25 años de historia. Se trata pues, de un análisis meso-escalar que, por sus características, puede tener un interés claro sobre la gestión de este espacio.

Los objetivos centrales que se plantean en este apartado son **(1)** tratar de reconocer la tendencia evolutiva registrada en las playas de Sagunt y de Canet d'en Berenguer en el periodo 1984-2009 a una escala espacial detallada y global, **(2)** detectar si se han producido variaciones significativas en los procesos de evolución a lo largo de este periodo y **(3)** tratar de reconocer cambios significativos en la morfología (concretamente su anchura y pendiente) y textura de las playas analizadas a lo largo del periodo estudiado.

5.5.1. Zona de estudio

Las costas de Sagunt han formado parte de la gran célula sedimentaria que constituía el golfo de Valencia. Dicha célula, sin embargo, ha ido fragmentándose a lo largo de los últimos dos siglos como consecuencia de la construcción de los grandes diques portuarios. Concretamente dos actuaciones afectan al área de estudio: el puerto de Sagunt y el puerto deportivo de Canet.

El propio puerto de Sagunt es el que ha provocado la mayor modificación en la estructura morfosedimentaria del sector. La construcción a primeros de los años 50 del siglo XX del puerto marcó la introducción de un obstáculo artificial al transporte longitudinal de sedimentos que se produce de forma dominante hacia el sur (Pardo-Pascual, 1991). Ello ha implicado una acumulación forzada al norte del obstáculo y un vaciamiento de materiales al sur del mismo. Así, al norte del puerto ha supuesto una ampliación en la anchura de las playas y, al sur un retroceso.

En el caso concreto de Sagunt, sin embargo, al sur del puerto se fueron vertiendo durante años las escorias sobrantes de las fundiciones del hierro y arrabio de los altos hornos. Esta aportación artificial de materiales al sistema costero supuso que, justo al

sur del puerto, se produjese (al contrario de lo que se hubiese podido esperar) una fuerte acumulación de materiales.

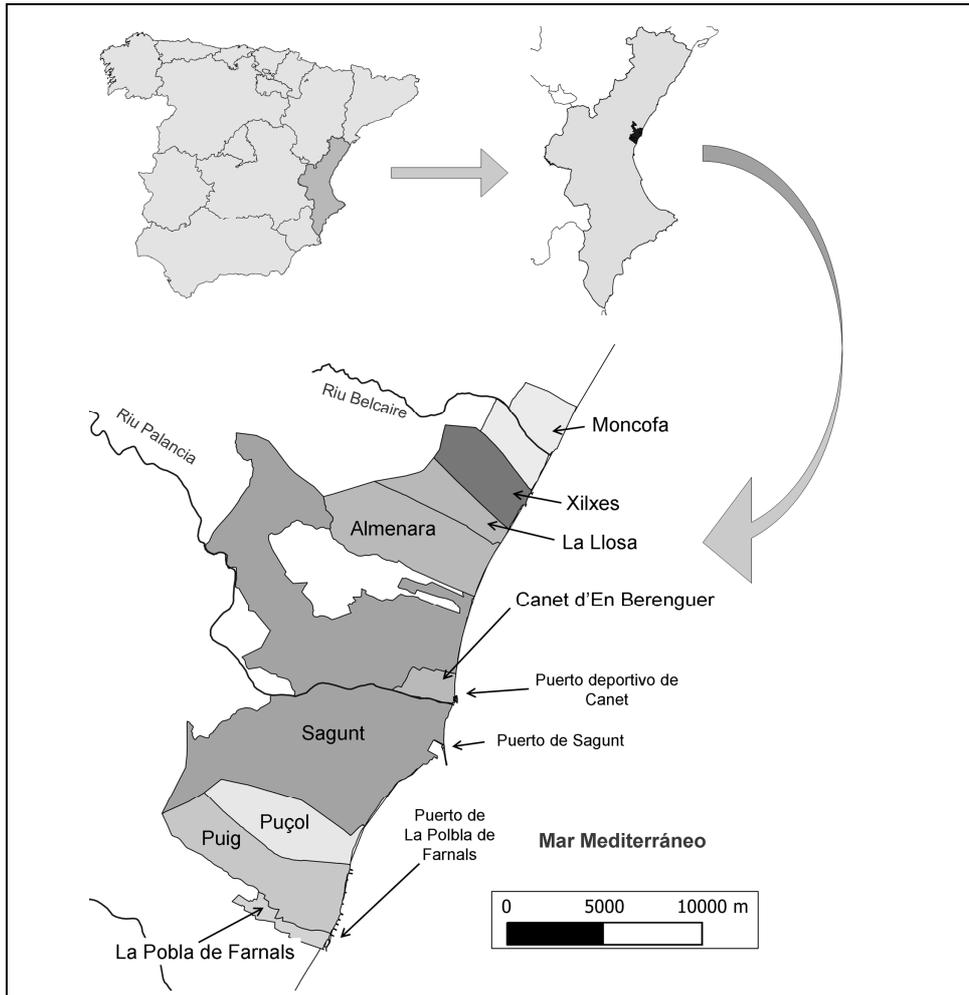


Figura 95. Zona de estudio.

Por otra parte, la naturaleza de las escorias cementaron al contacto con el agua y se formó una placa de material rígido. Esta cementación no se produjo exclusivamente en la orilla sino, como se pudo comprobar en campo (Pardo-Pascual, 1991) en las partes sumergidas de la playa y llegó a percibirse hasta 7,2 km del antiguo dique sur del puerto (el anterior a la actual ampliación). En consecuencia, la erosión que habría de haberse percibido inmediatamente al sur del puerto se dejó sentir a partir del punto en que los materiales volvían a estar sueltos, a partir del término municipal del Puig (Pardo-Pascual, 1991b)

Por otro lado, en 1982 se iniciaron las obras de construcción del puerto deportivo de Canet que, a pesar de sus dimensiones modestas, ha provocado una sustancial modificación en la dinámica evolutiva de las playas saguntinas que se analizarán con detalle en los siguientes apartados.

Tal como queda explicitado en el trabajo de Sanjaume (1985) existe, al menos en el sector más septentrional del término, una base de materiales groseros de origen fluvial, probablemente procedentes del río Belcaire, que van perdiendo significación conforme nos alejamos de su desembocadura. Con todo, incluso en el sector con claro predominio arenoso, como las playas situadas al norte del puerto deportivo de Canet, no es extraño encontrar cantos y gravas junto con las arenas.

5.5.2. Metodología

En la Figura 96 aparece un diagrama de flujo que muestra la metodología seguida para poder realizar los análisis. Para reconocer la dinámica evolutiva a lo largo del periodo 1984-2009 se han analizado 50 posiciones de la línea de costa repartidas a lo largo de todo el periodo pero con la particularidad de que, para la mayor parte de los años en los que se dispone de datos, se han gestionado varias posiciones de la orilla distintas.

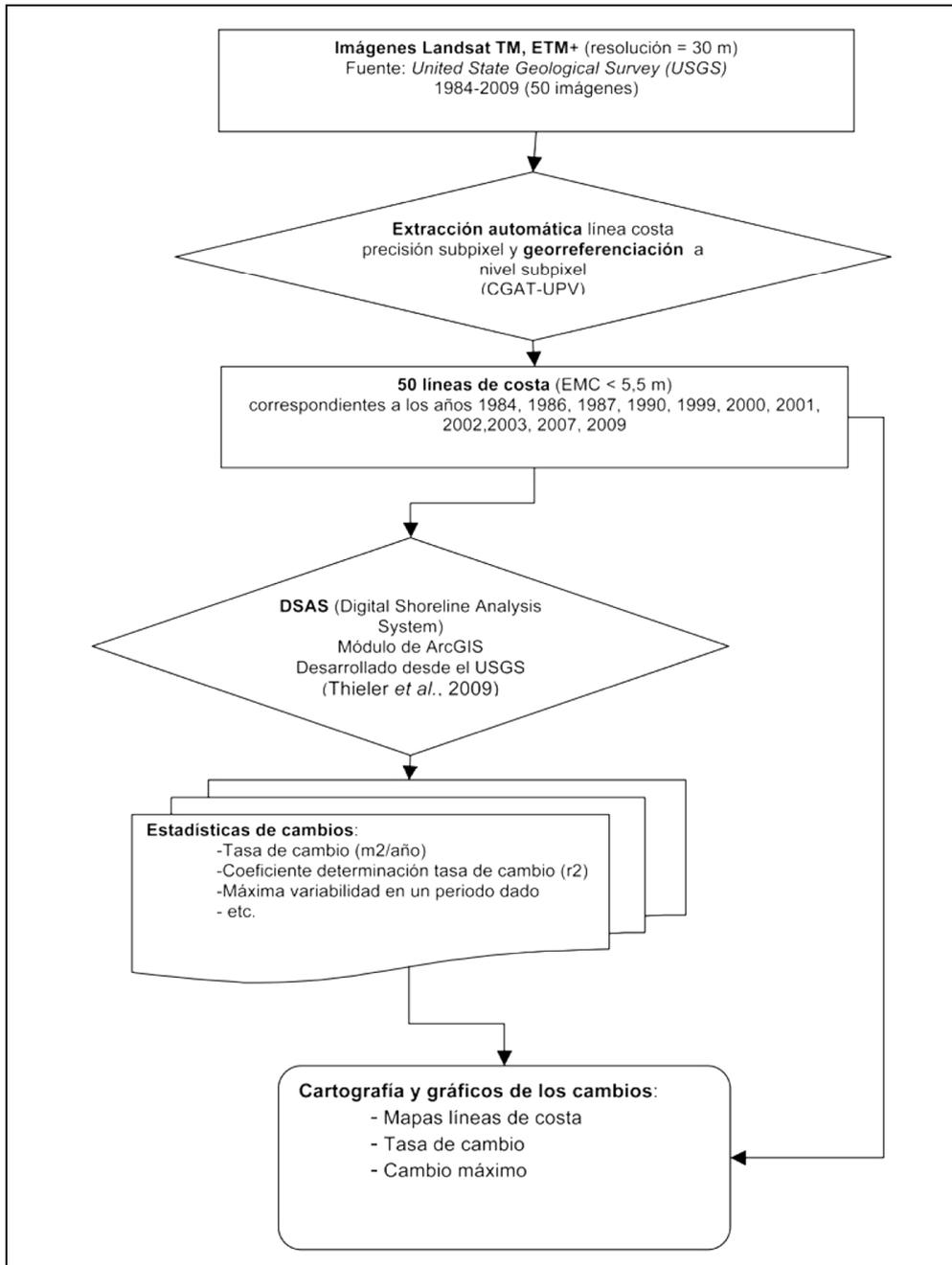


Figura 96. Diagrama de Flujo del método desarrollado para la realización de los análisis.

Esta solución metodológica, permite aprovechar las imágenes Landsat TM/ETM+/OLI y, por tanto, hacer análisis sobre una fuente de datos hasta la fecha no utilizada en este tipo de estudios de forma sistemática.

Tabla 36. Imágenes analizadas. L5: Landsat 5. L7: Landsat 7. H: Alta ganancia. L: baja ganancia.

Fecha	Tipo imagen	Fecha	Tipo imagen
21/09/1984	L5	02/04/2002	L7-H
07/10/1984	L5	24/04/2002	L7-H
23/10/1984	L5	26/05/2002	L7-L
24/11/1984	L5	19/06/2002	L5
22/05/1986	L5	29/07/2002	L7-L
23/06/1986	L5	30/08/2002	L7-L
10/08/1986	L5	06/02/2002	L7-L
26/08/1986	L5	10/03/2002	L7-L
29/10/1986	L5	27/04/2003	L7-L
23/04/1987	L5	29/05/2003	L7-L
26/06/1987	L5	08/07/2003	L5
12/07/1987	L5	24/07/2003	L5
13/08/1987	L5	09/08/2003	L5
09/06/1990	L5	25/08/2003	L5
21/07/1999	L7-H	08/01/2007	L5
06/09/1999	L5	24/01/2007	L5
12/01/2000	L7-H	09/02/2007	L5
29/01/2000	L7-H	13/03/2007	L5
01/03/2000	L7-H	03/07/2007	L5
08/08/2000	L7-H	04/08/2007	L5
09/09/2000	L7-H	20/08/2007	L5
27/10/2000	L7-H	22/06/2009	L5
26/07/2001	L7-H	24/07/2009	L5
30/10/2001	L7-H	10/09/2009	L5
19/02/2002	L7-H	12/10/2009	L5

Una vez se dispone de las sucesivas líneas de costa (en nuestro caso 50, véase Figura 97 y Tabla 36) se puede cartografiar el conjunto de las líneas. Para el análisis evolutivo se ha utilizado una herramienta analítica DSAS (Thieler et al, 2009). Este programa permite la realización de una serie de transectos sistemáticos que cortan la totalidad de las líneas de costa disponibles (Figura 98). Cada línea de costa ha de tener identificada su fecha de adquisición y el sistema mide, en cada perfil, la distancia de toda línea una línea base que sirve como referencia. Con ese dato se pueden deducir analíticamente las variaciones de anchura que se han ido produciendo a lo largo del tiempo.

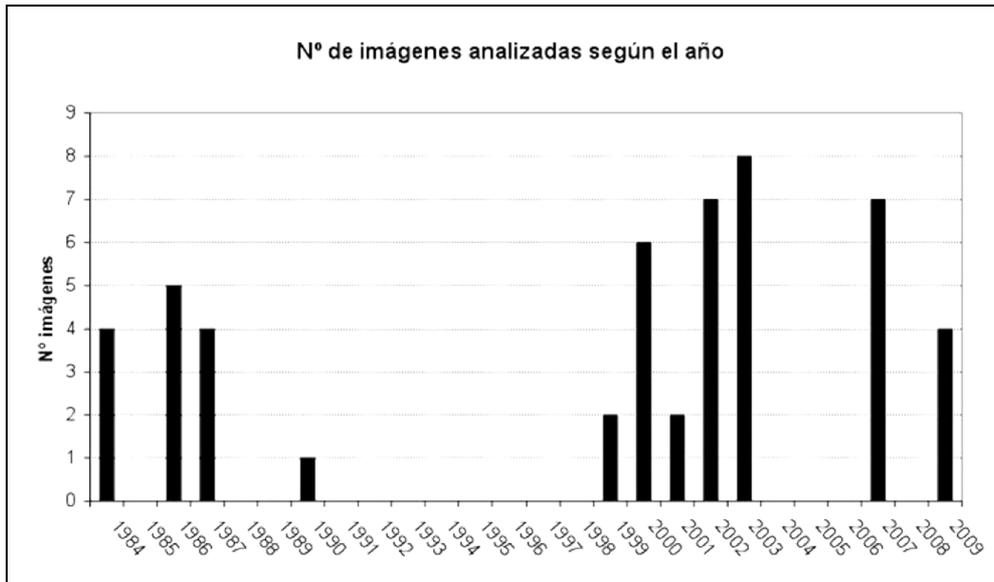


Figura 97. Número de imágenes, y líneas de costa, analizadas en cada año.

Se han realizado los perfiles o transectos con una separación sistemática de 50 m a lo largo del frente costero del termino municipal de Sagunt y Canet d'en Berenguer, exceptuando el sector que queda dentro del puerto industrial de Sagunt, de forma que se ha dispuesto de un total de 256 perfiles o transectos sobre los que se han ido obteniendo los distintos parámetros estadísticos, cuyo análisis nos ayudará a entender y cuantificar la dinámica evolutiva del sector costero estudiado.

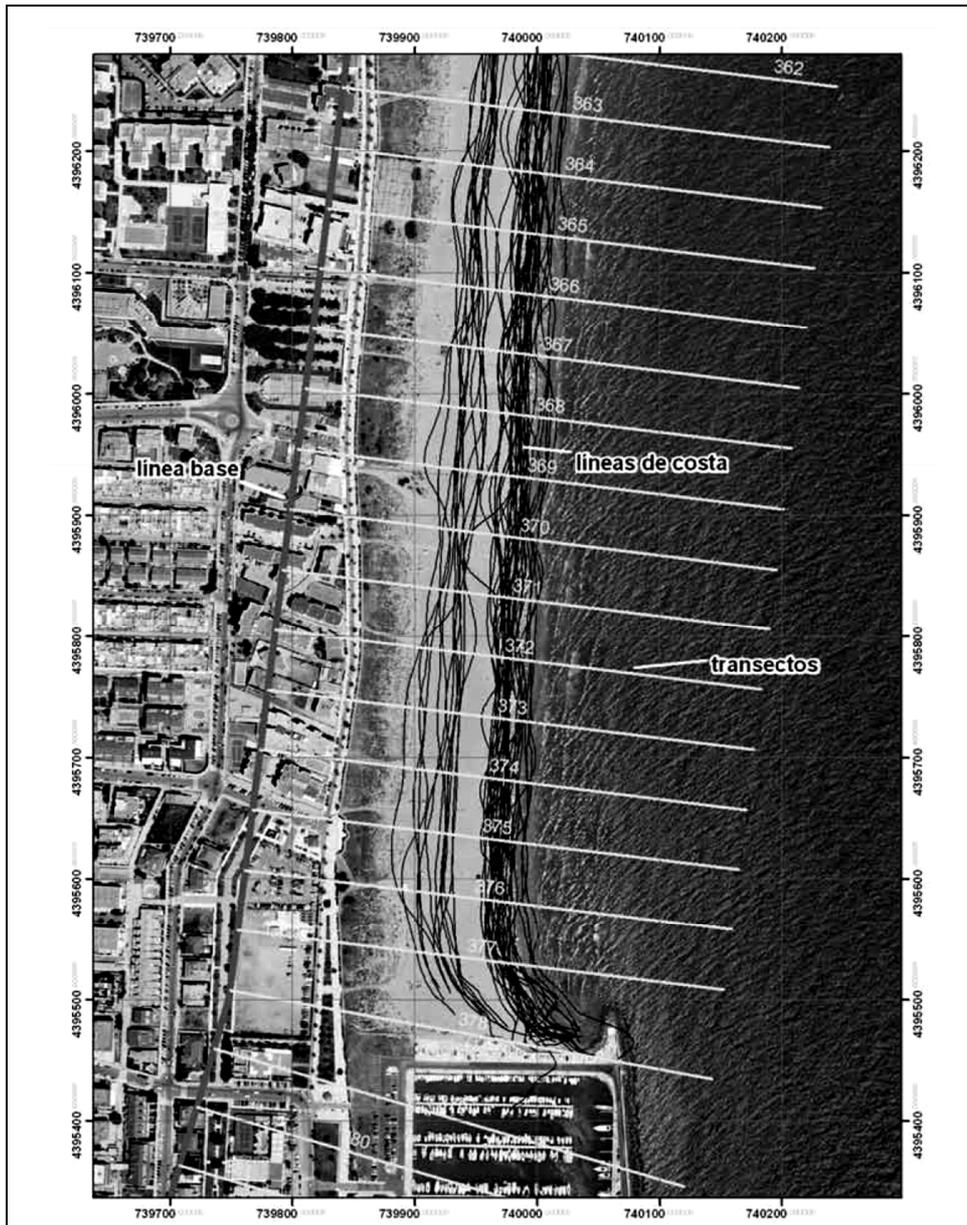


Figura 98. Ejemplo de cómo se opera desde el sistema de tratamiento digital de líneas de costa (DSAS) en el entorno de ArcGis. Los perfiles o transectos están equiespaciados cada 50 m. De fondo la ortografía de 2008 del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea. Cuadrícula con separación igual a 100 m.

Para el presente trabajo se han utilizado principalmente dos tipos de estadísticos de los doce que se obtienen con la gestión de DSAS: (a) la máxima distancia de cambio (SCE, *Shoreline Change Envelope*) y (b) la tasa de cambio (LRR, *Linear Regression Rate*).

El SCE (*Shoreline Change Envelope*) indica la distancia entre la línea más lejana y la más próxima a la línea base (momento en que la franja de arena de la playa es mínima) para cada transecto, mostrando así el cambio máximo en el movimiento de las posiciones de las líneas de costa sin estar relacionado con las fechas de las mismas (ver Figura 99). Son siempre valores positivos.

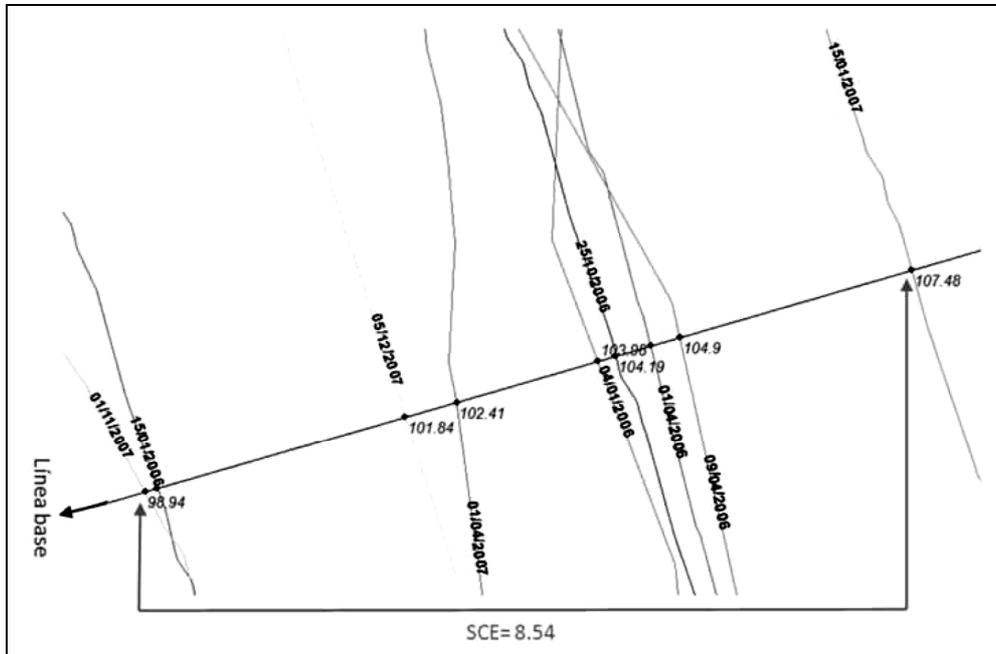


Figura 99. Ejemplo de cómo se ha calculado el cambio máximo para un perfil o transecto dado con DSAS.

La tasa de cambio, (LRR o *Linear Regression Rate*) es un estadístico que se determina mediante mínimos cuadrados. Tomando determinado transecto, si se plasma la magnitud de cambio en función de la fecha se obtiene la ecuación de la recta que mejor se ajusta a los datos. El LRR es la pendiente de la recta ajustada e indica la tasa de cambio a lo largo de ese perfil por año transcurrido (ver Figura 100).

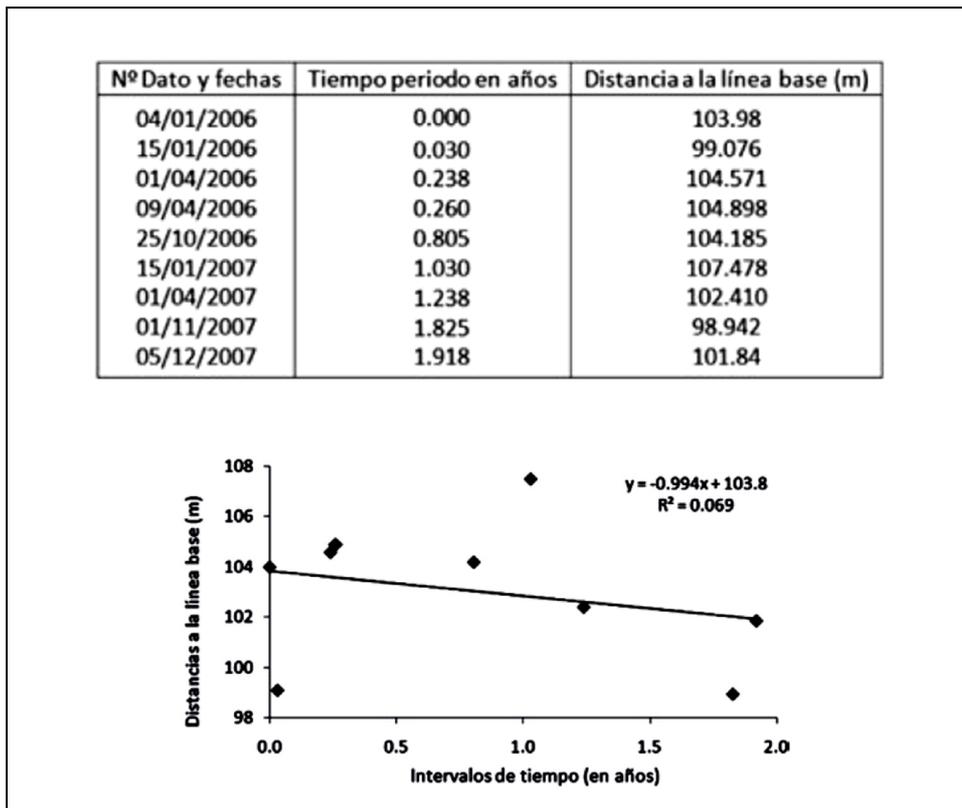


Figura 100. Ejemplo de cómo se calcula la tasa de cambio o LRR para un perfil o transecto dado con DSAS.

Una crítica habitual que suele aportarse al uso de la tasa de cambio es que, a lo largo del tiempo, el modelo de evolución puede ir cambiando (acelerándose o ralentizándose los procesos de erosión/acumulación costera) lo que no se vería reflejado correctamente cuando se calcula una tasa lineal para un periodo dado (Del Río y Gracia, 2008). En parte para resolver este problema recientemente se han planteado soluciones metodológicas bastante complejas (Frazer, et al., 2009; Genz, et al., 2009) que toman en consideración no solo la posible variabilidad temporal del modelo de cambio sino también las variaciones que se van dando sucesivamente a lo largo de las playas.

Más recientemente Sánchez-García (2011) evaluó el empleo de ecuaciones de segundo y tercer grado para tratar de caracterizar los cambios en lugares en que se había observado un cambio en la tendencia. Los resultados aportados en dicho trabajo evidencian que el empleo de ecuaciones de grado mayor a la unidad lleva aparejado un alto riesgo de exageración en la determinación de la tasa de cambio, sobre todo cuando se emplean para pronosticar posiciones futuras. Sin embargo, estos ajustes de mayor grado sí son útiles para localizar las posiciones temporales en las que se produce la modificación en el cambio de tendencia. Tomando en consideración todas estas circunstancias, para el caso que aquí nos ocupa, se ha preferido hacer además del cálculo

de la tasa de cambio y también del cambio máximo para todo el periodo analizado (1984-2009), hacerlo también para dos subperiodos: 1984-2000 y 1999-2009.

La elección de estos dos periodos viene determinada por la propia disponibilidad de datos que muestra dos bloques temporales bien definidos: 1984-1990 y 1999-2009. Dado que a lo largo del periodo con ese llamativo vacío en la década de los 90 no hay datos pero sí cambio, se ha considerado útil para ver si ha habido cambio de tendencia en la dinámica, introducir en el primer bloque temporal los dos últimos años del siglo XX que también se toman en consideración, a modo de punto de arranque, en el segundo bloque temporal

5.5.3. Resultados

Dado que los análisis se han realizado a distintas escalas temporales es conveniente presentar los resultados sobre estos distintos niveles escalares.

5.5.3.1. Tendencia evolutiva para todo el periodo analizado

La Figura 101 muestra la tasa de cambio ajustada mediante mínimos cuadrados (LRR) para todo el periodo considerado. Se puede observar que, de forma general, desde mediados de los ochenta la tendencia dominante, con diferencia, ha sido positiva, es decir, las dimensiones de las playas, en general, han aumentado significativamente. Las mayores tasas de avance se han registrado junto al puerto deportivo de Canet, con tasas para el conjunto del periodo, que llegan y superan, en algunos casos, los 3 m/año.

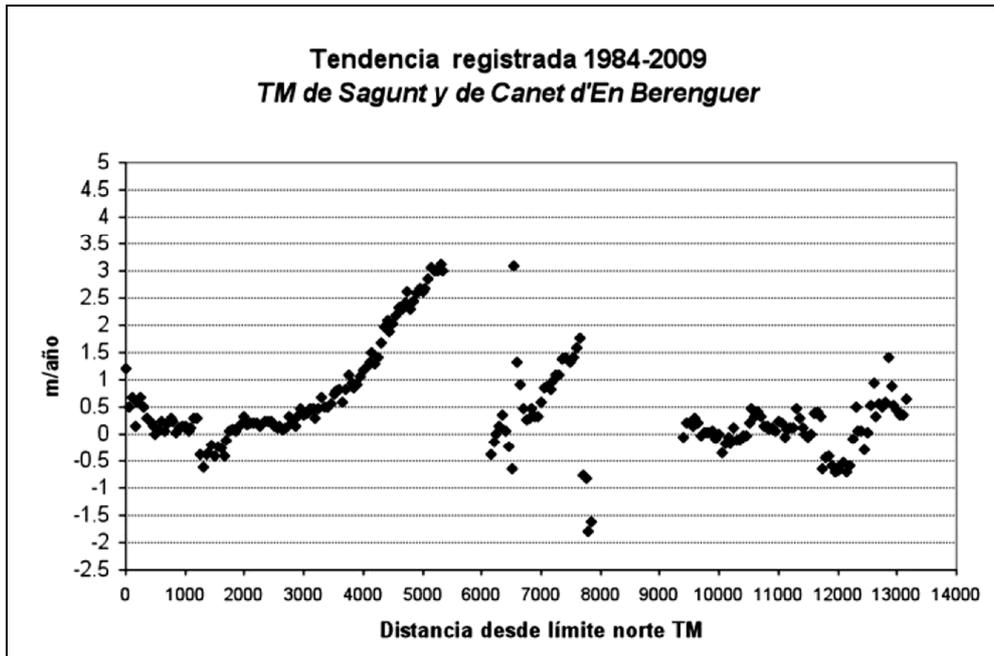


Figura 101. Tasa de cambio para todo el periodo estudiado. Cada punto del gráfico proviene de los datos calculados sobre cada perfil o transecto analizado. Abscisas: distancias desde el límite norte del término municipal (metros).

En la Figura 102 y la Figura 103 se muestra, sobre las ortofotos de 2008 mediante símbolos proporcionales cuál ha sido la tendencia (expresada en m/año) detectada para el conjunto del periodo analizado (1984-2009). En la Figura 102 se muestra la zona al norte del puerto deportivo de Canet. La Figura 103 muestra las zonas que rodean el puerto de Sagunt. Al sur de la figura Figura 102 y al norte de la Figura 103 aparece el puerto deportivo de Canet y sirve como referencia para ubicar ambas imágenes.

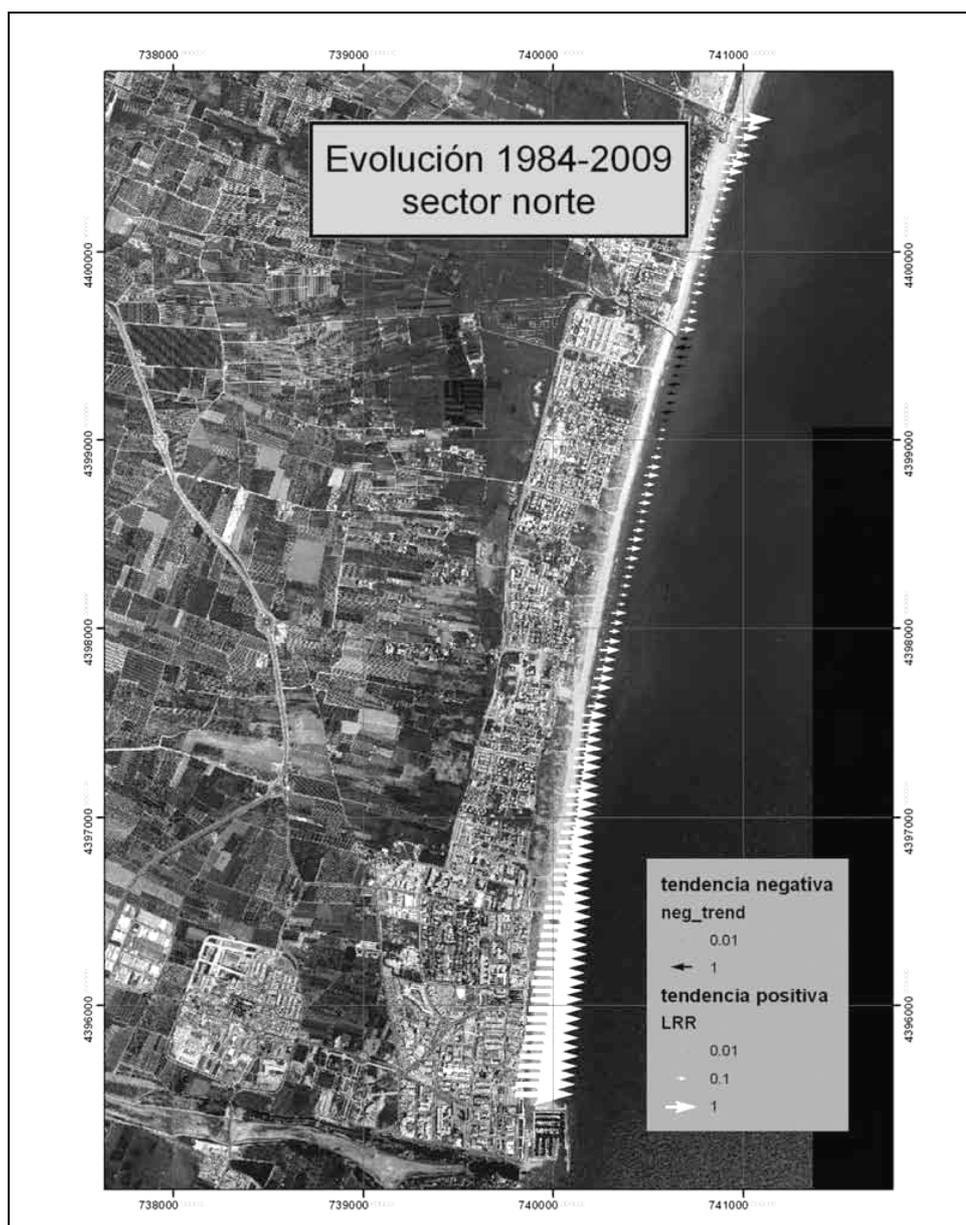


Figura 102. Mapa de tendencia evolutiva. La dimensión de la flecha muestra la magnitud del cambio, mientras que la dirección y el color de la misma designan si es positivo o negativo.

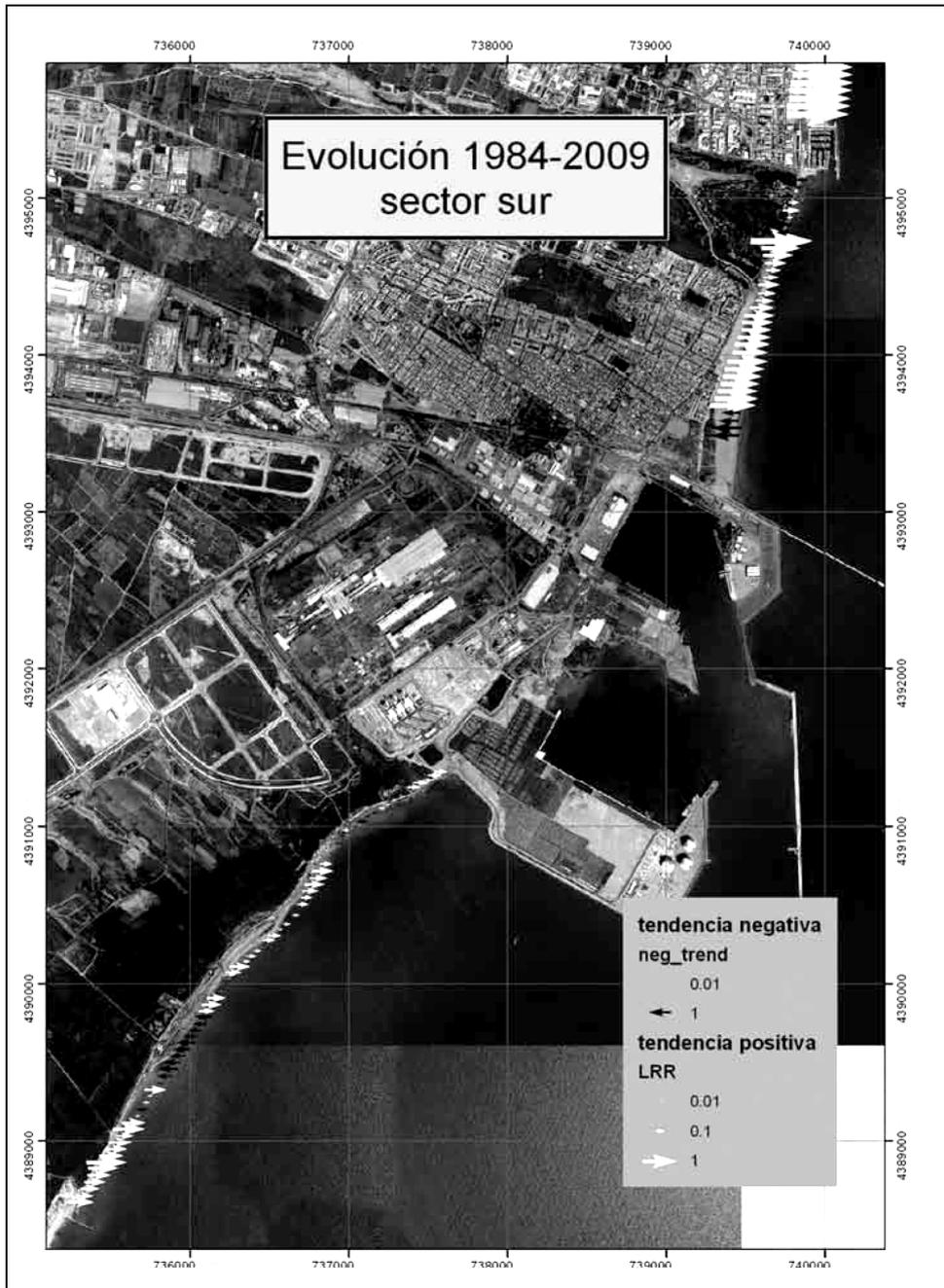


Figura 103. Mapa de tendencia evolutiva. La dimensión de la flecha muestra la magnitud del cambio, mientras que la dirección y el color de la misma designan si es positivo o negativo.

Se puede observar diversos efectos evolutivos globales. Así en la Figura 102 podemos observar:

- La mayor tasa de cambio al norte del puerto deportivo de Canet. Concretamente una clara tendencia acumulativa.
- La tendencia acumulativa se disipa y llega a ser negativa durante unos 500 años antes de volver a ser positiva, aunque escasamente, en la parte más septentrional.

En la Figura 103 podemos observar:

- Al sur del puerto de Sagunt, las escorias cementadas de los antiguos altos hornos, comentados anteriormente, hacen que la zona se mantenga estable.
- Tras un comportamiento heterogéneo, la zona más meridional vuelve a presentar una tendencia acumulativa.

5.5.3.2. Variaciones de la tendencia en los cambios durante los periodos analizados: 1984-2000 y 1999-2009

Las diferencias entre ambos periodos se van a analizar según dos parámetros: la tasa de cambio (los m/año que se ha desplazado las líneas en cada transecto en cada periodo) y la variación máxima observada (en cada transecto y en cada periodo).

5.5.3.2.1. Diferencia de tasa de cambio entre ambos periodos

Las tasas de cambio están representadas en la Figura 104. En ella se comparan las tendencias observadas durante los dos subperiodos analizados. El gráfico representa de izquierda a derecha las distancias al norte del término municipal. A una distancia de 5000 m se encuentra el puerto deportivo de Canet y el espacio vacío entre 8000 m y 9000 m corresponde al puerto de Sagunt.

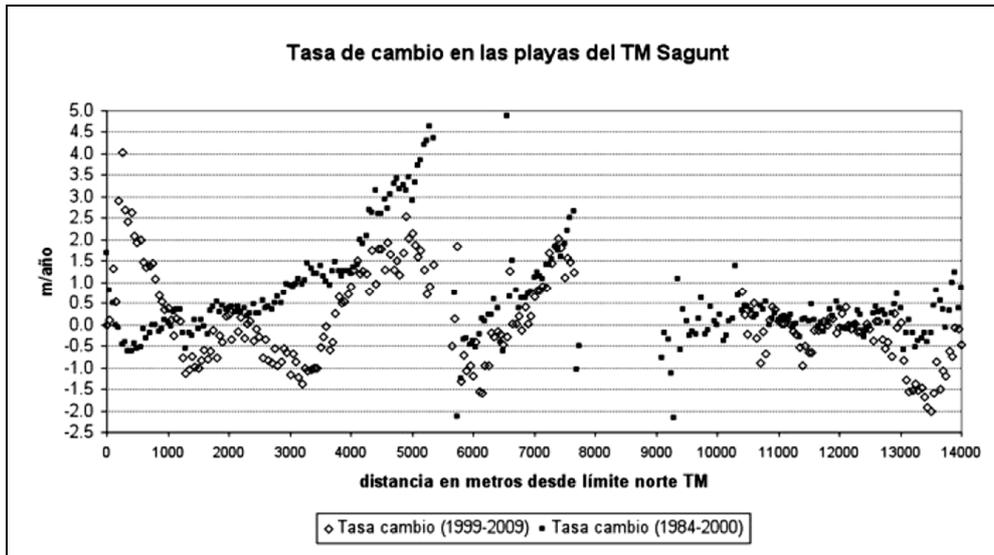


Figura 104. Comparación de las tasas de cambio del periodo 1984-2000 frente a las del periodo 1999-2009 (en metros).

Podemos realizar las siguientes comparaciones:

- Entre 0 m y 5000 m las tasas de cambio de ambas zonas presentan los comportamientos más diferentes entre sí.
- Entre 0 m y 1600 m, durante el periodo 1999-2009, se da una tasa acumulativa que disminuye progresivamente. El mismo sector, para 1984-2000, no parece presentar ninguna tendencia.
- Entre 1600 m y 2600 m, durante 1984-2000, la tendencia es levemente acumulativa 0,5 m / año. Pero el periodo 1999-2009 no presenta tendencia.
- Entre 2600 m y 5000 m, se produce un aumento de la tasa de cambio probablemente debido a la acumulación que produce el puerto deportivo de Canet como trampa sedimentaria. Sin embargo, en el periodo 1999-2009, esta tendencia acumulativa no se extiende tanto como en 1984-2000. Concretamente, entre 2600 m y 3200 m, el periodo 1999-2009 presenta una tendencia erosiva para luego, como se ha dicho, recuperar el comportamiento acumulativo esperado, si bien menor al periodo 1984-2000.
- Por último, la zona más meridional del estudio, que durante el periodo 1984-2000 se mantuvo sin tendencia específica, adquiere una ligera tendencia erosiva en el periodo 1999-2009.

5.5.3.2.2. Diferencia de cambio máximo entre ambos periodos

Los cambios máximos están representados en la Figura 105. En ella se comparan los máximos cambios durante los dos subperiodos analizados. El gráfico representa nuevamente de izquierda a derecha las distancias al norte del término municipal. A una distancia de 5000 m se encuentra el puerto deportivo de Canet y el espacio vacío entre 8000 m y 9000 m corresponde al puerto de Sagunt

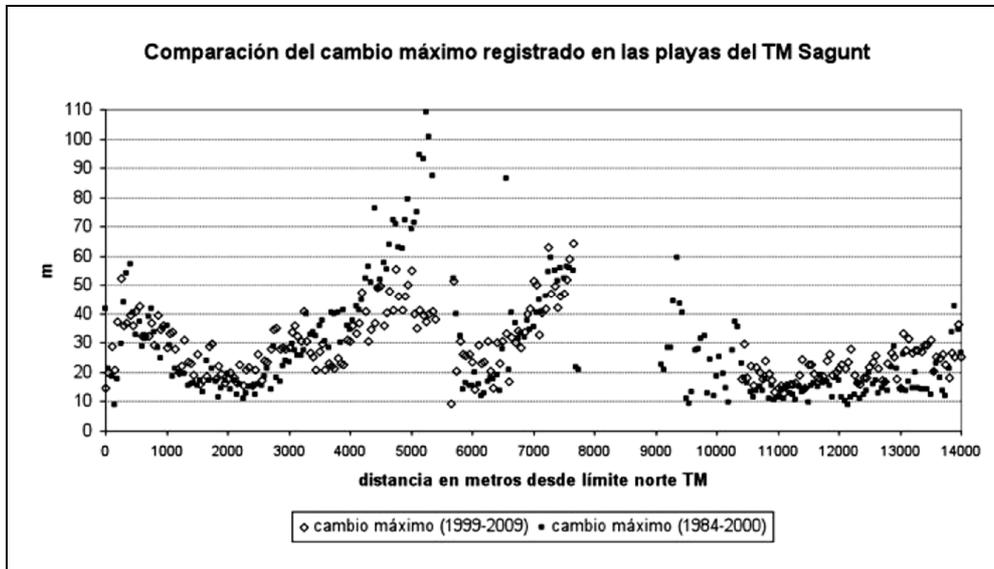


Figura 105. Comparación de la magnitud del cambio máximo registrado en los dos subperiodos considerados (en metros).

Se puede observar (Figura 105) que las zona que se observó con poca tendencia evolutiva son aquellos lugares que han permanecido estables y se encuentran por el norte, en algún segmento situado entre el puerto deportivo de Canet y el de Sagunt y, lógicamente, la zona de materiales cementados situados al sur del puerto de Sagunt. Por el contrario, aquellos ámbitos en los que se ha registrado tasas de cambio mayores (tanto erosivas como acumulativas) son los que presentan un cambio máximo mayor.

5.5.3.3. Variabilidad en los cambios a corto plazo

Es importante contrastar si se ha producido un cambio significativo en la variabilidad intranual de la línea de costa a lo largo del periodo estudiado. Playas de materiales más groseros presentan mayores pendientes y, en ellas, los cambios de posición de la orilla a lo largo de un año tienden a ser menores.

Para este análisis se han tomado en consideración tres periodos de estudio de aproximadamente un año. En la Tabla 37 se indican las fechas de las imágenes incluidas en cada uno de los periodos. Cubren un año o poco más, siendo el más corto el bloque

tres con siete líneas de costa (de enero a agosto de 2007), le sigue el bloque 2 con 11 líneas de costa (de julio de 2001 a agosto de 2002) y el periodo más largo corresponde al bloque 1 que con 9 líneas de costa cubre el periodo mayo 1986 hasta agosto de 1987.

Tabla 37. Combinaciones de resolución, vecindario y factor de densificación de puntos empleados.

Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3
22/05/1986	26/07/2001	08/01/2007
23/06/1986	30/10/2001	24/01/2007
10/08/1986	06/02/2002	09/02/2007
26/08/1986	19/02/2002	13/03/2007
29/10/1986	10/03/2002	03/07/2007
23/04/1987	02/04/2002	04/08/2007
26/06/1987	24/04/2002	20/08/2007
12/07/1987	26/05/2002	
13/08/1987	19/06/2002	
	29/07/2002	
	30/08/2002	

Para analizar la variabilidad a corto plazo se ha utilizado el análisis de los cambios máximos detectados en cada transecto en los tres periodos o bloques estudiados en esta fase. El resultado se muestra en la Figura 106.

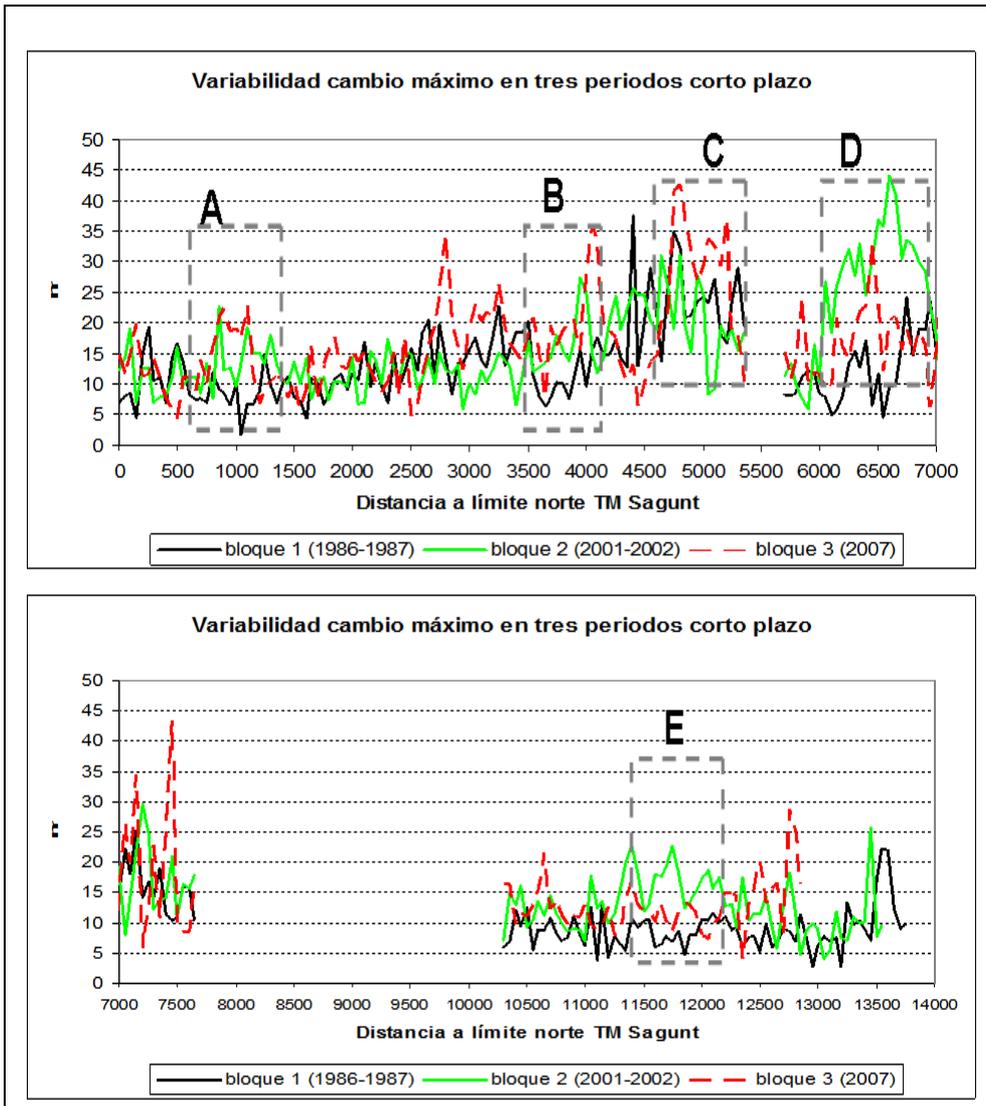


Figura 106. Comparación de la variabilidad intra-anual de la línea de costa reflejada por el cambio máximo producido a lo largo de tres periodos o bloques de un año aproximadamente de duración. La explicación de los espacios recuadrados se hace en el texto. El vacío de información entre 7500 y 10000 m se asocia al sector no estudiado de las infraestructuras del puerto de Sagunt.

Lo primero que llama la atención de la Figura 106 es una cierta coherencia a lo largo de todos los periodos. Ciertamente el sector norte (al menos los primeros 2500 m) y también el sector situado tras el puerto de Sagunt presenta una variabilidad intranual escasa (del orden de los 5-15 m). Conforme nos acercamos al puerto deportivo de Canet (5000 m respecto al límite norte del término de Sagunt) la variabilidad aumenta, al tiempo que disminuye la pendiente de la playa. La zona con menos coherencia a largo de

los años estudiados es justamente la playa situada junto al puerto de Sagunt con cambios muy importantes a largo del tiempo.

En la Figura 106 se han diferenciado cinco sectores en los que resulta más evidente la existencia de un cambio de tendencia:

En las posiciones A y B se observa que en el bloque más antiguo la variabilidad era sustancialmente más baja que en los otros dos, lo que señalaría una disminución de la pendiente de la playa (y también del tamaño de sus sedimentos).

En C, inmediatamente al norte del puerto deportivo de Canet, lo que se aprecia es una mayor variabilidad en 2007 que en el resto de los años analizados.

Las playas situadas junto al dique del puerto industrial de Sagunt (señalado con la letra D) presentan una enorme variabilidad, mientras que en el periodo 1986-87 cambiaba del orden de 10 m, en el periodo 2001-02 lo hacía prácticamente el doble y, en 2007 lo ha hecho en magnitudes que oscilan entre los 30 y los 45 m.

Tras los diques situados al sur del puerto llama la atención en E cambios un poco mayores en el periodo 2001-2002 que en el resto.

5.5.4. Conclusiones sobre la evolución de la costa de Sagunt

De los resultados presentados se desprende que la mayor parte de las playas de los términos de Sagunt y de Canet d'en Berenguer a lo largo del periodo de análisis (1984-2009) han presentado una tendencia claramente acumulativa. Este resultado es llamativo dado que en el contexto general del golfo de Valencia dominan los procesos erosivos.

Para comprender la dinámica de este sector es necesario tomar en consideración la existencia de dos infraestructuras importantes que segmentan el transporte longitudinal de sedimentos (el puerto deportivo de Canet y el puerto industrial de Sagunt) y el hecho de que parte de los materiales situados al sur del puerto de Sagunt están cementados como consecuencia del efecto de las escorias procedentes de la industria siderúrgica que durante décadas fueron vertidas a la costa. Este último hecho provoca que las costas al sur del puerto de Sagunt, que debía comportarse como claramente erosivas, se mantengan estables, con sólo alguna pequeña señal de erosión en los años más recientes.

Dentro del periodo analizado, la obra que mayor impacto ha causado es el puerto deportivo de Canet que ha propiciado una sustancial ampliación de la playa. Ahora bien, los resultados aportados indican variaciones en el comportamiento en zonas diferentes. Esta variabilidad es observable por ejemplo al comparar dos perfiles: el *transecto nº 102* (situado a 5050 m de límite norte del término municipal) y que dista 350 m del dique norte de puerto deportivo de Canet (Figura 107) y el *transecto nº 77* (a 3800 m del límite norte) y a 1600 m del dique de puerto deportivo de Canet (Figura 108).

En el perfil 102 (Figura 107) se observa una acumulación marcada, del orden de 60 m a lo largo de todo el periodo analizado.

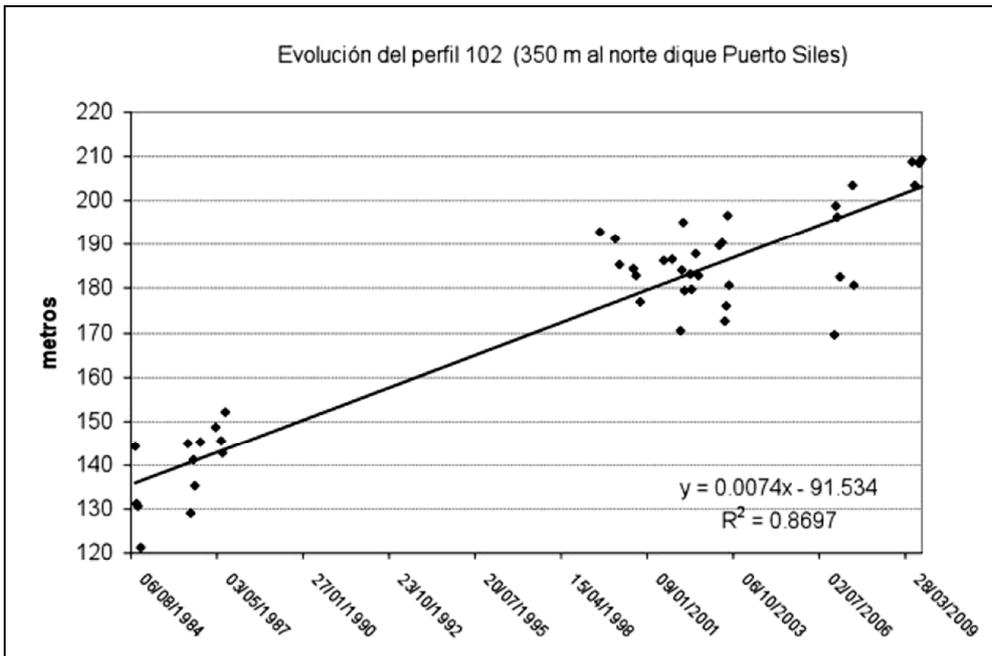


Figura 107. Representación de la evolución seguida por la playa en el segmento o perfil 102. En el eje de ordenadas: distancia a la línea de referencia, en metros. En el eje de abscisas: tiempo. La pendiente de la recta ajustada indica la tendencia del cambio. En concreto se indica una tendencia de cambio de 0,74 centímetros por día, o bien 2,7 m por año.

En el perfil 102 (Figura 107) se observa una acumulación menor, del orden de 20 m a lo largo de todo el periodo analizado. De hecho, es a partir del cambio de siglo cuando se aprecia realmente una tendencia.

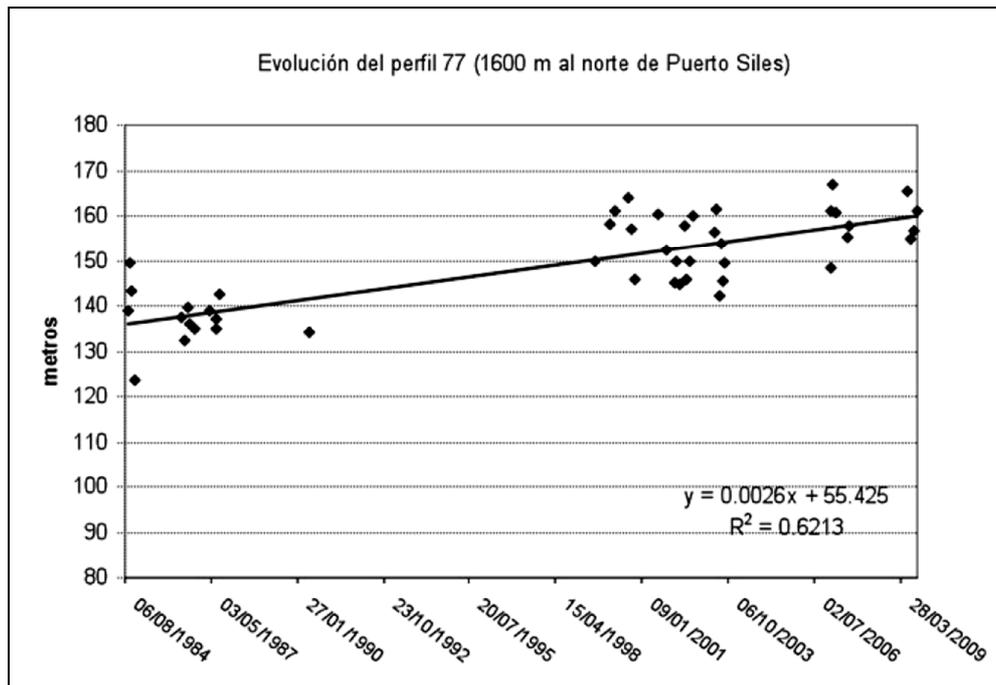


Figura 108. representación de la evolución seguida por la playa en el segmento o perfil 77. En el eje de ordenadas: distancia a la línea de referencia, en metros. En el eje de abscisas: tiempo. La pendiente de la recta ajustada indica la tendencia del cambio. En concreto se indica una tendencia de cambio de 0,0026 m por día o bien, 0,94 m por año.

Tras la construcción del dique del puerto deportivo de Canet, y dado el transporte longitudinal norte-sur del golfo de Valencia, eran esperables dos consecuencias: acumulación en la vertiente norte y erosión en la vertiente sur. En los perfiles 106 y 77 analizados se observa la tendencia acumulativa esperable al norte del puerto. Es previsible que el efecto acumulativo sea más exagerado más cerca del puerto para irse disipando en la lejanía hasta llegar a un punto en que la estructura construida no tenga ningún efecto. Este hecho es el que justifica que la acumulación observada en el perfil 106 (a 350 m al norte del puerto) sea más pronunciada que en el perfil 77 (a 1600 m al norte del puerto).

Queda, sin embargo, una duda sobre si la magnitud del impacto a lo largo del tiempo (visto de forma global) permanece estable o es cambiante. Si calculamos el promedio de las tasas de cambio para el periodo 1984-2000 y para el periodo 1999-2009 descubrimos que, a lo largo del periodo más antiguo, la tasa de crecimiento media fue de 0,63 m/año mientras que para el segundo lo fue únicamente en un 0,12 m/año. ¿Por qué ha disminuido de forma tan exagerada la tasa de crecimiento? Hemos expuesto anteriormente que en la costa saguntina hay factores estructurales que favorecen la acumulación (los diques portuarios) y limitan la erosión (la existencia de unos materiales cementados que el oleaje es capaz de movilizar). Por tanto, ¿qué significa que haya

menos acumulación? Básicamente, que el volumen de sedimentos que es transportado por el sistema litoral hacia el sur ha disminuido en este periodo. Este hecho es coherente con trabajos previos para las costas de la Safor realizados mediante fotointerpretación en imágenes aéreas. Este es un hecho relevante dado que advierte de la menor disponibilidad de arena en el sistema costero en el golfo de Valencia y, por tanto, de una situación sedimentaria cada día más frágil y delicada.

El análisis de la variabilidad intranual que aquí hemos planteado permite detectar cambios no sólo en la anchura de la playa sino que sugiere que se ha tenido que producir una modificación en la configuración (pendiente) y probablemente en la composición (textura). Esto resulta muy complicado de reconocer de otra manera dado que no se dispone de registros topográficos y granulométricos de este tipo de datos para prácticamente ningún lugar de nuestras costas.

5.6. Conclusiones

En este capítulo se ha expuesto un conjunto de aplicaciones particulares de estudios geomorfológicos derivados de líneas de costa. La peculiaridad de estos estudios es el uso de la metodología de extracción de línea de costa propuesto en los capítulos previos.

Concretamente, se han mostrado resultados de estudios en tres resoluciones temporales: corto, medio y largo plazo.

- 1) En referencia a detecciones a corto plazo, se ha mostrado cómo el empleo de múltiples líneas de costa permiten caracterizar y diferenciar el impacto de uno o múltiples temporales costeros permitiendo valorar la importancia o significación que los distintos tipos de condicionantes (geográficos, morfológicos y de abastecimiento sedimentario) tienen a la hora de explicar tanto el impacto como los procesos de recuperación de una playa.
- 2) A medio plazo, se ha mostrado cómo es posible registrar y evaluar el proceso de recuperación de un espacio costero a lo largo del tiempo tras determinados impactos. Por otro lado, se ha mostrado cómo la variabilidad de la línea de costa dentro de un mismo año se relaciona con el tipo de perfil, pendiente y textura en la costa.
- 3) A más largo plazo, se ha mostrado cómo una nueva estructura en la costa modifica el comportamiento acumulativo y erosivo de sus zonas más cercanas y cómo este efecto se disipa en la distancia y se detectan variaciones en las magnitudes de los cambios mesoescalares, lo que permite relacionarlo con los fenómenos de desabastecimiento sedimentario a escala de célula sedimentaria, que no siempre son sencillos de reconocer y cuantificar.

Evidentemente, se dan ciertas interrelaciones a tener en cuenta en procesos futuros. Se ha de ser consciente de que las líneas registradas son instantáneas y sujetas a las condiciones de un momento determinado. Las tendencias a medio y largo plazo serán posibles una vez se conozca la variabilidad de la posición a corto plazo por razones meteorológicas o mareales. A su vez, las tendencias a largo plazo serán posibles una vez conocidas las variabilidades propias del medio plazo.

Se ha mostrado cómo las variaciones a corto plazo pueden ser indicativas de la pendiente y textura de cada punto de la línea de costa. Se ha mostrado cómo el hecho de tratar la información por zonas y no de forma meramente puntual, permite realizar análisis en que se disipa parcialmente los efectos a muy corto plazo como pueda ser del oleaje, lo cual no implica que no deban tomarse en cuenta los efectos de marea en un futuro.

Se ha mostrado que las líneas de costa se ven condicionadas por la morfología costera y se ha apuntado a que las propias líneas de costa pueden ser indicativas de morfología costera cuando ésta sea desconocida.

De forma específica, se ha demostrado cómo las imágenes Landsat TM/ETM+ permiten disponer de un cartografiado costero histórico. Ello tiene un interés en sí mismo para el cartografiado del pasado y prever interrelaciones, causas y efectos con objeto de mejorar la monitorización de estos espacios costeros en el futuro.

La realización de aplicaciones reales y análisis geomorfológicos a partir de las líneas de costa obtenidas con la metodología expuesta en los capítulos precedentes permite apuntar alguna conclusión técnica que no tiene contraste numérico sino un contraste frente a la "lógica natural" del fenómeno estudiado como, en este caso, la dinámica de las playas.

En este sentido vale la pena mencionar al menos dos aspectos:

- (i) El primero será verificar que la banda 5 adecuada resultado más conveniente que la banda 4, de momento, para la realización de estudios en playas. Para explicar esto conviene recordar que en el capítulo II, cuando se analizaba el algoritmo sobre las imágenes QuickBird en las playas entre Valencia y Cullera, se encontraban errores groseros cuando había franjas de espuma en la zona de rompientes de la ola. Ello provocaba saltos bruscos en la disposición de la línea de costa. En el capítulo IV se evaluó el algoritmo con imágenes Landsat y en espacios con defensas longitudinales rigidizadas por bloques de escollera, por lo que no es de esperar un gran efecto de la espuma. Cuando ahora se ha aplicado el procedimiento a playas naturales, se ha hecho sobre la banda 5 y no se ha encontrado ningún caso de líneas entrecortadas aún cuando se sabe que ha habido imágenes tomadas con alturas máximas del mar superiores a 1,2 m. Este hecho sugiere que en esta longitud de onda, el efecto de la espuma está mucho más matizado que sobre la longitud de onda de la banda 4 (NIR) que se corresponde con la banda infrarroja de QB. No obstante, las precisiones alcanzadas para las bandas 4 y 7 obligan a seguir teniéndolas presentes en trabajos futuros.
- (ii) El segundo aspecto a destacar es que, tanto en análisis o fenómenos de corto plazo (impacto de temporales y recuperación de la playa tras los mismos), como en los estudios de tendencias, el análisis de las líneas de costa obtenidas con el método propuesto ha podido ser explicado sin que crease "incoherencias" con la dinámica natural esperable. Esta coherencia en la dinámica de las playas estudiadas avala la metodología empleada en la extracción de la línea de costa cuando se trabaja en entornos de playas naturales. Esta es una conclusión importante pero que deberá, a medio plazo, ser verificada con mediciones reales en playas utilizando herramientas de alta precisión.

Capítulo VI

CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

"Eres más denso que yo, que ya es decir"

Josep E. Pardo (director de esta tesis) a un servidor (autor)

6.1 Conclusiones

Se ha desarrollado una metodología mediante la cual se pueden obtener automáticamente líneas de costa con precisión sub-píxel partiendo de las bandas infrarrojas de los sensores Landsat TM/ETM+/OLI.

En el planteamiento de los objetivos se preveían dos dificultades: la obtención de la línea de costa con precisión sub-píxel en cada escena y la georreferenciación de tales líneas. A ello se ha debido añadir la evaluación del método, un aspecto que ha sido crucial. Así pues, los logros parciales de la tesis son los siguientes:

- 1) Se ha propuesto un método para evaluar las líneas de costa. El fundamento es calcular la distancia entre los puntos que componen las líneas de costa obtenidas y una línea de referencia. Este planteamiento no es novedoso en sí mismo pero sí la forma de llevarlo a cabo. La primera dificultad es cómo disponer de alineaciones de costa que se hayan mantenido constantes a lo largo

del tiempo y sirvan de referencia para la evaluación: dependiendo del capítulo, se han tomado dos definiciones para estas líneas de referencia. La segunda dificultad, más ligada a la propia algorítmica, ha sido aprovechar la propia escena procesada para indicar a cada punto obtenido cuál es su orientación hacia el mar y, de esta manera, poder particularizar la dirección con que calcular la distancia a la línea de referencia e indicar su dirección y sentido.

- 2) Para la georreferenciación de las líneas se ha decidido emplear el método LUFT (*Local Upsampling of the Fourier Transform*) o ampliación local del máximo de correlación. Para verificar la validez del método para esta aplicación concreta se ha propuesto una metodología de evaluación, independiente del proceso de obtención de líneas de costa, y así evaluar cómo afectan sus parámetros (tamaño de las imágenes y factor de ampliación del máximo de correlación) a las precisiones. Se dan aquí dos particularidades: la gran cantidad de resultados analizados y haber ideado la manera de disponer de imágenes de traslación conocida sub-píxel sin el uso de interpolaciones. Así, a partir de imágenes de alta resolución se han generado, mediante dos procesos diferentes de disminución de resolución, dos conjuntos de imágenes de resolución equivalente a Landsat. Con los resultados se han podido demostrar varios aspectos:
 - a. El método lleva a mejores resultados cuanto mayor es el tamaño de las imágenes con que se trabaje y cuanto más se amplíe el máximo de correlación. Sin embargo, aumentar más de 10 veces la resolución del máximo de correlación, garantiza que todas las posibles soluciones alcancen la décima de píxel (3 m para este caso) de precisión, pero no la incrementarán. Es decir, no por aumentar el máximo de correlación 1000 veces se estará obteniendo una precisión de la milésima de píxel.
 - b. Las diferencias entre la imagen a georreferenciar y la imagen de referencia afectan al resultado. Concretamente, se ha observado que georreferenciar con fragmentos distintos de una misma imagen lleva a resultados distintos (aunque a mayores tamaños de imagen se minimiza este efecto).
 - c. De los dos conjuntos con que se han generado imágenes con resolución de 30 m/píxel, se ha obtenido mejor precisión en el conjunto de imágenes que aproximaban con mayor detalle las escenas Landsat TM. Se han simulado imágenes Landsat TM a partir de imágenes de alta resolución mediante dos métodos, en el primero se promedian los valores de los píxeles, mientras que en el segundo se pondera mediante una función gaussiana basada la función de dispersión (*Point Spread Function*) de la banda 5 del sensor TM de Landsat 5. Mediante el primer método se ha obtenido un error de ± 3 m (± 0.1 píxeles) mientras que con el segundo se ha obtenido un error de ± 2 m (± 0.07 píxeles), error esperable en su aplicación sobre imágenes Landsat TM/ETM+/OLI.

- d. El comportamiento del error de ± 2 m no es aleatorio. Se han obtenido resultados exhaustivos para realizar una descripción sub-píxel del comportamiento del error. Se ha comprobado empíricamente que tales ± 2 m son la amplitud de una onda de error. Es previsible saber si el error cometido es positivo o negativo.
- 3) El método para la obtención de líneas de costa se fundamenta en refinar la posición de una línea de costa inicial. Para ello se obtiene una función matemática que ajuste, mediante mínimos cuadrados, los niveles de intensidad de los píxeles que rodean cada píxel de la línea de costa aproximada. El Laplaciano de esta función ajustada permite obtener fragmentos de línea de costa sub-píxel que al unirse conforman la línea de costa definitiva. El método de evaluación se ha descrito anteriormente y se ha llevado a cabo en dos ocasiones:
- a. En primer lugar, para evitar que las líneas evaluadas combinaran errores de extracción y de georreferenciación, se ha trabajado con un conjunto de imágenes QuickBird. Concretamente, se ha fotointerpretado la línea de costa de cada imagen y, remuestreando la misma imagen a diferentes resoluciones, se han comparado las líneas obtenidas en estas imágenes con aquellas fotointerpretadas. En esta evaluación se concretó que para el resto de la tesis se procesarían las líneas analizando vecindarios de 7×7 píxeles y se obtendrían puntos cada 7,5 m. Los errores medios en estos experimentos para resoluciones de 30 m/píxel han oscilado entre -0,8 y 2 m, con errores medios cuadráticos entre 4 y 7 m.
- b. En segundo lugar, habiendo evaluado las precisiones de la extracción de las líneas de costa y la georreferenciación por separado, se han integrado ambos procesos para aplicar la metodología sobre imágenes Landsat TM/ETM+/OLI. En este caso, se ha empleado como referencia un conjunto de zonas estabilizadas artificialmente, como escolleras. Tras una primera evaluación se observó que las líneas tendían a adentrarse en el mar y que este desplazamiento se relacionaba con la intensidad de los píxeles que rodeaban cada punto de la línea de costa. Se ha podido realizar una modelización con la que cada punto obtenido para la línea de costa es corregido en función de la intensidad que le rodea. Esta última corrección es el tercer paso metodológico propuesto por esta tesis y que no fue previsto en el desarrollo inicial. Tras el proceso completo aplicado sobre 348 imágenes (unos 430.000 puntos) el error medio esperable es 0 m y la desviación típica es igual a 6 m. Por otro lado, aunque el error medio de todo el estudio sea nulo, el error medio particular de cada línea procesada oscila entre -7 m y +7 m para cualquiera de los sensores y bandas procesados. Llama

especialmente la atención que las líneas procesadas de Landsat 8 tengan errores medios entre -3 y +4 m.

- 4) Alcanzar esta precisión métrica ha permitido realizar observaciones más detalladas.
 - a. Sobre el uso de diferentes bandas infrarrojas. Los errores medios de la banda 4 de Landsat TM/ETM+ son los que menos afectados se ven por los niveles de intensidad vecinos a la costa y, por tanto, estas líneas apenas requieren corrección por radiometría. Por el contrario las bandas 5 y 7 sí requieren de esta corrección para alcanzar sus mejores precisiones. Una vez hecha esta corrección, las tres bandas se homogeneizan.
 - b. El hecho de que las distintas bandas se hayan comportado de forma diferente en ambas zonas de análisis permite inducir un modelo de corrección de las líneas de costa en función de los niveles de intensidad.
 - c. Una vez realizadas todas las evaluaciones, el mejor equilibrio entre error medio y desviación se ha encontrado en la banda 5 de Landsat TM/ETM+ lo cual justifica que en las publicaciones Pardo-Pascual et al. (2012) y Pardo-Pascual et al. (2014) se emplee la banda 5. Cabe señalar, respecto a las imágenes de Landsat 8 que, en este caso, la precisión de las tres bandas analizadas es básicamente la misma si bien, dado que se ha contado con un número sustancialmente menor de imágenes, esta aseveración deberá ser corroborada en el futuro con nuevos datos.
- 5) Por último, el algoritmo completo ha sido empleado en diversos estudios geomorfológicos. Estos resultados son cruciales puesto que los experimentos en zonas estabilizadas hacen prever que, sobre las playas, existe modelos de error no cuantificados en esta tesis. Así pues, aunque sería deseable cuantificar estos modelos de error, no se dispone de la información necesaria para ello en la actualidad. De los resultados de aplicar la metodología en espacios costeros se extraen dos tipos de conclusiones:
 - a. Por un lado, como calibración de la metodología desde una lógica completamente distinta, el hecho de que los estudios geomorfológicos derivados de estas líneas sean coherentes con los cambios esperables en las playas (atendiendo a lo que señala la bibliografía) avala el uso de las líneas de costa en su estado actual.
 - b. Por otro lado, desde un punto de vista meramente aplicado, ha sido posible realizar estudios geomorfológicos concretos a distintas escalas temporales y espaciales cuyos resultados evidencian la utilidad y aplicabilidad real de estas líneas de costa.

Así pues, se dispone de una metodología para obtener líneas de costa con precisión sub-píxel a partir de escenas Landsat TM/ETM+/OLI. Su evaluación métrica y su utilidad para caracterizar la dinámica de las playas permiten concluir que el objetivo de la tesis ha sido cubierto. La solución aportada, si bien no se puede considerar definitiva, puede considerarse operativa para aportar una solución útil en un gran número de aplicaciones.

No sólo se ha establecido un flujo de trabajo para la obtención de líneas de costa con precisión sub-píxel, sino además un nuevo marco de trabajo. El flujo de trabajo presentado es potencialmente aplicable a escenas de diversos sensores con resoluciones medias similares a las de Landsat o al futuro Sentinel 2. Haber demostrado la viabilidad de las líneas de costa obtenidas en imágenes Landsat para análisis geomorfológicos permite llevar a cabo estudios retrospectivos hasta ahora vetados en gran medida. También, dado que los satélites Landsat 7 y Landsat 8 registran imágenes de todo el planeta cada 16 días, es posible que la metodología tenga continuidad temporal a futuro y una aplicabilidad global en potencia.

6.2 Investigaciones futuras

Desde el punto de vista geomorfológico, cada línea de costa es reflejo de un instante en un espacio costero. Se dispone de un nuevo recurso para obtener esta información desde imágenes Landsat. Sin embargo, ha de verificarse qué línea se está registrando en casos concretos de playas. Especialmente queda pendiente analizar la utilidad de las líneas de costa en espacios de mayor rango mareal donde la línea instantánea varía mucho en muy escaso periodo de tiempo. Probablemente, la línea de costa deba relacionarse con el nivel del mar y las características tridimensionales de la playa en cada instante para su adecuado análisis geomorfológico.

La metodología es potencialmente útil sobre otros sensores entre los que cabe destacar el futuro satélite Sentinel 2 de la Agencia Espacial Europea (ESA), cuya resolución media y bandas espectrales previstas son de similares características. El conjunto de plataformas de resolución media puede suponer un nuevo punto de inflexión en la monitorización global de usos del suelo, del medio ambiente y, obviamente, de los sectores costeros.

Desde el punto de vista metodológico, cada parte del flujo de trabajo implica un camino en sí mismo. Puede explorarse el proceso de extracción de la línea de costa desde diversos puntos de vista como la modificación del grado o forma del polinomio de ajuste, la ponderación aplicada o incluso el uso de umbrales adaptativos o zonales para una correcta umbralización automática.

Por otro lado, la extracción de la línea de costa puede entenderse como un caso particular de detección de bordes sub-píxel y, por tanto, todo algoritmo similar podría trasladarse a otras aplicaciones. Sería importante poder predecir una desviación esperable y un nivel de probabilidad en cada punto de línea de costa obtenido y no con

respecto al conjunto de puntos obtenidos. Si a ello sumamos que el proceso de georreferenciación se sirve de una ampliación del máximo de correlación en el espacio de frecuencias se ve una clara invitación a los procesos de hiperresolución y sus implicaciones. A su vez, dado que las bandas infrarrojas han llevado a diferentes resultados y a su modelización, cabe preguntarse a qué se debe este hecho y explorar soluciones combinadas, con objeto de obtener una solución que no requiera corrección (mediante combinación de bandas o clasificación difusa) o cuya interpretación aporte mayor información sobre el terreno.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, L.P., Ferreira, Ó. y Taborda, R., (2011). Geoprocessing tool to model beach erosion due to storms: application to Faro beach (Portugal). *Journal of Coastal Research*, SI 64, pp. 1830 - 1834.

Almonacid-Caballer, Jaime (2007). *Desarrollo e implementación de un método semi-automático para la detección de la línea de costa con precisión subpíxel en imágenes satelitales multiespectrales*. Proyecto fin de carrera, E.T.S.I. Geodesia Cartografía y Fotogrametría.

Almonacid-Caballer, J., Pardo-Pascual, J.E., Ruiz, L.A. y Palomar-Vázquez, J.M. (2011). Caracterización de los cambios de costa tras el temporal de noviembre de 2001 a partir de imágenes Landsat ETM+. *Actas de las VI Jornadas de Geomorfología Litoral*, Tarragona, pp. 19 - 22.

Almonacid-Caballer, J., Pardo-Pascual, J. E. y Ruiz, L. A. (2013). Detección automática de la línea de costa con precisión subpíxel en imágenes Landsat 7 con error de bandeo. *Actas del XV Congreso de la Asociación Española de Teledetección INTA*, Torrejón de Ardoz (Madrid), pp. 270 - 273.

Armaroli, C., Ciavola, P., Perirni, L., Calabrese, L., Lorito, S., Valentini, A. y Masina, M. (2012). Critical storm thresholds for significant morphological changes and damage along the Emilia-Romagna coastline, Italy. *Geomorphology*, 143 - 144, pp. 34 - 51.

Bayram, B., Acar, U. y Ari, A. (2008). A novel algorithm for coastline fitting through a case study over the Bosphorus. *Journal of Coastal Research*, 24 (4), pp. 938 - 991.

Benavente, J. , Gracia, F.J. y López-Aguayo, F. (2000). Empirical model of morphodynamic beachface behaviour for low-energy mesotidal environments. *Marine Geology*, 167, pp. 375 - 390.

Bender, C.J. y Dean, R.D. (2003). Wave field modification by bathymetric anomalies and resulting shoreline changes: a review with recent results. *Coastal Engineering*, 49, 125 - 153.

Boak, E.H. y Tunner, I.L., (2005). Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, 21 (4), pp. 688 - 703.

Brumby, S.P., Theiler, J., Bloch, J.J. y Harvey, N.R. (2002). Evolving land cover classification algorithms for multi-spectral and multi-temporal imagery. *Proceedings of Imaging Spectrometry*, SPIE-4480, pp. 120 - 129.

Campbell, T.J. y Jenkins, M.F. (2003). Design considerations for hot spot erosion areas on beach nourishment projects. *28th International Conference on Coastal Engineering*. World Scientific, London, pp. 3642 - 3648.

Chalermwat, P., El-Ghazawi, T. y Le Moigne, J. (2001). 2-Phase GA-based image registration on parallel clusters. *Future Generation Computer Systems*, 17 (4), pp. 467 - 476.

Chen, Q., Defrise, M. y Deconinck, F. (1994). Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 16 (12), pp.1156 - 1168.

Chu, Z.X., Sun, X.G., Zhai S.K. y Xu, K.H. (2006). Changing pattern of accretion/erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China: Based on remote sensing images. *Marine Geology*, 227 (1-2), pp. 13 - 30.

Cohen W.B., Yang, Z. y Kennedy, R. (2010). Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 2. TimeSync - Tools for calibrations and validation. *Remote Sensing of Environment*, 114 (12), pp. 2911 - 2924.

Davidson-Arnott, R. (2010). *Introduction to the coastal processes and geomorphology*. Cambridge University Press, Cambridge. 456 pp.

Del Río, L. y Gracia, F.J. (2008). Fotointerpretación aplicada al análisis de la línea de costa. *Actas de las Jornadas Técnicas "Las nuevas técnicas de información geográfica al servicio de la gestión de zonas costeras: Análisis de la evolución de playas y dunas"*, Servicio Publicaciones UPV, pp. 62 - 68.

Del Río, L., Plomaritis, T.A., Benavente, J., Valladares, M. y Ribera, P. (2012). Establishing storm thresholds for the Spanish Gulf of Cádiz coast. *Geomorphology*, 143 - 144, pp. 13 - 23.

Deronde, B., Houthuys, R., Sterckx, S., Debruyne, W., y Fransaer, D. (2004). Sand dynamics along the Belgian coast based on airborne hyperspectral data and lidar data. *EARSel eProceedings*. 3 (1), pp. 26 -33.

- Derrode, S. y Ghorbel, F. (2001). Robust and efficient Fourier-Mellin transform approximations for gray-level image reconstruction and complete invariant description. *Computer vision and image understanding*, 83 (1), pp. 57 - 78.
- Dolan, R. Hayden, B.P. y Heywood, J. (1978). A new photogrammetric method for determining shoreline erosion. *Coastal Engineering*, 2, 21 - 39.
- Edelman, T. (1968). Dune erosion during storm conditions. *Proceedings of the 11th Conference on Coastal Engineering (London)*, 2, pp. 719 - 722.
- Ekercin, S. (2007). Coastline change assessment at the Aegean Sea Coasts in Turkey using multitemporal Landsat imagery. *Journal of Coastal Research*, 23 (3), pp. 691 - 698.
- Espinosa, V. y Rodríguez, I. (2009). Evolución costera del tramo comprendido entre San Juan de los Terreros y playas de Vera (Almería). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 22 (1-2), pp. 3- 12.
- Farris, A.S. y List, J.L., (2007). Shoreline change as a proxy for subaerial beach volume change. *Journal of Coastal Research*, 23 (3), pp. 740-748.
- Ferreira, O. (2005). Storm groups versus extreme single storms: predicted erosion and management consequences. *Journal of Coastal Research*, SI 42, pp. 221-227.
- Fienup, J.R. (1997). Invariant error metrics for image reconstruction. *Applied Optics*, 36 (32), pp. 8352 - 8357.
- Foody, G.M., Muslim, A.M. y Atkinson, P. M. (2005). Super-resolution mapping of the waterline from remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 24, pp. 5381 - 5392.
- Foroosh, H., Zerubia, J.B. y Berthod, M. (2002). Extension of phase correlation to sub-pixel registration. *IEEE Transactions on Image Processing*, 11 (3), pp. 188 - 200.
- Frazer, L.N., Genz, A.S. y Fletcher, Ch. H. (2009). Towards parsimony in shoreline prediction (I): Basis function methods. *Journal of Coastal Research*, 25 (2), pp. 366 - 379.
- Frazier, P.S. y Page, K.J., (2000). Water body detection and delineation with Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66 (12), pp. 1461 - 1467.
- García-Haro, F.J. (2005). Corrección de la degradación espacial debida al PSF del sensor en teledetección. *XI Congreso Nacional de Teledetección*. Puerto de la Cruz (Tenerife).
- Gens, R. (2010). Remote sensing of the coastlines: detection, extraction & monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 31 (7), pp. 1819 - 1836.
- Genz, A.S., Frazer, L.N. y Fletcher, Ch. H. (2009). Towards parsimony in shoreline prediction (II): Applying basis function methods to real and synthetic data. *Journal of Coastal Research*, 25 (2), pp. 380-392.

Gervais, M., Balouin, Y, y Belon, R. (2012). Morphological response and coastal dynamics associated with major storm events along the Gulf of Lions Coastline, France. *Geomorphology*, 143 - 144, pp. 69 - 80.

Guariglia, A., Buonamassa, A., Losurdo, A., Saladino, R., Trivigno, M.L., Zaccagnino, A. y Colangelo, A. (2006). A multisource approach for coastline mapping and identification of the shoreline changes. *Annals of Geophysics*, 49 (1), pp. 295 - 304.

Guizar-Sicairos, M., Thurman, S. T., y Fienup, J. R. (2008). Efficient sub-píxel image registration algorithms. *Optics Letters*, 33 (2), pp. 156 - 158.

Guillen, J., Stive, M.J.F. y Capobianco, M. (1999). Shoreline evolution of the Holland coastal on a decadal scale. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 517 - 536.

Haerens, P., Bolle, A., Trouw, K. y Houthuys, R. (2012). Definition of storm thresholds for significant morphological change of the sandy beaches along the Belgian coastline. *Geomorphology*, 143 - 144, pp. 104 - 117.

Heathfield, D.K., Walker, I.J. y Atkinson, D.E. (2013). Erosive water level regime and climatic variability forcing of beach-dune systems on south-western Vancouver Island, British Columbia, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, pp. 751 - 762.

Hermosilla, T., Ruiz, L.A., Recio, J.A. y Cambra-Lopez, M. (2012). Assessing contextual descriptive features for plot-based classification of urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 106 (1), pp. 124 - 137.

Hoeke, R.K., Zarrillo, G.A. y Synder, M. (2001). *A GIS based tool for extracting shorelines positions from aerial imagery (BEACHTOOLS)*. Coastal Engineering Technical Note IV, Washington DC: US Army Corps of Engineers, 12 pp.

Holland K.T., Holman, R. A., Lippmann, T.C., Stanley, J. y Plant, N. (1997). Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 22 (1), pp. 81 - 92.

Hu, Z. y Acton, S.T. (2000). Morphological pyramid image registration. *In Proceedings: 4th IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation*, Austin (Texas).

Jianya, G., Haiganga, S., Guoruia, M. y Qimingb, Z., (2008). A Review of multi-temporal remote sensing data change detection algorithms. *The international archives of the photogrammetry, Remote sensing and spatial information sciences*, 37 (B7), pp. 757 - 762.

Jiménez, J.A., Sánchez-Arcilla, A., Bou, J. y Ortiz, M.A. (1997). Analysis short-term shoreline changes along the Ebro Delta (Spain) using aerial photographs. *Journal of Coastal Research*, 13 (4), pp. 1256 - 1266.

Jiménez, J.A., Sancho-García, A., Bosom, E., Valdemoro, H.I. y Guillén, J. (2012). Storm induced damages along the Catalan coast (NW Mediterranean) during the period 1958-2008. *Geomorphology*, 143 - 144, pp. 24 - 33.

- Jingying, J., Xiaodong, H., Kexin, X. y Qilian, Y. (2002). Phase Correlation-based matching method with sub-pixel accuracy for translated and rotated images. *International Conference on Signal Processing Proceedings*, 1, pp. 752 - 755.
- Jishuang, Q y Chao W. (2002). A multi-threshold based morphological approach for extraction coastal line feature in remote sensed images. *Pecora 15/Land Satellite Information IV Conference (Denver, Colorado), ISPRS Comission I/FIEO*, pp. 319 - 338.
- Kant, Y. y Badarinath K.V.S. (2002). Sub-pixel fire detection using Landsat-TM thermal data. *Infrared Physics and Technology*, 43 (6), pp. 383 - 387.
- Kennedy, R.E., Yang, Z. y Cohen, W.B. (2010). Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr - Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 114 (12), pp. 2897 - 2910.
- Kenney, C.S., Manjunath, B.S., Zuliani, M., Hower, G.A. y Nevel, A.V. (2003). A condition number for point matching with application to registration and postregistration error estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 25 (11), pp. 1437 - 1454.
- Kish, S.A. y Donoghue, J.F. (2013). Coastal response to storms and sea-level rise: Santa Rosa Island, Northwest Florida, U.S.A. *Journal of Coastal Research*, SI 63, pp. 131 - 140.
- Klinger, T., Ziems, M., Heipke, C., Schenke, H.W. y Ott, N. (2011). Antarctic Coastline Detection using Snakes. In: PFG 2011, 6, pp. 421 - 434.
- Krabill, W., Wright, C., Swift, R., Frederick, E., Manizade, S., Yungel, J., Martin, C., Sonntag, J., Duffy, M., Hulslander, W., y Brock, J. (2000). Airborne laser mapping of Assateague National Seashore Beach. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66 (1), pp. 65 - 71.
- Kuleli, T., Guneroglu, A., Karsli, F. y Dihkan, M. (2011). Automatic detection of shoreline change on coastal Ramsar wetlands of Turkey. *Ocean Engineering*, 38 (10), pp. 1141 - 1149.
- Kuglin, C.D. y Hines, D.C., (1975). The phase correlation image alignment method. *Proceedings IEEE Int. Conf. Cybernetics and Society*, pp. 163 - 165.
- Larson, M. y Kraus, N.C., (1989). SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change. *CERC-89-9, US Corps of Engineers (Vicksburg)*.
- Leatherman, S.P. (1983). Shoreline mapping: a comparison of techniques. *Shore and Beach*, 51, pp. 28 - 33.
- Leatherman, S.P. (1984). Shoreline evolution of North Assateague Island, Maryland. *Shore and Beach*, 52, pp. 3 - 10

- Lee, G., Nicholls, R.J. y Birkemeier, W.A. (1998). Storm-driven variability of the beach-nearshore profile at Duck, North Carolina, USA, 1981–1991. *Marine Geology*, 148, pp. 163–177.
- Liu, H. y Jezec, K.C. (2004). Automatic extraction of coastline from satellite imagery by integrating Canny edge detection and locally adaptative thresholding methods. *International Journal of Remote Sensing*, 25 (5), pp. 937 - 958.
- Liu, H., Sherman, D. y Gu, S. (2007). Automated extraction of shorelines from airborne light detection and ranging data and accuracy assessment based on Monte Carlo simulation. *Journal of Coastal Research*, 23 (6), pp. 1359 - 1369.
- López-García, M.J. y Pardo-Pascual, J.E. (1995). Avaluació dels canvis en els usos del sòl en un sector del litoral de Sagunt i Canet d'en Berenguer. *Braçal*, 11, pp. 465 - 477.
- Maiti, S. y Bhattacharya, A.K. (2009). Shoreline change analysis and its application to prediction: a remote sensing and statistics based approach. *Marine Geology*, 57, pp. 11 - 23.
- Manavalan, P., Sathyanath, P. y Rajegowda, G.I. (1997). Digital image analysis techniques to estimate waterspread for capacity evaluation of reservoirs. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 59 (9), pp. 1389 - 1395.
- Markham, B.L. (1985). The Landsat spectral response. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing*, GE-23 (6), 864 - 875.
- Masselink, G., Kroon, A. y Davidson-Arnott, R.G.D., (2006). Morphodynamics of intertidal bars in wavedominated coastal settings—a review. *Geomorphology* 73 pp., 33 - 49.
- McCurdy, P.G. (1950). Coastal delineation from aerial photographs. *Photogrammetric Engineering*, 16 (4), pp. 550 - 555.
- McLean, R. y Shen, J.S. (2006). From foreshore to foredune: Foredune development over the last 30 years at Moruya Beach, New South Wales, Australia. *Journal of Coastal Research*, 22 (1), pp.28 - 36.
- Mendoza E.T. y Jiménez J.A. (2008). Coastal storm classification on the Catalan littoral (NW Mediterranean). *Ingeniería Hidráulica en México*, 23(2), pp. 23 - 34.
- Mislata Cabo, Rosa María y Roselló Soto, Raquel (2012). *Determinación automática de las variaciones de la línea de costa entre 1984 y 2009 a partir de imágenes LANDSAT y su relación con la morfología de la playa caracterizada a partir de datos LIDAR. Aplicación sobre distintos sectores de las playas valencianas*. Proyecto fin de carrera para la obtención del título de Ingeniería Geodesia y Cartografía, E.T.S.I. Geodesia Cartografía y Fotogrametría.
- Moore, L.J. (2000). Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, 16(1), pp. 111 - 124.

- MOPU, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (1979). *Estudio de la dinámica litoral en la costa peninsular mediterránea y onubense. Provincias de Valencia, Castellón y Tarragona*. Laboratorio de Puertos Ramón Iribarren, Dirección General de Costas
- Morton, R.A., (1991). Accurate shoreline mapping; past, present and future. *Coastal Sediments. American Society of Civil Engineers*, 1, pp. 997 - 1010.
- Morton, R.A. (2002). Factors controlling storm impacts on barriers and beaches- A preliminary basis for real time forecasting. *Journal of Coastal Research*, 19, pp. 560 - 573.
- Morton, R.A., Paine, J.G. y Gibeaut, J.G. (1994). Stages and durations of post-storms beach recovery, southeastern Texas coast, U.S.A. *Journal of Coastal Research*, 10, pp. 884 - 908.
- Morton, R.A., Miller, T. y Moore, L. (2005). Historical shoreline changes along the US Gulf of Mexico: A summary of recent shoreline comparisons and analyses. *Journal of Coastal Research*, 21 (4), pp. 704-709.
- Muslim, A.M., Foody, G.M. y Atkinson, P.M. (2006). Localized soft classification for super-resolution mapping of the shoreline. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (11), pp. 2271 - 2285.
- Muslim, A.M., Foody, G.M. y Atkinson, P.M. (2007). Shoreline Mapping from Coarse-Spatial Resolution Remote Sensing Imagery of Seberang Takir, Malaysia. *Journal of Coastal Research*, 23 (6), pp. 1399 - 1408.
- NASA (2006). *Landsat 7 science data users handbook, (on-line)*. Available on. http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf
- Netanyahu, N.S., Le Moigne, J. y Masek, J.G. (2004). Georegistration of Landsat data via robust matching of multiresolution features. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 42 (7), pp. 1586 - 1600.
- Ouma, Y.O. y Tateish, R. (2006). A water index for rapid mapping of shoreline changes of five East African Rift Valley lakes: an empirical analysis using Landsat TM & ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (15), pp. 3153 - 3181.
- Pardo-Pascual, J.E. (1991). *La erosión antrópica en el litoral valenciano*, Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme i Transports, Generalitat Valenciana, 240 pp.
- Pardo-Pascual, J.E. (1991b). Acción antrópica y evolución costera del sector Sagunt-Valencia. Sociedad y territorio. *Actas del XII Congreso Nacional de Geografía*. Universitat de València, pp. 55-62.
- Pardo-Pascual, J.E. y Sanjaume, E. (1995). Caracterización de las playas valencianas a partir del parámetro escalar de surf. *III Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*, Universitat Politècnica de València , pp. 614 - 628.

Pardo-Pascual, J.E. y Sanjaume, E. (2001). Análisis multiescalar de la evolución costera. *Cuadernos de Geografía*, 69/70, pp. 95-126.

Pardo-Pascual, J.E., García-Asenjo, L., Palomar Vázquez, J. y Garrigues-Talens, P. (2005). New methods and tools to analyze beach-dune system evolution using a Real-Time Kinematic Global Positioning System and Geographic Information Systems. *Journal of Coastal Research*, SI: 49, pp. 34 -39.

Pardo-Pascual, J.E. , Ruiz, L.A., Palomar Vázquez, J., Calaf, X., Colmenárez, G.R., Almonacid-Caballer, J. y Gracia, G. (2008). Teledetección, GPS y Lidar: Nuevas técnicas de análisis y evolución de la línea de costa y de los espacios playa-duna. *Actas de las Jornadas Técnicas "Las nuevas técnicas de información geográfica al servicio de la gestión de zonas costeras: Análisis de la evolución de playas y dunas"*, Servicio Publicaciones UPV, pp. 62 - 68.

Pardo-Pascual, J.E., Palomar-Vázquez, J.M., García-Asenjo, L. y Garrigues, P. (2011). Determinación de la tendencia evolutiva en un segmento de playa basándose en múltiples levantamientos tridimensionales *Avances en Geomorfología Litoral, VI Jornadas de Geomorfología Litoral* (Tarragona), pp. 493 - 496.

Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L.A. y Palomar-Vázquez, J. (2012). Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM multi-temporal images with sub-pixel precision. *Remote Sensing of Environment*, 123, pp. 1 - 11.

Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J., Mislata-Cabo, R. y Roselló-Soto, R. (2012b). Caracterización de la evolución reciente de las playas de Sagunt y Canet d'En Berenguer a partir de imágenes Landsat. *Anales del instituto de estudios saguntinos*, 1, pp. 55 - 79.

Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L.A., Palomar-Vázquez, J. y Rodrigo-Alemany, R. (2014). Evaluation of storm impact on sandy beaches of the Gulf of Valencia using Landsat imagery. *Geomorphology*, 214, pp. 334 - 401.

Pérez-González, L. (2008). La gestión de la costa desde la Administración General del Estado: Lineas de trabajo y perspectivas. *Actas de las Jornadas Técnicas "Las nuevas técnicas de información geográfica al servicio de la gestión de zonas costeras: Análisis de la evolución de playas y dunas"*, Servicio Publicaciones UPV, pp. 44 - 48.

Persons, C.M., Chenault, D.B., Jones, M.W., Spradley, K.D., Gulley, M.G. y Farlow, C.A. (2002). Automated registration of polarimetric imagery using Fourier transform techniques. *In Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 4819, pp. 107 - 117.

Plomaritis, T.A., Del Rio, L y Benavente, J. (2011). Validating and estimating storm threshold using a single Environmental Parameter: The case of Cadiz coast. *Journal of Coastal Research*, SI 64, pp. 1876-1880

- Psuty, N.P. y Silvera, T.M. (2011). Tracking coastal geomorphological change: an application of protocols to collect geotemporal data sets at the national level in the US. *Journal of Coastal Research*, SI 64, pp. 1253 - 1257.
- Pye, K. y Blott, S.J. (2008). Decadal-scale variation in dune erosion and accretion rates: an investigation of the significance of changing storm tide frequency and magnitude on the Sefton coast UK. *Geomorphology*, 102, pp. 652 - 666.
- Quartel, A., Kroon, A. y Ruessink, B.G. (2008). Seasonal accretion and erosion patterns of a microtidal sandy beach. *Marine Geology*, 250, pp. 19 - 33.
- Rangel-Buitrago, N y Anfuso, G. (2011). Coastal storm characterization and morphological impacts on sandy coasts. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, pp. 1997 - 2010.
- Reyes, J.L., Martins, J.T, Benavente, J. ,Ferreira, Ó., Gracia, F.J., Alveirinho-Dias, J.M. y López-Aguayo, G. (1999). Gulf of Cádiz beaches: a comparative response to storm events. *Boletín Instituto Español de Oceanografía*, 15, pp. 221 - 228.
- Robertson, W.V., Whitman, D., Zhang, K.Q. y Leatherman, S.P. (2004). Mapping shoreline position using airborne laser altimetry. *Journal of Coastal Research*, 20 (3), pp. 884 - 892.
- Robertson, W. V., Zhang, K. y Whitman, D. (2007). Hurricane-induced beach change derived from airborne laser measurements near Panama City, Florida. *Marine Geology*, 237, pp. 191 - 205.
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., de Vries, J. V., McCall, R. y Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11-12), pp. 1133 - 1152.
- Rosati, J.D. y Ebersole, B.A. (1997). Littoral impact of Ocean City Inlet, Maryland, USA. *Proceed. 25th International Conference on Coastal Engineering, American Society Civil Engineering* (New York), pp. 2779 - 2792.
- Ruggiero, P., Komar, P.D., McDougal, W.G., Marra, J.J. y Beach, V.A. (2001). Wave runup, extreme water levels and the erosion of properties backing beaches. *Journal of Coastal Research*, 17 (2), pp. 407 - 419.
- Ruiz, L.A., Pardo-Pascual, J.E., Almonacid-Caballer, J.y Rodríguez, B. (2007). Coastline automated detection and multi-resolution evaluation using satellite images. *Proceedings of Coastal Zone 2007*, del 22 al 27 de Julio, Portland.
- Ryu, J-H, Won, J-S y Min, K.M. (2002). Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat: A case study in Gomsu Bay, Korea. *Remote sensing of environment*, 83 (3), pp. 442 - 456.
- Sallenger, A.H. (2000). Storm impact scale for barrier islands. *Journal of Coastal Research*, 16 (3), pp. 890 - 895.

Sallenger, A.H., Krabill, W., Swift, R., Brock, J., List, J., Hansen, M., Holman, R.A., Manizade, S., Sontag, J., Meredith, A., Morgan, K., Yunkel, J.K., Frederick, E. y Stockdon, H. (2003). Evaluation of airborne scanning lidar for coastal change applications. *Journal of Coastal Research*, 19, pp. 125 - 133.

Sánchez García, Elena (2011). *Estudio comparativo de la evolución de la costa del Saler (Valencia, España), con datos de alta y media precisión. Evaluación del poder predictivo del método*. Proyecto fin de carrera para la obtención del título de Ingeniería Técnica en Topografía, E.T.S.I. Geodesia Cartografía y Fotogrametría.

Sánchez García, Elena (2013). *Desarrollo de una herramienta analítica para la proyección de un fotograma terrestre sobre un plano georreferenciado. Aplicación en trabajos de monitorización de línea de costa*. Proyecto fin de carrera para la obtención del título de Ingeniería Geodesia y Cartografía, E.T.S.I. Geodesia Cartografía y Fotogrametría.

Sancho-García, A., Ruessink, B.G y Guillén, J. (2011). Storm-surge inundation along a multibarred beach. *Journal of Coastal Research*, SI 64, pp. 1911 - 1915.

Sanjaume, E., (1985). *Las costas valencianas. Sedimentología y morfología*. Universitat de València, Valencia

Sanjaume, E. y Pardo-Pascual, J.E, (2005). Erosion by human impact on the Valencian coastline. *Journal of Coastal Research*, SI 49, pp. 76 - 82.

Sanjaume, E. y Pardo-Pascual, J.E. (2011a). Las dunas de las costas valencianas. In: *Sanjaume, E. and Gracia Prieto, F.J. (Eds.), Las dunas en España. Sociedad española de geomorfología*, pp. 227 - 262.

Sanjaume, E. y Pardo-Pascual, J.E., (2011b). Las dunas de la Devesa del Saler. In: *Sanjaume, E. and Gracia Prieto, F.J. (Eds.), Las dunas en España. Sociedad española de geomorfología*, pp. 263 - 284.

Schwab, W.C., Thieler, E.R., Allen, J.R., Foster, D.S., Swift, B.A. y Denny, J.F. (2000). Influence of inner-continental shelf geologic framework on the evolution and behaviour of the barrier-island system between Fire Island Inlet and Shinnecock Inlet, Long Island, New York. *Journal of Coastal Research*, 16, pp. 408 - 422.

Sénéchal, N., Gouriou, B., Castelle, B., Parisot, J.-P., Capo, S., Bujan, S. y Howa, H. (2009). Morphodynamic response of a meso- to macro-tidal intermediate beach based on a long term data set. *Geomorphology*, 107 (3-4), pp. 263 - 274

Shah, C.A (2011). Automated lake shoreline mapping at subpixel accuracy. *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, 8 (6), pp. 1125 - 1129.

Shaikh, A.A., Gotoh, K., Tachiiri, K. (2005). Multi-temporal analysis of land cover changes in Nagasaki city associated with natural disasters using satellite remote sensing. *Journal of Natural Disaster Science*, 27 (1), pp. 9 - 15.

- Shekarforoush, H., Berthod, M. y Zerubia, J. (1996). Sub-pixel image registration by estimating the polyphase decomposition of cross power spectrum. *In Proceeding: IEEE Computer Society Conf. Computer Vision Pattern Recognition, Los Alamitos, CA*, pp. 532 - 537.
- Silva, A. , Taborda, R., Castelao, J. y Freire, P. (2009). DTM extraction using video-monitoring techniques application to the fetch limited beach. *Journal of Coastal Research*, SI 56, pp. 203 - 207.
- Smith, G.L. y Zarrillo, G.A. (1990). Calculating long-term shoreline recession rates using aerial photographic and beach profiling techniques. *Journal of Coastal Research*, 6 (1), pp. 111 - 120.
- Srinivasa-Reddy, B. y Chatterji, B. N. (1996). An FFT-Based technique for translation, rotation, and scale- invariant image registration. *IEEE transactions on image processing*, 5 (8), pp. 1266 - 1271.
- Stafford, D.B. (1971). *An aerial photographic technique for beach erosion surveys in North Carolina*, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Technical Memorandum, número 36, 115 pp.
- Stive, M.J.F., Aarninkhof, S.G.-J., Hamm, L., Hanson, H., Larson, M., Wijnberg, K.M., Nicholls, R.J. y Capobianco, M. (2002). Variability of shore and shoreline evolution. *Coastal Engineering*, 7, pp. 211 - 235.
- Stockdon, H.F., Sallenger, A.H., List, J.H. y Holman, R.A. (2002). Estimation of the shoreline position and change using airborne topographic lidar data. *Journal of Coastal Research*, 18 (3), pp. 502 - 513.
- Stone, H.S., Orchard, M.T., Chang, Ee.-Ch. y Martucci, S.A. (2001). A fast direct Fourier-based algorithm for sub-pixel registration of images. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 39 (10), pp. 2235 - 2243.
- Thieler, E.R. y Danforth, W.W. (1994). Historical shoreline mapping (I). Improving techniques and reducing positioning errors. *Journal of Coastal Research*, 10 (3), pp. 549 - 563
- Thom, B.G. y Hall, W. (1991). Behaviour of beach profiles during accretion and erosion dominated periods. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, pp. 113 - 127.
- Townshend, J.R.G, Justice, C.O., Gurney, C. y McManus, J. (1992). The impact of misregistration on change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30 (5), pp. 1054 - 1060.
- Trifonova, E.V., Valchev, N.N., Andreeva, N.Y., y Eftimova, P.T. (2012). Critical storm thresholds for morphological changes in the western Black Sea coastal zone. *Geomorphology* 143 - 144, pp. 81 - 94.

- Wang, C., Zhao, C. y Yang, J. (2011). Local Upsampling Fourier Transform for high accuracy image rotation estimation. *Advanced Materials Research*, 268 - 270, pp. 1488 - 1593.
- White, K y El Asmar, H. (1999). Monitoring changing position of coastlines using Thematic Mapper imagery, and example from the Nile Delta, *Geomorphology*, 29, pp. 93 - 105.
- White, S.A. y Wang, Y. (2003). Utilizing DEMs derived from LIDAR data to analyze morphologic change in the North Carolina coastline. *Remote Sensing of the Environment*, 85 (1), pp. 39 - 47.
- Wise, R. S., Smith, S.J y Larson, M. (1996). SBEACH. Numerical model for simulating storm-induced beach change. *CERC, US Army Corps of Engineers* (Vicksburg).
- Xiea, H., Hicksa, N., Kellera,G. R., Huangb, H. y Kreinovichb, V. (2003). An IDL/ENVI implementation of the FFT-based algorithm for automatic image registration. *Computers & Geosciences*, 29, pp. 1045 - 1055.
- Yamano, H., Shimazaki, H., Matsunaga, T., Ishoda, A., McClennen, C., Yokoki, H. Fujita, K., Osawa, Y. y Kayanne, H. (2006). Evaluation of various satellite sensors for waterline extraction in a coral reef environment: Majuro Atoll, Marshall Islands. *Geomorphology*, 82, pp. 398 - 411.
- Yuan, F., Sawaya, K., Loeffelholz, B. y Bauer, M. (2005). Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multi-temporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 98 (2-3), pp. 317 - 328,
- Zhang, Z., Zhang, J., Uao, M. y Zhang, L. (2000). Automatic registration of multi-source imagery based on global image matching. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66 (5), pp. 625 - 629.
- Zitova, B. y Flusser, J. (2003). Image registration methods: a Survey. *Image and Vision Computing*, 21 (11), pp. 977 - 1000.

ANEJOS

Anejo I

UMBRALIZACIÓN DE LA IMAGEN

AI.1. Introducción

El proceso de obtención de la línea de costa con precisión sub-píxel se plantea como un proceso de refinamiento a partir de una línea aproximada inicial. En este capítulo se aborda la obtención de dicha línea aproximada y diversas opciones para su automatización.

Las zonas acuáticas presentan una fuerte absorción de las frecuencias infrarrojas, ello produce que aparezcan claramente oscuras en las bandas sensibles a dichos infrarrojos (Figura 1). Esta es la propiedad que lleva a que los estudios de límite agua-tierra se realicen con las bandas sensibles a estas frecuencias. La forma más directa para la clasificación de las zonas en presencia o ausencia de agua en estas bandas es la umbralización, considerar que existe un valor (nivel digital o valor radiométrico) por debajo del cual todo lo observado es agua. La elección de este umbral también es susceptible de ser automatizada y suele llevarse a cabo analizando el histograma de la banda imagen correspondiente. Si en la banda analizada existe suficiente área de agua y tierra suele presentar en el histograma dos curvas bien diferenciadas, una ubicada en valores oscuros y muy concentrados –correspondiente a la zona acuática- y otra que se extiende por valores más claros –correspondiente al resto de la imagen y que, al presentar mayor mezcla de coberturas, tiene valores menos concentrados-. Esta propiedad es la que suele emplearse para la determinación automática del umbral agua-tierra.

La obtención automática del umbral a partir de esta propiedad se realiza considerando que el histograma se comporta como suma de dos distribuciones de Gauss. Obteniendo la expresión matemática de las dos curvas que lo constituyen es posible obtener el punto en que se intersectan, punto que es considerado como umbral.

A continuación se describirán diversos modelos matemáticos con que modelizar los histogramas y cómo aprovecharlos para obtener el umbral de forma automática. El objetivo es evaluar empíricamente la valía de los métodos automáticos para la umbralización de la imagen y obtención de la línea de costa aproximada.

AI.2. Parametrización del histograma y del umbral

La distribución de Gauss es una de las funciones más empleadas y con una de las gráficas más difundidas y conocidas. Se distingue por su forma similar a una campana, toma su valor máximo en un valor determinado μ y que, dependiendo de otro parámetro σ , se extiende más o menos a lo largo del espacio. Estos parámetros se relacionan a través de la función gaussiana -la ecuación (13)-.

$$G(A, \mu, \sigma) = A \cdot e^{\left(\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (13)$$

El término exponencial tiene un valor máximo igual a 1 en la posición μ . Por ello el valor de A es indicativo de la amplitud, es el valor que tomará la función en μ , pudiendo así adaptar la función a una posición horizontal mediante μ , a una extensión mediante σ , y a una altitud o amplitud mediante A .

El caso más extendido de esta función gaussiana general es la distribución de probabilidad normal. En esta particularización, μ se ubica en la media aritmética de una muestra de datos mientras que σ es la desviación típica. A su vez el término de amplitud A toma una forma concreta dependiente de la propia desviación típica. Así, la amplitud no es libre y la distribución sólo depende de dos parámetros -ecuación (14)-.

$$N(\mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}}\right) \cdot e^{\left(\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (14)$$

El comportamiento de la curva normal es ligeramente diferente de la curva gaussiana general. La parte exponencial sigue siendo igual a 1 en la posición μ pero la amplitud será menor cuanto mayor sea la desviación σ . Sin embargo, la peculiaridad de la curva normal es que el área que encierra es igual a la unidad.

Estas dos expresiones (la curva gaussiana y su particularización, la curva normal) son el punto de partida para poder parametrizar los histogramas de las imágenes analizadas.

AI.2.1. Modelo bi-gaussiano

Suponiendo que los histogramas pueden ser aproximados por una función bi-gaussiana – ecuación (15)- implica obtener los parámetros de mar (A_M, μ_M, σ_M) y tierra (A_T, μ_T, σ_T) que mejor se adapten al histograma.

$$Hist \approx F_{hist_A} = A_M \cdot e^{\left(\frac{-(x-\mu_M)^2}{2\sigma_M^2}\right)} + A_T \cdot e^{\left(\frac{-(x-\mu_T)^2}{2\sigma_T^2}\right)} \quad (15)$$

Conociendo los parámetros de las dos funciones, la resolución del umbral, como intersección de ambas, es directa dado que se puede plantear como una ecuación cuadrática –ecuación (16)-.

$$A \cdot x^2 + B \cdot x + C = 0$$

$$Donde \begin{cases} A = (\sigma_T^2 - \sigma_M^2) \\ B = -2 \cdot (\mu_M \cdot \sigma_T^2 - \mu_T \cdot \sigma_M^2) \\ C = (\sigma_T^2 \cdot \mu_M^2 - \sigma_M^2 \cdot \mu_T^2) - 2 \cdot \sigma_M^2 \cdot \sigma_T^2 \cdot \log\left(\frac{A_M}{A_T}\right) \end{cases} \quad (16)$$

La resolución de x indicará el umbral que separa ambas distribuciones.

AI.2.2. Modelo bi-normal y su ponderación

Si se considera que ambas curvas pueden expresarse como distribuciones normales, la expresión a ajustar se reduce a 4 parámetros $(\mu_M, \sigma_M, \mu_T, \sigma_T)$ como se observa en la ecuación (17)

$$Hist \approx \left(\frac{1}{\sigma_M \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \right) \cdot e^{\left(\frac{-(x-\mu_M)^2}{2 \cdot \sigma_M^2} \right)} + \left(\frac{1}{\sigma_T \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \right) \cdot e^{\left(\frac{-(x-\mu_T)^2}{2 \cdot \sigma_T^2} \right)} \quad (17)$$

La resolución del modelo bi-normal es análogo al bi-gaussiano. La igualación de ambas curvas, agrupando términos se llega a la expresión cuadrática a resolver –ecuación (18)-

$$A \cdot x^2 + B \cdot x + C = 0$$

$$Donde \begin{cases} A = (\sigma_T^2 - \sigma_M^2) \\ B = -2 \cdot (\mu_M \cdot \sigma_T^2 - \mu_T \cdot \sigma_M^2) \\ C = (\sigma_T^2 \cdot \mu_M^2 - \sigma_M^2 \cdot \mu_T^2) - 2 \cdot \sigma_M^2 \cdot \sigma_T^2 \cdot \log\left(\frac{\sigma_T}{\sigma_M}\right) \end{cases} \quad (18)$$

Esta formulación tiene ciertas desventajas respecto al modelo bi-gaussiano. En primer lugar, cuando la amplitud queda libre como en el modelo bi-gaussiano, la altitud de las respectivas curvas queda modelada por los términos de amplitud A_M y A_T que podrán ajustarse a valores cualesquiera. El modelo bi-normal no puede adaptarse de esta manera a ambos picos de cada histograma. Para salvar este problema es posible trabajar con un histograma de frecuencias relativas en el que cada valor no sea el número de píxeles que existen en la imagen sino la proporción respecto del total. Es sencillo escalar el histograma de una imagen para que quede en frecuencias relativas si se piensa en términos de área. A través de la expresión (19) se obtiene todo el área encerrada por el histograma siendo $hist(x_i)$ el valor su i -ésimo elemento y Δx el incremento empleado para separar los elementos al generar el histograma.

$$S = \sum_{i=1}^N hist(x_i) \cdot \Delta x \quad (19)$$

De esta manera, el histograma de frecuencias relativas o histograma normalizado se obtiene dividiendo cada i -ésimo elemento por dicho área total –ecuación (20)-

$$hist_{norm}(x_i) = \frac{hist(x_i)}{S} \quad (20)$$

El área encerrada por todo el histograma normalizado es igual a la unidad. Si bien es cierto que cada curva normal encierra un área igual a la unidad, Liu et al. (2004) aportan un nuevo parámetro para ponderar la aportación de cada una de las curvas (lo que también interpretan como la proporción que tierra y mar tienen la imagen). Así, la suma de ambas estará ponderada por una probabilidad p_M y p_T . La suma de ambas probabilidades ha de ser la unidad por lo que sólo un parámetro se añade a la ecuación (21). De esta manera, tanto el histograma normalizado como la función bi-normal cumplen la condición de encerrar áreas iguales a la unidad.

$$Hist \approx F_{hist_N} = \left(\frac{p_M}{\sigma_M \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \right) \cdot e^{\left(\frac{-(x-\mu_M)^2}{2 \cdot \sigma_M^2} \right)} + \left(\frac{p_T}{\sigma_T \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \right) \cdot e^{\left(\frac{-(x-\mu_T)^2}{2 \cdot \sigma_T^2} \right)}$$

$$p_M + p_T = 1 \rightarrow p_T = (1 - p_M) \quad (21)$$

$$Hist \approx F_{hist_N} = \left(\frac{p_M}{\sigma_M \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \right) \cdot e^{\left(\frac{-(x-\mu_M)^2}{2 \cdot \sigma_M^2} \right)} + \left(\frac{1 - p_M}{\sigma_T \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \right) \cdot e^{\left(\frac{-(x-\mu_T)^2}{2 \cdot \sigma_T^2} \right)}$$

La obtención del umbral requiere nuevamente resolver una ecuación de segundo grado que tras la ponderación queda como se indica en la expresión (22).

$$A \cdot x^2 + B \cdot x + C = 0$$

$$Donde \begin{cases} A = (\sigma_T^2 - \sigma_M^2) \\ B = -2 \cdot (\mu_M \cdot \sigma_T^2 - \mu_T \cdot \sigma_M^2) \\ C = (\sigma_T^2 \cdot \mu_M^2 - \sigma_M^2 \cdot \mu_T^2) - 2 \cdot \sigma_M^2 \cdot \sigma_T^2 \cdot \log \left(\frac{\sigma_T \cdot p_M}{\sigma_M \cdot p_T} \right) \end{cases} \quad (22)$$

AI.2.3 Obtención de los parámetros

En el apartado anterior se han descrito 3 formas de parametrizar un histograma bivariado: mediante suma de dos curvas normales, mediante suma de dos curvas normales ponderadas y, como caso general, como suma de dos curvas gaussianas.

Una vez conocidos los parámetros de cada modelo, de forma automática es posible obtener un umbral para binarizar cada imagen. Sin embargo, el problema radica precisamente en obtener estos parámetros. Se buscará su ajuste mediante mínimos cuadrados. Como se observa todas las expresiones que han de servir para modelar cada histograma -(15), (17) y (21)- requieren una solución mínimo cuadrática no lineal. Todas las resoluciones mínimo-cuadráticas empleadas tienen en común el ser iterativas y, por tanto, es necesaria una solución de partida que ir mejorando en cada iteración.

La obtención de la solución inicial puede realizarse analizando la imagen o el histograma asociado:

Sobre el histograma es posible analizar los picos predominantes para determinar la posición de las respectivas medias, tomar el umbral aproximado en su punto medio y de ahí la desviación típica de los valores más oscuros y más claros que dicho umbral darían, respectivamente, servirían como valores aproximados de desviación de mar y tierra. Otra opción es considerar que existe aproximadamente igual número de píxeles de tierra que de mar, esto permite obtener la posición del histograma una vez se ha alcanzado el 50% de los píxeles; las medias y desviaciones por debajo y por encima de este umbral llevan respectivamente a las medias y desviación para comenzar a iterar. Estos métodos son inconsistentes por la casuística que puede darse: demasiados picos secundarios, valores demasiado concentrados, etc

Por otro lado, es posible obtener información directa de la imagen delimitando zonas de tierra y mar. De los píxeles incluidos en cada una de las zonas delimitadas se obtiene un nivel digital medio y su desviación.

En casos ideales el primer sistema puede llevar a valores aceptables para iniciar las iteraciones pero contemplar toda la casuística es prácticamente inabarcable. El segundo método tiene como desventaja la necesidad de un trabajo manual, aunque muy sencillo. A su vez, si el objetivo es procesar multitud de imágenes de un mismo sector, basta con delimitar una vez las zonas.

Se ha optado por el análisis de zonas de la imagen puesto que se ha demostrado empíricamente su mayor robustez.

A continuación se describe en qué consiste el análisis zonal de la imagen y de qué se sirve para obtener unos parámetros aproximados para modelar los histogramas bivariados. Esta solución aproximada es una solución en sí misma, se entiende que el ajuste iterativo tiene por objeto eliminar la subjetividad de las zonas delimitadas, pero ha

de comprobarse que efectivamente es una mejora. Como se ha dicho, cada histograma será ajustado a una función bi-gaussiana y una bi-normal; a su vez, desde los parámetros iniciales, el ajuste en cada modelo se realizará mediante 3 métodos iterativos diferentes con objeto de encontrar el óptimo.

AI.2.3.1. Obtención de parámetros por regiones de interés

Una región de interés (Region of interest, ROI, en inglés y nombrada así coloquialmente) es una zona delimitada de la imagen. Suele ser obtenida manualmente para obtener estadísticas de ciertas zonas en concreto y de forma independiente al resto de la imagen.

En este caso es posible delimitar dos regiones, una correspondiente al mar y otra correspondiente a la tierra. De cada una de ellas se obtiene una media y una desviación $(\mu_M, \sigma_M, \mu_T, \sigma_T)$ que permiten resolver el umbral de forma directa con el modelo de curva bi-normal sin ponderación.

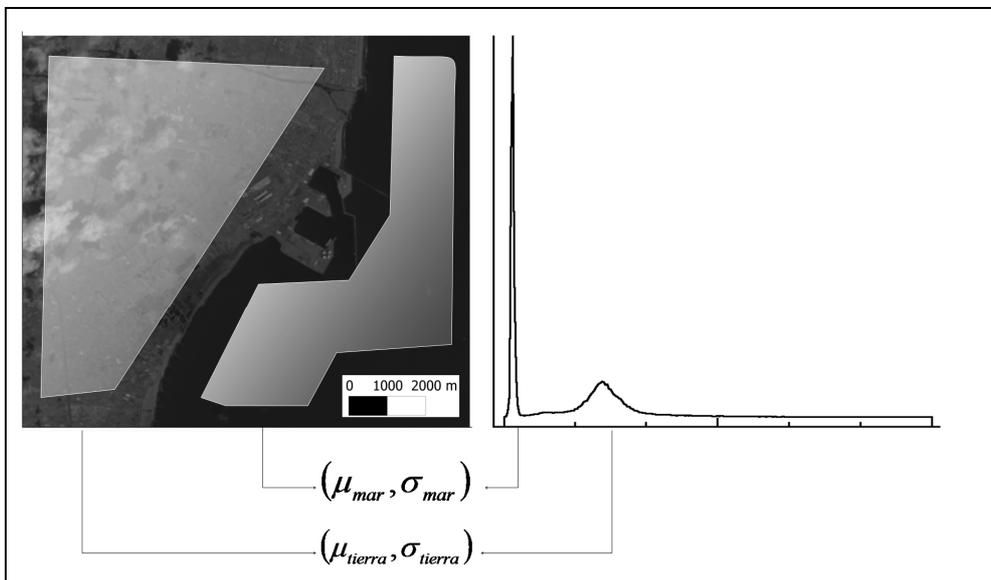


Figura 109. Cada media y desviación de cada ROI sirve para ajustar la curva normal de cada pico en el histograma.

AI.2.3.1. Ajuste iterativo de los parámetros

Partimos de ambos modelos matemáticos para la el ajuste de cada histograma.

El modelo bi-gaussiano:

$$Hist \approx F_{hist_A} = A_M \cdot e^{\left(\frac{-(x-\mu_M)^2}{2\sigma_M^2}\right)} + A_T \cdot e^{\left(\frac{-(x-\mu_T)^2}{2\sigma_T^2}\right)} \quad (23)$$

Y el modelo bi-normal:

$$Hist \approx F_{hist_N} = \left(\frac{p_M}{\sigma_M \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}}\right) \cdot e^{\left(\frac{-(x-\mu_M)^2}{2\sigma_M^2}\right)} + \left(\frac{1-p_M}{\sigma_T \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}}\right) \cdot e^{\left(\frac{-(x-\mu_T)^2}{2\sigma_T^2}\right)} \quad (24)$$

A partir del análisis de áreas de interés se dispone de parámetros aproximados tanto para el modelo bi-gaussiano $(A_M, \mu_M, \sigma_M, A_T, \mu_T, \sigma_T)$ como para el bi-normal ponderado $(p_M, \mu_M, \sigma_M, p_T, \mu_T, \sigma_T)$. Para el caso bi-normal se asigna igual probabilidad (0,5) a mar y a tierra.

En cada modelo los parámetros adicionales varían –ecuación (25)-

$$\text{Bi-gaussiano: } a_{p-0} = (A_M, \mu_M, \sigma_M, A_T, \mu_T, \sigma_T)_0 \quad (25)$$

$$\text{Bi-normal: } a_{p-0} = (p_M, \mu_M, \sigma_M, p_T, \mu_T, \sigma_T)_0$$

Pero permiten obtener unos residuos iniciales, la diferencia entre los valores de cada histograma y el modelo evaluado en los parámetros iniciales:

$$\begin{aligned} \text{Bi-gaussiano: } R(x) &= F_{hist_A}(x) - Hist(x) \\ \text{Bi-normal: } R(x) &= F_{hist_N}(x) - Hist(x) \end{aligned} \quad (26)$$

A partir de los parámetros iniciales se ha resuelto el ajuste por 3 métodos:

(i) Por el método de Gauss-Newton o método pseudo-lineal. Toma cualquiera de las dos funciones F_{hist_N} o F_{hist_A} y, a partir de su jacobiana J_f calcula unos diferenciales δa_p para cada parámetro a_p :

$$\delta a_{p-i} = \left(J_f^T \cdot J_f \right)_{a_{p-i}}^{-1} \cdot - \left(R^T \cdot J_f \right)_{a_{p-i}} \quad (27)$$

Los parámetros de cada i -ésima iteración se renuevan mediante $a_{p-i+1} = a_{p-i} + \delta a_{p-i}$

Los dos modelos restantes corresponden a sendas variantes del método de Levenberg Marquardt. En primer lugar **(ii)** el modelo de Levenberg-Marquardt sin consideración de escalado:

$$\delta a_{p-i} = \left(J_f^T \cdot J_f + \lambda \cdot I \right)_{a_{p-i}}^{-1} \cdot - \left(R^T \cdot J_f \right)_{a_{p-i}} \quad (28)$$

Este método iterativo es el que sugiere el mismo trabajo de Liu et al. (2004). En dicho artículo plantea la resolución general que implica el uso de la Hessiana de la función de suma de cuadrados a minimizar, en el anejo II se encuentra la justificación para obtener la expresión (28) que es la que normalmente se emplea y como suele encontrarse formulada la resolución de Levenberg-Marquardt.

Por otro lado, **(iii)** una variante de Levenberg-Marquardt se formula como sigue:

$$\delta a_{p-i} = \left(\left(J_f^T \cdot J_f \right) + \lambda \cdot \text{diag} \left(J_f^T \cdot J_f \right) \right)_{a_{p-i}}^{-1} \cdot - \left(R^T \cdot J_f \right)_{a_{p-i}} \quad (29)$$

Nuevamente, la iteración se realiza mediante la suma de los diferenciales obtenidos a los parámetros de la iteración anterior: $a_{p_{-i+1}} = a_{p_{-i}} + \delta a_{p_{-i}}$.

En el anejo II se realiza una revisión más detallada de los métodos de resolución mínimo cuadráticos no lineales.

AI.3. Metodología

Para la evaluación se requiere de una información de referencia con la que contrastar el resultado de los métodos automáticos. Esta información de referencia no existe puesto que no se puede asegurar cuál es umbral óptimo para cada imagen. Así pues, se ha aplicado las metodologías descritas a un amplio conjunto de imágenes para las que un usuario experto ha determinado un umbral visualmente óptimo. La cantidad de imágenes analizadas sirve para eliminar subjetividades, errores groseros y poder evaluar estadísticamente los resultados.

Así, los umbrales manuales de referencia **(i)** serán comparados con los siguientes:

(ii) un umbral deducido de la intersección de dos curvas normales parametrizadas por las medias y desviaciones de áreas de interés.

(iii) los umbrales deducidos por el ajuste del modelo bi-normal y ajustado con los diferentes métodos iterativos descritos (Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt, y Levenberg-Marquardt con escalado).

(iv) los umbrales deducidos por el ajuste del modelo bi-gaussiano y ajustado con los diferentes métodos iterativos descritos (Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt, y Levenberg-Marquardt con escalado).

Lo análisis se centran en diferentes aspectos:

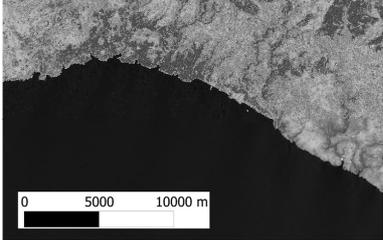
Comparación de los sistemas de resolución mínimo cuadrática con objeto de establecer la prioridad de un método de un concreto. Se realiza mediante la comparación de las resoluciones mediante los tres métodos iterativos dentro de cada modelo bi-normal **(iii)** o bi-gaussiano **(iv)**. El objetivo es deducir si alguno de los métodos iterativos ataja el problema del mal condicionamiento que presenta este ajuste.

La comparación de un modelo bi-normal o bi-gaussiano para la mejor definición del histograma. El objetivo es poder justificar, si se diera el caso, la validez o invalidez de alguno de los modelos.

Finalmente se compara los umbrales automáticos y el definido por el técnico **(i)**. Mientras que los análisis anteriores ponen en entredicho los métodos para la obtención de los parámetros de un histograma bivariado, en este análisis se pone en entredicho la validez de los modelos para obtener el umbral óptimo.

AI.4. Datos y zona de estudio

Para comprobar los métodos de resolución y umbralización se ha tomado un total de 174 imágenes de 4 zonas y diferentes (Figura 110).

<p>Costa Mediterránea provincia Castellón Resolución: 1465x2426 26 imágenes disponibles Landsat 7 ETM+</p>	
<p>Segmento de Menorca desde Torre Saura a la Es Canutells Resolución: 857x558 44 imágenes disponibles Landsat 5 TM</p>	

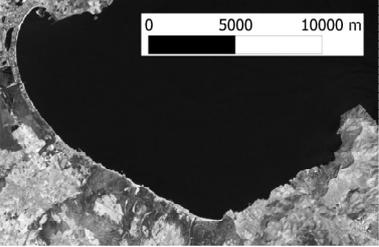
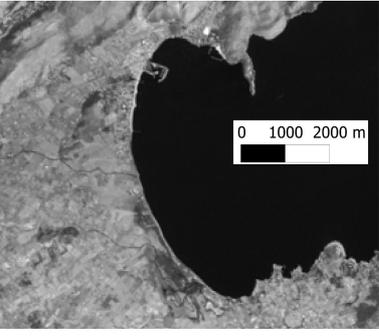
<p>Bahía de Alcudia en Mallorca Resolución: 857x558 49 imágenes disponibles Landsat 5 TM</p>	
<p>Bahía de Pollença en Mallorca Resolución: 291x253 55 imágenes disponibles Landsat 5 TM</p>	

Figura 110. Localización de las zonas de estudio.

AI.5. Análisis y resultados

AI.5.1. Imágenes no adecuadas para el estudio

De las 174 imágenes, resolviendo el modelo bi-normal, sólo 8 han llevado a parámetros ilógicos quedando 166 para siguientes análisis. Por otro lado, resolviendo el modelo bi-gaussiano, 6 imágenes han sido desechadas quedando 168 para el análisis de este modelo. Sólo una imagen lleva a parámetros ilógicos para ambos modelos: la imagen de Landsat 7 ETM+ de 21 de noviembre de 2003 (Figura 111).

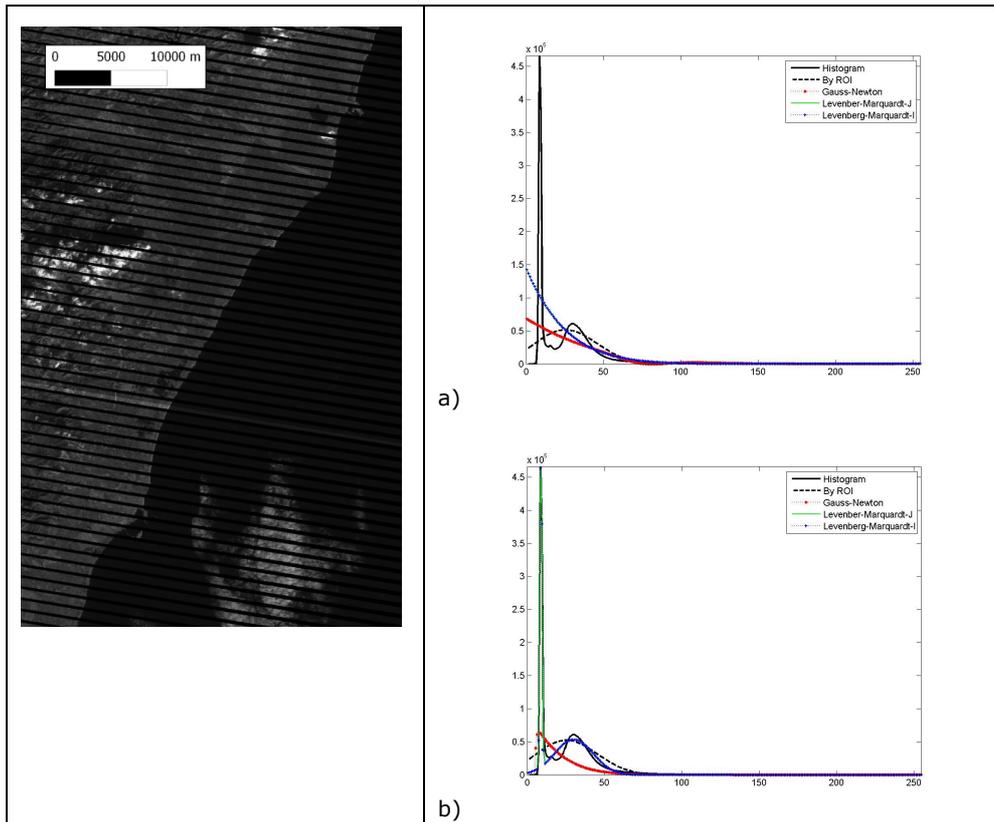


Figura 111. Ajuste de histogramas. Imagen Landsat 7 ETM+ de 21 de noviembre de 2003. a) Modelo bi-gaussiano. b) modelo bi-normal

Varios efectos confluyen en esta escena. Las zonas terrestres quedan oscuras por lo que la curva terrestre se acerca a la de mar sin que exista en la gráfica un valle suficientemente profundo entre ambas distribuciones. Por otro lado, dado que las ROIs se toman en una primera imagen y se aprovecha para todas las imágenes que abarquen la misma área de estudio, lleva a que en este caso se haya promediado zonas nubosas para los parámetros de la zona marina. La elevada media del mar por causa de las nubes y la baja media de tierra por la oscuridad de la imagen llevan a que, de origen, no se dibuje con claridad la curva bi-modal y en consecuencia no converjan las iteraciones.

AI.5.2. Comparación de los métodos iterativos

Los métodos empleados han sido Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt y Levenberg-Marquardt con escalado.

Cuando el modelo a ajustar es el modelo bi-normal, el resultado de los 3 métodos iterativos es idéntico. Cuando el modelo a ajustar es el modelo bi-gaussiano, ambas

versiones iterativas de Levenberg-Marquardt llevan a idéntico resultado; sin embargo, el método de Gauss-Newton coincide con ellos en 140 de las 168 imágenes.

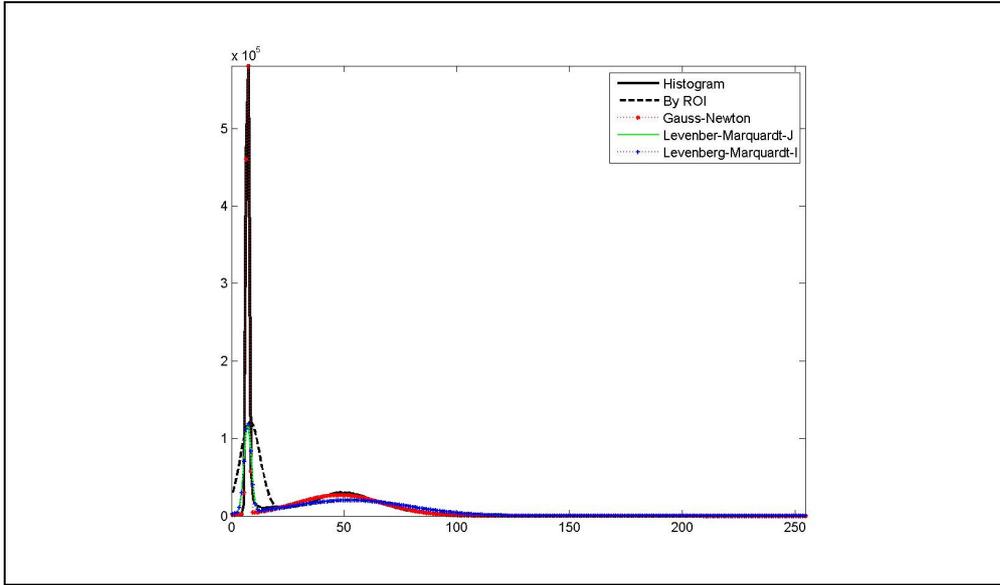


Figura 112. Divergencia de soluciones Gauss-Newton y Levenberg Marquardt

En los casos en que los modelos no coinciden en el resultado –ver Figura 112- el método de Gauss-Newton suele aportar un estimador de varianza menor que el método de Levenberg-Marquardt. Este estimador depende de los residuos –ecuación (30)- referidos como r (R en caso de notación matricial) y los grados de libertad (g.d.l.) por lo que, siendo menor, indica un mejor ajuste.

$$\sigma^2 = \frac{\sum r^2}{g.d.l.} = \frac{R^T \cdot R}{g.d.l.} \quad (30)$$

El objetivo es, una vez se tiene cada ajuste, obtener un umbral. Los 2 modelos y los 3 métodos de iteración llevan a 6 resultados cuyos respectivos umbrales se observan en la Tabla 38

Tabla 38. Comparación de umbrales obtenidos.

Umbral	Gauss-Newton	Levenber-Marquardt escalado	Levenber-Marquardt
Bi_normal	9,02435	9,02543	9,02542
Bi_gaussian	9,10344	10,8518	10,8518

Se concluye que las diferencias por lo diferentes métodos iterativos lleva a variaciones mínimas en la detección del umbral.

AI.5.3. Comparación de los modelos bi-normal y bi-gaussiano

Si se toma todas las imágenes que no han tenido problemas a priori en la resolución de los métodos iterativos se tiene un conjunto de 136 imágenes para comparar.

Las funciones modelo procuran ajustar el histograma de cada imagen, por lo que la variable a ajustar tiene dimensiones de (número de) "píxeles" para cada nivel digital. La diferencia de estimadores de varianza a posteriori entre el modelo bi-normal y bi-gaussiano se concentran en un 95% de casos por debajo de 141 píxeles, y siempre es superior para el ajuste bi-normal. Linealmente su concordancia se encuentra fuertemente correlacionada (Figura 113):

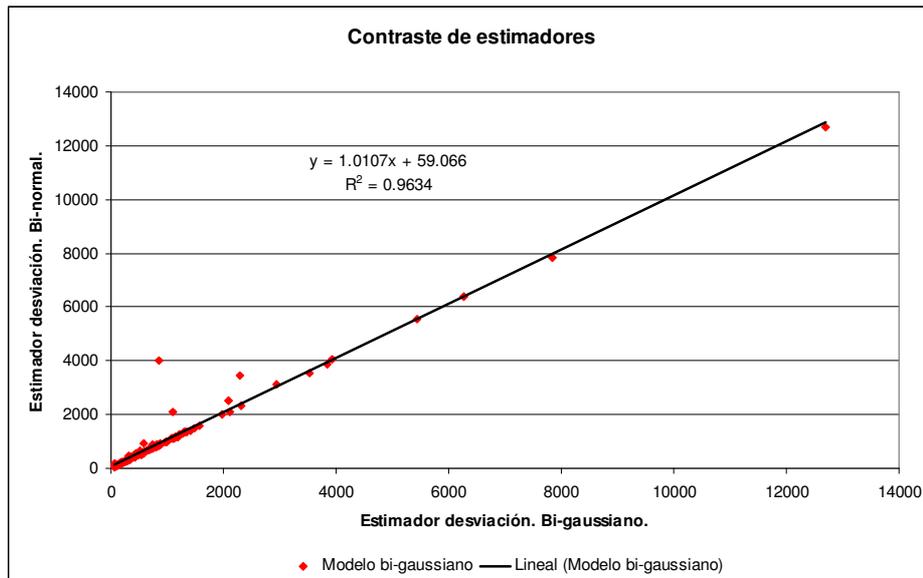


Figura 113. Correlación de estimadores de ajuste bi-gaussiano y bi-normal

No obstante, pese a la aparente divergencia de estimador en ciertas imágenes, se puede considerar que los umbrales resueltos por ambos modelos son idénticos (Figura 114):

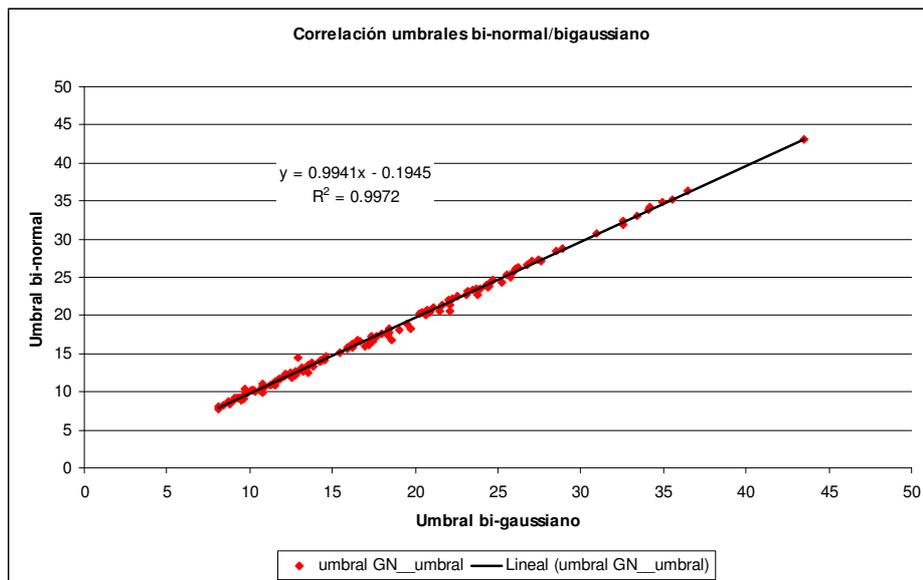


Figura 114. Correlación de umbrales obtenidos por modelo bi-gaussiano y modelo bi-normal.

Al aplicar estos umbrales sobre cada imagen la diferencia no es apreciable por lo que por un modelo u otro la línea de costa obtenida es la misma.

AI.5.4. Validez de los modelos bivariados para la obtención automática de umbrales

La última cuestión a responder es si el esfuerzo por la mejora en los ajustes bi-modales del histograma lleva a un automatismo completo y adecuado. Demostrada la escasa diferencia de umbrales obtenidos por cualquiera de los dos modelos y cualquier método de resolución, sólo intervienen a continuación 3 umbrales: el umbral manual, el umbral deducido de forma directa por el método de ROIs y el ajustado.

El interés por analizar gran cantidad de imágenes tiene por objeto hacer que este análisis esté lo menos afectado por la casuística de imágenes en concreto e interpretaciones humanas erróneas. Con 136 imágenes se considera que ambas fuentes de subjetividad quedan minimizadas.

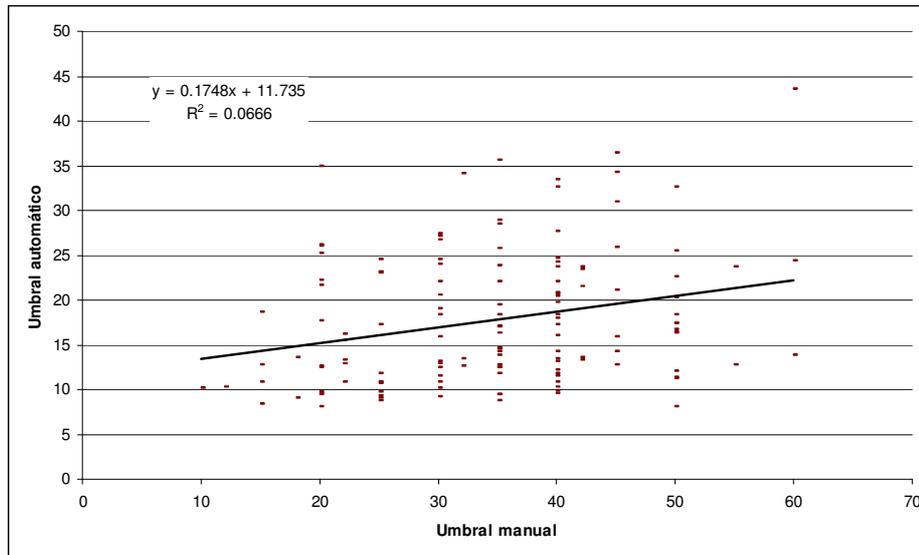


Figura 115. Divergencia de soluciones Gauss-Newton y Levenberg Marquardt

Como se observa en la Figura 115, los umbrales ajustados difieren en gran medida de los umbrales dado de forma manual por lo que pese al ajuste preciso de todos los métodos, no permitirían sustituir el proceso de fotointerpretación tal y conforme hasta ahora se plantea en la metodología global de la tesis.

AI.6. Conclusiones y futuras investigaciones

Se han probado 3 métodos para la semi-automatización de la umbralización de imágenes infrarrojas y separación de las zonas de tierra y mar. El primero, el método de áreas de interés (ROIs) por el cual se obtiene dos curvas normales y se encuentra su intersección.

El segundo y tercero parten de la solución anterior y buscan un ajuste mínimo cuadrático del histograma para evitar que los parámetros resultantes dependan de las ROIs tomadas por el usuario. El segundo ajusta un modelo bi-normal ponderado y el tercero un modelo bi-gaussiano.

Se dan casos específicos en que las imágenes no son aptas bien para la umbralización, o bien incluso para la propia extracción de la línea de costa.

Se ha verificado que ambos modelos (en 136 de las 174 imágenes respectivamente) llevan a soluciones de umbral equivalentes independientemente del método de ajuste iterativo que se emplee.

Por último, los umbrales obtenidos de forma automática se alejan de los umbrales dados de forma manual. Esto invalida, a priori, la posibilidad de umbralizar las imágenes de forma robusta. La incapacidad de ajustar los histogramas no se encuentra en los procesos iterativos ni en la matemática ni modelos de los ajustes realizados sino en la propia naturaleza de las imágenes: la zona marina crea picos muy exagerados en el histograma y los umbrales ajustados se resuelven en valores extremadamente cercanos a este pico marino.

A su vez, la heterogeneidad de la zona terrestre genera una curva extremadamente llana en comparación con la zona marina. Esto lleva de forma directa a considerar que el histograma proviene de la cantidad de píxeles que el área tomada tenga para cada nivel digital por tanto, tal y como apuntan Liu et al. (2004), resulta lógico contemplar la influencia de zonas de área determinada con mayor o menor proporción de mar, así como comprobar -mediante tests de bi-modalidad- que los datos siguen efectivamente dicha distribución, y realizar análisis zonales de bi-modalidad abriendo el camino al empleo de umbrales dinámicos dependientes de la zona concreta.

Anejo II

REVISIÓN MÍNIMOS CUADRADOS NO LINEALES

AII.1. Introducción

La modelización de determinados datos mediante una expresión matemática permite su análisis y previsión. Obtener la expresión matemática que describa tales datos pasa por seleccionar un modelo que los describa y ajustar sus parámetros a tales datos.

El método de mínimos cuadrados está ampliamente reconocido para realizar tal ajuste, sin embargo, si el modelo no es lineal requiere una atención especial. En la literatura matemática su notación es variada, para su comprensión y aplicación en esta tesis se considera útil su deducción y revisión.

El problema de ajuste no lineal parte de N observaciones de la variable aleatoria, y_n , (con $n = 1, \dots, N$). Cada una de estas observaciones se relaciona con otros M observables o variables explicativas x_{nm} (con $m = 1, \dots, M$) mediante una función o modelo dependiente de los parámetros a_p (con $p = 1, \dots, P$). Esto es:

$$y = f(a_p; x_m) \quad (31)$$

Es común encontrarlo en forma matricial como:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(a_p; x_{1m}) \\ f(a_p; x_{2m}) \\ \vdots \\ f(a_p; x_{Nm}) \end{pmatrix} \quad (32)$$

Un ejemplo podría ser:

$$y_n = f(a_p; x_{nm}) = a_1 + a_2 \cdot x_{n1} + a_3 \cdot \sin(x_{n2} + \dots) \quad (33)$$

Así, dados unos datos (y_n, x_{nm}) , el ajuste permite deducir los a_p del modelo. A partir de entonces, dado un x , se deducirá inmediatamente su y correspondiente.

Siendo r_n , el residuo, la diferencia entre lo observado y lo modelizado en cada observación:

$$r_n = y_n - f(a_p; x_{nm})$$

$$R = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 - f(a_p; x_{1m}) \\ y_2 - f(a_p; x_{2m}) \\ \vdots \\ y_N - f(a_p; x_{Nm}) \end{pmatrix} \quad (34)$$

La solución concreta de los parámetros a_p será aquellos a_{p-k} que minimicen el cuadrado de los residuos, χ^2 , siendo:

$$\chi^2 = \sum_{n=1}^N r_n^2 = \min. \quad (35)$$

$$\chi^2 = R^T \cdot R = \min.$$

Cabe destacar que f es la función modelo y χ^2 la función a minimizar. Ambas funciones dependen de los mismos parámetros a_p .

Para que la función χ^2 alcance un mínimo, su pendiente y, por tanto, su derivada deberían anularse en dicho mínimo.

AII.2. Gauss-Newton y Newton-Raphson

Dos métodos para resolver esta cuestión son: el método de Gauss-Newton y el método de Newton-Raphson. El primero de ellos parte de linealizar la función modelo por desarrollo de Taylor hasta primer orden y así recurrir a los mínimos cuadrados tradicionales. El segundo método trata el problema partiendo de la propia función χ^2 .

El método de Gauss-Newton parte de la función original -ecuación (34)-, y desarrolla por Taylor hasta primer orden con unos parámetros aproximados a_{p-0}

$$y_n = f(a_p; x_{nm}) + r_n \cong f(a_{p-0}; x_{nm}) + \left(\frac{\partial f}{\partial a_1} \right)_{a_{p-0}} da_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial a_2} \right)_{a_{p-0}} da_2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial a_p} \right)_{a_{p-0}} da_p \quad (36)$$

Teniendo la derivada de f respecto a cada parámetro se evalúa para cada n -ésimo dato y los parámetros aproximados a_{p-0} , quedando como incógnita los diferenciales da_p (con $p = 1, \dots, P$).

$$\begin{aligned} y_1 - f(a_{p-0}; x_{1m}) &= \left(\frac{\partial f}{\partial a_1}\right)_{a_{p-0}, x_{1m}} da_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial a_2}\right)_{a_{p-0}, x_{1m}} da_2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial a_p}\right)_{a_{p-0}, x_{1m}} da_p + r_1 \\ y_2 - f(a_{p-0}; x_{2m}) &= \left(\frac{\partial f}{\partial a_1}\right)_{a_{p-0}, x_{2m}} da_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial a_2}\right)_{a_{p-0}, x_{2m}} da_2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial a_p}\right)_{a_{p-0}, x_{2m}} da_p + r_2 \\ &\vdots \\ y_N - f(a_{p-0}; x_{Nm}) &= \left(\frac{\partial f}{\partial a_1}\right)_{a_{p-0}, x_{Nm}} da_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial a_2}\right)_{a_{p-0}, x_{Nm}} da_2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial a_p}\right)_{a_{p-0}, x_{Nm}} da_p + r_N \end{aligned} \quad (37)$$

$$K = J_f \cdot da_p + R$$

Sistema que puede verse como un sistema lineal y por ello es llamado modelo *pseudo lineal*, resoluble mediante las ecuaciones normales de mínimos cuadrados:

$$da_p = (J_f^T \cdot J_f)_{a_{p-0}}^{-1} \cdot -(J_f^T \cdot K)_{a_{p-0}} \quad (38)$$

Los nuevos parámetros se obtendrán sumando los diferenciales obtenidos a los aproximados. La siguiente iteración tendrá por parámetros $a_{p-1} = a_{p-0} + da_p$.

El método de Newton-Raphson es un método para encontrar los ceros o raíces de una función. En este caso, minimizar χ^2 -ecuación (35)-, dado que su evaluación depende de los mismos parámetros a_p que la función modelo -ecuación (34)-, equivale a encontrar aquellos parámetros concretos a_{p-k} tales que hagan $\chi^2(a_{p-k}) = \min$.

Dado que $\chi^2(a_p)$ depende de P parámetros, la nulidad de la pendiente para los parámetros concretos a_{p-k} depende de la nulidad de todas las derivadas parciales en dicho a_{p-k} .

$$\begin{aligned}
 J_{\chi^2}(a_{p-k}) &= \bar{0} \\
 \begin{bmatrix} \chi_{a_1}^2 \\ \chi_{a_2}^2 \\ \vdots \\ \chi_{a_p}^2 \end{bmatrix}_{a_{p-k}} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{39}$$

Siendo el subíndice la variable de la derivada parcial correspondiente. Por tanto, el método de Newton-Raphson en mínimos cuadrados consiste en aplicar el método homónimo de localización de ceros o raíces a las derivadas parciales que harán mínima la función χ^2 .

Siendo J_{χ^2} un conjunto de P ecuaciones no lineales, será conveniente hacer sobre ellas respectivos desarrollos de Taylor de primer orden:

$$\begin{aligned}
 \chi_{a_1}^2(a_{p0}) + \left(\frac{\partial}{\partial a_1} \chi_{a_1}^2 \right)_{a_{p0}} \cdot da_1 + \left(\frac{\partial}{\partial a_2} \chi_{a_1}^2 \right)_{a_{p0}} \cdot da_2 + \dots + \left(\frac{\partial}{\partial a_p} \chi_{a_1}^2 \right)_{a_{p0}} \cdot da_p &= 0 \\
 \chi_{a_2}^2(a_{p0}) + \left(\frac{\partial}{\partial a_1} \chi_{a_2}^2 \right)_{a_{p0}} \cdot da_1 + \left(\frac{\partial}{\partial a_2} \chi_{a_2}^2 \right)_{a_{p0}} \cdot da_2 + \dots + \left(\frac{\partial}{\partial a_p} \chi_{a_2}^2 \right)_{a_{p0}} \cdot da_p &= 0 \\
 \vdots & \\
 \chi_{a_p}^2(a_{p0}) + \left(\frac{\partial}{\partial a_1} \chi_{a_p}^2 \right)_{a_{p0}} \cdot da_1 + \left(\frac{\partial}{\partial a_2} \chi_{a_p}^2 \right)_{a_{p0}} \cdot da_2 + \dots + \left(\frac{\partial}{\partial a_p} \chi_{a_p}^2 \right)_{a_{p0}} \cdot da_p &= 0
 \end{aligned} \tag{40}$$

Que, agrupando:

$$\begin{bmatrix} \chi_{a_1}^2 \\ \chi_{a_2}^2 \\ \vdots \\ \chi_{a_p}^2 \end{bmatrix}_{a_{p0}} + \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial a_1} \chi_{a_1}^2 \\ \frac{\partial}{\partial a_1} \chi_{a_2}^2 \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial a_1} \chi_{a_p}^2 \end{bmatrix}_{a_{p0}} \cdot da_1 + \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial a_2} \chi_{a_1}^2 \\ \frac{\partial}{\partial a_2} \chi_{a_2}^2 \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial a_2} \chi_{a_p}^2 \end{bmatrix}_{a_{p0}} \cdot da_2 + \dots + \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial a_p} \chi_{a_1}^2 \\ \frac{\partial}{\partial a_p} \chi_{a_2}^2 \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial a_p} \chi_{a_p}^2 \end{bmatrix}_{a_{p0}} \cdot da_p = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (41)$$

Lo que lleva a un sistema determinado de P ecuaciones con P incógnitas pudiendo emplear cualquier método de inversión de matrices para su resolución.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial a_1} \chi_{a_1}^2 & \frac{\partial}{\partial a_2} \chi_{a_1}^2 & \dots & \frac{\partial}{\partial a_p} \chi_{a_1}^2 \\ \frac{\partial}{\partial a_1} \chi_{a_2}^2 & \frac{\partial}{\partial a_2} \chi_{a_2}^2 & \dots & \frac{\partial}{\partial a_p} \chi_{a_2}^2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial}{\partial a_1} \chi_{a_p}^2 & \frac{\partial}{\partial a_2} \chi_{a_p}^2 & \dots & \frac{\partial}{\partial a_p} \chi_{a_p}^2 \end{bmatrix}_{a_{p0}} \cdot \begin{bmatrix} da_1 \\ da_2 \\ \vdots \\ da_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \chi_{a_1}^2 \\ \chi_{a_2}^2 \\ \vdots \\ \chi_{a_p}^2 \end{bmatrix}_{a_{p0}} \quad (42)$$

Notar que se acaba de escribir el sistema en función de la matriz de segundas derivadas de la función χ^2 o matriz Hessiana. Por ello, este sistema suele encontrarse expresado como sigue –ecuación (43)-:

$$H_{\chi^2} \cdot \delta a_p = -J_{\chi^2} \quad (43)$$

Siendo el método iterativo a resolver

$$a_{p_it+1} = a_{p_it} - \left(H_{\chi^2} \right)_{a_{p_it}}^{-1} \cdot \left(J_{\chi^2} \right)_{a_{p_it}} \quad (44)$$

Ahora bien, es conveniente y práctico que la expresión anterior se pueda expresar en función de la función modelo f y los N datos originales y no en función de la función χ^2 .

Para ello debemos tomar las matrices jacobiana y hessiana de χ^2 de la ecuación (44) y expresarlas en función de la función modelo f . Como se demuestra en desarrollo 2 del apartado siguiente, J_{χ^2} es expresable entonces como –ecuación (45)-:

$$J_{\chi^2}^T(a_p) = [\chi_{a_1}^2(a_p), \chi_{a_2}^2(a_p), \dots, \chi_{a_p}^2(a_p)] = -2 \cdot [R^T]_{1,N} \cdot [J_f(a_p)]_{N,p}$$

$$J_{\chi^2}^T(a_p) = -2 \cdot [r_1 \quad r_2 \quad \dots \quad r_N] \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_p; x_{1m}) & \frac{\partial f}{\partial a_2}(a_p; x_{1m}) & \frac{\partial f}{\partial a_p}(a_p; x_{1m}) \\ \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_p; x_{2m}) & \frac{\partial f}{\partial a_2}(a_p; x_{2m}) & \frac{\partial f}{\partial a_p}(a_p; x_{2m}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_p; x_{Nm}) & \frac{\partial f}{\partial a_2}(a_p; x_{Nm}) & \frac{\partial f}{\partial a_p}(a_p; x_{Nm}) \end{pmatrix} \quad (45)$$

Y la matriz hessiana H_{χ^2} es expresable (ver desarrollo 3 del apartado siguiente de desarrollos) como –ecuación (46)-:

$$H_{\chi^2} = -2 \cdot (J_f^T \cdot J_f + B)$$

$$\text{Siendo } B = \sum_{n=1}^N r_n \cdot H_f(a_{p0}; x_{nm}) \quad (46)$$

Y el sistema de ecuaciones –ecuación (43)- a resolver queda como –ecuación (47) -:

$$H_{\chi^2} \cdot \delta a_p = -J_{\chi^2} \quad (47)$$

$$\left(J_f^T \cdot J_f + B\right)_{a_{p0}} \cdot \delta a_p = -\left(R^T \cdot J_f\right)_{a_{p0}}$$

Donde la resolución es directa:

$$\delta a_p = \left(J_f^T \cdot J_f + B\right)_{a_{p0}}^{-1} \cdot -\left(R^T \cdot J_f\right)_{a_{p0}} \quad (48)$$

Los siguientes parámetros para la iteración serán, de forma equivalente a la ecuación (44):

$$a_{p1} = a_{p0} + \delta a_p \rightarrow a_{p-it+1} = a_{p-it} + \delta a_p$$

$$a_{p-it+1} = a_{p-it} - \left(J_f^T \cdot J_f + B\right)_{a_{p-it}}^{-1} \cdot \left(R^T \cdot J_f\right)_{a_{p-it}} \quad (49)$$

AII.3. Levenberg-Marquardt

El método iterativo derivado para el método de Newton Raphson es –ecuaciones (44) y (50)-

$$a_{p-it+1} = a_{p-it} - \left(H_{\chi^2}\right)_{a_{p-it}}^{-1} \cdot \left(J_{\chi^2}\right)_{a_{p-it}} \quad (50)$$

No es raro encontrar factores que busquen una mejor convergencia del sistema. Uno de ellos es el método de Levenber-Marquardt que tiene por expresión la ecuación (51).

$$a_{p-it+1} = a_{p-it} - \left(H_{\chi^2} + (1 + \lambda) \cdot I\right)_{a_{p-it}}^{-1} \cdot \left(J_{\chi^2}\right)_{a_{p-it}} \quad (51)$$

Y si se sustituye por la formulación dependiente de la función modelo f como se indicó en la ecuación (47) se obtiene –ecuación (52)-:

$$a_{p_it+1} = a_{p_it} - \left((J_f^T \cdot J_f + B) + (1 + \lambda) \cdot I \right)_{a_{p_it}}^{-1} \cdot (R^T \cdot J_f)_{a_{p_it}} \quad (52)$$

En ocasiones, si las diferentes variables tienen diferente naturaleza y sus diferenciales han de ser muy dispares puede llevar a problemas. Este problema de escalado entre variables suele resolverse empleando la propia diagonal de la matriz hessiana para ponderar el salto de la iteración quedando –ecuación (53)-:

$$a_{p_it+1} = a_{p_it} - \left(H_{\chi^2} + (1 + \lambda) \cdot \text{diag}(H_{\chi^2}) \right)_{a_{p_it}}^{-1} \cdot (J_{\chi^2})_{a_{p_it}} \quad (53)$$

O equivalentemente si se vuelve a expresar según la función modelo f :

$$a_{p_it+1} = a_{p_it} - \left((J_f^T \cdot J_f + B) + (1 + \lambda) \cdot \text{diag}(J_f^T \cdot J_f + B) \right)_{a_{p_it}}^{-1} \cdot (J_{\chi^2})_{a_{p_it}} \quad (54)$$

Cuando la solución inicial está suficientemente cerca de la solución definitiva es posible simplificar los cálculos dado que los residuos ya están suficientemente cerca de 0 como para considerar que la matriz B no es necesaria. Esta es la razón que lleva a la fórmula más generalmente conocida de Levenberg Marquardt –ecuación (55)-:

$$a_{p_it+1} = a_{p_it} - \left((J_f^T \cdot J_f) + (1 + \lambda) \cdot I \right)_{a_{p_it}}^{-1} \cdot (R^T \cdot J_f)_{a_{p_it}} \quad (55)$$

Equivalentemente si se tiene en cuenta el problema de escalado –ecuación (56)-:

$$a_{p_it+1} = a_{p_it} - \left((J_f^T \cdot J_f) + (1 + \lambda) \cdot \text{diag}(J_f^T \cdot J_f) \right)_{a_{p_it}}^{-1} \cdot (J_{\chi^2})_{a_{p_it}} \quad (56)$$

AII.4. Desarrollos

AII.4.1. Desarrollo 1: derivada del cuadrado del residuo

El residuo n-ésimo derivado respecto a cualquiera de los P parámetros será:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial a_p} (r_n^2) &= \frac{\partial}{\partial a_p} \left([y_n - f(a_p; x_{nm})]^2 \right) = \\ &= \frac{\partial}{\partial a_p} \left([y_n^2 - 2 \cdot y_n \cdot f(a_p; x_{nm}) + f(a_p; x_{nm})^2] \right) = \\ &= \frac{\partial}{\partial a_p} [y_n^2] - 2 \cdot \frac{\partial}{\partial a_p} [y_n \cdot f(a_p; x_{nm})] + \frac{\partial}{\partial a_p} [f(a_p; x_{nm})^2] = \\ &= [0] - \left[0 + 2 \cdot y_n \cdot \frac{\partial}{\partial a_p} (f(a_p; x_{nm})) \right] + \left[2 \cdot f(a_p; x_{nm}) \cdot \frac{\partial}{\partial a_p} (f(a_p; x_{nm})) \right] = \end{aligned}$$

Pudiendo concluir finalmente:

$$\frac{\partial}{\partial a_p} (r_n^2) = -2 \cdot r_n \cdot \frac{\partial}{\partial a_p} (f(a_p; x_{nm})) \quad (57)$$

AII.4.2. Desarrollo 2: Expresión de la Jacobiana de χ^2 a partir de la función modelo f

El conjunto de derivadas parciales de χ^2 será su vector gradiente y viene dado por su matriz jacobiana:

$$J_{\chi^2}^T(a_p) = \left[\frac{\partial}{\partial a_1}(\chi^2) , \frac{\partial}{\partial a_2}(\chi^2) , \dots , \frac{\partial}{\partial a_p}(\chi^2) \right]$$

La función χ^2 proviene de los residuos de los N puntos muestrales:

$$\frac{\partial}{\partial a_p}(\chi^2) = \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial}{\partial a_p}(r_n^2) \right) \quad (58)$$

Derivar un residuo como indica el término $\frac{\partial}{\partial a_p}(r_n^2)$, tiene sentido en tanto que

depende de los parámetros a_p . Sustituyendo la ecuación (57) en la ecuación (58) se obtiene la ecuación (59).

$$\frac{\partial}{\partial a_p}(\chi^2) = \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial}{\partial a_p}(r_n^2) \right) = \sum_{n=1}^N \left(-2 \cdot r_n \cdot \frac{\partial}{\partial a_p}(f(a_p; x_{nm})) \right) \quad (59)$$

$$\frac{\partial}{\partial a_p}(\chi^2) = -2 \cdot [R^T]_{1,N} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial a_p}(f(a_{p-k}; x_{nm})) \right]_{N,1}$$

Cada r_n es conocido y tras calcular la p -ésima derivada parcial de la función modelo y evaluándola en x_{nm} (con unos parámetros a_{p-k} concretos), se tiene los N datos necesario para el sumatorio o bien matricialmente como se indica -ecuación (59)-.

Con la ecuación (59) se puede obtener cada componente J_{χ^2} . Pudiendo obtener dicha matriz de forma directa a partir de la jacobiana de f , J_f .

$$J_f^T(a_p) = \left[\frac{\partial}{\partial a_1}(f) , \frac{\partial}{\partial a_2}(f) , \dots , \frac{\partial}{\partial a_p}(f) \right] \quad (60)$$

De esta manera se obtiene la forma matricial de calcular J_{χ^2} -ecuación (61)- desde J_f -ecuación (60)-

$$J_{\chi^2}^T(a_p) = \left[\frac{\partial}{\partial a_1}(\chi^2) , \frac{\partial}{\partial a_2}(\chi^2) , \dots , \frac{\partial}{\partial a_p}(\chi^2) \right] = -2 \cdot [R^T]_{1,N} \cdot [J_f(a_p)]_{N,P} \quad (61)$$

Que desarrollada para más claridad queda –ecuación (62)-

$$J_{\chi^2}^T(a_p) = -2 \cdot [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_N] \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_p; x_{1m}) & \frac{\partial f}{\partial a_2}(a_p; x_{1m}) & \frac{\partial f}{\partial a_p}(a_p; x_{1m}) \\ \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_p; x_{2m}) & \frac{\partial f}{\partial a_2}(a_p; x_{2m}) & \frac{\partial f}{\partial a_p}(a_p; x_{2m}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_p; x_{Nm}) & \frac{\partial f}{\partial a_2}(a_p; x_{Nm}) & \frac{\partial f}{\partial a_p}(a_p; x_{Nm}) \end{pmatrix} \quad (62)$$

AII.4.3. Desarrollo 3. Expresión de la hessiana de χ^2 a partir de la función modelo

La matriz hessiana de la suma cuadrática de residuos, χ^2 , se expresa como –ecuación (63)-

$$H_{\chi^2} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial a_1} \chi_{a_1}^2 & \frac{\partial}{\partial a_2} \chi_{a_1}^2 & \frac{\partial}{\partial a_Q} \chi_{a_1}^2 \\ \frac{\partial}{\partial a_1} \chi_{a_2}^2 & \frac{\partial}{\partial a_2} \chi_{a_2}^2 & \dots & \frac{\partial}{\partial a_Q} \chi_{a_2}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial}{\partial a_1} \chi_{a_p}^2 & \frac{\partial}{\partial a_2} \chi_{a_p}^2 & \dots & \frac{\partial}{\partial a_Q} \chi_{a_p}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial a_1 \partial a_1} \chi^2 & \frac{\partial}{\partial a_2 \partial a_1} \chi^2 & \dots & \frac{\partial}{\partial a_Q \partial a_1} \chi^2 \\ \frac{\partial}{\partial a_1 \partial a_2} \chi^2 & \frac{\partial}{\partial a_2 \partial a_2} \chi^2 & \dots & \frac{\partial}{\partial a_Q \partial a_2} \chi^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial}{\partial a_1 \partial a_p} \chi^2 & \frac{\partial}{\partial a_2 \partial a_p} \chi^2 & \dots & \frac{\partial}{\partial a_Q \partial a_p} \chi^2 \end{bmatrix} \quad (63)$$

Que proviene de derivar la expresión respecto a las P variables en primer lugar y, a cada una de las P componentes resultantes, realizar segundas derivadas respecto a las mismas P variables que, por diferenciar el orden en que se realizan llamaremos Q .

Por tanto se compone de $Q \times P$ elementos con $q = 1, \dots, Q$, $p = 1, \dots, P$, siendo $Q = P$, y por tanto, siendo una matriz cuadrada.

Cada uno de sus elementos $\left(\frac{\partial}{\partial a_q} \chi_{a_p}^2 \right)$ proviene de realizar q -ésimas segundas derivadas a las p -ésimas primeras derivadas ya conocidas por ecuación (59). Así:

$$\frac{\partial}{\partial a_q} \chi_{a_p}^2 = \frac{\partial}{\partial a_q} \left(\sum_{n=1}^N \left[-2 \cdot r_n \cdot \frac{\partial}{\partial a_p} (f(a_p; x_{nm})) \right] \right) = \quad (64)$$

Y desarrollando:

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial}{\partial a_q} \left(-2 \cdot r_n \cdot \frac{\partial}{\partial a_p} (f(a_p; x_{nm})) \right) \right] = \\ &= -2 \cdot \sum_{n=1}^N \left[\frac{\partial}{\partial a_q} \left((y_n - f(a_p; x_{nm})) \cdot \frac{\partial}{\partial a_p} (f(a_p; x_{nm})) \right) \right] \end{aligned}$$

Concluyendo –ecuación (65)- como se obtiene cada término de la matriz hessiana de χ^2 desde la función modelo f .

$$\frac{\partial}{\partial a_q} \chi_{a_p}^2 = \frac{\partial}{\partial a_1 \partial a_1} \chi^2 = -2 \cdot \sum_{n=1}^N \left[- \left(\frac{\partial}{\partial a_q} (f(a_p; x_{nm})) \right) \cdot \frac{\partial}{\partial a_p} (f(a_p; x_{nm})) \right] + \left(r_n \cdot \frac{\partial^2}{\partial a_q \partial a_p} (f(a_p; x_{nm})) \right) \quad (65)$$

En cuanto a las *consideraciones de cálculo*, es conveniente visualizar cómo la matriz H_{χ^2} completa resultante es calculable desde la evaluación de la función modelo y su derivada en los N puntos muestrales.

Desarrollando la ecuación (65) para visualizar su cálculo para la primera fila, $p=1$, tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial a_q} \chi_{a_1}^2 = -2 \cdot \left\{ \left[\frac{\partial f}{\partial a} (a_p; x_{1m}) \quad \frac{\partial f}{\partial a_1} (a_p; x_{2m}) \quad \dots \quad \frac{\partial f}{\partial a_1} (a_p; x_{Nm}) \right] \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial a_q} (a_{p0}; x_{1m}) \\ \frac{\partial f}{\partial a_q} (a_{p0}; x_{2m}) \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial a_q} (a_{p0}; x_{Nm}) \end{bmatrix} - \left[r_1 \quad r_2 \quad \dots \quad r_N \right] \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial a_1 \partial a_1} (a_{p0}; x_{1m}) \\ \frac{\partial^2 f}{\partial a_1 \partial a_1} (a_{p0}; x_{2m}) \\ \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial a_1 \partial a_1} (a_{p0}; x_{Nm}) \end{bmatrix} \right\} \quad (66)$$

Así, las P componentes de la primera ecuación quedan:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial a_{1..p}} \chi^2 = (H_{\chi^2})_{1..1-p} = \\
 & = -2 \cdot \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_{p0}; x_{1m}) & \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_{p0}; x_{2m}) & \dots & \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_{p0}; x_{Nm}) \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_{p0}; x_{1m}) & \frac{\partial f}{\partial a_2}(a_{p0}; x_{1m}) & \dots & \frac{\partial f}{\partial a_p}(a_{p0}; x_{1m}) \\ \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_{p0}; x_{2m}) & \frac{\partial f}{\partial a_2}(a_{p0}; x_{2m}) & & \frac{\partial f}{\partial a_p}(a_{p0}; x_{2m}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_{p0}; x_{Nm}) & \frac{\partial f}{\partial a_2}(a_{p0}; x_{Nm}) & \dots & \frac{\partial f}{\partial a_p}(a_{p0}; x_{Nm}) \end{array} \right] - \\
 & - [r_1 \quad r_2 \quad \dots \quad r_N] \cdot \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial^2 f}{\partial a_1 \partial a_1}(a_{p0}; x_{1m}) & \frac{\partial^2 f}{\partial a_2 \partial a_1}(a_{p0}; x_{1m}) & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial a_p \partial a_1}(a_{p0}; x_{1m}) \\ \frac{\partial^2 f}{\partial a_1 \partial a_1}(a_{p0}; x_{2m}) & \frac{\partial^2 f}{\partial a_2 \partial a_1}(a_{p0}; x_{2m}) & & \frac{\partial^2 f}{\partial a_p \partial a_1}(a_{p0}; x_{2m}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial a_1 \partial a_1}(a_{p0}; x_{Nm}) & \frac{\partial^2 f}{\partial a_2 \partial a_1}(a_{p0}; x_{Nm}) & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial a_p \partial a_1}(a_{p0}; x_{Nm}) \end{array} \right] = A - B \quad (67)
 \end{aligned}$$

Se puede distinguir 2 sumandos, A y B . El primero de ellos permitiría resolver el rango completo de H_{χ^2} , es decir, completa las $P \times P$ dimensiones requeridas para la matriz

H_{χ^2} :

$$A = \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_{p0}; x_{1m}) & \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_{p0}; x_{2m}) & \dots & \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_{p0}; x_{Nm}) \\ \frac{\partial f}{\partial a_2}(a_{p0}; x_{1m}) & \frac{\partial f}{\partial a_2}(a_{p0}; x_{2m}) & \dots & \frac{\partial f}{\partial a_2}(a_{p0}; x_{Nm}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial a_p}(a_{p0}; x_{1m}) & \frac{\partial f}{\partial a_p}(a_{p0}; x_{2m}) & \dots & \frac{\partial f}{\partial a_p}(a_{p0}; x_{Nm}) \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_{p0}; x_{1m}) & \frac{\partial f}{\partial a_2}(a_{p0}; x_{1m}) & \dots & \frac{\partial f}{\partial a_p}(a_{p0}; x_{1m}) \\ \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_{p0}; x_{2m}) & \frac{\partial f}{\partial a_2}(a_{p0}; x_{2m}) & & \frac{\partial f}{\partial a_p}(a_{p0}; x_{2m}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial a_1}(a_{p0}; x_{Nm}) & \frac{\partial f}{\partial a_2}(a_{p0}; x_{Nm}) & \dots & \frac{\partial f}{\partial a_p}(a_{p0}; x_{Nm}) \end{array} \right]$$

Que, de forma útil, puede ser calculada desde la evolución de la función modelo:

$$A = J_f^T \cdot J_f$$

Sin embargo, el segundo de los sumandos, B , permite completar el rango de una fila, en este caso donde se ha realizado la derivada respecto del primer parámetro a_1 .

Hay, por tanto, dos formas, (1) y (2) de proceder para el cálculo de B :

(1) Realizar para cada fila p la multiplicación:

$$S_{2p} = [r_1 \quad r_2 \quad \dots \quad r_N] \cdot \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial^2 f}{\partial a_1 \partial a_p}(a_{p0}; x_{1m}) & \frac{\partial^2 f}{\partial a_2 \partial a_p}(a_{p0}; x_{1m}) & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial a_p \partial a_p}(a_{p0}; x_{1m}) \\ \frac{\partial^2 f}{\partial a_1 \partial a_p}(a_{p0}; x_{2m}) & \frac{\partial^2 f}{\partial a_2 \partial a_p}(a_{p0}; x_{2m}) & & \frac{\partial^2 f}{\partial a_p \partial a_p}(a_{p0}; x_{2m}) \\ \vdots & & & \\ \frac{\partial^2 f}{\partial a_1 \partial a_p}(a_{p0}; x_{Nm}) & \frac{\partial^2 f}{\partial a_2 \partial a_p}(a_{p0}; x_{Nm}) & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial a_p \partial a_p}(a_{p0}; x_{Nm}) \end{array} \right]$$

(2) Dada la matriz Hessiana de f , H_f (de dimensiones $P \times P$ como H_{χ^2}), evaluarla en cada n -ésimo punto multiplicada por su r_n correspondiente.

$$B = \sum_{n=1}^N r_n \cdot H_f(a_{p0}; x_{nm}) \tag{68}$$

Realizada esta operación previa, es posible resolver finalmente:

$$H_{\chi^2} = -2 \cdot (J_f^T \cdot J_f + B) \tag{69}$$

Anejo III

RELACIÓN DEL ÍNDICE DE CORRELACIÓN DE PEARSON Y SU CÁLCULO MEDIANTE TRANSFORMADAS DE FOURIER

Seguidamente se presenta la deducción que permite relacionar el coeficiente de correlación de Pearson con la transformada de Fourier. Pese a que muchos softwares la incorporan directamente en el cálculo de correlación cruzada e indican su formulación mediante transformada de Fourier, la razón que permite relacionar el estadístico de Pearson y su formulación espectral no es común.

AIII.1. Índice de correlación de Pearson

El índice de correlación de Pearson es conocido, es un indicador rápido de similitud de comportamiento entre dos series de datos de igual tamaño.

$$\rho_{XY} = \frac{S_{XY}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}$$

Dónde S_{XY} es la covarianza entre las dos series, y σ_X , σ_Y son las desviaciones típicas de X e Y respectivamente. Si las dos series tienen el mismo comportamiento dará un máximo de 1, y si el comportamiento es exactamente inverso será -1, y en caso de

obtener 0, serán variables de comportamiento independiente. Es posible encontrar diversas formulaciones. Desarrollando el término de covarianza:

$$S_{XY} = \frac{\sum_i^n (X_i - \mu_X) \cdot (Y_i - \mu_Y)}{n} \rightarrow \rho_{XY} = \frac{\sum_i^n (X_i - \mu_X) \cdot (Y_i - \mu_Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} \cdot \frac{1}{n} \quad (70)$$

El denominador n , es el número de elementos a sumar. No es extraño considerar que la varianza tiene un grado menos de libertad (dos listas con un solo elemento tendrían covarianza 0, no hay "libertad", por tanto n pasa a ser $n-1$), razón por lo que suele aparecer la siguiente expresión:

$$S_{XY} = \frac{\sum_i^n (X_i - \mu_X) \cdot (Y_i - \mu_Y)}{n-1}$$

Y en consecuencia, la correlación:

$$\rho_{XY} = \frac{\sum_i^n (X_i - \mu_X) \cdot (Y_i - \mu_Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} \cdot \frac{1}{n-1}$$

La diferencia, estadísticamente hablando, es que para un caso ideal con una **población** completa, el denominador es n y para el caso de una **muestra (sample** en inglés) se sustituye por $n-1$.

Es posible seguir desarrollando la última expresión separando cada desviación con su variable en dos términos diferentes:

$$\rho_{XY} = \frac{\sum_i^n (X_i - \mu_X) \cdot (Y_i - \mu_Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} \cdot \frac{1}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n \left(\frac{X_i - \mu_X}{\sigma_X} \right) \cdot \left(\frac{Y_i - \mu_Y}{\sigma_Y} \right) \quad (71)$$

Si a un conjunto de datos se le resta su media, se está obligando a que su nueva media sea 0, lo que se denomina centralización. Si a su vez se divide por la desviación típica, el nuevo conjunto de datos se llama *estandarizado* o *normalizado*. La característica de este proceso es que un conjunto de datos es transformado a otro equivalente de media 0 y desviación típica 1. Estadísticamente esta idea es muy empleada al comparar familias de datos de naturaleza diferente. Si se tiene un conjunto de datos de distinta naturaleza, el coeficiente de correlación incorpora en sí la normalización y las hace comparables.

Si se estandariza las dos series de datos el coeficiente de correlación es simplificable:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{X}_i &= \left(\frac{X_i - \mu_X}{\sigma_X} \right) \\ \tilde{Y}_i &= \left(\frac{Y_i - \mu_Y}{\sigma_Y} \right) \end{aligned} \right\} \rho_{XY} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n \tilde{X}_i \cdot \tilde{Y}_i \quad (72)$$

En ocasiones se encuentran diferentes notaciones

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_{XY} &= \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n X_i \cdot Y_i \\ \rho_{XY} &= \sum_i^n X_i \cdot Y_i \end{aligned} \right\} \quad (73)$$

La primera expresión no es correcta si las variables no están normalizadas. Y en el segundo caso aún menos, aunque en ocasiones se obvia el cociente (1/n) suponiendo que la suma de los productos es el resultado buscado o simplemente que para el objetivo no va a afectar, pero siempre habría de estar advertido que esta igualdad es falsa.

Para el cálculo vectorial de la correlación $X_i \cdot Y_i$ pasarán a indicar su propia versión normalizada $\tilde{X}_i \cdot \tilde{Y}_i$. Así:

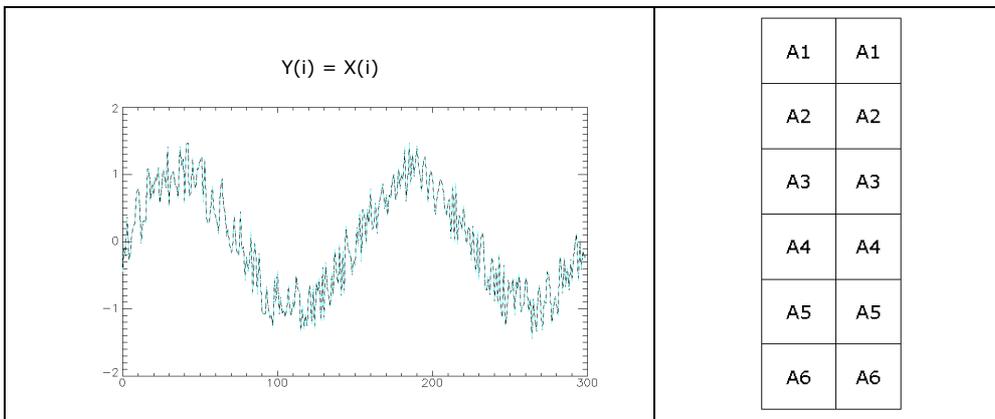
$$\rho_{XY} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n X_i \cdot Y_i = \frac{1}{n} \cdot (\dots X_i \dots) \cdot \begin{pmatrix} \vdots \\ Y_i \\ \vdots \end{pmatrix} = \frac{1}{n} \cdot \bar{X} \cdot \bar{Y}^T \quad (74)$$

Supongamos que en vez de tener una serie de datos, éstas son una función continua, tanto X como Y son funciones que toman valores a lo largo de *i* (lo que en un vector es una posición): *X(i)*, *Y(i)*. A su vez, el cociente (1/n) es interpretable como un *fragmento* o *diferencial*, por tanto el índice de correlación quedaría:

$$\rho_{XY} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n X_i \cdot Y_i = \left(\sum_i^n X_i \cdot Y_i \right) \cdot \frac{1}{n} = \int_i X(i) \cdot Y(i) \cdot di \quad (75)$$

AIII.2. Correlación Cruzada

La correlación de Pearson antes descrita es un indicador estadístico para dos series de datos y toma un sólo valor. Ahora bien, en análisis temporal o desplazamiento de una señal o conjunto de datos puede ser útil hacer un *barrido de correlaciones*. Tómese por ejemplo un conjunto de datos, en este caso una onda con ruido aleatorio y un listado, y hágase una copia respectivamente.



a. Serie sinusoida con ruido aleatorio

b. Dos series de datos

Figura 116. Generación de dos series para evaluación de correlación

Evidentemente, la correlación entre dos series iguales es 1. Ahora bien, desplacemos la copia d unidades a la derecha hacia la derecha:

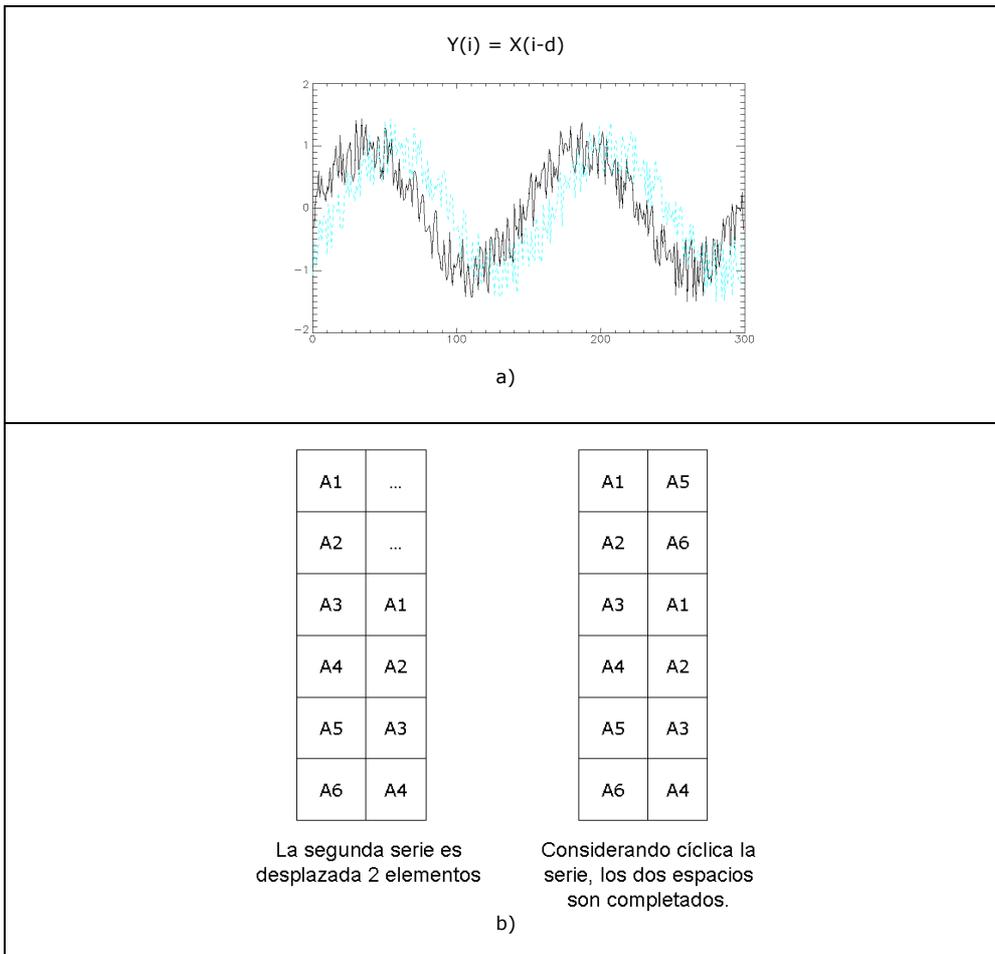


Figura 117. Desplazamiento de series para evaluación de la correlación. a) Serie sinusoide con ruido aleatorio y desplazada. b) Dos series de datos desplazadas.

Cada elemento no tiene a su igual como pareja de cálculo por lo que no obtendremos valor 1 en la correlación. Según esta lógica, dado un conjunto discreto de datos, desplazando la segunda lista 6 veces se estará recuperando el desplazamiento. Por tanto, si sabemos que la segunda lista ha sido desplazada, existirá un desplazamiento $d=6$ en que la correlación volverá a ser 1.

¿Cuántas veces habría que desplazar a la izquierda la señal $Y(i)$ para recuperar su posición respecto de $X(i)$? En este caso se observa fácilmente, 2 píxeles. Matemáticamente es importante saber que si para crear la nueva serie desplazada a la

derecha hemos empleado la expresión $Y(i) = X(i-d)$, desplazar la señal a la izquierda será una nueva serie móvil $M(i) = Y(i+c)$

En la tabla podemos ver $X(i)$, un desplazamiento impuesto $Y(i) = X(i-d)$, y seguidamente 6 series que son $Y(i)$ desplazadas c veces a la izquierda

X (i)	Y (i)	Y (i+c)					
A1	A5	A5	A6	A1	A2	A3	A4
A2	A6	A6	A1	A2	A3	A4	A5
A3	A1	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A4	A2	A2	A3	A4	A5	A6	A1
A5	A3	A3	A4	A5	A6	A1	A2
A6	A4	A4	A5	A6	A1	A2	A3
	C =	0	1	2	3	4	5
	ρ =	<1	<1	1	<1	<1	<1

Figura 118. Comportamiento detallado de la correlación para detectar desplazamiento en una serie de datos

Sólo en una posición el índice de correlación será máximo, en este caso ideal 1, y dado que la traslación de la serie está controlada, nos indicará el desplazamiento que separa $X(i)$ y $Y(i)$. A su vez se demuestra que todas las posibilidades de correlación quedan en un único vector de mismo tamaño que las dos series a comparar.

Este proceso se denomina correlación cruzada (cross correlation) y tiene por resultado un vector de correlaciones.

i) Formulación

Como se ha visto al principio, ρ_{XY} es un único valor:

$$\rho_{XY} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n X_i \cdot Y_i = \frac{1}{n} \cdot (\dots X_i \dots) \cdot \begin{pmatrix} \vdots \\ Y_i \\ \vdots \end{pmatrix} = \frac{1}{n} \cdot \bar{X} \cdot \bar{Y}^T \quad (76)$$

Pero ahora a cada posición c se asocia un índice, por tanto podemos escribir:

$$\rho_{XY}(c) = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n X_i \cdot Y_{i+c} \quad (77)$$

dónde es importante $(i + c)$ porque hemos demostrado un comportamiento específico de desplazamiento de las series, su desplazamiento y la recuperación del mismo.

ii) Generalización

Del mismo modo que expresábamos la correlación:

$$\rho_{XY} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n X_i \cdot Y_i = \left(\sum_i^n X_i \cdot Y_i \right) \cdot \frac{1}{n} = \int_i X(i) \cdot Y(i) \cdot di \quad (78)$$

El vector de correlaciones podría ser una función continua que asociara a una variable espacial c la correlación de una función con otra:

$$\rho_{XY}(c) = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n X_i \cdot Y_{i+c} = \left(\sum_i^n X_i \cdot Y_{i+c} \right) \cdot \frac{1}{n} = \int_i X(i) \cdot Y(i+c) \cdot di \quad (79)$$

iii) Cuestiones de cálculo

La idea intuitiva es clara. El resultado podría obtenerse matricialmente. Si recordamos, una sola correlación es:

$$\rho_{XY} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n X_i \cdot Y_i = \frac{1}{n} \cdot (\dots X_i \dots) \cdot \begin{pmatrix} \vdots \\ Y_i \\ \vdots \end{pmatrix} = \frac{1}{n} \cdot \bar{X} \cdot \bar{Y}^T \quad (80)$$

Para cada caso en que la serie Y_i se desplaza a la izquierda una cantidad c podemos expresar:

$$\begin{aligned} \rho_{XY}(c) &= \frac{1}{n} \cdot (\dots X_i \dots) \bullet \begin{pmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{i+0} & Y_{i+1} & \dots & Y_{i+c} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} = \\ &= \frac{1}{n} \cdot \bar{X}(i) \cdot \bar{Y}(i+c)^T = \text{vector fila} \end{aligned} \quad (81)$$

Esta notación no se encuentra en ninguna bibliografía estudiada pero dada la deducción siguiente tampoco es necesaria, aunque ayuda a la comprensión.

Lo incómodo del cálculo anterior es que, dadas las dos series, ha de crearse sintéticamente la matriz $Y(i+c)$.

AIII.3. Relación con la transformada de Fourier

Es normal que si se comparan dos series que puedan tener un comportamiento cíclico, éste sea estudiado en el ámbito de frecuencias, es decir, a través de la transformada de Fourier.

Si bien la expresión general de una correlación entre dos series era:

$$\rho_{XY} = \int_i X(i) \cdot Y(i) \cdot di$$

A lo largo de un eje que recorre las traslaciones que se aplican a Y para obtener las diferentes correlaciones, tendremos que:

$$\rho_{XY}(c) = \int_i X(i) \cdot Y(i+c) \cdot di$$

La transformada de Fourier es:

$$F(\xi) = \int f(x) \cdot e^{-j2\pi x\xi} dx$$

La variable espacial será el desplazamiento c , por tanto:

$$F(\xi) = \int \left(\int_i X(i) \cdot Y(i+c) \cdot di \right) \cdot e^{-j2\pi c \xi} dc$$

$$(i+c) = w \Rightarrow F(\xi) = \int \left(\int_i X(i) \cdot Y(w) \cdot di \right) \cdot e^{-j2\pi(w-i)\xi} dw$$

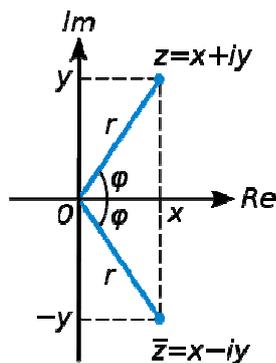
$$F(\xi) = \left(\int_i X(i) \cdot e^{-j2\pi(-i)\xi} \cdot di \right) \cdot \left(\int_w Y(w) \cdot e^{-j2\pi(w)\xi} \cdot dw \right)$$

Lo que equivale a dos transformadas de Fourier independientes, pero debemos tener alguna precaución:

$$\left(\int_w Y(w) \cdot e^{-j2\pi(w)\xi} \cdot dw \right) = TF(Y(w)) = TF(Y(i))$$

Para la función $Y(w)$, dado que w es una variable a lo largo del eje en que Y está definida (el mismo de las correlaciones cruzadas), da igual $Y(w)$ que $Y(i)$, es una mera forma de denotarla.

El conjugado de un número complejo implica cambiar el signo de la parte imaginaria:



Pero si el número está expresado en forma exponencial:

$$(x + jy)^* = (x - jy)$$

$$(r \cdot e^{-j\phi})^* = r \cdot e^{+j\phi}$$

Para la función $X(i)$ al tener un negativo en el numerador, podemos hablar de conjugados

$$X(i) \cdot e^{-j2\pi(-i)\xi} = (X(i) \cdot e^{-j2\pi i \xi})^*$$

Con lo que:

$$F(\xi) = \left(\int_i X(i) \cdot e^{-j2\pi(-i)\xi} \cdot di \right) \cdot \left(\int_w Y(w) \cdot e^{-j2\pi(w)\xi} \cdot dw \right)$$
$$F(\xi) = \left(\int_i (X(i) \cdot e^{-j2\pi(i)\xi})^* \cdot di \right) \cdot \left(\int_w Y(w) \cdot e^{-j2\pi(w)\xi} \cdot dw \right)$$

Y por las propiedades de la transformada de Fourier:

$$F(\xi) = TF^*(X) \cdot TF(Y)$$

Y dado que venimos de realizar la transformada a la correlación, nos será devuelta al hacer la transformada inversa. Por tanto la correlación cruzada es calculable mediante la expresión:

$$\rho_{XY}(c) = \int_i X(i) \cdot Y(i+c) \cdot di = TF^{-1}(TF^*(X) \cdot TF(Y))$$

Anejo IV

TABLAS COMPLEMENTARIAS CAPÍTULO DE EXTRACCIÓN DE LÍNEA DE COSTA

AIV.1. Descripción

Se recoge aquí el conjunto de tablas que sustentan las gráficas del Capítulo II.

AIV.2. Error medio por degradación, fecha y zona de evaluación

Tabla 39. Error medio por degradación, fecha y zona de evaluación.

Resolución	Zona	20041026		20050718		20060409		20060104		20071127	
		Num. puntos	Error (m.)								
9,6	1	240	-0,266	258	-0,273	267	-1,508	422	25,230		
9,6	2	905	-1,451	951	0,900	1031	-2,474	1482	26,937	1292	48,539

9,6	3	1067	-1,009	1209	0,585	1237	-1,245	1378	2,381	1290	27,162
9,6	4	2963	0,123	2965	0,296	2960	-1,144	4222	40,424	4760	131,874
9,6	5	1332	-0,680	1360	-1,413	1358	-3,022	1999	39,080	1850	85,595
9,6	6	1106	1,702	1373	1,041	1344	-0,623	2162	31,043	1861	97,222
9,6	7	1890	0,349	1945	0,738	1892	0,310	2575	34,783	2649	95,460
9,6	8	2357	-4,583	2500	-0,680	2570	-1,616	3200	28,860	3452	74,866
14,4	1	378	1,069	263	-0,311	255	-0,932	385	40,022		
14,4	2	1553	-4,588	1057	-1,684	1073	-6,425	1592	43,557	2214	15,908
14,4	3	1696	0,431	1138	0,873	1194	-1,631	1264	3,843	1896	30,059
14,4	4	4118	1,968	2761	1,548	2757	-0,405	4359	52,091	7444	122,944
14,4	5	1905	3,225	1289	-1,168	1265	-1,638	2099	51,218	2828	86,282
14,4	6	1559	2,789	1281	0,984	1257	-1,547	2308	45,778	3009	88,360
14,4	7	2734	1,724	1848	1,647	1780	0,668	2942	47,079	4049	78,670
14,4	8	3652	-4,937	2608	0,968	2583	-0,354	3441	28,379	5586	83,689
19,6	1	443	0,646	427	-0,224	454	-0,673	603	46,371		
19,6	2	1804	-6,443	1840	-1,479	1919	-6,560	2542	50,071	2387	35,087
19,6	3	1880	0,481	1974	1,025	2089	-1,430	2071	3,487	2121	29,764
19,6	4	4974	2,066	4970	1,449	4962	-0,219	6910	61,813	7440	136,235
19,6	5	2247	2,510	2275	-1,121	2262	-1,460	3344	60,689	2855	97,950
19,6	6	1815	1,165	2302	1,147	2241	-1,315	3664	58,148	3217	100,463
19,6	7	3220	1,062	3248	1,792	3152	0,769	4277	48,840	4572	85,770
19,6	8	4159	-0,073	4549	1,263	4538	-0,240	5572	29,528	5566	83,451
24	1	332	1,790	328	0,529	360	-0,510	451	34,935		
24	2	1448	-7,278	1504	-3,523	1546	-7,496	2114	40,963	2160	82,304
24	3	1588	0,697	1607	0,526	1702	-0,317	1579	4,931	1709	28,296
24	4	4073	3,734	4066	2,534	4045	0,898	5590	69,323	6416	164,493
24	5	1869	5,540	1862	-0,516	1850	-0,464	2643	69,139	2575	118,434
24	6	1508	3,000	1868	1,577	1828	-0,956	3044	61,772	2533	124,781
24	7	2658	1,815	2653	2,378	2589	1,240	3689	52,726	3981	117,619
24	8	3402	3,994	3668	2,162	3723	0,796	4283	28,666	5957	129,079
28,8	1	197	2,367	199	0,800	213	1,357	233	40,252		
28,8	2	969	-5,833	987	-3,675	1032	-7,565	1325	29,390	1392	69,962
28,8	3	1002	2,964	1079	1,808	1084	-0,547	963	7,701	1078	29,512
28,8	4	2702	4,826	2709	3,108	2693	1,759	3836	71,784	3660	166,082
28,8	5	1217	5,415	1234	0,086	1226	0,153	1769	74,821	1420	128,455
28,8	6	966	3,247	1242	2,163	1213	-0,561	2024	64,260	1582	130,191
28,8	7	1764	2,064	1754	2,588	1701	1,498	2438	55,913	2225	107,121
28,8	8	2248	5,034	2450	3,166	2496	1,491	2726	26,788	2737	84,322
33,6	1	166	3,664	167	0,870	180	2,316	183	34,054		

TABLAS DEL CAPÍTULO II. EXTRACCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

33,6	2	791	-5,051	865	-4,431	867	-7,884	1048	27,889	1091	113,820
33,6	3	811	4,484	908	0,924	898	-0,211	788	12,147	910	32,252
33,6	4	2316	6,207	2320	3,816	2315	2,709	3272	73,487	3445	191,409
33,6	5	1045	8,204	1058	1,231	1049	0,806	1482	79,469	1340	144,677
33,6	6	871	6,220	1062	3,098	1043	0,523	1655	62,972	1417	145,856
33,6	7	1506	3,467	1515	3,700	1465	2,083	2066	60,616	2129	134,573
33,6	8	1915	6,930	2139	3,669	2145	2,399	2283	27,124	2696	124,098

Anejo V

TABLAS COMPLEMENTARIAS CAPÍTULO IV

AV.1. Descripción

Se recoge aquí el conjunto de tablas que sustentan las gráficas del Capítulo IV

AV.2. Estadísticas líneas georreferenciadas sin corrección radiométrica

AV.2.1. Landsat 5

Tabla 40. Banda 4. Escollera 2.

Fecha (aaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19840525	427	7,587	8,475	5,894	-17,666	20,975	38,641	4,339	11,604	7,265
19840626	422	7,919	8,151	4,285	-2,357	16,919	19,276	4,229	11,244	7,014
19840703	426	5,312	5,216	6,437	-13,901	25,207	39,108	1,987	8,173	6,187
19840921	427	4,424	3,835	6,841	-15,110	25,309	40,419	0,102	8,446	8,344
19840930	423	11,622	11,183	6,747	-20,197	32,107	52,305	8,187	14,654	6,466
19841007	420	11,259	11,836	6,331	-18,551	26,789	45,339	7,513	14,386	6,873
19841023	430	8,482	7,614	6,333	-3,608	24,357	27,966	3,829	11,826	7,998
19841124	435	12,244	13,174	6,486	-5,569	26,666	32,235	8,298	16,315	8,017
19850325	429	8,358	8,490	4,263	-7,498	18,011	25,510	5,934	11,197	5,264
19850410	425	9,188	9,628	5,516	-4,445	23,537	27,982	5,372	12,975	7,603
19860522	416	11,235	11,917	8,860	-11,874	32,791	44,666	4,370	17,870	13,499
19860623	424	3,438	3,554	6,435	-18,044	16,893	34,936	0,081	8,036	7,956
19860810	406	2,091	1,088	6,601	-9,958	21,458	31,417	-2,081	6,124	8,205
19860826	425	7,217	7,372	5,447	-9,901	21,029	30,930	3,450	10,618	7,167
19861029	429	8,976	8,338	5,896	-18,342	23,352	41,694	5,240	12,479	7,239
19870416	426	10,019	9,918	5,469	-6,481	23,747	30,228	6,528	13,687	7,159
19870423	426	6,910	6,665	4,660	-3,621	20,925	24,546	3,330	9,516	6,185
19870502	399	5,921	6,351	5,724	-11,946	17,383	29,329	1,715	10,173	8,458
19870626	432	5,707	5,742	4,985	-6,419	22,973	29,392	2,253	8,229	5,976
19870712	421	4,554	4,748	6,249	-10,888	18,547	29,435	1,330	8,612	7,282
19870813	424	3,716	3,596	5,374	-10,929	15,631	26,560	-0,402	7,437	7,839
19870907	423	8,433	8,605	6,181	-3,174	29,621	32,795	3,677	11,812	8,134
19870923	426	8,263	8,372	5,039	-1,694	25,312	27,006	4,602	11,268	6,666
19900906	425	6,595	4,759	7,532	-5,029	30,269	35,298	1,756	9,957	8,201
20020619	756	-1,236	-1,353	4,826	-20,975	9,425	30,401	-4,044	2,049	6,094
20020628	770	5,702	6,046	6,187	-17,987	21,113	39,101	1,975	10,024	8,049
20030701	767	3,074	2,734	3,513	-5,613	13,014	18,627	0,396	5,590	5,195
20030708	759	0,217	-0,158	4,620	-10,516	12,059	22,575	-3,164	3,519	6,682
20030724	764	-0,759	-0,479	5,036	-14,170	11,312	25,482	-4,082	2,716	6,798
20030802	765	4,736	4,924	4,870	-7,452	19,982	27,433	1,693	7,542	5,849
20030809	752	0,837	0,689	6,207	-15,266	15,223	30,489	-3,745	5,853	9,598

TABLAS DEL CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DEL ALGORITMO SOBRE IMÁGENES LANDSAT

20030818	768	6,058	6,077	4,459	-10,868	20,156	31,023	3,599	8,605	5,006
20030825	766	0,323	0,650	4,622	-13,220	12,231	25,451	-2,532	3,302	5,834
20061029	770	6,056	5,293	5,750	-20,570	29,461	50,032	2,679	9,572	6,893
20061114	770	6,287	6,218	6,018	-8,534	23,589	32,123	2,504	9,707	7,203
20070108	762	6,104	6,373	6,044	-13,112	18,584	31,696	2,807	10,108	7,301
20070124	764	4,265	4,219	5,588	-9,073	17,902	26,975	0,183	8,033	7,849
20070209	762	5,347	4,690	6,492	-8,018	25,780	33,798	0,978	9,696	8,718
20070313	752	2,060	2,065	5,402	-14,209	22,360	36,569	-1,520	6,158	7,677
20070509	750	-2,052	-2,237	3,392	-11,403	6,871	18,274	-4,250	0,539	4,789
20070703	184	-1,872	-2,005	4,109	-14,819	7,205	22,023	-4,130	1,249	5,379
20070728	767	2,407	2,628	3,881	-12,423	15,393	27,815	-0,113	4,828	4,941
20070804	754	-0,478	-0,493	5,558	-15,959	16,844	32,802	-4,192	3,153	7,346
20070813	762	-0,103	0,459	4,461	-18,021	8,165	26,186	-2,220	3,168	5,388
20070820	761	1,594	2,287	4,996	-18,930	13,248	32,177	-1,268	4,746	6,014
20090622	733	1,673	2,035	6,487	-24,132	19,755	43,887	-2,250	5,944	8,193
20090724	751	-0,710	-0,697	4,010	-14,796	8,499	23,295	-3,079	2,162	5,241
20090910	767	1,073	0,914	4,881	-13,695	13,464	27,159	-2,134	3,967	6,100
20091012	751	1,060	0,834	4,438	-11,219	13,011	24,230	-1,963	3,816	5,779
20100524	737	-3,539	-3,287	4,714	-16,026	12,767	28,793	-6,920	-0,933	5,987
20100711	743	-2,386	-1,951	4,518	-17,599	9,140	26,739	-5,642	0,815	6,456
20100727	747	-2,096	-2,090	4,276	-14,724	10,025	24,749	-5,440	1,126	6,566
20101116	755	4,908	4,549	4,788	-9,664	20,036	29,700	2,040	8,170	6,130
20110119	250	8,561	8,239	6,718	-17,551	24,972	42,524	5,731	12,183	6,453
20110204	771	8,461	8,182	6,102	-7,248	26,125	33,373	3,645	12,436	8,791
20110409	763	-1,044	-1,719	5,438	-11,160	14,713	25,873	-5,142	2,476	7,619
20110511	741	-3,802	-3,661	3,909	-15,620	7,071	22,691	-6,439	-1,045	5,394
20110628	744	-4,453	-4,220	4,507	-18,594	7,420	26,014	-7,305	-1,388	5,917
20110815	751	-1,982	-1,869	4,241	-13,376	7,845	21,221	-4,641	1,230	5,871
Total	35595	3,225	2,885	6,818	-24,132	32,791	56,923	-1,443	7,587	9,031

Tabla 41. Banda 4. Escollera 3.

Fecha (aaaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19840525	457	0,802	0,743	3,287	-7,049	8,635	15,683	-1,572	3,242	4,813
19840626	461	1,907	1,672	4,604	-9,185	15,781	24,966	-1,157	5,810	6,967
19840703	436	-1,164	-0,714	3,782	-13,638	9,073	22,712	-3,167	1,158	4,325
19840921	436	-2,436	-2,886	3,841	-15,417	6,708	22,125	-5,008	0,373	5,381
19840930	461	2,058	1,501	3,604	-5,396	12,910	18,306	-0,329	4,069	4,398
19841007	418	3,123	1,944	5,882	-10,481	16,094	26,576	-0,770	7,177	7,947
19841023	431	1,369	1,330	2,826	-7,760	8,855	16,614	-0,576	3,359	3,935
19841124	411	4,067	3,307	5,034	-6,449	17,387	23,836	0,607	6,692	6,086
19850325	461	1,716	2,319	5,138	-7,844	14,085	21,929	-2,888	5,802	8,690
19850410	460	0,911	0,226	5,084	-12,677	12,376	25,052	-2,821	5,242	8,062
19860522	430	0,188	-0,159	4,159	-8,627	12,022	20,649	-2,669	2,777	5,446
19860623	430	-3,821	-3,217	4,687	-15,003	9,218	24,221	-7,190	-0,426	6,764
19860810	426	-4,005	-4,460	4,035	-12,202	8,080	20,283	-7,126	-1,101	6,025
19860826	420	-1,110	-1,002	4,165	-10,534	11,200	21,734	-4,126	1,437	5,563
19861029	421	1,717	1,317	4,509	-7,332	12,761	20,093	-1,546	4,291	5,836
19870416	605	2,928	2,955	4,536	-11,202	16,303	27,505	-0,336	6,129	6,464
19870423	555	0,326	0,085	4,172	-8,603	13,358	21,961	-2,371	2,571	4,942
19870502	605	0,279	-0,168	4,509	-9,008	16,851	25,859	-2,137	2,737	4,874
19870626	563	-1,970	-1,855	5,170	-12,360	13,387	25,747	-5,949	0,850	6,799
19870712	567	-0,868	-0,712	4,485	-15,483	16,169	31,652	-3,595	1,916	5,511
19870813	562	-0,426	-0,115	5,386	-13,835	15,466	29,301	-4,034	3,036	7,070
19870907	593	3,654	3,355	4,476	-10,138	18,560	28,698	0,652	5,615	4,963
19870923	593	2,997	1,697	4,367	-6,683	16,982	23,665	-0,442	6,101	6,544
19900906	260	-1,214	-2,260	6,626	-15,647	15,626	31,273	-5,922	1,971	7,893
20020619	567	-5,589	-5,866	3,529	-16,196	8,798	24,995	-8,028	-3,236	4,792
20020628	609	-1,210	-1,548	5,563	-14,368	12,945	27,312	-5,528	2,436	7,963
20030701	608	-0,625	-0,774	3,132	-9,300	12,282	21,581	-2,644	1,123	3,767
20030708	565	-3,841	-3,524	4,270	-19,103	8,261	27,365	-6,755	-1,017	5,738
20030724	565	-4,640	-4,602	4,202	-21,041	6,216	27,257	-7,354	-1,756	5,598
20030802	606	0,274	0,080	3,765	-9,933	10,986	20,919	-1,934	2,771	4,706
20030809	569	-3,204	-3,690	4,780	-15,692	14,767	30,459	-6,568	-0,278	6,290
20030818	606	1,791	1,568	3,395	-6,022	12,248	18,271	-0,689	3,960	4,649
20030825	567	-2,547	-2,565	3,480	-13,420	7,200	20,619	-5,054	-0,224	4,830
20061029	601	4,252	4,039	3,690	-5,881	14,770	20,651	2,134	6,840	4,706
20061114	601	5,574	5,888	4,452	-11,840	15,045	26,884	2,573	8,977	6,404
20070108	551	5,397	6,017	6,236	-18,210	19,515	37,724	2,035	9,516	7,481
20070124	552	3,943	4,001	3,826	-7,369	11,783	19,152	1,421	6,900	5,480
20070209	569	3,550	4,050	5,447	-8,468	12,996	21,465	-1,306	8,369	9,675
20070313	560	0,252	-0,040	3,627	-10,663	12,892	23,556	-1,845	2,498	4,344
20070509	606	-1,152	-1,170	3,320	-13,387	7,788	21,175	-3,472	1,242	4,714

TABLAS DEL CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DEL ALGORITMO SOBRE IMÁGENES LANDSAT

20070703	567	-2,448	-2,807	5,471	-17,067	11,140	28,207	-6,315	0,885	7,200
20070728	610	1,202	0,996	3,088	-8,011	9,767	17,778	-1,000	3,027	4,027
20070804	569	-2,786	-3,099	4,228	-11,899	11,452	23,352	-6,120	-0,281	5,839
20070813	604	-0,064	-0,164	3,154	-9,258	8,761	18,019	-2,378	1,875	4,253
20070820	564	-0,227	-0,207	4,228	-10,744	10,429	21,172	-3,149	2,973	6,123
20090622	542	0,238	-0,513	5,599	-14,004	19,180	33,183	-3,466	3,695	7,161
20090724	569	-2,831	-2,738	4,507	-12,341	10,385	22,725	-6,291	0,263	6,555
20090910	565	-0,010	0,299	3,809	-11,011	14,514	25,524	-2,426	2,435	4,861
20091012	569	1,300	1,039	3,384	-10,671	10,094	20,765	-0,536	3,500	4,036
20100524	574	-3,984	-3,933	4,641	-18,215	5,563	23,778	-6,997	-0,511	6,486
20100711	570	-4,144	-4,259	4,597	-18,373	8,938	27,310	-7,345	-0,975	6,370
20100727	564	-3,262	-2,992	3,807	-14,746	7,180	21,926	-5,835	-0,669	5,166
20101116	552	2,880	2,506	4,690	-14,242	13,235	27,477	0,270	6,664	6,394
20110119	318	2,908	2,241	4,672	-9,263	16,429	25,692	-0,512	6,124	6,636
20110204	560	5,038	4,617	4,621	-8,542	18,677	27,220	1,456	8,218	6,762
20110409	565	-0,795	-0,505	3,895	-12,023	8,878	20,901	-3,564	1,555	5,119
20110511	567	-4,525	-4,747	3,750	-16,196	7,642	23,838	-7,023	-2,394	4,629
20110628	569	-3,570	-3,807	4,316	-13,216	8,418	21,634	-6,662	-0,894	5,768
20110815	567	-2,679	-2,467	3,359	-13,299	8,418	21,717	-4,824	-0,540	4,284
Total	31329	-0,100	-0,262	5,201	-21,041	19,515	40,555	-3,542	3,180	6,722

Tabla 42. Banda 5. Escollera 2.

Fecha (aaaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19840525	428	14,128	13,258	4,623	4,490	24,303	19,813	10,574	17,661	7,087
19840626	423	12,093	11,504	4,034	3,557	23,548	19,991	8,916	14,605	5,690
19840703	426	9,318	9,475	6,171	-2,331	28,723	31,054	3,708	12,619	8,911
19840921	428	9,890	10,217	7,106	-3,053	29,335	32,388	4,383	14,908	10,525
19840930	424	16,238	14,653	5,904	1,647	37,950	36,304	12,187	20,054	7,867
19841007	429	10,655	10,358	7,063	-3,703	29,947	33,650	5,400	15,496	10,096
19841023	432	12,539	11,753	6,797	-0,489	30,729	31,218	7,064	17,321	10,257
19841124	430	13,616	12,481	4,522	4,479	28,155	23,676	10,476	16,494	6,018
19850325	429	15,409	14,220	5,609	-2,193	36,982	39,174	11,578	19,040	7,462
19850410	428	11,517	11,956	5,621	-2,811	22,932	25,743	8,579	15,334	6,754
19860522	418	11,491	10,560	5,764	1,212	26,419	25,207	6,861	16,202	9,341
19860623	432	9,970	9,555	4,140	1,505	20,646	19,142	6,729	13,059	6,330
19860810	422	10,595	9,841	5,327	-0,494	29,764	30,258	7,103	13,181	6,078
19860826	427	10,688	10,441	4,683	0,115	22,707	22,592	7,347	14,429	7,082
19861029	430	11,974	11,406	4,853	-0,384	26,721	27,105	9,215	14,845	5,630
19870416	427	14,850	14,883	6,061	0,790	34,788	33,998	11,716	18,453	6,737
19870423	405	9,687	9,531	4,774	-10,687	23,033	33,720	6,712	12,069	5,358
19870502	336	12,613	11,924	4,210	-8,424	23,799	32,223	9,845	15,811	5,966
19870626	424	9,056	9,392	4,735	-6,008	20,163	26,171	6,703	11,540	4,837
19870712	429	9,415	8,732	5,086	-1,652	28,479	30,131	5,526	12,723	7,196
19870813	430	12,150	10,978	4,813	3,803	27,131	23,329	8,585	15,585	7,000
19870907	422	14,700	13,671	6,692	2,307	36,943	34,636	9,646	20,117	10,470
19870923	425	14,578	14,009	5,649	1,192	29,074	27,883	10,407	18,713	8,306
19900906	425	11,395	10,741	6,996	-4,396	29,463	33,859	6,585	14,416	7,831
20020619	735	4,597	4,443	6,135	-22,340	19,875	42,215	0,701	8,518	7,817
20020628	768	5,242	5,934	6,984	-22,587	23,287	45,874	0,581	9,953	9,372
20030701	765	7,751	8,210	5,751	-15,745	20,545	36,290	5,491	10,469	4,978
20030708	721	3,759	4,101	6,209	-24,675	17,853	42,528	1,795	6,784	4,990
20030724	728	3,413	3,729	6,251	-24,025	16,549	40,573	0,811	6,689	5,878
20030802	757	7,254	7,593	6,274	-16,755	22,253	39,008	4,546	10,465	5,919
20030809	705	5,071	5,770	6,496	-24,041	18,662	42,702	0,983	9,555	8,572
20030818	766	9,202	9,060	5,982	-20,191	23,521	43,712	6,223	12,721	6,497
20030825	744	4,569	5,258	6,395	-24,169	16,868	41,037	1,971	8,238	6,267
20061029	766	8,341	8,034	5,794	-19,716	30,022	49,739	4,799	11,490	6,692
20061114	777	9,137	8,890	5,583	-10,163	27,391	37,554	5,032	11,692	6,661
20070108	727	9,570	9,547	6,204	-7,858	33,165	41,023	5,205	13,947	8,742
20070124	765	7,176	7,317	5,530	-16,597	25,324	41,920	3,389	10,461	7,073
20070209	771	8,555	9,208	4,967	-3,048	24,178	27,226	5,135	11,753	6,618
20070313	766	4,256	4,239	5,752	-25,553	16,923	42,477	1,318	7,847	6,530
20070509	753	5,201	5,920	4,576	-13,857	14,982	28,839	3,034	8,329	5,295

TABLAS DEL CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DEL ALGORITMO SOBRE IMÁGENES LANDSAT

20070703	133	1,054	1,132	3,536	-7,535	9,164	16,699	-0,945	3,441	4,387
20070728	764	5,512	5,592	5,152	-11,653	21,856	33,509	3,212	8,196	4,984
20070804	734	1,190	1,810	6,089	-20,676	19,225	39,900	-2,113	5,214	7,327
20070813	759	5,508	5,690	5,342	-16,101	18,599	34,699	2,020	9,417	7,397
20070820	745	1,658	1,695	5,570	-15,972	16,640	32,613	-1,786	5,248	7,034
20090622	731	0,156	0,980	6,189	-21,350	13,788	35,138	-3,184	4,358	7,542
20090724	731	0,733	1,140	5,864	-20,639	14,905	35,544	-1,673	4,097	5,770
20090910	736	2,540	2,261	5,676	-12,247	16,887	29,135	-1,510	6,997	8,507
20091012	767	5,138	5,195	4,530	-6,836	18,802	25,639	2,373	7,550	5,177
20100524	747	0,934	1,246	6,066	-19,193	14,190	33,383	-1,568	4,900	6,468
20100711	749	-0,394	-0,129	5,745	-21,959	11,803	33,762	-3,303	3,231	6,534
20100727	750	0,921	1,233	5,890	-20,676	18,488	39,163	-2,500	4,465	6,965
20101116	769	6,664	6,981	5,803	-13,254	23,574	36,828	3,128	10,060	6,932
20110119	589	6,871	7,027	6,219	-8,177	29,148	37,325	3,049	10,443	7,394
20110204	767	5,847	6,289	6,405	-10,212	22,365	32,577	1,419	10,400	8,981
20110409	754	3,290	3,570	5,270	-9,966	19,199	29,165	-0,631	6,861	7,492
20110511	742	0,810	1,735	5,526	-21,375	13,272	34,647	-2,017	4,365	6,382
20110628	734	-0,090	0,678	6,008	-17,623	14,445	32,068	-3,271	3,777	7,047
20110815	759	0,723	0,883	4,897	-13,945	12,670	26,614	-2,320	4,176	6,496
Total	35603	6,599	6,666	7,218	-25,553	37,950	63,504	2,077	11,110	9,033

Tabla 43. Banda 5. Escollera 3.

Fecha (aaaa-mm-dd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19840525	461	3,272	3,825	3,807	-8,787	10,452	19,240	0,464	5,654	5,191
19840626	458	2,845	2,756	3,401	-9,643	11,199	20,841	0,730	5,434	4,704
19840703	433	-0,750	-0,851	4,801	-14,204	8,727	22,932	-3,533	2,430	5,963
19840921	438	0,070	-0,845	4,842	-16,329	12,114	28,443	-3,285	3,143	6,428
19840930	459	2,857	2,754	2,769	-7,255	10,374	17,629	1,022	4,869	3,847
19841007	435	0,157	0,618	3,731	-10,705	7,578	18,283	-2,233	3,093	5,326
19841023	432	2,145	1,886	3,271	-10,291	10,483	20,773	0,250	4,290	4,040
19841124	434	2,623	2,202	2,826	-5,031	10,319	15,350	0,669	4,627	3,959
19850325	459	4,137	3,952	4,829	-7,068	13,521	20,589	0,606	8,359	7,753
19850410	459	0,811	1,320	4,803	-14,060	10,571	24,631	-1,692	4,121	5,813
19860522	432	-0,158	-0,093	2,632	-8,641	6,646	15,287	-1,934	1,873	3,806
19860623	433	-1,390	-1,014	2,849	-10,097	6,035	16,132	-2,816	0,390	3,207
19860810	428	-1,434	-2,204	3,521	-9,278	5,967	15,244	-3,928	2,035	5,963
19860826	425	-0,050	0,090	2,790	-7,241	9,650	16,892	-1,950	1,994	3,944
19861029	434	3,032	3,186	2,621	-3,726	9,491	13,218	1,126	4,898	3,772
19870416	602	3,773	3,967	3,895	-11,739	13,762	25,502	0,973	6,444	5,471
19870423	562	1,244	1,423	3,216	-6,868	12,234	19,102	-1,231	3,347	4,578
19870502	603	2,907	2,629	3,730	-5,129	18,635	23,764	0,535	4,909	4,374
19870626	565	-0,430	-0,749	3,772	-8,971	9,461	18,432	-3,382	2,318	5,699
19870712	563	0,671	0,674	3,034	-8,920	8,612	17,532	-1,259	2,798	4,057
19870813	559	1,142	0,907	3,897	-12,744	12,596	25,340	-0,787	3,124	3,910
19870907	592	4,407	3,734	3,910	-3,911	14,889	18,800	1,730	6,637	4,907
19870923	596	4,672	4,221	3,878	-7,944	15,029	22,973	1,631	7,461	5,830
19900906	273	0,043	-0,857	4,213	-6,448	14,648	21,097	-3,176	1,489	4,665
20020619	567	-1,615	-1,307	3,807	-11,983	10,390	22,373	-3,934	0,649	4,583
20020628	606	-0,643	-1,012	4,861	-16,173	11,556	27,729	-4,566	3,492	8,058
20030701	603	2,850	2,456	3,652	-7,745	12,711	20,456	0,745	5,113	4,368
20030708	558	-1,765	-1,599	4,251	-12,658	10,830	23,488	-4,515	0,572	5,087
20030724	567	-1,595	-1,504	4,243	-14,771	9,599	24,370	-3,744	0,928	4,672
20030802	609	1,590	1,559	3,452	-13,586	10,054	23,641	-0,652	3,931	4,583
20030809	562	-1,316	-0,941	4,574	-16,519	10,024	26,543	-4,228	1,323	5,550
20030818	606	2,831	2,486	3,644	-11,766	14,046	25,812	0,269	5,361	5,092
20030825	562	-0,399	-0,088	3,539	-11,500	7,860	19,360	-2,185	1,686	3,871
20061029	606	4,898	4,987	3,649	-8,082	13,323	21,404	2,339	7,965	5,626
20061114	601	6,150	6,154	4,670	-7,707	17,625	25,332	2,501	9,246	6,745
20070108	555	6,810	7,222	5,508	-10,158	20,209	30,367	3,165	10,804	7,639
20070124	554	4,947	5,394	3,308	-5,228	11,671	16,899	3,039	7,345	4,307
20070209	564	6,270	5,914	5,070	-7,841	16,840	24,682	2,066	10,665	8,600
20070313	564	1,510	0,908	3,200	-5,796	11,521	17,316	-0,644	3,649	4,293
20070509	603	3,543	3,409	4,047	-12,105	14,326	26,431	1,289	5,888	4,599

TABLAS DEL CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DEL ALGORITMO SOBRE IMÁGENES LANDSAT

20070703	562	-0,113	-0,201	4,269	-14,159	11,815	25,974	-3,000	2,296	5,296
20070728	606	3,744	3,750	2,926	-4,012	11,043	15,055	1,734	5,775	4,041
20070804	561	-0,921	-0,943	4,292	-10,970	11,553	22,523	-3,725	1,285	5,010
20070813	605	3,638	4,011	3,312	-6,602	12,439	19,041	0,970	5,982	5,013
20070820	568	-1,406	-1,317	3,903	-10,330	8,404	18,734	-4,516	1,531	6,048
20090622	570	-0,757	-0,690	3,561	-12,340	7,618	19,958	-3,270	1,790	5,060
20090724	568	-0,348	-0,655	3,363	-9,169	8,810	17,979	-2,646	1,513	4,159
20090910	563	0,928	0,899	3,295	-6,644	9,456	16,100	-1,410	3,092	4,501
20091012	564	3,537	3,714	3,697	-5,850	13,001	18,852	0,770	6,434	5,664
20100524	569	0,213	0,442	4,294	-12,019	8,740	20,759	-2,821	2,973	5,793
20100711	574	-0,435	-0,323	3,431	-11,579	8,889	20,468	-2,693	1,691	4,384
20100727	569	0,563	0,664	3,492	-9,379	8,597	17,976	-1,616	2,566	4,182
20101116	568	4,033	4,063	4,082	-11,972	13,016	24,987	1,729	6,572	4,843
20110119	586	4,421	3,781	4,666	-10,374	14,986	25,360	1,197	7,626	6,429
20110204	566	1,931	1,946	3,681	-7,542	10,095	17,637	-0,771	4,693	5,464
20110409	568	1,513	1,640	3,835	-9,399	11,957	21,357	-0,936	4,103	5,039
20110511	563	0,262	0,528	3,293	-8,000	11,006	19,007	-2,074	2,410	4,484
20110628	564	-0,242	-0,072	3,734	-7,979	9,274	17,253	-3,112	2,212	5,324
20110815	564	0,310	0,218	3,444	-11,045	9,161	20,207	-1,468	2,236	3,704
Total	31680	1,619	1,470	4,464	-16,519	20,209	36,728	-1,191	4,440	5,631

Tabla 44. Banda 7. Escollera 2

Fecha (aaaa-mm-dd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19840525	430	15,442	15,029	4,991	3,026	30,110	27,084	12,243	18,239	5,996
19840626	426	14,496	14,003	4,650	3,429	31,416	27,987	12,011	16,598	4,587
19840703	431	12,269	11,133	6,442	0,184	35,489	35,306	8,007	16,277	8,270
19840921	427	11,580	10,617	6,638	-2,794	28,540	31,334	7,068	16,473	9,405
19840930	426	17,602	16,635	5,318	6,247	35,283	29,036	13,726	21,301	7,575
19841007	430	11,848	11,416	6,724	-4,461	34,533	38,994	7,058	15,591	8,532
19841023	424	15,168	14,295	7,157	-0,224	33,402	33,626	9,581	20,324	10,743
19841124	424	15,399	14,592	6,133	2,501	35,558	33,057	11,478	18,541	7,063
19850325	425	16,673	16,889	6,422	-0,931	31,840	32,771	13,271	21,131	7,860
19850410	431	13,914	14,167	6,850	0,335	37,549	37,214	8,769	18,624	9,855
19860522	429	12,346	12,244	6,606	-4,354	29,008	33,362	8,635	16,277	7,642
19860623	431	11,893	11,238	5,467	-7,692	26,402	34,094	8,488	14,740	6,252
19860810	428	12,655	12,936	5,040	-0,712	29,762	30,474	9,303	15,511	6,209
19860826	431	12,643	13,384	6,461	-5,914	31,557	37,471	9,439	16,847	7,408
19861029	428	13,935	14,463	6,102	-2,948	28,879	31,826	10,985	18,244	7,259
19870416	425	17,004	17,076	5,599	5,263	33,280	28,017	12,998	20,390	7,392
19870423	276	10,324	11,101	5,807	-2,478	26,342	28,820	5,787	14,252	8,465
19870502	330	13,653	12,973	5,208	-2,465	25,594	28,059	9,796	16,852	7,057
19870626	426	11,324	11,787	6,072	-11,932	31,929	43,861	8,187	15,101	6,915
19870712	426	12,126	11,648	5,414	-0,852	26,578	27,430	7,945	15,919	7,974
19870813	429	14,836	14,324	5,344	0,522	31,524	31,002	11,602	18,670	7,068
19870907	430	16,996	16,099	6,820	4,116	36,929	32,813	12,023	21,493	9,469
19870923	429	16,882	16,227	5,425	3,726	31,241	27,514	12,664	20,739	8,075
19900906	427	12,788	11,431	7,041	-5,845	30,731	36,576	7,866	16,928	9,062
20020619	728	5,455	5,777	8,553	-21,452	22,349	43,801	0,184	11,055	10,871
20020628	734	6,598	6,398	7,221	-21,884	27,904	49,788	2,146	10,924	8,778
20030701	738	8,678	9,578	7,107	-21,695	23,152	44,847	5,858	12,644	6,786
20030708	690	6,351	6,139	6,316	-24,626	22,869	47,495	2,723	9,426	6,703
20030724	668	5,668	5,508	7,022	-23,922	26,073	49,995	1,747	9,429	7,682
20030802	744	8,280	8,478	7,750	-22,649	26,521	49,170	5,737	12,188	6,451
20030809	694	6,684	6,260	6,496	-24,917	20,625	45,542	2,299	11,233	8,934
20030818	741	10,496	10,614	7,323	-23,840	25,261	49,100	7,011	14,564	7,553
20030825	707	6,894	6,499	7,544	-23,657	23,882	47,539	2,701	12,142	9,441
20061029	735	9,632	9,428	7,532	-9,242	36,250	45,492	4,366	13,347	8,980
20061114	767	10,511	10,028	7,117	-11,679	33,556	45,234	5,728	14,304	8,576
20070108	566	8,200	8,389	7,805	-12,631	29,207	41,838	2,666	13,598	10,932
20070124	759	8,326	8,500	6,668	-14,625	25,409	40,033	4,333	12,329	7,996
20070209	766	10,082	10,173	5,102	-4,302	23,759	28,061	6,404	13,546	7,142
20070313	760	5,474	5,989	7,227	-25,697	25,034	50,731	1,631	9,844	8,213
20070509	759	7,294	8,146	6,001	-11,423	18,769	30,192	4,335	11,457	7,122

TABLAS DEL CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DEL ALGORITMO SOBRE IMÁGENES LANDSAT

20070703	290	3,433	3,530	3,541	-6,940	12,886	19,826	0,851	6,036	5,185
20070728	761	6,145	6,867	6,798	-15,488	21,018	36,506	2,729	10,699	7,970
20070804	701	3,185	3,044	7,346	-23,152	21,859	45,011	-0,483	7,215	7,698
20070813	745	6,891	7,254	7,439	-17,672	26,272	43,944	2,719	11,464	8,745
20070820	745	2,699	3,290	8,191	-19,874	24,488	44,362	-2,086	7,811	9,896
20090622	537	0,360	1,492	6,814	-24,653	13,353	38,006	-2,326	5,212	7,538
20090724	685	2,504	3,339	8,215	-24,991	25,342	50,333	-0,905	7,007	7,912
20090910	722	3,787	3,948	8,228	-22,224	20,867	43,091	-2,257	10,144	12,401
20091012	763	7,180	7,046	6,370	-9,407	25,979	35,385	2,510	10,682	8,172
20100524	715	3,413	3,154	7,988	-22,119	22,759	44,878	-0,051	7,266	7,318
20100711	723	1,783	1,222	7,438	-23,476	23,048	46,524	-2,935	6,561	9,497
20100727	733	2,777	2,614	8,328	-22,847	24,027	46,875	-3,159	8,105	11,263
20101116	761	7,751	7,785	6,480	-9,235	27,901	37,136	3,571	11,634	8,063
20110119	532	6,553	7,251	7,164	-14,597	28,682	43,279	2,168	11,051	8,883
20110204	764	6,169	6,983	8,239	-21,377	30,777	52,154	0,229	11,265	11,037
20110409	734	3,984	4,434	6,653	-17,737	23,240	40,978	-0,173	8,455	8,629
20110511	711	2,976	3,589	7,612	-22,797	19,855	42,652	-0,908	7,065	7,973
20110628	684	1,361	2,321	8,265	-21,040	22,718	43,758	-3,468	8,006	11,473
20110815	746	2,193	2,280	7,459	-19,959	21,530	41,490	-2,785	7,943	10,728
Total	34627	8,169	8,349	8,265	-25,697	37,549	63,247	3,154	13,598	10,444

Tabla 45. Banda 7. Escollera 3

Fecha (aaaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19840525	459	3,174	2,736	4,238	-9,865	13,395	23,259	0,229	6,445	6,216
19840626	457	2,936	3,186	4,288	-13,287	10,986	24,272	0,204	6,080	5,876
19840703	430	0,082	0,264	5,002	-15,125	10,537	25,662	-3,539	3,683	7,222
19840921	433	0,388	-0,288	4,458	-12,520	10,408	22,929	-2,536	3,166	5,702
19840930	457	3,116	2,830	3,079	-6,504	11,399	17,903	1,085	5,160	4,075
19841007	433	0,089	0,605	4,295	-10,214	9,033	19,247	-2,889	3,417	6,305
19841023	433	2,859	2,280	3,582	-10,140	11,854	21,994	0,396	5,134	4,738
19841124	429	1,676	1,823	3,815	-11,238	12,236	23,474	-0,284	4,282	4,566
19850325	459	4,085	4,113	4,394	-13,387	14,382	27,769	1,891	7,403	5,511
19850410	458	1,225	1,468	3,889	-12,898	8,636	21,534	-0,734	4,086	4,819
19860522	435	-1,176	-0,448	3,966	-10,307	9,260	19,567	-4,144	1,612	5,756
19860623	431	-2,599	-2,096	4,162	-15,036	5,264	20,300	-5,713	0,282	5,995
19860810	430	-0,606	-0,498	3,695	-13,381	7,011	20,391	-3,311	1,955	5,265
19860826	433	-0,825	-0,506	3,787	-11,841	7,764	19,605	-2,584	1,768	4,352
19861029	429	4,244	4,343	3,762	-6,813	14,043	20,855	1,261	6,684	5,423
19870416	595	4,289	4,552	4,329	-17,095	15,443	32,537	1,609	7,061	5,452
19870423	566	0,577	0,151	4,259	-12,808	14,286	27,094	-2,656	3,292	5,948
19870502	603	3,166	2,884	4,316	-11,384	15,824	27,208	0,121	6,084	5,963
19870626	562	-1,223	-0,896	4,817	-11,386	11,953	23,339	-5,261	2,227	7,488
19870712	559	0,129	0,411	4,057	-17,519	11,335	28,854	-2,146	2,829	4,975
19870813	559	0,759	0,823	4,253	-14,828	10,580	25,408	-1,633	3,392	5,024
19870907	594	4,781	4,854	4,290	-7,718	13,778	21,496	1,338	7,923	6,585
19870923	596	5,026	4,377	4,220	-7,810	15,964	23,774	1,868	8,623	6,755
19900906	285	-0,798	-1,152	4,271	-10,004	24,646	34,650	-3,894	2,327	6,220
20020619	566	-2,098	-2,439	4,855	-21,991	16,519	38,510	-5,074	0,883	5,957
20020628	605	-0,608	-0,612	3,924	-15,960	9,868	25,828	-2,875	1,964	4,839
20030701	603	3,006	2,771	4,792	-10,522	14,544	25,066	0,217	6,189	5,973
20030708	569	-1,492	-1,067	5,187	-13,673	11,975	25,648	-5,204	1,808	7,012
20030724	564	-1,843	-1,203	4,605	-17,353	9,901	27,253	-4,320	1,044	5,364
20030802	610	1,173	1,273	4,209	-10,613	11,193	21,805	-1,375	3,667	5,042
20030809	568	-1,069	-0,932	4,221	-16,304	11,308	27,612	-3,445	1,538	4,982
20030818	605	2,457	1,875	4,392	-11,017	15,806	26,823	-0,340	4,873	5,212
20030825	567	-0,429	-0,198	4,427	-15,267	9,709	24,976	-2,982	2,822	5,804
20061029	606	4,333	4,272	5,099	-9,057	14,424	23,481	0,789	8,706	7,918
20061114	599	6,232	6,392	6,049	-12,342	18,343	30,684	1,649	11,606	9,957
20070108	576	5,818	6,517	7,795	-17,212	23,039	40,250	0,773	11,829	11,056
20070124	556	4,763	5,073	4,044	-7,457	13,763	21,220	2,330	7,660	5,330
20070209	564	6,299	5,868	4,339	-5,355	20,173	25,527	3,027	9,498	6,471
20070313	560	0,148	-0,161	4,313	-11,978	12,940	24,918	-2,285	3,101	5,385
20070509	602	3,497	3,222	3,857	-11,401	15,306	26,707	1,108	5,475	4,367

TABLAS DEL CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DEL ALGORITMO SOBRE IMÁGENES LANDSAT

20070703	560	0,308	0,326	5,227	-22,691	15,284	37,974	-2,874	3,662	6,536
20070728	602	3,131	3,565	3,964	-10,640	11,000	21,639	1,137	5,836	4,699
20070804	563	-1,243	-1,295	3,964	-12,004	10,959	22,964	-3,626	0,855	4,481
20070813	603	3,731	3,850	3,713	-8,024	12,946	20,970	1,302	6,579	5,278
20070820	565	-2,547	-1,743	5,782	-16,410	13,086	29,496	-6,713	1,726	8,439
20090622	569	-1,587	-1,323	4,503	-19,337	7,817	27,154	-4,584	1,469	6,053
20090724	565	0,040	0,381	4,893	-13,983	11,916	25,898	-2,701	2,706	5,407
20090910	567	0,918	1,223	5,062	-14,299	12,156	26,454	-2,855	4,640	7,495
20091012	569	3,459	3,654	5,421	-8,887	14,276	23,163	-0,564	7,959	8,523
20100524	563	-0,022	-0,062	5,032	-12,728	10,943	23,670	-3,611	3,908	7,519
20100711	562	-0,934	-0,392	4,696	-21,978	8,585	30,563	-3,360	2,336	5,696
20100727	562	0,220	0,808	5,213	-16,104	10,407	26,511	-3,079	3,733	6,812
20101116	560	3,605	4,051	4,448	-8,588	14,883	23,471	0,875	7,060	6,185
20110119	585	3,366	2,524	6,498	-14,637	19,466	34,104	-0,612	8,335	8,947
20110204	563	0,365	0,434	4,729	-19,188	10,861	30,050	-2,599	3,486	6,085
20110409	568	0,620	1,544	5,456	-15,086	11,127	26,213	-3,425	4,555	7,980
20110511	562	-0,150	-0,092	4,168	-12,524	8,238	20,762	-3,052	2,872	5,924
20110628	564	-0,399	-0,249	5,265	-19,188	12,355	31,544	-3,618	3,174	6,792
20110815	562	0,188	-0,243	4,500	-10,249	13,645	23,894	-2,776	3,134	5,910
Total	31659	1,395	1,356	5,206	-22,691	24,646	47,336	-1,816	4,809	6,625

AV.2.2. Landsat 7

Tabla 46. Banda 4. Escollera 2.

Fecha (aaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19990714	769	3,099	2,725	3,557	-6,842	15,838	22,679	0,818	5,200	4,381
19990721	758	0,050	-0,150	4,581	-15,012	15,406	30,418	-2,538	2,823	5,360
19990806	751	3,180	3,166	4,449	-14,089	16,434	30,523	0,593	6,383	5,790
19990916	773	0,220	-0,236	4,341	-9,290	19,230	28,520	-2,955	2,880	5,835
19991025	771	4,858	3,992	5,766	-5,798	24,629	30,427	0,494	7,813	7,319
20000122	771	10,377	10,429	4,307	-1,809	24,402	26,212	7,383	12,834	5,451
20000129	774	6,839	6,234	4,477	-3,896	21,823	25,719	3,855	9,595	5,740
20000301	770	3,327	2,348	5,042	-16,685	22,035	38,719	0,265	5,479	5,214
20000418	766	0,575	0,797	3,711	-10,007	14,397	24,404	-1,586	2,920	4,506
20000513	772	8,437	7,605	4,131	1,038	21,422	20,385	5,492	10,989	5,496
20000605	758	1,596	1,668	3,718	-12,804	10,856	23,660	-0,507	4,069	4,576
20000614	757	0,483	0,359	3,946	-9,129	11,861	20,990	-1,560	2,762	4,322
20000808	769	0,685	0,541	3,627	-9,154	12,765	21,919	-1,887	2,816	4,703
20000817	626	-0,274	-0,635	5,729	-10,975	23,426	34,401	-3,827	2,383	6,209
20000909	750	3,542	3,626	4,125	-10,080	14,474	24,554	0,817	6,045	5,228
20001004	774	7,389	6,795	4,303	-2,713	24,202	26,916	4,491	9,919	5,427
20001027	572	3,602	4,219	5,746	-10,934	19,137	30,071	-0,353	7,396	7,749
20001121	772	9,125	8,905	5,720	-18,421	26,954	45,375	6,039	11,714	5,675
20010108	774	8,882	8,224	5,704	-7,411	30,736	38,147	5,549	11,558	5,810
20010313	755	2,441	2,254	5,162	-26,401	19,439	45,840	-0,427	5,336	5,764
20010414	768	3,423	3,797	3,099	-5,914	11,995	17,910	1,319	5,514	4,196
20010601	780	6,127	6,172	3,510	-4,468	21,209	25,676	3,705	8,093	4,388
20010608	568	0,410	-0,317	6,511	-24,191	19,256	43,447	-4,161	5,105	9,266
20010617	773	3,431	3,830	3,557	-8,279	15,184	23,463	1,257	5,571	4,314
20010726	771	-1,870	-2,529	4,380	-12,080	16,074	28,154	-4,599	0,761	5,360
20011007	771	4,479	3,791	4,440	-4,831	21,427	26,259	1,617	6,791	5,174
20011030	755	1,329	0,607	6,047	-20,643	22,799	43,442	-2,041	4,401	6,442
20011108	772	6,508	6,579	5,538	-7,952	28,301	36,253	2,614	9,997	7,383
20020111	768	15,406	15,854	5,572	-2,311	31,447	33,759	11,537	19,077	7,540
20020219	763	3,539	3,866	4,716	-12,933	19,421	32,354	0,968	6,139	5,171
20020401	772	5,798	5,679	4,339	-6,967	18,805	25,772	3,413	7,874	4,461
20020417	767	4,583	4,247	4,565	-9,670	23,921	33,591	1,667	7,321	5,655
20020424	773	1,562	1,125	4,847	-26,918	18,839	45,757	-1,543	4,677	6,220
20020519	772	4,036	4,081	4,685	-12,791	16,766	29,556	1,424	6,818	5,394
20020526	763	2,369	2,907	5,470	-29,096	18,998	48,094	-0,635	5,459	6,094
20020706	732	1,969	2,472	5,949	-21,539	17,814	39,353	-1,272	5,550	6,822
20020729	739	0,531	-0,162	5,153	-19,456	17,913	37,370	-2,857	3,671	6,527

TABLAS DEL CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DEL ALGORITMO SOBRE IMÁGENES LANDSAT

20020830	760	-0,380	-1,020	3,907	-9,669	14,065	23,735	-2,845	1,551	4,396
20020924	758	1,246	1,253	5,230	-10,787	17,882	28,669	-2,709	3,929	6,638
20021026	756	1,316	1,326	5,042	-11,400	18,721	30,121	-1,368	3,595	4,963
20030114	775	13,230	12,982	5,614	-4,507	31,614	36,121	10,067	16,540	6,473
20030121	748	14,217	13,399	7,525	-3,954	42,119	46,073	9,666	18,384	8,719
20030206	748	13,635	13,196	7,184	-3,880	36,571	40,451	8,860	16,869	8,009
20030310	760	2,533	2,391	5,076	-10,400	16,806	27,206	-0,786	5,323	6,109
20030427	751	-0,237	0,223	4,861	-16,046	11,714	27,761	-2,401	2,766	5,167
20030522	764	-0,573	-0,513	3,964	-12,464	14,243	26,707	-3,347	1,574	4,921
20030529	761	0,244	0,116	4,339	-15,438	15,633	31,071	-2,612	2,958	5,571
Total	35370	4,035	3,407	6,448	-29,096	42,119	71,216	-0,244	7,499	7,743

Tabla 47. Banda 4. Escollera 3.

Fecha (aaaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19990714	610	-0,694	-0,588	3,242	-8,000	9,117	17,117	-3,008	1,575	4,583
19990721	601	-4,335	-4,054	4,009	-14,828	7,287	22,114	-7,081	-1,884	5,197
19990806	583	1,522	1,177	4,523	-12,360	12,828	25,188	-1,555	4,486	6,041
19990916	609	-2,307	-2,551	2,844	-9,118	6,989	16,107	-4,369	-0,633	3,735
19991025	587	-0,250	-0,154	3,117	-10,669	8,833	19,502	-2,334	1,756	4,090
20000122	613	4,926	5,217	3,197	-7,874	13,718	21,593	2,813	7,097	4,284
20000129	587	1,213	0,820	3,479	-5,507	14,967	20,473	-0,967	2,979	3,946
20000301	597	-1,694	-1,601	3,194	-10,213	8,073	18,287	-3,846	0,250	4,096
20000418	597	-1,259	-1,230	4,023	-11,584	12,133	23,716	-3,816	1,083	4,900
20000513	609	3,123	2,676	4,021	-8,728	15,744	24,472	0,693	5,484	4,790
20000605	599	-0,907	-0,957	3,877	-10,036	11,702	21,739	-3,210	1,470	4,680
20000614	607	0,074	-0,043	4,608	-12,768	16,957	29,725	-3,192	3,365	6,557
20000808	595	-3,250	-3,345	3,595	-11,116	9,638	20,754	-5,580	-1,314	4,266
20000817	610	-4,828	-4,809	3,496	-13,896	4,168	18,064	-6,821	-2,425	4,396
20000909	446	-0,581	-1,185	3,770	-9,367	11,036	20,403	-3,133	1,272	4,405
20001004	607	1,890	1,809	3,145	-6,567	11,027	17,594	-0,532	3,924	4,455
20001027	427	1,033	0,849	3,428	-9,625	12,648	22,274	-1,307	3,200	4,507
20001121	607	2,526	2,507	2,653	-8,070	9,685	17,755	0,606	4,105	3,499
20010108	613	4,231	4,079	3,632	-8,562	16,355	24,917	1,831	6,460	4,629
20010313	608	0,311	0,124	2,777	-7,365	9,066	16,431	-1,450	2,145	3,596
20010414	602	1,166	0,949	2,909	-7,714	11,965	19,678	-0,861	3,401	4,262
20010601	606	2,447	2,673	3,947	-7,888	13,891	21,779	-0,503	5,316	5,818
20010608	350	-3,569	-3,269	4,728	-16,750	12,072	28,822	-6,849	-0,465	6,385
20010617	609	-0,460	0,031	3,907	-11,595	10,111	21,706	-2,448	1,837	4,286
20010726	602	-5,460	-5,065	3,996	-14,143	5,853	19,996	-8,737	-2,732	6,004
20011007	606	-1,177	-1,115	2,808	-9,999	9,268	19,267	-3,114	0,650	3,764
20011030	598	-2,193	-2,366	3,271	-13,932	7,815	21,747	-4,257	-0,277	3,980
20011108	604	3,763	3,893	3,520	-18,120	11,549	29,669	1,375	6,251	4,875
20020111	600	8,375	8,035	4,903	-6,572	29,800	36,371	5,323	11,089	5,766
20020219	594	-0,799	-1,025	3,391	-10,256	11,302	21,557	-3,083	0,851	3,934
20020401	605	-0,844	-0,787	3,417	-15,217	7,654	22,871	-2,888	1,434	4,322
20020417	609	-0,410	-0,303	3,622	-11,558	15,712	27,270	-2,798	1,631	4,429
20020424	597	-3,618	-3,334	3,140	-11,720	5,902	17,622	-5,629	-1,430	4,199
20020519	611	-0,441	-0,319	3,310	-10,292	8,931	19,223	-2,137	1,416	3,553
20020526	601	-2,786	-2,752	4,018	-14,437	8,851	23,288	-4,630	-0,216	4,414
20020706	609	1,703	1,893	8,976	-17,953	31,157	49,110	-3,044	5,978	9,021
20020729	597	-3,569	-3,625	4,135	-15,263	11,653	26,917	-6,199	-0,960	5,239
20020830	601	-5,549	-5,618	3,093	-14,328	5,189	19,517	-7,864	-3,565	4,299
20020924	609	-2,869	-3,103	3,624	-15,507	10,890	26,397	-5,200	-0,773	4,427
20021026	610	-2,278	-1,944	3,115	-12,366	8,782	21,148	-4,420	-0,107	4,313

TABLAS DEL CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DEL ALGORITMO SOBRE IMÁGENES LANDSAT

20030114	590	5,727	5,671	4,604	-4,740	27,049	31,789	2,509	8,375	5,866
20030121	553	1,361	1,210	3,985	-9,097	10,896	19,993	-0,656	3,977	4,633
20030206	588	4,454	4,124	4,278	-13,569	18,413	31,982	1,976	6,609	4,633
20030310	597	-0,756	-0,806	3,140	-7,788	9,561	17,349	-2,800	1,044	3,844
20030427	599	-2,582	-2,344	3,234	-11,607	10,638	22,244	-4,609	-0,611	3,998
20030522	613	-4,075	-3,930	3,531	-16,469	5,411	21,880	-6,115	-1,752	4,363
20030529	595	-3,044	-2,895	4,014	-16,148	7,481	23,629	-5,348	-0,169	5,179
Total	27667	-0,339	-0,537	4,907	-18,120	31,157	49,277	-3,462	2,563	6,025

Tabla 48. AIV.2.2.1. Banda 5. Escollera 2.

Fecha (aaaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19990714	771	8,433	7,843	4,495	-2,632	29,679	32,311	5,464	11,111	5,647
19990721	745	3,759	3,258	4,993	-5,879	19,482	25,361	-0,029	7,600	7,629
19990806	741	6,430	6,102	4,828	-10,805	23,099	33,904	3,023	8,868	5,845
19990916	771	6,321	5,393	5,018	-4,843	32,302	37,145	3,518	8,000	4,482
19991025	710	7,043	6,116	4,880	-8,091	26,323	34,414	3,994	9,700	5,706
20000122	764	14,604	13,676	5,389	5,051	33,547	28,497	10,903	17,448	6,545
20000129	779	11,463	9,740	5,449	0,196	31,963	31,767	7,543	15,237	7,694
20000301	748	6,635	5,033	6,223	-8,901	31,270	40,171	2,365	10,852	8,487
20000418	773	6,151	5,399	4,706	-4,300	26,246	30,546	3,102	8,562	5,460
20000513	750	9,713	8,720	4,953	-5,848	33,437	39,285	6,646	12,661	6,015
20000605	768	5,147	4,429	5,477	-8,562	37,967	46,529	1,741	8,105	6,364
20000614	771	3,653	2,636	4,186	-5,726	15,429	21,155	0,763	6,279	5,516
20000808	772	4,251	3,423	5,263	-6,630	29,148	35,778	0,435	7,083	6,648
20000817	623	2,389	0,988	6,212	-10,565	26,816	37,381	-1,594	5,692	7,285
20000909	688	3,330	2,654	4,705	-7,116	20,186	27,303	0,158	6,424	6,266
20001004	762	9,254	8,125	5,380	-3,584	31,012	34,595	5,855	11,833	5,978
20001027	699	9,052	8,445	4,283	-2,028	24,437	26,464	6,235	11,245	5,011
20001121	776	12,960	11,662	5,400	0,808	29,353	28,545	9,368	16,120	6,752
20010108	777	14,061	12,994	6,003	0,981	35,773	34,792	9,930	17,949	8,019
20010313	772	10,228	9,810	4,141	0,998	28,632	27,634	7,538	12,403	4,865
20010414	770	10,136	9,307	5,242	0,029	33,016	32,988	6,944	12,662	5,718
20010601	772	11,499	10,671	4,953	-3,889	31,381	35,270	8,665	14,165	5,501
20010608	740	2,498	0,724	6,395	-8,927	27,011	35,938	-1,953	5,916	7,869
20010617	773	8,475	8,244	4,768	-4,757	27,280	32,036	5,704	10,451	4,747
20010726	764	4,352	3,012	6,133	-6,894	27,133	34,028	-0,117	7,438	7,555
20011007	775	9,699	8,792	5,003	-2,579	31,014	33,593	6,680	11,698	5,019
20011030	670	7,868	7,299	5,549	-5,826	32,938	38,764	4,587	10,633	6,046
20011108	768	16,165	14,711	5,051	6,198	33,522	27,323	12,899	19,050	6,151
20020111	772	16,326	14,317	6,668	3,720	43,675	39,955	11,566	20,376	8,809
20020219	773	7,017	5,586	6,466	-5,664	28,013	33,676	1,982	11,373	9,391
20020401	776	8,006	7,301	4,775	-2,782	19,940	22,722	4,799	10,518	5,720
20020417	771	8,343	8,072	4,745	-5,765	20,411	26,177	5,176	11,586	6,410
20020424	758	4,243	4,141	5,225	-11,984	21,493	33,477	0,976	7,575	6,599
20020519	763	7,129	7,547	5,711	-20,253	20,016	40,269	3,764	10,646	6,882
20020526	737	3,143	2,655	6,289	-20,309	26,249	46,558	-1,173	7,042	8,215
20020706	774	7,369	7,080	5,801	-20,108	24,472	44,581	4,465	10,730	6,266
20020729	667	2,174	1,412	5,300	-21,604	22,584	44,188	-1,256	5,067	6,323
20020830	736	3,901	4,042	5,398	-19,809	25,203	45,012	1,307	6,713	5,406
20020924	731	3,161	3,463	5,189	-20,609	21,010	41,620	0,649	6,106	5,457
20021026	760	6,800	6,646	6,418	-18,252	31,542	49,794	3,809	10,123	6,314

TABLAS DEL CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DEL ALGORITMO SOBRE IMÁGENES LANDSAT

20030114	759	12,195	11,317	5,221	-8,713	32,389	41,102	8,758	15,795	7,037
20030121	760	6,362	5,271	6,447	-13,907	26,701	40,609	2,106	10,388	8,282
20030206	758	7,752	6,446	6,387	-20,550	29,949	50,498	3,653	11,307	7,654
20030310	751	5,076	4,301	6,412	-19,528	27,731	47,259	1,511	8,502	6,991
20030427	748	4,734	5,122	6,463	-18,380	18,486	36,866	1,520	8,754	7,235
20030522	758	3,170	3,484	6,280	-22,688	17,278	39,966	0,231	7,155	6,924
20030529	739	4,554	4,564	6,813	-24,696	22,177	46,873	1,235	8,491	7,256
Total	35283	7,453	7,040	6,606	-24,696	43,675	68,372	3,146	11,264	8,118

Tabla 49. AIV.2.2.1. Banda 5. Escollera 3.

Fecha (aaaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19990714	607	1,601	2,004	3,821	-10,633	10,806	21,439	-0,788	4,008	4,796
19990721	598	-4,571	-4,292	3,866	-14,510	5,456	19,967	-7,817	-1,612	6,205
19990806	600	-0,807	-0,813	3,365	-9,977	7,143	17,120	-3,143	1,564	4,707
19990916	609	-0,843	-0,545	2,929	-16,173	6,399	22,572	-2,337	0,800	3,137
19991025	596	0,811	0,826	3,559	-9,796	10,381	20,177	-1,229	2,980	4,209
20000122	609	6,326	6,702	3,782	-6,817	12,354	19,171	4,767	8,699	3,933
20000129	595	2,314	2,541	3,052	-8,948	9,005	17,953	0,353	4,459	4,107
20000301	599	-1,153	-0,890	2,838	-8,760	7,395	16,155	-2,915	0,675	3,589
20000418	595	0,117	0,282	3,491	-10,224	8,454	18,678	-2,001	2,528	4,528
20000513	608	1,861	1,874	3,175	-8,670	9,880	18,550	-0,177	3,806	3,983
20000605	598	-1,283	-1,188	3,380	-11,404	7,802	19,206	-3,482	0,832	4,314
20000614	609	-2,702	-2,691	3,089	-12,346	4,251	16,596	-4,642	-0,557	4,085
20000808	595	-3,355	-3,723	3,655	-12,609	6,367	18,976	-5,725	-0,847	4,878
20000817	612	-3,689	-3,374	3,415	-15,545	4,431	19,976	-5,855	-1,171	4,684
20000909	598	-3,369	-3,369	3,107	-16,816	4,437	21,253	-5,463	-1,180	4,283
20001004	608	1,435	1,294	3,181	-12,105	11,419	23,524	-0,489	3,648	4,138
20001027	596	1,655	1,197	3,687	-13,710	15,131	28,840	-0,495	3,502	3,998
20001121	605	4,610	4,822	2,981	-4,844	11,691	16,535	3,148	6,582	3,433
20010108	608	6,118	6,354	3,413	-11,130	14,231	25,361	4,193	8,476	4,283
20010313	607	3,145	2,999	3,164	-8,085	12,982	21,067	1,077	5,506	4,429
20010414	606	3,432	3,568	3,580	-7,330	11,322	18,652	0,913	6,084	5,171
20010601	599	3,956	4,089	3,963	-6,715	13,724	20,439	0,987	7,276	6,289
20010608	599	-3,347	-3,071	4,188	-15,749	6,212	21,961	-6,018	-0,498	5,520
20010617	607	1,454	1,857	4,490	-14,547	10,534	25,081	-1,389	4,923	6,312
20010726	599	-3,149	-2,836	3,871	-15,619	5,189	20,808	-5,256	-0,158	5,099
20011007	606	1,407	1,419	3,322	-13,276	8,769	22,045	-0,691	4,037	4,727
20011030	593	-0,010	0,367	3,052	-11,352	7,698	19,050	-1,782	1,983	3,765
20011108	606	6,456	6,661	3,731	-8,474	15,266	23,740	4,230	9,308	5,078
20020111	610	8,234	8,577	3,789	-6,350	17,780	24,130	6,653	10,668	4,015
20020219	598	-0,641	-0,503	3,030	-10,277	9,756	20,033	-2,200	1,089	3,288
20020401	605	1,305	1,694	3,163	-15,431	7,669	23,099	-0,080	3,156	3,236
20020417	609	1,828	1,831	3,280	-9,392	10,676	20,067	-0,079	3,949	4,028
20020424	598	-1,761	-1,403	3,383	-12,936	8,063	20,999	-3,906	0,497	4,403
20020519	608	0,908	0,697	3,236	-11,047	9,926	20,973	-0,732	2,937	3,670
20020526	599	-2,282	-2,041	3,651	-14,621	10,401	25,022	-4,359	0,061	4,420
20020706	607	0,724	0,748	3,444	-11,657	9,248	20,905	-0,975	2,859	3,834
20020729	599	-2,549	-2,408	3,612	-15,383	9,337	24,720	-4,455	-0,541	3,914
20020830	597	-3,375	-3,241	3,022	-14,550	4,674	19,224	-5,145	-1,553	3,592
20020924	613	-2,496	-2,289	3,162	-14,739	6,737	21,476	-4,206	-0,673	3,534
20021026	609	0,745	0,978	3,179	-12,902	11,243	24,144	-0,828	2,672	3,500

TABLAS DEL CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DEL ALGORITMO SOBRE IMÁGENES LANDSAT

20030114	605	5,761	5,794	3,176	-2,985	15,107	18,093	3,826	7,898	4,072
20030121	595	-0,543	-0,486	2,991	-8,780	7,190	15,970	-2,476	1,376	3,852
20030206	595	-0,090	-0,119	3,420	-9,436	8,933	18,370	-2,076	1,808	3,884
20030310	594	-0,007	-0,159	2,921	-8,775	7,525	16,300	-1,871	1,764	3,634
20030427	598	0,298	0,552	3,842	-12,196	12,133	24,329	-2,171	2,634	4,804
20030522	608	-0,667	-0,260	3,769	-18,011	8,687	26,698	-2,827	1,787	4,614
20030529	591	-0,075	0,077	4,362	-12,364	11,482	23,846	-3,235	3,127	6,363
Total	28305	0,515	0,359	4,569	-18,011	17,780	35,791	-2,436	3,491	5,927

Tabla 50. AIV.2.2.1. Banda 7. Escollera 2.

Fecha (aaaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19990714	769	9,262	8,340	5,523	-8,097	37,855	45,952	5,531	12,995	7,465
19990721	759	5,280	4,258	7,040	-12,845	28,247	41,092	0,374	10,021	9,648
19990806	695	7,009	6,083	6,712	-22,250	31,814	54,063	2,382	10,946	8,564
19990916	780	7,645	6,630	5,968	-7,395	29,365	36,760	4,102	11,106	7,003
19991025	780	8,542	7,721	6,033	-10,291	28,058	38,349	4,658	12,188	7,530
20000122	778	15,366	14,060	6,190	4,582	38,898	34,317	10,928	18,805	7,877
20000129	777	12,966	11,129	6,717	-1,065	39,642	40,706	8,042	17,160	9,118
20000301	767	7,945	6,353	7,083	-12,028	34,264	46,292	3,129	12,728	9,599
20000418	778	7,281	6,525	5,710	-6,356	35,405	41,760	3,634	9,951	6,317
20000513	774	9,980	8,599	6,641	-4,026	41,316	45,342	6,028	13,737	7,709
20000605	709	4,860	3,788	6,327	-11,668	26,057	37,725	0,963	8,511	7,547
20000614	765	5,127	3,753	5,880	-7,729	25,728	33,458	1,060	8,593	7,533
20000808	762	4,989	3,519	7,196	-9,301	37,323	46,623	-0,254	9,237	9,491
20000817	615	3,503	2,521	7,049	-15,675	31,101	46,777	-1,161	7,110	8,271
20000909	727	4,557	3,983	5,923	-7,428	28,346	35,774	0,439	7,949	7,511
20001004	774	9,147	7,241	7,208	-6,966	39,018	45,983	4,525	12,285	7,760
20001027	756	10,746	10,073	5,267	-0,182	33,965	34,147	7,216	13,473	6,257
20001121	770	13,470	12,466	5,900	-2,121	34,632	36,753	9,467	17,283	7,817
20010108	774	15,203	14,065	6,526	1,637	42,200	40,563	10,553	19,080	8,527
20010313	772	11,522	10,698	5,351	-0,065	29,945	30,011	7,939	14,307	6,368
20010414	770	11,443	9,956	6,241	-1,448	33,107	34,554	6,806	15,760	8,954
20010601	752	13,426	12,596	5,956	-10,967	33,109	44,076	9,608	16,812	7,203
20010608	687	2,668	1,639	7,300	-13,600	28,544	42,145	-1,681	6,893	8,574
20010617	752	9,609	9,023	6,084	-5,266	31,300	36,566	5,645	12,291	6,647
20010726	759	6,782	4,633	8,311	-6,999	37,445	44,444	0,403	11,673	11,270
20011007	769	11,474	10,310	6,767	-0,815	39,583	40,399	7,093	14,203	7,110
20011030	662	9,336	8,638	6,570	-9,489	36,890	46,379	5,584	12,743	7,160
20011108	778	18,152	17,109	5,727	5,540	38,883	33,343	14,153	21,209	7,056
20020111	775	17,299	14,574	7,354	4,980	43,710	38,731	12,234	21,756	9,522
20020219	774	8,052	6,000	7,492	-4,132	34,059	38,191	2,264	12,861	10,597
20020401	765	8,577	7,510	5,889	-9,424	27,157	36,581	4,625	11,865	7,240
20020417	759	9,320	8,512	5,442	-5,977	23,965	29,942	5,430	13,919	8,489
20020424	742	4,873	4,612	7,303	-19,209	20,271	39,480	1,086	9,820	8,734
20020519	743	7,791	8,624	6,818	-22,937	26,353	49,290	3,595	12,241	8,646
20020526	723	3,358	2,803	7,595	-23,482	21,001	44,483	-0,859	9,469	10,328
20020706	761	7,821	7,393	6,655	-18,696	27,601	46,297	3,922	12,708	8,786
20020729	675	2,930	1,919	7,294	-20,589	20,468	41,056	-1,373	7,315	8,688
20020830	738	4,914	4,648	6,742	-22,457	26,905	49,362	1,450	8,695	7,245
20020924	716	3,956	4,037	6,262	-23,934	26,413	50,347	1,084	7,286	6,202
20021026	752	8,222	7,409	7,337	-19,879	34,489	54,368	4,264	13,069	8,805

TABLAS DEL CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DEL ALGORITMO SOBRE IMÁGENES LANDSAT

20030114	754	12,005	11,468	7,100	-24,066	32,874	56,940	7,770	17,039	9,269
20030121	737	6,397	4,777	7,257	-21,545	29,329	50,874	2,114	11,890	9,776
20030206	751	6,735	6,000	7,644	-25,670	29,214	54,884	2,767	12,273	9,506
20030310	743	5,563	4,781	7,691	-25,310	25,597	50,907	1,691	10,109	8,419
20030427	753	5,424	5,928	7,778	-25,208	21,041	46,250	1,917	10,142	8,225
20030522	726	4,436	4,028	6,817	-23,392	19,194	42,586	0,845	8,871	8,026
20030529	699	7,357	6,668	7,230	-24,085	29,153	53,238	2,802	12,238	9,436
Total	35096	8,444	7,856	7,663	-25,670	43,710	69,380	3,414	13,177	9,762

Tabla 51. AIV.2.2.1. Banda 7. Escollera 3.

Fecha (aaaa-mm-dd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19990714	605	1,809	2,090	3,564	-11,966	10,353	22,319	-0,222	4,008	4,230
19990721	593	-4,588	-4,234	4,379	-16,972	5,791	22,763	-7,586	-1,259	6,328
19990806	596	-1,253	-1,269	3,621	-11,967	7,721	19,689	-3,604	1,172	4,776
19990916	606	-0,996	-0,770	2,931	-17,118	5,873	22,990	-2,757	0,879	3,637
19991025	595	0,741	0,898	3,580	-11,633	9,234	20,867	-1,376	3,020	4,396
20000122	606	5,446	5,795	3,590	-10,737	12,983	23,720	3,600	7,937	4,337
20000129	599	2,378	2,667	3,481	-9,537	10,968	20,504	0,191	4,695	4,504
20000301	592	-1,418	-1,107	3,194	-10,509	6,524	17,033	-3,554	0,782	4,336
20000418	596	0,055	0,214	3,910	-12,997	10,249	23,246	-2,673	2,926	5,599
20000513	606	1,007	1,256	3,686	-12,052	8,860	20,912	-1,101	3,485	4,586
20000605	595	-2,603	-1,693	4,529	-19,302	8,633	27,935	-5,451	0,396	5,847
20000614	605	-3,173	-3,241	3,455	-13,675	4,129	17,804	-5,763	-0,363	5,400
20000808	597	-3,606	-3,889	4,227	-18,371	7,741	26,111	-6,473	-0,432	6,042
20000817	611	-4,022	-3,632	3,510	-14,795	3,595	18,390	-6,211	-1,363	4,848
20000909	598	-3,663	-3,611	3,359	-12,421	4,203	16,624	-5,720	-1,118	4,603
20001004	609	0,546	0,856	3,466	-11,819	9,482	21,301	-1,235	3,055	4,290
20001027	585	2,506	2,509	3,782	-13,273	17,367	30,640	0,217	4,310	4,092
20001121	604	5,127	5,634	3,593	-8,864	12,703	21,567	3,610	7,355	3,745
20010108	606	6,505	6,889	3,985	-12,485	16,081	28,566	4,057	9,298	5,242
20010313	604	3,211	3,286	4,034	-9,299	14,712	24,011	0,529	5,974	5,445
20010414	607	2,218	2,076	3,552	-7,342	10,207	17,549	-0,377	4,820	5,197
20010601	607	3,805	3,749	3,629	-5,274	14,667	19,941	1,121	6,586	5,465
20010608	598	-2,965	-2,453	4,620	-16,996	7,322	24,317	-5,553	0,409	5,962
20010617	605	0,528	0,988	4,109	-15,506	9,709	25,215	-2,348	3,415	5,763
20010726	597	-3,278	-2,694	3,936	-15,620	4,799	20,419	-5,779	-0,243	5,535
20011007	606	0,924	0,866	3,770	-11,594	9,309	20,903	-1,245	3,767	5,012
20011030	601	-0,024	0,131	3,269	-10,323	7,996	18,319	-1,961	2,079	4,040
20011108	604	6,875	6,998	3,343	-9,310	15,451	24,761	5,059	8,972	3,913
20020111	605	7,961	8,269	3,923	-4,099	19,096	23,195	5,886	10,281	4,395
20020219	599	-0,705	-0,699	2,944	-9,940	7,982	17,922	-2,385	1,198	3,583
20020401	605	0,594	0,676	2,893	-15,137	9,954	25,091	-1,028	2,227	3,255
20020417	606	1,661	1,855	3,012	-9,027	10,040	19,067	0,109	3,505	3,396
20020424	596	-1,927	-1,820	3,572	-13,112	7,698	20,810	-4,080	0,497	4,578
20020519	609	0,785	0,767	3,393	-13,362	9,544	22,905	-0,844	3,015	3,859
20020526	596	-2,687	-2,248	3,939	-14,482	9,873	24,355	-5,361	-0,045	5,315
20020706	608	0,445	0,628	3,632	-13,106	11,450	24,556	-1,769	2,612	4,381
20020729	595	-3,115	-2,984	3,967	-15,477	7,272	22,749	-5,386	-0,375	5,011
20020830	595	-3,764	-3,618	3,369	-15,078	5,335	20,414	-5,749	-1,345	4,404
20020924	613	-2,828	-2,509	3,201	-15,770	6,144	21,914	-4,491	-0,905	3,587
20021026	606	0,738	0,782	3,377	-14,266	10,293	24,559	-1,257	2,948	4,205

TABLAS DEL CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DEL ALGORITMO SOBRE IMÁGENES LANDSAT

20030114	606	4,734	4,933	3,106	-4,881	18,732	23,613	2,593	6,857	4,264
20030121	596	-1,527	-1,010	3,683	-17,534	13,264	30,798	-3,561	0,565	4,126
20030206	597	-1,889	-1,152	3,903	-17,520	7,597	25,117	-4,100	0,436	4,536
20030310	597	-0,587	-0,584	3,328	-12,626	9,096	21,722	-2,385	1,544	3,929
20030427	593	0,107	0,561	3,832	-12,031	11,431	23,463	-2,116	2,321	4,437
20030522	606	-1,052	-0,523	4,253	-14,106	10,462	24,568	-3,633	1,595	5,228
20030529	590	0,113	0,390	4,817	-13,201	11,519	24,720	-3,104	3,356	6,460
Total	28251	0,205	0,211	4,786	-19,302	19,096	38,398	-2,798	3,286	6,084

AV.2.3. Landsat 8

Tabla 52. Banda 5. Escollera 2.

Fecha (aaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
20130414	743	-3,289	-3,196	4,631	-16,460	10,996	27,456	-5,689	-0,751	4,938
20130423	747	-5,384	-5,240	3,963	-15,957	4,973	20,931	-7,491	-2,685	4,806
20130430	728	6,202	6,548	6,313	-15,442	27,825	43,267	2,155	10,362	8,206
20130516	745	-6,474	-6,028	5,346	-22,768	5,762	28,530	-9,011	-3,027	5,984
20130525	743	-5,668	-5,561	4,382	-17,746	8,186	25,932	-7,569	-3,170	4,399
20130601	743	-6,550	-6,259	4,901	-18,959	6,963	25,922	-9,026	-3,500	5,526
20130610	745	-5,921	-5,548	4,201	-17,427	7,970	25,397	-7,787	-3,503	4,284
20130617	744	-5,295	-4,973	5,203	-18,473	11,451	29,924	-7,483	-2,165	5,318
20130626	743	-3,059	-2,757	4,328	-16,463	11,099	27,562	-5,330	-0,699	4,631
20130703	747	-5,312	-4,786	5,090	-17,502	10,344	27,847	-7,586	-2,634	4,952
Total	7428	-4,098	-4,471	6,044	-22,768	27,825	50,593	-7,282	-1,365	5,916

Tabla 53. Banda 5. Escollera 3.

Fecha (aaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
20130414	559	-1,110	-1,207	3,962	-12,147	14,111	26,258	-3,408	1,287	4,694
20130423	567	-3,383	-3,327	2,800	-10,321	3,946	14,268	-5,427	-1,403	4,024
20130430	550	2,485	1,574	4,698	-8,588	16,280	24,868	-0,682	5,038	5,720
20130516	559	-5,698	-5,578	3,933	-17,137	3,378	20,515	-8,250	-2,919	5,331
20130525	565	-3,205	-3,443	3,299	-11,640	7,422	19,062	-5,369	-0,720	4,649
20130601	560	-5,198	-5,430	3,720	-14,989	6,004	20,993	-7,600	-2,976	4,624
20130610	566	-3,696	-4,044	3,264	-12,075	5,769	17,844	-5,988	-1,237	4,750
20130617	561	-4,567	-4,464	3,982	-16,977	4,084	21,061	-6,933	-2,024	4,910
20130626	570	-0,996	-1,424	3,678	-9,736	11,345	21,081	-3,393	1,506	4,899
20130703	559	-4,659	-4,878	3,688	-14,682	4,373	19,054	-7,086	-1,943	5,143
Total	5616	-3,010	-3,191	4,404	-17,137	16,280	33,417	-5,816	-0,404	5,412

Tabla 54. Banda 6. Escollera 2.

Fecha (aaaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
20130414	755	3,938	4,768	5,696	-11,975	16,542	28,517	0,257	7,927	7,670
20130423	743	0,507	1,563	5,513	-15,365	12,532	27,897	-3,079	4,456	7,535
20130430	761	4,967	5,981	6,195	-11,452	17,390	28,842	1,153	9,320	8,168
20130516	740	-0,096	1,967	6,908	-20,462	13,978	34,440	-4,407	4,833	9,240
20130525	743	-0,740	0,646	5,847	-17,116	11,794	28,910	-3,873	3,057	6,930
20130601	739	1,662	3,207	7,341	-20,157	17,828	37,985	-1,844	6,454	8,298
20130610	743	-1,336	-0,112	5,548	-16,894	10,976	27,869	-4,137	2,267	6,403
20130617	732	0,041	1,220	7,119	-18,633	13,830	32,463	-5,319	5,411	10,730
20130626	741	-2,196	-0,856	5,482	-16,038	10,275	26,313	-5,284	1,774	7,059
20130703	719	1,522	2,719	7,922	-18,634	27,488	46,122	-3,693	5,905	9,598
Total	7416	0,842	1,794	6,754	-20,462	27,488	47,950	-3,195	5,362	8,556

Tabla 55. Banda 6. Escollera 3.

Fecha (aaaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
20130414	549	3,004	2,659	3,912	-10,150	16,798	26,948	-0,105	5,512	5,617
20130423	565	-0,572	-0,397	3,069	-9,744	8,679	18,423	-2,391	1,454	3,845
20130430	554	1,036	0,491	3,743	-7,115	10,169	17,285	-1,635	3,978	5,613
20130516	554	-0,094	0,070	3,766	-11,098	7,559	18,657	-2,661	2,775	5,436
20130525	563	-0,554	-0,642	3,287	-10,407	9,769	20,176	-2,561	1,482	4,043
20130601	552	0,901	0,782	3,271	-7,492	9,813	17,305	-1,360	3,223	4,582
20130610	566	-0,952	-0,825	3,259	-11,137	8,504	19,641	-2,829	0,887	3,716
20130617	551	0,560	0,850	3,663	-9,349	9,123	18,472	-1,762	3,018	4,779
20130626	567	-2,134	-2,027	3,224	-12,883	5,897	18,780	-4,546	0,203	4,749
20130703	556	0,919	0,915	3,582	-10,022	10,228	20,250	-1,539	3,316	4,855
Total	5577	0,198	0,085	3,729	-12,883	16,798	29,681	-2,192	2,648	4,839

Tabla 56. Banda 7. Escollera 3.

Fecha (aaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
20130414	542	2,915	2,671	4,141	-9,358	16,965	26,323	-0,418	5,616	6,034
20130423	566	-0,806	-0,564	3,305	-10,322	8,050	18,372	-3,022	1,294	4,316
20130430	550	-0,290	-0,895	4,092	-8,329	9,909	18,239	-3,452	2,714	6,166
20130516	548	-0,463	-0,295	4,090	-11,789	9,803	21,592	-3,177	2,604	5,781
20130525	564	-0,923	-1,000	3,570	-12,265	9,484	21,749	-3,240	1,467	4,707
20130601	549	1,148	1,253	3,719	-7,220	10,801	18,022	-1,595	3,669	5,264
20130610	563	-1,057	-0,991	3,504	-11,360	8,535	19,895	-3,372	1,192	4,564
20130617	550	0,712	0,813	4,068	-10,067	10,053	20,119	-2,596	3,738	6,333
20130626	566	-2,190	-1,941	3,512	-12,058	6,119	18,176	-4,667	0,361	5,028
20130703	544	0,786	1,084	4,033	-11,991	11,232	23,223	-2,500	3,811	6,311
Total	5542	-0,035	-0,148	4,044	-12,265	16,965	29,230	-2,857	2,674	5,531

AV.3. Estadísticas líneas georreferenciadas y con corrección radiométrica.

AV.3.1. Landsat 5

Tabla 57. Banda 4. Escollera 2.

Fecha (aaaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19840525	427	8,820	10,085	5,542	-13,057	22,374	35,431	5,292	12,399	7,107
19840626	422	7,760	8,459	4,189	-1,996	17,822	19,817	4,242	10,819	6,577
19840703	426	6,596	6,413	6,098	-9,212	25,605	34,817	3,193	9,269	6,076
19840921	427	0,795	0,228	6,611	-13,434	22,681	36,115	-3,732	4,965	8,697
19840930	423	8,261	7,953	6,367	-21,705	27,969	49,674	4,761	11,118	6,357
19841007	420	7,815	8,208	5,990	-19,924	21,946	41,870	4,306	10,865	6,559
19841023	430	3,676	2,639	6,596	-8,558	21,781	30,339	-1,477	7,027	8,504
19841124	435	6,394	6,835	5,937	-10,809	21,588	32,397	3,324	10,347	7,023
19850325	429	5,276	5,487	4,105	-9,747	15,741	25,488	3,134	8,172	5,038
19850410	425	6,304	6,826	5,481	-8,160	20,145	28,305	2,791	10,012	7,220
19860522	416	12,165	12,579	8,086	-6,274	32,549	38,823	5,617	18,086	12,469
19860623	424	3,495	3,057	5,716	-13,969	16,236	30,206	0,355	7,649	7,294
19860810	406	0,593	-0,086	5,886	-11,203	20,012	31,215	-3,295	4,065	7,359
19860826	425	4,695	4,452	5,067	-10,209	18,401	28,610	0,951	7,703	6,753
19861029	429	3,707	3,224	5,671	-20,197	18,920	39,117	0,199	6,954	6,755
19870416	426	7,823	7,841	5,405	-8,519	22,113	30,632	4,659	11,237	6,578
19870423	426	6,231	5,774	4,550	-3,882	20,451	24,334	2,964	8,799	5,835
19870502	399	5,775	6,261	5,569	-10,271	15,839	26,110	1,891	10,618	8,728
19870626	432	5,654	5,039	5,038	-6,107	24,512	30,619	2,245	8,532	6,287
19870712	421	3,895	3,734	5,742	-9,626	18,279	27,905	0,475	7,300	6,826
19870813	424	3,515	2,836	4,979	-7,992	14,948	22,939	-0,372	6,784	7,156
19870907	423	5,588	5,524	5,941	-6,233	26,098	32,330	0,937	9,421	8,483
19870923	426	4,763	4,927	4,951	-5,458	21,416	26,874	0,812	7,625	6,812
19900906	425	3,505	1,808	7,511	-8,165	28,530	36,695	-1,071	6,435	7,506
20020619	756	0,612	0,668	4,573	-17,115	12,158	29,273	-2,285	3,684	5,970
20020628	770	5,964	6,325	5,869	-16,385	20,375	36,760	2,298	10,086	7,788
20030701	767	0,814	0,458	3,469	-7,866	12,685	20,551	-1,935	3,129	5,065
20030708	759	0,961	0,750	4,122	-9,034	13,721	22,755	-2,183	3,811	5,994
20030724	764	-0,295	-0,485	4,519	-12,214	11,916	24,130	-3,272	2,869	6,141
20030802	765	2,925	2,838	4,687	-9,200	18,275	27,475	-0,230	5,609	5,839
20030809	752	-0,358	-0,524	6,036	-15,883	14,341	30,224	-4,908	4,283	9,191
20030818	768	3,674	3,612	4,282	-10,498	18,984	29,481	1,112	6,046	4,934
20030825	766	-1,670	-1,438	4,391	-15,298	10,950	26,247	-4,368	1,224	5,592

20061029	770	0,788	0,270	5,366	-22,678	23,228	45,907	-2,684	3,777	6,461
20061114	770	0,703	0,730	5,683	-12,922	17,026	29,948	-3,207	4,120	7,327
20070108	762	-1,424	-1,116	5,751	-17,776	13,174	30,950	-4,682	2,221	6,903
20070124	764	-1,392	-1,783	5,396	-14,518	12,469	26,987	-5,257	2,320	7,576
20070209	762	-0,067	-0,469	6,032	-11,822	15,738	27,559	-4,157	3,850	8,007
20070313	752	-0,717	-0,619	4,840	-15,786	15,880	31,667	-3,918	2,563	6,480
20070509	750	-3,425	-3,526	3,401	-11,189	5,445	16,634	-5,883	-1,004	4,879
20070703	184	0,158	0,661	3,725	-12,504	7,634	20,138	-2,013	2,981	4,995
20070728	767	1,346	1,487	3,625	-8,986	15,009	23,995	-1,085	3,853	4,938
20070804	754	-0,482	-0,529	5,200	-11,895	15,890	27,785	-4,135	3,217	7,352
20070813	762	-2,187	-1,679	4,017	-16,449	6,500	22,948	-4,289	0,814	5,103
20070820	761	0,335	0,824	4,419	-14,560	11,167	25,727	-2,367	3,245	5,612
20090622	733	4,171	4,289	5,901	-15,307	23,378	38,685	0,528	7,695	7,167
20090724	751	-1,117	-1,181	3,751	-12,818	9,151	21,969	-3,724	1,573	5,297
20090910	767	-1,931	-2,058	4,502	-12,724	10,292	23,016	-4,928	0,910	5,838
20091012	751	-2,928	-3,305	4,422	-15,008	8,851	23,859	-6,044	-0,064	5,980
20100524	737	-1,171	-1,715	4,647	-15,215	15,340	30,555	-4,097	1,510	5,607
20100711	743	-1,043	-1,034	4,355	-10,077	10,410	20,487	-4,478	2,275	6,753
20100727	747	-2,289	-2,466	4,312	-10,809	10,555	21,364	-5,709	0,650	6,359
20101116	755	-0,593	-0,798	4,805	-15,442	14,959	30,401	-3,295	2,539	5,834
20110119	250	0,799	0,380	6,032	-21,335	18,082	39,417	-2,008	3,948	5,956
20110204	771	2,315	2,034	5,749	-11,765	17,349	29,115	-1,983	6,627	8,610
20110409	763	-2,735	-3,507	5,208	-12,982	12,541	25,523	-6,458	0,580	7,037
20110511	741	-2,745	-2,777	3,955	-11,946	9,755	21,702	-5,536	-0,101	5,435
20110628	744	-2,566	-2,664	4,380	-13,753	10,060	23,813	-5,500	0,284	5,785
20110815	751	-4,142	-4,058	4,116	-15,723	7,045	22,769	-6,928	-1,203	5,726
Total	35595	1,371	0,924	6,179	-22,678	32,549	55,227	-2,886	5,146	8,032

Tabla 58. Banda 4. Escollera 3.

Fecha (aaaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19840525	457	1,573	1,401	3,402	-6,360	10,126	16,486	-0,630	4,282	4,912
19840626	461	2,010	1,708	4,624	-8,265	15,872	24,138	-1,283	5,560	6,843
19840703	436	0,720	1,353	3,739	-9,777	10,371	20,147	-1,461	3,125	4,586
19840921	436	-5,678	-5,978	3,712	-14,850	4,965	19,814	-8,288	-2,951	5,337
19840930	461	-1,384	-1,962	3,455	-8,102	8,155	16,257	-3,768	0,660	4,428
19841007	418	-0,403	-1,301	5,778	-14,685	13,452	28,137	-4,407	3,426	7,834
19841023	431	-3,274	-3,148	2,661	-10,029	3,464	13,493	-5,103	-1,457	3,646
19841124	411	-1,603	-2,525	4,820	-11,129	13,940	25,069	-4,942	0,677	5,619
19850325	461	-1,283	-0,891	5,114	-11,626	11,495	23,121	-5,459	2,863	8,322
19850410	460	-1,736	-2,369	4,989	-13,887	8,884	22,771	-5,214	2,674	7,888
19860522	430	1,912	1,662	4,090	-6,744	11,968	18,712	-1,001	4,428	5,430
19860623	430	-3,233	-2,691	4,545	-14,459	8,616	23,075	-6,687	-0,122	6,565
19860810	426	-4,961	-5,593	3,931	-14,317	6,989	21,306	-7,951	-2,136	5,815
19860826	420	-3,643	-3,482	4,282	-13,739	10,920	24,659	-6,788	-1,405	5,383
19861029	421	-2,969	-3,125	4,312	-11,508	8,913	20,421	-6,068	-0,586	5,483
19870416	605	1,156	1,285	4,416	-12,644	13,987	26,631	-1,770	4,215	5,986
19870423	555	1,216	0,694	4,169	-8,385	15,601	23,986	-1,410	3,309	4,718
19870502	605	1,394	1,047	4,327	-8,060	16,842	24,902	-1,205	3,920	5,124
19870626	563	-1,181	-1,328	4,966	-11,587	14,144	25,730	-4,775	1,759	6,534
19870712	567	-0,625	-0,499	4,100	-14,147	14,164	28,311	-3,255	2,147	5,402
19870813	562	-0,361	-0,035	5,275	-13,500	14,664	28,164	-3,936	2,966	6,902
19870907	593	0,969	0,451	4,500	-13,054	15,543	28,597	-1,828	2,981	4,808
19870923	593	-0,258	-1,564	4,400	-11,010	13,815	24,825	-3,610	3,026	6,636
19900906	260	-2,105	-3,474	6,408	-16,043	18,691	34,734	-6,449	0,949	7,398
20020619	567	-3,131	-3,346	3,423	-13,906	11,626	25,532	-5,418	-0,795	4,623
20020628	609	-0,916	-1,321	5,365	-12,234	14,222	26,456	-4,909	2,793	7,702
20030701	608	-2,538	-2,688	3,044	-11,738	9,198	20,936	-4,462	-0,424	4,038
20030708	565	-3,248	-2,875	3,929	-16,071	9,284	25,355	-5,677	-0,638	5,039
20030724	565	-4,479	-4,583	3,899	-19,035	6,834	25,869	-7,053	-1,330	5,723
20030802	606	-1,701	-1,887	3,648	-11,634	9,378	21,012	-3,866	0,601	4,467
20030809	569	-4,479	-5,068	4,558	-14,451	12,074	26,525	-7,908	-1,800	6,108
20030818	606	-0,488	-0,637	3,248	-8,344	9,696	18,040	-2,728	1,536	4,264
20030825	567	-4,758	-4,552	3,315	-15,670	4,273	19,943	-7,007	-2,606	4,400
20061029	601	-0,410	-0,388	3,505	-12,253	9,161	21,414	-2,531	2,014	4,545
20061114	601	0,580	0,685	4,213	-15,920	9,383	25,302	-2,427	3,899	6,325
20070108	551	-2,003	-1,435	5,834	-24,808	10,300	35,107	-5,577	2,023	7,601
20070124	552	-1,114	-1,035	3,499	-9,973	6,683	16,656	-3,705	1,387	5,092
20070209	569	-1,662	-1,211	5,076	-12,000	8,568	20,568	-6,090	2,324	8,414
20070313	560	-2,737	-3,145	3,518	-12,435	8,264	20,699	-5,004	-0,641	4,363
20070509	606	-2,994	-2,953	3,301	-13,552	5,889	19,442	-5,419	-0,769	4,649
20070703	567	-1,085	-1,166	5,432	-15,725	11,402	27,127	-5,087	2,673	7,760

ANEJO V

20070728	610	0,580	0,497	2,987	-7,180	8,991	16,171	-1,523	2,285	3,808
20070804	569	-2,237	-2,587	3,994	-11,081	9,484	20,564	-5,416	0,476	5,891
20070813	604	-1,879	-2,158	3,000	-9,325	7,501	16,826	-3,968	0,239	4,206
20070820	564	-1,284	-1,100	3,909	-11,415	8,743	20,158	-3,882	1,500	5,382
20090622	542	2,947	2,674	5,167	-10,960	20,978	31,937	-0,620	6,125	6,745
20090724	569	-2,599	-2,253	4,344	-12,749	11,109	23,858	-5,749	0,353	6,103
20090910	565	-2,792	-2,288	3,787	-13,345	9,948	23,292	-5,089	-0,378	4,710
20091012	569	-2,464	-2,827	3,309	-13,120	5,884	19,004	-4,189	-0,181	4,008
20100524	574	-1,559	-1,306	4,430	-15,870	8,227	24,097	-4,456	1,887	6,343
20100711	570	-2,483	-2,532	4,354	-16,323	9,572	25,895	-5,638	0,891	6,529
20100727	564	-2,906	-2,705	3,646	-13,930	6,239	20,169	-5,346	-0,322	5,024
20101116	552	-2,003	-1,904	4,560	-19,450	8,280	27,729	-4,928	1,121	6,049
20110119	318	-2,118	-2,794	4,076	-12,220	7,785	20,005	-5,025	0,409	5,434
20110204	560	-0,342	-0,729	4,335	-12,997	13,665	26,661	-3,564	2,600	6,163
20110409	565	-2,349	-2,112	3,514	-12,604	5,993	18,597	-4,426	-0,129	4,297
20110511	567	-3,355	-3,173	3,435	-14,267	6,855	21,121	-5,387	-1,161	4,226
20110628	569	-1,403	-1,514	4,017	-10,385	8,999	19,384	-4,121	1,073	5,195
20110815	567	-4,401	-4,200	3,215	-14,719	5,195	19,915	-6,409	-2,284	4,125
Total	31329	-1,557	-1,741	4,573	-24,808	20,978	45,785	-4,603	1,340	5,943

Tabla 59. Banda 5 Escollera 2.

Fecha (aaaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19840525	428	9,288	8,910	4,291	-1,093	20,255	21,347	6,149	12,275	6,126
19840626	423	7,281	7,345	4,009	-2,422	18,687	21,109	4,131	9,973	5,842
19840703	426	3,385	3,079	5,460	-7,806	19,644	27,449	-0,455	5,865	6,321
19840921	428	-0,140	-0,588	6,545	-12,099	18,801	30,900	-5,350	4,174	9,524
19840930	424	7,804	6,435	5,184	-6,427	27,811	34,238	4,457	10,811	6,353
19841007	429	2,463	2,565	5,997	-10,126	18,051	28,177	-1,379	6,139	7,518
19841023	432	2,060	1,078	5,969	-8,304	19,896	28,200	-2,795	4,972	7,767
19841124	430	1,417	1,380	4,430	-10,806	14,332	25,137	-1,507	3,688	5,195
19850325	429	8,701	7,732	5,004	-7,438	28,185	35,623	5,241	11,674	6,433
19850410	428	6,274	6,719	5,242	-6,162	17,913	24,076	3,204	9,919	6,715
19860522	418	5,746	4,750	5,125	-5,513	19,409	24,922	1,653	9,931	8,277
19860623	432	3,744	3,317	3,718	-7,519	14,395	21,914	1,130	6,078	4,948
19860810	422	2,651	1,673	4,860	-8,314	20,024	28,338	-0,348	4,583	4,931
19860826	427	2,792	2,541	4,067	-7,967	12,728	20,695	0,117	5,708	5,591
19861029	430	1,197	0,925	4,409	-9,862	15,153	25,016	-1,761	3,489	5,250
19870416	427	9,101	8,864	5,573	-3,546	28,190	31,736	5,986	12,282	6,296
19870423	405	2,189	1,794	4,373	-13,463	17,186	30,649	-0,569	4,436	5,005
19870502	336	6,765	6,573	3,750	-13,267	15,954	29,221	4,608	9,330	4,722
19870626	424	3,179	2,947	4,213	-9,725	13,903	23,628	0,583	5,604	5,021
19870712	429	3,317	2,663	4,522	-5,007	20,468	25,475	-0,108	5,533	5,641
19870813	430	4,490	3,459	4,543	-3,976	17,387	21,363	1,354	7,622	6,268
19870907	422	7,888	6,396	6,069	-3,633	28,538	32,171	3,343	11,975	8,632
19870923	425	6,903	6,314	5,034	-5,500	22,155	27,655	3,340	10,008	6,668
19900906	425	2,509	1,149	6,465	-10,663	21,364	32,027	-1,576	5,345	6,921
20020619	735	3,453	3,221	5,149	-19,374	16,148	35,521	-0,093	7,048	7,142
20020628	768	3,543	3,529	5,927	-13,291	18,293	31,584	-0,696	8,076	8,772
20030701	765	4,154	4,837	5,584	-21,092	16,306	37,398	2,214	7,038	4,824
20030708	721	1,647	2,057	4,367	-15,770	13,086	28,855	-0,304	4,187	4,490
20030724	728	0,753	1,099	4,645	-16,401	12,801	29,202	-1,851	3,641	5,492
20030802	757	3,764	4,107	5,441	-18,703	17,926	36,629	1,237	6,543	5,305
20030809	705	1,220	1,576	5,450	-22,582	13,713	36,294	-2,282	5,168	7,449
20030818	766	4,250	4,445	5,117	-22,699	17,181	39,880	1,892	6,998	5,105
20030825	744	-0,344	0,267	5,223	-24,846	11,731	36,577	-2,858	2,764	5,621
20061029	766	-0,787	-0,700	5,020	-26,749	15,931	42,680	-3,731	1,673	5,403
20061114	777	0,009	-0,147	4,962	-18,778	18,599	37,377	-3,313	2,686	5,999
20070108	727	-2,551	-2,165	5,868	-20,676	20,493	41,168	-6,464	1,229	7,693
20070124	765	-2,059	-1,741	4,825	-24,657	11,961	36,619	-4,930	0,984	5,915
20070209	771	-0,865	-0,893	4,403	-12,655	11,808	24,463	-3,766	2,354	6,120
20070313	766	-2,390	-2,039	4,917	-30,342	9,560	39,903	-4,752	0,619	5,371
20070509	753	1,761	2,422	4,118	-16,868	11,805	28,672	-0,043	4,336	4,379
20070703	133	0,231	-0,067	3,683	-8,274	8,922	17,195	-2,441	2,380	4,821

ANEJO V

20070728	764	2,663	3,185	4,339	-12,685	17,204	29,889	0,720	5,145	4,425
20070804	734	-1,708	-1,422	5,225	-22,185	11,322	33,507	-4,253	1,459	5,712
20070813	759	1,621	1,945	4,521	-15,925	11,689	27,614	-1,290	5,064	6,354
20070820	745	-2,171	-1,909	4,748	-18,015	10,730	28,745	-4,415	0,817	5,232
20090622	731	-0,733	-0,187	5,689	-21,123	11,594	32,717	-3,490	3,238	6,728
20090724	731	-1,225	-0,463	5,127	-21,543	10,085	31,627	-3,338	2,119	5,457
20090910	736	-2,904	-2,712	5,090	-19,571	8,620	28,191	-6,484	1,120	7,604
20091012	767	-2,000	-1,732	4,299	-13,382	10,175	23,557	-4,786	0,653	5,440
20100524	747	0,040	-0,001	5,532	-18,971	15,459	34,431	-2,472	3,705	6,178
20100711	749	-1,550	-0,991	5,376	-23,172	9,323	32,495	-4,486	2,064	6,550
20100727	750	-1,136	-0,759	5,013	-20,820	12,411	33,231	-3,880	2,118	5,999
20101116	769	-1,570	-1,275	5,009	-19,167	14,064	33,230	-4,323	1,405	5,728
20110119	589	-3,797	-3,683	5,569	-16,772	14,077	30,848	-7,393	-0,034	7,358
20110204	767	-2,395	-1,699	5,463	-17,114	11,676	28,790	-6,129	1,166	7,294
20110409	754	-1,524	-1,527	4,699	-13,982	14,173	28,155	-4,727	1,320	6,047
20110511	742	-1,102	-0,318	4,499	-20,635	8,139	28,774	-3,510	1,782	5,293
20110628	734	-1,097	-0,775	5,232	-17,681	11,398	29,079	-4,339	2,612	6,951
20110815	759	-3,425	-3,156	4,267	-15,884	6,619	22,503	-6,314	-0,503	5,811
Total	35603	1,152	1,163	5,979	-30,342	28,538	58,880	-2,467	4,757	7,224

Tabla 60. Banda 5 Escollera 3.

Fecha (aaaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19840525	461	1,111	1,559	3,723	-9,861	9,452	19,313	-1,566	3,451	5,017
19840626	458	1,013	0,843	3,671	-10,126	9,301	19,427	-1,562	3,815	5,377
19840703	433	-1,170	-1,263	4,240	-13,807	9,019	22,826	-3,698	1,743	5,441
19840921	438	-5,729	-5,931	4,245	-19,982	5,270	25,252	-8,454	-2,726	5,728
19840930	459	-2,232	-2,175	2,476	-10,682	4,791	15,473	-3,861	-0,640	3,221
19841007	435	-5,032	-4,810	3,333	-14,747	1,915	16,662	-7,168	-2,573	4,594
19841023	432	-4,697	-4,960	2,938	-14,836	5,222	20,058	-6,427	-2,899	3,527
19841124	434	-5,570	-5,399	3,146	-15,137	2,664	17,801	-7,774	-3,610	4,164
19850325	459	-0,065	0,258	4,916	-11,122	9,834	20,956	-4,172	4,082	8,255
19850410	459	-2,852	-2,384	4,689	-16,782	7,334	24,116	-5,880	0,241	6,121
19860522	432	-0,219	0,461	3,177	-10,766	6,190	16,956	-2,591	1,996	4,587
19860623	433	-1,041	-0,478	3,509	-10,697	5,503	16,200	-2,464	1,459	3,923
19860810	428	-4,011	-4,664	3,702	-11,312	4,749	16,061	-7,171	-0,693	6,478
19860826	425	-3,893	-3,227	3,069	-12,450	4,855	17,304	-6,014	-1,603	4,411
19861029	434	-4,277	-4,265	2,620	-10,187	2,434	12,620	-6,135	-2,621	3,514
19870416	602	0,392	0,335	3,924	-14,794	10,692	25,487	-2,341	3,056	5,396
19870423	562	-1,559	-1,376	3,198	-10,709	9,644	20,353	-3,472	0,499	3,971
19870502	603	1,697	1,222	3,455	-5,874	17,900	23,773	-0,321	3,466	3,786
19870626	565	-0,246	-0,336	3,500	-8,802	10,556	19,357	-2,800	2,368	5,169
19870712	563	0,659	1,095	3,422	-10,446	8,741	19,187	-1,396	2,576	3,972
19870813	559	-1,695	-1,372	4,394	-16,126	11,451	27,577	-3,997	0,336	4,334
19870907	592	0,292	-0,353	3,840	-7,657	11,959	19,617	-2,240	2,333	4,573
19870923	596	0,234	-0,569	4,156	-12,535	11,419	23,954	-2,870	3,471	6,341
19900906	273	-3,780	-5,032	4,776	-11,585	15,813	27,399	-7,321	-1,078	6,244
20020619	567	-0,889	-0,639	3,955	-11,466	12,193	23,658	-3,423	1,673	5,096
20020628	606	-0,669	-1,364	4,578	-11,557	12,567	24,123	-4,045	2,880	6,925
20030701	603	0,296	0,207	3,680	-10,763	10,847	21,610	-2,106	2,625	4,731
20030708	558	-1,783	-1,555	4,679	-13,881	11,196	25,077	-4,383	1,008	5,391
20030724	567	-2,635	-2,437	4,075	-14,651	8,099	22,750	-5,670	0,166	5,836
20030802	609	-1,131	-1,433	3,312	-12,434	7,747	20,181	-3,244	1,432	4,676
20030809	562	-3,515	-3,212	4,644	-17,816	8,706	26,523	-6,422	-0,662	5,759
20030818	606	-0,589	-0,692	3,529	-12,154	9,700	21,854	-3,004	1,768	4,772
20030825	562	-3,931	-3,468	3,458	-13,343	4,761	18,104	-5,680	-1,812	3,868
20061029	606	-2,144	-2,083	3,304	-16,144	6,064	22,208	-4,610	-0,066	4,544
20061114	601	-1,075	-1,256	4,212	-13,555	9,773	23,328	-4,317	2,020	6,337
20070108	555	-3,890	-3,881	5,354	-21,274	9,257	30,530	-7,850	0,474	8,323
20070124	554	-2,318	-2,247	3,139	-11,621	5,856	17,478	-4,574	-0,240	4,334
20070209	564	-1,311	-1,774	4,671	-11,579	9,488	21,067	-5,264	2,413	7,677
20070313	564	-3,219	-3,463	3,320	-13,562	7,341	20,903	-5,101	-1,243	3,858
20070509	603	0,761	0,559	3,763	-14,108	10,411	24,519	-1,548	3,479	5,027
20070703	562	-0,237	-0,185	4,545	-15,555	13,958	29,513	-3,079	2,045	5,124

ANEJO V

20070728	606	2,326	2,114	2,796	-5,852	9,366	15,218	0,470	4,152	3,681
20070804	561	-1,623	-1,527	4,108	-10,978	9,922	20,899	-4,538	1,166	5,704
20070813	605	1,025	1,190	2,922	-8,525	9,318	17,842	-1,016	2,885	3,901
20070820	568	-3,263	-3,521	3,420	-12,083	7,871	19,954	-5,751	-0,790	4,961
20090622	570	0,821	0,924	3,401	-9,889	8,181	18,070	-1,831	3,414	5,245
20090724	568	0,121	0,839	3,842	-9,632	8,640	18,273	-1,859	2,671	4,530
20090910	563	-2,721	-2,391	3,353	-12,522	5,772	18,295	-4,861	-0,847	4,013
20091012	564	-1,897	-1,764	3,396	-10,492	7,228	17,720	-4,478	0,708	5,186
20100524	569	2,287	2,740	4,530	-10,097	12,907	23,004	-0,602	5,577	6,180
20100711	574	0,789	1,208	3,491	-9,574	9,935	19,510	-1,640	3,159	4,798
20100727	569	0,991	1,136	3,332	-8,928	10,048	18,976	-1,073	3,253	4,327
20101116	568	-2,754	-2,729	3,891	-18,068	6,751	24,819	-4,972	-0,459	4,513
20110119	586	-3,577	-3,307	4,203	-20,782	7,698	28,479	-6,816	-0,559	6,258
20110204	566	-4,896	-4,692	3,463	-13,885	4,125	18,010	-7,731	-2,526	5,205
20110409	568	-0,930	-1,114	3,372	-11,737	8,422	20,159	-3,001	1,552	4,553
20110511	563	1,314	1,671	3,313	-9,727	12,130	21,857	-0,599	3,261	3,860
20110628	564	1,193	1,611	3,692	-9,330	10,137	19,467	-0,763	3,532	4,295
20110815	564	-1,864	-1,591	3,175	-11,263	6,643	17,905	-3,804	0,191	3,995
Total	31680	-1,295	-1,242	4,284	-21,274	17,900	39,173	-4,087	1,642	5,729

Tabla 61. Banda 7 Escollera 2.

Fecha (aaaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19840703	431	3,908	3,062	5,570	-9,418	22,092	31,510	-0,232	6,755	6,987
19840921	427	-0,829	-1,687	5,877	-12,451	20,133	32,584	-4,974	2,732	7,707
19840930	426	6,288	5,974	4,855	-3,877	20,572	24,449	3,336	9,103	5,767
19841007	430	1,681	1,538	5,335	-10,824	19,198	30,023	-1,984	4,491	6,475
19841023	424	1,661	0,690	5,903	-10,369	19,199	29,569	-2,650	4,273	6,923
19841124	424	-0,260	-0,579	5,708	-16,326	16,562	32,888	-4,298	2,601	6,898
19850325	425	8,285	8,050	5,284	-6,449	20,128	26,577	4,960	11,500	6,540
19850410	431	7,627	7,517	6,299	-4,126	32,482	36,608	2,843	11,633	8,790
19860522	429	4,627	4,024	5,849	-8,821	19,981	28,802	0,704	8,550	7,847
19860623	431	3,278	2,904	4,574	-9,971	17,993	27,965	0,492	5,497	5,005
19860810	428	2,026	1,623	4,533	-11,741	17,751	29,492	-0,931	5,073	6,004
19860826	431	2,680	2,988	5,190	-14,150	16,206	30,356	-0,386	6,355	6,741
19861029	428	0,197	0,168	5,171	-16,415	13,926	30,341	-2,968	3,701	6,669
19870416	425	9,422	8,949	4,692	0,507	24,020	23,513	5,879	12,439	6,560
19870423	276	0,178	-0,281	5,339	-15,261	11,995	27,256	-3,340	3,932	7,272
19870502	330	6,056	5,810	4,140	-8,081	16,778	24,860	3,815	8,640	4,825
19870626	426	2,841	2,846	5,295	-18,811	17,121	35,932	0,033	5,879	5,846
19870712	426	3,887	3,345	4,943	-6,519	18,918	25,436	0,481	6,361	5,880
19870813	429	4,461	4,056	4,768	-6,686	18,572	25,258	0,904	7,069	6,165
19870907	430	8,035	6,535	5,989	-3,163	24,731	27,894	3,744	11,640	7,895
19870923	429	7,114	6,495	4,631	-5,428	20,597	26,024	3,884	9,797	5,912
19900906	427	1,579	0,165	6,145	-13,714	19,095	32,808	-2,376	5,193	7,569
20020619	728	3,610	3,824	6,931	-16,796	20,303	37,098	-0,802	8,714	9,516
20020628	734	3,949	3,934	5,725	-12,248	23,648	35,895	0,589	7,462	6,872
20030701	738	5,701	6,289	5,545	-19,468	18,024	37,491	3,471	8,875	5,403
20030708	690	3,070	3,510	4,613	-14,210	18,607	32,817	-0,431	5,944	6,374
20030724	668	1,502	1,695	5,219	-17,064	17,045	34,109	-1,000	4,382	5,381
20030802	744	4,547	4,803	5,783	-22,578	18,485	41,063	2,230	7,396	5,166
20030809	694	1,781	1,762	4,830	-21,919	16,434	38,353	-1,188	4,861	6,049
20030818	741	4,339	4,732	5,715	-23,442	16,428	39,870	1,428	7,697	6,269
20030825	707	0,832	1,075	6,098	-23,373	19,226	42,599	-2,835	4,649	7,484
20061029	735	-1,101	-0,876	6,448	-19,563	21,882	41,445	-5,494	2,538	8,032
20061114	767	-0,744	-0,939	6,351	-21,374	19,112	40,486	-5,442	3,486	8,928
20070108	566	-5,440	-4,990	7,322	-25,181	20,523	45,704	-10,722	-0,344	10,378
20070124	759	-2,679	-2,266	5,493	-26,118	12,616	38,734	-4,880	0,506	5,386
20070209	766	-1,506	-1,438	4,293	-19,342	12,033	31,376	-4,234	1,335	5,569
20070313	760	-2,527	-1,910	5,862	-31,014	13,994	45,008	-5,282	1,021	6,304
20070509	759	2,955	3,769	4,812	-14,668	10,933	25,601	1,232	6,295	5,063
20070703	290	0,486	0,466	3,428	-8,814	9,416	18,230	-1,791	2,827	4,618
20070728	761	2,271	3,482	5,524	-17,520	13,526	31,046	-0,216	5,765	5,981
20070804	701	-1,333	-0,618	5,717	-26,396	13,143	39,539	-3,663	2,273	5,936

ANEJO V

20070813	745	2,144	2,888	6,096	-19,518	17,838	37,356	-0,646	5,766	6,412
20070820	745	-2,509	-1,575	7,028	-23,983	12,905	36,888	-6,512	2,634	9,146
20090622	537	-1,706	-0,595	6,162	-25,747	11,296	37,043	-4,265	2,219	6,484
20090724	685	-0,915	0,279	6,592	-25,825	13,817	39,642	-4,498	3,434	7,932
20090910	722	-2,800	-2,455	6,887	-23,524	12,129	35,652	-8,209	3,076	11,285
20091012	763	-1,442	-1,618	5,975	-14,907	15,797	30,704	-5,720	2,941	8,660
20100524	715	1,232	1,476	6,817	-23,030	17,936	40,966	-2,961	5,717	8,678
20100711	723	-0,767	-0,347	6,339	-24,712	15,103	39,815	-4,505	3,698	8,204
20100727	733	-0,697	-0,073	6,681	-25,310	14,829	40,139	-5,545	4,024	9,569
20101116	761	-2,018	-1,973	5,120	-17,151	13,210	30,361	-5,382	1,499	6,882
20110119	532	-5,426	-5,093	6,416	-26,158	12,653	38,811	-9,466	-1,705	7,761
20110204	764	-3,580	-3,182	6,617	-28,696	14,423	43,119	-7,582	0,709	8,291
20110409	734	-1,532	-2,061	5,777	-18,990	18,305	37,295	-5,347	2,442	7,789
20110511	711	-0,574	0,318	5,802	-23,223	14,143	37,366	-3,972	3,379	7,351
20110628	684	-1,408	-0,614	6,628	-21,136	11,551	32,687	-5,170	3,517	8,687
20110815	746	-3,329	-2,854	6,084	-20,500	10,099	30,599	-7,265	1,484	8,750
Total	34627	1,180	1,515	6,751	-31,014	32,482	63,496	-2,955	5,499	8,453

Tabla 62. Banda 7 Escollera 3.

Fecha (aaaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19840525	459	1,709	2,009	3,694	-10,426	10,313	20,739	-0,800	4,545	5,345
19840626	457	1,086	1,351	3,842	-10,996	8,917	19,913	-0,898	3,847	4,746
19840703	430	-0,215	-0,334	3,736	-11,248	10,703	21,951	-2,418	2,176	4,594
19840921	433	-5,425	-5,758	3,586	-17,593	3,272	20,866	-7,446	-2,753	4,693
19840930	457	-2,005	-1,998	2,667	-10,373	6,095	16,468	-3,672	-0,425	3,247
19841007	433	-4,949	-4,551	3,491	-13,314	3,299	16,613	-7,413	-2,361	5,052
19841023	433	-4,165	-4,410	3,039	-13,934	6,267	20,200	-6,164	-2,390	3,775
19841124	429	-7,066	-6,713	3,523	-20,458	1,880	22,338	-9,165	-4,419	4,746
19850325	459	0,236	0,271	4,274	-14,654	11,166	25,820	-2,185	3,376	5,560
19850410	458	-1,785	-1,610	3,733	-15,028	6,454	21,482	-3,694	0,800	4,494
19860522	435	-1,035	-0,665	3,348	-9,060	6,380	15,440	-3,381	1,400	4,781
19860623	431	-0,940	-1,015	3,802	-13,900	8,136	22,036	-3,570	1,948	5,518
19860810	430	-3,218	-3,322	3,365	-13,199	5,610	18,809	-5,627	-0,698	4,929
19860826	433	-4,134	-3,878	3,396	-13,577	3,931	17,508	-6,178	-1,664	4,514
19861029	429	-3,505	-3,520	3,262	-12,888	4,863	17,750	-5,819	-1,339	4,481
19870416	595	1,245	1,260	3,972	-16,472	13,352	29,824	-1,238	3,624	4,862
19870423	566	-2,176	-1,929	3,563	-15,504	8,158	23,662	-4,864	0,248	5,112
19870502	603	1,899	1,765	3,903	-13,644	15,791	29,435	-0,333	3,970	4,303
19870626	562	-0,752	-0,655	3,670	-8,750	12,385	21,135	-3,375	1,512	4,888
19870712	559	0,090	0,189	3,728	-14,759	11,743	26,502	-2,501	2,381	4,882
19870813	559	-1,475	-1,256	4,400	-13,977	10,279	24,256	-4,224	1,193	5,417
19870907	594	0,908	0,927	4,013	-10,780	10,765	21,544	-2,210	3,529	5,739
19870923	596	0,754	0,243	4,501	-12,370	13,124	25,493	-2,746	3,987	6,733
19900906	285	-4,427	-4,653	4,896	-13,829	18,103	31,933	-8,101	-1,095	7,006
20020619	566	-0,503	-0,986	4,722	-19,546	18,409	37,955	-3,625	2,341	5,966
20020628	605	-0,412	-0,528	3,602	-10,708	11,977	22,685	-2,515	1,653	4,168
20030701	603	1,410	1,356	4,592	-12,654	13,930	26,584	-1,327	4,695	6,022
20030708	569	-0,620	-0,398	5,370	-12,685	13,854	26,539	-4,399	2,817	7,216
20030724	564	-2,109	-2,103	4,140	-15,350	9,136	24,486	-4,720	0,579	5,299
20030802	610	-1,015	-1,082	3,827	-10,376	8,588	18,964	-3,601	1,443	5,045
20030809	568	-2,765	-2,467	4,119	-17,269	10,156	27,425	-5,415	-0,328	5,086
20030818	605	-0,936	-1,495	4,294	-13,331	13,565	26,896	-3,703	1,835	5,538
20030825	567	-3,667	-3,369	4,133	-19,097	4,325	23,422	-6,300	-0,603	5,698
20061029	606	-2,454	-2,246	4,839	-13,929	8,566	22,495	-5,832	0,901	6,733
20061114	599	-1,012	-0,968	5,794	-16,602	12,043	28,645	-5,332	3,673	9,004
20070108	576	-5,311	-4,828	7,354	-23,407	8,775	32,182	-10,933	0,693	11,627
20070124	556	-2,221	-1,785	3,936	-13,646	7,704	21,350	-5,168	0,557	5,725
20070209	564	-1,520	-1,508	3,810	-10,737	12,283	23,020	-4,240	0,906	5,147
20070313	560	-4,051	-3,871	4,316	-15,284	9,272	24,556	-6,672	-1,482	5,190
20070509	602	1,543	1,307	3,525	-9,616	13,378	22,994	-0,737	3,635	4,372
20070703	560	-1,162	-1,070	5,055	-21,553	12,215	33,768	-3,986	1,902	5,887

ANEJO V

20070728	602	1,984	2,311	3,474	-9,508	11,032	20,539	0,131	4,417	4,287
20070804	563	-1,150	-1,396	4,001	-11,308	10,141	21,449	-3,945	1,686	5,631
20070813	603	1,474	1,418	3,494	-7,984	10,543	18,528	-1,025	3,851	4,876
20070820	565	-3,794	-3,542	5,165	-17,503	10,520	28,023	-6,906	0,224	7,131
20090622	569	0,101	0,600	4,223	-14,332	9,208	23,539	-2,137	3,107	5,244
20090724	565	0,989	1,785	5,262	-15,989	12,693	28,682	-1,563	4,370	5,933
20090910	567	-2,268	-1,361	5,114	-15,548	9,895	25,442	-6,003	1,221	7,224
20091012	569	-1,639	-1,462	5,127	-13,967	9,348	23,315	-5,274	2,628	7,902
20100524	563	2,915	2,527	5,383	-8,370	16,992	25,362	-0,986	7,411	8,397
20100711	562	0,896	1,636	4,174	-18,409	11,297	29,706	-1,666	3,868	5,534
20100727	562	1,104	1,745	4,463	-13,129	13,259	26,388	-1,832	4,316	6,148
20101116	560	-3,345	-3,139	4,013	-14,385	7,468	21,853	-6,155	-0,704	5,451
20110119	585	-6,517	-6,856	5,960	-25,893	11,232	37,126	-10,628	-2,003	8,625
20110204	563	-6,589	-6,621	4,302	-25,646	4,537	30,182	-9,029	-3,688	5,341
20110409	568	-1,290	-0,766	5,056	-16,764	9,734	26,498	-4,706	2,467	7,173
20110511	562	1,104	1,465	4,198	-9,651	10,459	20,111	-2,048	4,267	6,315
20110628	564	1,018	1,457	4,924	-16,716	13,235	29,951	-1,734	4,370	6,104
20110815	562	-1,704	-1,909	4,155	-11,578	11,377	22,955	-4,743	1,086	5,829
Total	31659	-1,290	-1,130	4,923	-25,893	18,409	44,303	-4,416	2,003	6,420

AV.3.2. Landsat 7

Tabla 63. Banda 4. Escollera 2.

Fecha (aaaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19990714	769	2,363	1,955	3,724	-8,028	17,790	25,817	-0,108	4,574	4,682
19990721	758	0,816	0,471	4,759	-12,398	16,303	28,700	-2,113	3,822	5,934
19990806	751	2,674	2,909	4,368	-8,919	17,322	26,240	-0,067	5,485	5,552
19990916	773	-1,095	-1,564	4,298	-10,666	17,071	27,738	-4,141	1,691	5,832
19991025	771	1,814	1,135	5,304	-8,659	21,638	30,296	-2,029	4,532	6,561
20000122	771	3,189	2,765	4,047	-8,185	15,070	23,255	0,745	5,443	4,698
20000129	774	-0,358	-0,667	4,045	-12,034	13,435	25,469	-2,885	1,676	4,561
20000301	770	0,966	0,286	4,721	-17,138	19,345	36,483	-1,947	2,578	4,525
20000418	766	-0,584	-0,323	3,773	-11,320	13,690	25,010	-2,859	1,758	4,616
20000513	772	7,021	6,280	4,093	-0,753	20,368	21,121	4,283	9,463	5,180
20000605	758	2,832	2,944	3,614	-11,998	11,129	23,128	0,797	5,372	4,575
20000614	757	-0,976	-0,965	3,927	-11,335	9,630	20,965	-3,276	1,292	4,569
20000808	769	0,380	0,155	3,644	-10,223	14,238	24,461	-2,069	2,414	4,483
20000817	626	-0,165	-1,403	6,483	-12,909	21,174	34,083	-4,305	3,180	7,485
20000909	750	1,709	1,918	4,418	-16,566	12,885	29,450	-0,774	4,493	5,268
20001004	774	5,509	4,855	4,226	-4,139	22,222	26,361	2,675	7,780	5,105
20001027	572	-0,115	0,348	4,816	-14,199	12,159	26,358	-3,547	2,989	6,536
20001121	772	3,325	2,968	5,766	-27,317	19,512	46,829	0,489	6,455	5,966
20010108	774	1,288	0,953	5,160	-11,527	20,538	32,065	-1,836	3,939	5,775
20010313	755	1,673	1,671	4,458	-24,676	14,523	39,199	-0,960	4,237	5,196
20010414	768	2,642	2,772	3,054	-6,399	11,819	18,218	0,514	4,760	4,245
20010601	780	4,594	4,458	3,604	-5,629	21,344	26,974	2,389	6,502	4,113
20010608	568	0,945	0,226	6,186	-19,846	18,935	38,782	-3,121	5,273	8,394
20010617	773	2,027	2,123	3,622	-9,329	14,098	23,428	-0,125	4,221	4,345
20010726	771	-1,831	-2,426	4,417	-12,201	14,728	26,928	-4,762	0,824	5,586
20011007	771	2,912	2,116	4,369	-6,118	19,523	25,640	-0,023	5,170	5,192
20011030	755	0,456	0,025	5,402	-13,569	20,230	33,799	-3,060	3,436	6,496
20011108	772	2,766	3,110	5,269	-10,368	22,733	33,101	-0,909	6,245	7,154
20020111	768	3,922	3,446	5,647	-12,155	23,547	35,702	0,325	6,865	6,540
20020219	763	-0,749	-0,351	4,318	-14,925	13,719	28,645	-3,260	1,908	5,168
20020401	772	5,513	5,386	4,278	-7,487	19,287	26,774	3,175	7,693	4,518
20020417	767	3,820	3,573	4,579	-10,309	23,540	33,849	0,808	6,581	5,773
20020424	773	0,958	0,796	4,598	-24,564	17,191	41,755	-1,960	3,632	5,592
20020519	772	3,024	2,831	4,625	-13,160	15,541	28,701	0,374	5,971	5,597
20020526	763	3,401	3,899	4,741	-21,229	19,124	40,353	0,940	6,134	5,193
20020706	732	2,196	2,551	5,808	-23,660	17,477	41,137	-1,003	6,121	7,124
20020729	739	-0,022	-0,449	4,905	-17,226	17,825	35,051	-3,363	2,805	6,169
20020830	760	0,122	-0,466	3,975	-9,280	14,712	23,992	-2,351	1,946	4,297

ANEJO V

20020924	758	1,520	1,416	5,322	-10,475	18,708	29,182	-2,570	4,635	7,206
20021026	756	-0,318	-0,263	4,947	-13,598	17,339	30,937	-3,028	2,292	5,320
20030114	775	3,540	3,853	5,070	-11,098	20,971	32,069	-0,023	6,483	6,506
20030121	748	5,596	4,885	7,111	-18,664	26,329	44,993	1,522	9,669	8,147
20030206	748	4,947	4,471	6,553	-10,986	25,300	36,286	0,688	7,986	7,297
20030310	760	-0,494	-0,435	4,726	-13,102	14,078	27,180	-3,179	1,883	5,062
20030427	751	-1,064	-0,602	4,895	-17,320	10,507	27,826	-3,459	1,927	5,386
20030522	764	-0,425	-0,597	4,549	-13,525	17,885	31,409	-3,357	1,873	5,230
20030529	761	0,837	0,714	4,179	-12,179	14,890	27,069	-1,668	3,371	5,040
Total	35370	1,795	1,577	5,177	-27,317	26,329	53,647	-1,544	4,823	6,367

Tabla 64. Banda 4. Escollera 3.

Fecha (aaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19990714	610	-1,678	-1,810	3,115	-8,624	9,102	17,726	-3,712	0,340	4,052
19990721	601	-3,525	-3,542	4,120	-14,839	7,386	22,226	-5,967	-0,935	5,031
19990806	583	1,250	0,671	4,714	-11,360	12,945	24,306	-2,201	4,585	6,786
19990916	609	-3,378	-3,570	2,785	-10,023	6,057	16,080	-5,478	-1,639	3,839
19991025	587	-2,673	-2,494	2,872	-12,340	5,519	17,859	-4,677	-0,713	3,964
20000122	613	-2,090	-2,038	2,931	-13,888	5,520	19,407	-3,911	0,083	3,994
20000129	587	-5,299	-5,589	2,949	-12,793	7,238	20,031	-7,197	-3,559	3,638
20000301	597	-3,349	-3,298	3,006	-11,151	5,134	16,286	-5,508	-1,351	4,157
20000418	597	-1,949	-1,889	4,065	-11,531	11,905	23,435	-4,645	0,420	5,065
20000513	609	1,985	1,472	3,926	-8,926	14,222	23,147	-0,543	4,193	4,736
20000605	599	0,713	0,734	3,542	-7,929	11,712	19,641	-1,374	2,874	4,248
20000614	607	-1,064	-1,272	4,440	-11,490	15,196	26,686	-4,503	2,282	6,784
20000808	595	-3,393	-3,645	3,530	-12,407	8,674	21,082	-5,882	-1,304	4,578
20000817	610	-5,517	-5,566	3,586	-15,408	3,939	19,347	-7,776	-3,212	4,564
20000909	446	-1,479	-1,703	3,581	-10,707	10,193	20,901	-3,712	0,598	4,310
20001004	607	0,342	0,322	3,025	-8,044	8,598	16,641	-1,978	2,267	4,245
20001027	427	-2,696	-2,820	3,395	-13,046	8,472	21,518	-5,000	-0,547	4,453
20001121	607	-3,052	-3,002	2,645	-13,781	4,716	18,497	-4,616	-1,394	3,222
20010108	613	-3,358	-3,202	3,397	-15,524	6,034	21,559	-5,539	-1,235	4,303
20010313	608	-0,383	-0,452	2,518	-7,499	7,829	15,328	-1,981	1,260	3,241
20010414	602	0,268	0,087	2,886	-8,138	10,754	18,893	-1,735	2,489	4,223
20010601	606	1,131	1,440	3,954	-9,809	11,300	21,109	-1,728	4,005	5,733
20010608	350	-2,406	-2,034	5,198	-17,624	12,835	30,459	-5,832	1,159	6,991
20010617	609	-1,572	-1,245	3,830	-13,518	10,011	23,528	-3,535	0,819	4,354
20010726	602	-5,133	-4,790	3,743	-14,591	5,628	20,220	-7,802	-2,324	5,478
20011007	606	-2,515	-2,305	2,707	-10,717	7,463	18,180	-4,451	-0,705	3,746
20011030	598	-4,205	-4,465	3,094	-14,280	6,395	20,676	-6,082	-2,600	3,482
20011108	604	-0,759	-0,967	3,304	-21,684	8,271	29,955	-2,996	1,575	4,570
20020111	600	-2,429	-2,822	5,164	-14,906	20,647	35,553	-5,261	0,363	5,623
20020219	594	-3,881	-4,255	3,401	-13,032	8,023	21,055	-6,108	-2,016	4,092
20020401	605	-0,667	-0,469	3,401	-13,868	8,014	21,882	-2,714	1,616	4,329
20020417	609	-1,004	-0,970	3,654	-9,846	14,839	24,685	-3,315	1,204	4,519
20020424	597	-4,176	-3,931	3,203	-12,995	4,911	17,906	-6,252	-1,958	4,294
20020519	611	-0,796	-0,512	3,061	-11,268	8,217	19,485	-2,543	1,185	3,728
20020526	601	-1,822	-1,606	3,710	-12,609	9,056	21,665	-3,834	0,484	4,317
20020706	609	1,887	1,515	8,611	-16,740	29,722	46,462	-2,827	5,529	8,356
20020729	597	-3,516	-3,457	3,699	-15,659	11,669	27,328	-5,958	-0,863	5,095
20020830	601	-4,963	-5,127	3,096	-13,478	5,568	19,046	-7,177	-2,793	4,384
20020924	609	-2,015	-2,188	3,602	-14,350	11,481	25,830	-4,488	0,142	4,630
20021026	610	-4,235	-4,059	3,667	-15,275	8,021	23,296	-6,535	-1,732	4,803
20030114	590	-2,958	-2,919	4,387	-16,254	12,899	29,152	-6,247	0,207	6,454

ANEJO V

20030121	553	-6,362	-6,031	3,711	-16,114	2,027	18,141	-8,264	-3,912	4,352
20030206	588	-3,095	-3,720	4,354	-19,754	14,652	34,406	-5,623	-1,111	4,512
20030310	597	-3,070	-3,278	3,137	-10,541	7,323	17,864	-5,239	-0,965	4,274
20030427	599	-3,335	-3,202	3,274	-11,644	9,457	21,101	-5,386	-1,346	4,040
20030522	613	-4,212	-4,180	3,221	-14,427	4,449	18,877	-6,243	-2,137	4,106
20030529	595	-1,881	-1,750	3,844	-15,693	8,636	24,329	-4,363	0,692	5,055
Total	27667	-2,295	-2,396	4,229	-21,684	29,722	51,406	-4,996	0,241	5,237

Tabla 65. Banda 5. Escollera 2.

Fecha (aaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19990714	771	5,734	5,548	4,038	-6,097	23,185	29,283	3,057	8,342	5,285
19990721	745	-0,529	-0,242	3,536	-10,464	8,902	19,366	-2,903	1,986	4,889
19990806	741	1,252	1,207	3,232	-18,630	11,347	29,977	-0,463	3,337	3,799
19990916	771	1,662	1,494	3,588	-7,827	21,926	29,753	-0,455	3,343	3,798
19991025	710	-0,555	-0,384	3,336	-13,065	12,096	25,161	-2,390	1,547	3,937
20000122	764	2,214	2,014	3,518	-6,206	13,434	19,639	-0,124	4,469	4,593
20000129	779	0,070	0,053	3,149	-10,288	13,719	24,006	-1,838	1,946	3,784
20000301	748	-0,499	-0,441	3,971	-18,244	17,468	35,712	-2,588	1,480	4,068
20000418	773	2,486	2,586	3,575	-6,397	16,344	22,741	0,414	4,536	4,122
20000513	750	6,678	6,389	3,919	-10,752	26,438	37,190	4,301	8,928	4,627
20000605	768	2,454	2,790	4,638	-11,846	21,478	33,324	0,070	5,392	5,321
20000614	771	0,867	0,433	3,556	-9,494	10,747	20,241	-1,642	3,431	5,073
20000808	772	0,256	0,270	3,534	-8,365	16,753	25,119	-1,961	2,244	4,205
20000817	623	0,093	-1,172	5,913	-12,460	21,397	33,856	-3,698	3,128	6,827
20000909	688	-1,687	-1,761	3,183	-10,138	9,174	19,312	-3,721	0,502	4,224
20001004	762	3,745	3,541	3,405	-11,773	18,466	30,239	1,931	5,498	3,567
20001027	699	-1,839	-1,730	3,182	-12,953	9,814	22,768	-3,835	0,024	3,859
20001121	776	2,466	2,862	3,462	-14,874	13,902	28,775	0,783	4,612	3,829
20010108	777	1,869	1,784	3,519	-8,770	17,033	25,803	-0,252	4,196	4,448
20010313	772	4,883	5,144	3,448	-7,076	15,617	22,692	2,690	7,113	4,423
20010414	770	6,902	6,629	4,378	-4,365	24,163	28,528	4,221	9,188	4,967
20010601	772	9,008	8,618	4,668	-5,653	28,965	34,618	6,364	11,271	4,907
20010608	740	-0,701	-0,938	4,329	-12,510	17,606	30,116	-3,260	1,650	4,911
20010617	773	6,226	6,091	4,394	-5,125	25,199	30,323	3,584	8,081	4,497
20010726	764	0,169	-0,427	4,313	-10,296	18,808	29,105	-2,278	1,715	3,993
20011007	775	4,015	3,733	3,795	-9,375	22,884	32,259	1,839	5,884	4,045
20011030	670	-2,647	-2,924	4,223	-13,284	18,214	31,498	-5,026	-0,857	4,170
20011108	768	5,669	5,656	3,390	-4,314	18,238	22,552	3,533	7,231	3,697
20020111	772	3,336	2,998	4,582	-7,228	25,489	32,718	0,368	5,579	5,211
20020219	773	-0,559	-0,540	4,075	-15,076	15,667	30,743	-3,168	1,757	4,924
20020401	776	4,652	4,680	3,888	-4,947	15,490	20,437	2,065	7,073	5,008
20020417	771	5,492	5,519	4,059	-7,801	15,989	23,790	3,120	8,234	5,114
20020424	758	0,902	1,528	4,238	-13,162	14,374	27,536	-1,442	3,411	4,853
20020519	763	5,169	5,487	4,340	-17,327	16,313	33,639	2,645	7,942	5,297
20020526	737	0,869	1,268	4,332	-19,236	18,154	37,391	-1,185	3,405	4,590
20020706	774	3,643	3,313	3,923	-8,087	22,677	30,765	1,175	6,176	5,000
20020729	667	-2,168	-1,766	4,047	-21,831	12,678	34,509	-4,484	0,431	4,915
20020830	736	2,658	3,330	4,704	-19,463	20,196	39,658	0,755	4,926	4,171
20020924	731	-1,246	-0,943	4,390	-22,621	12,520	35,140	-3,234	1,518	4,752
20021026	760	-0,564	0,176	5,443	-24,198	16,629	40,827	-3,435	2,835	6,270
20030114	759	0,814	1,069	3,499	-14,034	12,673	26,707	-1,175	2,777	3,952

ANEJO V

20030121	760	-4,412	-4,505	4,443	-20,041	11,799	31,840	-6,845	-1,808	5,037
20030206	758	1,724	1,740	4,573	-24,778	16,598	41,375	-0,536	3,995	4,530
20030310	751	0,010	0,286	4,544	-21,412	15,462	36,874	-2,397	2,589	4,986
20030427	748	-0,344	-0,126	4,928	-17,333	14,450	31,783	-2,989	2,538	5,527
20030522	758	1,774	1,692	4,418	-13,936	14,797	28,733	-1,048	4,536	5,584
20030529	739	3,236	3,892	4,700	-16,865	14,177	31,042	1,115	6,031	4,916
Total	35283	1,876	1,764	4,969	-24,778	28,965	53,742	-1,225	4,909	6,133

Tabla 66. Banda 5. Escollera 3.

Fecha (aaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19990714	607	-0,652	-0,378	3,786	-13,333	8,802	22,135	-2,744	1,555	4,299
19990721	598	-4,526	-4,457	4,106	-13,306	7,733	21,039	-7,654	-1,276	6,379
19990806	600	-1,857	-1,808	3,420	-10,215	7,444	17,659	-4,332	0,393	4,725
19990916	609	-2,816	-2,434	2,974	-16,625	4,487	21,112	-4,371	-1,084	3,287
19991025	596	-3,431	-3,086	3,837	-14,953	5,636	20,589	-5,668	-0,979	4,690
20000122	609	-1,977	-1,479	4,039	-13,336	6,974	20,310	-4,436	0,762	5,198
20000129	595	-4,936	-5,064	3,524	-14,244	4,688	18,932	-7,384	-2,407	4,976
20000301	599	-4,852	-4,575	2,964	-12,652	3,634	16,286	-7,160	-2,609	4,552
20000418	595	-1,704	-1,546	3,452	-10,759	7,609	18,368	-3,999	0,661	4,660
20000513	608	-0,066	-0,197	3,146	-9,723	8,828	18,550	-2,138	2,150	4,288
20000605	598	1,800	1,969	3,706	-8,614	12,401	21,015	-0,799	4,637	5,435
20000614	609	-5,032	-5,063	3,237	-15,742	2,125	17,866	-7,223	-2,787	4,436
20000808	595	-4,323	-4,361	3,685	-12,408	5,429	17,837	-6,946	-1,719	5,227
20000817	612	-5,778	-5,549	3,360	-16,948	1,953	18,901	-7,984	-3,290	4,694
20000909	598	-5,822	-5,599	3,110	-17,750	1,727	19,476	-8,111	-3,394	4,717
20001004	608	-0,839	-0,930	3,174	-13,534	8,748	22,282	-2,700	1,315	4,015
20001027	596	-5,279	-5,488	3,794	-20,343	8,497	28,840	-7,465	-3,349	4,117
20001121	605	-1,749	-1,599	3,203	-12,245	6,882	19,126	-3,783	0,451	4,235
20010108	608	-1,817	-1,540	3,624	-18,807	7,648	26,456	-4,147	0,458	4,605
20010313	607	1,035	1,124	3,195	-9,718	11,397	21,116	-1,036	3,462	4,498
20010414	606	1,239	1,390	3,571	-9,292	10,009	19,301	-1,295	3,652	4,947
20010601	599	1,986	2,005	3,995	-8,565	12,387	20,951	-0,939	5,267	6,206
20010608	599	-0,912	-0,164	4,256	-11,759	9,985	21,745	-3,669	2,045	5,714
20010617	607	-0,103	0,346	4,435	-13,504	9,892	23,397	-3,012	3,067	6,079
20010726	599	-3,784	-3,497	3,813	-14,233	4,631	18,864	-6,434	-1,035	5,400
20011007	606	-1,198	-1,172	3,505	-14,734	7,168	21,902	-3,464	1,628	5,092
20011030	593	-6,639	-6,378	3,386	-17,541	2,032	19,572	-8,487	-4,207	4,280
20011108	606	0,555	0,813	4,028	-13,995	10,154	24,149	-2,163	3,255	5,418
20020111	610	-1,421	-1,087	3,960	-14,424	10,618	25,043	-3,746	1,300	5,046
20020219	598	-4,572	-4,279	3,448	-14,166	7,548	21,715	-6,501	-2,792	3,709
20020401	605	-0,646	-0,378	3,147	-15,176	6,256	21,432	-1,942	1,191	3,133
20020417	609	-0,249	-0,264	3,248	-10,013	8,507	18,520	-2,098	1,818	3,916
20020424	598	-3,226	-2,923	3,377	-13,887	5,897	19,783	-5,516	-0,889	4,627
20020519	608	0,977	0,770	3,081	-8,311	11,152	19,462	-0,898	2,954	3,852
20020526	599	-1,400	-1,291	3,625	-11,642	11,619	23,261	-3,592	1,034	4,626
20020706	607	-1,231	-1,291	3,501	-14,435	8,447	22,881	-3,108	0,878	3,985
20020729	599	-3,333	-3,237	3,661	-14,677	9,258	23,935	-5,263	-0,985	4,278
20020830	597	-3,515	-3,443	3,174	-14,647	4,756	19,403	-5,305	-1,456	3,849
20020924	613	-4,697	-4,432	3,091	-15,417	4,323	19,739	-6,392	-2,811	3,580
20021026	609	-2,756	-1,588	4,774	-17,334	10,593	27,927	-5,186	0,328	5,515
20030114	605	-2,806	-2,793	3,720	-11,562	8,723	20,284	-5,408	-0,435	4,973

ANEJO V

20030121	595	-8,650	-8,718	3,696	-18,662	2,013	20,674	-11,135	-6,344	4,791
20030206	595	-2,825	-2,423	4,048	-13,427	8,349	21,776	-5,300	-0,227	5,073
20030310	594	-3,165	-3,126	3,092	-12,228	5,182	17,410	-5,225	-1,406	3,819
20030427	598	-2,952	-2,989	3,767	-11,894	8,488	20,381	-5,250	-0,576	4,674
20030522	608	-1,465	-1,140	3,593	-11,700	8,447	20,147	-3,651	0,927	4,578
20030529	591	1,189	1,405	4,361	-10,013	11,719	21,731	-2,076	4,689	6,765
Total	28305	-2,338	-2,169	4,310	-20,343	12,401	32,744	-5,086	0,525	5,611

Tabla 67. Banda 7. Escollera 2.

Fecha (aaaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19990714	769	5,560	5,664	4,069	-9,328	24,216	33,543	3,109	8,228	5,119
19990721	759	-1,005	-0,833	4,406	-22,615	12,440	35,055	-3,200	1,971	5,171
19990806	695	-0,310	-0,038	4,627	-33,811	13,735	47,546	-2,937	2,515	5,452
19990916	780	1,017	1,454	4,092	-11,708	13,668	25,376	-1,286	3,570	4,856
19991025	780	-1,710	-1,247	3,940	-17,578	7,596	25,174	-4,236	1,164	5,400
20000122	778	1,324	1,148	3,571	-8,206	13,974	22,180	-0,986	3,590	4,576
20000129	777	0,179	0,099	3,749	-12,956	18,512	31,468	-1,962	2,121	4,083
20000301	767	-0,910	-0,618	4,140	-15,951	17,032	32,984	-3,221	1,491	4,712
20000418	778	1,717	1,884	4,093	-10,779	19,840	30,619	-0,416	4,241	4,657
20000513	774	5,349	5,332	4,485	-6,319	26,685	33,004	2,414	8,011	5,597
20000605	709	2,431	3,193	4,756	-14,112	15,304	29,416	-0,074	5,374	5,449
20000614	765	1,096	0,877	3,928	-10,294	15,081	25,375	-1,353	3,067	4,420
20000808	762	-1,253	-1,106	4,324	-13,646	15,912	29,558	-4,131	1,450	5,581
20000817	615	0,280	-0,431	6,746	-22,574	20,517	43,091	-3,394	3,776	7,170
20000909	727	-2,983	-2,775	3,625	-14,259	9,960	24,219	-5,448	-0,472	4,976
20001004	774	1,813	2,039	4,141	-8,635	20,574	29,209	-0,536	4,088	4,625
20001027	756	-3,380	-3,146	3,824	-17,334	9,199	26,533	-5,533	-0,915	4,618
20001121	770	1,547	2,366	3,916	-11,990	11,685	23,675	-0,764	4,208	4,973
20010108	774	1,742	1,877	4,066	-10,773	19,977	30,750	-0,552	4,383	4,935
20010313	772	4,795	5,326	3,663	-6,667	16,050	22,717	2,303	7,340	5,037
20010414	770	6,770	6,487	4,519	-4,235	19,842	24,076	3,926	9,579	5,653
20010601	752	9,834	9,898	4,940	-14,972	24,566	39,538	6,951	12,475	5,524
20010608	687	-0,110	0,332	5,596	-15,740	19,062	34,802	-3,056	2,927	5,983
20010617	752	6,467	6,279	5,077	-8,217	28,647	36,863	3,497	8,848	5,351
20010726	759	0,468	-0,059	4,825	-13,568	19,810	33,378	-2,325	2,672	4,997
20011007	769	4,474	4,053	4,654	-8,876	25,185	34,061	1,678	6,664	4,986
20011030	662	-3,828	-3,934	4,793	-17,104	18,382	35,486	-6,690	-1,687	5,002
20011108	778	5,488	5,440	3,615	-3,855	18,396	22,251	3,339	7,642	4,303
20020111	775	3,330	2,850	4,340	-6,429	22,245	28,674	0,838	5,150	4,312
20020219	774	0,123	0,074	4,266	-14,180	16,123	30,303	-2,343	2,358	4,701
20020401	765	4,491	4,671	4,501	-10,842	22,013	32,855	1,929	6,958	5,029
20020417	759	5,859	6,028	4,294	-8,241	17,584	25,825	3,363	8,562	5,199
20020424	742	0,450	1,342	5,647	-20,729	13,014	33,743	-1,758	4,081	5,840
20020519	743	5,305	5,918	4,811	-9,475	21,184	30,659	2,395	8,340	5,945
20020526	723	-0,238	0,456	5,382	-17,928	12,262	30,190	-2,612	3,300	5,912
20020706	761	2,954	3,051	4,202	-10,473	16,684	27,157	0,570	5,108	4,539
20020729	675	-3,320	-2,390	5,005	-25,045	10,154	35,200	-6,422	0,033	6,456
20020830	738	3,153	3,698	5,309	-22,278	17,990	40,268	0,709	6,234	5,525
20020924	716	-1,608	-0,995	5,355	-29,992	14,204	44,196	-4,039	1,367	5,406
20021026	752	-0,882	-0,165	5,705	-28,759	19,322	48,081	-3,256	2,170	5,426
20030114	754	0,288	0,630	4,626	-30,896	12,616	43,512	-2,304	2,952	5,256

ANEJO V

20030121	737	-5,218	-4,942	4,479	-25,618	9,499	35,117	-7,478	-2,810	4,669
20030206	751	-0,091	0,443	5,430	-28,780	15,727	44,506	-2,389	2,991	5,379
20030310	743	0,524	1,118	5,244	-24,631	14,779	39,409	-1,441	3,464	4,906
20030427	753	-0,946	-0,918	5,251	-20,398	12,186	32,584	-3,290	2,428	5,718
20030522	726	2,218	1,997	4,919	-10,978	16,321	27,299	-1,065	5,403	6,468
20030529	699	4,249	4,271	4,756	-15,906	20,399	36,305	2,228	7,311	5,082
Total	35096	1,484	1,524	5,572	-33,811	28,647	62,457	-1,872	4,885	6,757

Tabla 68. Banda 7. Escollera 3.

Fecha (aaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
19990714	605	1,212	1,250	3,550	-13,058	10,383	23,442	-0,988	3,655	4,643
19990721	593	-3,664	-3,737	4,386	-13,639	8,934	22,574	-7,025	-0,558	6,468
19990806	596	-1,953	-1,895	3,689	-12,888	6,796	19,684	-4,631	0,382	5,013
19990916	606	-2,512	-2,384	2,911	-17,054	3,698	20,752	-4,155	-0,616	3,539
19991025	595	-2,790	-2,508	3,823	-14,881	5,568	20,449	-5,076	-0,319	4,756
20000122	606	-1,915	-1,861	3,858	-15,526	8,184	23,710	-4,120	0,550	4,670
20000129	599	-3,659	-3,975	3,833	-13,262	6,151	19,412	-6,443	-0,941	5,503
20000301	592	-4,514	-4,269	3,113	-12,385	3,267	15,652	-6,620	-2,177	4,443
20000418	596	-1,212	-1,474	3,955	-10,710	9,670	20,380	-3,982	1,101	5,083
20000513	606	-0,098	-0,107	3,505	-10,896	8,120	19,016	-2,531	2,407	4,937
20000605	595	0,280	0,546	4,172	-14,458	10,540	24,998	-2,444	3,218	5,662
20000614	605	-3,831	-3,829	3,266	-12,221	4,458	16,679	-6,211	-1,549	4,662
20000808	597	-3,526	-3,386	4,278	-16,455	6,611	23,066	-6,547	-0,257	6,291
20000817	611	-5,457	-5,141	3,428	-16,302	3,094	19,396	-7,741	-2,913	4,828
20000909	598	-5,972	-6,014	3,313	-13,628	2,547	16,174	-8,180	-3,300	4,880
20001004	609	-1,326	-1,023	3,410	-13,167	8,326	21,493	-3,256	0,902	4,157
20001027	585	-4,482	-4,647	3,809	-20,127	11,057	31,184	-6,863	-2,324	4,539
20001121	604	0,036	0,487	3,667	-14,136	8,794	22,930	-2,363	2,393	4,756
20010108	606	0,051	0,255	3,894	-18,696	10,819	29,514	-2,071	2,317	4,388
20010313	604	1,553	1,546	4,070	-10,493	13,461	23,953	-1,202	4,565	5,767
20010414	607	0,675	0,647	3,503	-9,115	9,356	18,472	-1,949	3,331	5,280
20010601	607	3,713	3,439	3,407	-4,858	13,970	18,829	1,391	6,239	4,848
20010608	598	-0,183	0,463	4,507	-12,225	8,364	20,588	-3,351	3,147	6,499
20010617	605	0,906	1,297	4,204	-11,011	11,621	22,632	-2,030	3,937	5,967
20010726	597	-3,115	-2,976	3,946	-14,920	6,790	21,710	-5,831	-0,322	5,509
20011007	606	-1,059	-1,303	3,820	-12,761	7,588	20,349	-3,752	1,859	5,611
20011030	601	-6,288	-5,995	3,799	-18,408	2,865	21,273	-8,764	-3,747	5,016
20011108	604	1,971	2,052	3,697	-13,775	11,424	25,199	-0,832	4,673	5,505
20020111	605	-0,946	-1,082	3,752	-11,218	12,121	23,339	-3,062	1,566	4,629
20020219	599	-3,463	-3,350	2,998	-12,059	5,862	17,922	-4,990	-1,588	3,402
20020401	605	-1,004	-0,748	2,779	-15,185	8,415	23,600	-2,280	0,609	2,890
20020417	606	0,002	0,272	2,849	-8,713	7,933	16,646	-1,468	1,708	3,176
20020424	596	-2,647	-2,557	3,586	-14,647	7,787	22,434	-4,655	-0,315	4,340
20020519	609	1,823	1,938	3,174	-10,135	11,475	21,610	-0,019	3,688	3,707
20020526	596	-0,795	-0,470	3,887	-12,293	13,281	25,574	-3,370	1,822	5,192
20020706	608	-0,533	-0,789	3,627	-13,423	11,136	24,559	-2,886	2,206	5,093
20020729	595	-3,667	-3,541	3,948	-15,526	8,587	24,112	-6,011	-1,071	4,940
20020830	595	-2,542	-2,389	3,697	-12,572	7,429	20,001	-4,695	-0,086	4,609
20020924	613	-4,539	-4,189	3,081	-15,708	4,918	20,627	-6,266	-2,676	3,590
20021026	606	-2,770	-2,123	4,390	-16,730	9,021	25,751	-5,462	0,036	5,498
20030114	606	-2,605	-2,648	3,886	-12,270	12,329	24,600	-4,890	0,320	5,210

ANEJO V

20030121	596	-8,514	-8,177	4,255	-22,611	7,476	30,087	-11,346	-5,627	5,719
20030206	597	-4,083	-3,872	4,200	-17,717	6,430	24,148	-6,926	-1,059	5,867
20030310	597	-2,366	-2,364	3,270	-13,489	7,524	21,013	-4,281	-0,318	3,964
20030427	593	-2,037	-2,043	3,717	-12,854	10,219	23,073	-4,240	0,542	4,782
20030522	606	-0,886	-0,935	3,963	-11,770	10,383	22,153	-3,364	1,990	5,354
20030529	590	1,740	1,932	4,849	-9,941	13,542	23,483	-1,762	5,342	7,104
Total	28251	-1,843	-1,779	4,465	-22,611	13,970	36,581	-4,695	1,203	5,898

AV.3.3. Landsat 8

Tabla 69. Banda 5. Escollera 2.

Fecha (aaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
20130414	743	-1,167	-1,064	4,886	-16,128	11,784	27,912	-3,753	2,102	5,855
20130423	747	-0,960	-0,690	4,083	-12,157	10,434	22,591	-3,102	1,604	4,706
20130430	728	4,479	4,286	5,937	-10,181	22,589	32,770	0,345	8,055	7,710
20130516	745	-3,453	-2,954	5,374	-19,863	8,730	28,592	-6,150	-0,092	6,058
20130525	743	-0,913	-0,621	4,445	-13,451	13,361	26,811	-2,862	1,508	4,370
20130601	743	-1,629	-1,205	4,882	-14,024	12,419	26,443	-4,286	0,966	5,251
20130610	745	-1,252	-0,881	4,322	-13,297	13,260	26,557	-3,323	1,184	4,507
20130617	744	0,455	0,744	5,321	-12,579	18,496	31,075	-2,152	3,507	5,659
20130626	743	0,285	0,439	4,207	-11,885	14,350	26,235	-1,986	2,687	4,672
20130703	747	-1,107	-0,827	4,792	-12,956	11,612	24,569	-3,690	1,923	5,613
Total	7428	-0,538	-0,479	5,225	-19,863	22,589	42,451	-3,242	2,363	5,606

Tabla 70. Banda 5. Escollera 3.

Fecha (aaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
20130414	559	-0,995	-0,884	3,849	-13,357	10,791	24,148	-2,897	1,646	4,543
20130423	567	0,778	0,874	2,903	-6,952	7,435	14,386	-1,250	2,890	4,141
20130430	550	1,448	1,269	4,138	-10,047	14,760	24,806	-1,074	3,842	4,915
20130516	559	-2,091	-1,789	3,802	-14,970	5,803	20,773	-4,261	0,533	4,793
20130525	565	1,293	1,151	3,263	-7,761	11,375	19,135	-0,865	3,795	4,659
20130601	560	-0,090	-0,181	3,501	-10,888	10,503	21,392	-2,427	2,084	4,510
20130610	566	0,908	0,666	3,258	-7,182	9,399	16,580	-1,353	3,382	4,735
20130617	561	1,804	1,971	4,058	-10,514	11,141	21,655	-0,659	4,444	5,103
20130626	570	2,723	2,535	3,385	-5,097	13,638	18,736	0,415	4,937	4,521
20130703	559	1,296	1,220	3,700	-14,324	9,934	24,258	-1,210	4,083	5,293
Total	5616	0,711	0,735	3,840	-14,970	14,760	29,730	-1,674	3,227	4,902

Tabla 71. Banda 6. Escollera 2.

Fecha (aaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
20130414	755	0,284	1,067	4,787	-13,474	11,994	25,468	-2,847	3,684	6,531
20130423	743	-1,196	-0,627	4,595	-15,714	7,243	22,957	-3,921	2,216	6,137
20130430	761	-1,006	-0,152	5,225	-15,753	12,568	28,321	-4,598	3,095	7,693
20130516	740	-2,384	-1,239	5,995	-22,590	8,631	31,221	-6,177	2,000	8,177
20130525	743	-0,413	0,371	5,154	-14,889	9,814	24,702	-3,019	3,373	6,392
20130601	739	0,695	1,922	6,336	-20,196	14,544	34,739	-2,134	5,030	7,165
20130610	743	-0,345	0,641	5,014	-15,171	9,774	24,945	-2,458	3,168	5,627
20130617	732	-0,992	-0,103	6,258	-18,159	11,033	29,191	-5,474	3,894	9,368
20130626	741	-1,455	-0,503	4,896	-14,379	8,844	23,223	-4,213	2,186	6,399
20130703	719	-1,173	-0,108	6,033	-21,049	14,620	35,668	-4,878	3,348	8,226
Total	7416	-0,796	0,111	5,521	-22,590	14,620	37,210	-3,946	3,186	7,132

Tabla 72. Banda 6. Escollera 3.

Fecha (aaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
20130414	549	2,566	2,110	3,629	-12,159	16,670	28,829	0,126	5,056	4,930
20130423	565	0,361	0,492	2,880	-7,209	8,129	15,338	-1,596	2,257	3,853
20130430	554	-0,142	-0,314	3,275	-8,530	9,002	17,532	-2,450	2,163	4,613
20130516	554	0,912	1,260	3,490	-9,403	8,939	18,342	-1,497	3,515	5,012
20130525	563	1,454	1,365	3,043	-7,338	9,989	17,327	-0,507	3,423	3,930
20130601	552	1,707	1,684	3,157	-5,682	11,019	16,700	-0,563	3,924	4,487
20130610	566	1,273	1,333	3,071	-8,508	10,047	18,555	-0,559	3,081	3,640
20130617	551	1,297	1,394	3,439	-7,977	10,975	18,951	-0,952	3,800	4,752
20130626	567	-0,259	-0,185	3,031	-9,586	7,568	17,153	-2,560	2,242	4,801
20130703	556	1,465	1,371	3,400	-7,557	10,065	17,622	-0,712	3,484	4,196
Total	5577	1,058	1,085	3,348	-12,159	16,670	28,829	-1,140	3,227	4,367

Tabla 73. Banda 7. Escollera 2.

Fecha (aaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
20130414	757	0,531	1,355	5,303	-17,455	12,831	30,286	-2,761	4,285	7,046
20130423	746	-1,350	-0,644	5,150	-18,899	10,971	29,870	-4,541	2,298	6,839
20130430	757	-1,477	-0,792	5,334	-18,853	11,628	30,481	-4,930	2,654	7,584
20130516	702	-2,146	-1,412	6,234	-26,985	10,637	37,622	-6,416	2,863	9,279
20130525	738	-0,393	0,698	5,755	-17,340	13,784	31,123	-3,217	3,851	7,068
20130601	701	1,662	3,058	6,365	-25,673	16,487	42,160	-1,298	5,862	7,160
20130610	746	-0,143	0,805	5,624	-16,994	12,623	29,617	-2,995	3,912	6,907
20130617	729	-1,187	-0,750	6,894	-27,266	13,381	40,647	-5,228	3,957	9,186
20130626	741	-0,953	0,257	5,783	-19,239	11,604	30,843	-4,211	3,061	7,272
20130703	701	-1,090	0,087	6,510	-24,553	16,048	40,601	-5,372	3,389	8,761
Total	7318	-0,656	0,310	5,996	-27,266	16,487	43,753	-4,261	3,639	7,900

Tabla 74. Banda 7. Escollera 3.

Fecha (aaaammdd)	Recuento	Media (m)	Mediana (m)	Desviación Estándar (m)	Mínimo (m)	Máximo (m)	Rango (m)	Cuartil Inferior (m)	Cuartil Superior (m)	Rango Intercuartil. (m)
20130414	542	3,143	2,859	3,910	-10,931	17,202	28,134	0,639	5,439	4,801
20130423	566	0,038	0,034	3,101	-7,731	8,465	16,196	-1,945	2,175	4,120
20130430	550	-0,800	-0,932	3,687	-9,247	10,139	19,386	-3,414	1,581	4,996
20130516	548	0,405	0,457	3,767	-9,419	10,167	19,585	-2,312	3,185	5,497
20130525	564	1,280	1,198	3,267	-7,934	9,455	17,389	-0,846	3,392	4,238
20130601	549	1,662	1,667	3,464	-6,583	10,838	17,421	-1,245	3,993	5,237
20130610	563	1,295	1,379	3,203	-8,535	9,890	18,425	-0,597	3,416	4,013
20130617	550	0,965	0,938	3,748	-8,281	10,371	18,652	-1,762	3,587	5,349
20130626	566	-0,188	-0,092	3,268	-9,692	7,555	17,247	-2,540	2,380	4,920
20130703	544	0,926	1,001	3,823	-9,306	10,264	19,570	-1,570	3,487	5,056
Total	5542	0,866	0,888	3,679	-10,931	17,202	28,134	-1,672	3,323	4,995

Anejo VI

DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE LA LÍNEA DE COSTA CON PRECISIÓN SUB-PÍXEL EN IMÁGENES LANDSAT 7 CON ERROR SLC-OFF

AVI.1. Introducción

Las playas son uno de los medios naturales más dinámicos y cambiantes y, al mismo tiempo, con mayor atractivo social y económico. Para su correcta gestión (DGC, 2008) es necesario caracterizar su evolución, lo que pasa por recopilar información a lo largo de un cierto periodo de tiempo, con frecuencia de registros y precisión adecuadas. Por ello, las series de imágenes Landsat 5 y 7 son potencialmente útiles, máxime desde que el USGS (United States Geological Survey) ha puesto su amplio archivo a disposición de cualquier usuario.

A pesar de que el uso de estas imágenes queda restringido debido a su resolución espacial media (Gens, 2010), las recientes aportaciones de Pardo-Pascual et al. (2012) permiten detectar la posición de la línea de de costa con aproximadamente 5 m de Error Medio Cuadrático (EMC) y abren el uso potencial de las imágenes Landsat para este tipo de estudios. El uso combinado de datos de la serie 5 y 7 permite densificar temporalmente los registros, mejorando sustancialmente la capacidad analítica de la dinámica de los espacios de playa.

Desde el 31 de mayo de 2003, Landsat 7 produce imágenes con bandeo debido al fallo del sistema de corrección de la oblicuidad del barrido (alternando franjas con y sin dato), limitando así su uso. El presente trabajo establece una solución metodológica que permite deducir la línea de costa de las franjas tomadas correctamente. De confirmar que la precisión se equipara a la obtenida a partir de Landsat 5 y Landsat 7 antes del fallo del sistema de adquisición, la serie de datos permitiría incrementar la frecuencia temporal de las líneas, aspecto crucial para la monitorización de la dinámica de las playas.

AVI.2. Zona de evaluación y datos

La zona de evaluación se encuentra al sur de Castellón, en el término de Borriana y consta de dos segmentos de escolleras (Figura 119).

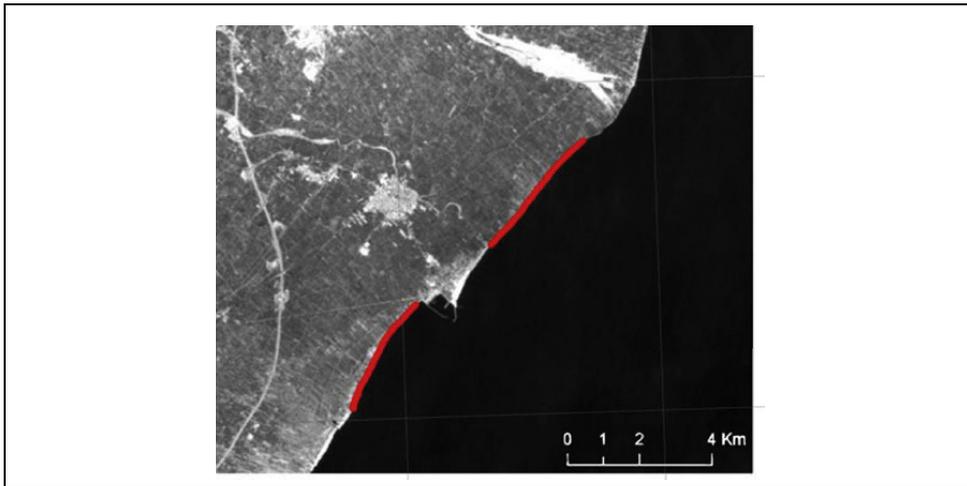


Figura 119. Zona de estudio.

La imagen de referencia sobre la que se fotointerpretó la línea de referencia y utilizada para la georreferenciación es una ortofotografía de la zona, de 0,5m/píxel de resolución obtenida en el marco del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Para hacer la evaluación han sido procesadas las líneas de 25 imágenes Landsat adquiridas entre los años 2003 y 2009. Todas ellas han sido tomadas de los archivos del USGS y están clasificadas como LT1 (NASA, 2006).

AVI.3. Metodología

La metodología del proceso de extracción automática de la línea de costa se encuentra descrita en Pardo-Pascual et al. (2012). Aquí se presenta de forma resumida. Se compone de cuatro pasos fundamentales:

- 1- Extracción de la línea de costa en cada imagen.
- 2- Registro sub-píxel con respecto a la imagen de referencia.
- 3- Corrección de la línea por radiometría.
- 4- Evaluación.

AVI.3.1. Extracción de la línea de costa

El algoritmo comienza con la definición de una línea aproximada (con precisión de un píxel) mediante la umbralización automática del histograma de la banda infrarroja en la que las distribuciones de tierra y mar se distinguen con claridad –en nuestro caso la banda 5.

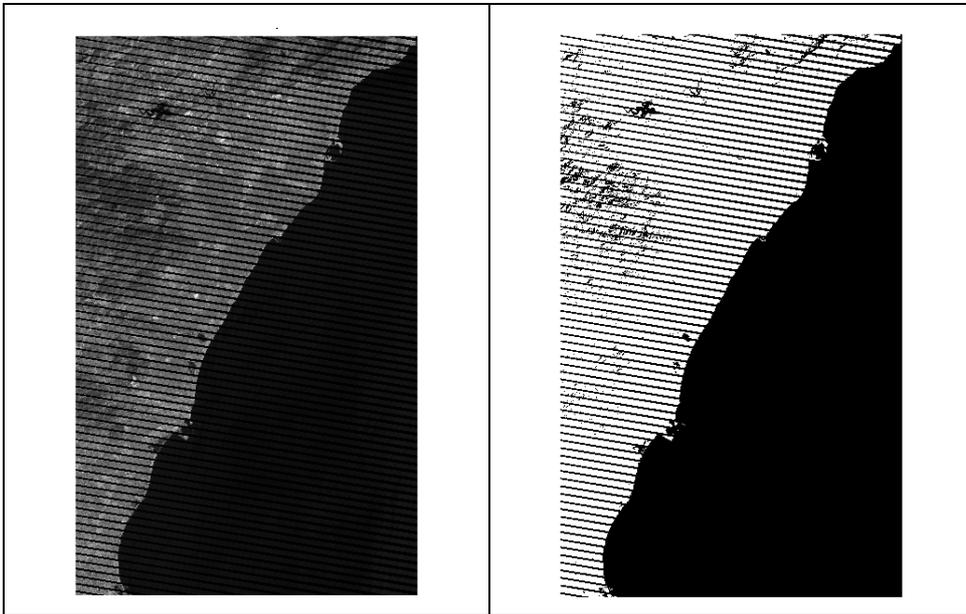


Figura 120. Landsat7 ETM+ binarizada.

Como se puede observar en la Figura 120, la binarización no es perfecta y suelen aparecer errores por exceso y defecto: zonas de sombra en tierra se confundirán con el mar y ciertas embarcaciones o nubes se confundirán como tierra en la zona marina. Estas pequeñas áreas se eliminan mediante filtrado morfológico. En el caso de imágenes defectuosas, las zonas de barrido vacío y las adyacentes requieren un filtrado específico.

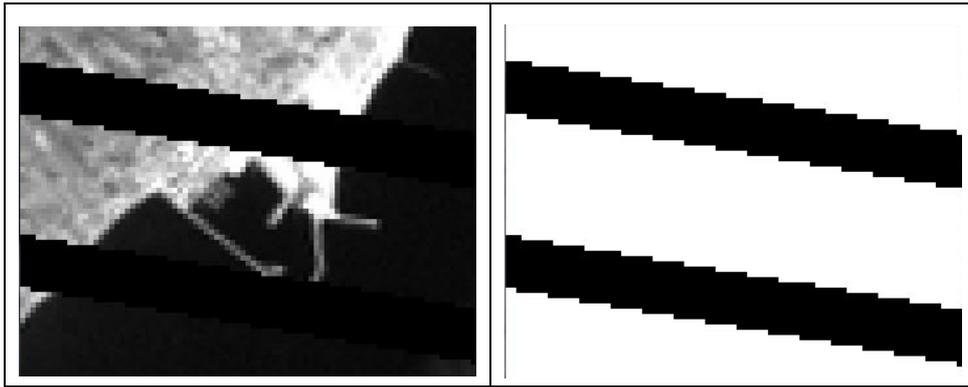


Figura 121. Detalle de Landsat7 ETM+, y máscara asociada.

Las imágenes Landsat 7 ETM+ con error de bandeo suelen incorporar una máscara (Figura 121), que indica qué píxeles contienen dato real. Si bien en Pardo et, al. (2012) se plantea que la línea de costa aproximada es la que queda alrededor de la umbralización, en este caso es necesario combinar la umbralización (Figura 120) y la máscara (Figura 121).

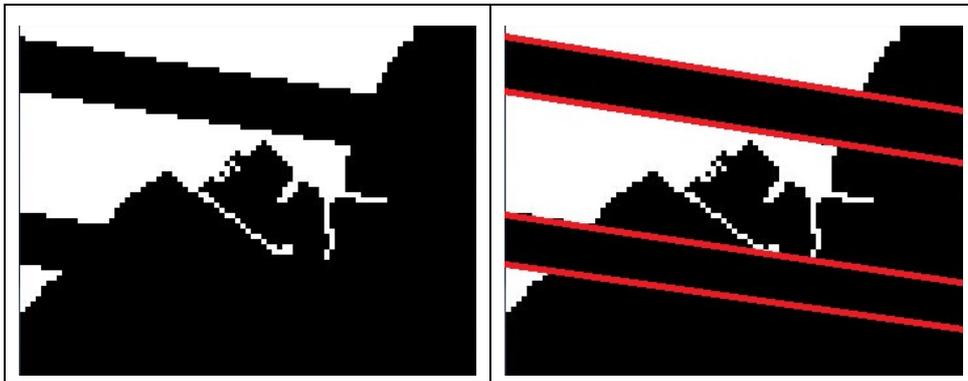


Figura 122. Landsat7 ETM+ umbralizada y bordes de precaución.

Una vez combinadas la umbralización y la máscara, la línea de píxeles de borde puede ser considerada como línea de costa aproximada, siempre y cuando no coincida con el borde de la máscara (las líneas rojas de la figura 4 serían borde pero no costa).

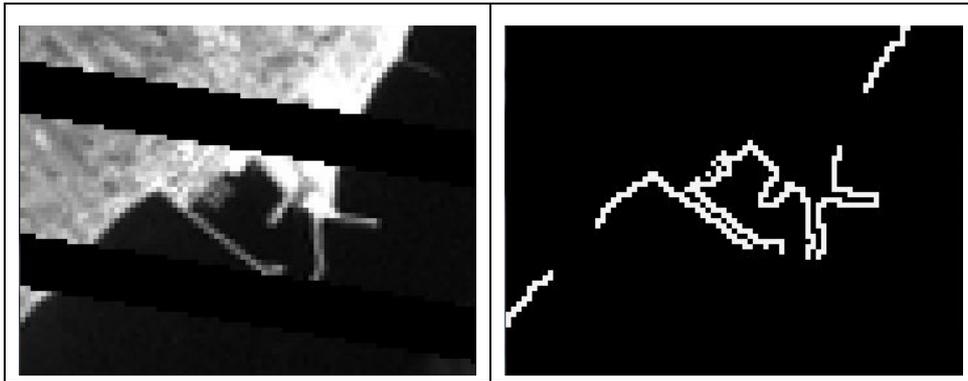


Figura 123. Landsat7 ETM+, y línea aproximada.

Una vez se dispone de una línea de la costa aproximada (a nivel píxel) (Figura 123) se procede a buscar sobre ella la posición a nivel sub-píxel modelando matemáticamente el vecindario que envuelve esta línea. Cada vecindario –de 7 x 7 píxeles- alrededor de cada píxel de la línea preliminar es ajustado mediante mínimos cuadrados a una función de orden 5, $z = f(x, y)$ (Figura 124). Para evitar que la función modele un extremo de fragmento de línea, se toma una distancia de precaución de 3 píxeles desde las zonas sin dato.

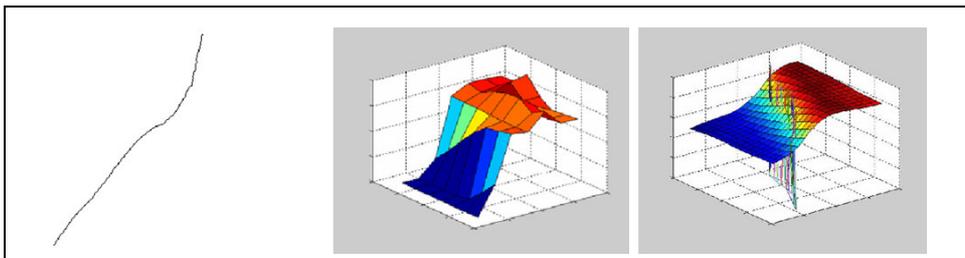


Figura 124. Modelización matemática del vecindario.

Sobre esta función se calcula la línea de máximo gradiente, esto es, aquella que haga cero su derivada segunda (ecuación (82)).

$$f(x, y) \rightarrow \nabla f(x, y) = \frac{\delta^2 f}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 f}{\delta y^2} = 0 \quad (82)$$

Dado que cada píxel es tratado en varios vecindarios, existen varias soluciones dentro de cada píxel, siendo el promedio de tales soluciones la línea de costa sub-píxel definitiva.

AVI.3.2. Georreferenciación sub-píxel

En este paso se realiza la georreferenciación de forma automática y sin puntos de control. Las imágenes Landsat están georreferenciadas por el USGS mediante puntos de control con una desviación, a priori, de 0,44 píxeles (13 m). Este error es significativo si las líneas de diversas imágenes han de ser comparadas. El método empleado se basa en la correlación cruzada (CC) que tiene su fundamento en la más que conocida correlación de Pearson. Este estadístico compara la semejanza en el comportamiento de 2 series (A y B) como indica la ecuación (83):

$$\rho_{AB} = \frac{S_{AB}}{\sigma_A \cdot \sigma_B} \quad (83)$$

Si A y B son dos vectores de datos de iguales dimensiones, la CC tiene por resultado un vector de su mismo tamaño en que cada elemento contiene la correlación de Pearson cuando una de las series se desplaza respecto de la otra. Según esta lógica, allí dónde se alcance un máximo de correlación, se tendrá la posición en que ambas series solapan mejor entre sí.

Es posible demostrar que este procedimiento se puede realizar de forma directa en el espectro de frecuencias relacionando las transformadas de Fourier de ambas series según la ecuación (84):

$$\rho_{AB}(c) = FT^{-1}(FT\{A\} \cdot FT^*\{B\}) \quad (84)$$

donde FT es la transformada de Fourier, FT^{-1} la transformada inversa y FT^* la conjugada. Extendiendo este concepto a las 2 dimensiones de una imagen, es posible obtener una matriz de CC, donde la posición del máximo de correlación indica la traslación que relaciona ambas imágenes.

Hasta aquí, este procedimiento sólo permite trabajar con precisión a nivel de píxel. De entre los métodos que buscan una localización sub-píxel del máximo de correlación se ha empleado el single-step-FFT propuesto por Guizar-Sicairos et al. (2008), también conocido como Local Upsampling Fourier Transform (Wang et al., 2011). El resultado es una ampliación local del máximo de correlación de la matriz de CC original. Dependiendo del factor con que se amplíe se obtendrá mayor precisión: si se amplía al doble de tamaño original, se obtiene 0,5 píxeles de resolución, si se amplía 4 veces la resolución será de 0,25 píxeles y así sucesivamente. Los ensayos realizados nos indican, sin embargo, que no es posible mejorar la precisión más allá de la décima de píxel, pero con esta resolución se puede llegar a niveles de precisión en georreferenciación de imágenes Landsat mejores a los 3 m.

Como resultado de aplicar la CC se obtienen dos valores que indican la traslación que separa la imagen Landsat frente a la imagen de referencia. Esta traslación se aplica a las coordenadas de las líneas correspondientes a cada imagen Landsat. Trabajando de esta

manera se evita una interpolación añadida de la imagen Landsat, como ocurriría si ésta hubiera sido georreferenciada antes de realizar la extracción de la línea.

AVI.3.3. Corrección de la línea por radiometría

Al realizar la modelización matemática alrededor de la línea inicial, las diferencias de reflectancia de la superficie adyacente a la propia línea afectan a la superficie modelizada y, por tanto, se dan pequeños desplazamientos de la línea sub-píxel. Esta dependencia entre el desplazamiento erróneo y la reflectancia ha sido modelizada y es posible corregirla en buena medida.

AVI.3.4. evaluación

Para la evaluación de los resultados se han tomado zonas de escollera, cuyas líneas de costa se consideran fijas en el periodo de estudio. La comparación de las líneas obtenidas a partir de imágenes Landsat y la línea de referencia trazada manualmente en la ortoimagen de referencia (0,5 m), permite evaluar los errores cometidos. Así, desde cada punto de la línea estimada se calcula la distancia mínima a la línea de referencia teniendo en cuenta la orientación de la propia línea de costa. Si el error es positivo, indica un desvío hacia tierra, y negativo hacia el mar. A partir de estos desplazamientos se obtienen el **error medio**, que da idea de la magnitud y del sentido del sesgo en la extracción de la línea, y el **EMC** respecto a la línea de referencia, indicando la magnitud de la variabilidad respecto a la referencia.

Esta evaluación se realiza 3 veces por cada imagen Landsat: **(1)** para la línea sub-píxel directa de la extracción, **(2)** tras ser georreferenciada, **(3)** tras la corrección por radiometría.

AVI.4. Resultados

Las 25 imágenes se han distribuido en dos grupos de procesos, según si la imagen fue tomada con alta o baja ganancia. En ambos casos se aplica diferente corrección radiométrica en el tercer paso.

En la Figura 125 se muestra el error medio, diferenciándose el error que se apreciaría sin corrección ninguna (línea original), aplicando la georreferenciación (línea georreferenciada.) o incluyendo también la transformación radiométrica (línea corregida).

Se puede observar cómo las líneas originales presentan errores groseros (oscilan entre -19,54 y 1,8 m) y marcan un sesgo dominante hacia valores negativos (hacia el mar).

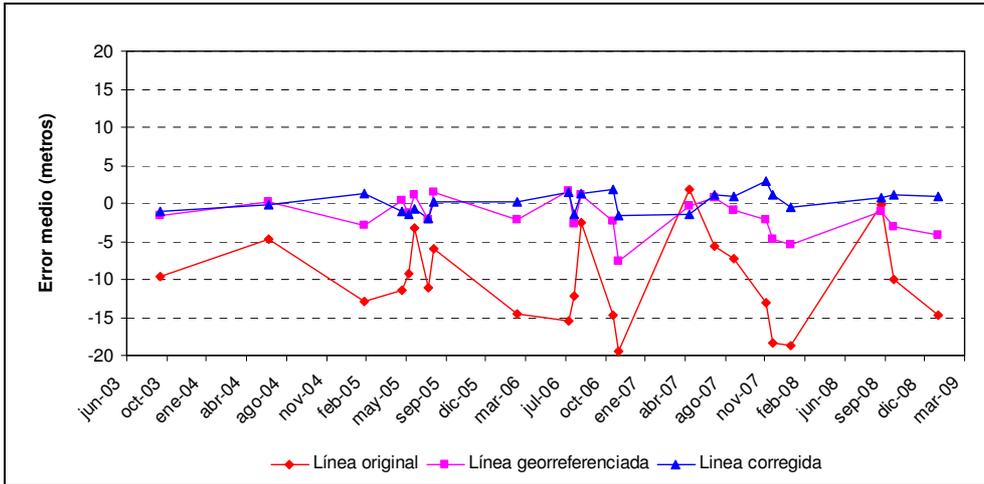


Figura 125. Errores medios (en metros).

Todo ello se corrige en gran medida tras la georreferenciación, lo que evidencia la importancia de dicho proceso. Tras este paso, el error medio oscila entre -7,6 y 1,56 m, con un leve sesgo hacia el mar. Finalmente, si se aplica la corrección por radiometría también se reconoce una mejora, si bien no tan significativa como en el paso anterior. Ahora el rango del error medio se sitúa entre -1,96 y 2,9 m, no apreciándose un sesgo claro en ningún sentido.

Otra medida clave para reconocer la utilidad del resultado obtenido es el error medio cuadrático (Figura 126). Los líneas originales tienen unas desviaciones típicas entre 2,9 y 6,2 m, pero al verse afectadas por el sesgo descrito anteriormente, su error medio cuadrático queda entre 3,6 y 20,5 m, lo que las hace inutilizables a efectos prácticos para análisis de evolución de playas.

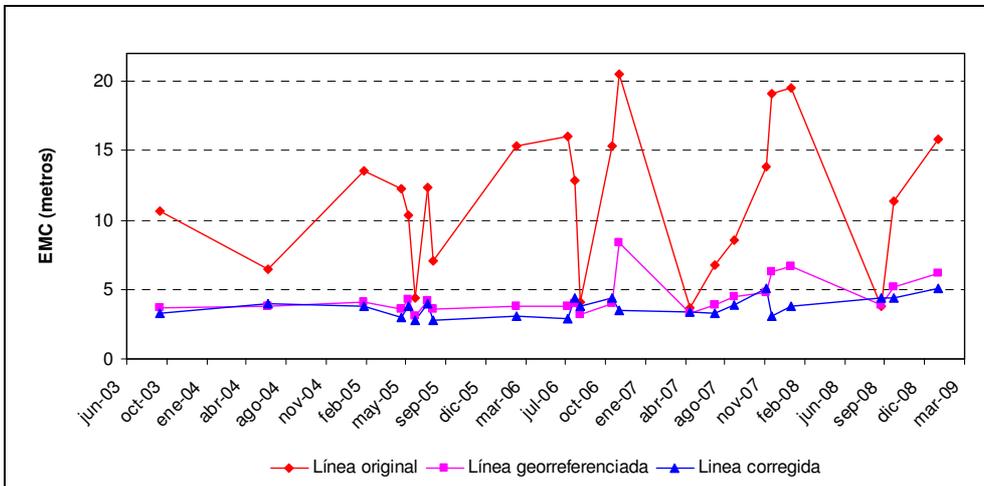


Figura 126. Errores Medios Cuadráticos (en metros).

Tras aplicarle la corrección por la georreferenciación sub-píxel el EMC se sitúa en valores más tolerables, entre 3,1 y 8,1 m, si bien todavía bastante poco precisos para su empleo en estudios evolutivos. Finalmente, cuando se aplica también la corrección radiométrica, los valores de EMC máximos sólo llegan a 5,1 m, lo suficientemente bajos para que estas líneas se puedan emplear en dichos estudios.

AVI.5. Conclusiones

Mediante el método desarrollado se han localizado las líneas de costa a partir de imágenes Landsat ETM+ (con error de bandeo) con errores medios inferiores a los 3 m y EMC inferior a los 5,1 m.

En consecuencia, los resultados de las imágenes de Landsat 7 tras el error por bandeo son perfectamente compatibles con las imágenes libres de este error. Aún más, permite equiparar ambos grupos de imágenes para calibraciones o experimentos posteriores.

Por otro lado, estas conclusiones capacitan a todo el conjunto de imágenes Landsat 7 para su empleo en análisis de costa, pudiendo densificar la información en aquellas fechas que, por dudar de los efectos de bandeo, no se hubieran considerado previamente. Todo ello confirma el potencial de las imágenes Landsat para la gestión costera global.