



# IISTA

Instituto Interuniversitario de Investigación  
del Sistema Tierra en Andalucía

## ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DEL DELTA DEL GUADALFEO

Proyecto Fin de Carrera

**Alumno:** Cristóbal Rodríguez Delgado

**Tutores:** Miguel Ortega Sánchez – Rafael Jesús Bergillos Meca

**Departamento:** Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica

UNIVERSIDAD DE GRANADA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



*ugr*

Universidad  
de Granada





*Al Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales y, en especial, a Rafael Jesús Bergillos Meca y al Doctor Miguel Ortega Sánchez por su inestimable ayuda en este Proyecto.*

*A mi familia, por todo lo que me han apoyado y querido durante estos años.*

*A Irene, por escucharme y hacerme feliz cada día*

**¡GRACIAS!**



# Antecedentes

El 1 de enero de 2013 comienzan los trabajos del proyecto de investigación fundamental no orientada Morfodinámica de Playas Heterogéneas en el litoral andaluz del mar de Alborán (CTM2012-32439). En el desarrollo del mismo se detecta que una de las zonas de estudio (Playa Granada, Motril) presenta problemas de erosión debidos, entre otros factores, a un desequilibrio del sistema como consecuencia de la disminución de los aportes de sedimentos procedentes del río Guadalfeo. De este modo, no se puede comprender con precisión el comportamiento de ese tramo de costa sin conocer lo que ocurre en el delta.

Por ello, se decide realizar un Informe Técnico basado en el estudio teórico, experimental y numérico de la evolución del delta del Guadalfeo. Este Proyecto Fin de Carrera ha sido realizado por Cristóbal Rodríguez Delgado, bajo la supervisión de Rafael Jesús Bergillos Meca y el doctor Miguel Ortega Sánchez, Investigador Principal del Proyecto.



# Resumen

Los sistemas deltaicos se sitúan en la confluencia de ambientes fluviales y marítimos por lo que los distintos agentes climáticos, sedimentarios y tectónicos interactúan en ellos de manera compleja. De esta manera, los deltas responden rápidamente tanto a los cambios naturales, como la subida del nivel del mar, como a los inducidos por el hombre: canalización y desviación de cauces, construcción de presas, etc. En los últimos tiempos, estos agentes están provocando el progresivo hundimiento de los deltas.

El Delta del Guadalfeo se ha visto afectado en los últimos años por la construcción, en el cauce del propio río, de la Presa de Rules y por la alta presión urbanística. El objetivo principal de este informe técnico es el análisis de los efectos que estas actuaciones pueden tener en la hidrodinámica y morfodinámica del Delta del Guadalfeo. Para ello, en primer lugar se ha realizado un análisis general de la zona de estudio. Posteriormente, se ha estudiado en profundidad el clima marítimo de la zona, así como el régimen de precipitaciones y caudales de la cuenca del Guadalfeo, en base a dos escenarios: un escenario real, tomando los caudales que salen de Rules, y un escenario natural, tomando los caudales que llegan a la presa. De esta manera podemos comparar la situación actual del delta con la que tendría si la presa no se hubiera construido.

Una vez realizado este análisis global, se han llevado a cabo medidas topográficas y batimétricas en el Delta. Con estas medidas, unidas a otras batimetrías anteriores de las que se disponía (años 1999, 2004 y 2008) y a diversas ortofotografías, se han estudiado los siguientes aspectos de la evolución del delta: En primer lugar, se ha analizado la evolución en planta de la zona, observando, a través de ortofotografías, los cambios que se han producido en la línea de costa así como el desarrollo de la presión urbanística en los últimos años. Posteriormente, se han tomado perfiles en las cuatro batimetrías y se ha estudiado la evolución espaciotemporal del perfil de playa. Por último, se ha medido el volumen de sedimentos acumulado en cada una de las cuatro batimetrías, con el fin de observar la evolución conjunta de planta y perfil y así poder hacer una estimación general de los cambios producidos en el comportamiento del Delta.

Para finalizar, se ha calibrado, validado y aplicado el modelo numérico Delft3D para complementar las medidas anteriores:

En primer lugar, se ha propagado el régimen medio desde aguas profundas hasta la costa, lo que ayuda a realizar un análisis más exhaustivo del clima marítimo de la zona y de su influencia en los cambios producidos. En segundo lugar, se han propagado cuatro estados de mar, dos en condiciones medias y dos en condiciones de tormenta, en cada una de las batimetrías de las que se disponía. De esta manera, se pueden observar los cambios en la propagación del oleaje que produce la alteración de la morfología sumergida del Delta. Por último, se ha llevado a cabo una simulación de una descarga de sedimentos del río, producida en diciembre de 2009, bajo los dos escenarios definidos: natural y real. De este modo, pude

comparar la acumulación real de sedimentos en el Delta y lo que hubiera tenido si no existiera la presa.

El análisis de los resultados, indica que la construcción de la Presa de Rules ha alterado severamente la morfología, y por tanto el comportamiento, del Delta del Guadalfeo. La retención de sedimentos en el embalse supone un importante retroceso de la línea de costa, así como una alteración morfológica que agrava, aún más, los procesos de erosión en el conjunto del Delta.

El efecto barrera de la presa de Rules queda evidenciado en el análisis de los escenarios real y natural. Los caudales que llegan a la desembocadura en el escenario real son mucho menores que los del escenario natural, lo cual lleva asociado una disminución importante del volumen de sedimentos aportado por el río. Este hecho queda reflejado en la evolución en planta de la zona de estudio. El descenso en el aporte de sedimentos por parte del río Guadalfeo ha supuesto un retroceso generalizado de la línea de costa, que en las zonas más cercanas a la desembocadura ha alcanzado los 200 m en los últimos 15 años. Además la presión urbanística sobre la costa es cada vez mayor, habiéndose incrementado la superficie construida en 400 ha en los últimos 50 años. Si sumamos dichos procesos, el resultado es que la superficie de playa disponible en las inmediaciones de la desembocadura del Guadalfeo se ha reducido de manera considerable en los últimos años.

En cuanto a la evolución del perfil de playa, queda reflejado que el volumen acumulado en los perfiles cercanos al delta se ha reducido considerablemente desde el año 2004 hasta prácticamente desaparecer la cuña deltaica. Por otra parte, en los perfiles situados en la Playa de Poniente, anexa al dique del Puerto de Motril, el volumen ha aumentado, lo cual evidencia que existe un transporte de sedimentos desde la desembocadura hacia la zona más oriental de la costa. El volumen de sedimentos acumulado en la desembocadura ha descendido unos 480000  $m^3$  durante el periodo de estudio. La desaparición de la cuña deltaica que ya intuíamos en el análisis del perfil de playa se refleja además en las batimetrías. Entre el año 2004 y 2008 se produce un giro en las líneas batimétricas de la cuña que se traduce en un aumento de la profundidad. Este giro se extiende hacia el este, y entre el año 2008 y 2014 comienza a observarse también en Playa Granada. Por último, las simulaciones con el modelo numérico también reflejan estas alteraciones. Se observa que en la desembocadura del río, la refracción en los años 1999 y 2004 es mayor que en los años 2008 y 2014, lo cual se traduce en unas alturas de ola mayores y en un cambio en la dirección de procedencia del oleaje. Estas alteraciones no hacen más que agravar los procesos de erosión de la zona.

Los resultados de este Proyecto Fin de Carrera han sido parcialmente publicados en los siguientes trabajos:

- Rodríguez-Delgado C, Bergillos RJ y Ortega-Sánchez (2015). Modelado de sistemas deltaicos mediterráneos altamente alterados: El caso del Guadalfeo (Sur de España). VIII Simposio sobre el Margen Ibérico Atlántico - MIA15, Málaga, España (en revisión).
- Bergillos RJ, Rodríguez-Delgado C, López-Ruiz A, Millares A, Ortega-Sánchez M y Losada MA (2015). Impact of river regulation on a Mediterranean delta - assessment of managed vs unmanaged scenarios. Water Resources Research (under review).
- Bergillos RJ, Rodríguez-Delgado C, López-Ruiz A, Millares A, Ortega-Sánchez M y Losada MA. Recent human-induced coastal changes in the Guadalfeo river deltaic system (southern Spain). 36th IAHR World Congress, The Hague, Netherlands.

- Bergillos RJ, Rodríguez-Delgado C, López-Ruiz A, Ortega-Sánchez M y Losada MA. Variabilidad espacio-temporal de un sistema deltaico heterogéneo: Playa Granada (sur de España). XIII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Avilés, España.
- Bergillos RJ, Luengo JM, Rodríguez-Delgado C y Ortega-Sánchez M. Massive urbanization and coastal management in Mediterranean deltaic systems: the unsustainable growth model of southern Spain. ECSA 55 - Unbounded boundaries and shifting baselines, London, UK.



# Índice general

Índice general	XI
Índice de figuras	XV
Índice de cuadros	XIX
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Zona de estudio</b>	<b>3</b>
<b>3. Metodología</b>	<b>7</b>
3.1. Datos	8
3.1.1. Clima Marítimo	8
3.1.2. Precipitaciones y caudales	10
3.1.3. Ortofotografías	11
3.1.4. Batimetrías	11
3.2. Medidas	13
3.2.1. Batimetría propia	13
3.2.2. Topografía	15
3.3. Análisis de datos y medidas	15
3.3.1. Evolución de la línea de costa	15
3.3.2. Evolución de la superficie construida	16
3.3.3. Tratamiento de las batimetrías	17
3.3.4. Evolución del perfil de playa	18
3.3.5. Cálculo de volúmenes	19
3.4. Modelo numérico	19
3.4.1. Módulo WAVE	19
3.4.2. Módulo FLOW	20
3.4.3. Propagación del régimen medio	21
3.4.3.1. Datos de entrada	21
3.4.3.2. Batimetría	22
3.4.3.3. Archivo Wavecon	22
3.4.3.4. Parámetros del modelo	23
3.4.3.5. Parámetros Calibrados	24
3.4.3.6. Análisis del régimen medio	25
3.4.4. Evolución de la propagación del oleaje	26
3.4.5. Descarga fluvial	26
3.4.5.1. Batimetría	27

3.4.5.2.	Parámetros del modelo . . . . .	28
3.4.5.3.	Simulación de la descarga fluvial . . . . .	28
<b>4.</b>	<b>Resultados</b>	<b>29</b>
4.1.	Análisis de clima marítimo . . . . .	29
4.1.1.	Descripción general del clima marítimo en profundidades indefinidas . . . . .	29
4.2.	Análisis de precipitaciones y caudales . . . . .	36
4.3.	Evolución en planta . . . . .	38
4.3.1.	Evolución de la línea de costa . . . . .	38
4.3.1.1.	Periodo 1947-1999 . . . . .	38
4.3.1.2.	Periodo 1999-2014 . . . . .	39
4.3.2.	Evolución de la superficie construida . . . . .	51
4.4.	Evolución del perfil de playa . . . . .	60
4.4.1.	Evolución espacial . . . . .	60
4.4.2.	Evolución temporal . . . . .	62
4.5.	Evolución conjunta . . . . .	66
4.6.	Aplicación del modelo numérico . . . . .	69
4.6.1.	Análisis del Régimen Medio . . . . .	69
4.6.1.1.	Altura de ola . . . . .	69
4.6.1.2.	Rosas de oleaje . . . . .	71
4.6.1.3.	Propagación de oleaje . . . . .	72
4.6.2.	Evolución de la propagación del oleaje . . . . .	73
4.6.3.	Descarga fluvial . . . . .	77
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>83</b>
<b>A.</b>	<b>Modelo numérico: ecuaciones y parámetros</b>	<b>87</b>
A.1.	Ecuaciones del software Delft3D: WAVE/SWAN . . . . .	87
A.1.1.	Ecuación de balance de acción . . . . .	87
A.1.1.1.	Transferencia de energía al oleaje debida al viento, $S_{in}$ . . . . .	88
A.1.1.2.	Interacciones no lineales entre olas, $S_{nl}$ . . . . .	89
A.1.1.3.	Disipación de energía en aguas profundas debido al White-capping, $S_{ds,w}$ . . . . .	92
A.1.1.4.	Término debido a la rotura por disminución de la profundidad, $S_{ds,br}$ . . . . .	93
A.1.1.5.	Disipación de energía por fricción con el fondo $S_{ds,b}$ . . . . .	94
A.2.	Parámetros del módulo WAVE . . . . .	95
A.2.1.	Description (Descripción) . . . . .	95
A.2.2.	Hydrodynamics (Hidrodinámica) . . . . .	95
A.2.3.	Grids (Malla) . . . . .	95
A.2.4.	Time frame (Periodo de tiempo) . . . . .	96
A.2.5.	Boundaries (Condiciones de contorno) . . . . .	96
A.2.6.	Obstacles (Obstáculos) . . . . .	96
A.2.7.	Physical parameters (Parámetros físicos) . . . . .	97
A.2.8.	Numerical parameters (Parámetros numéricos) . . . . .	98
A.2.9.	Output curves (Curvas de salida) . . . . .	98
A.2.10.	Output parameters (Parámetros de salida) . . . . .	98
A.2.11.	Additional parameters (Parámetros adicionales) . . . . .	99

A.3. Ecuaciones del software Delft3D: FLOW . . . . .	99
A.3.1. Ecuaciones de gobierno . . . . .	99
A.3.1.1. Ecs. de conserv. de cantidad de movimiento en el plano ho- rizontal X,Y . . . . .	100
A.3.1.2. Ecuaciones de continuidad (Conservación de la masa) . . . .	101
A.3.1.3. Ecuación del transporte . . . . .	101
A.3.1.4. Problema del cierre turbulento . . . . .	102
A.4. Parámetros del módulo Flow . . . . .	103
A.4.1. Description (Descripción) . . . . .	103
A.4.2. Domain (Dominio) . . . . .	103
A.4.3. Time Frame (Periodo de tiempo) . . . . .	103
A.4.4. Processes (Procesos) . . . . .	104
A.4.5. Initial conditions (Condiciones iniciales) . . . . .	104
A.4.6. Boundaries (Fronteras) . . . . .	104
A.4.7. Physical parameters (Parámetros físicos) . . . . .	104
A.4.8. Numerical parameters (Parámetros numéricos) . . . . .	105
A.4.9. Operations (Operaciones) . . . . .	106
A.4.10. Additional parameters (Parámetros adicionales) . . . . .	107
A.4.11. Output (Salida) . . . . .	107
 <b>Bibliografía</b>	 <b>109</b>



# Índice de figuras

2.1. Panel superior izquierdo: localización de la zona de estudio. Panel principal: delimitación de la cuenca, relieve, ríos y lugares importantes. . . . .	3
2.2. Zona costera del Delta del Guadalfeo. Peñón de Salobreña, Salobreña, Desembocadura del Guadalfeo, Playa Granada, Punta del Santo, Playa de Poniente y Puerto de Motril. . . . .	5
2.3. a) Planta, b) Alzado y c) Perfil del encauzamiento de la desembocadura del río Guadalfeo. d) Punta del Santo y Puerto de Motril . . . . .	6
3.1. Delimitación del volumen de control total y de los volúmenes parciales. . . . .	7
3.2. Localización del punto WANA 2040079 y del mareógrafo del Puerto de Motril . . . . .	8
3.3. Localización de las estaciones de precipitaciones y caudales estudiadas . . . . .	10
3.4. a) Esquema de funcionamiento de una sonda multihaz. b) Embarcación utilizada. c) Equipo de registro . . . . .	14
3.5. Puntos de ubicación del GPS base . . . . .	15
3.6. Medidas topográficas en Playa Granada . . . . .	16
3.7. Límite terrestre de la zona de estudio . . . . .	17
3.8. Esquema del datum del mareógrafo del Puerto de Motril. Fuente: Puertos del Estado . . . . .	18
3.9. Situación de los perfiles estudiados . . . . .	18
3.10. Definición de la línea de costa y las dos mallas anidadas . . . . .	22
3.11. Batimetría interpoladas por Delft3D . . . . .	23
3.12. Situación de los instrumentos de medida . . . . .	25
3.13. Definición de la línea de costa y las dos mallas anexas . . . . .	27
3.14. Batimetría usada en el modulo FLOW de Delft3D . . . . .	28
4.1. Serie temporal Hs. Periodo 1999-2014 . . . . .	30
4.2. Histograma Hs . . . . .	30
4.3. Serie temporal Tp. Periodo 1999-2014 . . . . .	31
4.4. Histograma Tp . . . . .	31
4.5. Histograma dirección media de procedencia del oleaje . . . . .	32
4.6. Rosa de oleaje . . . . .	32
4.7. Serie temporal V. Periodo 1999-2014 . . . . .	33
4.8. Histograma V . . . . .	33
4.9. Histograma dirección media de procedencia del viento . . . . .	34
4.10. Rosa de viento . . . . .	34
4.11. Serie temporal de las elevaciones debidas a la marea astronómica . . . . .	35
4.12. Serie temporal de las elevaciones debidas a la marea meteorológica . . . . .	35

4.13. Evolución de precipitación y caudal durante el periodo de estudio: (a) precipitación en la estación más húmeda (Cebadilla), (b) precipitación media espacial aguas arriba de la presa de Rules, (c) precipitación en la estación más seca (Lecrín), (d) caudal escenario real y (e) caudal escenario natural. Fuente <a href="#">Bergillos RJ (2015)</a> . . . . .	37
4.14. Evolución de la línea de costa desde 1947 a 1999 . . . . .	39
4.15. a)Evolución de la línea de costa en la zona 1 desde 1999 a 2004 y b)Evolución de la línea de costa en la zona 1 desde 2004 a 2008 . . . . .	40
4.16. a)Evolución de la línea de costa en la zona 1 desde 2008 a 2010 y b)Evolución de la línea de costa en la zona 1 desde 2010 a 2014 . . . . .	40
4.17. Evolución de la línea de costa en la zona 2 desde 1999 a 2009 . . . . .	42
4.18. Evolución de la línea de costa en la zona 2 desde 2009 a 2010 . . . . .	42
4.19. Modelo conceptual de la acumulación de sedimentos en torno a la desembocadura durante tormentas (a-f) y fotografías aéreas del proceso (g-i). Fuente <a href="#">RJ (2014)</a> . . . . .	43
4.20. Evolución de la línea de costa en la zona 2 desde 2010 a 2014 . . . . .	43
4.21. Evolución de la línea de costa en la zona 3 desde 1999 a 2001 . . . . .	45
4.22. Evolución de la línea de costa en la zona 3 desde 2001 a 2004 . . . . .	45
4.23. Evolución de la línea de costa en la zona 3 desde 2004 a 2009 . . . . .	46
4.24. Evolución de la línea de costa en la zona 3 desde 2009 a 2014 . . . . .	46
4.25. Evolución de la línea de costa en la zona 4 desde 1999 a 2007 . . . . .	47
4.26. Evolución de la línea de costa en la zona 4 desde 2007 a 2010 . . . . .	48
4.27. Evolución de la línea de costa en la zona 4 desde 2010 a 2013 . . . . .	48
4.28. Evolución de la línea de costa en la zona 5 desde 1999 a 2007 . . . . .	49
4.29. Evolución de la línea de costa en la zona 5 desde 2007 a 2009 . . . . .	50
4.30. Evolución de la línea de costa en la zona 5 desde 2009 a 2014 . . . . .	50
4.31. Superficie construida (en ha) para cada una de las ortofotos estudiadas . . . . .	51
4.32. Evolución de la superficie construida en el municipio de Salobreña (I) . . . . .	53
4.33. Evolución de la superficie construida en el municipio de Salobreña (II) . . . . .	54
4.34. Evolución de la superficie construida en Playa Granada (I) . . . . .	55
4.35. Evolución de la superficie construida en Playa Granada (II) . . . . .	56
4.36. Evolución de la superficie construida en el Puerto de Motril (I) . . . . .	57
4.37. Evolución de la superficie construida en el Puerto de Motril (II) . . . . .	58
4.38. Evolución de la superficie construida en cada periodo . . . . .	59
4.39. Evolución espacial del perfil . . . . .	61
4.40. Evolución temporal del perfil de playa . . . . .	63
4.41. Evolución temporal del perfil de playa . . . . .	64
4.42. Evolución temporal del perfil de playa . . . . .	65
4.43. Comparación de la morfología de la batimetría para cada uno de los periodos estudiados . . . . .	68
4.44. Localización de los puntos de control. Los puntos de color rojo son los puntos que se presentarán en los apartados 4.6.1.1 y 4.6.1.2. Los puntos de color azul serán representados en el apartado 4.6.1.3 . . . . .	69
4.45. Histogramas de altura de ola significativa en la batimétrica -8m . . . . .	70
4.46. Rosas de oleaje en la batimétrica -8m . . . . .	71
4.47. Propagación del oleaje en la zona de estudio. La separación entre las batimétricas está exagerada 200m . . . . .	72
4.48. Evolución de la propagación del oleaje en condiciones medias. Las figuras a1-a4 representan oleajes que provienen del E, mientras que b1-b4 muestran oleajes procedentes del O . . . . .	75

4.49. Evolución de la propagación del oleaje en condiciones de tormenta. Las figuras a1-a4 representan oleajes que produra vienen del E, mientras que b1-b4 muestran oleajes procedentes del O . . . . .	76
4.50. Concentración de sedimento en $kg/m^3$ para el escenario natural . . . . .	78
4.51. Concentración de sedimento en $kg/m^3$ para el escenario real . . . . .	79
4.52. Erosión (negativo)/Sedimentación(positivo) acumulada en $m$ para el escenario natural . . .	80
4.53. Erosión (negativo)/Sedimentación(positivo) acumulada en $m$ para el escenario real . . . .	81
A.1. Configuración de los cuádrupletes en el método de la Aproximación de Interacción Discreta. Fuente: <a href="#">Hasselmann et al. (1985)</a> . . . . .	90
A.2. Ejemplo de grid vertical con seis capas. Fuente: Manual del Delft3D-FLOW . . . . .	99



# Índice de cuadros

3.1. Estados de mar usados en la comparación de la propagación del oleaje . . . .	26
4.1. Diferencia de áreas (en m <sup>2</sup> ) entre las líneas de costa estudiadas y tasa anual (en m <sup>2</sup> /año) de pérdida (signo negativo) o ganancia (signo positivo). . . . .	38
4.2. Diferencias en el volumen de sedimentos (en m <sup>3</sup> ) basadas en medidas batimétricas: volumen de control y volúmenes de control parciales. . . . .	66
A.1. Armónicos de marea . . . . .	104
A.2. Valores del coeficiente de arrastre por viento . . . . .	105
A.3. Datos de caudal introducidos en la simulación . . . . .	106



# Capítulo 1

## Introducción

Los sistemas deltaicos están situados en la confluencia entre ambientes fluviales y marítimos, por lo cual, los procesos climáticos, sedimentarios y tectónicos que los afectan, interactúan entre sí de un modo complejo en ellos (Coleman and Wright (1975); Orton and Reading (1993); Overeem (2005); Syvitski and Saito (2007)). A consecuencia de ello, los deltas responden muy rápidamente a cambios naturales, principalmente controlados por la variación en el suministro de sedimento que llega al dominio costero (Mateo and Siringan (2007)).

En los últimos tiempos, las acciones humanas se han sumado a dichos procesos naturales, cambiando de manera aún más drástica el comportamiento de los sistemas deltaicos. Estas acciones incluyen deforestación, cambios en la ubicación del cauce y estabilización, disminución en la entrada de agua dulce por desvíos y bombeos, así como disminución en el suministro de sedimento por la construcción de presas. Estas actividades han alterado considerablemente la morfología de los ambientes deltaicos (McCarthy (2001); Hood (2010); Anthony et al. (2014)). Además, el aumento del nivel del mar supone efectos negativos en los deltas de todo el mundo, provocando su hundimiento progresivo (Syvitski et al. (2009)). El saldo final entre éste, las variaciones eustáticas, los hundimientos y los cambios en la descarga de sedimentos (Vella et al. (2005); Ericson et al. (2006)) es el que determina si la costa avanza o retrocede en el conjunto del delta y/o incluso, en determinados lugares a lo largo de ella.

Los deltas mediterráneos son especialmente vulnerables a los cambios en el nivel del mar (Jeftic et al. (1996); Nicholls and Hoozemans (1996); Anthony et al. (2014)), lo cual unido a la gran importancia ambiental, social y económica que presentan estos sistemas (Stanley and Warne (1993); Sanchez-Arcilla and Jimenez (1997); Trincardia and Syvitski (2004)) hace que sea de especial interés el estudio por menorizado de la evolución de los procesos que tienen lugar en ellos, así como su afección y alteración morfológica. En el caso concreto del Guadalfeo, la entrada en funcionamiento de la presa de Rules en el año 2003, ha supuesto una considerable alteración en su morfología. La presa regula el 85 % de la escorrentía total de la cuenca (Nevot Pérez (2004)), lo que supone una disminución importantísima de la descarga de sedimentos que alcanza el delta, y generando, por tanto, problemas de erosión. Ésta se traduce inmediatamente en un retroceso de la línea de costa (Losada et al. (2011)). Para paliar este retroceso se han llevado a cabo numerosas actuaciones de gestión en forma de regeneración de playas (aporte artificial de sedimentos) en los últimos años, obteniendo escasos resultados, lo cual motiva la realización de estudios en profundidad que atajen las causas fundamentales de este problema.

Los anteriores trabajos sobre el delta del Guadalfeo se han centrado en aspectos más específicos como la caracterización hidrológica del acuífero del delta (Duque et al. (2008)),

la descripción de la geomorfología de la costa y de la morfología submarina (Lobo et al. (2006); Fernández-Salas et al. (2007)), y la estimación del volumen de sedimento acumulado en el delta a partir de métodos geofísicos (Duque et al. (2010)). Jabaloy-Sánchez et al. (2014) hicieron un estudio sobre la interacción entre las zonas emergida y sumergida del delta. Este trabajo ya se basaba en la comparación de dos batimetrías espaciadas temporalmente (1877-2002). Sin embargo, la gran separación temporal entre ambas, así como la escasa precisión esperada en la batimetría más antigua, hace que sea muy difícil la extracción de conclusiones. En concreto, no podemos estudiar la evolución del delta en la última década, sobre todo el impacto costero derivado de la construcción y puesta en funcionamiento de la presa de Rules puesto que no tenemos datos suficientes.

Por tanto, el objetivo principal de este Proyecto Fin de Carrera es el estudio integral (cuenca-costa) del delta del Guadalfeo, haciendo especial hincapié en los cambios sufridos en los últimos 15 años. Para ello se han fijado los siguientes objetivos:

1. Revisión del estado del arte sobre sistemas deltaicos, prestando especial atención a su evolución como consecuencia de los cambios inducidos por el hombre.
2. Análisis de los registros de precipitación y caudal en la cuenca del Guadalfeo.
3. Estudio del clima marítimo de la zona.
4. Cuantificación de los cambios en la costa y en la morfología submarina somera del delta del Guadalfeo, para ello por un lado se estudiará la evolución temporal de la línea de costa y por otro se medirá el volumen de sedimentos acumulado en la costa a través de varias batimetrías.
5. Aplicación de un modelo numérico con dos objetivos principales:
  - Propagación del régimen medio desde aguas profundas a la costa con el fin de estudiar las afecciones sobre la morfología costera provocados por el forzamiento del oleaje.
  - Determinación de la descarga del río en el delta.
6. Discusión de la influencia de la acción humana en la evolución del delta y extracción de conclusiones.

## Capítulo 2

# Zona de estudio

Este proyecto fin de carrera se centra, principalmente, en el estudio del Delta del río Guadalfeo, el cual se encuentra situado en el sureste de la Península Ibérica ( $36^{\circ} 43' N$ ;  $3^{\circ} 35' W$ , Fig. 2.1).

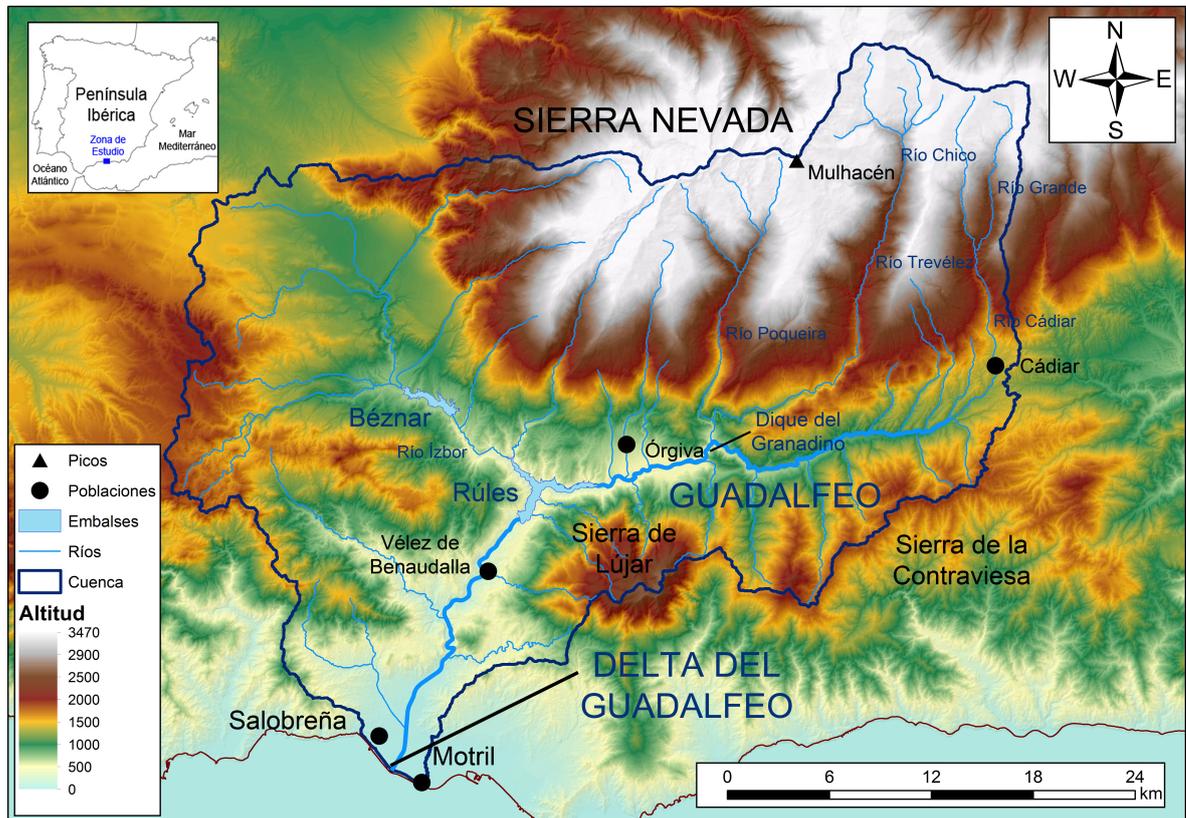


Figura 2.1: Panel superior izquierdo: localización de la zona de estudio. Panel principal: delimitación de la cuenca, relieve, ríos y lugares importantes.

La cuenca del río Guadalfeo ocupa un área de  $1252 \text{ km}^2$ , tiene una forma irregular aproximadamente rectangular y drena al mar Mediterráneo (Fig. 2.1). La divisoria norte corresponde a las crestas de Sierra Nevada, alcanzando su máxima altitud en el pico Mulhacén (3479 m.). La divisoria sur se corresponde básicamente con la línea de crestas E-W de las sierras de la Contraviesa y de Lújar, alcanzando altitudes de 1400-1878 m a tan solo 20 km

del Mar Mediterráneo.

En cuanto a su composición geológica, la cuenca del Guadalfeo se encuentra dentro de la zona interna de las béticas, donde encontramos esquistos, filitas y mármoles del Paleozoico al Triásico. Los principales pliegues antiformes son Sierra Nevada y el antiforme costero que se corresponde con las sierras de la Contraviesa, Lújar y Los Guájares. En medio de estos, encontramos el pliegue sinforme de la Alpujarra, donde tenemos sedimentos del Neogeno-Cuaternario. En estos sistemas montañosos existe un sistema de fallas que presenta gran actividad geológica, geomorfológica y sísmica desde el Cuaternario hasta la actualidad.

Se trata de una cuenca semiárida con un clima subtropical mediterráneo cuyos valores de precipitación anual tienen una gran variabilidad espaciotemporal, yendo desde 460 mm/año en los valles (altitudes menores de 600-800m.) hasta los 630 mm/año en las zonas montañosas (altitudes a partir de los 1500m.). En las zonas de alta montaña (altitudes por encima de los 2500 m.) aproximadamente el 70 % de la precipitación anual cae en forma de nieve. Por tanto, el régimen hidrológico de la cuenca se encuentra muy condicionado por la presencia de nieve en Sierra Nevada en los meses de Noviembre a Junio. Los meses de verano son muy secos debido a la influencia del anticiclón de las Azores, mientras que la precipitación media aumenta en los meses de otoño e invierno. Estos factores producen grandes variaciones estacionales en el régimen de caudales. La topografía escarpada de la cuenca favorece el transporte de sedimentos, pudiendo encontrar desde arenas hasta bolos, en gran variedad de gradación y mezcla.

El río desciende desde Sierra Nevada, en la parte este de la cuenca. Nace de la unión de los ríos Chico y Grande de Bérchules, aunque en su inicio se le denomina río Cádiar. Tras su paso por Cádiar comienza a llamarse Guadalfeo propiamente. El perfil longitudinal del río tiene la típica forma cóncava, con pendientes que van desde el 10.8 % en la parte sur de Sierra Nevada, para situarse en una pendiente media del 1.64 % en las partes medias y bajas del curso del río. El río desciende de manera gradual, presentando una curva hipsométrica relativamente recta.

Los principales municipios por los que discurre el Guadalfeo son: Cádiar (1288 hab.), Órgiva (3604 hab.), Vélez de Benaudalla (2661 hab.) y, por último, Salobreña (9208 hab.) y Motril (60870 hab.), los más importantes y para los cuales, la desembocadura del río supone la separación entre ambos.

Dentro de la cuenca, encontramos principalmente dos grandes infraestructuras de gestión hidrológica: las presas de Béznar y Rules.

La presa de Béznar fue construida entre 1977 y 1985. Se sitúa sobre el río Izbor, afluente principal del Guadalfeo, en la zona donde termina el valle de Lecrín, en los términos municipales de las Mancomunidades del Pinar y Lecrín. Es una presa bóveda de doble curvatura con 134 m de alzado desde la base del bloque central y 110 metros de altura desde el cauce del río. La longitud de la coronación es de 408 m. El aliviadero es de labio fijo, vertiendo libremente sobre coronación a un sistema formado por cuencoazud-contracuenco, situado a pie de presa.

Por su parte, la presa de Rules se construyó desde 1993 hasta 2003. Se encuentra situada a unos 4 kilómetros aguas abajo de la confluencia de los ríos Izbor y Guadalfeo y a tres kilómetros aguas arriba de Vélez de Benaudalla. Se trata de una presa de tipo arco-gravedad de 500 m de radio. El aliviadero es de labio fijo y el canal de descarga discurre sobre el paramento aguas abajo de la presa, enlazando al pie de la misma con un trampolín sumergido.

Como veremos en el desarrollo de este proyecto fin de carrera, la presa de Rules tiene un importante impacto en el sistema del delta del Guadalfeo, condicionando de manera significativa su comportamiento en los últimos años. En su construcción, se preveía que el 40 % de las aguas del embalse se utilizaran para riego, construyendo para ese fin dos tomas de un metro de diámetro. Otro 19 % de las aguas se usarían para abastecimiento, construyendo 3 tomas a diferentes cotas. También se preveía la construcción de una central hidroeléctrica en la presa, en la que el 9 % de las aguas embalsadas se usaran para generar energía eléctrica. El agua restante se usaría, un 30 % para control de avenidas y un 2 % para usos recreativos y otros. La superficie ocupada por el embalse en su máximo nivel normal es de 308 Ha, acumulando 117.07 Hm<sup>3</sup> de agua embalsada. En total, el presupuesto para conocimiento de la administración se fijó en 160.796.600,54 euros.

Asociado a esta presa encontramos el Dique del Granadino, situado cerca de la confluencia de los ríos Poqueira y Trevez. Entró en funcionamiento en el año 2002, este dique se construyó aguas arriba de la presa de Rules con el fin de retener parte de los sedimentos que transporta el río Guadalfeo y así evitar que se acumulen en el embalse de Rules, lo que supondría una disminución de su capacidad útil. Arrastra problemas de colmatación desde las fuertes lluvias que cayeron en la región en 2010.



Figura 2.2: Zona costera del Delta del Guadalfeo. Peñón de Salobreña, Salobreña, Desembocadura del Guadalfeo, Playa Granada, Punta del Santo, Playa de Poniente y Puerto de Motril.

El delta se encuentra delimitado por el oeste por el peñón de Salobreña y por el este por el puerto de Motril (Fig. 2.2). La actual desembocadura del río se encuentra encauzada y se sitúa entre el peñón de Salobreña y la Punta del Santo, antigua desembocadura del río. El tramo final del río Guadalfeo, sirve como límite entre los municipios de Salobreña y Motril. En la figura 2.3 vemos el estado actual del encauzamiento. En la costa encontramos cinco zonas principalmente: la Playa de Salobreña, la propia desembocadura del Guadalfeo, Playa Granada, la Punta del Santo (antigua desembocadura del río), y la Playa de Poniente.

La parte sumergida de la zona de estudio se sitúa en la parte más al norte del mar de Alborán, el cual, conecta por el oeste directamente con el océano Atlántico y por el este con la plataforma de las Islas Baleares.

La plataforma continental es estrecha en toda la zona norte del mar de Alborán (en torno a 5km). La pendiente de la plataforma es relativamente alta, encontrando valores entorno al 2.5 %, que pueden alcanzar incluso el 5 % en algunas zonas cercanas a la costa. La transición entre plataforma y talud continental la podemos encontrar a unos 115 m de profundidad.

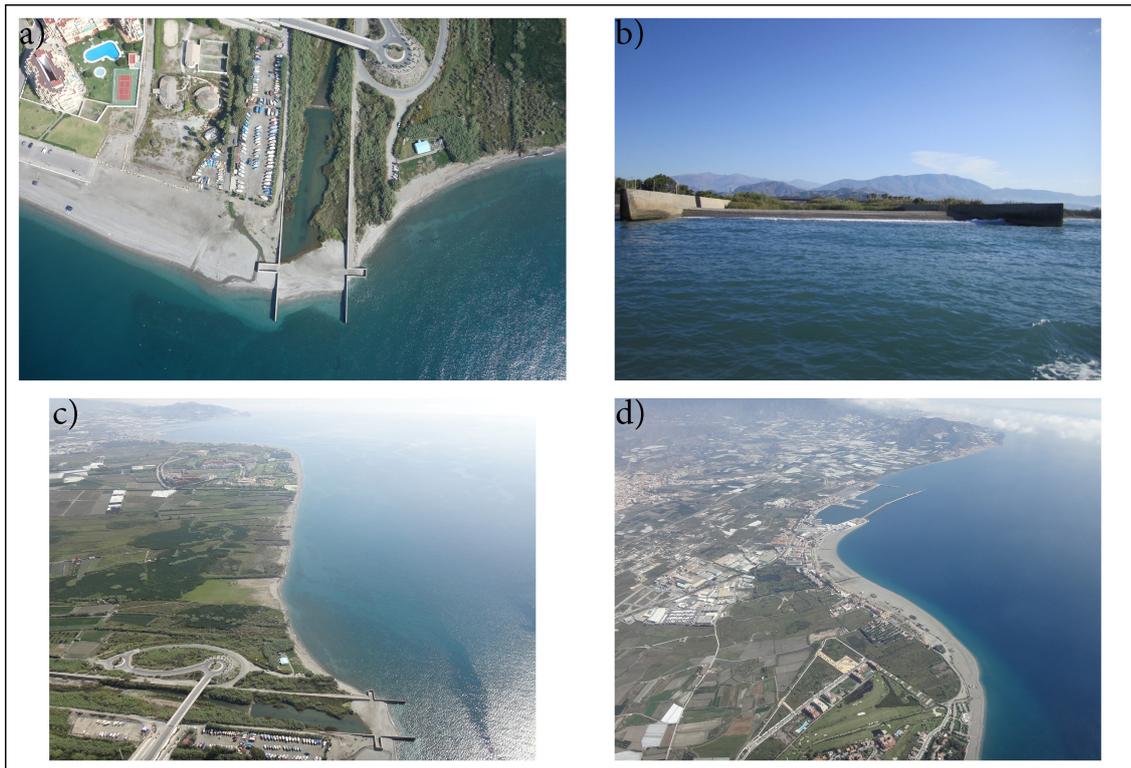


Figura 2.3: a) Planta, b) Alzado y c) Perfil del encauzamiento de la desembocadura del río Guadalfeo. d) Punta del Santo y Puerto de Motril

Las condiciones climáticas y geológicas de la zona (se trata de una zona tectónicamente activa) favorecen la formación cañones y deltas submarinos. Además, durante la última glaciación el nivel del mar se situó unos 100 m por debajo de donde está ahora, por lo que los cauces desembocaban en zonas que actualmente se encuentran sumergidas. Así, cerca de nuestra zona de estudio se encuentra el cañón de Jolúcar, un antiguo valle fluvial sumergido. Estos cañones, modifican el comportamiento del oleaje cerca de la costa y pueden producir efectos de resonancia de gran importancia morfodinámica y costera.

La costa se encuentra cubierta principalmente de gravas y arenas. El contenido de arena decrece conforme aumenta la profundidad (pasando de aproximadamente el 90 % al 70 %), por el contrario, el contenido de grava se incrementa con la profundidad pasando de un 5 % a casi el 25 %. El régimen de viento se caracteriza por la alternancia entre vientos del este, los cuales son más constantes y con velocidades superiores a los 50 km/h, y del oeste que son algo menos frecuentes y que alcanzan velocidades superiores a los 30 km/h. A la costa llegan oleajes de bajo contenido energético y la carrera de marea es débil, situándose en torno a los 0.8 m en el puerto de Motril. Los trenes de onda dominantes llegan tanto desde el este como del oeste, sin embargo las olas procedentes del este suelen ser transportar algo más de energía.

Por último, el puerto de Motril fue construido entre 1908 y 1927. Está situado entre la punta del Santo y el cabo Sacratif ( $36^{\circ}43' N$ ,  $3^{\circ}31' W$ ). Se encuentra en mar abierto y no presenta abrigo natural. Se protege con un dique paralelo a la costa y un contradique sensiblemente perpendicular al anterior. La boca de entrada al puerto está orientada al SO y tiene un ancho de 250 m.

## Capítulo 3

# Metodología

En este capítulo se describirá la metodología seguida para alcanzar los objetivos marcados en el capítulo 1. Para ello, se comenzó fijando un volumen de control que se encuentra limitado por el este por el puerto de Motril, por el oeste por el Peñón de Salobreña, por el sur por la envolvente superior de la máxima extensión de datos alcanzada por las batimetrías y por el norte por la envolvente superior de las líneas de costa (Fig. 3.1).

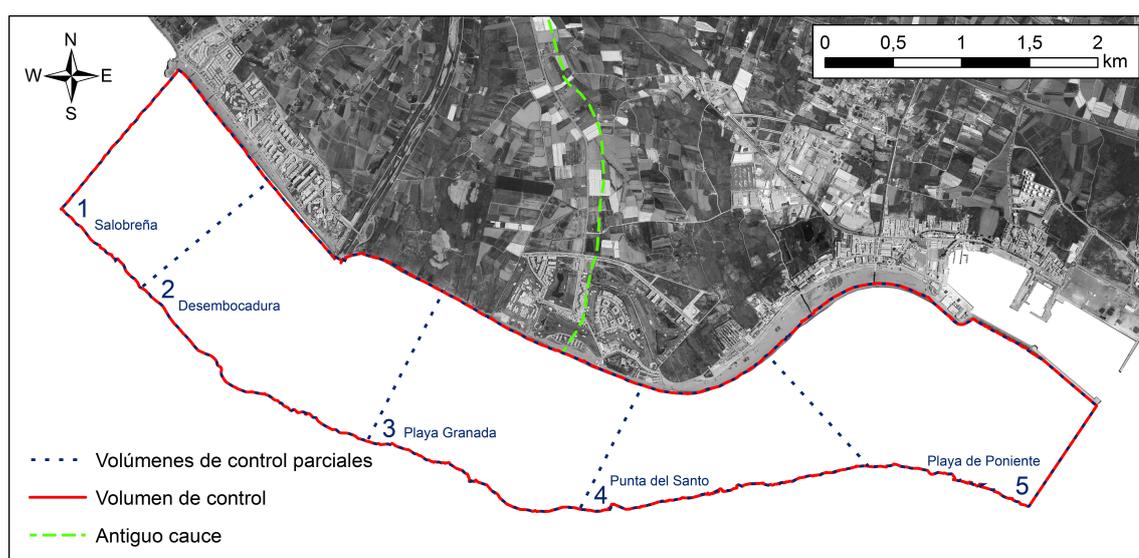


Figura 3.1: Delimitación del volumen de control total y de los volúmenes parciales.

Para facilitar el análisis de resultados, el volumen de control total se dividió a su vez en cinco volúmenes de control parciales cuya delimitación también podemos ver en la figura 3.1. El primer volumen parcial se corresponde con la zona de la playa de Salobreña. El segundo se corresponde con la zona de influencia de la desembocadura del Guadalfeo, delimitada por las formas de fondo observadas en la batimetría. El tercer volumen corresponde a Playa Granada, por el este se encuentra limitado por la zona de influencia de la antigua desembocadura del río, también observada por las formas del fondo. El cuarto volumen incluye la Punta del Santo y el quinto la playa de Poniente. La delimitación entre ambos se fijó en el punto de inflexión de la curvatura de la línea de costa.

### 3.1. Datos

#### 3.1.1. Clima Marítimo

En este proyecto fin de carrera se empleó una serie de 43800 estados de mar, correspondientes al periodo de estudio, procedentes del punto WANA 2040079 y proporcionados por Puertos del Estado. Podemos ver su localización en la figura 3.2.

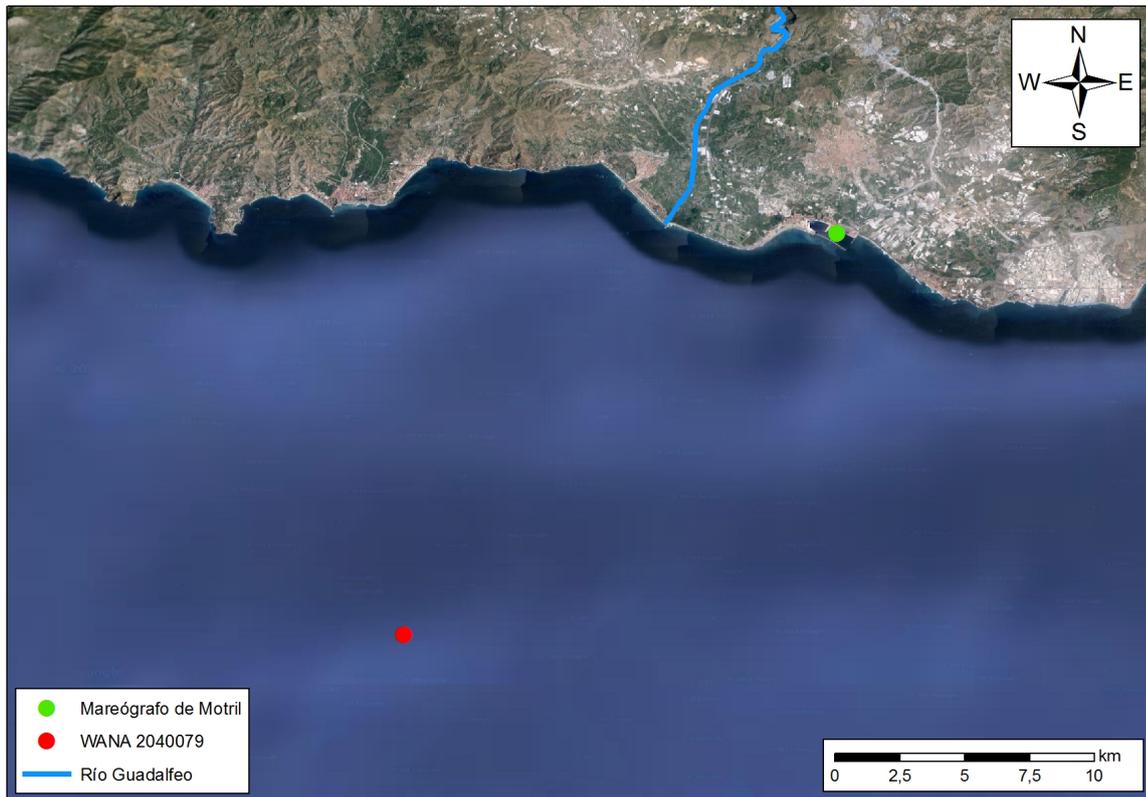


Figura 3.2: Localización del punto WANA 2040079 y del mareógrafo del Puerto de Motril

Los datos proporcionados por un punto WANA, son datos sintéticos obtenidos a partir de dos modelos numéricos operativos en el Instituto Nacional de Meteorología: HIRLAM y WAM.

Por su parte, el modelo HIRLAM es un modelo atmosférico mesoescalar. Genera datos de viento con una cadencia de 3 horas, aunque se representan valores medios horarios. Dichos valores se toman a 10 metros de altura. La resolución espacial media es de 15 km. Los datos de viento no reproducen efectos geográficos de baja escala, ni procesos de escala temporal inferior a 6 horas.

Por otro lado, el modelo WAM genera oleaje con una resolución de 30 km en el Atlántico y 15 km en el Mediterráneo. Estos datos presentan condiciones en aguas abiertas y profundidades indefinidas.

Los datos representados en un punto WANA son los siguientes:

- Altura significativa espectral

- Periodo medio espectral momentos 0 y 2
- Periodo de pico espectral
- Dirección media de procedencia del oleaje
- Mar de viento: altura significativa espectral
- Mar de viento: dirección media de procedencia
- Mar de fondo 1: altura significativa espectral
- Mar de fondo 1: periodo medio espectral
- Mar de fondo 1: dirección media de procedencia
- Mar de fondo 2: altura significativa espectral
- Mar de fondo 2: periodo medio espectral
- Mar de fondo 2: dirección media de procedencia
- Velocidad media del viento
- Dirección media de procedencia del viento

Estos datos se usaron para estudiar la evolución de la altura de ola en profundidades indefinidas ( $H$ ), el periodo de pico ( $Tp$ ) y la velocidad del viento ( $Vv$ ). Así como para el análisis conjunto de  $H$ -dirección de procedencia del oleaje ( $N=0^\circ$ ,  $E=90^\circ$ ) y  $Vv$ -dirección de procedencia del viento ( $N=0^\circ$ ,  $E=90^\circ$ ).

Además, estos datos se usaron como datos de partida de oleaje para las simulaciones con modelo numérico.

Para los registros de marea se emplearon los datos procedentes del mareógrafo de Motril (Punto REDMAR 3543), procedentes también de Puertos del Estado (Fig. 3.2).

Un punto REDMAR proporciona valores de marea astronómica y residuo meteorológico, correspondientes al cálculo armónico para cada año.

Los datos de este mareógrafo son el resultado de la concatenación de dos subconjuntos diferenciados por el canal de llegada de la información. En primer lugar tenemos una serie de datos históricos, pasados por un filtro que elimina los valores anormales, la inestabilidad en las referencias y los desfases del reloj. En segundo lugar se encuentran los datos recibidos en tiempo real a los que se les aplica un filtro para corregir valores fuera de rango, saltos y estabilizaciones anómalas.

En un punto REDMAR se representan las siguientes series de datos:

- Datos del nivel del mar horarios:
  - Nivel del mar
  - Marea o componente astronómica
  - Residuo o componente meteorológica.

- Datos del nivel del mar cada 5 minutos

Para homogeneizar los datos de marea, además fue necesario referenciar estos al nivel medio del puerto. Para ello, se le restó a cada uno de los valores el valor medio de la serie completa.

### 3.1.2. Precipitaciones y caudales

En primer lugar, se estudiaron los datos de precipitación (P) en 20 estaciones situadas dentro de la cuenca del Guadalfeo (Figura 3.3). En este proyecto se representan los datos de la estación más seca y más húmeda, es decir con menor y mayor valor promedio de P, respectivamente (Lecrín y Cebadilla, figura 3.3). Además, se calculó la evolución de la precipitación media espacial mediante el método del inverso del cuadrado de la distancia, con la ayuda del software ArcGIS.

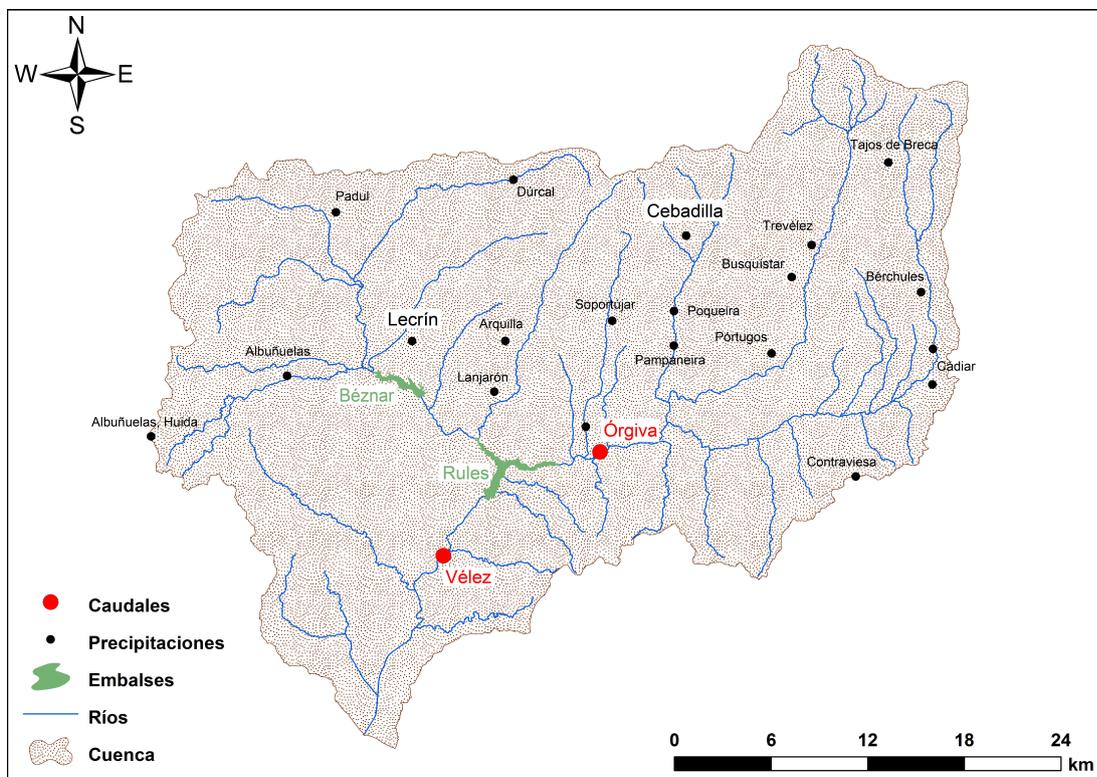


Figura 3.3: Localización de las estaciones de precipitaciones y caudales estudiadas

Por otra parte, se calcularon los valores de caudal medio diario que han salido de Rules y del azud de Vélez (restándole a los anteriores los derivados para riego y abastecimiento) para el periodo de estudio. Estos cálculos se realizaron considerando dos escenarios: el escenario real ( $Q_{real}$ ) y escenario natural ( $Q_{natural}$ ). Este último, suponiendo que no existiera la presa de Rules, con el objetivo de cuantificar el impacto de la presa sobre el sistema. Los  $Q_{real}$  anteriores a 2003 (entrada en funcionamiento de la presa de Rules) y el registro completo de  $Q_{natural}$  se obtuvieron como la suma de los caudales desaguados por la presa de Bézna y los registrados en Órgiva. Este registro, que solo se encuentra disponible hasta mayo de 2013, fue comparado con los datos de caudales que llegan a Rules (disponibles de 2003 a 2011) y se obtuvieron diferencias de solo el 5%. Todos los datos de caudales fueron obtenidos del

sistema automático de información hidrológica de las cuencas mediterráneas andaluzas (Red Hidrosur).

### 3.1.3. Ortofotografías

Para el estudio de la evolución de la línea de costa, se partió de una serie de ortofotografías históricas, obtenidas de distintas bases de datos. A continuación se describen en detalle:

- Ortofotos del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía:

A través del Localizador de Información Espacial de Andalucía (servicio Line@) se han obtenido las siguientes imágenes:

- Año 1956: ortofotografía pancromática, resolución 1 metro/pixel. Datum de georeferenciación ED50. Hoja 1055.
- Año 1977: ortofotografía pancromática, resolución 1 metro/pixel. Datum de georeferenciación ED50. Hoja 1055.
- Año 1984: ortofotografía pancromática, resolución 1 metro/pixel. Datum de georeferenciación ED50. Hoja 1055.
- Año 1998: ortofotografía en color, resolución 1 metro/pixel. Datum de georeferenciación ED50. Hoja 1055.
- Año 2001: ortofotografía pancromática, resolución 0.5 metros/pixel. Datum de georeferenciación ED50. Hoja 1055.
- Año 2004: ortofotografía en color, resolución 1 metro/pixel. Datum de georeferenciación ED50. Hoja 1055.
- Año 2007: ortofotografía en color, resolución 1 metro/pixel. Datum de georeferenciación ED50. Hoja 1055.
- Año 2008-2009: ortofotografía en color, resolución 0,5 metros/pixel. Datum de georeferenciación ED50. Hoja 1055.
- Año 2010-2011: ortofotografía en color, resolución 0,5 metros/pixel. Datum de georeferenciación ETRS89. Hoja 1055.

- Ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA):

De este servicio se obtuvo la hoja 1055, una ortofoto correspondiente al año 2013. La resolución de dicha imagen es 0.5 metros/pixel y se encuentra georeferenciada mediante el datum ETRS89.

Con objeto de completar el vacío de información existente entre los años 1956 y 1998, se obtuvo un informe de la demarcación provincial de puertos y costas de Granada. En este estudio, se representa la evolución de la línea de costa desde el peñón de Salobreña hasta el cabo Sacratif de los años 1947 a 1999. En concreto, se representan las líneas de costa correspondientes a los siguientes años: 1947, 1957, 1973, 1977, 1981, 1993, 1995 y 1999.

### 3.1.4. Batimetrías

Al inicio de este proyecto, se contaba con tres batimetrías de nuestra zona de estudio, realizadas en tres años diferentes: 1999, 2004 y 2008.

- Batimetría del Servicio Provincial de Costas de Granada (1999)

Estudio topográfico y batimétrico realizado en abril del año 1999. Abarca desde el peñón de Salobreña hasta el cabo de Sacratif. Para el levantamiento topográfico se usó el sistema de coordenadas UTM (Universal Transversal Mercator) apoyándose en diversos vértices geodésicos de la zona. El estudio batimétrico se llevó a cabo mediante recorridos perpendiculares a la costa de 50 en 50 metros. La cabecera de dichos perfiles se marcó previamente durante el levantamiento topográfico.

Cada perfil fue registrado por un sondador acústico de manera continua. Desde ahí se envían los datos a un ordenador, donde quedan registrados con una frecuencia de un segundo. La ecosonda utilizada fue un modelo analógico/digital de diseño modular (Modelo Atlas Deso 22). Por último, los perfiles se completaron con tres recorridos longitudinales a la costa en las cotas -10, -25 y -50 metros. Esta última cota supone el límite mar adentro del estudio batimétrico. Todas las cotas se refieren al cero del puerto de Motril. Para ello se usó un mareógrafo Aanderaa tipo WRL 7 para registrar las variaciones del nivel del mar.

- Batimetría del Grupo de Ríos y Embalses de la Universidad de Granada (2004)

Dicha batimetría comprende tres zonas: la zona del delta del Guadalfeo (Desde el peñón de Salobreña al puerto de Motril), la zona del puerto propiamente dicha y, por último, la zona que va desde el levante del puerto de Motril hasta Calahonda. El límite mar adentro de dicho estudio es la cota -100 metros. Al igual que en la batimetría anterior, todas las cotas están referidas al cero del puerto de Motril y el sistema de coordenadas es UTM.

Para la realización de esta batimetría se usó una ecosonda modelo Reson 8101. Además se usan los siguientes equipos accesorios: sensor de movimiento para corregir los movimientos del barco que alteren los sondeos batimétricos, sistema de posicionamiento DGPS Omnistar y medidor de la velocidad del sonido en el agua para corregir la velocidad de desplazamiento de las ondas de la sonda. En este caso, a diferencia de la batimetría anterior, el mareógrafo se instaló en el puerto de Motril, en vez de en el propio barco.

- Estudio ecocartográfico del litoral de las provincias de Granada, Almería y Murcia (2008). Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Batimetría hasta la cota -50 metros de los litorales de Granada, Almería y Murcia. Para este informe se ha contado con la información correspondiente a la zona que abarca desde Almuñécar hasta la playa de Carchuna. En este caso, las cotas están referenciadas al nivel medio del mar en Alicante, ya que se trata de una batimetría general. A su vez las coordenadas están referenciadas al datum ED50.

La sonda multihaz utilizada en este caso es una Reson Seabat 8124, que además incluye un sonar de barrido lateral C-MAX 800. Otros equipos auxiliares utilizados fueron: un compensador de oleaje, giroscópica, un medidor de la velocidad del sonido, GPS diferencial corregido por satélite y otros. El nivel de detalle de esta batimetría es realmente alto. Se estima que de media se recogieron 30-40 puntos de sonda por metro cuadrado, llegando a 80-100 puntos en las zonas más someras (profundidades inferiores a 16 metros). De manera que se alcanza un alto nivel de representación del fondo marino, siendo apenas necesaria la interpolación.

## 3.2. Medidas

### 3.2.1. Batimetría propia

Con el fin de conocer la situación actual de la zona de estudio se realizó un levantamiento batimétrico Multihaz de la Playa de poniente de Motril, playa Granada, y playa de Salobreña desde el Guadalfeo al Peñón, así como el levantamiento topográfico de la playa y la toma de muestras del lecho marino en puntos determinados. La toma de datos fue realizada desde el día 18 de diciembre de 2014 hasta el 17 de enero de 2015.

Se utiliza la sonda Multihaz Interferométrica GeoSwath de Geoacoustics-Kongsberg con cobertura del 100 % de las zonas sondadas y una estación Total GPS Trimble 5700, con radio integrada.

La sonda GeoSwath Plus es un sistema de sonar batimétrico con medición de fase, también llamado Multihaz interferométrica. Simultáneamente obtiene datos de sonar de barrido lateral y una batimetría con cobertura total. Con su configuración de doble cabeza obtiene un ángulo de visión de más de 240°. La información de profundidad utilizable está limitada solo por la fuerza de la señal reflejada por el fondo marino y su absorción alcanzándose una cobertura lateral efectiva de 12 veces la profundidad bajo el transductor.

Cada cabeza tiene cinco elementos cerámicos, uno transmite y cuatro reciben. Cuando el elemento activo transmite la señal. Uno de los elementos receptores registra la amplitud de la señal reflejada por el lecho marino, adquiriendo datos de sónar de barrido lateral y los cuatro elementos simultáneos determinan, por diferencia de fase de la señal recibida, la dirección del punto donde se reflejó. En combinación con la distancia calculada por el tiempo transcurrido desde la emisión y la recepción resulta la medida de la profundidad (fig. 3.4a).

El algoritmo de la medición por fase determina la dirección de retorno del sonido con una resolución de ángulo de 0.03°. La distancia obtenida mediante diferencias de tiempo alcanza los milímetros de precisión. Los datos obtenidos lateralmente son más de 40 por metro lineal. Con estos valores se pueden asegurar los últimos requerimientos del estándar IHO para trabajos de batimetría.

El Software de registro utilizado fue el suministrado por el propio fabricante de la Sonda GS+, el filtrado de ruidos y datos se realizó también con el mismo software. Para la realización de este trabajo se contó con el software Holandés QINSy 8 desarrollado por QPS. Este programa es usado por los mayores dragadores del mundo y por equipos offshore de perforación petrolífera, teniendo una gran potencia en el proceso y postproceso de batimetría multihaz (fig. 3.4c).

La zona sondada se extiende desde la escollera del dique del puerto de Motril hasta el Peñón de Salobreña, hasta una profundidad de 50m y una separación de 1.000 m de la rompiente. Se Sonda un área de unas 700 Hectáreas.

Para iniciar los trabajos se transporta hasta Motril una embarcación de polietileno de 4 metros de eslora y un motor fueraborda de 6 caballos con soportes para las cabezas sónar de la sonda y el resto de periféricos, compensadores de movimiento, altímetro, sensor de rumbo y GPS (fig. 3.4b). Se realizaron tanto trabajos de batimetría con sonda como de topografía, estos últimos solo en la zona de Playa Granada. La campaña tuvo que ser dividida en dos etapas, por lo que fue necesario tomar medidas de la velocidad de propagación del sonido en la columna de agua mediante un SVP (Sound Velocity Profiler) con el fin de hacer las correcciones necesarias. Los resultados de los dos perfiles de velocidad obtenidos fueron

plenamente satisfactorios, con diferencias en los parámetros de corrección inferiores a un grado. Para corregir el nivel de la superficie, se descargaron los datos de marea directamente de la página web de Puertos del Estado y posteriormente se incorporaron a los datos de batimetría en bruto.

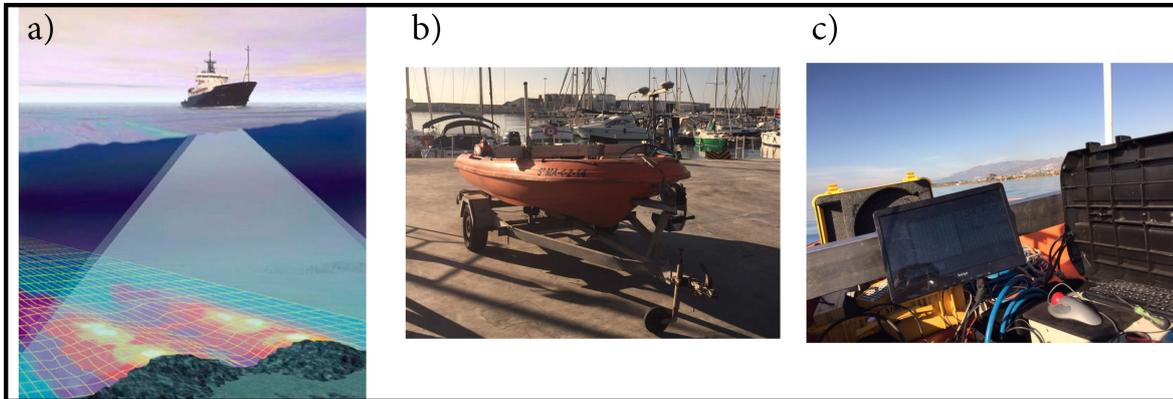


Figura 3.4: a) Esquema de funcionamiento de una sonda multihaz. b) Embarcación utilizada. c) Equipo de registro

Se utilizó una base de referencia Rtk Trimble 5700 que se fue ubicando en puntos previamente medidos y referenciados a la red geodésica nacional. El levantamiento se realiza con posicionamiento Rtk (Real Time Kinetic con precisión centimétrica). Una vez comprobado el ajuste planimétrico y de altitud, se realizó una calibración de los equipos acústicos y de sus ángulos de montaje. La construcción rígida y exacta de los componentes de los soportes garantiza el mantenimiento de las posiciones y ángulos entre los distintos dispositivos que conforman el sistema Multihaz: Cabezas sónar, sensor de movimientos MRU, y equipo de rumbo GPS, de manera que se pueda abatir volviendo siempre a la misma posición calibrada.

Las mareas se obtuvieron del mareógrafo de puertos del estado, al que se enlazaron las cotas de los puntos base suministrados. Las cotas de estos puntos están referidas al cero del IGN 0,412m por encima del hidrográfico del puerto de Motril.

La toma de datos de posición para la realización del levantamiento se hizo con un GPS centimétrico Rtk (Trimble SPS 751), de este mismo equipo se obtiene el PPS (pulso por segundo de sincronización); este receptor GPS recibe correcciones desde la base posicionada sobre los puntos de referencia previamente observados. El sistema de proyección empleado es el Universal Transversa Mercator (U.T.M), huso 30 norte. Los datos se toman en ED50, ya que es propuesto por el IGN para España y mediante medición topográfica se dan coordenadas WGS 84 a la base, calculadas en modo inverso a la medición del punto de referencia.

Para la medición de las coordenadas exactas de los puntos de apoyo del GPS base se partió del vértice geodésico Punta del Santo y del clavo del mareógrafo del puerto de Motril (MOT2). Para corregir las cotas se tuvo en cuenta que el cero del IGN se encuentra 0.412 m por encima del cero hidrográfico del puerto de Motril.

El GPS base se sitúa en tres puntos diferentes. El primero sobre el espaldón del puerto de Motril, coordenadas ED50:  $X= 453.526,892\text{m}$   $Y= 4.063.826,520\text{m}$   $Z=6,724\text{m}$ . Esta base se utiliza tanto para realizar sondeos como topografía. Posteriormente, se traslada la base al punto SA1, situado junto al bolardo central de inicio del paseo marítimo, coordenadas ED50  $X= 449.771,680$   $Y= 4.063.998,170$   $Z=2,096$  (ED50). Por último, se sitúa la base sobre el muro

de levante de la desembocadura del río Guadalfeo, coordenadas ED50: X= 448.412,320m Y= 4.064.562,418 m Z=3,720 m (Fig. 3.5).



Figura 3.5: Puntos de ubicación del GPS base

### 3.2.2. Topografía

Para completar la línea de costa en el año 2014, fueron realizados levantamientos topográficos en Playa Granada durante el mes de octubre de dicho año (Fig. 3.6). Para ello, se empleó un GPS Diferencial cuyas medidas presentaron errores menores a 2 cm. Previamente, se trasladaron las coordenadas del vértice geodésico 105582 Punta del Santo hasta la base de replanteo seleccionada, en la que se posicionó el GPS Base. El GPS Diferencial usado fue el modelo Javad Maxor GGD Movil, de precisión centimétrica en tiempo real, con GPS Y GPRS.

## 3.3. Análisis de datos y medidas

En este apartado, se describirán los trabajos realizados para el tratamiento de los datos y medidas descritos anteriormente, los cuales son necesarios para conseguir los objetivos fijados en este proyecto fin de carrera.

### 3.3.1. Evolución de la línea de costa

Para el estudio de la evolución de la línea de costa se reúnen todas las ortofotografías y se georreferencian al mismo sistema de coordenadas. Para ello, se usa el software de información

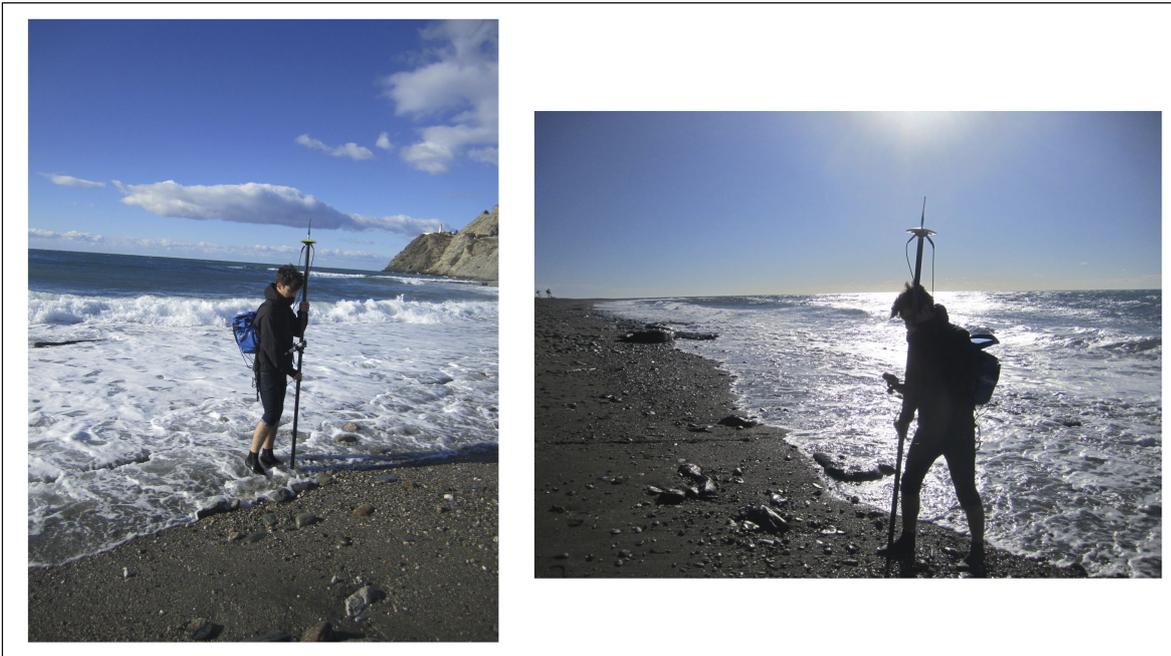


Figura 3.6: Medidas topográficas en Playa Granada

geográfica ArcGIS, el cual, mediante su calculadora geodésica interna, y los datos de la rejilla de transformación de datum oficial del IGN, es capaz de transformar capas raster (matriciales, como por ejemplo imágenes) en coordenadas ED50 y representarlas referenciadas al datum ETRS89 y viceversa.

Posteriormente, con la ayuda del mismo software se traza la línea de costa sobre cada una de las ortofotografías, obteniendo las diferentes capas shp reconocidas por el programa. Además, se obtienen los datos del informe de la demarcación provincial de puertos y costas en formato Autocad y se transforman al formato shp. También se incluyen los datos volcados de los levantamientos topográficos realizados para la medición de la línea de costa actual.

Por último, mediante la regla del trapecio se obtuvieron las diferencias de áreas y la tasa de variación en metros cuadrados por año para cada dos líneas sucesivas en el periodo 1999-2014. Estos cálculos se realizaron tanto para el volumen de control total como para los volúmenes de control parciales.

### 3.3.2. Evolución de la superficie construida

Para el seguimiento de la superficie construida en torno a la línea de costa, el primer paso fue definir un límite dentro de la parte terrestre del ámbito de estudio. Este límite se fijó en la paralela a 1.5 km a la posición media de la línea de costa en el periodo de estudio (figura 3.7). Esta línea, coincide en gran parte con la mínima distancia entre la carretera nacional N-340 y la costa.

Una vez fijado el ámbito terrestre del estudio, se marcaron sobre las ortofotografías descritas anteriormente los polígonos correspondientes a las parcelas que contuvieran algún tipo de construcción, contenidas dentro del límite. Posteriormente, se obtuvo el área total construida para cada año como suma de estos polígonos. Para esto se usó también el software ArcGIS.

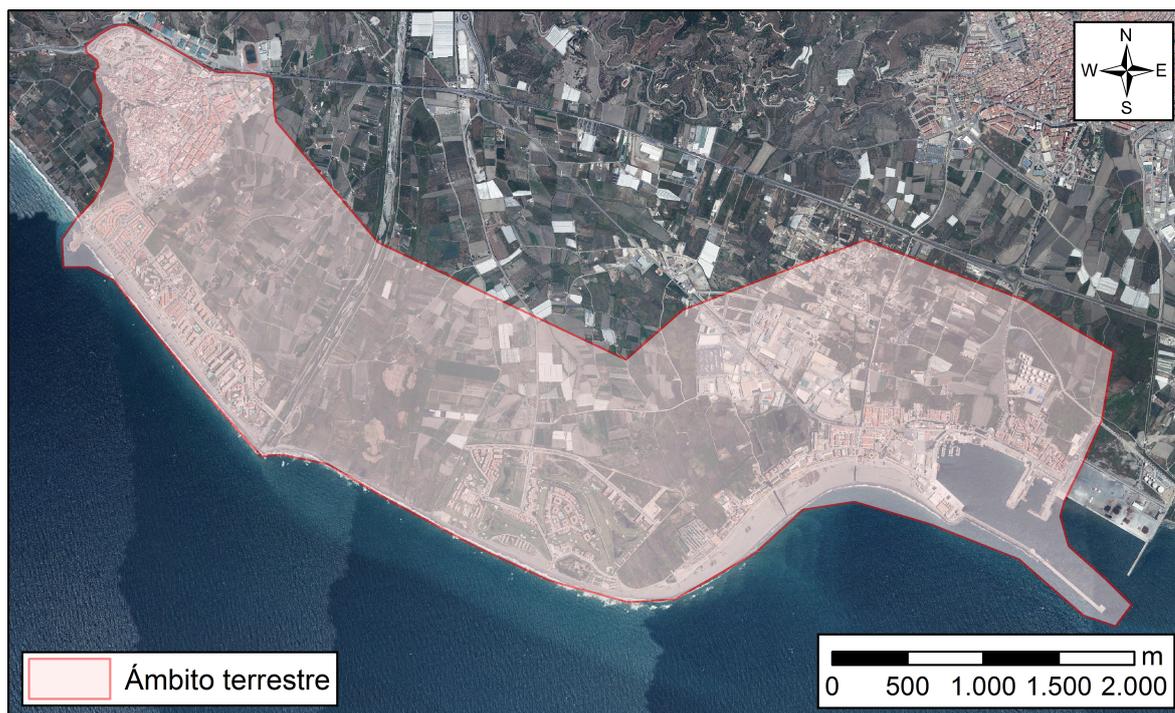


Figura 3.7: Límite terrestre de la zona de estudio

A partir de las áreas totales construidas se realizaron diferentes cálculos: diferencia de área entre cada par de años, tasa de crecimiento anual, etc.

### 3.3.3. Tratamiento de las batimetrías

Las batimetrías obtenidas se trataron mediante el software Autocad. Se completaron algunas zonas faltantes, sobre todo en la zona de la escollera del dique del puerto, y se corrigieron algunos pequeños fallos de interpolación.

La batimetría del Grupo de Ríos y Embalses (año 2004) se obtuvo en formato raster, como modelo digital de elevaciones. Por lo que previamente a su tratamiento, se obtuvieron las curvas batimétricas mediante interpolación con ArcGIS y posteriormente se trasladaron los datos a Autocad.

Tanto la batimetría del Ministerio de Medio Ambiente como la propia estaban referenciadas al datum ED50 mientras que el resto es referenciaban en WGS84. Por tanto, se procedió a trasladar de coordenadas las dos primeras, quedando todas en WGS84. Para ello de nuevo se usó el software ArcGIS y la rejilla oficial del IGN, al igual que ya se hizo con las ortofotografías.

Una vez homogeneizados los datos, mediante una rutina de Autocad (programada en el lenguaje Lisp, facilitada por el doctor Antonio Moñino Ferrando) se extrajo una nube de puntos en coordenadas xyz de cada una de ellas. En este punto fue necesario corregir las cotas obtenidas en la batimetría del año 2008, puesto que ésta se encontraba referida al nivel medio del mar en Alicante (cero general del IGN para toda España), mientras que el resto se encontraban referenciadas al nivel medio del mareógrafo del puerto de Motril. La diferencia de cota entre estos dos puntos es de 0.416m por lo tanto, fue necesario restar dicha cantidad

a cada una de las cotas. En la figura 3.8 podemos ver esquemáticamente la diferencia de cotas mencionada.

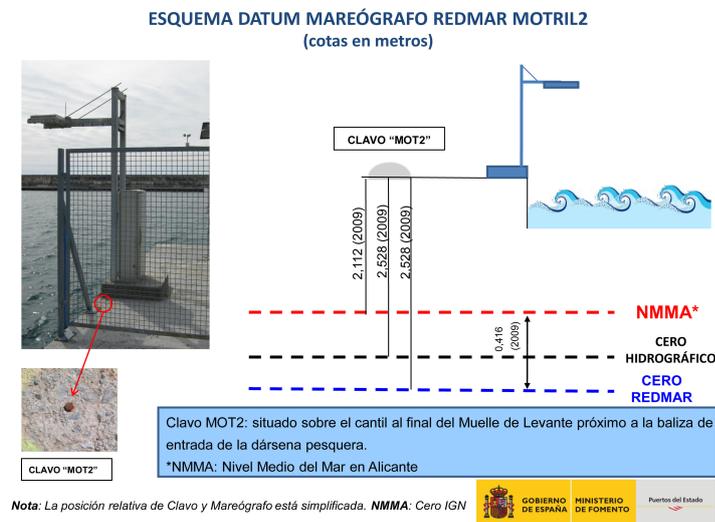


Figura 3.8: Esquema del datum del mareógrafo del Puerto de Motril. Fuente: Puertos del Estado

Dichos archivos xyz se trasladaron al software Surfer y se generó una malla .grd con la que se realizarían los cálculos con dicho programa.

### 3.3.4. Evolución del perfil de playa

Se obtuvieron para el estudio del perfil de playa un total de 122 perfiles para las cuatro batimetrías. En la figura 3.9 vemos su situación. Fijadas las coordenadas de la cabecera y el pie de cada uno de los perfiles, se trasladaron al programa Surfer y se extrajeron los datos de elevación.

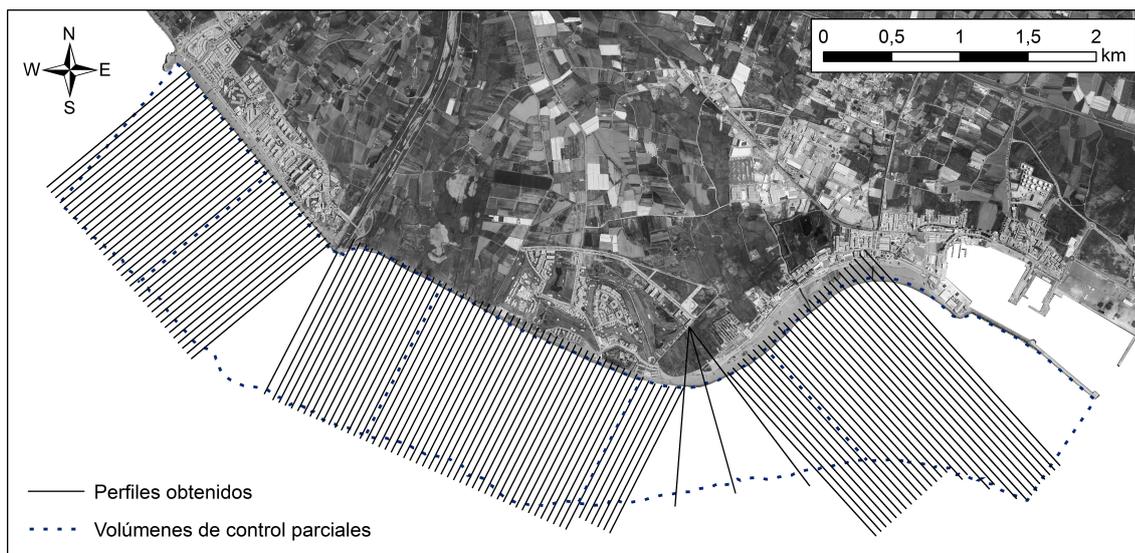


Figura 3.9: Situación de los perfiles estudiados

### 3.3.5. Cálculo de volúmenes

Se calcularon los volúmenes de sedimento dentro de dicho volumen de control mediante la regla del trapecio y el software Surfer, tanto para el volumen de control total, como para los parciales. Finalmente, se incorporaron al análisis todas las aportaciones artificiales de sedimentos (regeneraciones) llevadas a cabo durante el periodo de estudio.

## 3.4. Modelo numérico

El modelo numérico que se ha empleado para la propagación del oleaje es el Delft3D.

La elección de este modelo numérico concreto viene motivada porque se ha comprobado que reproduce bien el comportamiento de la costa en otras zonas de Andalucía. Ha sido calibrado y validado con éxito en trabajos en zonas cercanas como la Playa de Carchuna (Ortega-Sánchez et al. (2014)). En todos estos trabajos se han conseguido resultados satisfactorios usando como modelo Delft3D y nos servirán como referencia en las simulaciones llevadas a cabo en este proyecto. Además, el Delft3D se adapta perfectamente a nuestras necesidades, entre otras: la necesidad de un código que trabaje tanto en aguas profundas como someras para estudiar la propagación del oleaje desde su generación hasta la costa; que tenga en cuenta los procesos físicos de disipación de energía, reflexión, refracción, interacciones no lineales, etc. y lo más importante, se trata de un software libre.

Este modelo fue desarrollado por la Universidad tecnológica de Delft, en Países Bajos, con el objetivo de estimar las características del oleaje en zonas costeras, estuarios, lagos, canales, islas, etc. generados por vientos locales y corrientes ambientales.

Este software alberga varios módulos, en este proyecto se han utilizado dos: el módulo WAVE para propagar los oleajes medidos en el punto WANA hasta la costa y el módulo FLOW para simular una descarga de sedimentos desde el río.

### 3.4.1. Módulo WAVE

El módulo WAVE del Delft3D se basa en el modelo numérico SWAN (Simulation Waves Nearshore). En SWAN el oleaje es descrito mediante el espectro bidimensional de densidad de acción  $N(\sigma, \theta)$  en lugar del espectro de densidad de energía  $E(\sigma, \theta)$ . Por tanto la evolución de la energía del oleaje es descrita por la ecuación espectral de balance de la acción,  $N(\sigma, \theta)$  a partir de condiciones arbitrarias de viento, corrientes y batimetría, siendo  $\theta$  la frecuencia y  $\sigma$  la dirección de propagación. Esto es debido a que, en presencia de corrientes, la densidad de acción se conserva mientras que la densidad de energía no (Whitham (2011)).

La densidad de acción es igual a la densidad de energía dividida por la frecuencia relativa  $N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$ .

En su forma general, esta ecuación de conservación de la acción se presenta :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\sigma N)}{\partial \sigma} \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (3.1)$$

(Hasselmann et al. (1973))

El primer término de la parte izquierda representa la evolución local a lo largo del tiempo de la densidad de acción, el segundo y el tercer término representan la propagación de  $N(\sigma, \theta)$

en el espacio geográfico (con velocidades de propagación  $c_x$  y  $c_y$ ), el cuarto término representa los cambios de la frecuencia relativa debido a las variaciones de la batimetría y las corrientes (siendo  $c_\sigma$  la velocidad de propagación en el espacio  $\sigma$ ). El quinto término representa la refracción del oleaje producida por los cambios de profundidad y corrientes (con velocidad de propagación  $c_\theta$  en el espacio  $\theta$ ).

El término de la derecha ( $S = S(\sigma, \theta)$ ) es el término fuente de energía y es representado como la superposición de varios términos fuente:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds,w} + S_{ds,br} + S_{ds,b} \quad (3.2)$$

- $S_{in}$ : Transferencia de energía al oleaje debida al viento.
- $S_{nl}$ : Interacciones no lineales entre olas.
- $S_{ds,w}$ : Disipación de energía en aguas profundas debidas al White-capping.
- $S_{ds,br}$ : Término debido a la rotura por disminución de la profundidad.
- $S_{ds,b}$ : Disipación de energía por fricción con el fondo.

La formulación detallada de las ecuaciones del modelo se encuentra en el apéndice A.1.

### 3.4.2. Módulo FLOW

El módulo Delft3D-FLOW proporciona la base hidrodinámica al resto de módulos del programa, en concreto al WAVE. Permite simular el flujo y el transporte de sedimentos en aguas someras resultado de las mareas y/o forzamiento meteorológico teniendo en cuenta los siguientes procesos físicos:

- Gradientes en la superficie libre debido a los efectos barotrópicos.
- Efecto coriolis por la rotación de la tierra.
- Agua con densidad variable.
- Forzamientos de marea en contornos abiertos.
- Modelos de turbulencia.
- Efectos producidos por la tensión cortante que genera el viento sobre la superficie libre del mar.
- Esfuerzos cortantes sobre el fondo.
- Presión atmosférica sobre la superficie del mar variable en el espacio y el tiempo.
- Fuerzas generadas por las mareas.

El Delft3D-FLOW resuelve el sistema de ecuaciones formado por: La ecuación de la continuidad (conservación de masa), las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento, la ecuación del transporte y el problema de cierre turbulento.

### 3.4.3. Propagación del régimen medio

#### 3.4.3.1. Datos de entrada

##### Línea de costa

La línea de costa se creó mediante Autocad, partiendo de las medidas topográficas realizadas para este proyecto. Se dibujó usando la herramienta polilínea y posteriormente se exportaron las coordenadas xyz de cada punto para importarlas en el Delft3D. En la figura 3.10 podemos ver el resultado.

##### Malla

La malla es la discretización del dominio físico para la propagación del oleaje y modelado hidrodinámico. El diseño de la malla es un proceso que debe basarse en la experiencia y en el ensayo-error, siendo individualizada para cada caso.

Los criterios empleados para la definición de la malla fueron:

- Asegurar un buen anidamiento de las mallas, evitando que se inunden zonas de tierra seca.
- Evitar vértices que concentren mucha energía y que puedan impedir una buena propagación del oleaje.
- Orientar la malla correctamente para que abarque el oleaje predominante.

Finalmente se definieron dos mallas: una exterior y otra interior más pequeña anidada dentro de la anterior para dar mayor precisión a la zona más cercana a la costa, donde los procesos de erosión son más importantes y, por tanto, nos interesa conocer con mayor exactitud el comportamiento del oleaje. En la figura 3.10 podemos ver la situación de estas dos mallas.

##### Malla exterior

Esta malla cubre tanto la zona de aguas profundas como la de profundidades reducidas dentro de la zona de estudio.

Se compone de cuatro contornos, uno de ellos está en la zona de tierra y los otros tres cubren la totalidad del oleaje proveniente de las direcciones Este y Oeste principalmente y también, aunque en menor medida, la dirección Sur. La longitud de estos contornos es, aproximadamente: 4920 metros el contorno oeste, 9600 metros el sur y 2870 metros el este. En cuanto a las profundidades, la mayor alcanzada es 218 metros en la zona más alejada de la costa.

Para la resolución de la malla hay que distinguir entre la zona de mayores profundidades donde la resolución de la malla oscila alrededor de los 160 x 60 m, y la zona de aguas más someras donde oscila alrededor de 92 x 60 m.

##### Malla interior

La malla interior, situada como ya hemos dicho en la zona más cercana a Playa Granada, tiene una resolución de aproximadamente 24 x 14 metros.

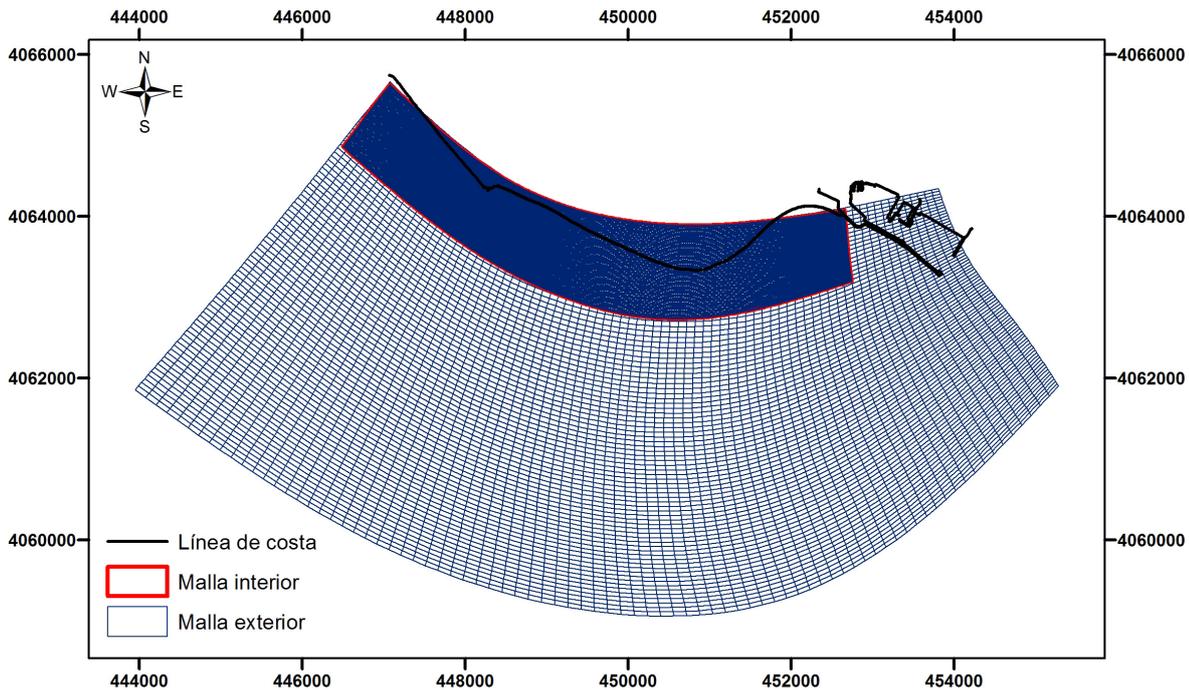


Figura 3.10: Definición de la línea de costa y las dos mallas anidadas

### 3.4.3.2. Batimetría

Para que el modelo interpole la malla y le asigne a cada nodo un valor de profundidad se han usado las siguientes batimetrías:

- Batimetría propia realizada en el año 2014. Esta batimetría ya fue descrita en el apartado 3.2. Esta batimetría se ha usado para cubrir la zona de aguas más someras, hasta la batimétrica de profundidad 50 metros.
- Batimetría del Grupo de Ríos y Embalses de la Universidad de Granada (2004). Esta batimetría también fue descrita anteriormente en el apartado 3.1. De esta batimetría se han obtenido los datos correspondientes a la zona intermedia, desde la profundidad 50 m hasta la profundidad 100 m aproximadamente.
- Batimetría dibujada a partir de cartas náuticas. La carta náutica empleada es la del Instituto Hidrográfico de la marina. De esta se ha obtenido la zona más profunda, entre los 100 y los 220 metros de profundidad.

Estas tres batimetrías se han combinado en Autocad para posteriormente exportar a un archivo de texto a las coordenadas X, Y, Z de cada punto para poder importarlo a Delft3D y asignar a cada celda de la malla una profundidad.

El resultado final lo podemos ver en la figura 3.11

### 3.4.3.3. Archivo Wavecon

Este archivo contiene los datos a propagar. Consiste en un archivo de texto formado por ocho columnas:

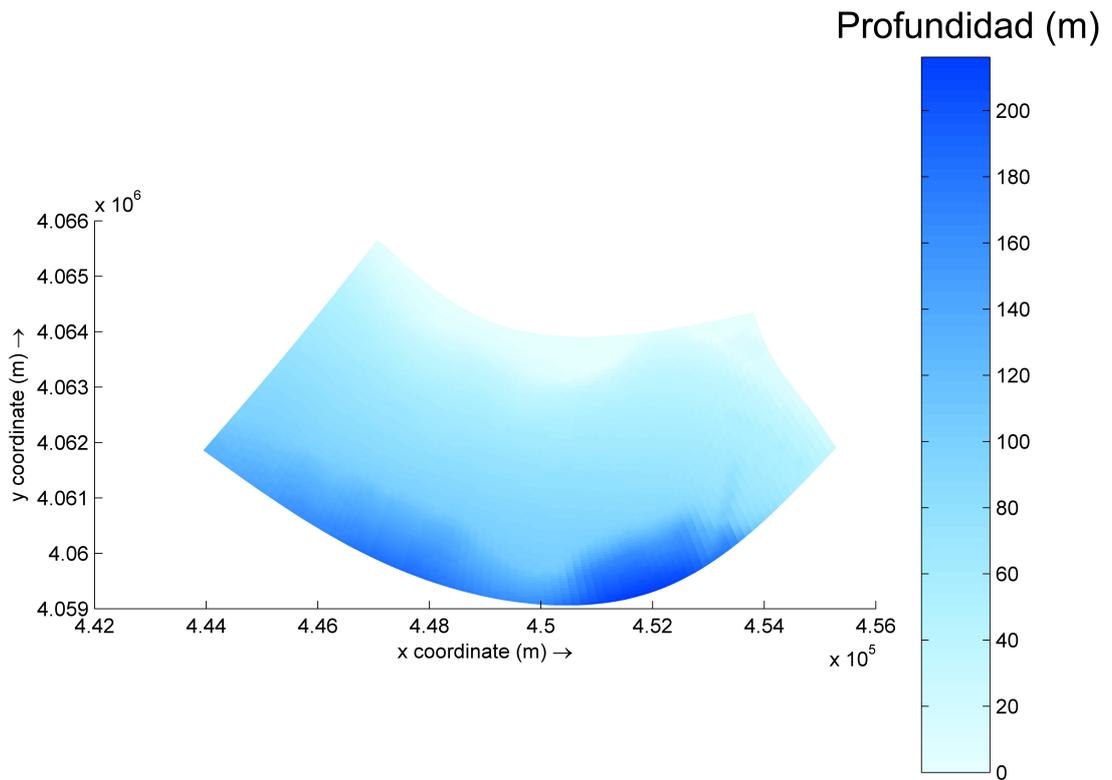


Figura 3.11: Batimetría interpoladas por Delft3D

- Tiempo
- Altura de ola significativa ( $H_s$ )
- Periodo Pico ( $T_p$ )
- Dirección de procedencia del oleaje ( $\theta$ )
- Dispersión ( $ms$ )
- Nivel de la superficie libre ( $wl$ )
- Velocidad del viento ( $V_v$ )
- Dirección de procedencia del viento ( $\theta_v$ )

#### 3.4.3.4. Parámetros del modelo

Para una descripción detallada de cada uno de los parámetros del modelo véase el apéndice A .

### 3.4.3.5. Parámetros Calibrados

El modelo ha sido calibrado y validado mediante las medidas tomadas en una campaña de campo de 49 días de duración. Estos datos de oleaje fueron tomados desde el 19 de diciembre de 2014 hasta el 6 de febrero de 2015 mediante tres instrumentos de medidas hidrodinámicas (Figura 3.12). Se compararon las alturas de ola medidas por los instrumentos durante la campaña y las alturas equivalentes propagadas con Delft3D para las mismas localizaciones. La correlación entre los resultados del modelo y las medidas de campo se evaluaron mediante un coeficiente de determinación. Si consideramos que  $h$  son los datos medidos y  $\hat{h}$  los datos estimados en  $N$  puntos discretos:

$$R^2 = \left( \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \frac{(h - \bar{h})(\hat{h} - \bar{\hat{h}})}{\sigma_h \sigma_{\hat{h}}} \right)^2 \quad (3.3)$$

Donde  $\sigma_h$  y  $\sigma_{\hat{h}}$  son la desviación estándar de los datos medidos y estimados respectivamente. La barra superior indica valores medios. Los rangos de correlación van desde 0 (no existe correlación) hasta 1 (correlación fuerte).

Finalmente, se obtiene un coeficiente  $R^2$  igual o mayor a 0.86.

Los datos finalmente introducidos se indican a continuación:

#### PARÁMETROS FÍSICOS

- **Rotura inducida por el fondo:**

Alpha: 1

Gamma: 0.73

- **Interacciones triádicas no lineales:**

Alpha: 0.1

Gamma: 2.2

- **Fricción del fondo:**

Modelo: Collins

Coefficiente de fricción: 0.02

- **Difracción:**

Activada

Coefficiente de suavizado: 0.6

Pasos de suavizado: 900

- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen

- **Constantes:**

Gravedad: 9.81  $m/s^2$

Densidad del agua: 1025  $Kg/m^3$

Norte: 90° (Coordenadas náuticas)

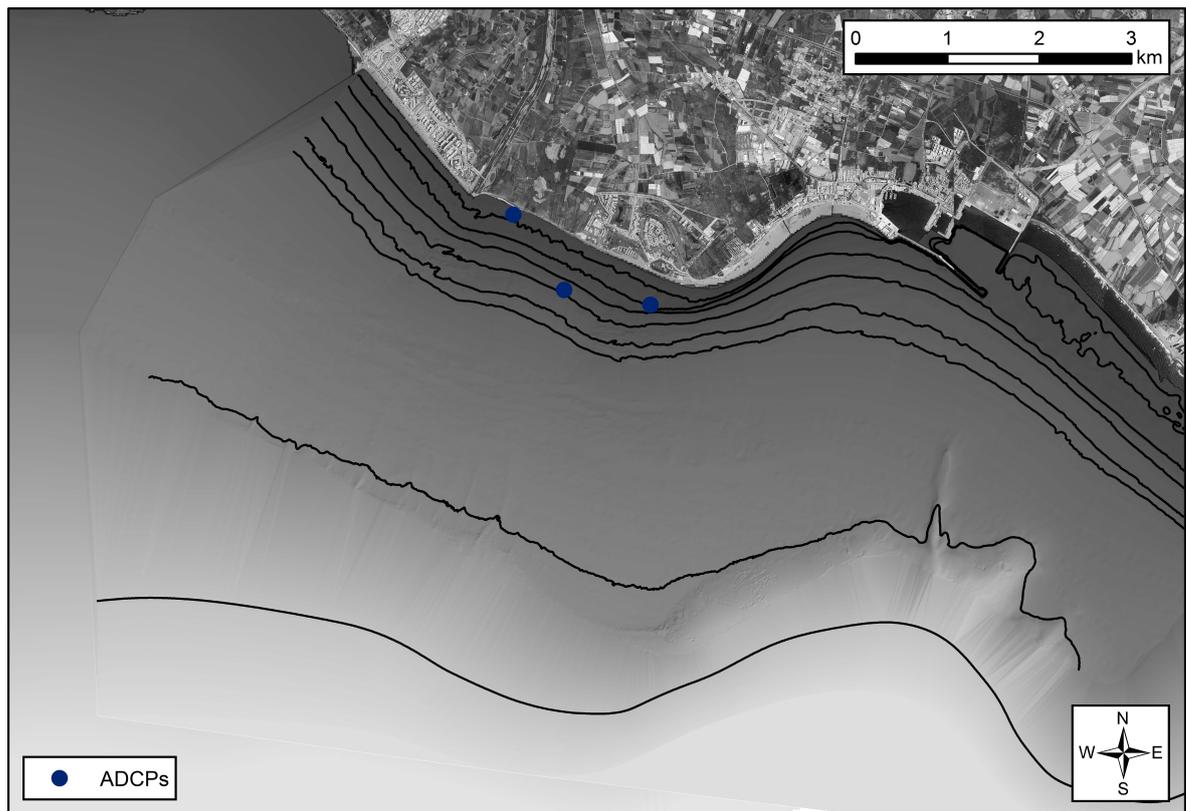


Figura 3.12: Situación de los instrumentos de medida

#### 3.4.3.6. Análisis del régimen medio

Se calcula el régimen medio propagado a aguas someras con el fin de estudiar como influye el forzamiento del oleaje en la evolución del perfil de playa. Para ello, se han fijado una serie de puntos de control asociados a los perfiles. Concretamente, se ha escogido en cada perfil de los obtenidos los puntos de profundidad 4, 8, 16 y 32 metros.

El análisis del régimen medio implica tener los 182956 estados de mar del punto WANA en diferentes puntos de control definidos a lo largo de la zona de estudio. Propagar todos los estados de mar supone un alto coste computacional, por tanto el procedimiento a seguir es:

1. Se seleccionan los estados de mar más representativos de todo el registro del punto WANA (200 estados de mar). Para ello, en primer lugar se analizan las tablas (tablas cruzadas) para sacar los estados de mar más frecuentes. En segundo lugar se añaden algunos estados de mar para tener una representación completa de todo el registro del punto WANA, para poder interpolar posteriormente.
2. Los estados de mar seleccionados se dividen en dos grupos en función de la dirección de procedencia: W y E para facilitar la propagación mediante Delft3D.
3. Se crea un archivo wavecon para cada uno de los grupos y se propaga desde el punto WANA a los puntos de control de los perfiles con el módulo WAVE de Delft3D.
4. Se programa una rutina en Matlab para que:

- Lea los archivos de salida del programa (estados de mar propagados) de cada uno de los dos grupos.
- Junte los dos grupos en un archivo único que contenga los 200 estados de mar propagados.
- Pregunte en que punto de control queremos realizar la interpolación de los datos.
- Empleando una función de Matlab “interp3D” se interpolan los 182956 datos a partir de los 200 propagados, teniendo todos los datos propagados en el punto de control elegido.
- Repita el proceso para todos los puntos de control dónde se deseen analizar el régimen medio.

#### 3.4.4. Evolución de la propagación del oleaje

Además de la propagación del régimen medio, el módulo WAVE del modelo Delft3D se ha usado para realizar una comparativa en la propagación del oleaje entre las distintas batimetrías de las que se disponía.

Los datos de entrada para el modelo fueron los mismos que se describieron anteriormente, salvo en el caso de las batimetrías. Se realizaron tres batimetrías más colocando en la zona de aguas más someras (desde la batimétrica 0 a la -50 m) cada una de las otras batimetrías disponibles, descritas en el apartado 3.1.4: 1999, 2004 y 2008.

Una vez ya interpoladas las 3 batimetrías nuevas que se unían a la ya utilizada en la propagación del régimen medio, se seleccionaron los dos estados de mar más comunes de cada una de las dos direcciones principales de procedencia de oleaje. Se tomó un estado correspondiente a condiciones medias y otro correspondiente a condiciones de tormenta. Los estados introducidos finalmente los podemos ver en la tabla 3.1.

Hs (m)	T (s)	$\theta$ (°)
3.125	8.5	112.5
0.375	4.5	112.5
3.125	8.5	247.5
0.375	4.5	225

Tabla 3.1: Estados de mar usados en la comparación de la propagación del oleaje

Estos estados de mar se añadieron en un archivo wavecon y se propagan con el módulo WAVE del Delft3D usando cada una de las 4 batimetrías obtenidas. Se tomaron puntos de control en las profundidades -4 m y -8 m de la batimetría de 1999. Finalmente, se representaron los datos de altura de ola y dirección en esos mismos puntos en cada batimetría con el fin de observar los cambios producidos en la propagación del oleaje a lo largo del periodo de estudio.

#### 3.4.5. Descarga fluvial

Por último, se realiza una simulación de una descarga intensa de sedimentos del río Guadalfeo a través del módulo FLOW del propio Delft3D. A continuación describimos los datos de entrada al modelo

## Malla

Aunque el módulo FLOW no permite el anidamiento de mallas, si permite la unión de dos mallas anexas mediante la herramienta DDBoundarie. Con esta herramienta podemos llevar a cabo una simulación en el módulo FLOW en dos mallas como si estas se trataran de una sola.

En este caso las mallas solo cubren la zona más cercana al delta. De nuevo se define una malla exterior más gruesa que va desde la zona de aguas profundas hasta cerca de la costa, y una malla más fina en la zona del cono del delta con el fin de estudiar con más detalle la descarga de sedimentos del río. La figura 3.13 muestra la situación de ambas mallas.

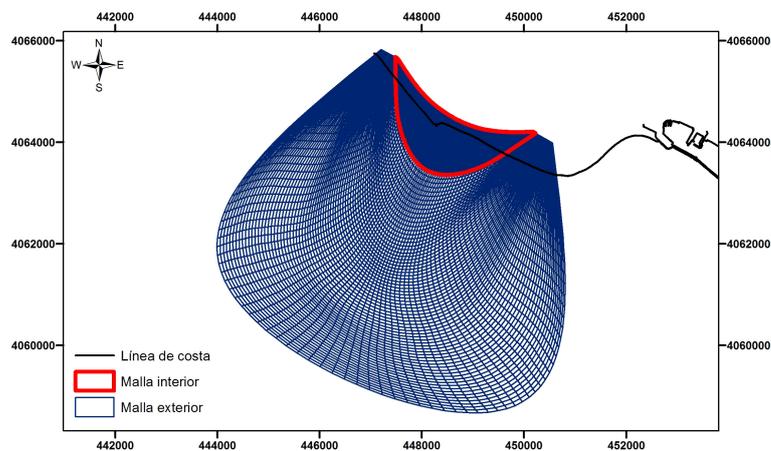


Figura 3.13: Definición de la línea de costa y las dos mallas anexas

## Malla exterior

Esta malla cubre desde la zona de aguas profundas hasta el cono del delta del Guadalfeo.

De los cuatro contornos que componen la malla, dos se sitúan en la zona de tierra. De los otros dos, uno limita con la malla interior y el otro cubre todas las direcciones desde las que la marea entra en el sistema: Este, Sur y Oeste. La longitud de esta última frontera es de unos 20 km aproximadamente. La mayor profundidad alcanzada es de 218 m.

La resolución de la malla va desde 250 x 50 m en la zona más alejada de la costa hasta los 50 x 100 m en la zona más cercana.

## Malla interior

Esta malla cubre el cono del delta del Guadalfeo y su resolución es de 13 x 33 m.

### 3.4.5.1. Batimetría

Se usa la misma batimetría que se utilizó para la propagación del regimen medio. El resultado de la interpolación se representa en la figura 3.14

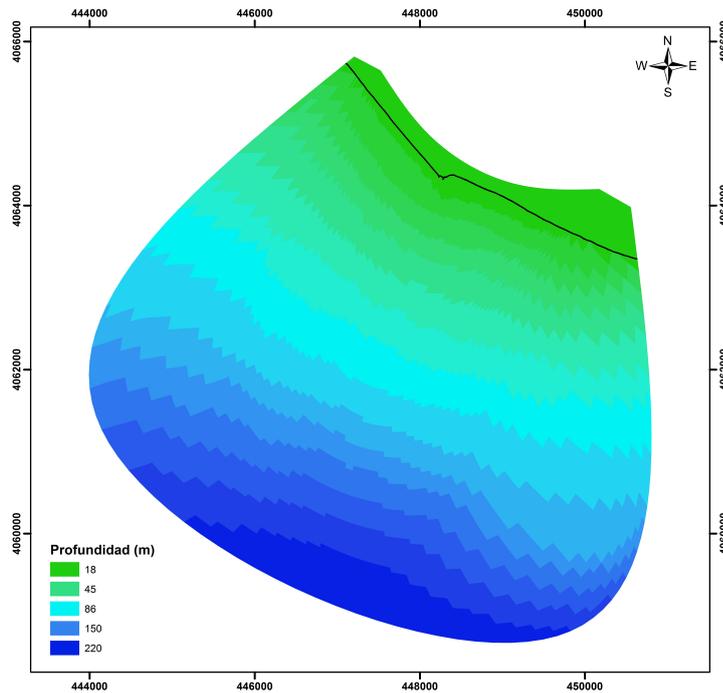


Figura 3.14: Batimetría usada en el modulo FLOW de Delft3D

### 3.4.5.2. Parámetros del modelo

Para una descripción detallada de cada uno de los parámetros del modelo véase el apéndice A.

Los datos introducidos en el modelo se han obtenido de trabajos en zonas cercanas como la playa de Carchuna (Ortega-Sánchez et al. (2014)). En estos trabajos los resultados han sido aceptables por lo que es esperable que también lo sean en el caso de este proyecto fin de carrera.

### 3.4.5.3. Simulación de la descarga fluvial

Se simula mediante el módulo FLOW de Delft3D la descarga de sedimento acontecida entre el 21 y el 31 de diciembre de 2009. Se han simulado dos casos, correspondientes a los dos escenarios natural y real analizados en el análisis de caudal.

Una vez simulados, se extraen los datos de concentración de sedimento y de sedimentación/erosión acumulada mediante la herramienta QUICKPLOT del propio Delft3D.

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Análisis de clima marítimo

#### 4.1.1. Descripción general del clima marítimo en profundidades indefinidas

Vamos a realizar, en primer lugar, un análisis general de las características del clima marítimo de la zona en profundidades indefinidas. La serie temporal escogida se corresponde con el periodo de estudio 1999-2014. A continuación presentamos los siguientes gráficos:

- Serie temporal de la altura de ola significativa ( $H_s$ ) para el periodo 1999-2014.
- Histograma para  $H_s$
- Serie temporal del periodo de pico ( $T_p$ ) para el mismo periodo.
- Histograma para  $T_p$
- Histograma de la dirección media de procedencia del oleaje
- Rosa de oleaje
- Serie temporal de la velocidad del viento ( $V$ ) para el mismo periodo que los anteriores
- Histograma para  $V$
- Histograma de la dirección media de procedencia del viento
- Rosa de viento
- Serie temporal de las sobreelevaciones debidas a la marea astronómica. Periodo 2007-2014.
- Serie temporal de las sobreelevaciones debidas a la marea meteorológica para el mismo periodo.

En la figura 4.1 podemos ver que los valores máximos de la altura de ola significativa en este periodo se encuentran en torno a las 4.5 - 5.5 m. Si consideramos cada uno de los periodos de estudio por separado (1999-2004, 2004-2008 y 2008-2014), observamos que el último de ellos estuvo sometido a un mayor número de tormentas (eventos con  $H > 3$  m durante al menos 12 h.), produciéndose eventos con altura de ola en indefinidas mayor de 4 m hasta en 7 ocasiones. Por el contrario, en el periodo 2004-2008 solo observamos un evento de estas características y en el periodo 1999-2004 dos.

Si observamos la figura 4.2 vemos que aproximadamente el 77% de las alturas de ola registradas en el periodo de estudio fueron menores de 1 m. Entre 1 y 2 m encontramos el 18% de los registros y entre 2 y 3 m el 4%. Por tanto, las alturas de ola de tormenta (mayores de 3 m) representan el 1% del total de los registros.

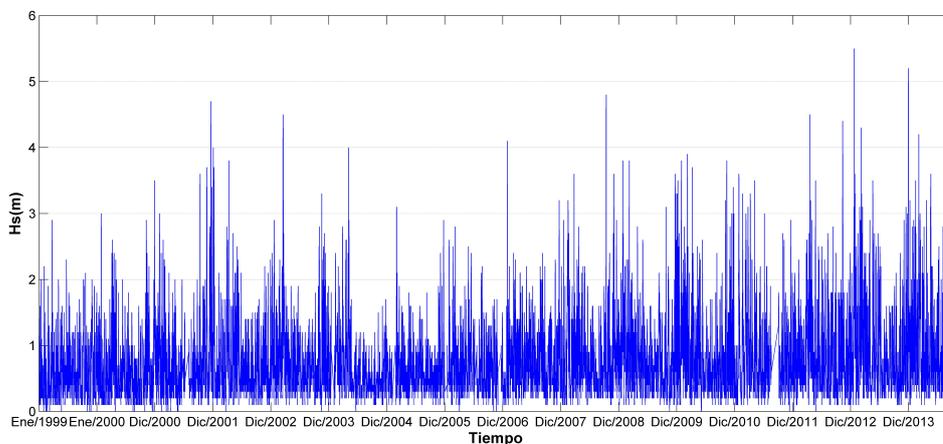


Figura 4.1: Serie temporal Hs. Periodo 1999-2014

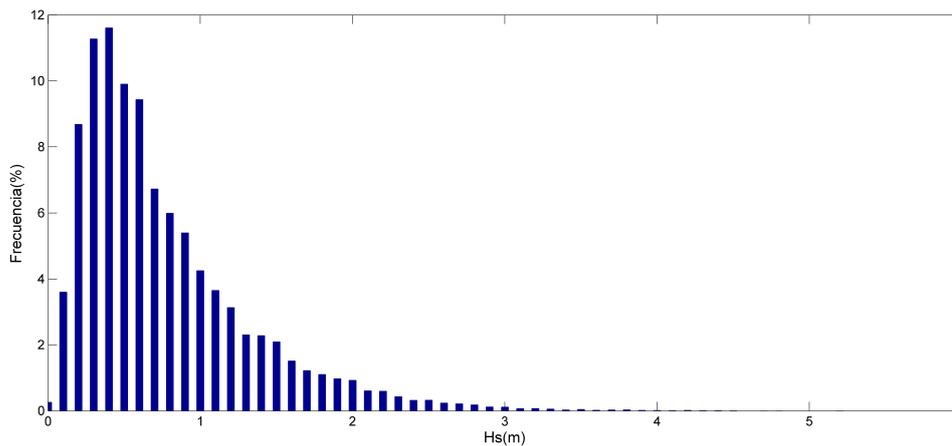


Figura 4.2: Histograma Hs

Los valores máximos para el periodo de pico se encuentran cercanos a los 14 s (Fig. 4.3). Si separamos por periodos, vemos que entre 1999-2004 se producen periodos largos (mayores de 12 s) hasta en 7 ocasiones, superándose en una ocasión los 14 s. Sin embargo, en el periodo 2004-2008 solo se superan los 12 s una vez y entre 2008 y 2014 solo en dos ocasiones.

El 52 % de los registros del periodo de pico se encuentran entre 4 y 6 s. Menores de 4 s tenemos el 26 % y mayores de 6 s el 22 % (Fig. 4.4).

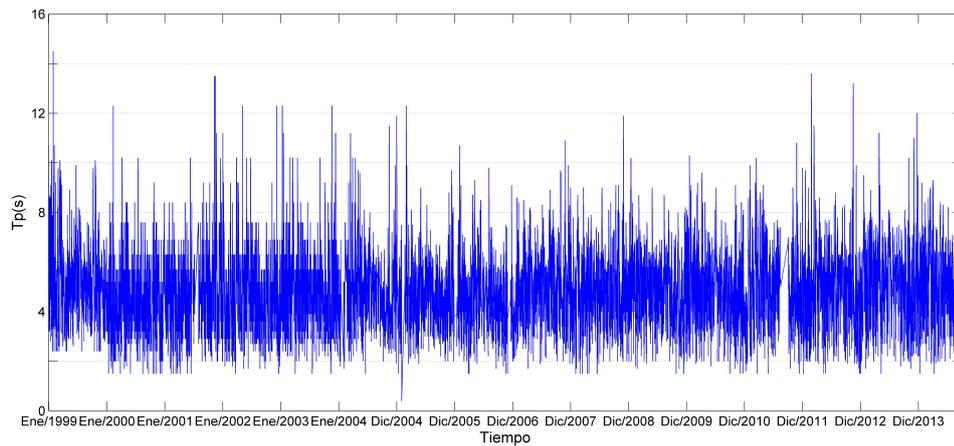


Figura 4.3: Serie temporal  $T_p$ . Periodo 1999-2014

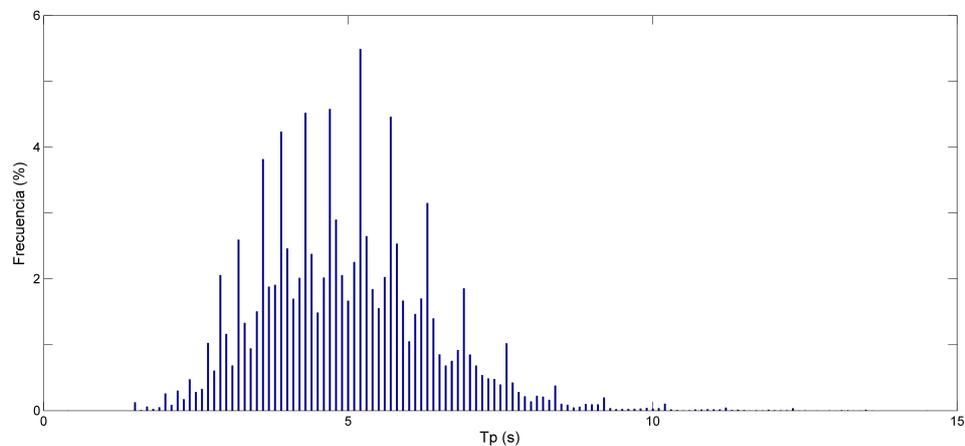


Figura 4.4: Histograma  $T_p$

Una vez analizados los resultados de altura significativa y periodo de pico podemos concluir que la zona de estudio se encuentra normalmente afectada por oleajes de bajo contenido energético.

Las direcciones de procedencia del oleaje más frecuentes fueron SO-O y E-SE (Fig. 4.5). Como veremos en el desarrollo del proyecto, esta bidireccionalidad del oleaje condiciona de manera importante el funcionamiento del sistema.

En la figura 4.6 se representa una correlación de la función de densidad de las alturas de ola junto con la dirección de procedencia del oleaje. Podemos ver que, aunque tenemos eventos extremos en las dos direcciones principales, la mayoría de ellos se asocian a las direcciones O-SO.

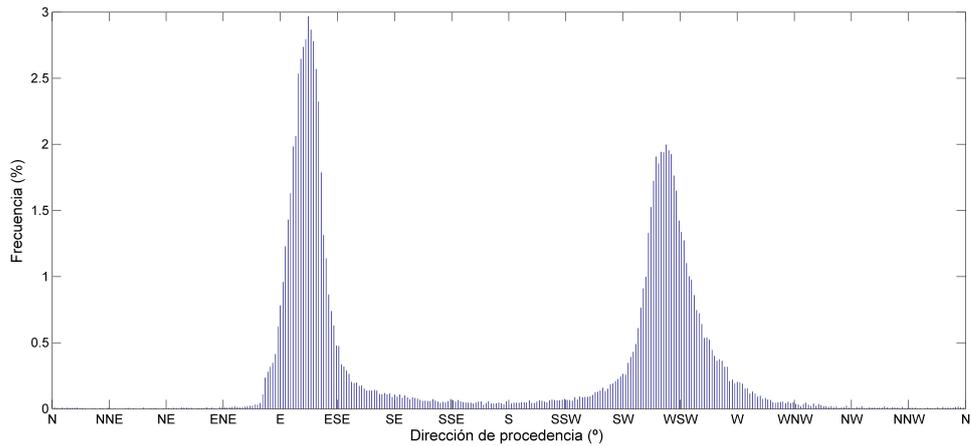


Figura 4.5: Histograma dirección media de procedencia del oleaje

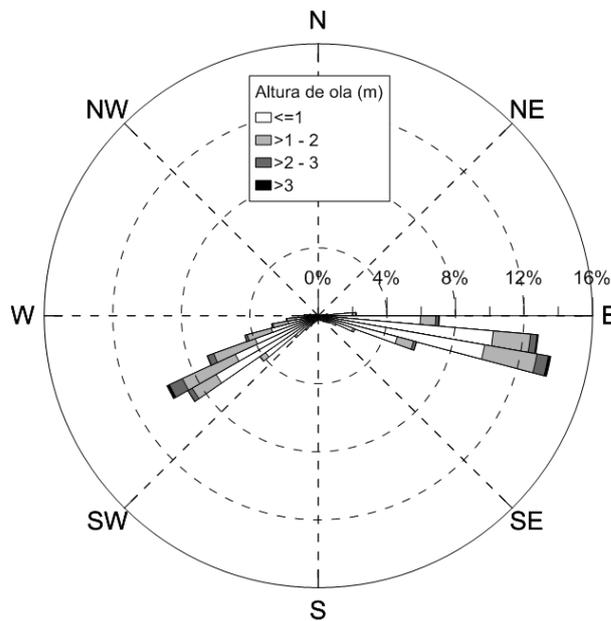


Figura 4.6: Rosa de oleaje

Los mayores valores de velocidad del viento alcanzaron los 22 m/s y se produjeron en el periodo 2008-2014 (Fig. 4.7). Es de destacar que tan solo se superan los 20 m/s en este último periodo, mientras que en los periodos de 1999-2004 y 2004-2008 los valores máximos se quedan entorno a los 17 m/s.

El 89 % de los registros de velocidad de viento son inferiores a 10 s (Fig. 4.8). Entre 10 y 15 m/s tenemos un 10 % superando los 15 m/s tan solo el 1 % de los registros.

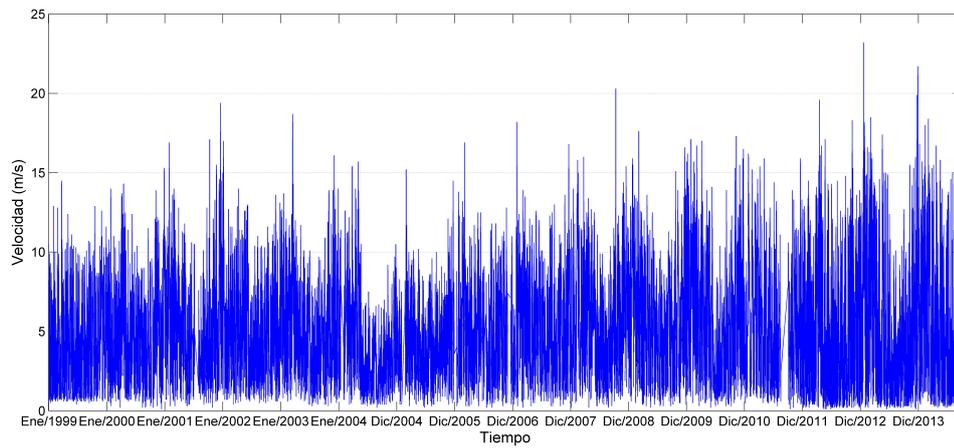


Figura 4.7: Serie temporal V. Periodo 1999-2014

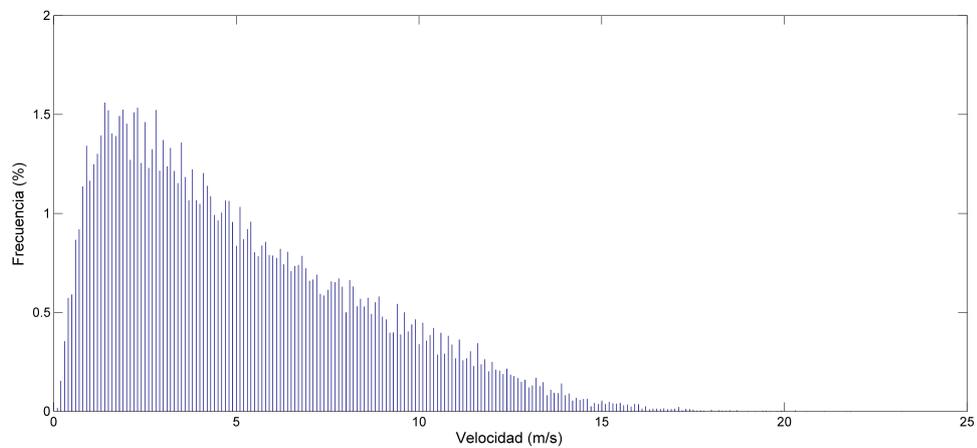


Figura 4.8: Histograma V

Al igual que en el oleaje, podemos observar que el viento tiene una clara componente bidireccional E-SE y O-SO (Fig 4.9). La figura 4.10 es equivalente a la 4.6, en este caso se relacionan la velocidad del viento con la dirección de procedencia de este. Vemos que los valores extremos de viento provienen, normalmente, del oeste.

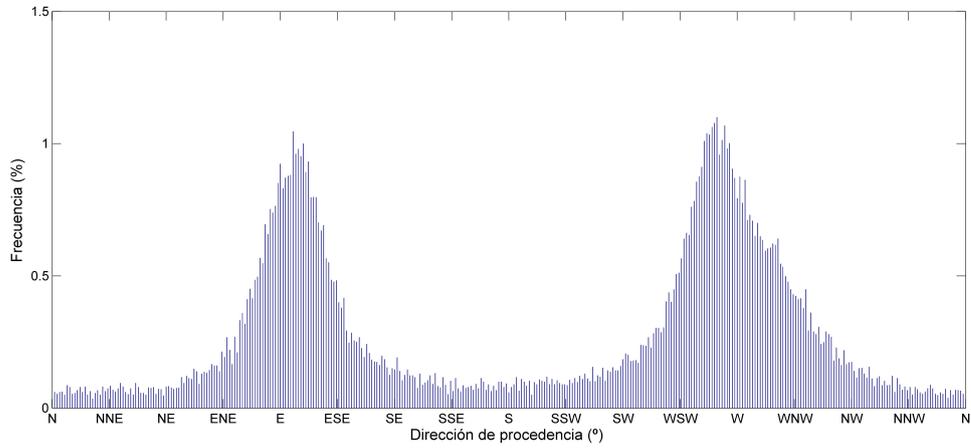


Figura 4.9: Histograma dirección media de procedencia del viento

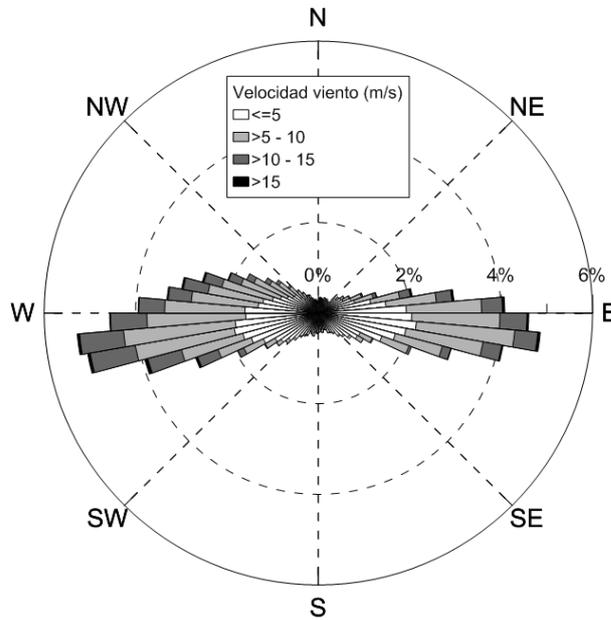


Figura 4.10: Rosa de viento

Por último, en las figuras 4.11 y 4.12 se representan las elevaciones en torno al nivel medio del mar debidas a la marea astronómica y a la marea meteorológica. La carrera de marea astronómica durante el periodo de estudio fue de aproximadamente 0.8 m., mientras que los valores máximos y mínimos de sobreelevación debida a marea meteorológica fueron 0.34 y -0.35 m, respectivamente.

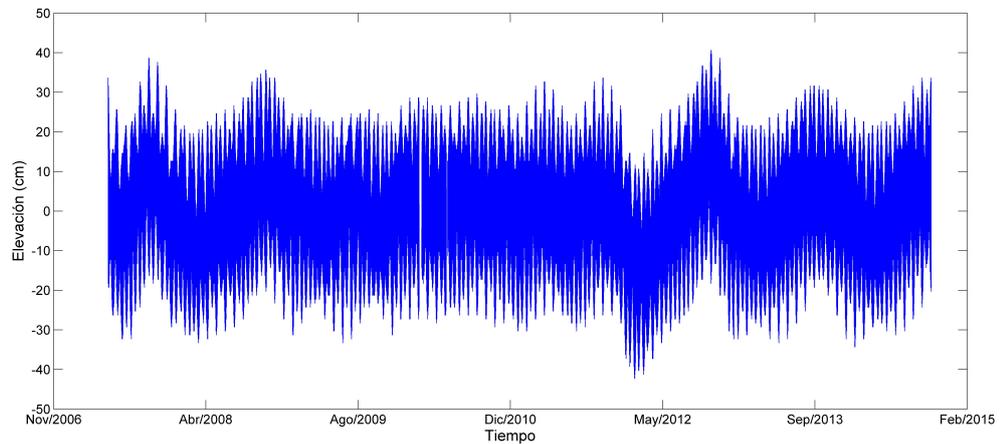


Figura 4.11: Serie temporal de las elevaciones debidas a la marea astronómica

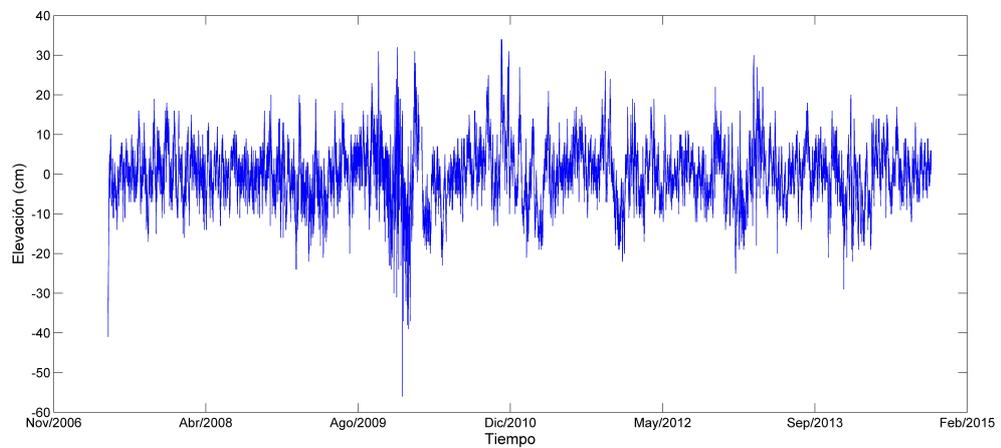


Figura 4.12: Serie temporal de las elevaciones debidas a la marea meteorológica

## 4.2. Análisis de precipitaciones y caudales

En la figura 4.13 tenemos la evolución de las precipitaciones y los caudales durante el periodo de estudio. Vemos que existe una gran diferencia entre la estación más húmeda, Cebadilla (figura 4.13a) y la más seca, Lecrín (figura 4.13c). Mientras que en Cebadilla las precipitaciones se acercan a los 80 mm, superando incluso los 100 mm en eventos extremos (se registra un máximo de 160 mm); en Lecrín a penas se alcanzan los 40 mm, registrándose un máximo cercano a los 80 mm. Esta diferencia de precipitaciones entre las zonas más húmedas y las más secas es un aspecto característico de la cuenca del Guadalfeo. En cuanto a la precipitación media (figura 4.13b), los valores se sitúan por debajo de los 50 mm en la gran mayoría de los casos, superando esta cifra en reducidas ocasiones y alcanzándose máximos inferiores a los 100 mm.

En la figura 4.13 d-e vemos los registros de caudales que salen de Rules y que llegan al delta, para los dos escenarios definidos. Demuestran que el régimen hidrológico del Guadalfeo está gobernado por la ocurrencia de eventos de precipitación extremos, que generan avenidas 11 veces mayores a la media aguas abajo de Rules y hasta 24 veces mayores a la media aguas arriba de Rules. Se comprueba además, que la precipitación media a partir de 2003, tiene más relación con el caudal que llega a Rules (figura 4.13e) que con el que salió de la presa (figura 4.13d), lo que deja claro el impacto que supone la presa para el sistema.

La comparación entre los dos escenarios (fig. 4.13 d-e) nos muestra que la presa reguló el caudal del río, de manera que en eventos de tormenta, como por ejemplo en diciembre de 2009, el transporte de sedimentos se limitó aguas abajo de la misma. Vemos claramente como el máximo caudal desaguado por Rules (diciembre de 2010) no coincide con el máximo caudal del escenario definido como natural (diciembre de 2009). Aun así, este segundo escenario tampoco muestra el comportamiento que tendría el río sin ninguna regulación, puesto que está afectado por la presa de Béznar. Por último, señalar que, aunque la diferencia entre el caudal que sale de Rules y el que sale del azud de Vélez no fue significativa, este último es más representativo del que llega al delta, puesto que las observaciones in situ muestran que ese caudal es nulo con frecuencia.

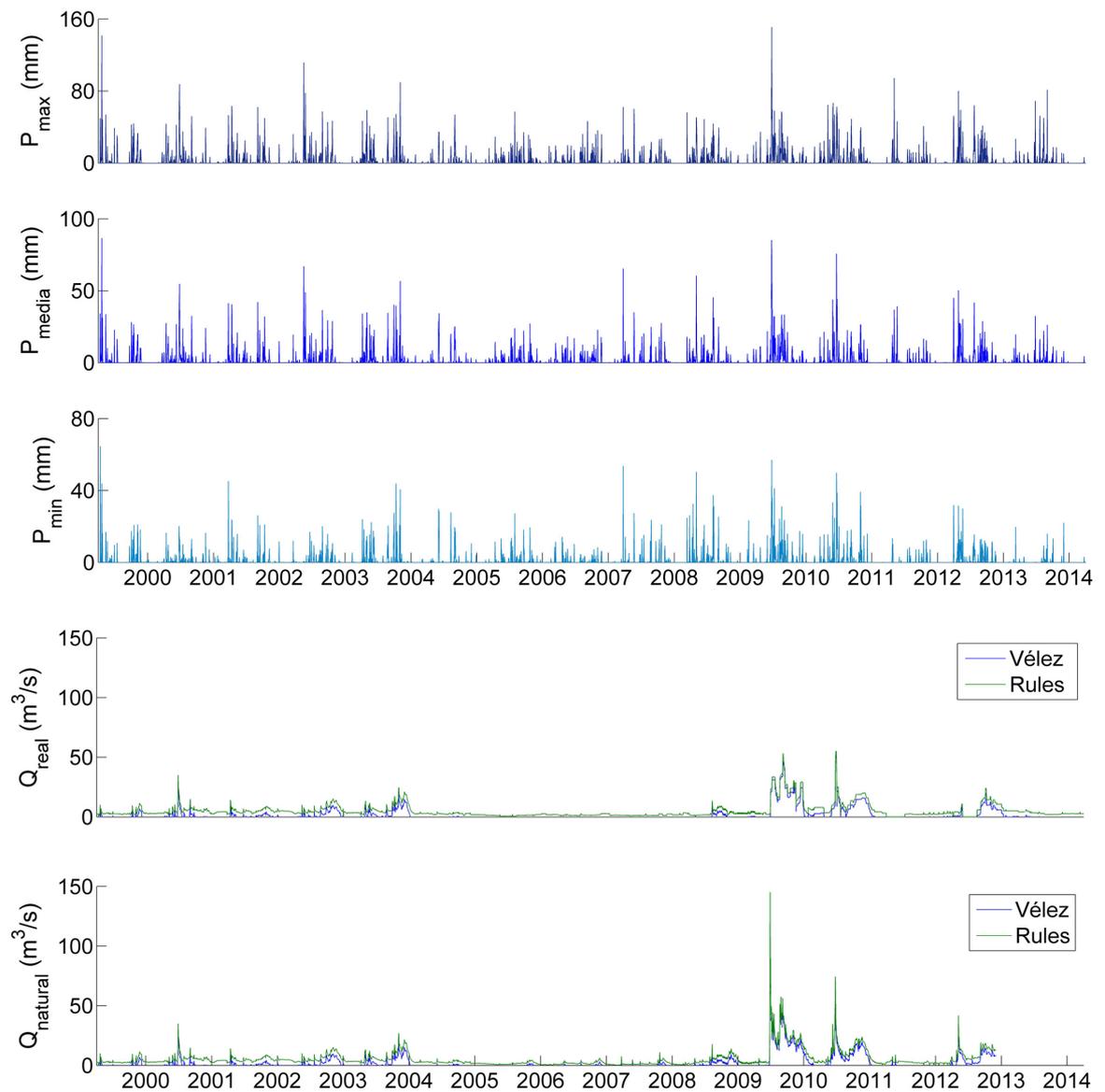


Figura 4.13: Evolución de precipitación y caudal durante el periodo de estudio: (a) precipitación en la estación más húmeda (Cebadilla), (b) precipitación media espacial aguas arriba de la presa de Rules, (c) precipitación en la estación más seca (Lecrín), (d) caudal escenario real y (e) caudal escenario natural. Fuente Bergillos RJ (2015)

### 4.3. Evolución en planta

#### 4.3.1. Evolución de la línea de costa

En este apartado se expondrán los resultados obtenidos del análisis de la evolución de la línea de costa, desde 1947 hasta la actualidad.

En la tabla 4.1 se representan las diferencias de áreas entre líneas de costa sucesivas, así como la tasa anual de pérdida o ganancia, es decir, de retroceso o avance de la línea de costa respectivamente. A continuación haremos un análisis detallado de los resultados, para lo cual dividiremos las líneas de costa en dos grupos: anteriores al periodo de estudio (1947-1999) y las incluidas en el periodo de estudio (1999-2014). Para el primer grupo haremos un análisis general del comportamiento, mientras que para el segundo se llevará a cabo un análisis más detallado, para lo cual se estudiará la evolución en cada uno de los volúmenes de control parciales por separado.

Periodo	Balance	Tasa	Periodo	Balance	Tasa
1947 – 1956	181189	20132	1999 – 2001	-14832	-7416
1956 – 1973	64180	3.775	2001 – 2004	-84351	-28117
1973 – 1977	38921	9730	2004 – 2007	-80445	-26815
1977 – 1981	-36778	9195	2007 – 2008	-4062	-4062
1981 – 1993	-156933	-13078	2008 – 2009	23518	23518
1993 – 1995	-71104	-35552	2009 – 2010	44175	44175
1995 – 1998	170980	56993	2010 – 2013	-20612	-6871
1998 – 1999	50149	50149	2013 – 2014	-15686	-15686

Tabla 4.1: Diferencia de áreas (en m<sup>2</sup>) entre las líneas de costa estudiadas y tasa anual (en m<sup>2</sup>/año) de pérdida (signo negativo) o ganancia (signo positivo).

##### 4.3.1.1. Periodo 1947-1999

En la figura 4.14 tenemos representada la evolución general de la línea de costa desde 1947 hasta 1999.

En este periodo no encontramos una tendencia de evolución clara, alternándose periodos de crecimiento y de retroceso de la línea de costa. Esto es debido seguramente a las puntuales aportaciones del río (pulsos) debidas al clima de la zona. En general, observamos un retroceso de la alineación oeste de la playa (Punta del Santo - desembocadura) en contraste con el avance de la alineación este (Punta del Santo - Puerto de Motril), debido seguramente al obstáculo que supone para los sedimentos el dique del puerto de Motril, unido a los oleajes predominantes del Suroeste, que generan cierta deriva litoral. También cabe destacar el gran volumen de sedimentos acumulado en el delta entre los años 1998-1999 en concordancia con lo reflejado en la tabla 4.1. Esto seguramente sea debido a una importante descarga del río como consecuencia de uno o varios episodios de tormenta, con sus consecuentes pulsos de sedimento en el río. En suma, el balance neto de áreas en este periodo fue de +240604 m<sup>2</sup>.

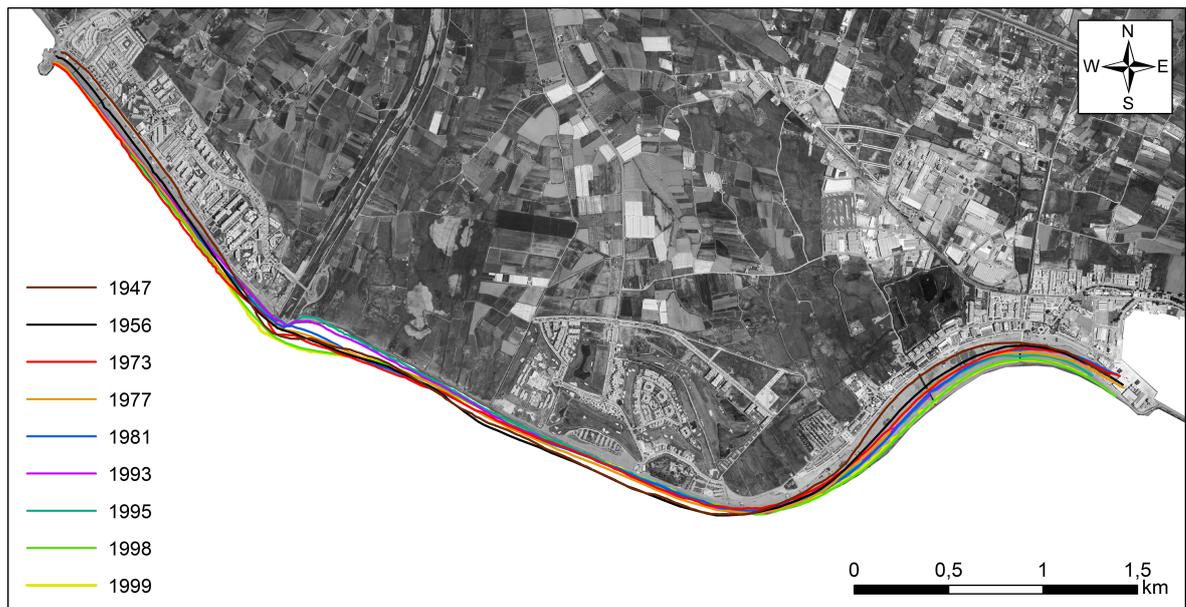


Figura 4.14: Evolución de la línea de costa desde 1947 a 1999

#### 4.3.1.2. Periodo 1999-2014

Para estudiar con más detalle la evolución en planta durante el periodo de estudio, el análisis se hará por separado en cada una de las zonas correspondientes a los volúmenes de control parciales.

##### Zona 1

En general, en la zona 1 tampoco encontramos un patrón claro durante el periodo de estudio, alternándose sucesivos estados de avance y erosión de la línea de costa. A continuación, expondremos los distintos estados a través de las figuras 4.15 y 4.16.

En la figura 4.15a vemos como en el periodo 1999-2004 se produce un ligero avance de la costa en esta zona, si bien los efectos de la erosión en zonas cercanas al delta ya se pueden observar en el periodo 2001-2004. Por otra parte, en la figura 4.15b vemos como este patrón de avance se torna en erosión generalizada en el periodo 2004-2008, seguramente debida a la entrada en funcionamiento de la presa de Rules (año 2004).

En el periodo 2008-2009 la erosión se estabiliza (figura 4.16a). Sin embargo, en el periodo 2009-2010 volvemos a encontrar erosión, seguramente debido a la dinámica litoral, ya que los oleajes más energéticos del periodo de estudio se producen en este intervalo, y además provenían del SO. En la figura 4.16b vemos como en el periodo 2010-2014 se estabiliza la línea de costa en la zona 1. Esto puede ser debido a que se haya alcanzado el equilibrio en esta zona, puesto que es en este periodo cuando se producen los oleajes más energéticos de todo el periodo de estudio (alturas superiores a 5 m) y además estos provenían del SO. En conclusión, podemos decir que esta zona se encuentra en general estable. Aunque se alternan periodos de avance y retroceso, si comparamos la posición de la línea de costa en 1999 y en 2014 vemos que estas son prácticamente coincidentes lo que sugiera que esta zona del sistema se encuentra en equilibrio.

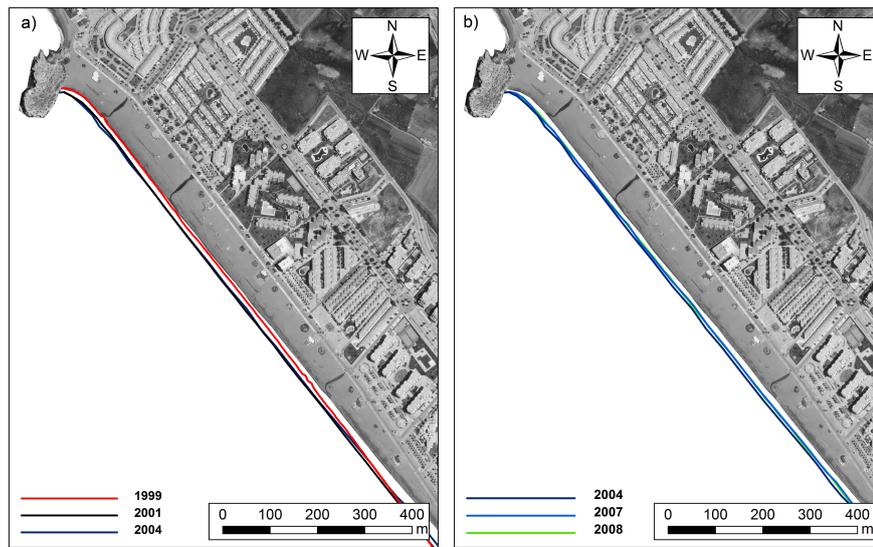


Figura 4.15: a) Evolución de la línea de costa en la zona 1 desde 1999 a 2004 y b) Evolución de la línea de costa en la zona 1 desde 2004 a 2008

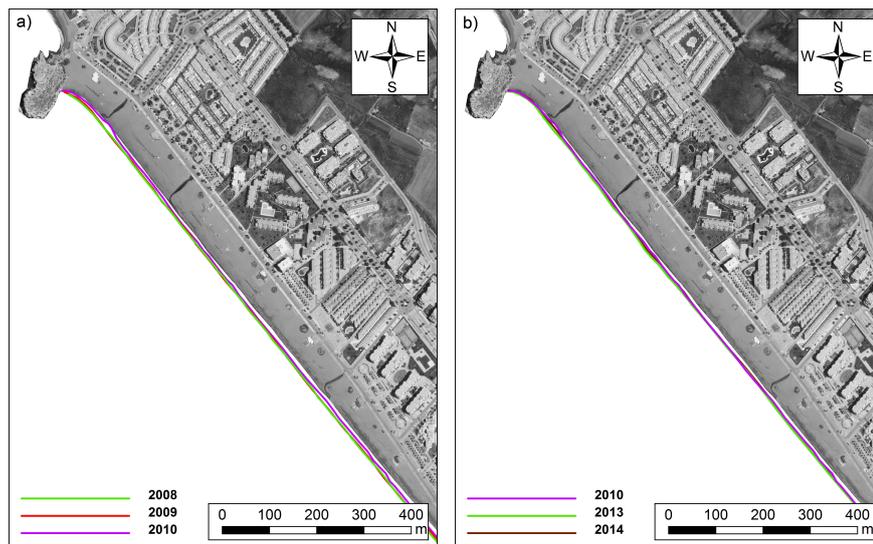


Figura 4.16: a) Evolución de la línea de costa en la zona 1 desde 2008 a 2010 y b) Evolución de la línea de costa en la zona 1 desde 2010 a 2014

## Zona 2

La zona 2 de este proyecto fin de carrera coincide con la desembocadura del río Guadalfeo. Esta zona sin duda es la más afectada del sistema y sí podemos ver que existe un patrón de erosión importante y generalizado. Pasamos a estudiarlo de manera detallada.

Partimos de una situación inicial (año 1999) en la que encontramos un gran volumen de sedimentos en torno a la desembocadura. Estos sedimentos se habían acumulado durante el periodo 1995-1998 como vemos en la tabla 4.1. Esto seguramente se debiera a descargas fluviales importantes ocurridas durante este periodo. En la figura 4.17 podemos observar como a partir de esta situación inicial se produce una importante erosión. Entre el año 1999 y 2001 la línea de costa se suaviza, repartiéndose los sedimentos a ambos lados de la desembocadura aunque en mayor medida en el lado este. Entre el año 2001 y 2004 continúa este proceso de suavizado alcanzándose el equilibrio anterior a 1999. Sin embargo, entre el año 2004 y 2007 se produce una importante erosión sobre todo en el lado este de la desembocadura. Esto, probablemente esté debido a la entrada en funcionamiento de la presa de Rules en el año 2004, lo cual limita la descarga del río reduciendo mucho el aporte de sedimentos. El hecho de que la erosión sea más acusada al este de la desembocadura seguramente se deba a que los oleajes más energéticos provienen del SO. Esta erosión continúa en los años posteriores. En el periodo 2007-2009 disminuye el ritmo de erosión aunque esta continúa.

Entre el año 2009 y 2010 podemos ver en la figura 4.18 que se produce una gran acumulación de sedimentos en torno a la desembocadura. Esto es debido a que durante ese año se produjo una gran avenida, que provocó una descarga importante de caudal desde la presa de Rules (figura 4.13). Este aporte, junto con la direccionalidad del oleaje produjo acumulación de sedimentos a ambos lados de la desembocadura. La variación resultó especialmente importante de nuevo en el lado este, seguramente debido de nuevo a que los oleajes más energéticos durante este periodo provenían del SO. En la figura 4.19 podemos ver un esquema conceptual de este proceso, así como fotografías aéreas que lo corroboran.

Una vez pasado el episodio de descarga fluvial, en la figura 4.20 vemos como se vuelve a la dinámica de erosión anterior. En el año 2013 ya se ha vuelto a la situación anterior a la descarga de 2010 y entre el año 2013 y 2014 se produce una gran erosión perdiendo ya, prácticamente, la totalidad de la playa.

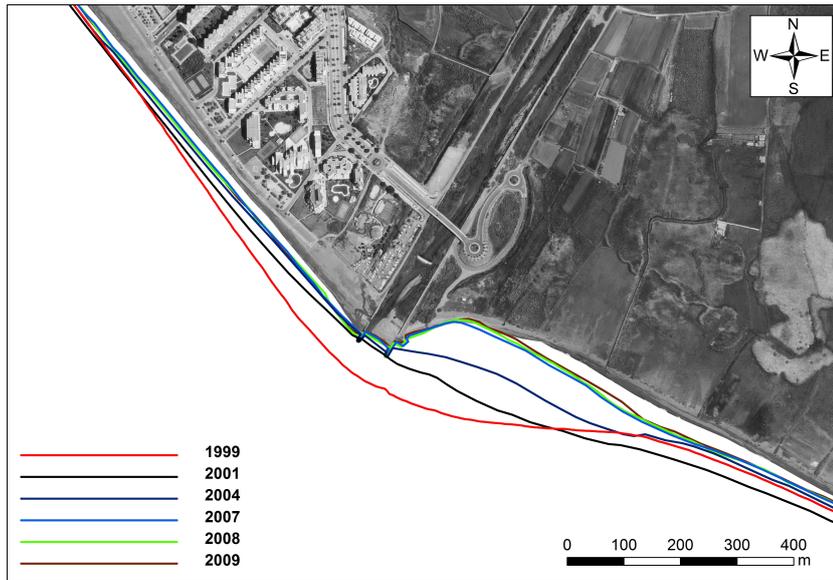


Figura 4.17: Evolución de la línea de costa en la zona 2 desde 1999 a 2009

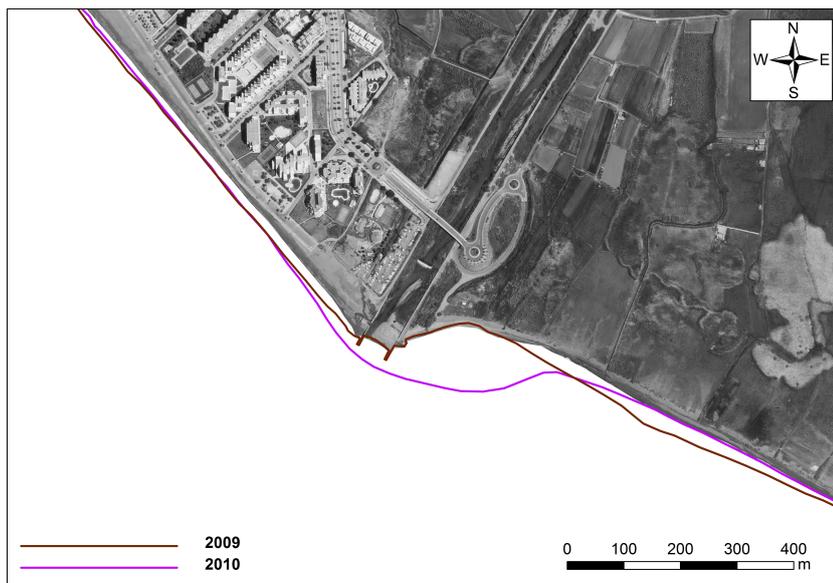


Figura 4.18: Evolución de la línea de costa en la zona 2 desde 2009 a 2010

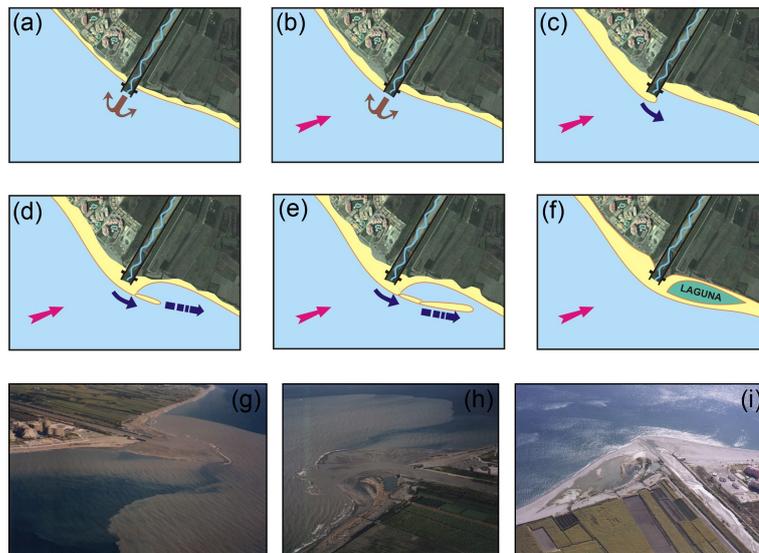


Figura 4.19: Modelo conceptual de la acumulación de sedimentos en torno a la desembocadura durante tormentas (a-f) y fotografías aéreas del proceso (g-i). Fuente RJ (2014)

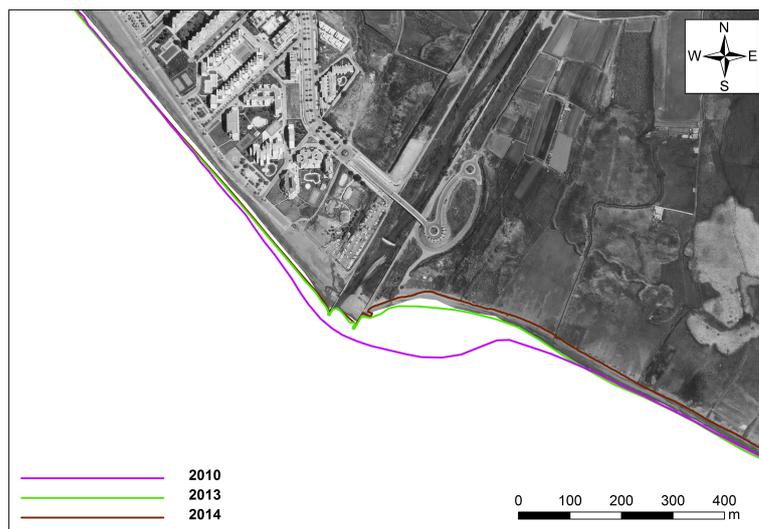


Figura 4.20: Evolución de la línea de costa en la zona 2 desde 2010 a 2014

### Zona 3

En la zona 3 se alternan etapas de avance y retroceso. Esta zona tiene la particularidad de que se comporta de manera distinta en su parte occidental (la zona de playa Granada más cercana a la desembocadura) y su parte oriental (la zona más cercana a la Punta del Santo). En general, en la zona occidental se produce una erosión constante a partir del año 2004 mientras que la zona oriental es más estable, produciéndose incluso avances en la posición de la línea de costa.

En la figura 4.21 vemos como entre los años 1999-2001 se produce un avance de la línea de costa. Este avance está relacionado con el suavizado de la línea de costa en la desembocadura, que ya comentamos en el apartado anterior.

Entre el año 2001 y 2004 (figura 4.22) se produce un giro de la línea de costa. Mientras que la parte occidental, cercana a la desembocadura, sufre una importante erosión, la parte más oriental, cercana a la punta del santo, avanza. Este proceso seguramente esté relacionado con la dinámica litoral del oleaje. Puesto que el oleaje predominante en cuanto a energía, como ya vimos en el apartado dedicado al clima marítimo, proviene del O-SO se produce un intercambio de sedimentos de la parte occidental a la oriental.

En la figura 4.23 vemos como este comportamiento diferenciado se mantiene. En el periodo 2004-2009 continúa la erosión en la parte occidental, la zona más cercana a la Punta del Santo apenas sufre cambios. De nuevo, vemos como la entrada en funcionamiento de la presa de Rules, favorece la erosión también en esta parte de nuestra zona de estudio.

Por último, entre 2009 y 2014 (figura 4.24) se mantiene la tendencia. Continúa erosionándose la parte occidental, mientras que la oriental se mantiene fija. Podemos intuir entonces, aunque lo confirmaremos al estudiar la siguiente zona, que la Punta del Santo es una parte en equilibrio en nuestro sistema que se mantiene fija como eje de la erosión y avance dentro de la zona de estudio.

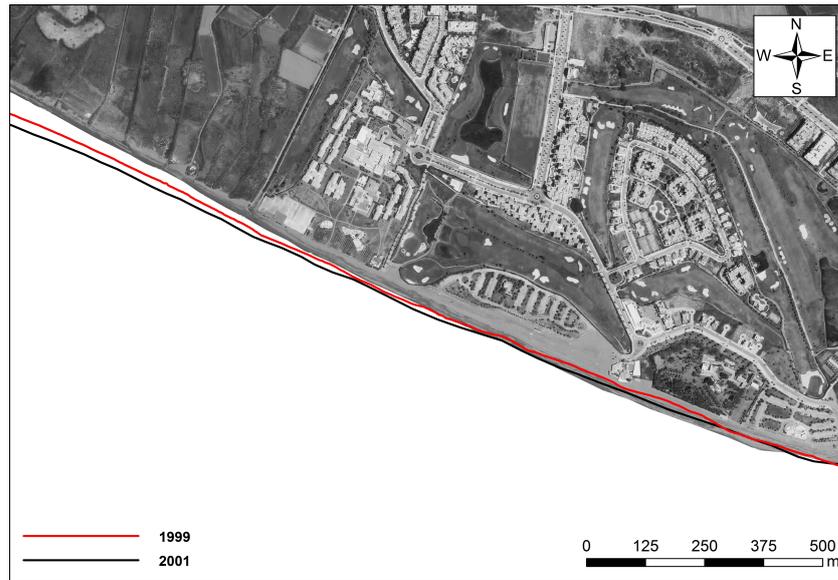


Figura 4.21: Evolución de la línea de costa en la zona 3 desde 1999 a 2001

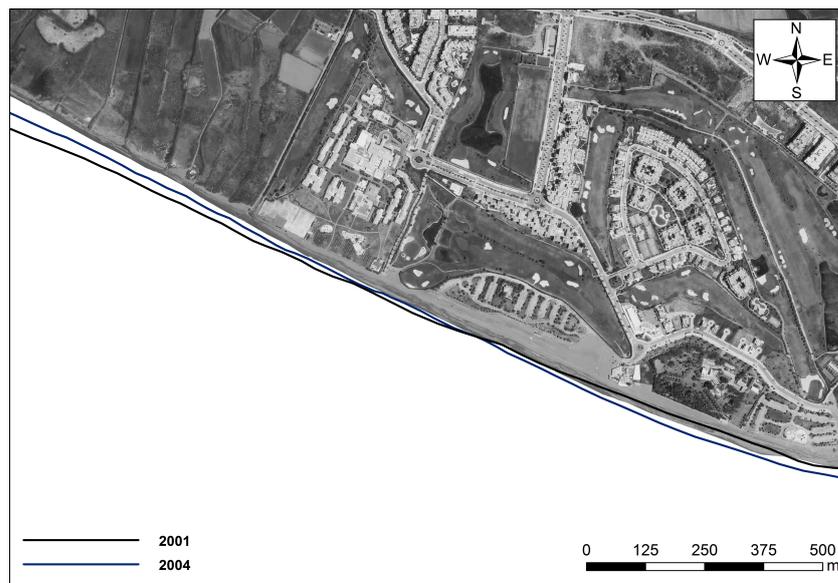


Figura 4.22: Evolución de la línea de costa en la zona 3 desde 2001 a 2004

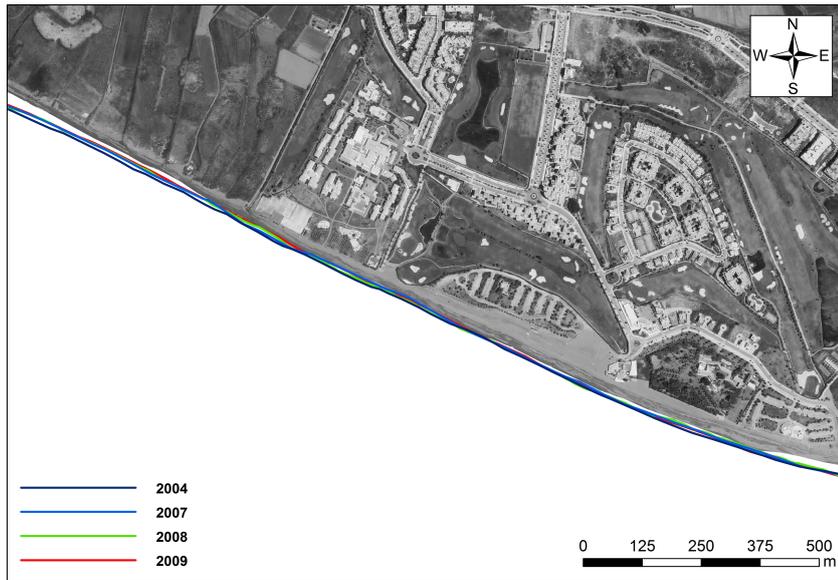


Figura 4.23: Evolución de la línea de costa en la zona 3 desde 2004 a 2009

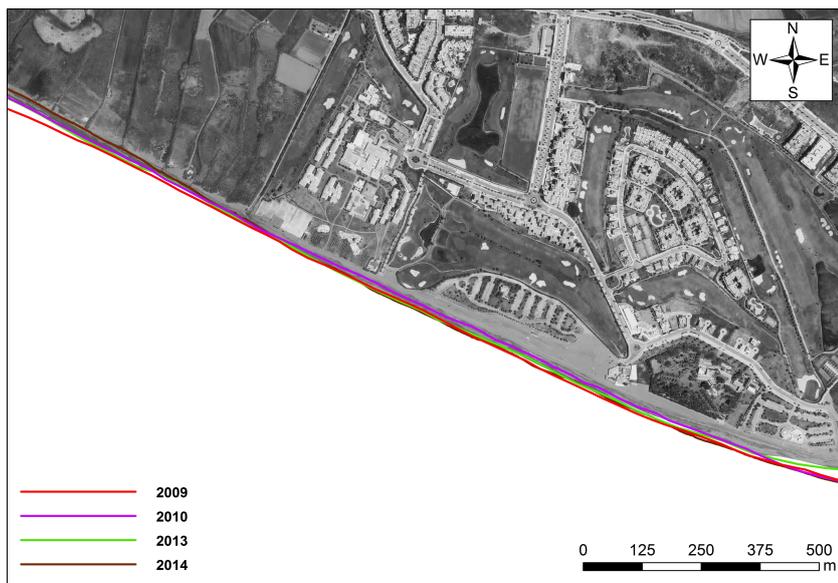


Figura 4.24: Evolución de la línea de costa en la zona 3 desde 2009 a 2014

#### Zona 4

La zona 4 se corresponde con la Punta del Santo, antigua desembocadura del Guadalfeo, previa a la canalización de este. La Punta del Santo como ya vimos en el apartado anterior se mantiene prácticamente invariable durante el periodo de estudio. En la figura 4.25 vemos como desde 1999 a 2007 se produce un avance progresivo de la línea de costa. Por zonas, entre 1999 y 2001 se produce un mayor avance en la parte oriental de la punta, quedando, siendo entre 2001 y 2004 más importante el avance en la parte occidental.

Entre 2007 y 2010 (figura 4.26) vemos que a partir de 2007 la Punta del Santo se mantiene como punto fijo. Durante este periodo no sufre variaciones importantes, permaneciendo la forma de la línea de costa prácticamente invariable.

En la figura 4.27 vemos que durante 2013 la línea de costa sufrió un retroceso para volver a la posición anterior en 2014. Este retroceso seguramente este debido al error cometido al extraer la posición de la línea de costa de ortofotos, por lo que ese retroceso puede ser estacional o incluso estar debido a un evento de tormenta.

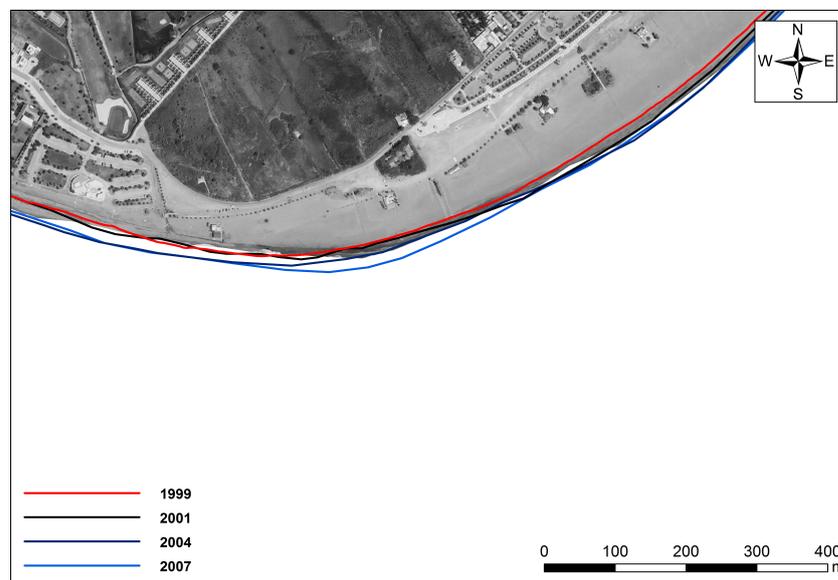


Figura 4.25: Evolución de la línea de costa en la zona 4 desde 1999 a 2007

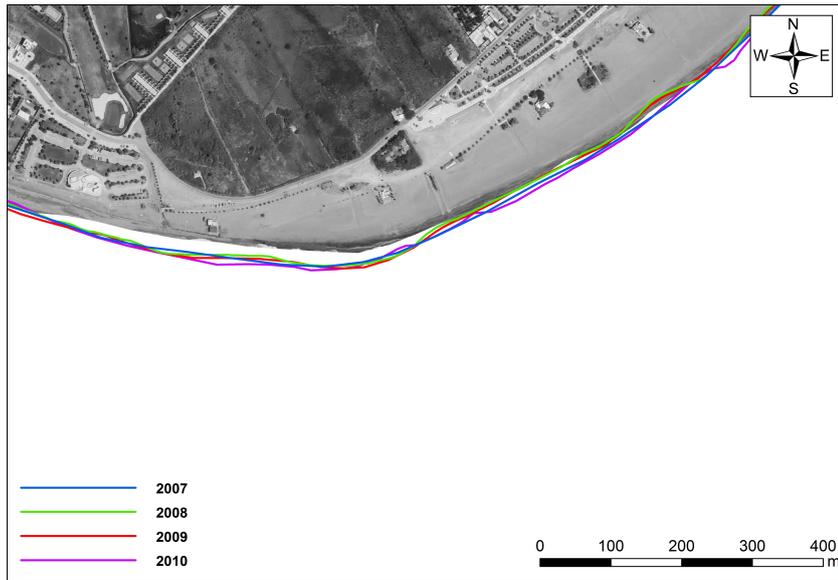


Figura 4.26: Evolución de la línea de costa en la zona 4 desde 2007 a 2010

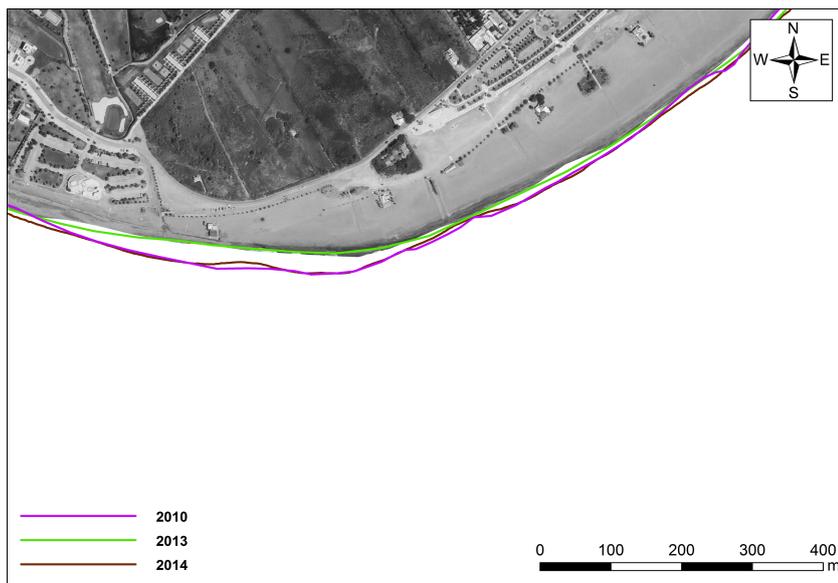


Figura 4.27: Evolución de la línea de costa en la zona 4 desde 2010 a 2013

### Zona 5

La zona 5 corresponde a la Playa de Poniente, la parte más cercana al dique de abrigo del Puerto de Motril. Debido a la influencia de éste, esta zona se encuentra en constante avance. La naturaleza bidireccional del oleaje favorece el transporte longitudinal de sedimentos en la dirección O-E, el dique de abrigo del puerto actúa como una barrera para este transporte de sedimentos favoreciendo el depósito en esta zona.

En la figura 4.28 vemos como se produce un importante avance en la posición de la línea de costa en el periodo 1999-2007. Además podemos ver claramente la influencia del dique ya que, entre 1999 y 2001 el avance se produce justo en la parte oriental de la playa, pegada al dique. Una vez que se ha rellenado la parte adyacente al dique, este avance se transmite a la parte occidental de la playa en el periodo 2004-2007.

Durante el periodo 2007-2009 (figura 4.29) este avance no es significativo. Esto puede estar debido a la ausencia de oleajes importantes en ese periodo, lo que limitaría la deriva litoral. Y por último, en el periodo 2009-2014 (figura 4.30) vemos como se vuelve a reactivar el avance, lo que puede estar debido a que durante este periodo se registran los oleajes más importantes que alcanzan alturas mayores a 5 m (4.1) y que provienen del O-SO. Estas tormentas generarían un importante transporte longitudinal de sedimentos desde la parte oriental de la zona de estudio a la parte occidental.

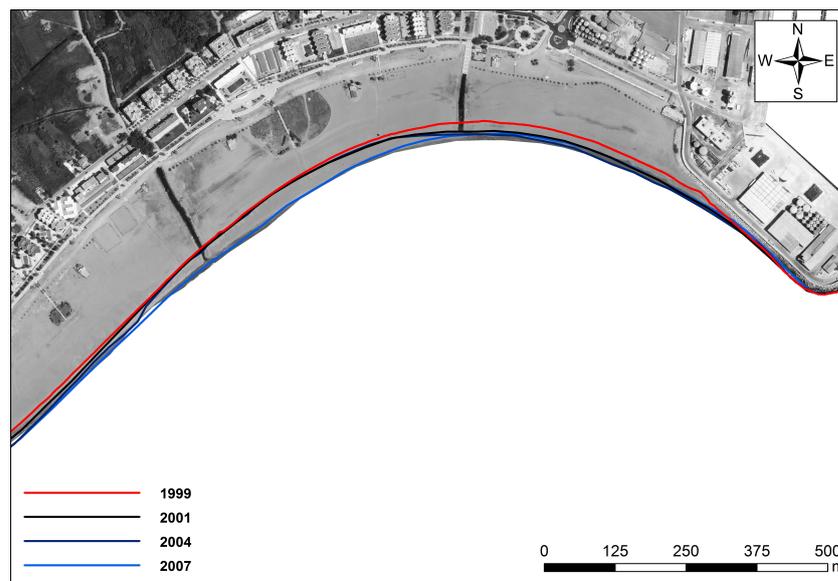


Figura 4.28: Evolución de la línea de costa en la zona 5 desde 1999 a 2007

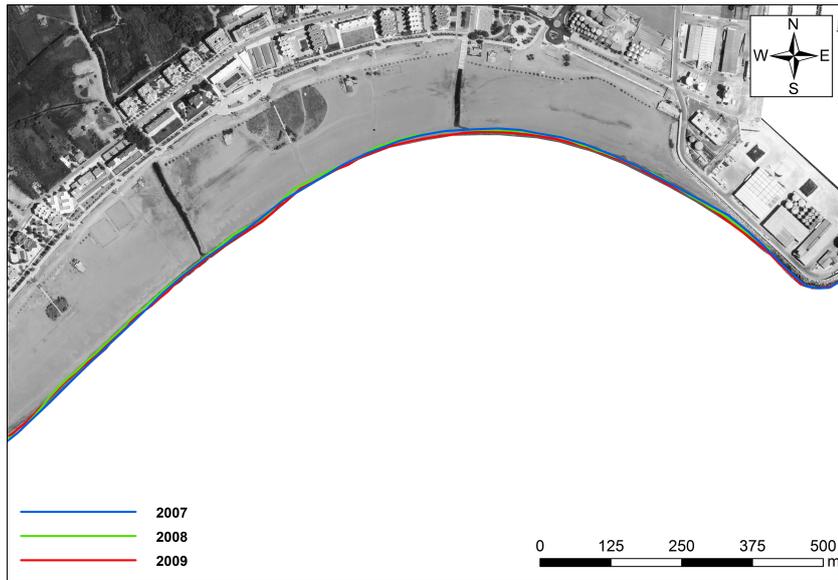


Figura 4.29: Evolución de la línea de costa en la zona 5 desde 2007 a 2009

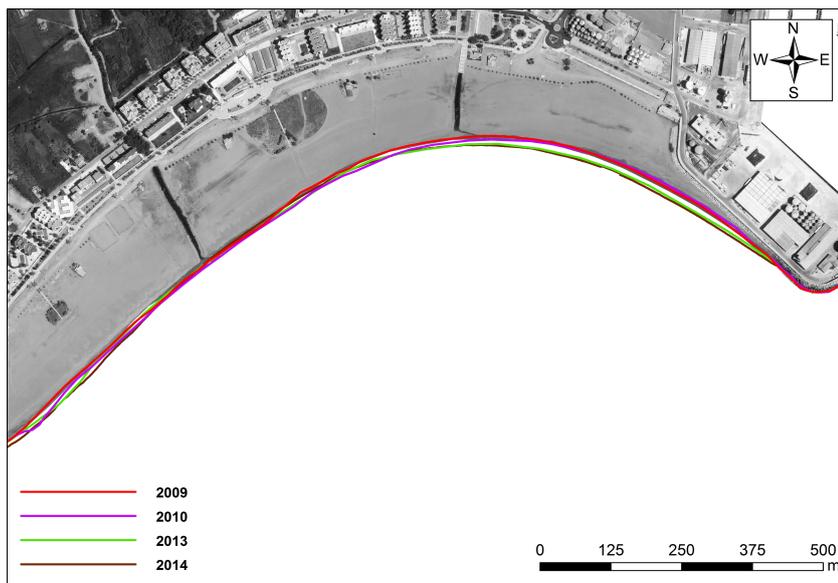


Figura 4.30: Evolución de la línea de costa en la zona 5 desde 2009 a 2014

### 4.3.2. Evolución de la superficie construida

A continuación se presentarán los resultados obtenidos en el análisis de la evolución de la superficie construida. Hay que tener en cuenta que estos datos se han obtenido mediante la observación de ortofotos, con una resolución limitada. Por tanto, las cifras que se dan a continuación no deben ser tomadas ni mucho menos como exactas, si no como una aproximación a la evolución urbana de la zona.

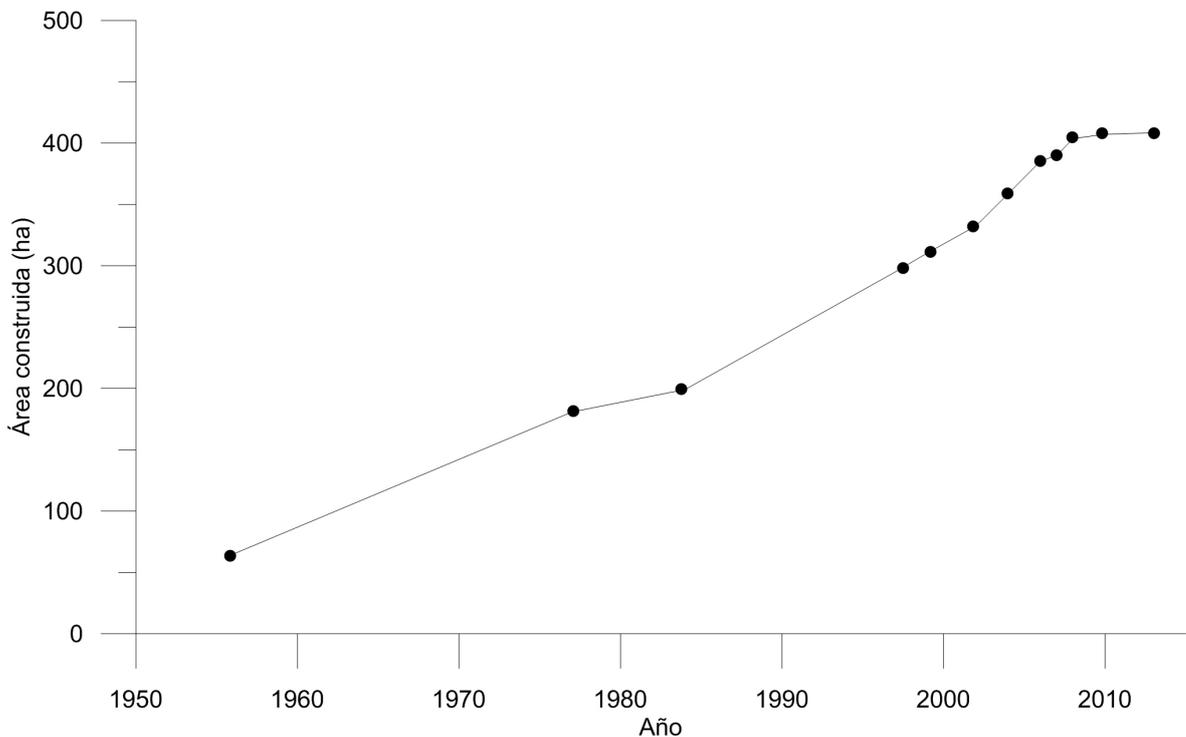


Figura 4.31: Superficie construida (en ha) para cada una de las ortofotos estudiadas

En la figura 4.31 tenemos la superficie construida en cada uno de los años de los que se han podido obtener ortofotografías. Se puede ver, que en 60 años, la superficie construida se ha multiplicado por 8, pasando de las escasas 50 ha del año 1956, a las 400 ha del 2010. La evolución de la urbanización ha sido dispar según la zona. En el municipio de Salobreña, podemos observar como inicialmente en el año 1956 no hay construcción en torno a la costa, si no que el núcleo municipal se mantiene alejado de la playa situándose en la cara interior de una roca (figura 4.32 a). Posteriormente, en el año 1977 ya observamos alguna construcción aislada en la zona de playa del municipio y, por su parte, el núcleo municipal continúa creciendo ocupando ya la totalidad de la roca y extendiéndose hacia la carretera N-340 (figura 4.32 b). Esta tendencia continúa en los años posteriores, con el núcleo municipal extendiéndose también hacia la vega y la urbanización costera ampliándose longitudinalmente a la playa (figura 4.32 c, d). Entre los años 1997 y 1999 la zona del núcleo municipal y la urbanización costera quedan unidas, formándose un único núcleo urbano en forma de L (figura 4.32 e). Durante los siguientes años hasta la actualidad, por el norte el núcleo urbano ya bordea toda la carretera N-340. En la zona más cercana a la costa, se ha ampliado el cordón de unión entre en el antiguo municipio y la nueva zona de urbanización costera. En esta última no solo se ha completado la llamada "primera línea de playa", si no que ya aparece también una

segunda línea casi completa. Durante los últimos 5 años también cabe destacar la aparición de algunos invernaderos en la vega de Salobreña (figura 4.33).

Al este de la desembocadura del Guadalfeo tenemos la localidad de Playa Granada, perteneciente al municipio de Motril. En esta zona es más interesante aún estudiar el desarrollo urbano, puesto que en el año 1956 aún no existía como tal (figura 4.34 a). Ya en el año 1977 aparece el núcleo de urbanización a partir de la que se extenderá esta pequeña localidad, junto con varios campos de golf (figura 4.34 b). Entre los años 1977 y 2002, aparecen numerosos invernaderos en la vega de Motril-Salobreña, al norte del núcleo de playa Granada (figura 4.34 c, d, e, f). Entre el año 2002 y la actualidad, la construcción se ha centrado sobre todo en la urbanización costera. Cerrándose en primer la zona de playa, con más urbanizaciones y campos de Golf y, posteriormente, comienza su expansión hacia el norte, construyéndose varios edificios (figura 4.35).

Por último, en la parte más oriental encontramos la zona del Puerto de Motril y la playa de Poniente. En el año 1956 ya existía el puerto, con un pequeño dique de abrigo (figura 4.36 a). En el año 1977 ya aparecen nuevas construcciones siguiendo dos ejes claros: hacia el norte del puerto, una zona edificios más industriales asociados a la actividad portuaria; y hacia el oeste, en la playa de poniente, de nuevo una serie de urbanizaciones costeras de carácter residencial y recreativo (figura 4.36 b). El crecimiento continúa siguiendo estos dos ejes y, en el año 1997, la zona residencial ya casi ha alcanzado la Punta del Santo (figura 4.36 c, d). Por su parte, en la zona norte del puerto, aparte de continuar apareciendo edificios de carácter industrial, también aparecen invernaderos en la vega, al igual que ocurría en la zona de playa Granada. En la última década continúa el crecimiento. En la zona residencial, al igual que en otras partes de la costa, comienza a aparecer una segunda línea de urbanización, mientras que al norte del puerto continúan apareciendo edificios industriales e invernaderos (figura 4.37).

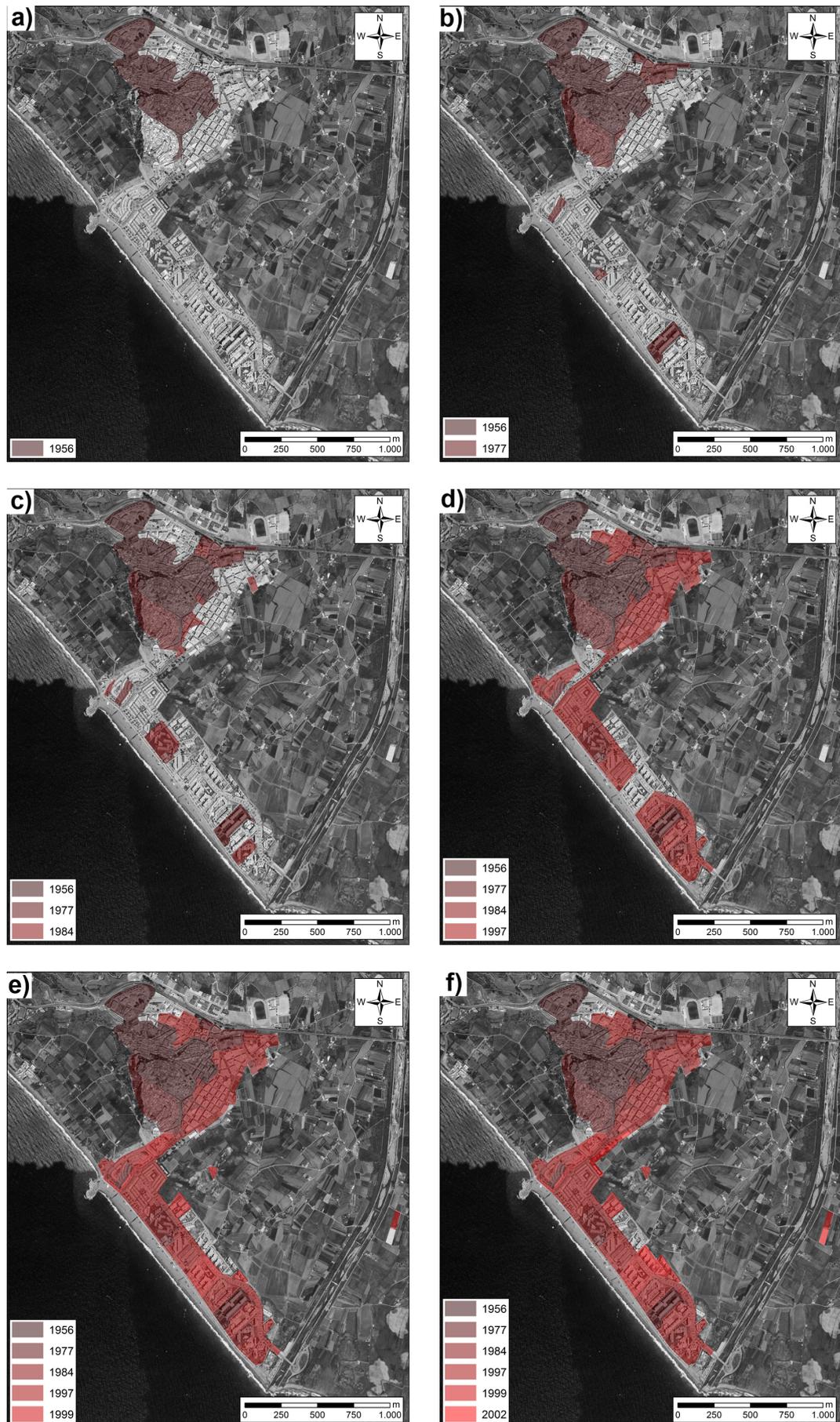


Figura 4.32: Evolución de la superficie construida en el municipio de Salobreña (I)

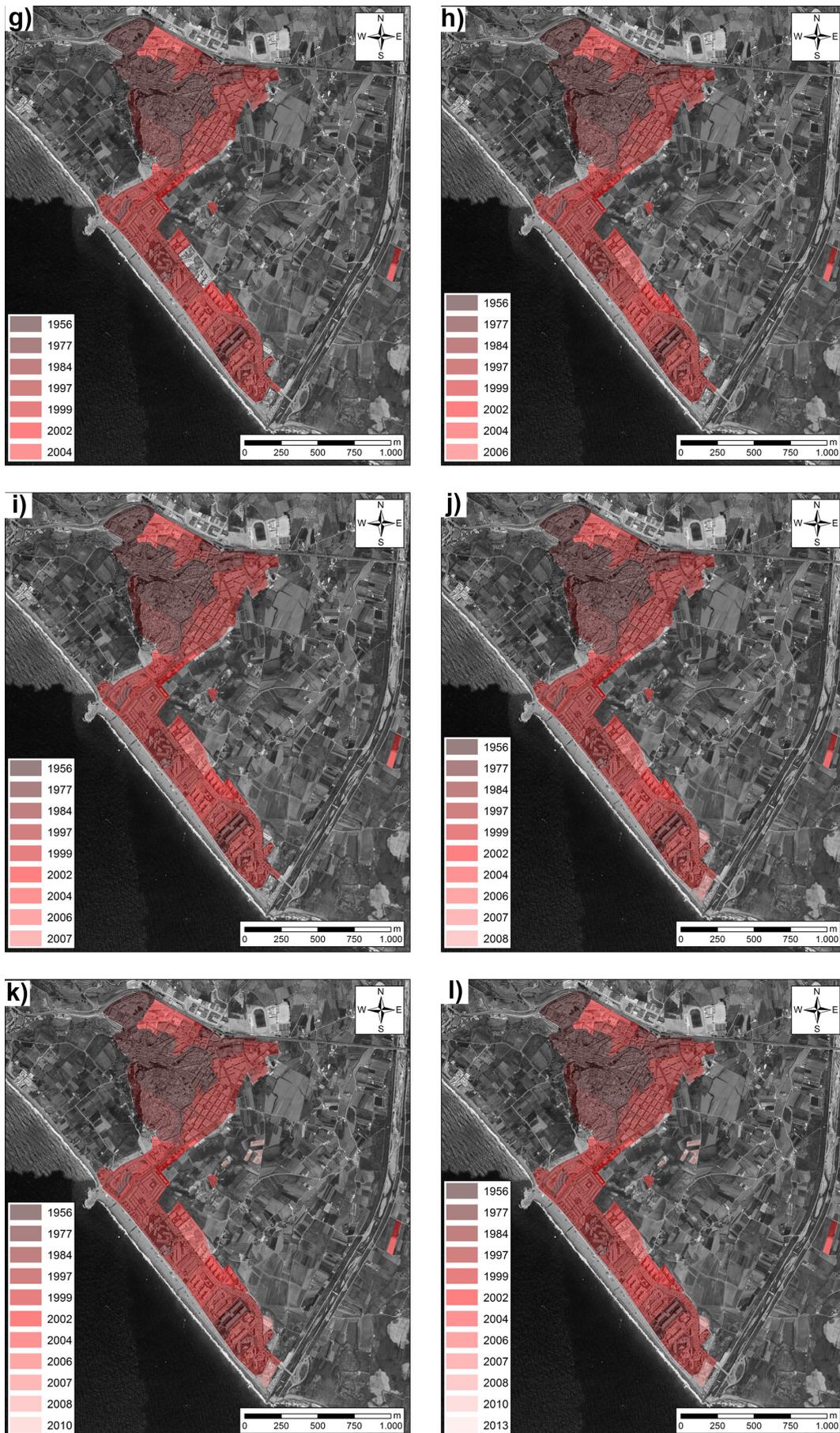


Figura 4.33: Evolución de la superficie construida en el municipio de Salobreña (II)

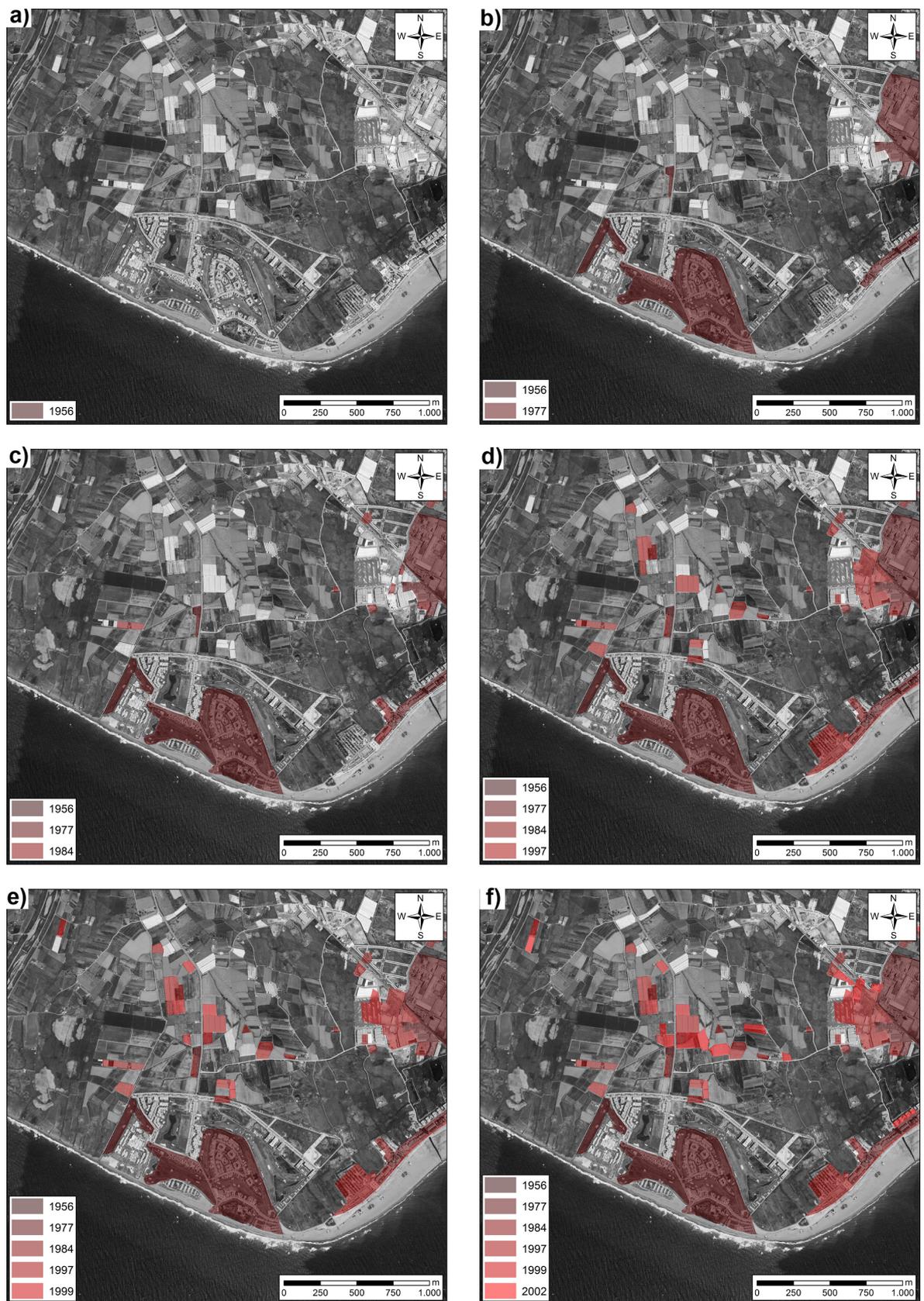


Figura 4.34: Evolución de la superficie construida en Playa Granada (I)

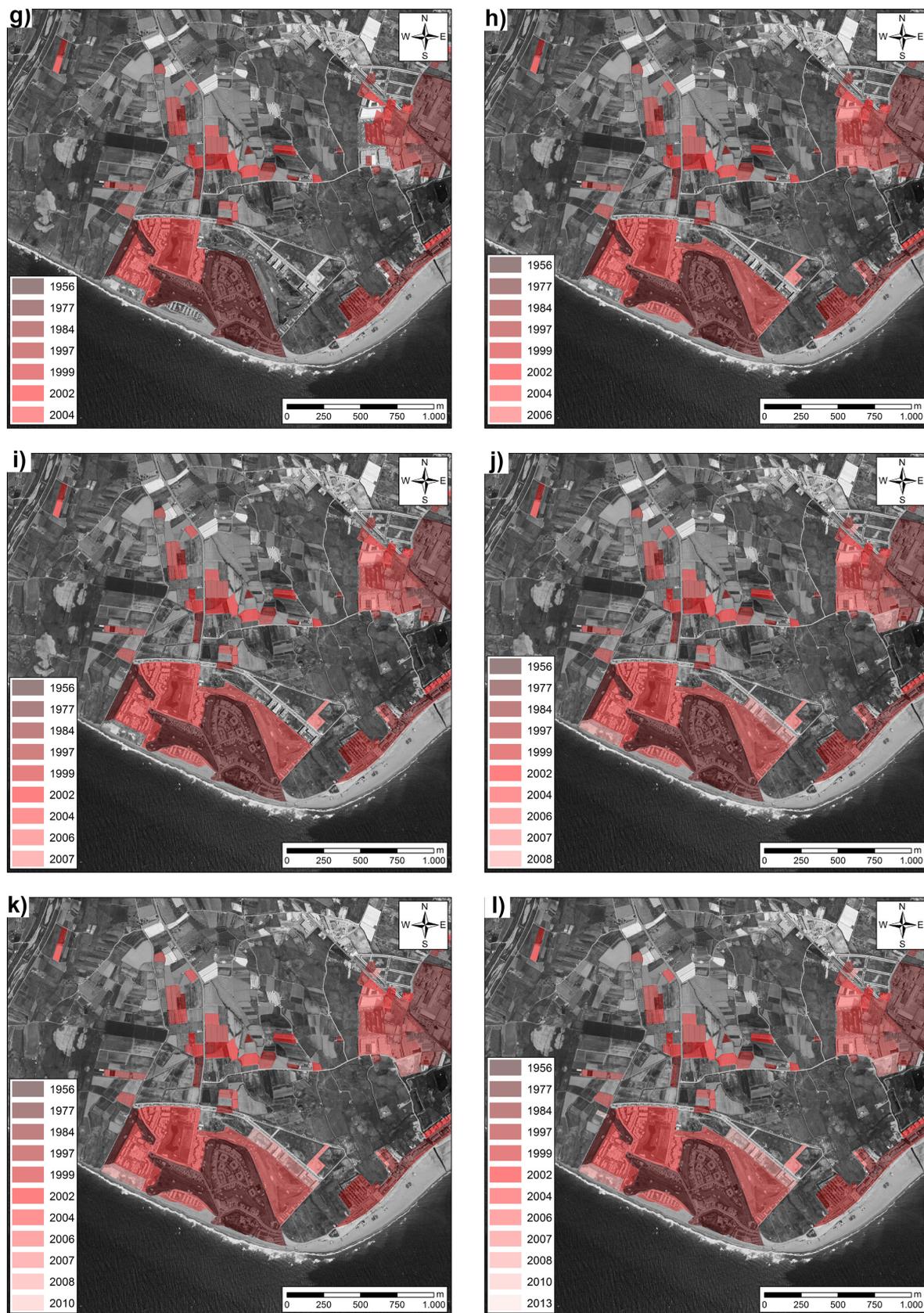


Figura 4.35: Evolución de la superficie construida en Playa Granada (II)

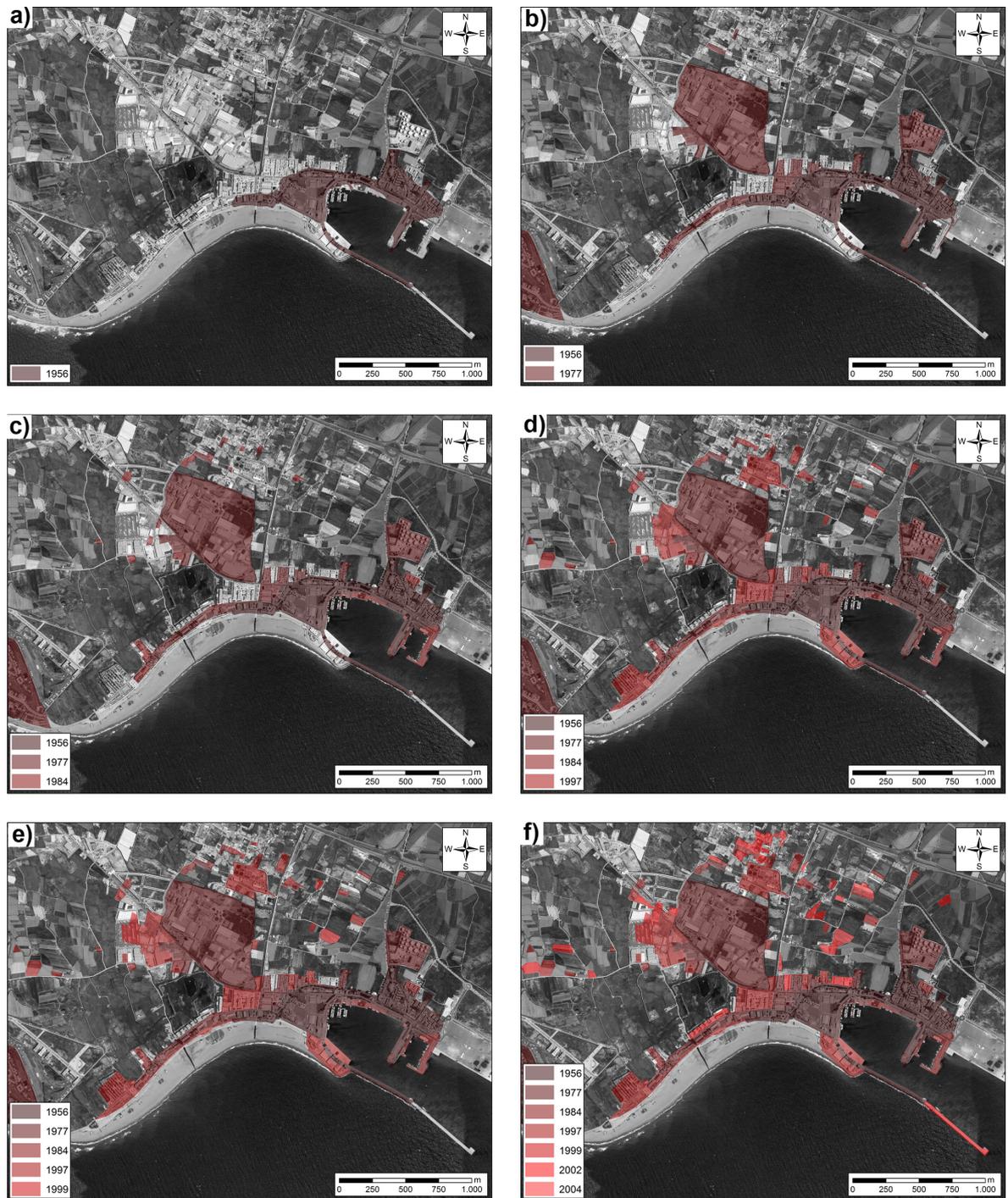


Figura 4.36: Evolución de la superficie construida en el Puerto de Motril (I)

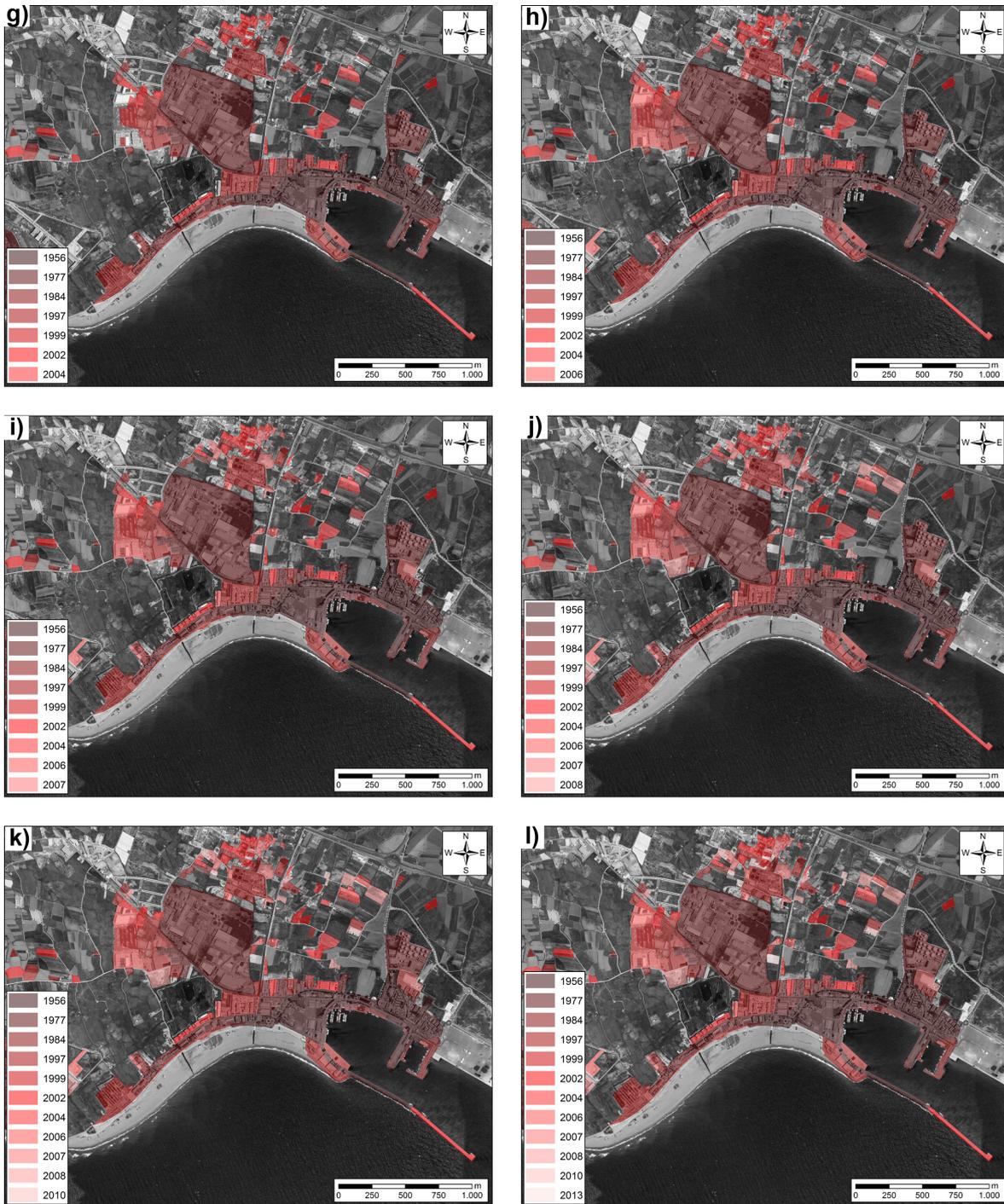


Figura 4.37: Evolución de la superficie construida en el Puerto de Motril (II)

Esta evolución temporal de la superficie construida no ha sido ni mucho menos lineal a lo largo de los años. En la figura 4.38 tenemos la tasa de crecimiento anual en ha por año. Entre el año 1956 y 1977, la construcción crece a un ritmo de 5 ha al año, lo que supone un crecimiento anual del 8% respecto al área inicial de este periodo en 1956. Este periodo coincide con la década de los 60 y principio de los 70 en la que en España se produce un gran desarrollo económico ligado a la construcción y al turismo y que, por tanto, se caracteriza precisamente por la ocupación de las costas en las que hasta entonces prácticamente no se había construido. Entre el año 1984 y 2002 la tasa anual continúa aumentando hasta alrededor de las 7.5 ha al año, lo que supone un crecimiento anual cercano al 3% del área construida en 1984. El periodo 2002-2008 alcanza el máximo exponente de la burbuja inmobiliaria, ascendiendo la tasa anual a las 13.5 ha al año, manteniéndose un crecimiento del 4% del área ocupada en 2002. Este crecimiento se frena en seco a partir del año 2008, con la aparición de la crisis económica. En el periodo 2008-2010 la tasa pasa de las 13.5 a tan solo 2 ha al año, cifra muy por debajo incluso de la del periodo 1956-1977. El crecimiento porcentual cae por tanto hasta el 0.44% del área ocupada en 2008. Durante el periodo 2010-2013, los años más crudos de la crisis, podemos decir que la superficie construida es prácticamente 0. Tan solo se construyen 0.35 ha al año durante ese periodo, por lo que el crecimiento porcentual cae al 0.08% tomando de nuevo como referencia el inicio del periodo, año 2010.

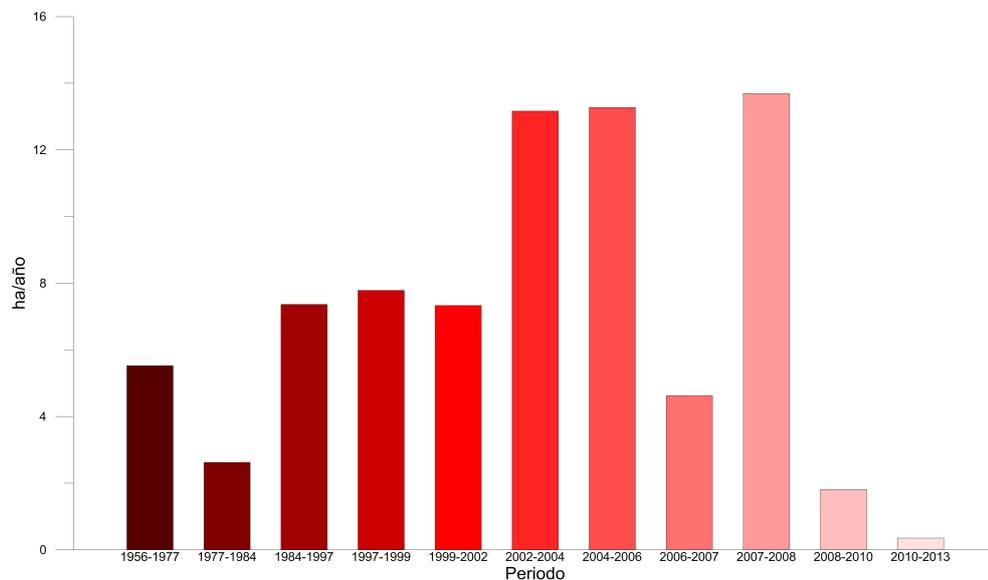


Figura 4.38: Evolución de la superficie construida en cada periodo

## 4.4. Evolución del perfil de playa

A continuación presentamos los resultados obtenidos con el análisis de los 122 perfiles estudiados. Para facilitar su exposición se ha dividido en dos subapartados: evolución espacial y evolución temporal. En el primero se verá como evoluciona el perfil de playa a lo largo de la zona de estudio en cada uno de los años de los que se dispone batimetría (1999, 2004, 2008 y 2014). En el segundo, se comparará un mismo perfil para cada uno de los años, de manera que podamos ver como ha cambiado la batimetría de la zona en cada punto a lo largo del periodo de estudio.

### 4.4.1. Evolución espacial

En la figura 4.39 se representan los 122 perfiles que se han obtenido para cada una de las batimetrías, con el fin de ver su evolución espacial. Vemos que el comportamiento es el mismo para los cuatro años estudiados. Los perfiles correspondientes a la playa de Salobreña mantienen todos la misma forma en superficie, variando algo en profundidad. Los más cercanos al peñón presentan una menor pendiente a partir isobata 12 que los que se sitúan cerca del Guadalfeo, en los que la pendiente a partir de esta isobata se ajusta a la que encontramos en los perfiles que encontramos en la continuación del lecho del río. Los perfiles correspondientes al río Guadalfeo, además, presentan una pendiente mucho menor en la parte más superficial (hasta la isobata número 10), debido a que muchos de los sedimentos que transporta el río depositan justo en esa zona. Los perfiles tomados en playa Granada tienen una gran variabilidad, los primeros se sitúan muy cercanos a los tomados en el Guadalfeo, e incluso conforme avanzamos hacia el este la pendiente disminuye aún más que en los del Guadalfeo, lo que sugiere que los oleajes que provienen del SO originan transporte de sedimentos hacia esta zona. Si seguimos avanzando hacia el este, la pendiente aumenta drásticamente hasta llegar a la punta del Santo. Esta es la parte de nuestra zona de estudio donde los perfiles tienen una mayor pendiente, y por tanto, la zona donde menos sedimentos se acumulan. Por último los perfiles obtenidos en la playa de poniente presentan una gran variabilidad. Los primeros son muy inclinados, puesto que están muy cerca de la Punta del Santo, sin embargo conforme avanzamos hacia el este y nos acercamos al dique del puerto de Motril, son cada vez más tendidos, hasta alcanzar los valores mínimos de pendiente de toda la zona de estudio.

# Evolución Espacial

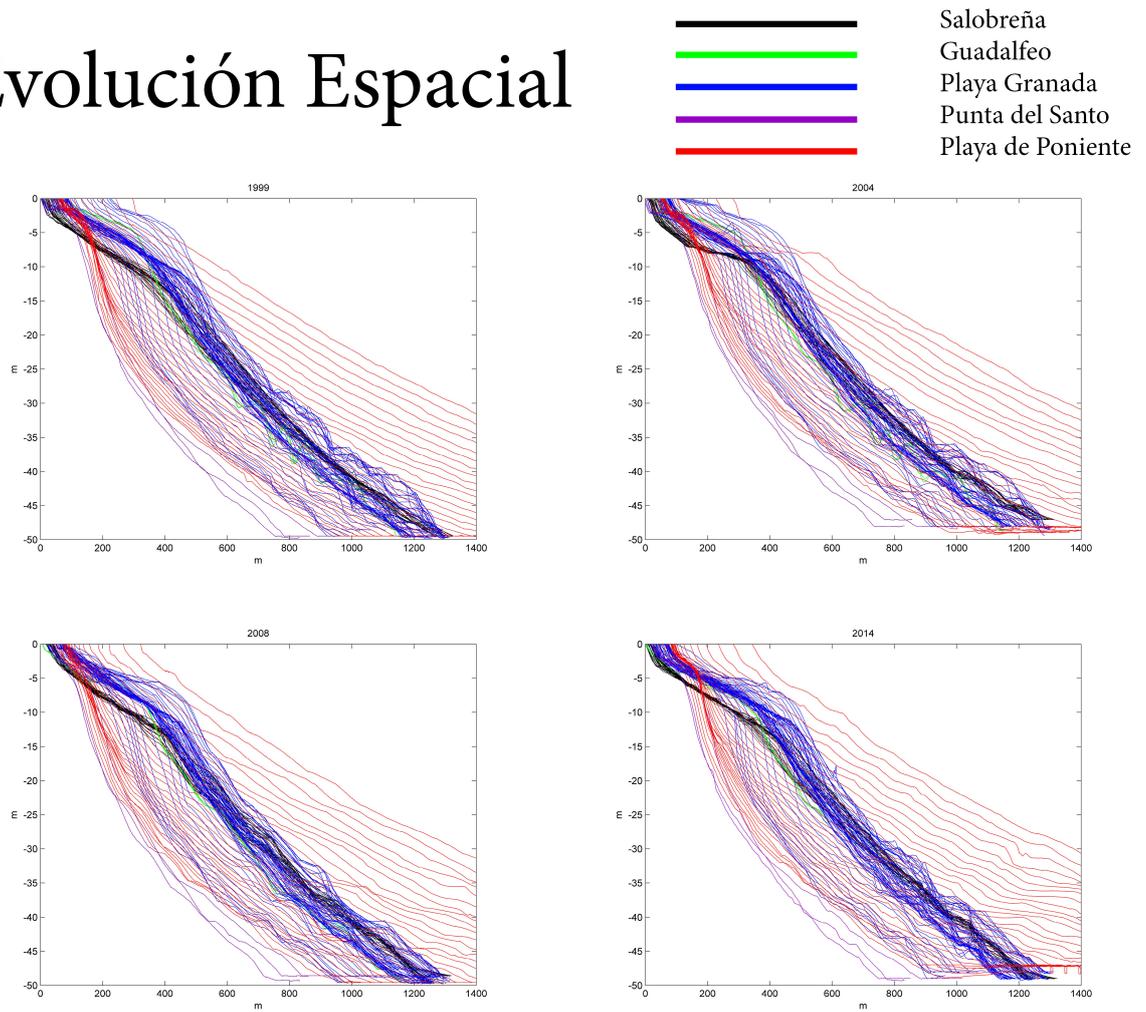


Figura 4.39: Evolución espacial del perfil

#### 4.4.2. Evolución temporal

Se presentan en la figura 4.40 la comparación de algunos de los perfiles obtenidos en las 4 batimetrías, con el objetivo de conocer la evolución temporal del perfil de la playa a lo largo del periodo de estudio. Se han agrupado los perfiles según las subzonas que hemos delimitado para este proyecto fin de carrera, a continuación presentamos los resultados obtenidos para cada una de ellas.

La zona 1, correspondiente a Salobreña, no sufre apenas cambios en cuanto al perfil de playa (figura 4.40a, b, c y d). En general, se observan diferencias inferiores a un metro entre cada uno de los años. Sí podemos observar alguna diferencia algo mayor en algunos perfiles entre el año 2004 y el resto. Esto seguramente se deba a errores de medidas en la realización de la batimetría, ya que si entre el año 1999 y 2014 no hay diferencias reseñables después de la profundidad de cierre, parece poco probable que se produzcan entre 1999 y 2004.

La zona 2 es la zona que más cambios sufre, puesto que es la que incluye la desembocadura del Guadalfeo. En la parte más oriental de esta zona vemos como no hay apenas diferencias entre los perfiles (figura 4.40e). Sin embargo, conforme avanzamos hacia el delta podemos observar como se produce una importante pérdida de sedimento en el perfil de playa de los años 2008 y 2014 (figura 4.40f) alcanzando valores de en torno a los 2 m. Si seguimos avanzando hacia el delta, vemos en la figura 4.40g como la erosión continúa avanzando, produciéndose un avance de la profundidad de cierre en los años 2008 y 2014. En la parte más oriental de la zona 2, ya en Playa Granada (figura 4.40h), vemos como el perfil del año 2008 se sitúa ya en una posición muy parecida a los del año 1999 y 2004, mientras que en el perfil del año 2014 persiste la erosión respecto al resto. Este comportamiento sugiere que la erosión que se produce debido a la reducción del volumen de sedimentos que aporte el río, se desplaza progresivamente hacia el este desde la desembocadura.

La erosión en los perfiles del año 2014 continúa en la parte más occidental de la zona 3 (figura 4.40i). Sin embargo, conforme avanzamos en dirección este hacia la Punta del Santo vemos que los perfiles se vuelven a igualar y no se observa ninguna diferencia entre ellos (figuras 4.40j, k, l). En la punta del santo (figura 4.40m, n, o, p), ya en la zona 4, los perfiles prácticamente no sufren variación a lo largo del periodo de estudio. Como ya vimos en el apartado de resultados de la evolución en planta, la punta del santo parece ser un punto fijo de nuestro sistema, actuando como eje del resto de transformaciones.

Por último, la zona 5 (figura 4.40q, r, s, t) es la única parte de toda la zona de estudio en la que vemos como se produce depósito de sedimentos. Mientras que los perfiles de 1999 y 2004 son prácticamente coincidentes, los correspondientes a los años 2008 y 2014 se sitúan por encima de estos. Este depósito, ya vimos que se explica por la deriva litoral que generan los oleajes que provienen del SO. Al llegar estos a la playa de poniente se encuentran con la barrera que supone el dique del puerto de Motril, depositándose en esta zona.

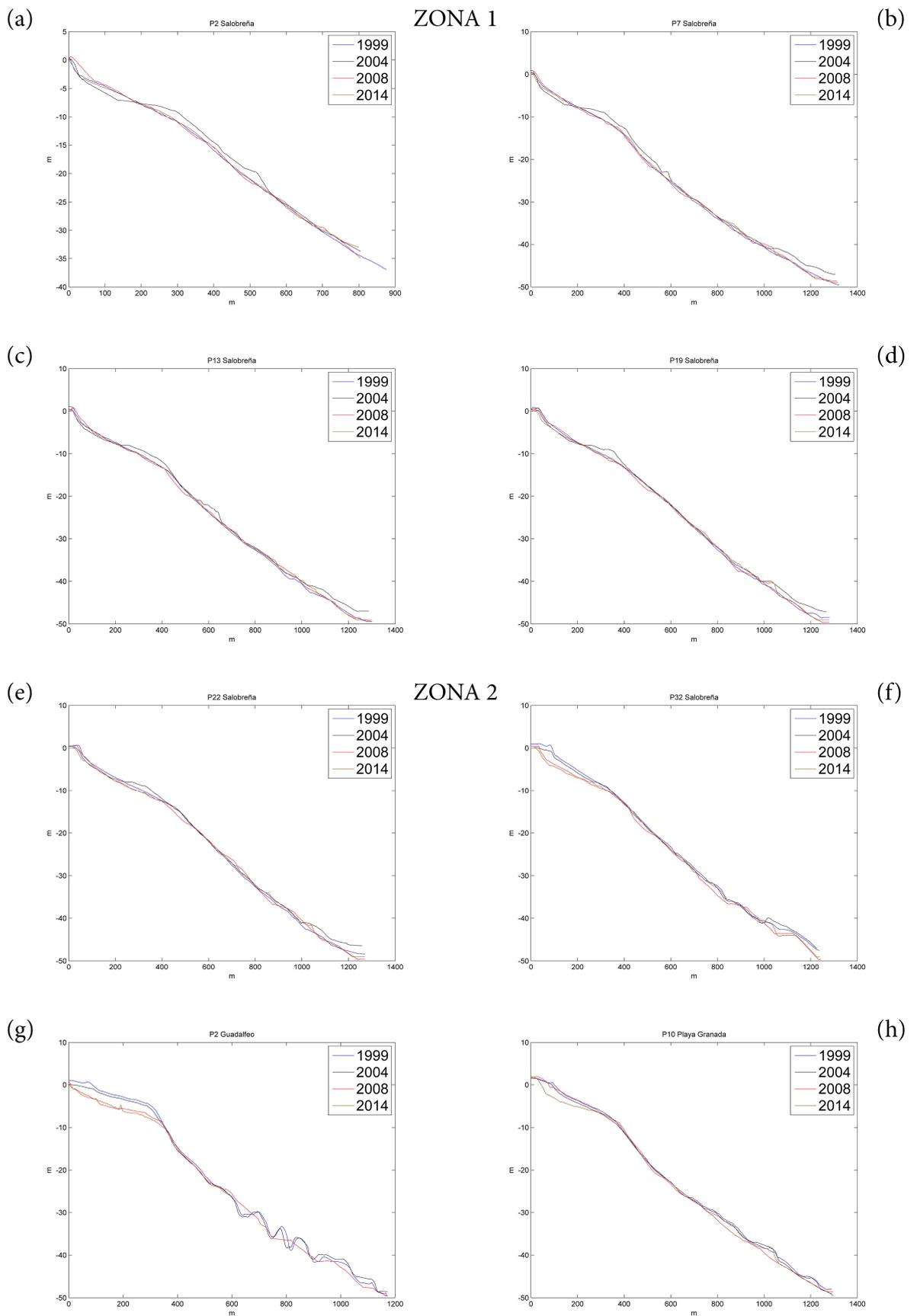


Figura 4.40: Evolución temporal del perfil de playa

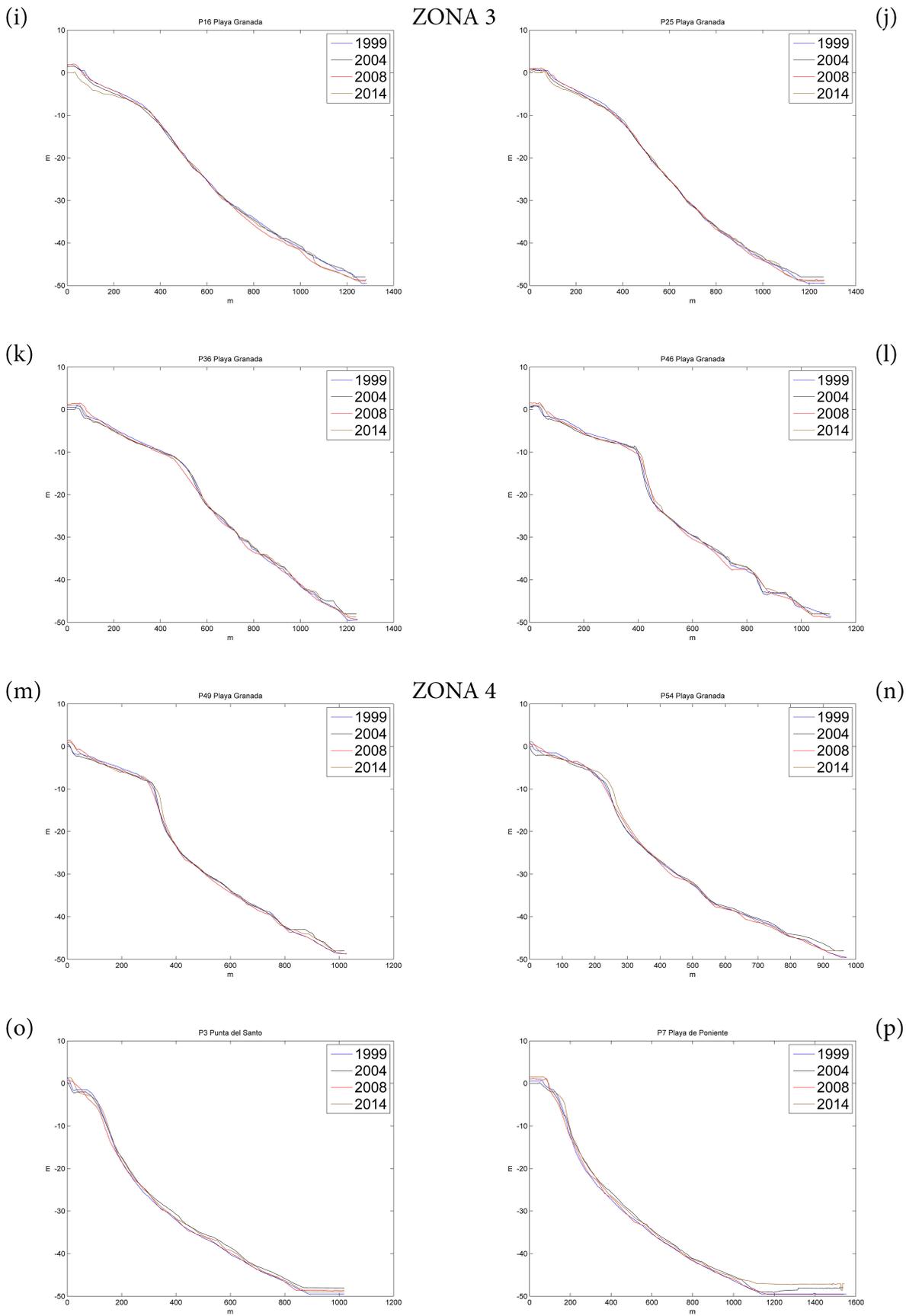


Figura 4.41: Evolución temporal del perfil de playa

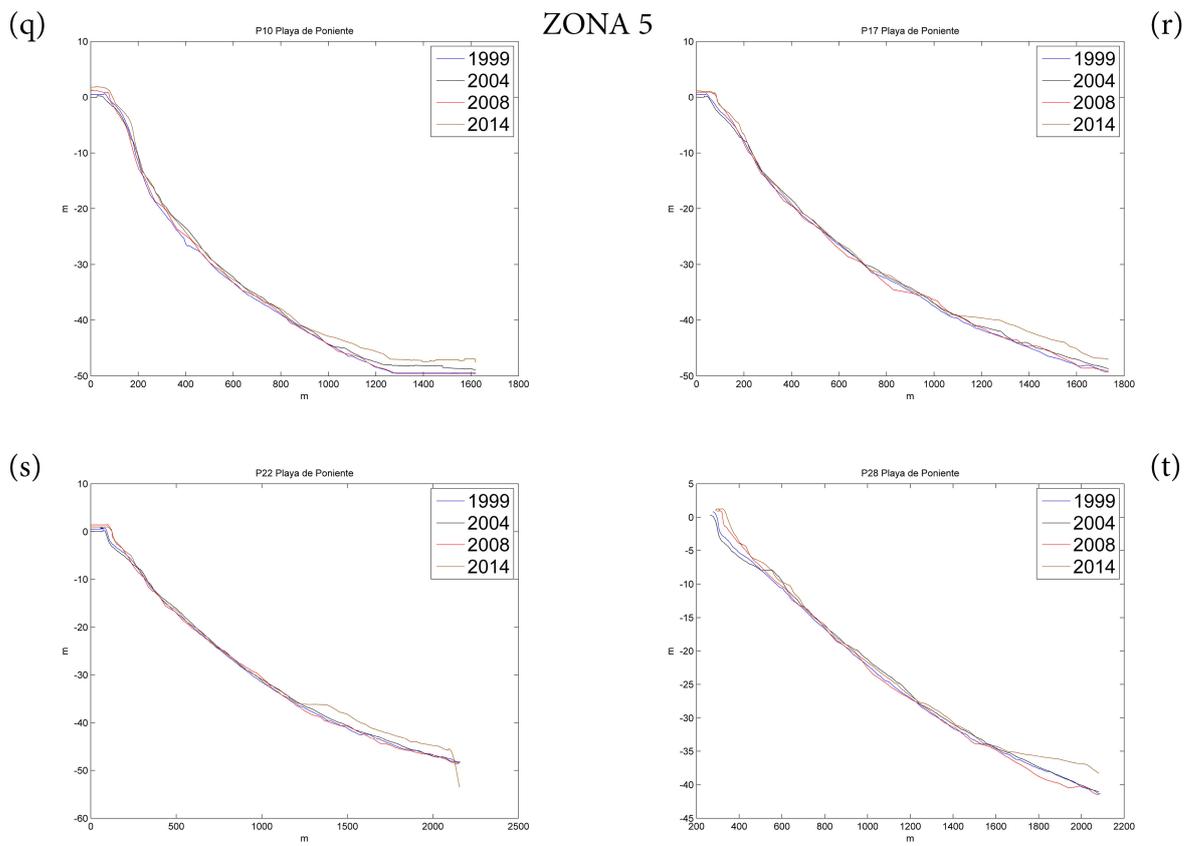


Figura 4.42: Evolución temporal del perfil de playa

## 4.5. Evolución conjunta

Para terminar con el análisis de la evolución del delta, presentamos a continuación los resultados obtenidos en el estudio del balance sedimentario entre cada una de las batimetrías. En la tabla 4.2 tenemos las diferencias de volumen en  $\text{m}^3$  entre cada dos batimetrías. El signo positivo significa que se ha ganado volumen y el negativo pérdida.

	1999 – 2004	2004 – 2008	2008 – 2014
Diferencia VC	+1968.43	-394892.32	+105430.58
Diferencia VCp1	-24757.37	-66372.27	-15195.64
Diferencia VCp2	-76189.02	-294362.59	-11185.11
Diferencia VCp3	-49172.79	-84371.71	-114361.96
Diferencia VCp4	+9592.63	+2071.41	+5854.83
Diferencia VCp5	+142494.97	+48142.84	+240318.45

Tabla 4.2: Diferencias en el volumen de sedimentos (en  $\text{m}^3$ ) basadas en medidas batimétricas: volumen de control y volúmenes de control parciales.

Si separamos por periodos, en el periodo 1999-2004 vemos que en el conjunto del volumen de control no ha habido grandes cambios, produciéndose tan solo un pequeño aumento de volumen de  $1968.43 \text{ m}^3$ . Si miramos los resultados en cada uno de los volúmenes parciales, vemos que en este periodo lo que tenemos es un transporte longitudinal de sedimentos hacia el este, perdiéndose volumen de los volúmenes 1, 2 y 3 y acumulándose, más o menos esta cantidad en los volúmenes 4 y 5. Si miramos la figura 4.13 vemos que no hubo grandes aportaciones de caudal por parte del río, lo que unido a que como vemos en la figura (rosa de oleaje periodo 1999-2004) los oleajes con más contenido energético provenían de la dirección O-SO, favoreciendo el transporte de sedimentos en esta dirección por deriva litoral.

En el periodo 2004-2008 es donde encontramos una mayor diferencia en el volumen de sedimentos, produciéndose una pérdida de  $394892.32 \text{ m}^3$ . Por volúmenes parciales vemos que la mayor pérdida se produce en el volumen 2, el que incluye la desembocadura del Guadalfeo, en el cual la diferencia es de  $-294362.59 \text{ m}^3$ , mientras que los volúmenes 1 y 3 la diferencia es de  $-66372.27$  y  $-84371.71 \text{ m}^3$  respectivamente. Por su parte, en los volúmenes 4 y 5 se sigue produciendo acumulación de sedimentos aunque en menor magnitud que en el periodo anterior. Durante este periodo, las precipitaciones fueron menores que en los anteriores lo que redujo el caudal que circuló por el Guadalfeo (figura 4.13). Además en el año 2004 entró en funcionamiento la presa de Rules lo que supuso una barrera adicional para los sedimentos, lo que junto con la reducción del caudal explicaría la pérdida de volumen.

Por último en el periodo 2008-2014 el balance global es de  $+105430.58 \text{ m}^3$ , sin embargo los resultados parciales varían mucho según que volumen de control miremos. Mientras que en los volúmenes 1,2 y 3 continúan las pérdidas, la acumulación aumenta en los volúmenes 4 y 5. El volumen que mayor diferencia experimenta en este caso es el 5 donde tenemos un aumento de  $240318.45 \text{ m}^3$ . En cuanto a los volúmenes que sufren pérdidas el que mayor diferencia experimenta, en este caso, es el 3 con  $-114361.96 \text{ m}^3$  aunque el volumen 2 también pierde  $11185.11 \text{ m}^3$ . Durante este intervalo, se produjo el mayor evento de precipitación de todo el periodo de estudio (figura 4.13) y aunque la mayor parte del caudal generado por este quedó retenido en Rules, el volumen que llegó a la desembocadura fue considerable. Cuando veíamos los resultados de la evolución en planta, ya vimos como este aporte de sedimentos se reflejaba en la línea de costa del año 2010. Tras la acción del oleaje, la mayor parte del volumen que inicialmente se acumula en la desembocadura queda depositado en el volumen 5 al encontrarse el dique de abrigo del puerto de Motril. Al margen de este episodio de

precipitación aislado, la reducción en el aporte de sedimentos continúa, de ahí que en las zonas 2 y 3 continúe la pérdida de sedimento. Vemos además como, efectivamente, la erosión se traslada hacia el este, siendo en este periodo más alta en el volumen 3 que en el 2.

Si miramos por volúmenes de control parciales, vemos que el comportamiento del sistema es claro. Los tres primeros volúmenes pierden sedimento en cada uno de los periodos. El que mayor pérdida total sufre es el volumen de control 2, asociado a la desembocadura, que pierde un 0.63 % de su volumen inicial en 1999, como ya hemos visto, el periodo en el que más volumen se pierde en esta zona es el 2004-2008 con un 0.48 % de pérdida, más del doble de lo que se pierde en suma en los otros dos periodos: 0.13 % entre 1999 y 2004; y 0.02 % entre 2008 y 2014. El volumen 3, asociado a Playa Granada, también sufre una pérdida de volumen total considerable: un 0.52 %. En este caso la pérdida es progresiva: 0.1 % en el periodo 1999-2004, 0.18 % entre 2004 y 2008; y por último en el periodo 2008-2014 un 0.24 %. Vemos como la erosión para este volumen parcial en el último intervalo de tiempo es mucho mayor que en el volumen 2 (0.24 % frente a 0.02 %) lo que sugiere que la erosión se ha trasladado hacia el este al quedar el volumen 2 en equilibrio. Los resultados en el volumen de control 1 también se corresponden con esta hipótesis perdiendo este un 0.22 % en el intervalo 2004-2008 y solo un 0.05 % en el periodo 2008-2014. En esta primer volumen de control la pérdida total es del 0.35 %. Si los tres primeros volúmenes se erosionan durante todo el periodo de estudio, por su parte el volumen 4 (correspondiente a la Punta del Santo) podemos considerar que no sufre apenas ningún cambio. El resultado total del balance concluye que solo gana en total un 0.06 % en todo el periodo de estudio. Parece confirmarse que la Punta del Santo actúa como eje invariable del sistema. Ya por último, como ya hemos comentado anteriormente, el volumen parcial 5, correspondiente a la Playa de Poniente, acumula gran cantidad de los sedimentos que se pierden en el resto de volúmenes. Esta último zona gana un total del 0.88 % respecto a su volumen inicial. Como ya hemos visto también, el periodo de más acumulación es el último (2008-2014) debido a las grandes precipitaciones que tienen lugar en 2010, ganándose un 0.49 % del volumen inicial. En los otros dos intervalos considerados también se produce acumulación pero en menor medida: entre 1999 y 2004 un 0.29 % y un 0.1 % en el intervalo 2004-2008.

Este proceso de erosión se refleja en la forma de la batimetría. En la figura 4.43 vemos la comparación de las formas de la batimetría entre cada uno de los periodos, para cada volumen de control parcial. En el periodo 1999-2004 (figura 4.43a) los cambios en el volumen no se traducen en cambios en la morfología sumergida. Sin embargo, la erosión producida en el volumen 2 en el periodo 2004-2008 produce un giro en la batimetría hasta, aproximadamente, la octava isobata. En la figura 4.43b.2 tenemos acotado dicho giro, que va desde el sureste de la desembocadura (Playa Granada) hasta el noroeste (Salobreña). Para este periodo en el resto de volúmenes la morfología continúa sin cambios importantes. En el último periodo podemos ver como, al igual que la erosión, los cambios morfológicos también se han trasladado hacia el este, alcanzando el volumen parcial número 3. En este caso el giro no está tan desarrollado aún como en el periodo anterior, pero ya podemos observar un giro hasta la cuarta isobata (figura 4.43c.3). Por tanto, de continuar esta tendencia, el giro continuaría extendiéndose hasta alcanzar una forma parecida a la del giro sureste de la figura 4.43b.2, que parece haberse estabilizado. Así, vemos como el clima marítimo de la zona, con oleajes provenientes del O-SO posibilita el transporte longitudinal de sedimentos, dando lugar a que los problemas de erosión se vayan trasladando, progresivamente, en la dirección O-E.

Comparación 1999-2004

Comparación 2004-2008

Comparación 2008-2014

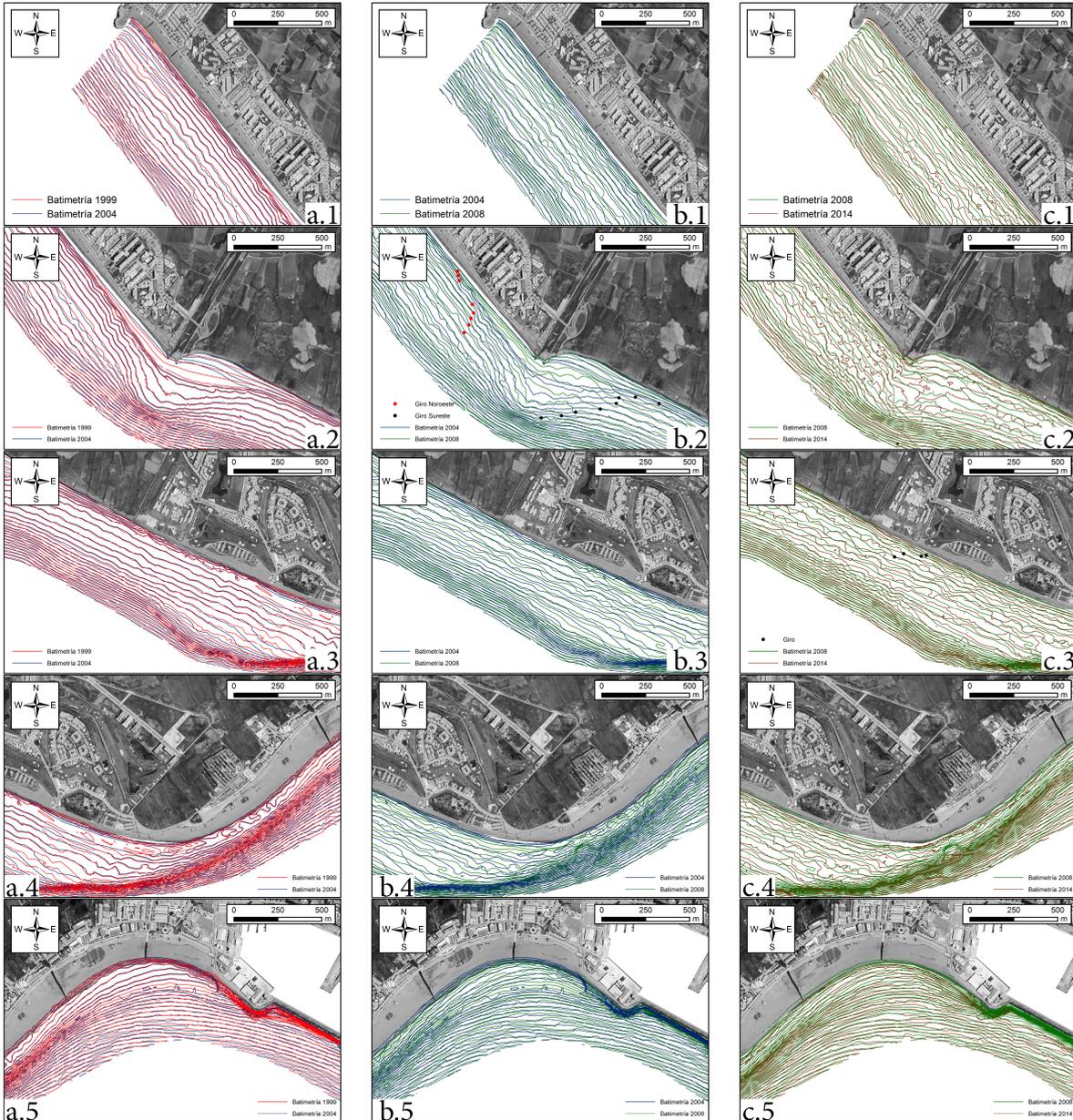


Figura 4.43: Comparación de la morfología de la batimetría para cada uno de los periodos estudiados

## 4.6. Aplicación del modelo numérico

### 4.6.1. Análisis del Régimen Medio

Con el fin de estudiar la propagación completa del régimen medio en el delta del Guadalfeo, se han tomado en total 488 puntos de control. Estos puntos se corresponden con la intersección de cada uno de los 122 perfiles estudiados con las batimétricas de profundidad -4, -8, -16 y -32 m. La localización de estos puntos la podemos observar en la figura 4.44. Para la presentación de los resultados se han escogido los puntos más representativos de la profundidad -8 m. En el caso del estudio de la propagación, sí se han utilizado los resultados de las cuatro profundidades.

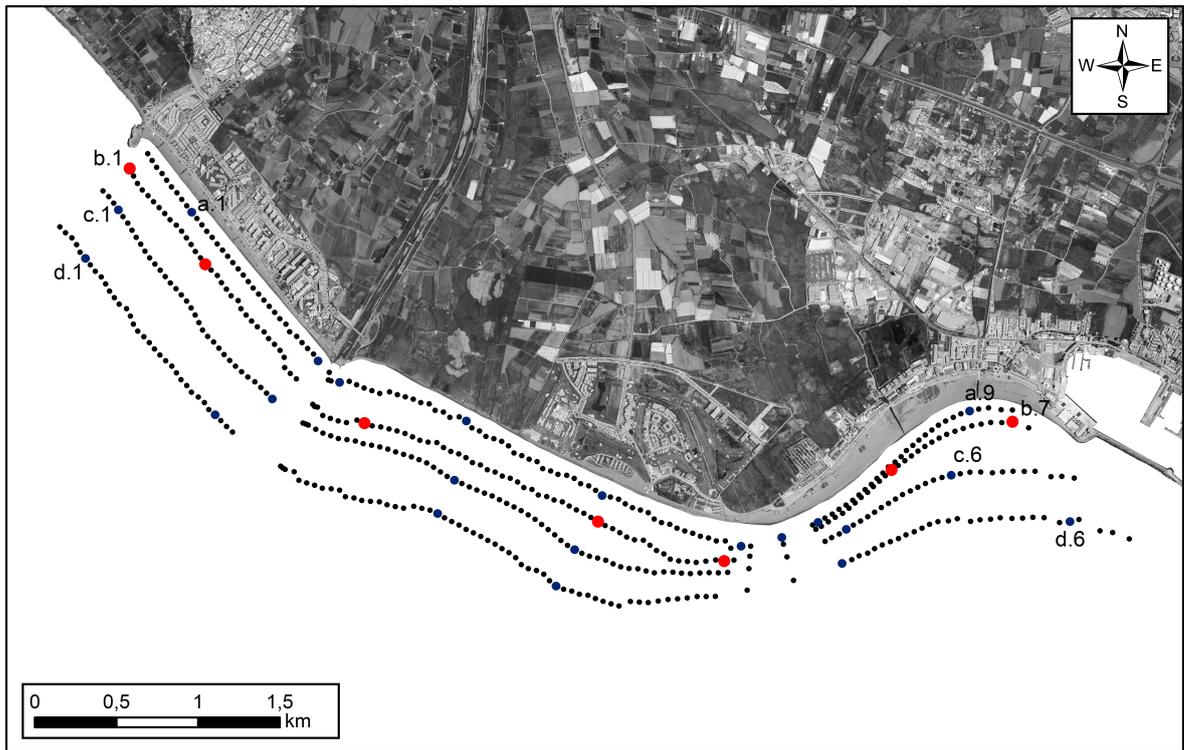


Figura 4.44: Localización de los puntos de control. Los puntos de color rojo son los puntos que se presentarán en los apartados 4.6.1.1 y 4.6.1.2. Los puntos de color azul serán representados en el apartado 4.6.1.3

#### 4.6.1.1. Altura de ola

Las alturas de ola más frecuentes a lo largo de toda la zona de estudio son las que se encuentran en el intervalo 0.25-0.5m con casi un 40% del total. Las siguientes son los intervalos 0.25-0.5 m y 0.5-0.75 m. El 85% de las alturas de ola son menores de 0.75 m.

Si observamos las alturas de ola longitudinalmente vemos que desde el punto b.1 al b.3 las olas de menor altura se hacen menos frecuentes, aumentando la frecuencia del intervalo 0.5-0.75 m. A partir del punto b.4 hasta el b.7, la tendencia es la contraria. Aumenta la frecuencia de las olas de menor altura, descendiendo la frecuencia del intervalo 0.5-0.75 m. Las alturas de ola mayores de 0.75 m apenas varían entre los distintos puntos.

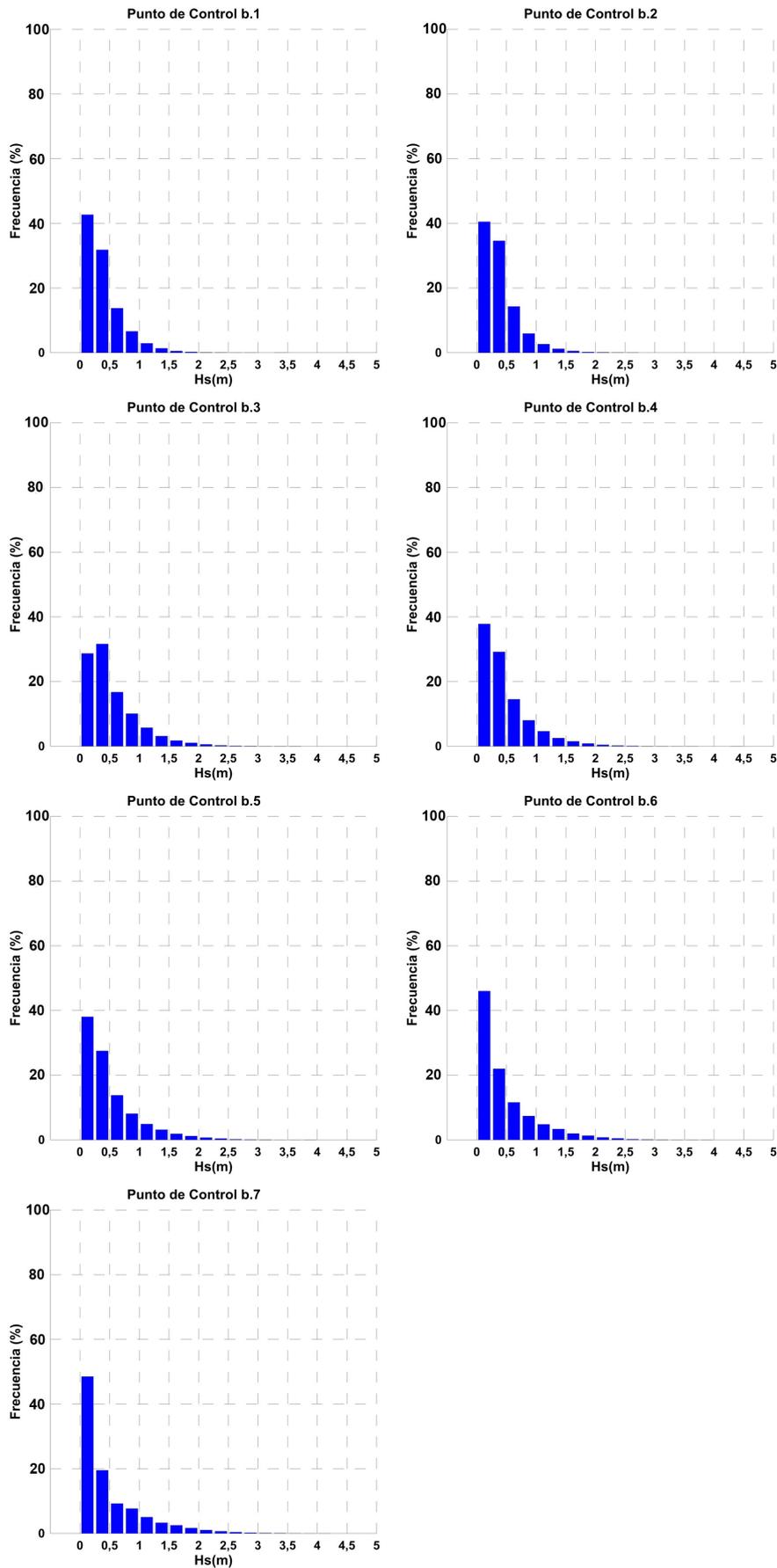


Figura 4.45: Histogramas de altura de ola significante en la batimétrica -8m

## 4.6.1.2. Rosas de oleaje

En cada punto, el oleaje procede principalmente de dos direcciones Este y Oeste. En el siguiente apartado, se profundizará más en la variación de esas dos direcciones tanto longitudinal como transversalmente a la costa.

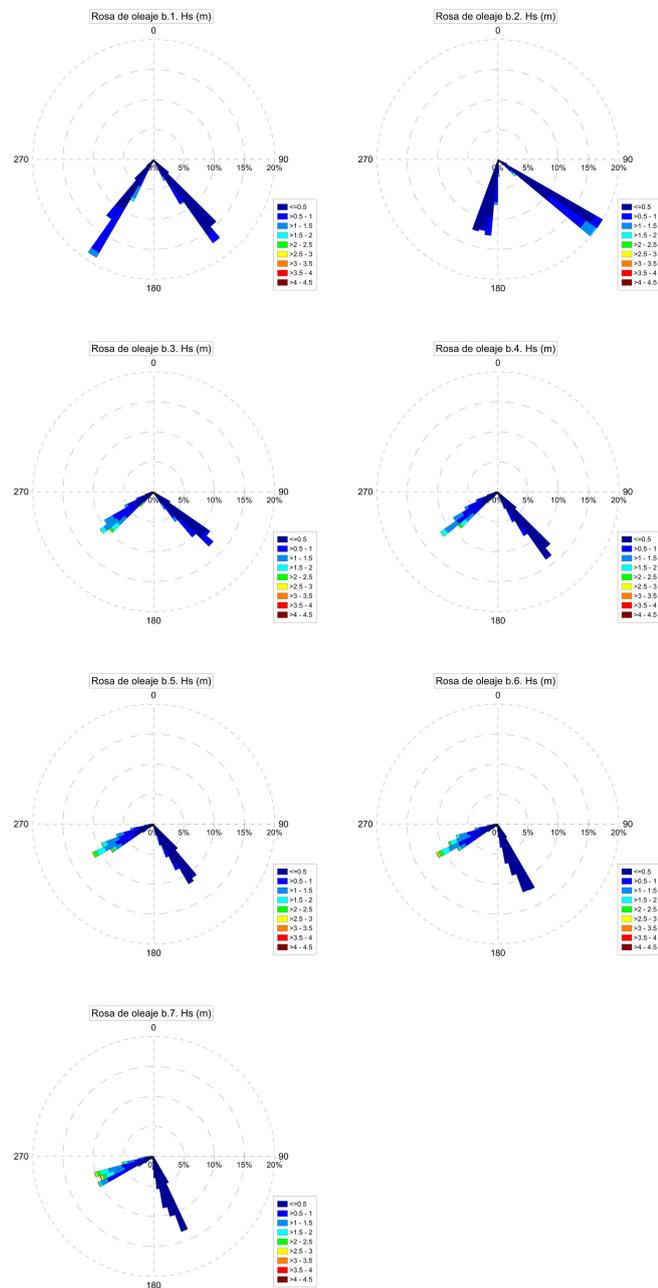


Figura 4.46: Rosas de oleaje en la batimetría -8m

#### 4.6.1.3. Propagación de oleaje

A continuación se analizarán las diferencias observadas entre las direcciones de procedencia del oleaje entre los distintos puntos de control.

Paralelamente a la línea de costa, vemos que conforme avanzamos en dirección oeste-este, en primer lugar las direcciones de oleaje se acercan al este y al oeste desde direcciones más cercanas al sur (puntos a1-a2, b1-b3, c1-c2, d1-d2, figura 4.47). A partir de dichos puntos, por un lado, la dirección oeste prácticamente se mantiene fija. Mientras que los oleajes que proceden del este se acercan cada vez más a la dirección sur (puntos a9, b7, c6, d6).

Perpendicularmente, la influencia de la refracción se deja notar conforme la profundidad descende. Así que mientras que el oleaje en la batimétrica -32 m procede de las direcciones E-O, conforme nos acercamos a la -4 m esas direcciones pasan a ser SE-SO.

En las zonas de Playa Granada, Punta del Santo y Playa de Poniente; se observa que la dirección S-SE prácticamente es perpendicular a la costa, mientras que los oleaje que provienen del O-SO forman un fuerte ángulo con la línea de costa. Esta disposición parece favorecer el transporte longitudinal de sedimentos desde el Oeste hacia el Este. Este resultado se corresponde con lo observado en las ortofotografías, en las que Playa Granada presentaba una fuerte erosión. Mientras que en la Playa de Poniente, sobre todo cerca del puerto, el proceso era el contrario, produciéndose una gran sedimentación.

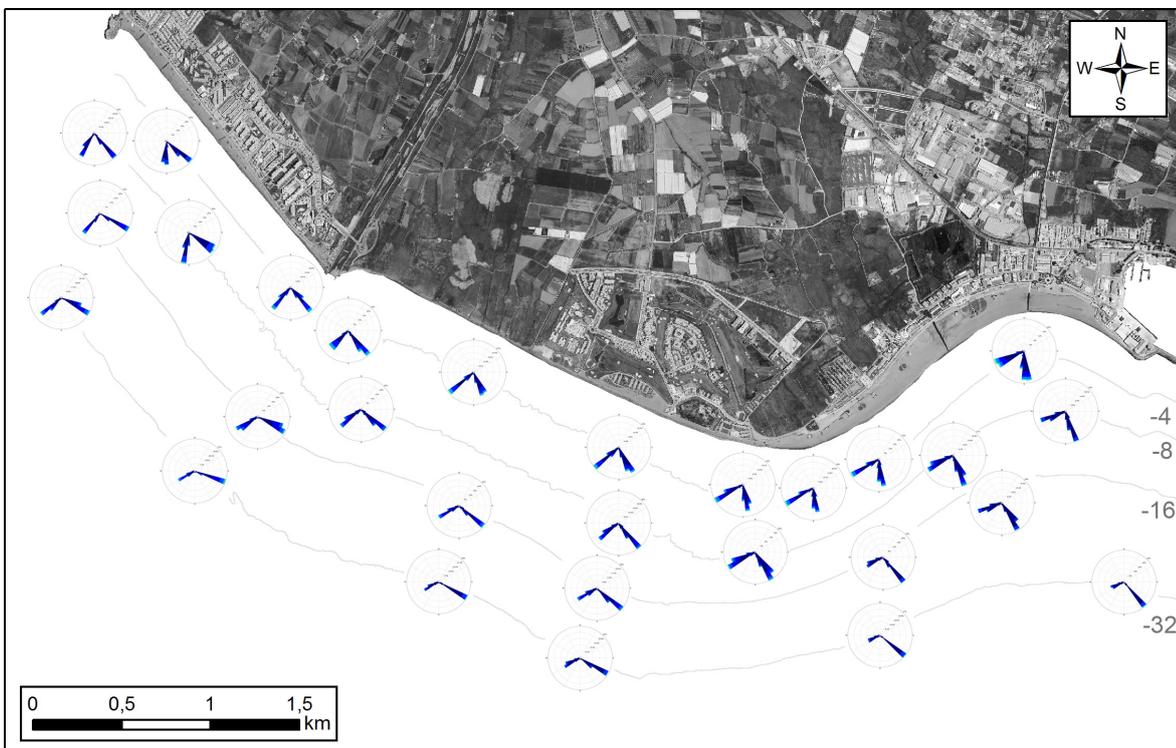


Figura 4.47: Propagación del oleaje en la zona de estudio. La separación entre las batimétricas está exagerada 200m

### 4.6.2. Evolución de la propagación del oleaje

En este apartado se presentan las consecuencias en la propagación del oleaje de los cambios producidos en la morfología sumergida.

En la figura 4.48 se presentan los resultados en condiciones medias. Para los oleajes que proceden del Este (4.48 a1-a4) la altura de ola asciende conforme avanzamos hacia el este de 0.1m a 0.3m. En cuanto a la dirección de procedencia, en la profundidad -8 m varía desde 160° al este, hasta descender a los 120° al oeste. A 4 m de profundidad, la influencia de la refracción hace que en la zona oeste la dirección de procedencia del oleaje ascienda hasta los 180°. Tanto a la profundidad 4m como a la profundidad 8m se puede observar como, en la zona al oeste del delta del Guadalfeo, la altura de ola y dirección varía significativamente entre los años 1999-2004 y 2008-2014. La altura de ola es menor en 1999 y 2004, mientras que los ángulos de procedencia son mayores. Esto se debe a los fuertes cambios que se han producido en la morfología sumergida, en la que entre el año 2004 y el año 2008 prácticamente ha desaparecido el cono del delta (4.43 b2). En el año 1999-2004, el cono deltaico del Guadalfeo suponía un obstáculo sumergido para la propagación del oleaje, de manera que si el oleaje procedía del este su altura de ola al oeste del delta descendía bastante. De la misma manera, la refracción producida por el cono deltaico se hace notar más fuertemente al oeste del delta.

Si observamos ahora los oleajes que proceden del oeste (4.48, b1-b4), vemos que la altura de ola es mucho más constante permaneciendo en 0.35 m en toda la zona al oeste de la Punta del Santo, para descender progresivamente a lo largo de la Playa de Poniente hasta 0.25 m. Algo parecido ocurre con la dirección de procedencia, manteniéndose en 220° al oeste de la Punta del Santo, y descendiendo hasta los 180° al este. A 4 m de profundidad, de nuevo vemos como la desaparición del cono deltaico produce que la altura de ola y la dirección de procedencia varíen fuertemente entre los años 1999-2004 y 2008-2014. Esta vez, se produce un descenso de la altura de ola y del ángulo de procedencia al este de la desembocadura, debido al mismo proceso explicado anteriormente. Es de destacar, que en el caso de los oleajes que proceden del oeste la variación sólo se produce en la batimétrica 4 m, y no es importante en la batimétrica 8 m. Esto coincide con lo observado en la figura 4.43 b2, ya que al oeste de la desembocadura, los cambios producidos en la batimetría alcanzaban una menor profundidad.

Por otra parte, en la figura 4.49 se presentan los resultados en condiciones de tormenta. En general, el comportamiento del sistema mantiene la misma tendencia. En los oleajes que proceden del este (figura 4.49 a1-a4) la altura de ola asciende según avanzamos en dirección O-E desde 1 m hasta 2.5 m. El ángulo de procedencia varía desde los 180° a 130° en la batimétrica -8m. Mientras que por efecto de la refracción, en la batimétrica -4m, el ángulo va desde 200° hasta 130°. De nuevo, la desaparición del cono del delta produce una variación grande entre los años 1999-2004 y 2008-2014 al oeste de la desembocadura.

Los oleajes que provienen del oeste (figura 4.49 b1-b4) presentan una altura de ola que varía, si seguimos la dirección O-E, desde 3 m a 1.5 m en la batimétrica -8m. Por su parte, en la batimétrica -4 m, las alturas son menores: varían desde 2.5 m a 1.5 m. El ángulo de procedencia cambia desde 240° hasta 160°. De nuevo, el cambio en el cono del delta solo se observa en la batimétrica -4m, sin embargo en este caso se acentúa aún más pasando de 2.5m de altura en los años 1999 y 2004, a alcanzar casi los 3 m en los años 2008 y 2014.

En resumen, los cambios morfológicos en la batimetría de la cuña deltaica han producido importantes alteraciones en la propagación del oleaje en las inmediaciones de la desembocadura del río Guadalfeo. Se ha desencadenado un proceso cíclico: el descenso del aporte de

sedimentos por parte del río ha causado el retroceso del delta, lo cual da lugar a alturas de ola mayores y, con ello, mayores tasas de transporte longitudinal, incrementando la erosión (retroceso) de la cuña deltaica. De esta manera, los cambios en la morfología se hacen cada vez mayores y éstos se extienden, junto con los cambios en la propagación del oleaje, longitudinalmente a ambos lados de la desembocadura.

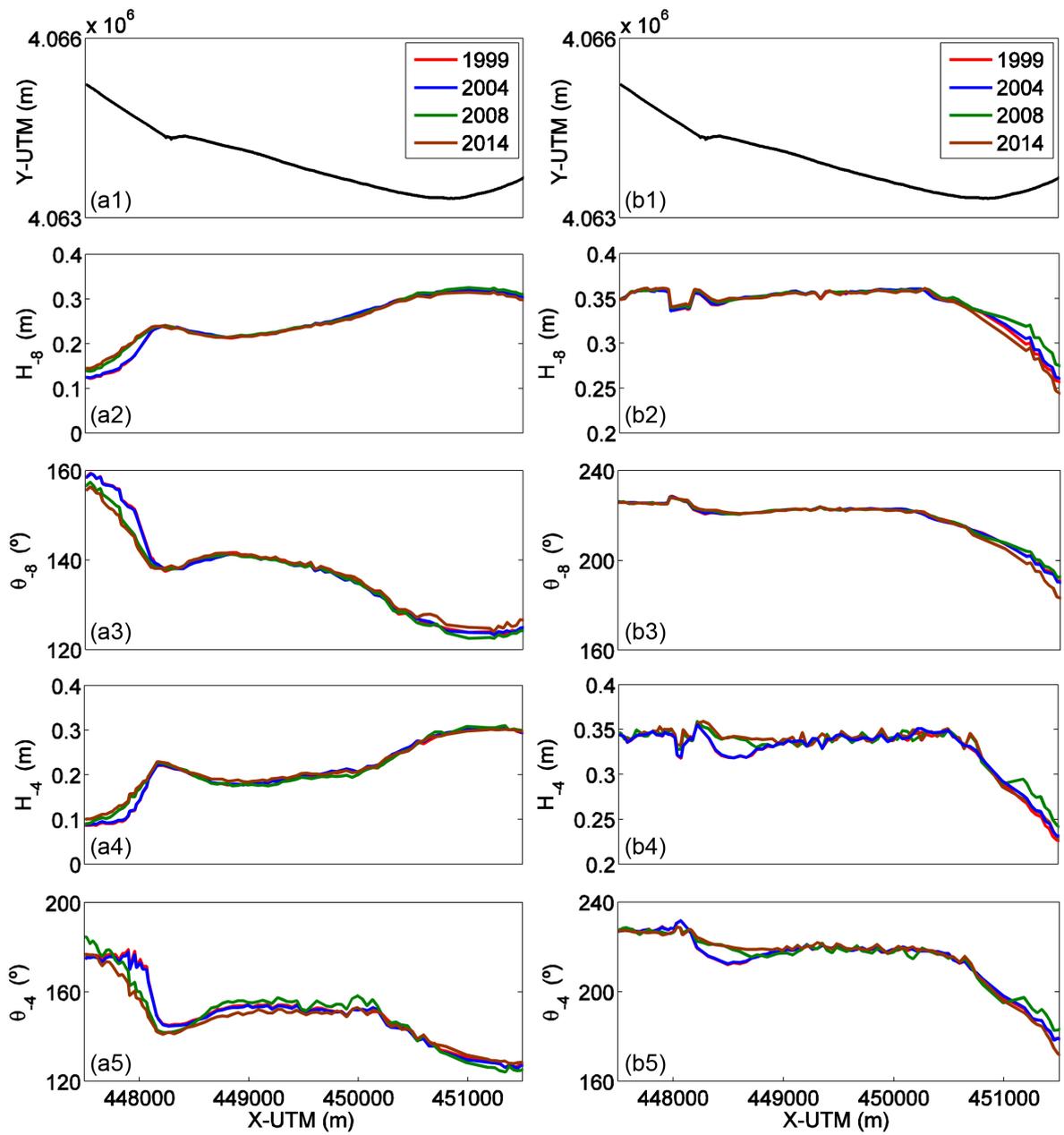


Figura 4.48: Evolución de la propagación del oleaje en condiciones medias. Las figuras a1-a4 representan oleajes que provienen del E, mientras que b1-b4 muestran oleajes procedentes del O

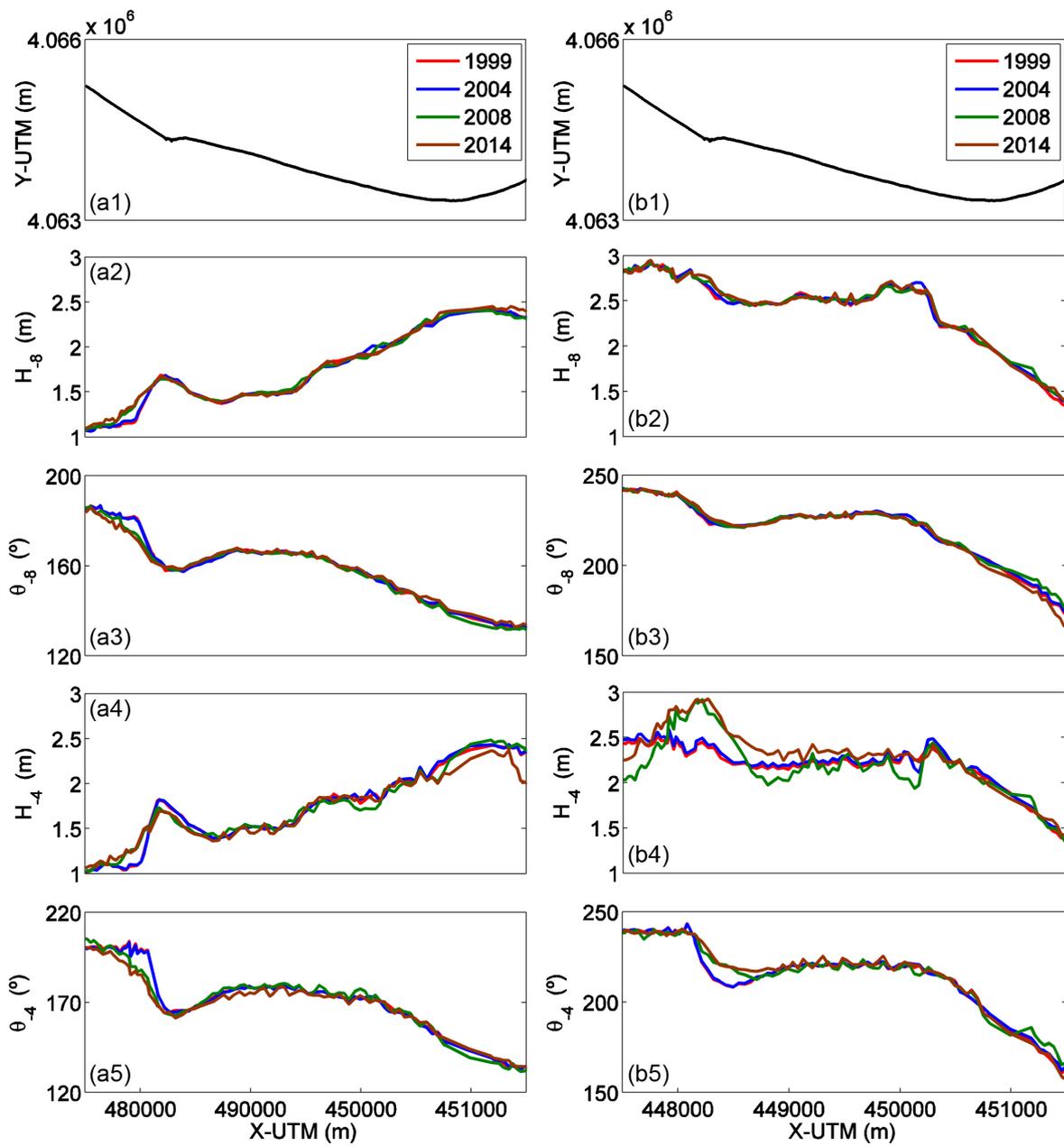


Figura 4.49: Evolución de la propagación del oleaje en condiciones de tormenta. Las figuras a1-a4 representan oleajes que produra vienen del E, mientras que b1-b4 muestran oleajes procedentes del O

### 4.6.3. Descarga fluvial

Por último, se presentan los resultados de la simulación de una descarga de sedimentos por parte del río Guadalfeo. La descarga corresponde a la acontecida entre el 21 y el 31 de diciembre de 2009. Se han calculado dos escenarios: por un lado el escenario natural, sin contar la influencia de la presa; y por otro lado el escenario real, tomando los caudales que salen de la presa.

En las figuras 4.50 y 4.51 se presentan los resultados de concentración de sedimento en  $kg/m^3$  en los escenarios natural y real respectivamente. Las variaciones entre ambos escenarios son muy fuertes: mientras que en el escenario natural se alcanzan concentraciones de  $4.5 kg/m^3$ , en el escenario real, apenas alcanza  $0.5 kg/m^3$ . Además, los sedimentos ocupan un área mucho mayor en el escenario natural, donde la longitud máxima de la pluma es de 300 m aproximadamente. En el escenario real, la longitud máxima apenas supera los 100 m.

Si observamos la sedimentación en las figuras 4.52 y 4.53 los cambios son aún mayores. En el escenario natural, los sedimentos se depositan en un área de  $60000 m^2$ , alcanzando en algunas zonas los 6 m de altura. Por su parte, en el escenario real los sedimentos depositados ocupan un área de  $10000 m^2$  alcanzando una altura de 0.6 m, e incluso presentando erosión en algunas zonas.

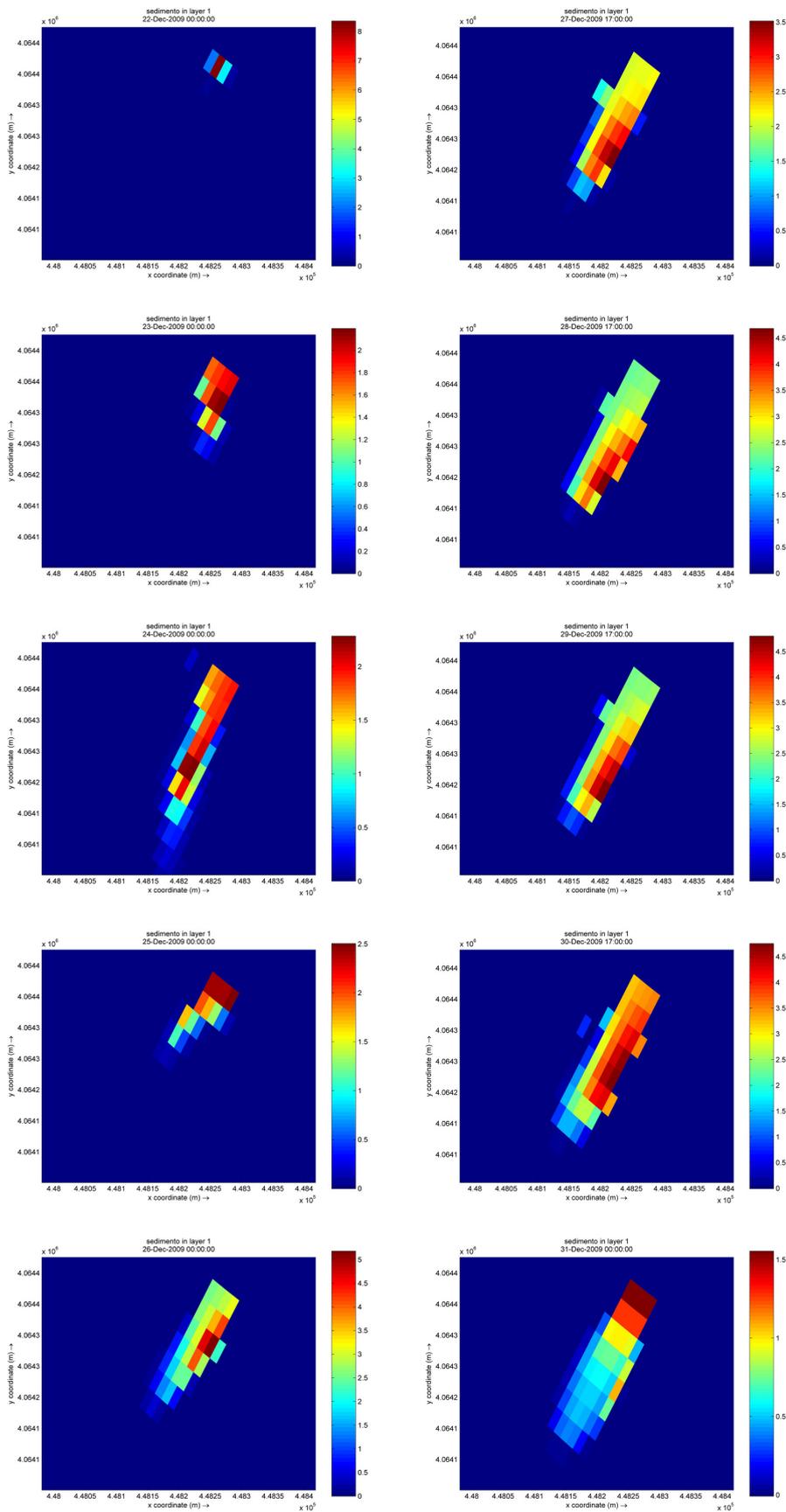


Figura 4.50: Concentración de sedimento en  $kg/m^3$  para el escenario natural

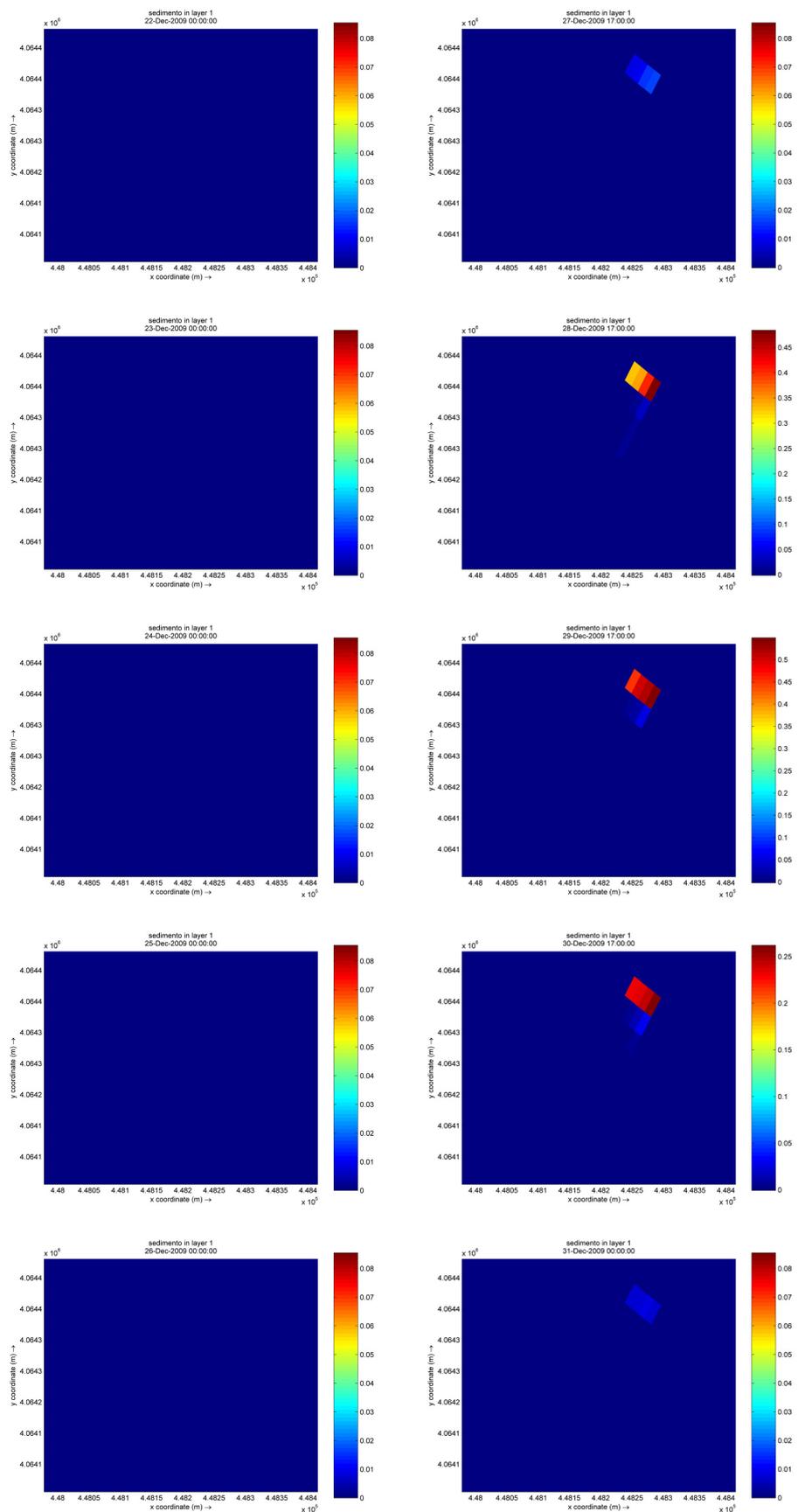


Figura 4.51: Concentración de sedimento en  $kg/m^3$  para el escenario real

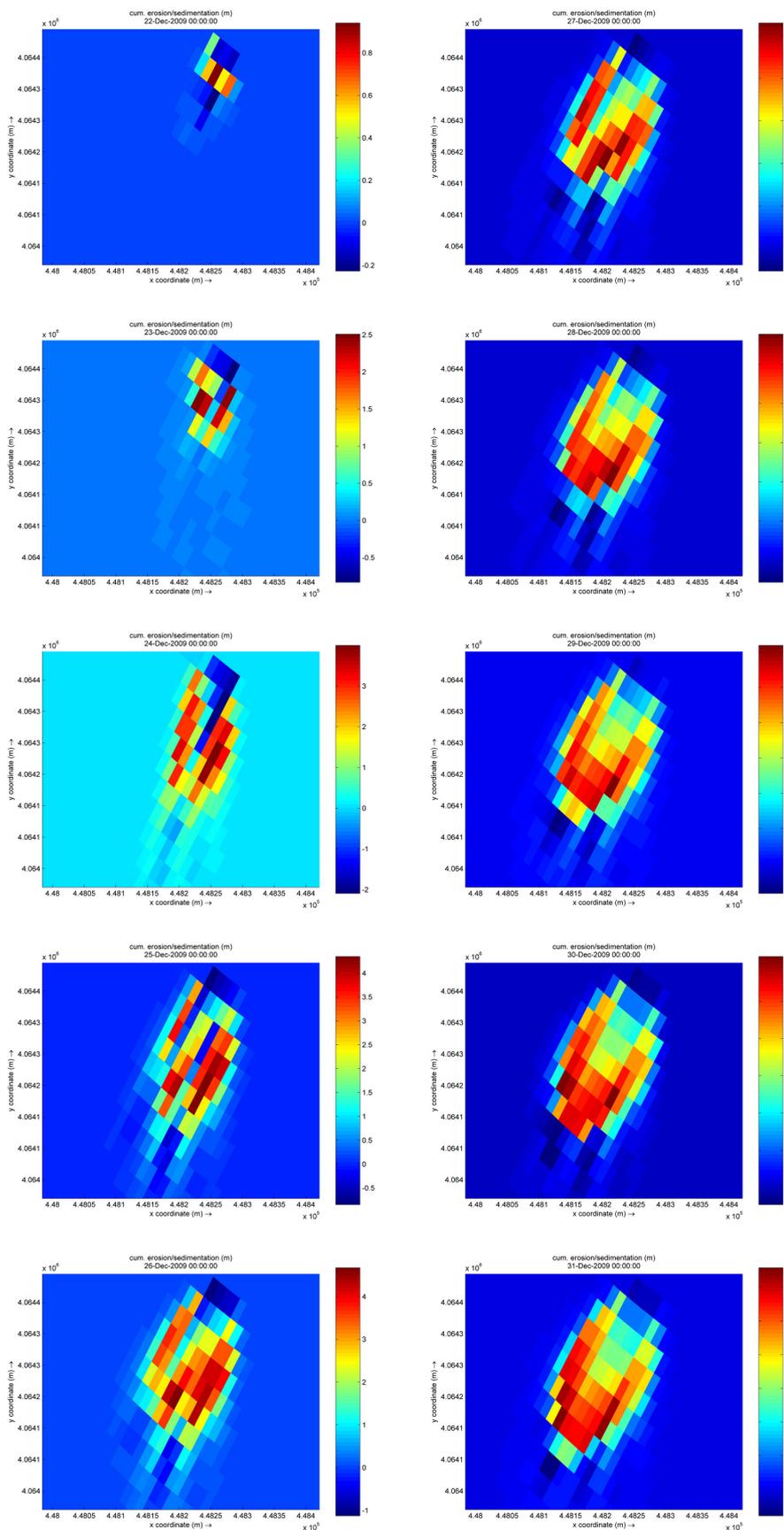


Figura 4.52: Erosión (negativo)/Sedimentación(positivo) acumulada en  $m$  para el escenario natural

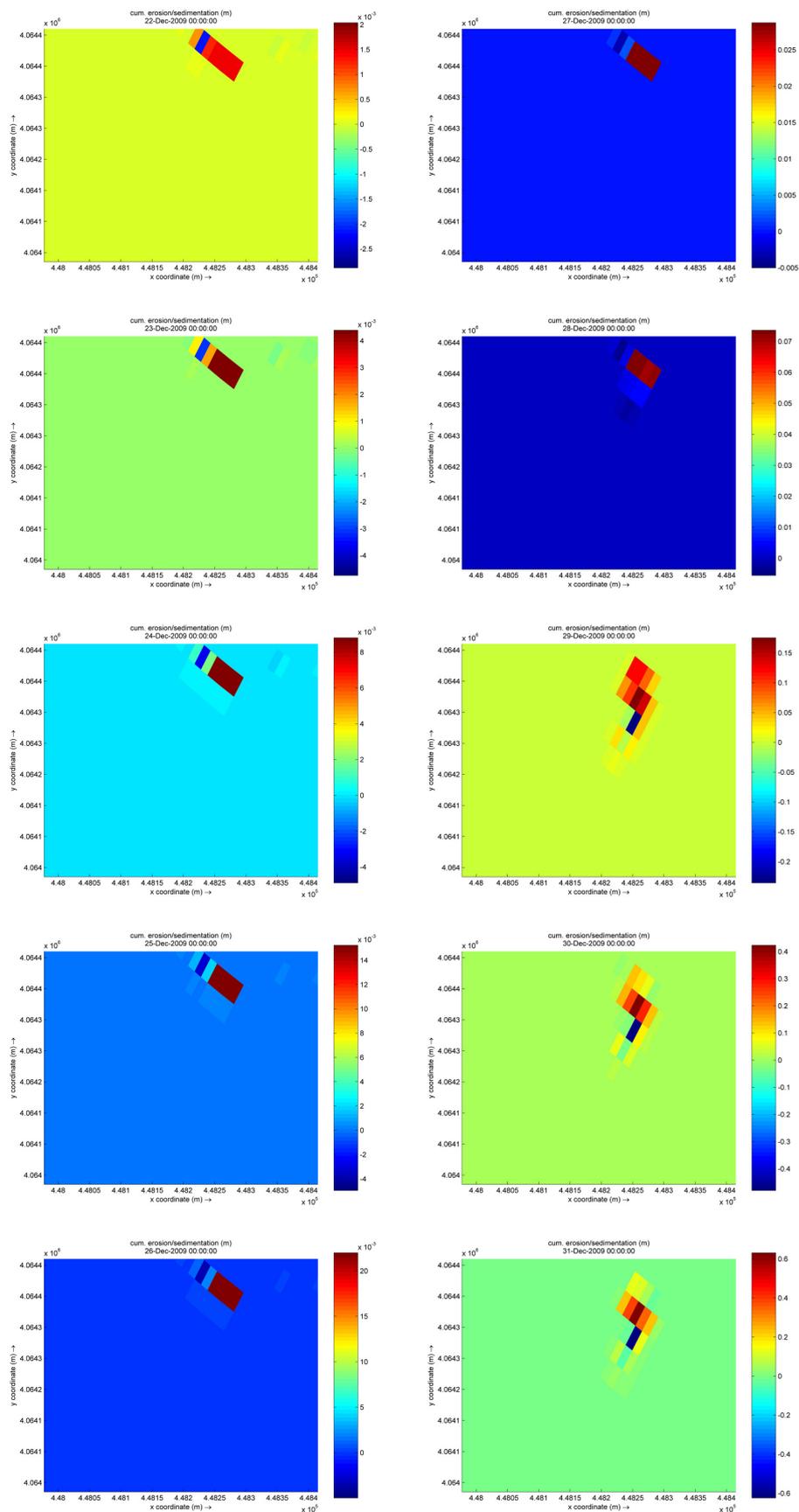


Figura 4.53: Erosión (negativo)/Sedimentación(positivo) acumulada en  $m$  para el escenario real



## Capítulo 5

# Conclusiones y recomendaciones

El objetivo principal de este trabajo es el de cuantificar los cambios producidos en el Delta del Guadalfeo debidos a las actuaciones humanas de los últimos años: presión urbanística y construcción de la Presa de Rules. Para ello, a partir de medidas batimétricas de diferentes años (1999, 2004, 2008 y 2014), hidrodinámicas, de precipitación, y a diversas ortofotografías; junto con la aplicación de un modelo numérico (Delft3D), se han analizado los siguientes aspectos:

- Régimen de caudales del Río Guadalfeo, en base a dos escenarios: natural (tomando los caudales que llegan a la presa, como si esta no se hubiera construido) y real (considerando los caudales que salen de la presa), de manera que se pueda cuantificar la afección de la presa al delta.
- Evolución en planta del Delta: retroceso de la línea de costa y evolución de la superficie construida.
- Evolución del perfil de playa.
- Evolución conjunta de planta y perfil: cálculo del volumen de sedimentos acumulado en las distintas batimetrías.
- Propagación del régimen medio.
- Propagación de estados de mar en condiciones medias y de tormenta en las distintas batimetrías, con el fin de estudiar los cambios que produce en la propagación del oleaje la alteración de la morfología sumergida.
- Descarga de sedimentos por parte del Río Guadalfeo bajo los dos escenarios: natural y real.

El análisis de los resultados ha permitido extraer las siguientes conclusiones:

El caudal del Guadalfeo siempre ha sido muy irregular, viéndose muy condicionado por eventos de precipitación torrenciales y por el deshielo de Sierra Nevada durante la primavera. La construcción de la Presa de Rules ha alterado de manera muy significativa el régimen de caudales que llega al Delta, disminuyendo éste de manera considerable y actuando como una barrera artificial para los sedimentos que transporta el río. Este descenso en el aporte de sedimentos desde el río se ha traducido en un retroceso generalizado de la línea de costa en torno al Delta, que en las zonas cercanas a la desembocadura del Guadalfeo ha alcanzado hasta

200 m. A esto se une que, en los últimos 50 años, la superficie construida se ha incrementado en 400 ha, lo que supone que el área de playa en las inmediaciones del Delta se ha reducido de manera considerable en los últimos 15 años.

Además, a día de hoy, Junio de 2015, las conducciones para riego y abastecimiento de la presa de Rules aún no se han acometido. Por tanto, aunque las afecciones sobre el delta son manifiestas, el 59% de los usos del agua implicados en la construcción del embalse aún no se han satisfecho. Esto, unido a los grandes costes ambientales, sociales y económicos parecen indicar que la presa no es una alternativa viable, cuya construcción no debiera haberse realizado.

En cuanto a la parte sumergida del delta, el descenso en la aportación del río ha supuesto que el volumen de sedimentos acumulado en el delta es considerablemente menor que hace 15 años. En la zona de la desembocadura se han perdido entorno a  $480000 m^3$  en este periodo. La primera consecuencia de esto es la desaparición parcial de la cuña deltaica del Río Guadalfeo. Entre el año 2004 y 2008 se produce un giro en las líneas batimétricas de la cuña que se traduce en un aumento de la profundidad. Entre el año 2008 y 2014 se empieza ya a observar que ese giro en las batimétricas, no solo se ha estabilizado, sino que se ha extendido hacia zonas más al este en Playa Granada.

El sucesivo aumento de la profundidad en la cuña deltaica, permite observar mediante las simulaciones en Delft3D, que el mismo estado de mar en aguas profundas produce ahora alturas de ola mayores en aguas someras que hace 15 años. Esto se traduce en un aumento de la tasa de erosión, lo que agrava aún más los cambios morfológicos en el Delta, y permite que éstos se extiendan longitudinalmente a ambos lados de la desembocadura. La bidireccionalidad del oleaje, con una fuerte componente O-SO, da lugar a que los sedimentos erosionados sean transportado hacia el este, de manera que, al igual que la zona más cercana a la desembocadura este sufriendo graves problemas de erosión, la Playa de Poniente, anexa al dique del Puerto de Motril, vea su área incrementada cada año. La simulación de la descarga de sedimentos mediante Delft3D nos permite observar que estos fenómenos se ven anulados por la retención de caudales de la presa de Rules. En el evento estudiado mediante el modelo numérico la acumulación de sedimentos en el delta pasa de los 6 metros, si la presa de Rules no se hubiera construido, a alcanzar apenas 0.5 metros tras la construcción de la presa. Esto impide que la cuña deltaica se recupere aunque solo sea parcialmente.

El caso del Guadalfeo supone un precedente de las graves afecciones que los cambios humanos en el entorno producen en los deltas. Invita a reflexionar para evitar que otros lugares similares puedan caer en el mismo error. A la vista de los resultados y conclusiones, se pueden realizar las siguientes recomendaciones:

- Completar el deslinde considerando la acción conjunta de forzamientos terrestres y marinos en zonas como desembocaduras y deltas a la hora de delimitarlo; aplicando la metodología propuesta por García et al. Y Desmantelar las construcciones asentadas sobre el Dominio Público Marítimo Terrestre e Hidráulico catalogadas como ilegales para recuperar la playa, llevando a cabo sobre los afectados las medidas compensatorias suficientes, incluyendo la redistribución de usos del suelo.
- Coordinación entre las distintas administraciones y las instituciones científicas. Financiando proyectos de investigación orientados al estudio multidisciplinar del litoral que se traduzcan en colaboraciones reales entre distintos grupos de investigación. De esta manera, posibilitar la participación y colaboración ciudadana a la hora de llevar a

cabo acciones de gestión integrada de las cuencas y el litoral, aplicando los resultados y propuestas de proyectos sociales (CAMP Almería) y de investigación (Proyecto Morfodinámica de Playas Heterogéneas en el Litoral Andaluz del Mar de Alborán, MORPHAL).



## Apéndice A

# Modelo numérico: ecuaciones y parámetros

En este apéndice se analizan todos los aspectos relacionados con el modelo numérico Delft3D: las ecuaciones que controlan cada módulo así como los parámetros que se han introducido en las simulaciones de este trabajo.

### A.1. Ecuaciones del software Delft3D: WAVE/SWAN

#### A.1.1. Ecuación de balance de acción

En el SWAN el oleaje se encuentra descrito por el espectro bidimensional de la densidad de acción  $N(\sigma, \theta)$  en lugar del espectro de densidad de energía  $E(\sigma, \theta)$  debido a que en presencia de corrientes la densidad de acción se conserva mientras que la densidad de energía no. La relación entre ambos es  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$ .

Este modelo se basa en la ecuación de balance de acción para describir la evolución del espectro de oleaje representada en coordenadas cartesianas y en el espacio frecuencia-dirección por:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (\text{A.1})$$

El primer término de la parte izquierda representa la evolución local a lo largo del tiempo de la densidad de acción, el segundo y el tercer término representan la propagación de  $N(\sigma, \theta)$  en el espacio geográfico (con velocidades de propagación  $c_x$  y  $c_y$ ), el cuarto término representa los cambios de la frecuencia relativa debido a las variaciones de la batimetría y las corrientes (siendo  $c_\sigma$  la velocidad de propagación en el espacio  $\sigma$ ). El quinto término representa la refracción del oleaje producida por los cambios de profundidad y corrientes (con velocidad de propagación  $c_\theta$  en el espacio  $\theta$ ). Las expresiones de estas velocidades de propagación son tomadas de la teoría lineal del oleaje [Whitham \(2011\)](#).

El término de la derecha de la ecuación A.1.1 ( $S = S(\sigma, \theta)$ ) es el término fuente de energía y es representado como la superposición de varios términos fuente de energía, los cuales se pasará a explicar a continuación.

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds,w} + S_{ds,br} + S_{ds,b} \quad (\text{A.2})$$

**A.1.1.1. Transferencia de energía al oleaje debida al viento,  $S_{in}$** 

El oleaje es una consecuencia del rozamiento del aire sobre la superficie del mar.

De la radiación solar que incide sobre la superficie de la Tierra, una parte de ella se invierte en producir un calentamiento desigual de la misma, lo que provoca en la atmósfera zonas de altas y bajas presiones, generando desplazamientos del aire de intensidad variable (viento).

La transferencia de energía del viento al oleaje es un proceso físico que aún no esta del todo entendido, la diferencia de presión en la atmósfera produce un movimiento desigual de las masas de agua que más adelante son arrastradas en forma de oleaje debido a la fricción entre el mar y el viento.

La expresión del término fuente correspondiente a la transmisión de energía debida al viento se encuentra constituida por la suma de un término lineal A más un término de crecimiento exponencial B:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (\text{A.3})$$

El término de crecimiento lineal A se calcula mediante la expresión de [Cavaleri and Rizzoli \(1981\)](#):

$$A = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{2\pi g^3} (U_* \cdot \max[0, \cos(\theta - \theta_w)])^4 H \quad (\text{A.4})$$

donde  $\theta_w$  es la dirección del viento,  $H$  es un filtro para eliminar el crecimiento del oleaje a frecuencias menores que la frecuencia de Pierson-Moskowitz y viene dado por:

$$H = \exp \left[ - \left( \frac{\sigma}{\sigma_{PM}^*} \right)^{-4} \right] \quad (\text{A.5})$$

donde  $\sigma_{PM}^*$  es la frecuencia pico del estado de mar completamente desarrollado y reformulado en términos de la velocidad friccional:

$$\sigma_{PM}^* = \frac{0.13g}{28U_*} 2\pi \quad (\text{A.6})$$

El crecimiento exponencial (B) esta representado por la expresión basada en la teoría de [Janssen \(1991\)](#):

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \left( \frac{U_*}{c_{ph}} \right)^2 \max[0, \cos(\theta - \theta_w)]^2 \sigma \quad (\text{A.7})$$

siendo:

$c_{ph}$ : Velocidad de fase

$\rho_a$ : Densidad del aire

$\rho_w$ : Densidad del agua

$U_*$ : Velocidad de fricción

$\theta$ : Dirección de propagación del oleaje

$\theta_w$ : Dirección del viento

$\beta$ : La constante de Miles, que se calcula a partir de la altura crítica no dimensional  $\lambda_h$ :

$$\beta = \frac{1.2}{\kappa^2} \lambda_h * \ln(\lambda_h) \quad \lambda_h \leq 1 \quad (\text{A.8})$$

$$\lambda_h = \frac{gz_e}{c_{ph}^2} e^r \quad r = \frac{\kappa c}{U_* \cos(\theta - \theta_w)} \quad (\text{A.9})$$

siendo  $\kappa$  la constante de Von Karman de valor 0.41 y  $z_e$  la longitud de rugosidad efectiva. En el caso de que  $\lambda_h \geq 1$ , la constante de Miles  $\beta$  es igual a 0.

Cuando el usuario define los parámetros de entrada al modelo, uno de ellos es la velocidad del viento a 10 metros de altura de la superficie ( $U_{10}$ ), pero el SWAN en su modelo computacional trabaja con  $U_*$  de modo que es necesario convertirla. El programa la calcula mediante un proceso iterativo a partir de la  $U_{10}$ .

#### A.1.1.2. Interacciones no lineales entre olas, $S_{nl}$

En primer orden, las olas marinas se pueden considerar como la superposición de componentes espectrales libres e independientes cada una con una frecuencia. Sin embargo, a órdenes más altos existen interacciones entre las diferentes componentes espectrales, las cuales producen un intercambio de energía, explicando así el crecimiento al principio de la formación de las olas.

Se consideran dos casos:

- **Interacción triádica** (*triad interactions*): Es la interacción de tres olas, en este caso dos olas interactúan de manera no lineal y transfieren energía a una tercera. Este tipo de interacciones son de mayor importancia en aguas someras, mientras que en aguas de mayor profundidad su importancia es mucho menor.
- **Interacción entre cuádrupletes** (*quadruplets interactions*): Son las interacciones no lineales entre grupos de cuatro olas que pueden intercambiar energía entre ellas si se cumplen ciertas condiciones. Este tipo de interacciones es de mayor importancia en aguas profundas.

#### Interacciones entre cuádrupletes

Hasselmann encontró en 1962 [Hasselmann \(1962\)](#) que en profundidades indefinidas las interacciones no lineales dominantes son las debidas a grupos de cuatro olas, las denominadas interacciones entre cuádrupletes. Éstas interacciones transfieren energía de las frecuencias altas a las bajas, produciendo el movimiento del pico espectral hacia frecuencias más bajas. Se vio que estos grupos de olas podían intercambiar energía cuando se cumplían la siguiente condición de resonancia:

$$\begin{aligned} \overline{k_1} + \overline{k_2} &= \overline{k_3} + \overline{k_4} \\ \overline{\sigma_1} + \overline{\sigma_2} &= \overline{\sigma_3} + \overline{\sigma_4} \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

siendo  $\overline{k_i}$  el vector número de onda de la ola y  $\sigma = 2\pi f$  la frecuencia angular de la onda.

Para el cálculo exacto de la transferencia no lineal de energía  $S_{nl}$  se hace necesario resolver la integral de Boltzman<sup>1</sup> ya que la cantidad de cambio de las distribuciones de densidad de las partículas  $\frac{\partial n_1}{\partial t}$  está directamente relacionado con  $S_{nl}$

<sup>1</sup>  $\frac{\partial n_1}{\partial t} = \int \int \int G(\overline{k_1}, \overline{k_2}, \overline{k_3}, \overline{k_4}) \delta(\overline{k_1} + \overline{k_2} - \overline{k_3} - \overline{k_4})$

Sin embargo a pesar de la tecnología disponible hoy en día, la resolución exacta de dicha integral es demasiado costosa desde el punto de vista computacional como para ser usada en la mayoría de los modelos numéricos.

En este sentido [Hasselmann et al. \(1985\)](#) fue el responsable de encontrar un método aproximado para resolver las interacciones no lineales entre cuadrupletes mediante el método de **Aproximación de Interacción Discreta (DIA)**.

En este método se consideran dos cuadrupletes: El primero esta formado por cuatro ondas cuyos vectores número de onda son  $(k_1, k_2, k_3$  y  $k_4)$ . Se asumen que los vectores  $k_1$  y  $k_2$  son iguales en módulo, dirección y sentido y están alineados. El vector  $k_3$  forma un ángulo  $\theta_3 = 11.5$  con respecto a  $k_1$  y  $k_2$ , mientras que el vector  $k_4$  forma un ángulo de  $\theta_3 = -33.6$ .

El segundo esta formado por otras cuatro ondas cuyos vectores número de ondas adoptan una configuración espejo del cuadruplete anterior, es decir,  $k'1 = k_1$  y  $k'2 = k_2$ . Y ahora  $k'3$  forma un ángulo  $\theta_3 = -11.5$  y  $k'4$  forma un ángulo de  $\theta_4 = 33.6$ .

En la figura A.1 se puede ver de forma más clara el esquema de los vectores número de onda:

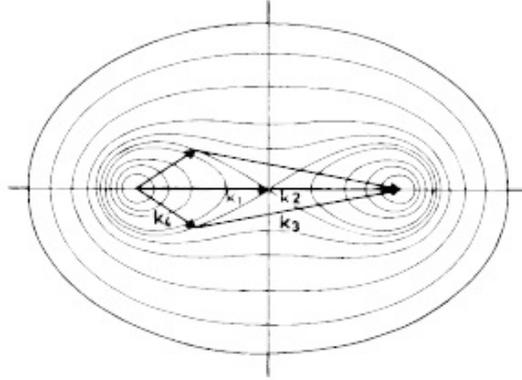


Figura A.1: Configuración de los cuadrupletes en el método de la Aproximación de Interacción Discreta. Fuente: [Hasselmann et al. \(1985\)](#)

En este método se asume que  $k_1 = k_2$ , de modo que las nuevas condiciones de resonancia están dadas por:

$$\begin{aligned}
 k_1 + k_2 &= k_3 + k_4 \\
 \sigma_1 &= \sigma_2 = \sigma \\
 \sigma_3 &= (1 + \lambda_n l) \sigma_1 \\
 \sigma_4 &= (+ - \lambda_n l) \sigma_1
 \end{aligned}
 \tag{A.11}$$

Donde  $\lambda_n l$  es una constante que toma un valor de 0.25

Con esta aproximación (la realizada por el método DIA), el término fuente  $S_{nl4}(\sigma, \theta)$  viene representado por:

$$S_{nl4} = (\sigma, \theta) = S_{nl4}^*(\sigma, \theta) + S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta)
 \tag{A.12}$$

donde  $S_{nl4}^*(\sigma, \theta)$  se refiere al primer cuadruplete (con  $\theta_3 = 11.5$  y  $\theta_4 = -33.6$ ) y  $S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta)$  se refiere al segundo (con  $\theta_3 = -11.5$  y  $\theta_4 = 33.6$ ):

$$S_{nl4}^*(\sigma, \theta) = 2\delta S_{nl4} = (\alpha_1, \theta, \sigma) - \delta(\alpha_2, \sigma, \theta) - \delta(\alpha_3, \sigma, \theta) \quad (\text{A.13})$$

con  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = (1 + \lambda)$  y  $\alpha_3 = (1 - \lambda)$ .

### Interacciones triádicas

En profundidades reducidas, las interacciones no lineales que toman mayor fuerza son las triádicas, lo que hacen es redistribuir la energía de las altas frecuencias a otras menores, así los espectros pasan de tener un solo pico a tener varios a medida que se van acercando a la costa. El problema está en que el modelado de las interacciones triádicas en términos de densidad de energía  $E(\sigma, \theta) = N(\sigma, \theta) \cdot \sigma$  es sumamente complejo.

En 1995 Eldeberky y Battjes consiguieron una aproximación bastante buena para el cálculo de las interacciones triádicas, el DTA (Discrete Triad Approximation) (Eldeberky and Battjes (1995)). Partiendo del DTA, Eldeberky en 1996 modificó la formulación creando el LTA (Lumped Triad Approximation) (Eldeberky and Battjes (1996)). El SWAN tiene implementado esta aproximación y su formulación es la siguiente:

$$S_{nl3}(\sigma, \theta) = S_{nl3}^-(\sigma, \theta) + S_{nl3}^+(\sigma, \theta) \quad (\text{A.14})$$

$$S_{nl3}^+(\sigma, \theta) = \max[0, \alpha_{EB} 2\pi c c_g J^2 |\sin(\beta_i)| E^2(\frac{\sigma}{2}, \theta) - 2E(\frac{\sigma}{2}, \theta) E(S_{nl3}^+(\sigma, \theta))] \quad (\text{A.15})$$

$$S_{nl3}^-(\sigma, \theta) = -2S_{nl3}^+(\sigma, \theta) \quad (\text{A.16})$$

siendo  $\alpha_{EB}^2$  un coeficiente de proporcionalidad. Las velocidades de ola y de grupo son respectivamente  $c$  y  $c_g$ . La bifase  $\beta_i$  se aproxima con

$$\beta_i = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh\left(\frac{0.2}{U_r}\right) \quad (\text{A.17})$$

El número de Ursell  $U_r$  se define como:

$$U_r = \frac{g}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{H_s \bar{T}^2}{d^2} \quad (\text{A.18})$$

$$\bar{T} = \frac{2\pi}{\sigma}$$

$H_s$ : La altura de ola significativa

$d$ : Es la profundidad o calado

$J$ : Coeficiente de interacción (Madsen y Sorensen, 1993)

Esta es la aproximación que el SWAN tiene implementada para el cálculo de las interacciones no lineales entre tres olas, las denominadas interacciones triádicas.

---

<sup>2</sup>Aunque aquí se estén explicando de forma teórica toda la formulación que hay detrás del programa, en el Apéndice D: Parámetros del modelo numérico, se definirán cada uno de los parámetros a introducir por el usuario en el modelo. Uno de ellos es  $\alpha_{EB}$

### A.1.1.3. Disipación de energía en aguas profundas debido al White-capping, $S_{ds,w}$

Esta forma de disipación de energía nada tiene que ver con el efecto que el fondo produce en las olas, está relacionado con la transferencia de energía del viento a las olas, la cual produce un aumento de la amplitud de éstas que alcanzado un punto se vuelven inestables y rompen. Esta forma de rotura se denomina decrestamiento (white-capping) y se reconoce por la espuma blanca que se forma en la cresta de las olas.

En el Delft3D hay que elegir entre usar la formulación de [Komen et al. \(1984\)](#) o la de [van der Westhuysen et al. \(2007\)](#).

Se ha elegido utilizar la formulación de Van der Westhuysen debido a que al ser más reciente incluye la de Komen y añade términos nuevos haciéndola mucho más completa.

La expresión de Van de Westhuysen se compone de dos partes denominadas: contribución a la disipación por rotura,  $S_{dis,break}$  y contribución mas débil de no rotura,  $S_{dis,non-break}$ :

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = f_{br}(\sigma)S_{dis,break} + [1 - f_{br}(\sigma)]S_{dis,non-break} \quad (A.19)$$

El primer término:

$$S_{dis,break}(\sigma, \theta) = C_{ds} \left[ \frac{B(k)}{B_r} \right]^{\frac{p}{2}} [\tanh(kd)]^{\frac{2-p}{4}} g^{\frac{1}{2}} k^{\frac{1}{2}} E(\sigma, \theta) \quad (A.20)$$

donde:

$C_{ds}$ : Es una constante de valor  $C_{ds} = 5.0 * 10^{-5}$

$B(k)$ : Se denomina saturación espectral, su expresión es:

$$B(k) = \int_0^{2\pi} k^4 \phi(k, \theta) d\theta \quad (A.21)$$

donde  $\phi(k, \theta)$  es el espectro expresado en función del número de onda en lugar de con frecuencias

$B_r$ : Es una constante denominada Nivel de saturación espectral, de valor  $1.75x10^{-3}$

$k$ : Es el número de onda

$d$ : Es el calado o profundidad

$p$ : Es una función de  $u_*/c$ :

$$p\left(\frac{u_*}{c}\right) = 3 + \tanh \left[ 25 \left( \frac{u_*}{c} - 0.1 \right) \right] \quad (A.22)$$

$g$ : Constante de gravedad universal

$E(\sigma, \theta)$ : Espectro de densidad de energía

El segundo término:

$$S_{dis,non-break}(\sigma, \theta) = -C'_{ds} \left( \frac{k}{\tilde{k}} \right)^q \left( \frac{\tilde{s}}{\tilde{s}_{PM}} \right) \tilde{\sigma} E(\sigma, \theta) \quad (A.23)$$

$C'_{ds}$ : Constante de valor  $2.36x10^{-5}$

$\tilde{k}$ : Es el número de ondas medio que viene dado por:

$$\tilde{k} = \left[ E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty df rac 1 \sqrt{k} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right]^{-2} \quad (\text{A.24})$$

siendo  $E_{tot}$  la energía total, representada por:

$$E_{tot} = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (\text{A.25})$$

$\tilde{S}$ : Es la pendiente del oleaje media,  $\tilde{s} = \tilde{k} \sqrt{E_{tot}}$

$\tilde{s}_{PM}$ : Es una constante de valor  $\sqrt{3.02 * 10^{-3}}$

$r$  y  $q$ : Son constantes y valen respectivamente 4 y 1

$\tilde{\sigma}$ : Frecuencia media

$$\tilde{\sigma} = \left[ E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty df rac 1 \sigma E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right]^{-1} \quad (\text{A.26})$$

Por último,  $f_{br}$  es un factor que se calcula con la siguiente expresión:

$$f_{br}(\sigma) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tanh \left[ 10 \left( \left( \frac{B(k)}{B_r} \right)^{1/2} \right) \right] \quad (\text{A.27})$$

#### A.1.1.4. Término debido a la rotura por disminución de la profundidad, $S_{ds,br}$

La disminución de profundidad que las olas van experimentando a medida que éstas se propagan desde profundidades indefinidas hasta la costa provoca un aumento de la altura de dicho oleaje. Cuando la relación  $\frac{\text{Alturadeola}}{\text{Profundidad}}$  es muy grande, las olas comienzan a romper y la energía se disipa rápidamente. En aguas con poca profundidad este proceso es muy dominante.

En el SWAN se utiliza el modelo de [Battjes and Janssen \(1978\)](#):

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = D_{tot} \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}} = \frac{\alpha_{BJ} Q_b \tilde{\sigma} H_m^2}{8\pi} \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}} \quad (\text{A.28})$$

$D_{tot}$ : Tasa media de disipación de energía por unidad horizontal debida a la rotura

$$D_{tot} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} Q_b \left( \frac{\tilde{\sigma}}{2\pi} \right) \quad (\text{A.29})$$

$E(\sigma, \theta)$ : Espectro de densidad de energía

$E_{tot}$ : Es la energía total, su expresión está en la ecuación A.25

$\alpha_{BJ}$ : Es una constante que el usuario debe introducir manualmente en el modelo. se hablará de ella más adelante, por defecto su valor es igual a 1.

$Q_b$ : Asumiendo una distribución de Rayleigh y que todas las olas por encima de una cierta altura rompen, la fracción de olas que rompen es  $Q_b$  y se puede calcular así:

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_m^2} \quad (\text{A.30})$$

$\bar{\sigma}$ : Es la frecuencia media. Su expresión viene dada por la ecuación A.26

$H_m^2 = \gamma d$ : Siendo  $\gamma$  un parámetro de rotura de valor constante que el usuario debe introducir manualmente en el modelo a la hora de calibrarlo. También se verá más adelante.

De modo que a la hora de calibrar el modelo, en lo que al término de rotura por disminución de la profundidad se refiere, el usuario debe introducir los valores de  $\alpha_{BJ}$  y  $\gamma$  de forma manual en el módulo WAVE del Delft3D.

#### A.1.1.5. Disipación de energía por fricción con el fondo $S_{ds,b}$

En profundidades reducidas, las olas pierden energía debido a la interacción con el fondo. Esta pérdida de energía es suma de una serie de factores: fricción con el fondo, choque con las piedras y arenas, percolación, interacciones con las irregularidades del fondo, etc.

No se tiene evidencia experimental de que ningún modelo de la fricción con el fondo sea mejor que otro. Por este motivo se han implementado en el SWAN las formulaciones de los tres modelos más importantes para que sea decisión del usuario decidir que modelo se ajusta mejor a las condiciones de su zona de estudio.

Las formulaciones de los tres modelos de fricción con el fondo comparten la expresión general:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) \quad (\text{A.31})$$

La diferencia entre un modelo u otro es la forma de definir el coeficiente de fricción del fondo  $C_{bottom}$ .

#### Modelo empírico de Hasselmann, (1973) (JONSWAP)

En este modelo, el coeficiente de fricción puede tomar dos valores diferentes en función del tipo de oleaje, para oleaje tipo SEA (Mar de viento)  $C_{bottom} = 0.038m^2s^{-3}$ , mientras que para estados de mar totalmente desarrollados en aguas someras (SWELL),  $C_{bottom} = 0.067m^2s^{-3}$

Este coeficiente debe ser elegido por el usuario, siendo libre de poder elegir cualquier otro valor diferente a la hora de intentar calibrar el modelo.

#### Modelo empírico de Hasselmann y Collins, (1968)

Éste es el modelo empleado en este informe técnico.

Según Collins, el coeficiente de fricción es definido mediante la expresión:

$$C_{bottom} = C_{fw} g U_{rms} \quad (\text{A.32})$$

donde:

$C_{bottom}$ : Es el coeficiente de fricción. Éste es el valor que se deberá introducir en el programa a la hora de introducir los parámetros de entrada.

$C_{fw}$ : Es una constante cuyo valor es modificable y se debe calibrar de forma empírica, se verá más adelante. De modo que fijando una altura de ola media  $U_{rms}$  modificando este parámetro se obtiene el  $C_{bottom}$  que se ha introducir en el módulo WAVE.

$U_{rms}$ : Es el movimiento orbital del fondo, definido por:

$$U_{rms} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sigma}{2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (\text{A.33})$$

### Modelo empírico de Madsen et al. (1988)

Es una formulación muy similar a la de Hasselmann y Collins, solo que el coeficiente de fricción con el fondo es función de la longitud de rugosidad del fondo,

$$C_{bottom} = f_{wr} \frac{g}{\sqrt{2}} U_{rms} \quad (\text{A.34})$$

$f_{wr}$ : Coeficiente de fricción no dimensional:

$$\frac{1}{4\sqrt{f_{wr}}} + \log_{10} \left[ \frac{1}{4\sqrt{f_{wr}}} \right] = m_f + \log_{10} \left[ \frac{a_b}{K_N} \right] \quad (\text{A.35})$$

$m_f = -0.08$  (Jonsson y Carlsen, 1976)

$a_b$ : Coeficiente de expresión:

$$a_b^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (\text{A.36})$$

$K_N$ : Longitud de la rugosidad del fondo, éste es el valor que el usuario debe introducir en el modelo. Por defecto se adopta un valor de 0.05 m.

## A.2. Parámetros del módulo WAVE

### A.2.1. Description (Descripción)

Este apartado permite añadir un nombre y una breve descripción a la simulación que se está realizando.

### A.2.2. Hydrodynamics (Hidrodinámica)

Aquí podemos elegir si la simulación va a ser exclusivamente con el módulo WAVE o por el contrario se hará una simulación conjunta de los módulos WAVE y FLOW.

### A.2.3. Grids (Malla)

#### Computational grid (Malla computacional)

Se importan todas las mallas que se vayan a emplear para el cálculo de la propagación del oleaje. En este proyecto hay que cargar las dos mallas anidadas una dentro de la otra.

#### Bathymetry (Batimetría)

Se cargan los archivos de batimetría que se crearon anteriormente. Se necesita un archivo de batimetría (.dep) para cada grid que se emplee.

### Spectral Resolution (Resolución espectral)

Se divide en dos partes:

- **Directional space (Espacio direccional):** Indica el número de partes en que se quiere dividir la circunferencia a la hora de considerar las direcciones.
- **Frequency space (Espacio de frecuencia):** Indica la frecuencia más baja y la más alta que se quiere considerar para el oleaje. O lo que es lo mismo los periodos mayores y menores que se tendrán en cuenta durante el cálculo del oleaje.

### Nesting (Anidamiento)

En este apartado se especifica al programa que la malla interior está anidada en la exterior.

### Hydrodynamics (Hidrodinamica)

Se le dice al programa si los resultados obtenidos en el módulo FLOW se usan para dotar de más precisión al WAVE o si los ignora. En este caso marcaremos "Don't use" puesto que nuestra simulación es solamente con el módulo WAVE.

#### A.2.4. Time frame (Periodo de tiempo)

En esta ventana debemos indicar al programa en que fechas del archivo "Wavecon" se llevará a cabo el cálculo. En este caso indicamos la totalidad de los casos del "Wavecon".

#### A.2.5. Boundaries (Condiciones de contorno)

El programa da la posibilidad de elegir diferentes formas de introducir las condiciones de contorno al modelo: por dirección, por coordenadas, etc.

En este caso hemos usado la definición por orientación de manera que el programa interprete que los datos de oleaje introducidos al modelo entran por aquellos bordes de la malla cuyas normales se aproximan más a la orientación oeste. El programa no permite introducir más de 4 orientaciones y puesto que en nuestra zona era necesario introducir más se han tenido que separar los datos en dos simulaciones. Por una parte se han simulado los oleajes con dirección de procedencia oeste indicándole al programa que entren desde las direcciones Oeste, Suroeste y Sur. Por otro lado se simulan los datos que proceden del Este, introduciéndolos desde el Este, Sureste y Sur.

#### A.2.6. Obstacles (Obstáculos)

En este apartado se pueden añadir obstáculos al modelo en zonas donde haya muros de contención, de escollera, muros sumergidos, etc. Con esto se consigue simular mejor la realidad de la zona de estudio.

Se han añadido seis obstáculos en total: dos para los muros del encauzamiento de la desembocadura del río Guadalfeo, y los otros cuatro para cada una de las secciones de escollera y muro del puerto de Motril.

Para todos los obstáculos se ha elegido la opción "Dam" que quiere decir que el coeficiente de transmisión depende de las condiciones del oleaje incidente y de la altura del obstáculo. Se

ha de definir también el coeficiente de reflexión en tanto por uno que se estime más conveniente y unos coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  que se obtienen del (referencia manual Wave) en función del tipo de obstáculo.

### A.2.7. Physical parameters (Parámetros físicos)

Es uno de los apartados más importantes de todo el programa ya que son estos parámetros físicos los que controlan en mayor medida el correcto funcionamiento del modelo. Como no ha sido posible realizar una campaña para calibrar el modelo, estos parámetros se han tomado de otros trabajos en zonas cercanas donde si se ha podido calibrar (referencias migue y pedro).

#### Constants (Constantes)

Se ha de especificar el valor de algunas constantes como son la gravedad, densidad del agua del mar, posición del eje x respecto al norte y el sistema de coordenadas.

Los valores adoptados son:

- **Gravedad:**  $9.81m/s^2$
- **Densidad del agua de mar:**  $1025kg/m^3$
- **Posición del eje X respecto al norte:** 90, eso quiere decir que el eje X señala hacia el Este.
- **Sistema de coordenadas:** Cartesiano
- **Fuerzas:** Ratio de disipación del oleaje

#### Processes (Procesos)

- **Generation (Generación):** 90, eso quiere decir que el eje X señala hacia el Este. Este es el primer parámetro que se debe ajustar dentro del apartado procesos, que como se ha dicho antes, es el más importante. Se utilizará siempre el modelo de tercera generación por las innumerables ventajas que presenta.
- **Depth induced breaking (Rotura inducida por fondo):** Este parámetro fue descrito físicamente a la hora de estudiar la ecuación de balance de acción (Apéndice F: Ecuaciones del software Delft3D: WAVE/SWAN).
- **Interacciones triádicas no lineales (LTA):** Es otro de los parámetros de los que menos información se posee al tratarse de un fenómeno bastante complejo. Los parámetros a ajustar son  $\alpha$ , que es el valor del coeficiente de proporcionalidad  $\alpha_{EB}$  que se veía en el Apéndice F: Ecuaciones del software Delft3D: WAVE/SWAN cuando se explicaban las ecuaciones de las interacciones triádicas no lineales. Y  $\beta$ , este valor determina el ratio entre la máxima frecuencia y la frecuencia principal para las cuales las interacciones son calculadas.
- **Bottom friction (Fricción del fondo):** Es el parámetro que más afecta al cálculo numérico de las simulaciones, de modo que si este valor no está bien ajustado, su efecto es tan fuerte que aunque se varíen el resto de variables del modelo, los resultados no cambiarán. El WAVE da la opción de elegir entre tres modelos de fricción. El modelo

de fricción empleado en este proyecto es el de Collins, con un coeficiente de fricción 0.02 que se ha probado que es válido en playas muy cercanas como la playa de Carchuna.

- **Difracción:** Proceso que podemos activar o desactivar. Una vez activado hay que definir dos valores: Coeficiente de suavizado y pasos de suavizado. En este proyecto se han empleado 0.6 y 900 respectivamente.

### Various (Varios)

En este apartado aparecen una serie de procesos que se pueden marcar o desmarcar, pero que no hay que introducir ningún valor al programa. De modo que para que la ejecución del modelo sea lo más realista posible es necesario activar todos los procesos.

- **Whitecapping (Decrestamiento):** Éste es el único donde se ha de elegir cual de los dos modelos usar:
  - Referencia Komen
  - Referencia Van der Westhuysen: Éste es el que se ha empleado

### A.2.8. Numerical parameters (Parámetros numéricos)

De este apartado únicamente se han modificado la precisión de convergencia que viene indicado como el tanto por ciento de puntos húmedos en los que el modelo debe converger, por defecto, 98 % (en este caso se ha tomado 92 %) y el número máximo de iteraciones que se deben realizar en cada paso o barrido, se han elegido 50.

El procedimiento de cálculo del DELFT es el siguiente: Al ejecutar la simulación el programa empieza a realizar la primera iteración, dentro de ella se realizan cuatro barridos ("sweep") y al termina el cuarto barrido la primera iteración finaliza con un porcentaje de puntos húmedos en los que el modelo ha convergido, debiéndose alcanzar el valor que se le haya indicado (por defecto 98 %). A continuación, continúa con la segunda iteración, dentro de la cual vuelve a realizar los cuatro barridos y finaliza con otro porcentaje de puntos húmedo donde ya hay convergencia del modelo. Pues el modelo finalizará cuando se alcance la cantidad mínima de puntos donde se debe garantizar la convergencia o bien cuando se alcance el número máximo de iteraciones.

### A.2.9. Output curves (Curvas de salida)

Aquí no se ha modificado nada, dejándolo todo en sus valores por defecto.

### A.2.10. Output parameters (Parámetros de salida)

El modo computacional que se ha elegido es el estacionario, cada estado de mar es independiente del otro y sus condiciones son estacionarias; hay que especificar dónde se quieren obtener los resultados. Al tener dos mallas anidadas, se marcarán las dos mallas como datos de salida y por último se pueden especificar los denominados puntos de control.

El programa ofrece dos formas de presentar los resultados, una de ellas es mediante una gráfica donde asigna a cada punto de la malla un dato de altura de ola, periodo, etc. Otra es en forma de tabla, en la que para cada punto de control que se introduzca mediante coordenadas UTM obtendremos los datos de salida en dicho punto específicamente.

Esto resulta de vital importancia por ejemplo a la hora de calibrar el modelo, ya que solo obteniendo los datos en el punto exacto donde el instrumento ha estado midiendo podremos comparar las gráficas de altura de ola.

### A.2.11. Additional parameters (Parámetros adicionales)

Este apartado no hace falta tocarlo.

## A.3. Ecuaciones del software Delft3D: FLOW

### A.3.1. Ecuaciones de gobierno

El Delft3D-FLOW resuelve un sistema de ecuaciones formado por: Ecuación de la continuidad (conservación de masa), las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento, la ecuación del transporte y el problema de cierre turbulento.

Antes de pasar a escribir las ecuaciones es necesario hacer dos aclaraciones:

#### Sistema de la coordenada $\sigma$ en vertical

En la dirección vertical el FLOW emplea una malla o grid regido por la coordenada  $\sigma$ . Este grid vertical consiste en capas limitadas arriba y abajo por planos con una coordenada  $\sigma$  constante, dichos planos no son estrictamente horizontales sino que se adaptan a la topografía del fondo y de la superficie libre.

El número de capas sobre toda el área computacional en horizontal es constante, sin embargo, el espesor de cada capa no es uniforme.

Dicha coordenada  $\sigma$  se puede definir como:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{H} \quad (\text{A.37})$$

con:

$z$ : Coordenada vertical en el espacio físico

$\zeta$ : La elevación de la superficie libre sobre un plano de referencia situado a  $z = 0$

$H$ : Profundidad total del agua

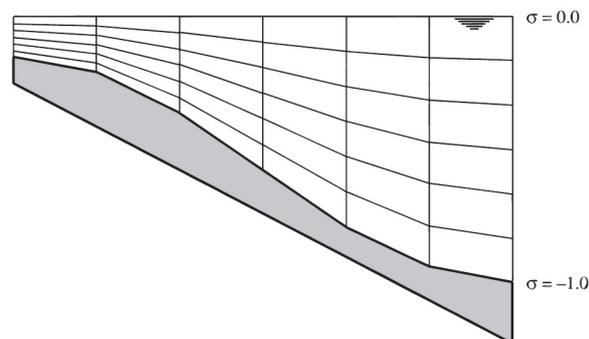


Figura A.2: Ejemplo de grid vertical con seis capas. Fuente: Manual del Delft3D-FLOW

### Generalized Lagrangian Mean (GLM)

En las simulaciones que incluyan oleaje, las ecuaciones hidrodinámicas del flow están escritas en un sistema de referencia lagrangiano (GLM). La formulación en coordenadas lagrangianas es muy similar a la Euleriana a excepción de las velocidades.

La relación entre la velocidad expresada en coordenadas lagrangianas y eulerianas viene dada por:

$$\begin{aligned} U &= u + u_s \\ V &= v + v_s \end{aligned} \quad (\text{A.38})$$

Donde  $U$  y  $V$  son las componentes de la velocidad en coordenadas lagrangianas y  $u$  y  $v$  son las componentes de la velocidad en coordenadas eulerianas. A los términos  $u_s$  y  $v_s$  son las "Stokes drift components" (componentes de deriva de Stokes).

Cuando una partícula se encuentra flotando en la superficie libre del mar junto con el oleaje, experimenta una velocidad de deriva de Stokes en la dirección de propagación de ola. Según la teoría lineal las olas producen un trayectoria elíptica y cerrada de las partículas del agua, sin embargo, esto no es real, los objetos que se encuentran cercanos a la costa al final terminan en la orilla de la playa debido a que son arrastrados por el mar. La razón es que el fenómeno no es lineal y las responsables de este movimiento de las partículas en la dirección de propagación de las olas son estas componentes de Stokes de la velocidad.

Este fenómeno no lineal fue descubierto en 1847 por Geroge Gabriel Stokes

### Suposición de Presión Hidrostática

Bajo esta suposición, la ecuación de conservación de cantidad de movimiento en la dirección  $z$  se reduce a la ecuación de la presión hidrostática:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -\rho g h \quad (\text{A.39})$$

#### A.3.1.1. Ecs. de conserv. de cantidad de movimiento en el plano horizontal X,Y

$$\begin{aligned} x) \quad \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial U}{\partial \sigma} - fV &= -\frac{1}{\rho_0} P_x + F_x + M_x + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \\ y) \quad \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial V}{\partial \sigma} - fU &= -\frac{1}{\rho_0} P_y + F_y + M_y + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.40})$$

Donde cada término representa:

$\frac{\partial U}{\partial t}$ : Este término representa la aceleración local, es la variación temporal de la velocidad en la dirección  $X$

$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial U}{\partial \sigma}$ : Es la aceleración convectiva, representa la variación de la velocidad en el espacio de un punto  $(x, y, z)$  a otro  $(x', y', z')$

$-fV$ : Representa el efecto de coriolis

$-\frac{1}{\rho_0}P_x$ : Las fuerzas de superficie se dividen en fuerzas de presión (ésta) y tensiones tangenciales. Las fuerzas de presión se aproximan mediante las expresiones de Boussinesq.

$F_x = \nu_H \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right)$ : Son las tensiones tangenciales o tensiones de Reynolds<sup>3</sup>

$M_x$ : Contribución debido a fuerzas externas, por ejemplo de estructuras hidráulicas

$\frac{\partial V}{\partial t}$ : Este término representa la aceleración local, es la variación temporal de la velocidad en la dirección  $Y$

$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial V}{\partial \sigma}$ : Es la aceleración convectiva, representa la variación de la velocidad en el espacio de un punto  $(x, y, z)$  a otro  $(x', y', z')$

$-fU$ : Representa el efecto de coriolis

$-\frac{1}{\rho_0}P_y$ : Las fuerzas de superficie se dividen en fuerzas de presión (ésta) y tensiones tangenciales. Las fuerzas de presión se aproximan mediante las expresiones de Boussinesq.

$F_y = \nu_H \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right)$ : Son las tensiones tangenciales o tensiones de Reynolds<sup>4</sup>

$M_y$ : Contribución debido a fuerzas externas, por ejemplo de estructuras hidráulicas

### A.3.1.2. Ecuaciones de continuidad (Conservación de la masa)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = Q \quad (\text{A.41})$$

Donde  $Q$  representa la contribución por unidad de área debido a descargas, evaporación, precipitación, etc.

### A.3.1.3. Ecuación del transporte

El transporte de una sustancia puede producirse mediante dos mecanismos físicos:

- **Advección:** Transporte de sustancias debido al movimiento del medio fluido. Va asociado a la velocidad media del fluido.
- **Difusión:** Transporte de sustancia debido a las fluctuaciones (movimiento aleatorio) que se produce en el fluido

$$\frac{\partial [hc]}{\partial t} + \frac{\partial [hUc]}{\partial x} + \frac{\partial [hVc]}{\partial y} + \frac{\partial [\omega c]}{\partial \sigma} = h \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_H \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_H \frac{\partial c}{\partial y} \right) \right] + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right] + hQ \quad (\text{A.42})$$

Donde:

$c$ : Es la concentración

$\frac{\partial [hc]}{\partial t} = h \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_H \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_H \frac{\partial c}{\partial y} \right) \right] + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right]$ : Representa el transporte por difusión

$\frac{\partial [hUc]}{\partial x} + \frac{\partial [hVc]}{\partial y} + \frac{\partial [\omega c]}{\partial \sigma}$ : Representa el transporte por advección

$Q$ : Es el término fuente por unidad de área

<sup>3</sup>La relación entre las tensiones tangenciales y las derivadas segundas de la componente  $x$  de la velocidad se establece mediante las ecuaciones constitutivas del fluido newtoniano

<sup>4</sup>La relación entre las tensiones tangenciales y las derivadas segundas de la componente  $y$  de la velocidad se establece mediante las ecuaciones constitutivas del fluido newtoniano

#### A.3.1.4. Problema del cierre turbulento

Se ha visto que el conjunto de ecuaciones que utiliza el FLOW son las ecuaciones de estado: la ecuación de continuidad deducida a partir del principio de conservación de masa bajo la aproximación de incompresibilidad y la ecuación de conservación de cantidad de movimiento bajo las aproximaciones de Boussinesq y de Reynolds. Además emplea también la ecuación del transporte.

En principio, dadas las condiciones iniciales y de contorno correspondientes al mencionado sistema de ecuaciones cabría pensar que es posible obtener las características del movimiento del fluido. Sin embargo, en el caso del flujo turbulento esto no es posible debido a la presencia de términos no lineales en dicho conjunto de ecuaciones (procedentes de las ecuaciones de Navier-Stokes) que posibilitan que las perturbaciones del movimiento se amplifiquen e interaccionen con otras perturbaciones. Aquí radica la dificultad del cálculo de todo movimiento turbulento. A parte de esto, la presencia de los mencionados términos no lineales provoca que el número de incógnitas sea mayor que el número de ecuaciones, de modo que el sistema no es resoluble. Esta situación se conoce como el problema de cierre turbulento.

De modo que la no linealidad del sistema de ecuaciones que gobierna un flujo turbulento impide su resolución y obliga a la búsqueda de nuevas técnicas para tratar de resolverlo siempre de forma aproximada. Los métodos más utilizados se basan en la parametrización de determinadas magnitudes físicas.

En el módulo FLOW del Delft3D se diferencia entre el coeficiente de viscosidad horizontal  $\nu_H$  y el vertical  $\nu_V$ .

#### Coefficiente de viscosidad horizontal $\nu_H$

Este valor debe ser introducido por el usuario de forma manual en el programa. Más adelante se volverá a este parámetro cuando se definan los datos de entrada introducidos al modelo.

#### Coefficiente de viscosidad vertical $\nu_V$

Para el cálculo de este valor el FLOW tiene cuatro formas de resolver el problema de cierre turbulento:

1. Coeficiente constante
2. Problema de cierre algebraico, AEM (*Algebraic Eddy viscosity closure Model*)
3. Problema de cierre turbulento  $k - L$
4. Problema de cierre turbulento  $k - \epsilon$

En todos los modelos, el coeficiente de viscosidad tiene la misma forma:

$$\nu_V = c'_\mu L \sqrt{k} \quad (\text{A.43})$$

Donde:

$c'_\mu$ : Constante que se determina mediante calibración empírica

$L$ : Longitud de mezcla

$k$ : Energía cinética turbulenta

El modelo que se ha empleado en las simulaciones realizadas en este informe técnico es el "Problema de cierre turbulento  $k - \epsilon$ ".

En este modelo, los valores de la energía cinética turbulenta  $k$  y la disipación  $\epsilon$  son producidos por términos relacionados con el esfuerzo cortante en la superficie y en el flujo. Las concentraciones de  $k$  y  $\epsilon$  en cada celda del grid son calculadas mediante la ecuación del transporte.

Finalmente la longitud de mezcla  $L$  se determina a partir de  $\epsilon$  y  $k$  a través de la expresión:

$$L = c_D \frac{k\sqrt{k}}{\epsilon} \quad (\text{A.44})$$

Donde  $c_D$  es otra constante que se debe calibrar.

## A.4. Parámetros del módulo Flow

### A.4.1. Description (Descripción)

Permite añadir una breve descripción al modelo, al igual que en el anterior módulo.

### A.4.2. Domain (Dominio)

#### Grid Parameter (Parámetros de la malla)

Se introduce en el modelo la malla que va a utilizar el FLOW para el cálculo. Son dos archivos, el ".grdz" el ".enc". Para el Flow se ha tomado como grid la malla compuesta que se generó mediante la opción DDBoundary.

Se debe también introducir al modelo la latitud en la que se encuentra la zona de estudio.

#### Bathymetry (Batimetría)

Se selecciona el archivo de batimetría ".dep".

### A.4.3. Time Frame (Periodo de tiempo)

Hay tres tipos de tiempos:

- **Tiempo de referencia:** Es el tiempo cero, a partir del cual se empieza a contar el tiempo. Es muy importante recordar que el tiempo de inicio de simulación NO tiene por qué ser el tiempo de referencia.
- **Tiempo de inicio de la simulación:** Tiempo en el que la simulación empieza.
- **Tiempo de finalización de la simulación:** Tiempo en el que la simulación termina.
- **Paso de tiempo:** Se deja por defecto el valor de 1 minuto.

#### A.4.4. Processes (Procesos)

De todos los procesos que están disponibles en el FLOW, únicamente se tendrán en cuenta dos para este proyecto: viento y transporte de sedimentos. Para el sedimento se define el tipo Non-cohesive (no cohesivo).

Algunos de los procesos que no se han considerado son: salinidad, temperatura y oleaje.

#### A.4.5. Initial conditions (Condiciones iniciales)

Al seleccionar viento y sedimento, en este apartado deberemos introducir el valor inicial de nivel de marea y concentración del sedimento. Ambos valores han sido fijados como 0 al inicio de la simulación.

#### A.4.6. Boundaries (Fronteras)

Consta de los siguientes valores:

- **Coordenadas de la frontera:** Hemos de especificar de dónde a dónde va en coordenadas de la malla M y N.

M1=3	N1=1
M2=79	N2=1

- **El tipo de forzamiento:** Marea astronómica.

Hay que introducir al programa los armónicos de marea. Estos datos se tomaron del mareógrafo del puerto de Motril. Puesto que la amplitud de marea de en esta zona es reducida solamente se tomaron los armónicos de amplitud representativa: M2 y S2. Los valores introducidos son:

Nombre	Amplitud (m)	Fase (°)
M2	0.1551	48.21
S2	0.0601	73.94

Tabla A.1: Armónicos de marea

#### A.4.7. Physical parameters (Parámetros físicos)

##### Constants (Constantes)

Las constantes hidrodinámicas son:

- **Gravedad:**  $9.81 \text{ m/s}^2$
- **Densidad del agua:**  $1025 \text{ kg/m}^3$
- **Densidad del aire:**  $1 \text{ kg/m}^3$
- **Coefficiente de arrastre por viento:**

Puntos de rotura	Coficiente	Velocidad del viento (m/s)
A	0.003	0
B	0.00723	100
C	0.00723	100

Tabla A.2: Valores del coeficiente de arrastre por viento

### Roughness (Rugosidad)

Dentro del apartado de rugosidad, hay que definir que modelo se va a emplear para la rugosidad del fondo y darle al programa unos valores de U y V.

Después de consultar diferente bibliografía y realizar varias pruebas se ha decidido emplear la fricción de Chezy, usando los valores de  $U = 100$  y  $V = 100$ . Ambos valores tenían un valor por defecto de 65.

### Viscosity (Viscosidad)

Se toma un valor de viscosidad uniforme de  $10 \text{ m}^2/\text{s}$ .

### Sediment (Sedimento)

Se deben definir las características del sedimento para la simulación:

- **Densidad específica:**  $2650 \text{ kg}/\text{m}^3$
- **Densidad seca:**  $1600 \text{ kg}/\text{m}^3$
- **Mediana del diametro del sedimento (D50):**  $200 \mu\text{m}$

### Morphology (Morfología)

En este apartado se definen algunas características morfológicas para la simulación. Se han dejado los valores por defecto que ofrece el programa.

### Wind (Viento)

Para el viento, se debe generar un archivo aparte “.wnd” que consta de dos columnas, una con la velocidad del viento y otra con su dirección. Se importa dicho archivo para incorporarlo a los datos de entrada del modelo.

#### A.4.8. Numerical parameters (Parámetros numéricos)

A pesar de los muchos parámetros que se pueden encontrar, únicamente interesa uno, es el denominado smoothing time. Éste tiene la peculiaridad de que cuanto más pequeño es este valor más preciso es el modelo, pero más riesgo existe de que no converja. Lo que hace es eliminar el ruido inicial que se producen en los datos resultado de una simulación con modelos numéricos: Alturas de ola, periodo, dirección, . . . Finalmente, el valor adoptado es 60.

### A.4.9. Operations (Operaciones)

#### Discharges (Descargas)

Aquí se especifican los datos para la simulación de la descarga fluvial:

- **Localización:** Se deben indicar las celdas de la malla donde se introducirá el caudal de la descarga:

M1=103	N1=26
M2=104	N2=26
M3=105	N3=26
M4=106	N4=26

- **Caudal:** Se indican los datos de caudal para el periodo de tiempo considerado. Se han tomado los datos correspondientes a un evento de tormenta que tuvo lugar entre el 21 y el 31 de diciembre de 2009. Además, se han considerado dos escenarios, el natural, sin tener en cuenta la influencia de la presa de Rules, y el real. La procedencia de los datos de caudal fue explicado en el apartado referencia metodología. Los vemos en la tabla A.3

Fecha	Natural ( $m^3/s$ )	Concentración ( $kg/m^3$ )	Real ( $m^3/s$ )	Concentración ( $kg/m^3$ )
21 Diciembre 2009	5.84	0.1	2.072	0.05
22 Diciembre 2009	33.06	0.2	2.065	0.05
23 Diciembre 2009	120.5	2	2.058	0.05
24 Diciembre 2009	323.28	2	2.867	0.075
25 Diciembre 2009	127.7	2	3.177	0.075
26 Diciembre 2009	195.35	2	3.171	0.075
27 Diciembre 2009	105.29	2	3.179	0.075
28 Diciembre 2009	106.13	2	18.49	0.2
29 Diciembre 2009	102.68	2	23.654	0.2
30 Diciembre 2009	107.29	2	23.628	0.2
31 Diciembre 2009	115.24	2	23.597	0.2

Tabla A.3: Datos de caudal introducidos en la simulación

Los datos de concentración se han tomado de (referencia artículo Tino) y han sido medidos en el dique del Granadino.

#### A.4.10. Additional parameters (Parámetros adicionales)

Nada

#### A.4.11. Output (Salida)

Dentro de Output es necesario modificar el apartado de Storage.

Aparecen varios tiempos que se deben definir antes de iniciar el modelo, por lo que es importante tener muy claro que significa cada uno de ellos:

- **Store map results:**
  - **Start time:** Se introduce la fecha de comienzo de la simulación.
  - **End time:** Se introduce la fecha de finalización de la simulación.
  - **Interval:** Se refiere a cada cuanto se quiere que el programa saque los resultados del cálculo.
  - **History interval:** Se introduce el mismo valor que antes
- **Store communication file:**
  - **Start time:** Se introduce la fecha de comienzo de la simulación.
  - **End time:** Se introduce la fecha de finalización de la simulación.
  - **Interval:** Aquí se debe introducir con que intervalo hay datos de entrada en el módulo Wave, de modo que como es uno cada hora, se elige 60 min.
  - **Restart time:** Se deja el valor por defecto 1440 min.



# Bibliografía

- Anthony, E. J., Marriner, N., and Morhange, C. (2014). Human influence and the changing geomorphology of mediterranean deltas and coasts over the last 6000years: From progradation to destruction phase? *Earth-Science Reviews*, 139:336–361.
- Battjes, J. and Janssen, J. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(16).
- Bergillos RJ, Rodríguez-Delgado C, L.-R. A. M. A. O.-S. M. L. M. (2015). Recent human-induced coastal changes in the guadalfeo river deltaic system (southern spain). IAHR Delft, The Netherlands.
- Cavaleri, L. and Rizzoli, P. M. (1981). Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 86(C11):10961–10973.
- Coleman, J. M. and Wright, L. (1975). Modern river deltas: variability of processes and sand bodies.
- Duque, C., Calvache, M. L., and Engesgaard, P. (2010). Investigating river–aquifer relations using water temperature in an anthropized environment (motril-salobreña aquifer). *Journal of hydrology*, 381(1):121–133.
- Duque, C., Calvache, M. L., Pedrera, A., Martín-Rosales, W., and López-Chicano, M. (2008). Combined time domain electromagnetic soundings and gravimetry to determine marine intrusion in a detrital coastal aquifer (southern spain). *Journal of Hydrology*, 349(3):536–547.
- Eldeberky, Y. and Battjes, J. (1995). Parameterization of triad interactions in wave energy models.
- Eldeberky, Y. and Battjes, J. A. (1996). Spectral modeling of wave breaking: application to boussinesq equations. *J. Geophys. Res*, 101(C1):1253–1264.
- Ericson, J. P., Vörösmarty, C. J., Dingman, S. L., Ward, L. G., and Meybeck, M. (2006). Effective sea-level rise and deltas: causes of change and human dimension implications. *Global and Planetary Change*, 50(1):63–82.
- Fernández-Salas, L., Lobo, F., Sanz, J., Diaz-del Rio, V., Garcia, M., and Moreno, I. (2007). Morphometric analysis and genetic implications of pro-deltaic sea-floor undulations in the northern alboran sea margin, western mediterranean basin. *Marine Geology*, 243(1):31–56.
- Hasselmann, K. (1962). On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum. *J. Fluid Mech*, 12(15):481–500.

- Hasselmann, K., Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D., Enke, K., Ewing, J., Gienapp, H., Hasselmann, D., Kruseman, P., et al. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (jonswap). Technical report, Deutsches Hydrographisches Institut.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J., and Barnett, T. (1985). Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. part ii: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *Journal of Physical Oceanography*, 15(11):1378–1391.
- Hood, W. G. (2010). Delta distributary dynamics in the skagit river delta (washington, usa): extending, testing, and applying avulsion theory in a tidal system. *Geomorphology*, 123(1):154–164.
- Jabaloy-Sánchez, A., Lobo, F. J., Azor, A., Martín-Rosales, W., Pérez-Peña, J. V., Bárcenas, P., Macías, J., Fernández-Salas, L. M., and Vázquez-Vílchez, M. (2014). Six thousand years of coastline evolution in the guadalfeo deltaic system (southern iberian peninsula). *Geomorphology*, 206:374–391.
- Janssen, P. A. (1991). Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *Journal of Physical Oceanography*, 21(11):1631–1642.
- Jeftic, L., Keckes, S., Pernetta, J., et al. (1996). *Climate change and the Mediterranean: environmental and societal impacts of climatic change and sea level rise in the Mediterranean region. Volume 2*. Edward Arnold, Hodder Headline, PLC.
- Komen, G., Hasselmann, K., and Hasselmann, K. (1984). On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of physical oceanography*, 14(8):1271–1285.
- Lobo, F., Fernández-Salas, L., Moreno, I., Sanz, J., and Maldonado, A. (2006). The sea-floor morphology of a mediterranean shelf fed by small rivers, northern alboran sea margin. *Continental Shelf Research*, 26(20):2607–2628.
- Losada, M., Baquerizo, A., Ortega-Sánchez, M., and Ávila, A. (2011). Coastal evolution, sea level, and assessment of intrinsic uncertainty. *Journal of Coastal Research*, pages 218–228.
- Mateo, Z. R. P. and Siringan, F. P. (2007). Tectonic control of high-frequency holocene delta switching and fluvial migration in lingayen gulf bayhead, northwestern philippines. *Journal of Coastal Research*, pages 182–194.
- McCarthy, J. J. (2001). *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Nevot Pérez, A. (2004). La presa de rules. *Revista de Obras Publicas*, (trece (Canadá) XXI CONGRESO INTERNACIONAL DE GRANDES PRESAS):131–152.
- Nicholls, R. and Hoozemans, F. (1996). The mediterranean: vulnerability to coastal implications of climate change. *Ocean & Coastal Management*, 31(2):105–132.
- Ortega-Sánchez, M., Lobo, F., López-Ruiz, A., Losada, M., and Fernández-Salas, L. (2014). The influence of shelf-indenting canyons and infralittoral prograding wedges on coastal morphology: The carchuna system in southern spain. *Marine Geology*, 347:107–122.

- Orton, G. and Reading, H. (1993). Variability of deltaic processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size. *Sedimentology*, 40(3):475–512.
- Overeem, I. (2005). Three-dimensional numerical modeling of deltas.
- RJ, B. (2014). Estudio de la evolucion reciente del delta del guadalfeo (granada, españa).
- Sanchez-Arcilla, A. and Jimenez, J. A. (1997). Physical impacts of climatic change on deltaic coastal systems (i): an approach. *Climatic Change*, 35(1):71–93.
- Stanley, D. J. and Warne, A. G. (1993). Nile delta: recent geological evolution and human impact. *Science*, 260(5108):628–634.
- Syvitski, J. P., Kettner, A. J., Overeem, I., Hutton, E. W., Hannon, M. T., Brakenridge, G. R., Day, J., Vörösmarty, C., Saito, Y., Giosan, L., et al. (2009). Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience*, 2(10):681–686.
- Syvitski, J. P. and Saito, Y. (2007). Morphodynamics of deltas under the influence of humans. *Global and Planetary Change*, 57(3):261–282.
- Trincardia, F. and Syvitski, J. (2004). Mediterranean prodelta systems. *Oceanography*, (17):34.
- van der Westhuysen, A. J., Zijlema, M., and Battjes, J. A. (2007). Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in swan for deep and shallow water. *Coastal Engineering*, 54(2):151–170.
- Vella, C., Fleury, T.-J., Raccasi, G., Provansal, M., Sabatier, F., and Bourcier, M. (2005). Evolution of the rhône delta plain in the holocene. *Marine Geology*, 222:235–265.
- Whitham, G. B. (2011). *Linear and nonlinear waves*, volume 42. John Wiley & Sons.