

SEGUIMIENTO MORFODINÁMICO DE LA DESEMBOCADURA DEL ESTUARIO DEL OKA (RESERVA DE LA BIOSFERA DE URDAIBAI)



**biodibertsitatea
eta paisaia**
BIODIVERSIDAD Y
PAISAJE

Mayo 2005 –
Abril 2006



ELISKO JAURLARITZA



GOBIERNO VASCO

INGURUMEN ETA LURRALDE
ANTOLAMENDU SAILA

DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE
Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO

 **ingurumena.net**

Documento: SEGUIMIENTO MORFODINÁMICO DE LA DESEMBOCADURA DEL ESTUARIO DEL OKA (RESERVA DE LA BIOSFERA DE URDAIBAI)

Fecha de edición: 2006

Autor: Alejandro Cearreta
Manu Monge
Eneko Iriarte
(Universidad del País Vasco/EHU)

Propietario: Gobierno Vasco. Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.

ÍNDICE

| | Página |
|---|--------|
| 1. Introducción | |
| 1.1. <i>Elementos morfológicos y variabilidad temporal</i> | 8 |
| 1.2. <i>Intervenciones antrópicas: dragados y vertidos</i> | 9 |
| 1.3. <i>Situación actual: regeneración de dunas y variación del oleaje</i> | 12 |
| 1.4. <i>La ola de Mundaka</i> | 15 |
| 2. Resultados | |
| 2.1. <i>Características ambientales</i> | |
| <u>2.1.1. <i>Clima marítimo</i></u> | 18 |
| <u>2.1.2. <i>Naturaleza del material sedimentario arenoso</i></u> | 29 |
| 2.2. <i>Evolución morfológica</i> | |
| <u>2.2.1. <i>Batimetría y Topografía</i></u> | 33 |
| <u>2.2.2. <i>Fotografía aérea oblicua</i></u> | 41 |
| <u>2.2.3. <i>Evolución temporal del margen Sur de la playa de Laida</i></u> | 44 |
| 2.3. <i>Dinámica sedimentaria</i> | |
| <u>2.3.1. <i>Oleaje y corrientes mareales: bocana exterior</i></u> | 47 |
| <u>2.3.2. <i>Corrientes mareales: bocana interior</i></u> | 80 |
| 2.3.2.1. Prisma de marea | 81 |
| 2.3.2.2. Velocidad y dirección | 84 |
| <u>2.3.3. <i>Transporte sedimentario</i></u> | 88 |
| 3. Discusión | |
| 3.1. <i>Modelo de evolución temporal del oleaje</i> | 95 |
| 3.2. <i>Evolución temporal de la morfología del fondo</i> | 111 |
| 3.3. <i>Evolución en la calidad de la ola</i> | 117 |
| 3.4. <i>Modelo morfodinámico de funcionamiento del estuario exterior</i> | 119 |
| 4. Conclusiones | 125 |
| 5. Bibliografía | 129 |
| 6. Agradecimientos | 131 |

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

| | Página |
|---|--------|
| Figura 1. Vista general de los diferentes elementos constitutivos de la desembocadura del estuario. | 8 |
| Figura 2. Evolución morfológica de la desembocadura del estuario del Oka (Urdaibai) durante los últimos 50 años. La línea roja en el extremo Norte de Laidatxu aparece como referencia geográfica. | 10 |
| Figura 3. Localización de las zonas de vertido de los dragados históricos en la mitad inferior del estuario. | 12 |
| Figura 4. Situación morfológica de la desembocadura del Oka en Enero 2005. | 14 |
| Figura 5. Características del clima marino en el entorno de Mundaka. | 15 |
| Figura 6. Características de los frentes de oleaje incidentes en la desembocadura del estuario. | 16 |
| Figura 7. Vista general del oleaje incidente en la desembocadura del estuario, Febrero 2006. | 17 |
| Figura 8. Ejemplo de formación y evolución de un temporal provocado por las bajas presiones noratlánticas (26 Diciembre 2005/1 Enero 2006). | 19 |
| Figura 9. Rosa de oleaje en profundidades indefinidas. | 19 |
| Figura 10. Oleajes típicos en función de las direcciones de procedencia. | 21 |
| Figura 11. Gráficos estacionales del clima marítimo en la zona de Bilbao | 23 |
| Figura 12. Altura significativa de ola para diferentes períodos de retorno. | 24 |
| Figura 13. A: series de datos de alturas significantes del oleaje (Hs) medidas en la boya interior Bilbao y la boya exterior Bilbao-Vizcaya para la anualidad 2005. B: comparación de ambas series de datos. | 27 |
| Figura 14. Rosa de vientos para los periodos Mayo-Octubre 2005 y Noviembre 2005-Abril 2006 en Mundaka. | 27 |
| Figura 15. Altura significativa (m) de ola en la boya de Bilbao-Vizcaya (01/05/2005-30/04/2006). | 28 |
| Figura 16. Malla de muestreo (A), cartografía de la media granulométrica (B) y cartografía del <i>sorting</i> granulométrico (C) en escala phi. | 30 |
| Figura 17. Ejemplos de caracterización granulométrica de la arena y aspecto de la arena del fondo bajo la lupa binocular. La localización de las muestras 252 y 351 se encuentra en la Figura 15 (A). | 32 |
| Figura 18. Embarcaciones UKABI y HAREA con su equipamiento. | 33 |
| Figura 19. Nube de puntos tipo para cada campaña batimétrica y topográfica. | 34 |
| Figura 20. Batimetría previa de la desembocadura del estuario que muestra las condiciones en Diciembre 2002. La línea roja indica la cota 0 y la amarilla la batimétrica 2 del puerto de Bilbao. | 35 |
| Figura 21. Batimetrías mensuales de la desembocadura del estuario. Los meses de Mayo, Julio, Septiembre, Octubre y Diciembre de 2005, Febrero y Abril 2006 incluyen la información topográfica de las zonas intermareales. La línea roja indica la cota 0, la naranja la batimétrica 1 y la amarilla la batimétrica 2 del puerto de Bilbao. | 37 |
| Figura 22. Vista general de la erosión producida en el límite inter/supramareal (berma) de las zonas Noreste (A) y Oeste (B) de la playa de Laida. | 38 |

| | |
|--|----|
| Figura 23. Detalle de las batimetrías mensuales en la barra de Mundaka. La línea roja indica la cota 0, la naranja la batimétrica 1 y la amarilla la batimétrica 2 del puerto de Bilbao. | 40 |
| Figura 24. Evolución mensual de la desembocadura del estuario a través de fotografías aéreas oblicuas (Mayo 2005-Abril 2006). | 43 |
| Figura 25. Evolución temporal de la zona Sur de la playa de Laida (Diciembre 2001-Abril 2006). | 45 |
| Figura 26. Evolución temporal del balance sedimentario en la zona Sur de Laida (Diciembre 2001-Abril 2006). | 46 |
| Figura 27. Vista aérea de la playa de Laida en Diciembre 2005. | 46 |
| Figura 28. Campaña de correntímetros Valeport. A: Detalle del Valeport 808. B: Valeport 808 en la playa de Laida. C: Colocación del Valeport 730D en el canal de desembocadura. D: Valeport 730D bajo el agua. E: Oleaje incidente sobre el Valeport 730D. D: Descarga de datos del Valeport 730D. | 48 |
| Figura 29. Localización de los correntímetros Valeport 808 durante las 4 campañas de medida estivales. En color blanco la posición V1, en color rojo la posición V2, y en color verde la posición V3. | 49 |
| Figura 30. Parámetros de oleaje exterior (periodo y altura significativa) y nivel del mar (respecto al 0 de Bilbao) obtenidos a partir de la boya y mareógrafo de Bilbao durante las campañas estivales. | 50 |
| Figura 31. Velocidad de corriente (verde), altura de lámina de agua (azul) y turbidez (amarillo) registradas durante la Campaña I de verano. | 51 |
| Figura 32. Velocidad y dirección de corriente vs. altura de lámina de agua registradas durante la Campaña I de verano. | 52 |
| Figura 33. Altura de lámina de agua (azul) vs. altura significativa de ola (verde) y parámetros del oleaje (dirección, periodo vs. altura significativa) registrados durante la Campaña I de verano. | 53 |
| Figura 34. Velocidad de corriente (verde), altura de lámina de agua (azul) y turbidez (amarillo) registradas durante la Campaña II de verano. | 54 |
| Figura 35. Velocidad y dirección de corriente vs. altura de lámina de agua registradas durante la Campaña II de verano. | 55 |
| Figura 36. Altura de lámina de agua (azul) vs. altura significativa de ola (verde) y parámetros del oleaje (dirección, periodo vs. altura significativa) registrados durante la Campaña II de verano. | 56 |
| Figura 37. Velocidad de corriente (verde), altura de lámina de agua (azul) y turbidez (amarillo) registradas durante la Campaña III de verano. | 57 |
| Figura 38. Velocidad y dirección de corriente vs. altura de lámina de agua registradas durante la Campaña III de verano. | 58 |
| Figura 39. Altura de lámina de agua (azul) vs. altura significativa de ola (verde) y parámetros del oleaje (dirección, periodo vs. altura significativa) registrados durante la Campaña III de verano. | 59 |
| Figura 40. Velocidad de corriente (verde), altura de lámina de agua (azul) y turbidez (amarillo) registradas durante la Campaña IV de verano. | 60 |
| Figura 41. Velocidad y dirección de corriente vs. altura de lámina de agua registradas durante la Campaña IV de verano. | 61 |
| Figura 42. Altura de lámina de agua (azul) vs. altura significativa de ola (verde) y parámetros del oleaje (dirección, periodo vs. altura significativa) registrados durante la Campaña IV de verano. | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 43. Localización de los correntímetros Valeport 730D durante las 4 campañas de medida invernales. En color blanco la posición V1, en color rojo la posición V2 y en color verde la posición V3. | 63 |
| Figura 44. Parámetros de oleaje exterior (dirección, periodo y altura significativa) y nivel del mar (respecto al 0 de Bilbao) obtenidos a partir de la boya y mareógrafo de Bilbao durante las campañas invernales. | 64 |
| Figura 45. Velocidad de corriente (verde), altura de lámina de agua (azul) y turbidez (amarillo) registrados durante la Campaña I de invierno. | 65 |
| Figura 46. Velocidad y dirección de corriente vs. altura de lámina de agua registradas durante la Campaña I de invierno. | 66 |
| Figura 47. Altura de lámina de agua (azul) vs. altura significativa de ola (verde) y parámetros del oleaje (dirección, periodo vs. altura significativa) registrados durante la Campaña I de invierno. | 67 |
| Figura 48. Velocidad de corriente (verde), altura de lámina de agua (azul) y turbidez (amarillo) registradas durante la Campaña II de invierno. | 68 |
| Figura 49. Velocidad y dirección de corriente vs. altura de lámina de agua registradas durante la Campaña II de invierno. | 69 |
| Figura 50. Altura de lámina de agua (azul) vs. altura significativa de ola (verde) y parámetros del oleaje (dirección, periodo vs. altura significativa) registrados durante la Campaña II de invierno. | 70 |
| Figura 51. Velocidad de corriente (verde), altura de lámina de agua (azul) y turbidez (amarillo) registradas durante la Campaña III de invierno. | 71 |
| Figura 52. Velocidad y dirección de corriente vs. altura de lámina de agua registradas durante la Campaña III de invierno. | 72 |
| Figura 53. Altura de lámina de agua (azul) vs. altura significativa de ola (verde) y parámetros del oleaje (dirección, periodo vs. altura significativa) registrados durante la Campaña III de invierno. | 73 |
| Figura 54. Velocidad de corriente (verde), altura de lámina de agua (azul) y turbidez (amarillo) registradas durante la Campaña IV de invierno. | 74 |
| Figura 55. Velocidad y dirección de corriente vs. altura de lámina de agua registradas durante la Campaña IV de invierno. | 75 |
| Figura 56. Altura de lámina de agua (azul) vs. altura significativa de ola (verde) y parámetros del oleaje (dirección, periodo vs. altura significativa) registrados durante la Campaña IV de invierno. | 76 |
| Figura 57. Ejemplos de calibración de las medidas de turbidez desde OBS en voltios a gramos /litro. | 77 |
| Figura 58. Distribución y magnitudes de la corriente durante las 4 campañas de medición correspondientes al periodo estival. | 78 |
| Figura 59. Distribución y magnitudes de la corriente durante las 4 campañas de medición correspondientes al periodo invernal. | 79 |
| Figura 60. Bocana interior donde se realizaron los transectos e imagen del equipo ADCP. | 81 |
| Figura 61. Ciclo de marea y volumen de agua entrante y saliente a través de la bocana en condiciones de mareas vivas (8 de Mayo 2005). | 83 |
| Figura 62. Ciclo de marea y volumen de agua entrante y saliente a través de la bocana en condiciones de mareas muertas (14 de Mayo 2005). | 84 |
| Figura 63. Velocidad y dirección de las corrientes mareales, y transporte sedimentario a lo largo de un ciclo mareal completo en la bocana interior bajo condiciones de mareas muertas y vivas en verano. | 86 |

| | |
|---|-----|
| Figura 64. Velocidad y dirección de las corrientes mareales, y transporte sedimentario a lo largo de un ciclo mareal completo en la bocana interior bajo condiciones de mareas muertas y vivas en invierno. | 88 |
| Figura 65. Toma de muestras de sedimento en suspensión y aspecto del sedimento recogido bajo la lupa binocular. | 89 |
| Figura 66. <i>Backscatter</i> del sedimento transportado a través de la bocana del estuario a lo largo de un ciclo mareal bajo condiciones de mareas vivas y muertas en verano. Se muestran además los parámetros del oleaje medidos en la boya de Bilbao-Vizcaya durante la campaña. | 91 |
| Figura 67. <i>Backscatter</i> del sedimento transportado a través de la bocana del estuario a lo largo de un ciclo mareal bajo condiciones de mareas vivas y muertas en invierno. Se muestran además los parámetros del oleaje medidos en la boya de Bilbao-Vizcaya durante la campaña. | 92 |
| Figura 68. Porcentaje de sedimento transportado durante un ciclo mareal bajo condiciones de mareas vivas, un ciclo mareal bajo condiciones de mareas muertas y durante el período estival (Mayo-Octubre 2005). | 93 |
| Figura 69. Porcentaje de sedimento transportado durante un ciclo mareal bajo condiciones de mareas vivas, un ciclo mareal bajo condiciones de mareas muertas y durante el período invernal (Noviembre 2005-Abril 2006). | 94 |
| Figura 70. Nubes de puntos batimétricos y topográficos utilizadas en las simulaciones de propagación del oleaje. | 96 |
| Figura 71. Herramienta de simulación de oleaje MOPLA. | 96 |
| Figura 72. Calibración de la altura significativa de ola. | 98 |
| Figura 73. Espectros de oleaje utilizados para las simulaciones de propagación en la zona exterior del estuario y rangos de marea durante el periodo de estudio. | 100 |
| Figura 74. Altura significativa (H_s) del oleaje simulado durante la pleamar para la zona exterior del estuario a lo largo del periodo de estudio. | 102 |
| Figura 75. Altura significativa (H_s) del oleaje simulado durante la bajamar para la zona exterior del estuario a lo largo del periodo de estudio. | 103 |
| Figura 76. Altura significativa (H_s) y vectores de dirección de propagación del oleaje simulado durante la pleamar para la zona exterior del estuario a lo largo del periodo de estudio. | 104 |
| Figura 77. Altura significativa (H_s) y vectores de dirección de propagación del oleaje simulado durante la bajamar para la zona exterior del estuario a lo largo del periodo de estudio. | 105 |
| Figura 78. Vista aérea oblicua del oleaje incidente en el estuario exterior el día 14 de Enero 2006. | 106 |
| Figura 79. Vectores y magnitud de las corrientes de rotura del oleaje simulado durante la pleamar para la zona exterior del estuario a lo largo del periodo de estudio. | 107 |
| Figura 80. Vectores y magnitud de las corrientes de rotura del oleaje simulado durante la bajamar para la zona exterior del estuario a lo largo del periodo de estudio. | 108 |
| Figura 81. Transporte potencial simulado durante la pleamar para la zona exterior del estuario a lo largo del periodo de estudio. | 109 |
| Figura 82. Transporte potencial simulado durante la bajamar para la zona exterior del estuario a lo largo del periodo de estudio. | 110 |
| Figura 83. Balance sedimentario (sedimentación/erosión) bimensual entre los meses de Mayo 2005 y Abril 2006 para la zona exterior del estuario. | 112 |
| Figura 84. Balance sedimentario (sedimentación/erosión) semestral (verano e invierno) entre los meses de Mayo 2005 y Abril 2006 para la zona exterior del estuario. | 113 |

| | |
|--|-----|
| Figura 85. Balance sedimentario (sedimentación/erosión) mensual entre los meses de Mayo 2005 y Octubre 2005 (verano) para la zona de la barra de Mundaka. | 114 |
| Figura 86. Balance sedimentario (sedimentación/erosión) mensual entre los meses de Octubre 2005 y Abril 2006 (invierno) para la zona de la barra de Mundaka. | 115 |
| Figura 87. Balance sedimentario (sedimentación/erosión) en tres perfiles de la barra de Mundaka para los periodos estival (Mayo-Octubre 2005) e invernal (Octubre 2005-Abril 2006). | 116 |
| Figura 88. Ola de Mundaka en Febrero 2006. | 118 |
| Figura 89. Balance sedimentario (sedimentación/erosión) de un perfil N-S en el área central de la zona exterior del estuario para los periodos estival (Julio 2005) e invernal (Febrero 2006). | 120 |
| Figura 90. Interacción entre el oleaje incidente en la bahía y la corriente mareal vaciante en el canal de desembocadura (efecto chorro). | 121 |
| Figura 91. Balance sedimentario (sedimentación/erosión) entre los meses de Mayo 2005 (inicio de estudio) y Abril 2006 (fin de estudio) para la zona de la barra de Mundaka. | 123 |
| Figura 92. Balance sedimentario (sedimentación/erosión) entre los meses de Mayo 2005 (comienzo estudio), y Abril 2006 (fin estudio) para la zona exterior del estuario. | 124 |
| Tabla 1. Distribución histórica de los dragados efectuados por la empresa Astilleros de Murueta SA en el estuario del Oka (Urdaibai). | 11 |
| Tabla 2. Porcentaje de olas por sectores. | 20 |
| Tabla 3. Altura de ola significante (Hs). | 20 |
| Tabla 4. Distribución media del oleaje en profundidades indefinidas. | 22 |
| Tabla 5. Características del oleaje escalar extremal en la boya del Puerto de Bilbao-Vizcaya. | 25 |
| Tabla 6. Correlaciones entre la altura de ola y el período durante temporales según la "ROM 0.3-91-oleaje". | 25 |
| Tabla 7. Volumen de arena erosionado en el margen Sur de Laida (Diciembre 2001-Abril 2006). | 47 |

1. Introducción

1.1. Elementos morfológicos y variabilidad temporal

La desembocadura del Oka es la zona donde la dinámica sedimentaria estuarina es más activa debido a que ahí coexisten la acción del oleaje, de las corrientes de marea y del viento. La continua variabilidad de estos agentes tiene su reflejo en la dinámica sedimentaria y da lugar a constantes procesos de erosión, transporte y sedimentación de arena en distintas zonas de la desembocadura.



Figura 1. Vista general de los diferentes elementos constitutivos de la desembocadura del estuario.

Sin embargo, pese a esta variabilidad, la desembocadura presenta una serie de elementos sedimentarios que se mantienen con unas características pseudoestables a medio plazo, si bien exhiben una morfología y ubicación dinámicas y dependientes de eventos puntuales (tormentas, vientos fuertes,...), cíclicos (marea, régimen de oleaje y vientos) y antrópicos (dragados, vertidos,...). Estos elementos (Figura 1) son los siguientes:

a) La bocana submareal, que se localiza en la zona Oeste del estuario más resguardada de la acción del oleaje. Presenta una sección asimétrica en forma de V con un flanco

rocoso de fuerte pendiente situado al Oeste y otro flanco arenoso tendido de baja pendiente al Este.

b) El delta de reflujos inter/submareal, situado en la zona exterior y que, debido al margen rocoso y la acción del oleaje, queda reducido a una barra lateral situada al Este del canal de desembocadura, denominada localmente "barra de Mundaka".

c) El delta de flujo inter/submareal, situado en la zona interior de la desembocadura frente a la isla de Txatxarramendi y que está formado por un canal central, dos barras laterales y un lóbulo frontal. Esta estructura muestra una tendencia a migrar lateralmente debido a los procesos de erosión-transporte-sedimentación así como a las variaciones en la intensidad de las corrientes mareales.

d) La playa de Laida, afianzada en el margen Este de la bocana y genéticamente vinculada a la acción conjunta del oleaje y las corrientes de marea en sus zonas sub- e intermareales y del viento en su zona supramareal.

El equilibrio sedimentario de esta desembocadura se encuentra condicionado por un continuo movimiento de arena entre sus diferentes elementos constitutivos. Se trata de un equilibrio dinámico debido a que la intensidad de los agentes involucrados cambia a lo largo del tiempo (temporales/calmas, mareas vivas/muertas, vientos fuertes/moderados) dando lugar a una variación morfológica y espacial de esos elementos. De modo ilustrativo, la Figura 2 muestra la variabilidad experimentada por la zona de desembocadura durante las últimas décadas.

1.2. Intervenciones antrópicas: dragados y vertidos

Desde el siglo XVIII se ha recolectado arena del estuario inferior con diversos fines, principalmente para su utilización como material de construcción. Esta recolección se hacía inicialmente de modo manual y su impacto era relativamente pequeño. A mediados del siglo XX este proceso comenzó a realizarse de una forma más o menos industrial y se llegó a construir un depósito arenoso en Sukarrieta, al Este del puente de Txatxarramendi.

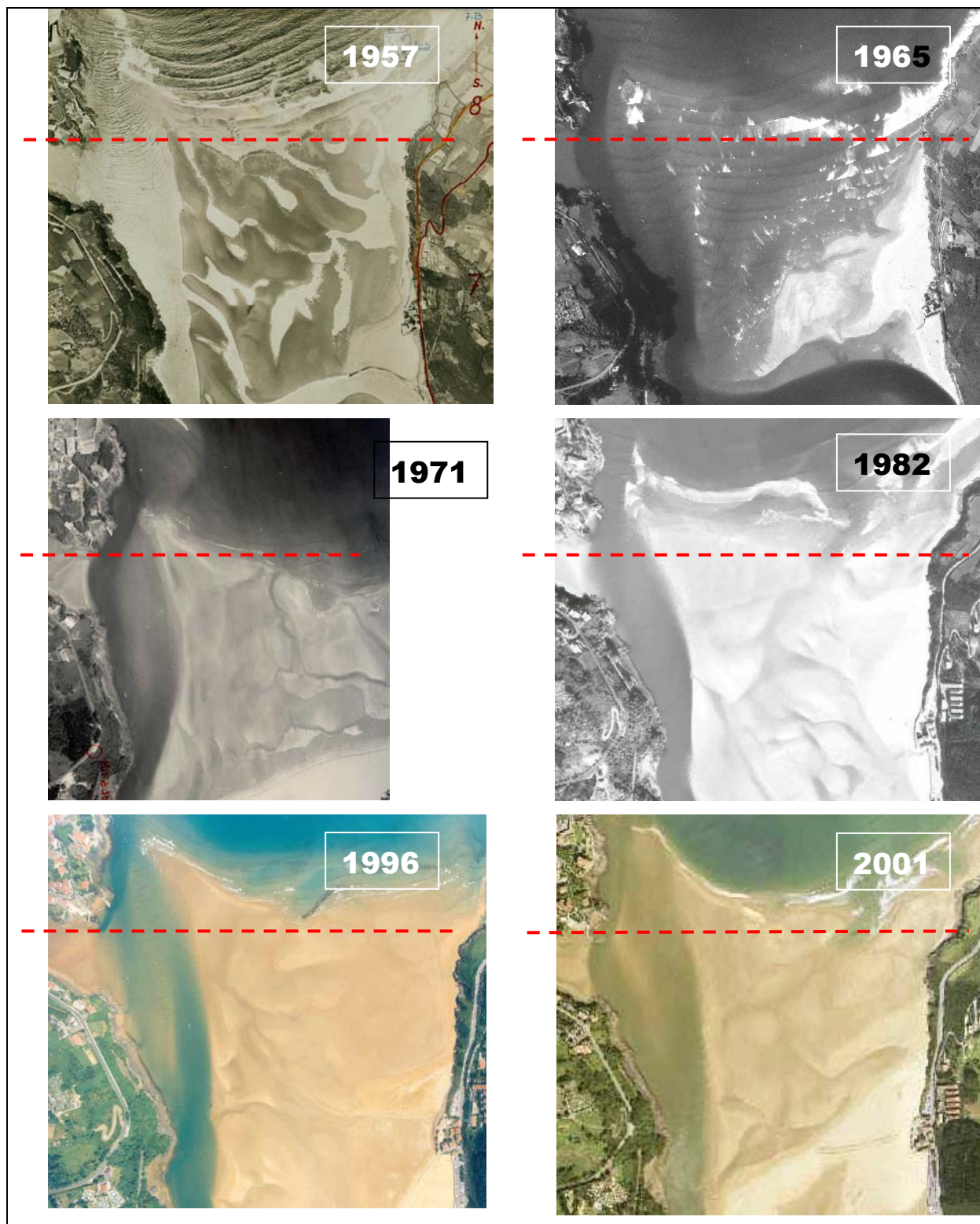


Figura 2. Evolución morfológica de la desembocadura del estuario del Oka (Urdaibai) durante los últimos 50 años. La línea roja en el extremo Norte de Laidatxu aparece como referencia geográfica.

La empresa Astilleros de Murueta SA, ubicada en el margen Oeste de la zona media del estuario desde el año 1943, realizó en 1973 su primer dragado utilizando maquinaria pesada debido a su necesidad de calados para poder sacar fuera del estuario los barcos construidos. A partir de ese dragado inicial, se han ido sucediendo paulatinamente otros con una periodicidad aproximada de unos 5 años (Tabla 1).

| Año | Volumen (m ³) | Zona de vertido |
|-----------|-----------------------------|--|
| 1973 | 176.000 arena | San Kristobal |
| 1978 | 150.000 arena (deducido) | San Kristobal y Axpe |
| 1984 | 125.000 arena | San Antonio |
| 1987 | ??? fango | Parcela anexa Astillero |
| 1992 | 56.000 arena | Kanalape (68%) y Sandindere (32%) |
| 1995/1996 | 45.000 arena | Kanalape, Sandindere y Laida N |
| 1998/1999 | 54.000 arena y fango | Laida San Antonio y Parcela anexa Astilleros |
| 2003 | 287.000 arena y fango | Laida S (85%) y Parcela anexa Astillero (15%) |

Tabla 1. Distribución histórica de los dragados efectuados por la empresa Astilleros de Murueta SA en el estuario del Oka (Urdaibai).

Debido a la presencia de metales pesados, los fangos procedentes de las extracciones se depositaron finalmente fuera del estuario tras un secado previo en una parcela anexa al astillero. Las arenas dragadas, en cambio, se han ido vertiendo en diversas zonas dentro del estuario: frente a San Kristobal, frente a Axpe, en la playa de San Antonio, en Kanalape, frente a la isla de Sandindere y, por último, en la playa de Laida (Figura 3).

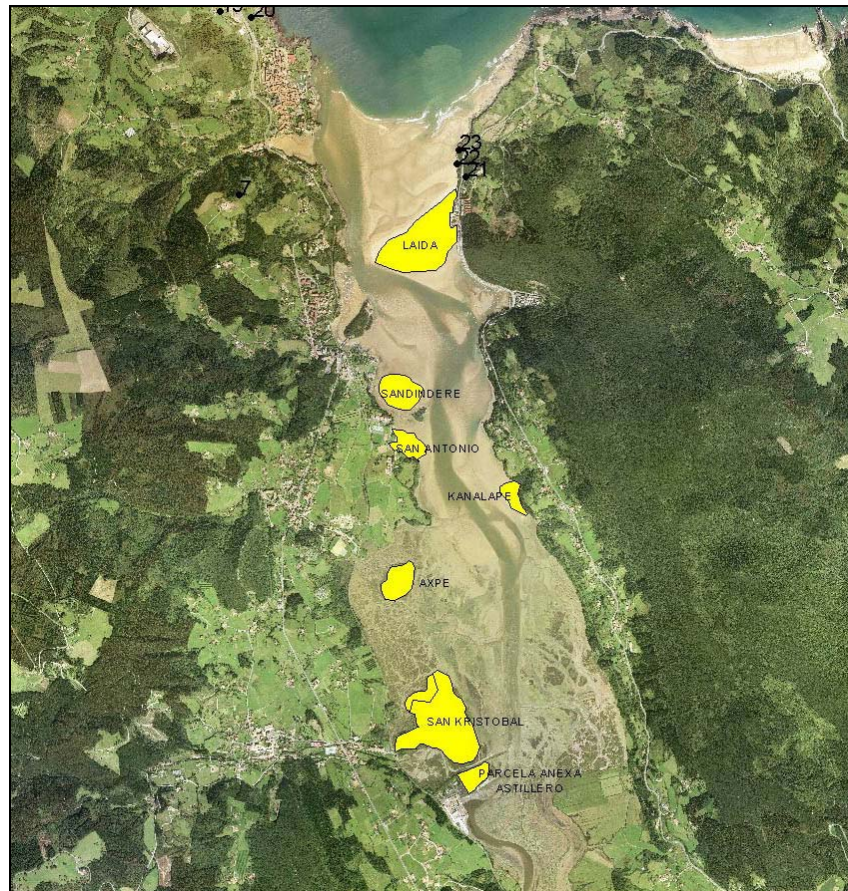


Figura 3. Localización de las zonas de vertido de los dragados históricos en la mitad inferior del estuario.

Actualmente, estos rellenos se presentan como grandes superficies arenosas de carácter supramareal. Sobre estos depósitos el proceso sedimentario dominante es el arrastre por el viento que provoca la dispersión de las arenas sobre la llanura intermareal fangosa que los rodea, modificando las características texturales de dicha unidad. Estos vertidos afectan a la distribución granulométrica, hidrodinámica y biológica del estuario ya que modifican las características naturales del sedimento en el fondo.

1.3. Situación actual: regeneración de dunas y variación del oleaje

Con el fin de lograr el mayor grado de naturalidad posible dentro de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai, el Patronato de la misma se propuso regenerar el campo dunar que antaño existía en Laida y que aparece registrado en diversa documentación gráfica de la primera mitad del siglo XX. A tal fin, el Patronato propuso a la UPV/EHU el diseño de un "Estudio de seguimiento y evaluación sedimentológica del proyecto de regeneración

dunar” para conocer y evaluar los diferentes procesos físicos que operan a lo largo del tiempo en la zona de actuación.

Tras los buenos resultados obtenidos en una primera prueba-piloto, el Patronato decidió utilizar los materiales arenosos que en 1999 habían sido dragados dentro de los canales mareales del estuario y vertidos en la playa de Laida como sustrato sobre el que desarrollar este proyecto de regeneración dunar. Durante el mes de Octubre 2001 comenzó la primera fase del trabajo con la implantación de captadores de arena, a la que siguieron una nueva implantación de captadores en Febrero 2002 y la plantación de vegetación dunar en Abril 2003 con el fin de estabilizar y naturalizar la acumulación arenosa.

La necesidad de mayor calado en el canal principal del estuario por parte de la empresa Astilleros de Murueta SA condujo a la realización de un nuevo dragado con la extracción de aproximadamente 240.000 m³ de arena y su vertido en la zona supramareal Sur de la playa de Laida. Una vez finalizado el vertido de sedimento arenoso en Junio 2003, se procedió a la implantación de captadores de mimbre en esa zona con el objetivo de ampliar significativamente el campo dunar en Laida. En Mayo 2004 se llevó a cabo la plantación de vegetación dunar en las acumulaciones arenosas generadas sobre el último vertido realizado.

Desde la finalización del último dragado en el año 2003, se observó un fuerte retroceso en el margen Sur de Laida como consecuencia de la actividad erosiva del canal de Arketa durante el vaciado mareal del estuario (reflujo). Este proceso responde a la migración lateral hacia el Norte del último meandro que describe el canal estuarino antes de su desembocadura. Hasta el mes de Diciembre 2004, este retroceso erosivo había sido cuantificado en 130 m lineales en dirección Norte, que representan un volumen de pérdida de arena equivalente a 160.000 m³ aproximadamente. Por otro lado, en la zona intermareal Norte de la playa de Laida se observó un incremento de arena cuantificado en unos 76.000 m³, procedentes en su mayor parte de la erosión del margen Sur. El resto de los materiales arenosos ahí erosionados se encontraría acumulado formando parte de los deltas de flujo y reflujo que se originan de modo natural en los extremos interior y exterior de la bocana respectivamente, tal y como se ha descrito con anterioridad (Figura 1).

Paralelamente, a partir del año 2003, las fotografías aéreas realizadas en la zona inferior del estuario mostraron una variación morfológica sustancial del canal de desembocadura, con el paulatino abandono de su posición original junto al margen rocoso Oeste de la ría

y la aparición de un canal alternativo hacia el Este que seccionaba la barra arenosa submareal de Mundaka (Figura 4). Esta variación provocó, además, un cambio en las características del oleaje incidente en la zona de Mundaka-Laida imposibilitando la práctica del surf en las condiciones idóneas que se disfrutaban hasta entonces.

A raíz de la preocupación social generada en la zona por este motivo, con fecha 20 de Abril 2005 se celebró una reunión en el Ayuntamiento de Mundaka entre las diferentes instituciones y organismos involucrados. En la misma se acordó encargar al equipo redactor de este proyecto la realización de un estudio de seguimiento morfodinámico de la desembocadura del estuario del Oka con el fin de establecer un diagnóstico científico del problema que afecta al oleaje en esa zona y de discutir posibles medidas correctoras en el caso de que la situación no se recuperase de forma natural tras el verano.

Con posterioridad a la presentación pública de los resultados del seguimiento correspondientes al período Mayo-Septiembre 2005 celebrada el día 15 de Octubre de 2005, el Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio del Gobierno Vasco decidió prorrogar durante 7 meses adicionales el estudio con el fin de caracterizar las condiciones invernales (Octubre 2005-Abril 2006) y completar así un ciclo anual en el seguimiento morfodinámico de la desembocadura del estuario.



Figura 4. Situación morfológica de la desembocadura del Oka en Enero 2005.

1.4. La ola de Mundaka

Entre las características que hacen a una ola especialmente adecuada para la práctica del surf, se encuentran, por un lado, las que dependen del clima marino del lugar en el que está ubicada y, por otro, las que dependen de la forma y tipo de fondo sobre el que ésta rompe.

En cuanto al clima marino, el régimen de oleaje de la zona es el factor que más influye en el tamaño o la regularidad de una ola, aunque existen otros factores que pueden hacer de un punto de la costa un sitio especial.

Para la práctica adecuada del surf, las olas deben estar bien definidas, con un frente uniforme y una pared lisa en el momento de la rotura. Las características que influyen en este aspecto son la dirección del viento y la anchura espectral del oleaje (variabilidad de periodos y direcciones). Los vientos flojos o terrales (de frente a la dirección de avance de la ola) hacen que la pared de la ola se mantenga lisa y uniforme durante la rotura. Por otro lado, un oleaje es la mezcla de distintos periodos, alturas y direcciones. Sin embargo, cuanto más tiempo se desplace el oleaje por la superficie del mar antes de llegar a la costa más uniforme se vuelve, transformándose en lo que se denomina *swell* (mar de fondo). Este tipo de oleaje es el que presenta mejor calidad para la práctica del surf ya que suele tener frentes bien definidos y la energía de cada ola es mayor, para la misma altura.

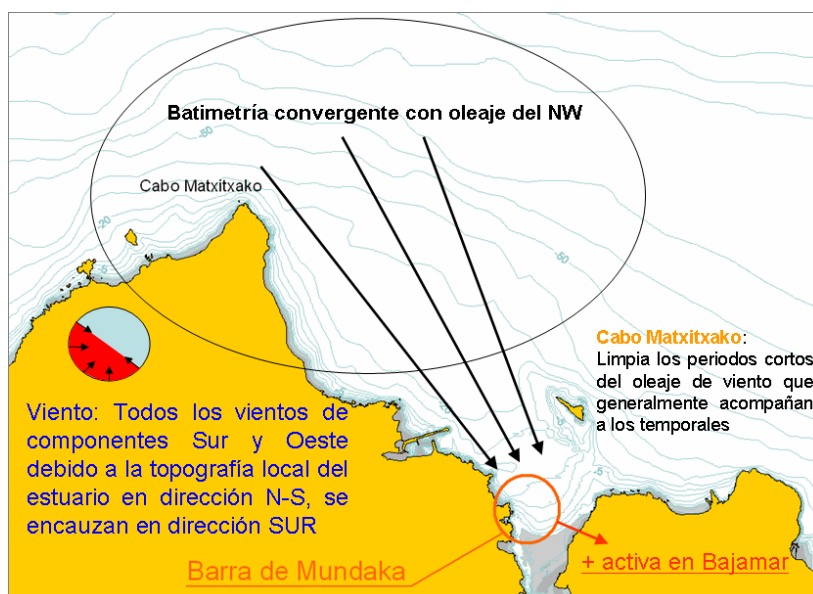


Figura 5. Características del clima marino en el entorno de Mundaka.

Desde el punto de vista del clima marino, Mundaka se encuentra situada estratégicamente en un lugar privilegiado. Como se indica en la Figura 5, la disposición de la batimetría en las inmediaciones de Matxitxako hace que la altura de ola con los periodos altos y las direcciones más cercanas al NW (que son los más frecuentes en el Cantábrico) se amplifiquen ligeramente y lleguen a la barra de Mundaka con toda su fuerza, mientras que los periodos más cortos (que provocan olas de peor calidad) pasan de largo. Además, los vientos de direcciones comprendidas entre el NW y el SE se encauzan debido a la orografía del estuario en una dirección marcadamente N-S y llegan a Mundaka en forma de viento terral.

No obstante, aunque Mundaka se encuentra en un lugar privilegiado desde el punto de vista del clima marino, las características que le han dado fama mundial (y que la han hecho ser considerada como la mejor ola izquierda de Europa y una de las mejores del mundo) están principalmente relacionadas con la morfología del fondo sobre el que rompe.

Para que una ola se pueda surfear, la rotura ha de empezar en un punto y avanzar a lo largo del frente de la ola a la velocidad adecuada. Además, cuanto más larga sea esta rotura progresiva, mayor será la distancia surfable y, por lo general, mejor la ola.

También el modo en que rompe la ola es una función de la pendiente del fondo en el punto de rotura y de las características del propio oleaje (altura y periodo). Pendientes muy suaves producen roturas también suaves y pendientes muy importantes provocan el colapso de la ola o incluso su reflexión. Hay un rango preciso de pendientes que hace que una ola rompa formando un tubo, que es el tipo de rotura más apreciado para el surf.

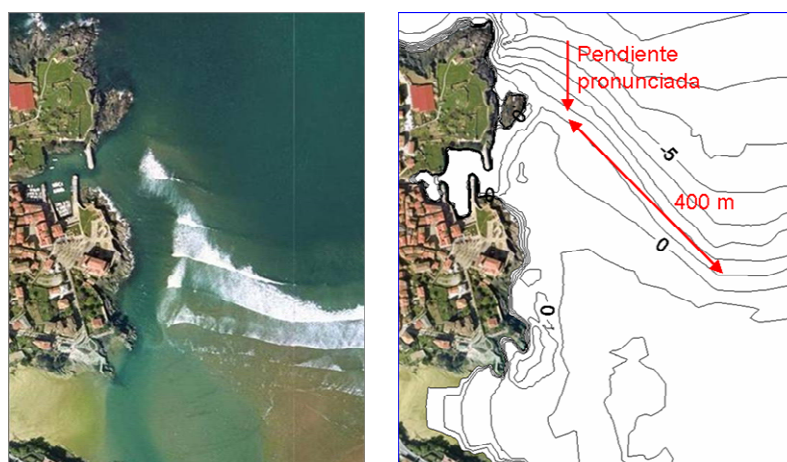


Figura 6. Características de los frentes de oleaje incidentes en la desembocadura del estuario.

Por lo tanto, las principales características que dependen de la morfología del fondo sobre el que rompe una ola son: la distancia surfeable, la velocidad que se alcanza en la ola y la intensidad con la que ésta rompe.

La ola de Mundaka rompe sobre un bajo arenoso generado por las corrientes de la desembocadura del estuario del Oka. Como se observa en la Figura 6 los frentes de ola llegan a las inmediaciones del puerto de Mundaka con una orientación aproximadamente Este-Oeste. La barra de Mundaka, a pesar de ser un bajo arenoso, es especialmente estable y habitualmente presenta la configuración que se observa en la batimetría (correspondiente a Diciembre 2002), formando una rampa con una orientación oblicua respecto al oleaje y provocando su rotura progresiva durante unos 400 m. Además, la pendiente habitual de la barra es ideal para provocar una rotura en tubo muy intensa, que es una de las características más apreciadas de esta ola.

La cota a la que se sitúa la parte superior de la barra (en torno a la bajamar máxima equinoccial) hace que las condiciones ideales se restrinjan al entorno de la bajamar dados los rangos de marea comunes en el Cantábrico (entre 2 y 4 m).



Figura 7. Vista general del oleaje incidente en la desembocadura del estuario. Febrero 2006.

Por lo tanto, como resumen podemos decir que la ola de Mundaka necesita condiciones de oleaje moderado a intenso (típicas de otoño-invierno), marea baja (a ser posible mareas vivas) y vientos de componente Sur u Oeste. También la calidad de la barra (al ser un bajo arenoso) varía a lo largo del año presentando mejores características

inmediatamente después del verano, y perdiéndolas poco a poco a lo largo del invierno (Figura 7).

Por todos estos motivos, la ola de Mundaka no se caracteriza por dar un número importante de días de gran calidad a lo largo del año, pero cuando todas las condiciones son adecuadas llega a alcanzar tal perfección que puede ser considerada, sin ninguna duda, entre las mejores del mundo.

2. Resultados

2.1. Características ambientales

2.1.1. Clima marítimo

La climatología marítima en la costa vasca está directamente relacionada con su posición geográfica en el contexto del Golfo de Bizkaia y del Atlántico Noreste. Por su orientación y posición, nuestra costa está expuesta a fuertes oleajes del cuarto cuadrante como consecuencia de la formación y evolución de las bajas presiones noratlánticas (Figura 8). Este oleaje (mar de fondo del Noroeste) es el dominante y más común en el área de estudio y persiste en situaciones de calma local e incluso con vientos fuertes y relativamente persistentes de direcciones netamente diferentes.

Durante la época estival, con la extensión del anticiclón de las Azores, se relaja la secuencia de formación de borrascas noratlánticas y también su intensidad. En estas condiciones predomina en la costa cantábrica el régimen de brisas y la circulación de vientos del Noreste. Ocasionalmente, puede formarse oleaje del Noreste que en el caso de la costa vasca, por encontrarnos en la parte más oriental del Cantábrico, es de escasa relevancia ya que el fetch asociado es muy reducido.

Los datos utilizados para conocer las características del oleaje exterior que afecta a la zona de estudio son los proporcionados por el programa ODIN (para el régimen medio anual y extremal) y los registros de la boya exterior de Bilbao-Vizcaya perteneciente a la red de Puertos del Estado (para el régimen medio estacional).

Así, el régimen de oleaje para la costa vasca en profundidades indefinidas tiene las siguientes características (Figura 9, Tablas 2 y 3):

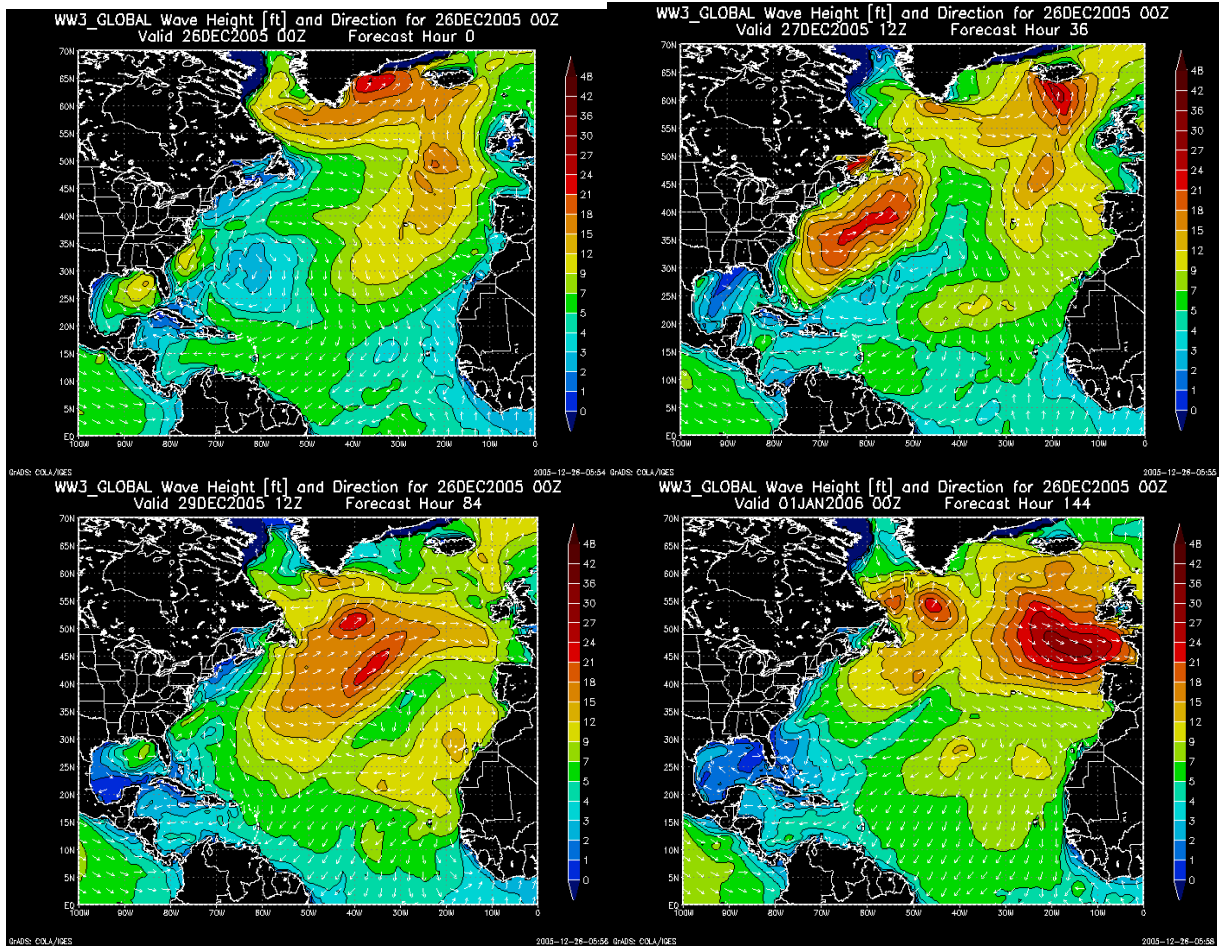


Figura 8. Ejemplo de formación y evolución de un temporal provocado por las bajas presiones noratlánticas (26 Diciembre 2005/1 Enero 2006) (Fuente: <https://www.fnmoc.navy.mil>).

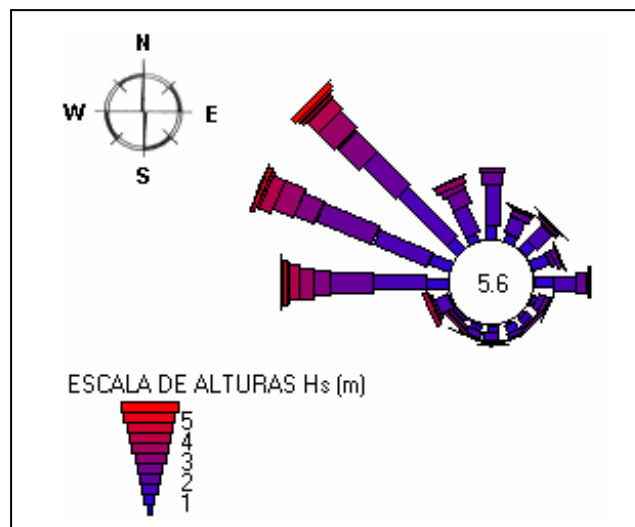


Figura 9. Rosa de oleaje en profundidades indefinidas.

| Sector | Prof. Indefinidas |
|------------------------------|-------------------|
| Calmas/fuera de rango | 5.6% |
| N | 6.8% |
| NNE (N23E) | 3.3% |
| NE (N45E) | 3.8% |
| E NE (N68E) | 2.9% |
| E | 5.1% |
| ESE (S68E) | 1.7% |
| SE (S45E) | 1.5% |
| SSE (S23E) | 1.5% |
| S | 1.7% |
| SSW (S23W) | 1.4% |
| SW (S45W) | 1.1% |
| WSW (S68W) | 2.4% |
| W | 15.6% |
| WNW (N68W) | 19.4% |
| NW (N45W) | 20.0% |
| NNW (N23W) | 6.3% |

Tabla 2. Porcentaje de olas por sectores.

| Dirección | Hs.50 | T.50 | Hs.01 | T.01 |
|-------------------|-------|------|-------|------|
| WNW (N68W) | 1,9 m | 9 s | 4,1 | 13s |
| NW (N45W) | 2,0 m | 12 s | 5,1 | 18s |

Tabla 3. Altura de ola significativa (Hs). Hs.50: Altura de ola significativa superada por el 50% de los estados de mar del año. Hs.01: Altura de ola significativa superada por el 1% de los estados de mar del año. T.50 y T.01 representan el periodo de pico característico asociado a dichos estados del mar.

-Dirección de flujo medio de energía en profundidades indefinidas: Azimut 304° (N56W)

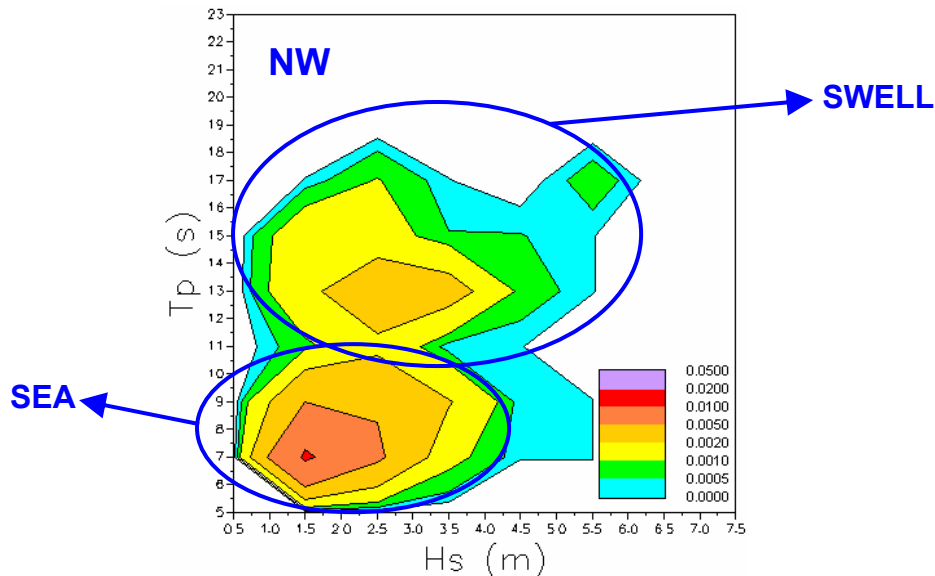


Figura 10. Oleajes típicos en función de las direcciones de procedencia.

En las direcciones de procedencia cercanas al NW (entre WNW y NNW) los oleajes se encuentran agrupados en dos tipos principales: oleajes tipo "swell" (mar de fondo) con periodos altos, y oleajes tipo "sea" (o mar de viento) con periodos bajos. En el resto de las direcciones el único oleaje existente es el tipo "sea" (Figura 10).

La característica que más influye en el comportamiento del oleaje al propagarse hacia la costa es su periodo medio y, en consecuencia, el número mínimo de casos representativos que se deben tener en cuenta a la hora de conocer las características medias anuales del clima marítimo general en la zona es:

- Un oleaje medio tipo *swell*: oleaje cuya altura, dirección y periodo es la media de los oleajes tipo *swell* de cada dirección en función de su probabilidad de ocurrencia. El porcentaje de ocurrencia será la suma de todos los oleajes tipo *swell*.
- Un oleaje medio tipo *sea*: oleaje cuya altura, dirección y periodo es la media de los oleajes tipo *sea* de cada dirección en función de su probabilidad de ocurrencia. El porcentaje de ocurrencia será la suma de todos los oleajes tipo *sea*. Dado el mayor rango de direcciones de los oleajes de viento, podría pensarse en separarlos en dos sectores.

En base a todo esto, la distribución media del oleaje en profundidades indefinidas que afecta a la costa vasca, de la forma más simplificada, se puede asimilar a:

| | Swell | Sea | Calmas |
|----------------------------------|--------------|------------|---|
| Altura significativa (Hs) | 3 m | 2,1 m | Suma de todas las direcciones que no son capaces de propagarse hasta la costa |
| Periodo de pico (Tp) | 13 s | 8 s | |
| Dirección de pico | 297° | 318° | |
| Porcentaje de ocurrencia | 22% | 56,6% | 21,4% |

Tabla 4. Distribución media del oleaje en profundidades indefinidas (Cearreta *et al.*, 2005).

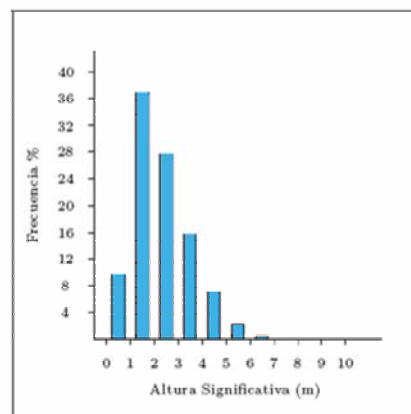
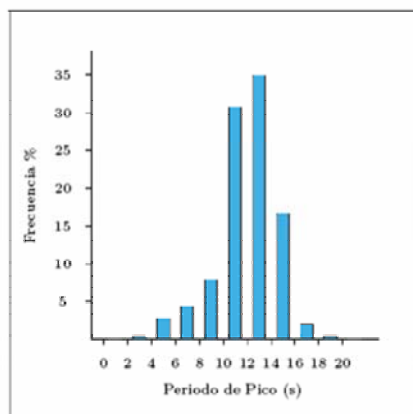
A partir de los datos estacionales de la boya de Bilbao-Vizcaya perteneciente a Puertos del Estado (lon: 3,052° W; lat: 43,640° N; prof: 600m) para el periodo 1990-2003, Cearreta *et al.* (2005) mostraron que el clima marítimo en la zona tiene dos épocas con unas características medias bien diferenciadas (Figura 11):

- El verano (Junio-Agosto): época en la que predominan los periodos bajos, con un máximo de ocurrencia en torno a los 9 s, y los periodos superiores a 10 s no llegan al 25%. Además, las alturas de ola son pequeñas, no superándose los 2 m de altura más de un 10% del tiempo.
- El invierno (Diciembre-Febrero): época en la que predominan los periodos altos con un máximo de ocurrencia en torno a los 13 s, y los periodos inferiores a 10 s no llegan al 20%. Las alturas de ola son importantes superándose los 2 m más del 50% del tiempo.

LUGAR : Bilbao-Vizcaya

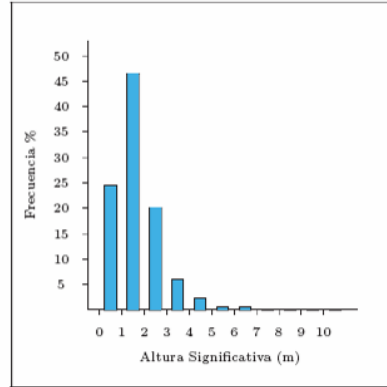
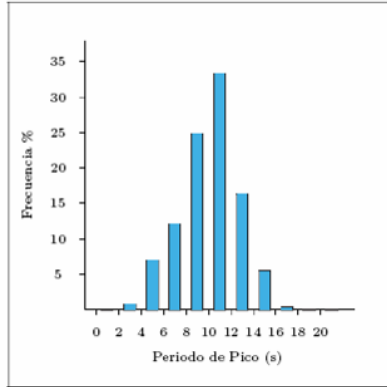
PERIODO : Dic. - Feb.

SERIE ANALIZADA : Nov. 1990 - Oct. 2002



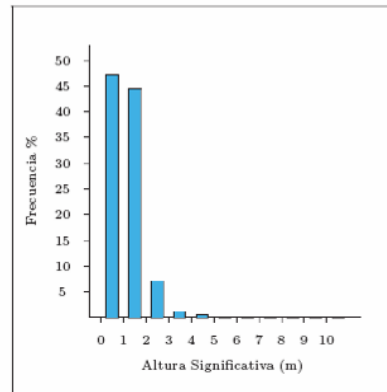
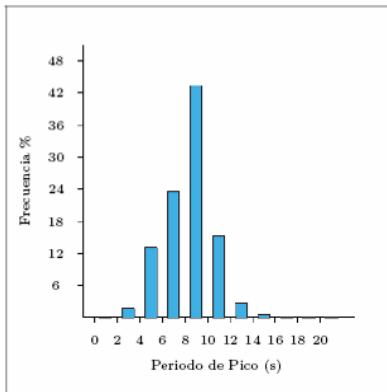
LUGAR : Bilbao-Vizcaya
 PERIODO : Mar. - May.

SERIE ANALIZADA : Nov. 1990 - Oct. 2002



LUGAR : Bilbao-Vizcaya
 PERIODO : Jun. - Ago.

SERIE ANALIZADA : Nov. 1990 - Oct. 2002



LUGAR : Bilbao-Vizcaya
 PERIODO : Sep. - Nov.

SERIE ANALIZADA : Nov. 1990 - Oct. 2002

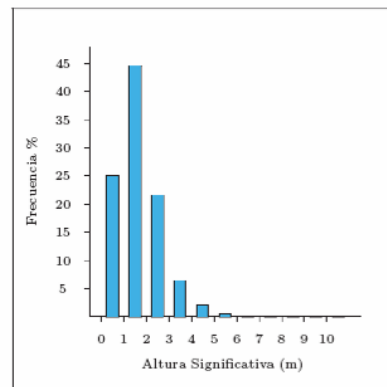
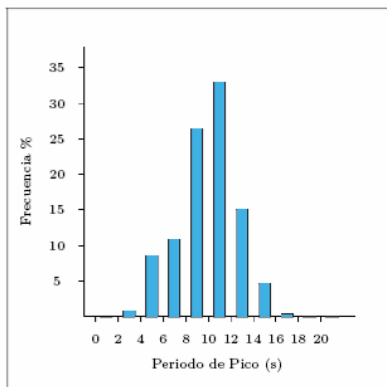


Figura 11. Gráficos estacionales del clima marítimo en la zona de Bilbao.

Las otras dos estaciones (primavera y otoño) presentan valores intermedios a las anteriormente descritas debido tanto a que en ellas existen meses que tienen un clima

más parecido a la estación diferenciada más cercana, como a que son épocas de transición en las que se combinan periodos de calma con tormentas típicas de invierno.

En consecuencia, podemos definir como oleajes característicos medios de cada una de las dos épocas más acusadas los siguientes:

- Verano: oleaje de 1,5 m de Hs y 9 s de periodo de pico. Estas características corresponden a un oleaje tipo *sea* o mar de viento generado por las perturbaciones locales que afectan al Golfo de Bizkaia durante la época estival.
- Invierno: oleaje de 3 m de Hs y 13 s de periodo de pico. Estas características corresponden a los oleajes tipo *swell* o mar de fondo que provienen de la circulación de las bajas presiones predominantes en el Atlántico Norte durante el invierno. Estos oleajes en muchas ocasiones llegarán mezclados con mar de viento local.

Por otra parte, el régimen extremal de un parámetro de oleaje representa la probabilidad de que su valor máximo en un cierto período de tiempo no supere un valor fijado. Asimismo, el número de años medio que transcurre entre dos excedencias sucesivas de un valor dado se denomina periodo de retorno.

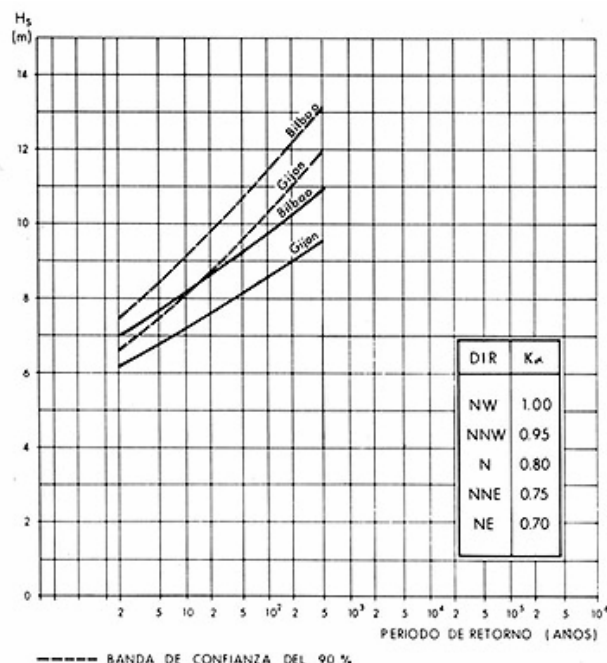


Figura 12. Altura significativa de ola para diferentes periodos de retorno.

Así, el ODIN aporta la tabla correspondiente a la "ROM 0.3-91-oleaje" para caracterizar el oleaje extremal en la zona. En la Tabla 5 se puede observar la altura de ola asociada a

diferentes períodos de retorno, así como la altura de ola correspondiente al nivel de confianza del 90% en la boya de Bilbao-Vizcaya.

| Período de retorno (años) | BILBAO | |
|---------------------------|--------------------|------------------------|
| | H _s (m) | H _s -90%(m) |
| 5 | 7,60 | 8,40 |
| 20 | 8,70 | 9,80 |
| 50 | 9,20 | 10,70 |
| 100 | 9,80 | 11,50 |

Tabla 5. Características del oleaje escalar extremal en la boya del Puerto de Bilbao-Vizcaya.

Las correlaciones disponibles entre la altura de ola y el período durante temporales según la "ROM 0.3-91-oleaje" consideran que el período de pico T_p depende linealmente de la raíz cuadrada de la altura significativa H_s

$$T_p = c \cdot \sqrt{H_s}$$

con coeficientes "c" que varían entre 5 y 8,5 para el caso de Bilbao.

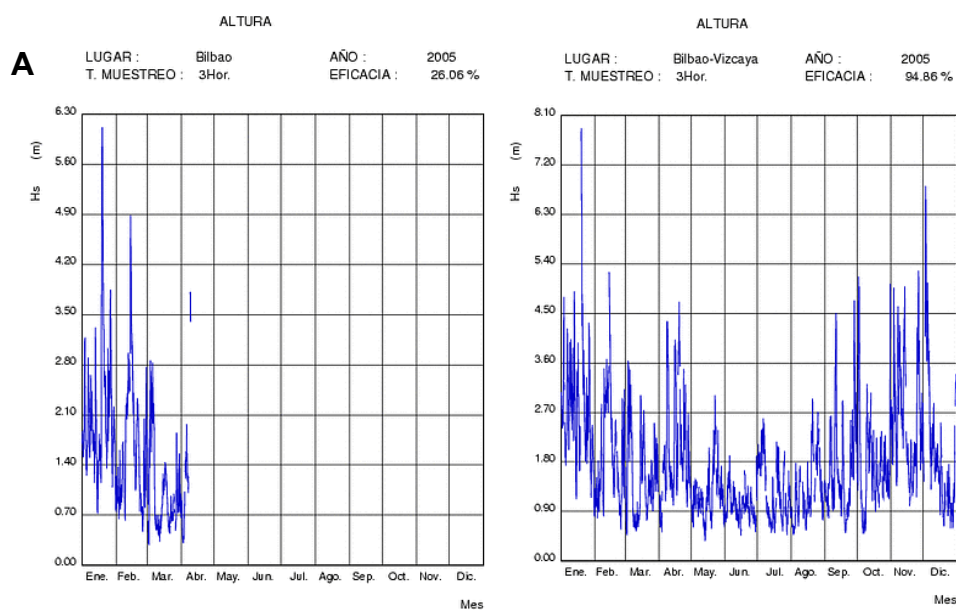
| BOYA | P = H _s / L _T = = $\frac{2\pi H_s}{gT^2}$ | T _p / T̄ | RELACION FINAL H _s (m) T _p (s) | VALORES DE DISEÑO | |
|--------------|--|---------------------|--|--------------------|----------------------|
| | | | | H _s (m) | T _p * (s) |
| BILBAO (Ext) | 0.015 ~ 0.04 | ≈ 1.30 | T _p = (5~8.5)√H _s | 5 | 11~19 |
| | | | | 7 | 13~22 |
| | | | | 9 | 15~25 |
| | | | | 11 | 16,5~28 |

Tabla 6. Correlaciones entre la altura de ola y el período durante temporales según la "ROM 0.3-91-oleaje".

Por otra parte, el Gobierno Vasco dispone de una red de estaciones de medida de datos océano-meteorológicos en las inmediaciones de los principales puertos del País Vasco. Estas estaciones disponen de sensores que miden y almacenan la información tanto de los parámetros meteorológicos (viento, temperatura, presión, visibilidad y radiación)

como de los oceanográficos (oleaje, marea, temperatura del agua y corrientes). La estación más cercana al área de estudio es la situada en el Puerto de Bermeo (aproximadamente 3 Km al Oeste de la desembocadura del estuario del Oka). Así se han recogido y analizado los datos correspondientes al periodo de realización del estudio (Mayo 2005-Abril 2006) para poder correlacionar la evolución registrada durante estos meses con el clima marino. Sin embargo, al analizar los datos se comprobó que el sensor que mide la altura de ola no ha funcionado correctamente para ese intervalo de tiempo. Lo mismo ocurrió con la boya interior del puerto de Bilbao perteneciente a la red de medida de Puertos del Estado (Figura 13A). Por este motivo, se ha decidido tomar como datos de oleaje a incluir en este estudio los procedentes de la boya océano-meteorológica de Bilbao-Vizcaya (boya exterior) que sí aportó un registro continuo (Figura 13A).

Esta información, aunque no es exactamente representativa del área de estudio debido a la diversa exposición de la costa al oleaje que existe entre estos dos puntos (la boya de Bilbao-Vizcaya está más expuesta al oleaje por lo que las alturas de ola serán ligeramente mayores), se puede tomar como una referencia válida del régimen de oleaje que ha existido durante la realización del estudio (Figura 13). Así, se observa que los datos de la boya exterior considerados en este trabajo sobreestiman ligeramente el valor del oleaje que se daría en zonas más litorales como las bocanas de Bilbao o Urdaibai, especialmente para los valores de oleaje más elevados (Figura 13B).



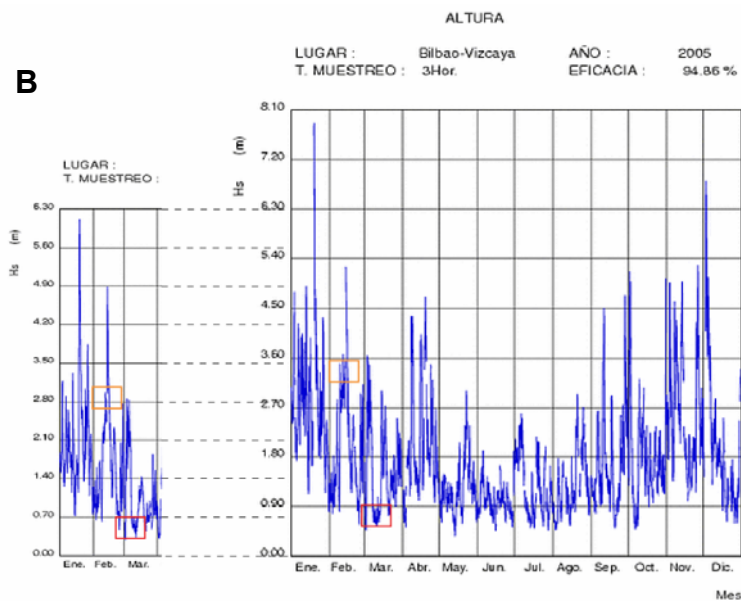


Figura 13. A: series de datos de alturas significantes del oleaje (Hs) medidas en la boya interior Bilbao y la boya exterior Bilbao-Vizcaya para la anualidad 2005. B: comparación de ambas series de datos.

A continuación se representan los datos más interesantes para el seguimiento de la evolución de la desembocadura, como son la dirección e intensidad del viento y la altura de ola.

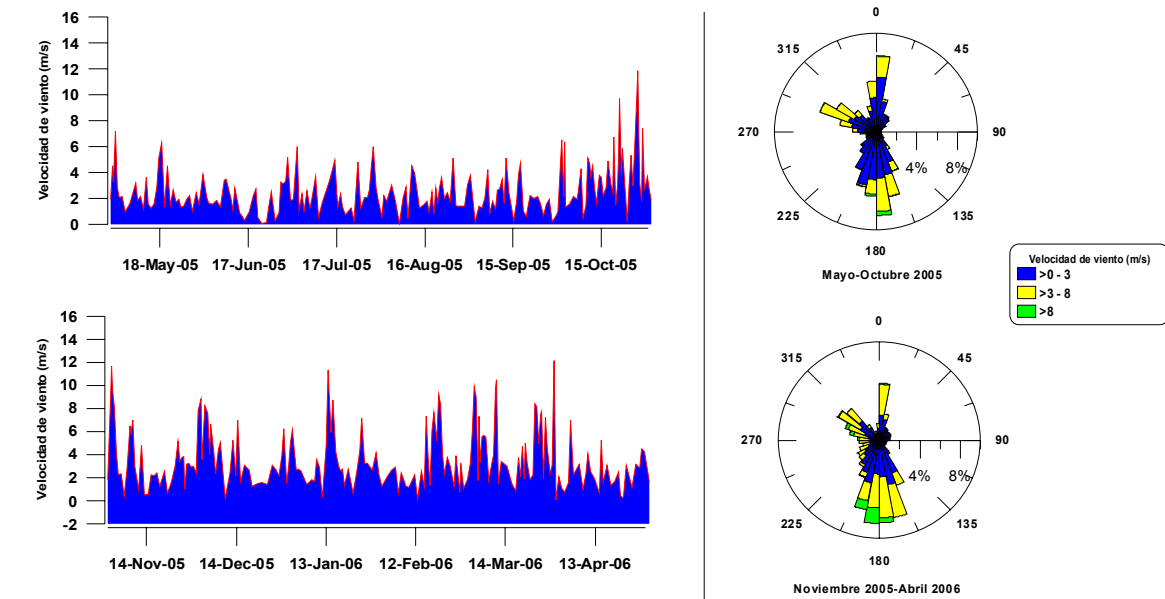


Figura 14. Rosa de vientos para los periodos Mayo-Octubre 2005 y Noviembre 2005-Abril 2006 en Mundaka. (Fuente: Red de Calidad Ambiental del Gobierno Vasco).

Del análisis de la intensidad y dirección del viento (Figura 14) se puede concluir que durante el período Mayo-Octubre los vientos en el estuario son fundamentalmente de componente Norte y Sur como consecuencia de la canalización del viento provocada por la fisiografía del mismo, alcanzando velocidades medias diarias entre 1-2 m/s. Ocasionalmente, todos los meses de este semestre muestran picos aislados que alcanzan los 6 m/s. Sin embargo, el período entre Noviembre-Abril se caracteriza por vientos dominantes del Norte que alcanzan una velocidad media diaria igual o superior a 4 m/s, con máximos todos los meses que llegan a alcanzar incluso los 10 m/s (Cearreta *et al.*, 2004).

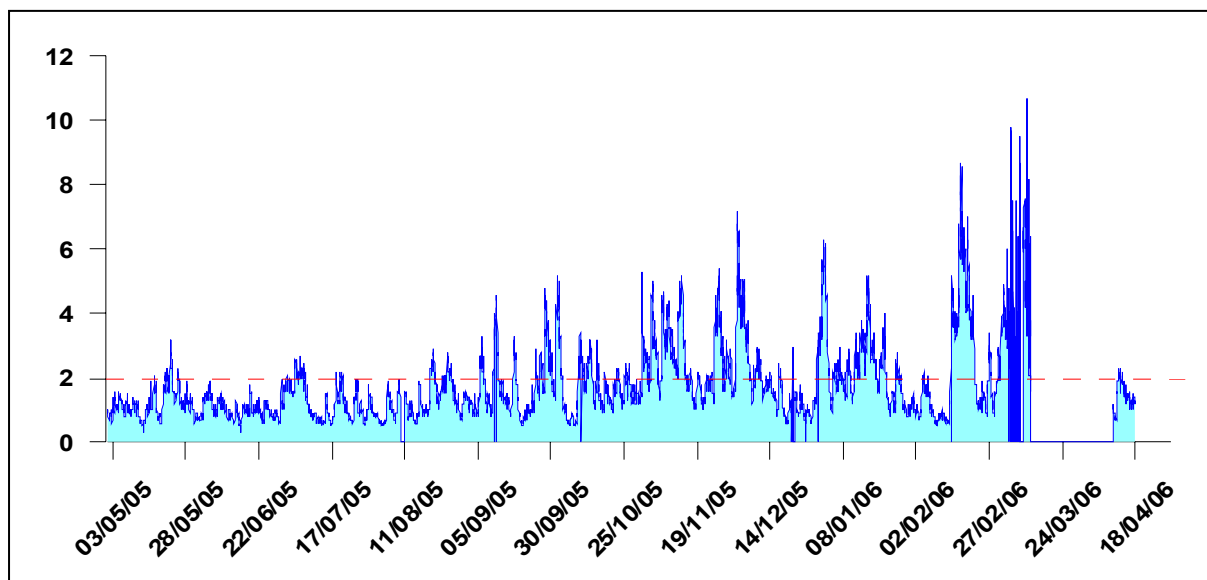


Figura 15. Altura significativa (m) de ola en la boya de Bilbao-Vizcaya (01/05/2005-30/04/2006). Fuente: Puertos del Estado.

A partir del análisis de la altura de ola (Figura 15) se puede afirmar que el régimen de oleaje durante el semestre estival ha sido muy suave, incluso más suave que el que correspondería a un régimen medio de verano, con valores predominantes en torno a 1 m de altura y algunos eventos que pocas veces llegaron a superar los 2 ó 2,5 m. Durante el semestre invernal, en cambio, el régimen de oleaje presentó valores situados alrededor de los 3 m llegando a alcanzar valores máximos de 11 m durante los temporales que caracterizaron el mes de Febrero 2006. Estas condiciones se corresponden, en general, a las habituales para las estaciones de otoño e invierno aunque este año se ha caracterizado por temporales excepcionalmente significativos.

2.1.2. Naturaleza del material sedimentario arenoso

Siguiendo una malla de muestreo de 200 x 200 m de lado (Figura 16), se recogieron desde la embarcación HAREA durante la pleamar 32 muestras superficiales de sedimento en las zonas inter y submareal (puntos rojos) mediante cuchara Van Veen. En la zona supramareal (puntos verdes) se recogieron manualmente las muestras superficiales.

Estas muestras fueron secadas y un peso de 100 g fue tamizado en seco a través de una torre de tamices con el fin de conocer su distribución granulométrica.

Desde un punto de vista mineralógico, la arena de la desembocadura es de naturaleza mixta, con un contenido en granos de cuarzo que varía entre 55-90% del total. El resto está compuesto mayoritariamente por bioclastos de naturaleza carbonatada (calcita y aragonito) y, de forma minoritaria, se ha observado mediante difracción de R-X la presencia de granos de dolomita, hematites y filosilicatos (Figura 16).

La fracción carbonatada está constituida exclusivamente por bioclastos de naturaleza orgánica, principalmente fragmentos de moluscos, espículas de equínidos y caparazones de foraminíferos bentónicos.

Para realizar el cálculo de los parámetros estadísticos relativos a la distribución granulométrica del sedimento se utilizó el software *Gradistat* desarrollado por Blott y Pye (2001).

El sedimento se encuentra moderadamente bien clasificado (*sorting*: 0,50-0,75) (Figura 17). En cuanto a su tamaño de grano, la fracción dominante está constituida por arena de grano medio-grueso (0,5-1,5 phi) en el canal de desembocadura y arena de grano medio (1,5-2 phi) en la zona intermareal. En dirección Sureste se observa una variación en la granulometría, aumentando la media de ésta a medida que nos acercamos al litoral.

A lo largo de la bocana el tamaño de grano es homogéneo longitudinalmente, mientras que en sentido transversal disminuye desde el margen rocoso hacia el Este. Estas variaciones en el tamaño de grano indican diferentes niveles de energía, existiendo una relación directa entre ambos parámetros.

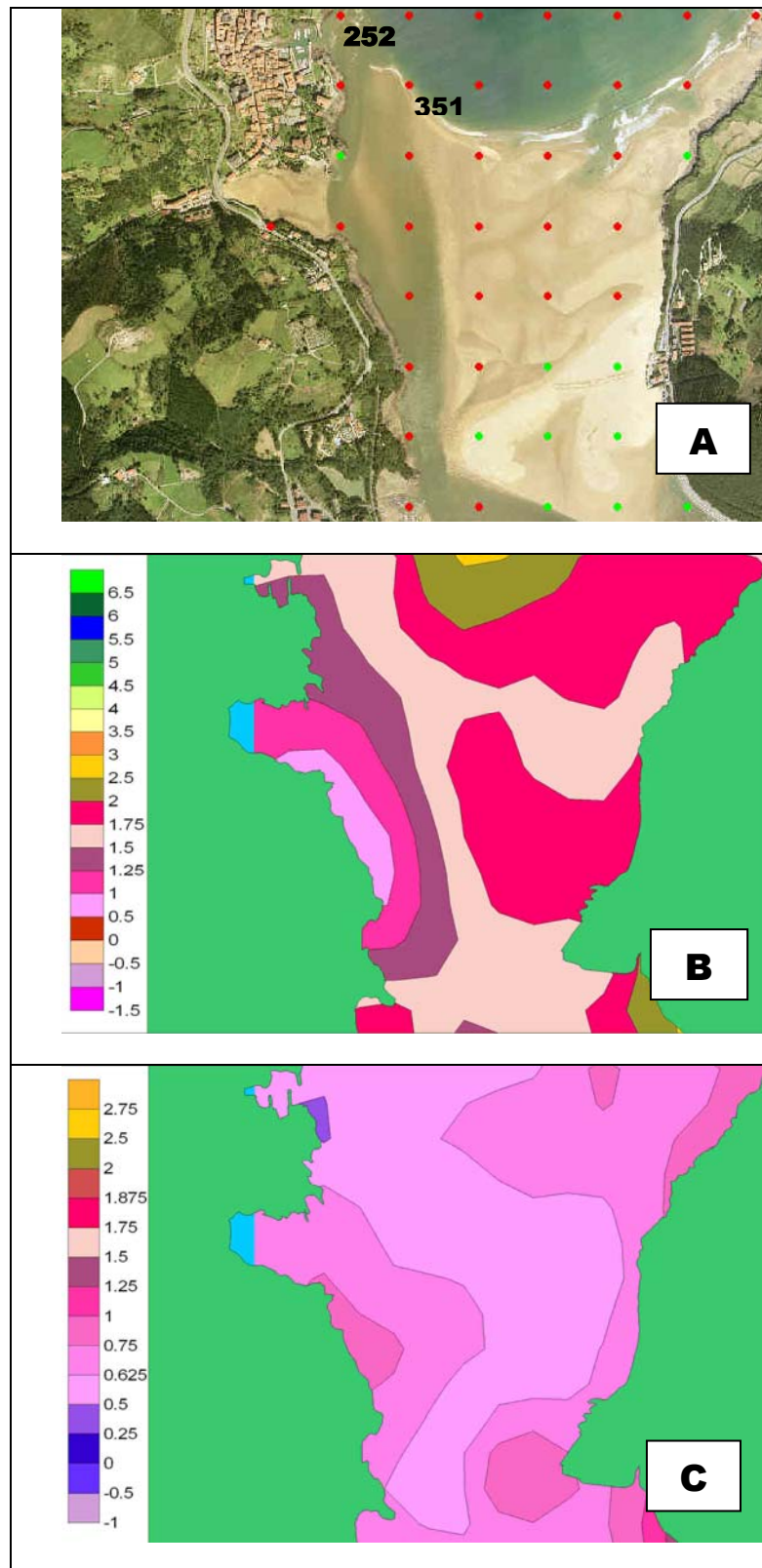


Figura 16. Malla de muestreo (A), cartografía de la media granulométrica (B) y cartografía del sorting granulométrico (C) en escala phi.

SAMPLE STATISTICS

SAMPLE IDENTITY: **252**

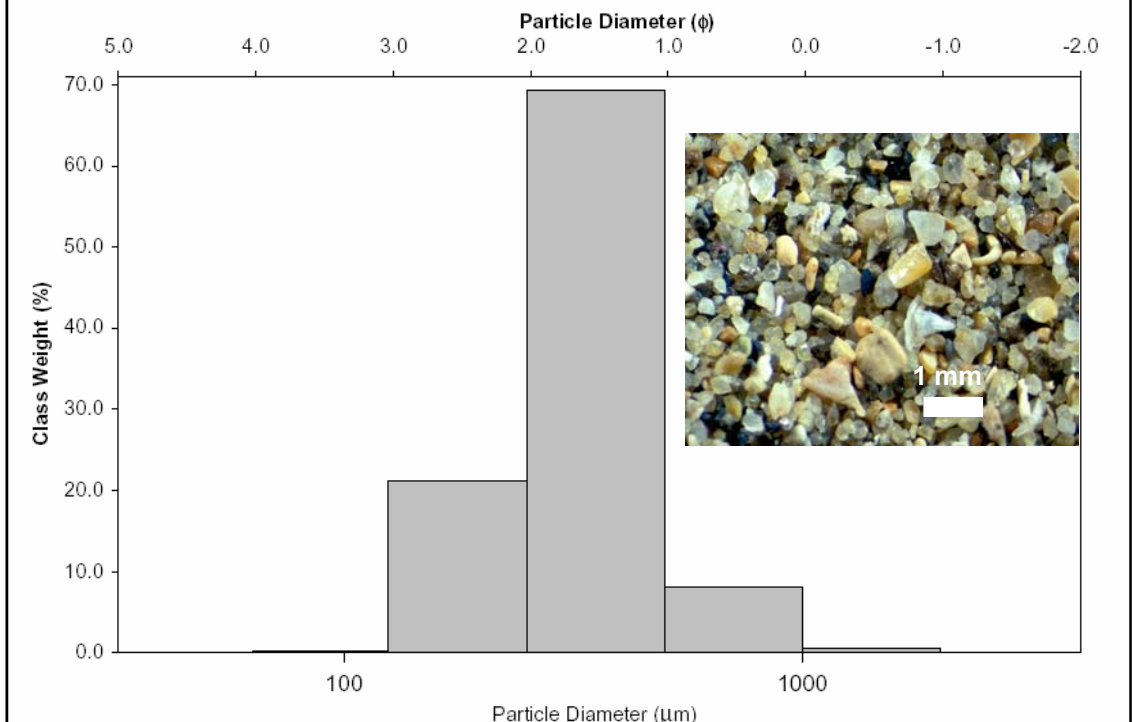
ANALYST & DATE: ,

SAMPLE TYPE: Unimodal, Moderately Well Sorted TEXTURAL GROUP: Sand

SEDIMENT NAME: Moderately Well Sorted Medium Sand

| | μm ϕ | | GRAIN SIZE DISTRIBUTION | | | |
|---------------------------------------|----------------------|---------------|-------------------------|---------------------|-------------------|------------------------|
| | MODE 1: | 375.0 | 1.500 | GRAVEL: 0.0% | COARSE SAND: 8.2% | |
| MODE 2: | | | SAND: 100.0% | MEDIUM SAND: 69.9% | | |
| MODE 3: | | | MUD: 0.0% | FINE SAND: 21.4% | | |
| D ₁₀ : | 172.1 | 1.020 | | V FINE SAND: 0.2% | | |
| MEDIAN or D ₅₀ : | 331.7 | 1.592 | V COARSE GRAVEL: 0.0% | V COARSE SILT: 0.0% | | |
| D ₉₀ : | 493.1 | 2.539 | COARSE GRAVEL: 0.0% | COARSE SILT: 0.0% | | |
| (D ₉₀ / D ₁₀): | 2.865 | 2.489 | MEDIUM GRAVEL: 0.0% | MEDIUM SILT: 0.0% | | |
| (D ₉₀ - D ₁₀): | 321.0 | 1.519 | FINE GRAVEL: 0.0% | FINE SILT: 0.0% | | |
| (D ₇₅ / D ₂₅): | 1.642 | 1.579 | V FINE GRAVEL: 0.0% | V FINE SILT: 0.0% | | |
| (D ₇₅ - D ₂₅): | 166.2 | 0.715 | V COARSE SAND: 0.4% | CLAY: 0.0% | | |
| | METHOD OF MOMENTS | | FOLK & WARD METHOD | | | |
| | Arithmetic | Geometric | Logarithmic | Geometric | Logarithmic | Description |
| | μm | μm | ϕ | μm | ϕ | |
| MEAN (\bar{x}): | 369.9 | 323.9 | 1.626 | 318.2 | 1.652 | Medium Sand |
| SORTING (σ): | 156.0 | 1.464 | 0.549 | 1.540 | 0.623 | Moderately Well Sorted |
| SKEWNESS (S_k): | 2.399 | 0.035 | -0.035 | -0.111 | 0.111 | Fine Skewed |
| KURTOSIS (K): | 14.63 | 3.935 | 3.935 | 1.268 | 1.268 | Leptokurtic |

GRAIN SIZE DISTRIBUTION



| SAMPLE STATISTICS | | | | | | |
|---|-------------------|---------------|-------------------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| SAMPLE IDENTITY: 351 | | | ANALYST & DATE: , | | | |
| SAMPLE TYPE: Unimodal, Moderately Well Sorted | | | TEXTURAL GROUP: Sand | | | |
| SEDIMENT NAME: Moderately Well Sorted Fine Sand | | | | | | |
| | μm | ϕ | GRAIN SIZE DISTRIBUTION | | | |
| MODE 1: | 187.5 | 2.500 | GRAVEL: 0.0% | | COARSE SAND: 2.5% | |
| MODE 2: | | | SAND: 99.9% | | MEDIUM SAND: 40.0% | |
| MODE 3: | | | MUD: 0.1% | | FINE SAND: 54.8% | |
| D ₁₀ : | 138.8 | 1.164 | | | V FINE SAND: 1.6% | |
| MEDIAN or D ₅₀ : | 230.2 | 2.119 | V COARSE GRAVEL: 0.0% | | V COARSE SILT: 0.1% | |
| D ₉₀ : | 446.3 | 2.849 | COARSE GRAVEL: 0.0% | | COARSE SILT: 0.0% | |
| (D ₉₀ / D ₁₀): | 3.216 | 2.448 | MEDIUM GRAVEL: 0.0% | | MEDIUM SILT: 0.0% | |
| (D ₉₀ - D ₁₀): | 307.5 | 1.685 | FINE GRAVEL: 0.0% | | FINE SILT: 0.0% | |
| (D ₇₅ / D ₂₅): | 2.052 | 1.674 | V FINE GRAVEL: 0.0% | | V FINE SILT: 0.0% | |
| (D ₇₅ - D ₂₅): | 176.4 | 1.037 | V COARSE SAND: 0.9% | | CLAY: 0.0% | |
| | METHOD OF MOMENTS | | | FOLK & WARD METHOD | | |
| | Arithmetic | Geometric | Logarithmic | Geometric | Logarithmic | Description |
| | μm | μm | ϕ | μm | ϕ | |
| MEAN (\bar{x}): | 286.9 | 243.2 | 2.040 | 240.2 | 2.058 | Fine Sand |
| SORTING (σ): | 166.4 | 1.541 | 0.624 | 1.563 | 0.645 | Moderately Well Sorted |
| SKEWNESS (Sk): | 3.900 | 0.777 | -0.777 | 0.133 | -0.133 | Coarse Skewed |
| KURTOSIS (K): | 26.71 | 4.375 | 4.375 | 0.752 | 0.752 | Platykurtic |

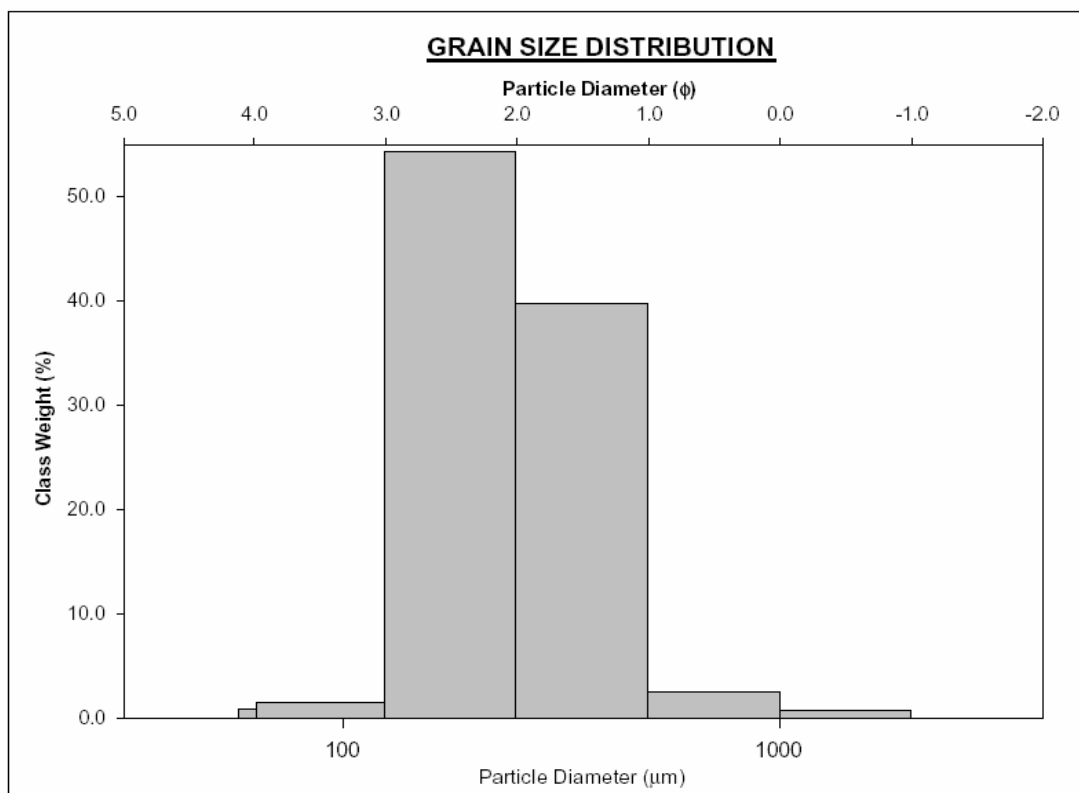


Figura 17. Ejemplos de caracterización granulométrica de la arena y aspecto de la arena del fondo bajo la lupa binocular. La localización de las muestras 252 y 351 se encuentra en la Figura 15 (A).

2.2. Evolución morfológica

2.2.1. Batimetría y Topografía

Utilizando las embarcaciones HAREA y UKABI, dotadas de un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) y GPS diferencial (Figura 18), se realizaron once batimetrías con periodicidad mensual en la zona exterior del estuario. A lo largo del recorrido, el ADCP va tomando una medida de la profundidad del agua cada 2,35 s y el GPS permite georeferenciar cada uno de los puntos de información obtenidos. En cada batimetría mensual se procesaron más de 4.000 puntos (Figura 19).



Figura 18. Embarcaciones UKABI y HAREA con su equipamiento.

La información relativa a la altura de la columna de agua fue corregida con relación al nivel de marea proporcionado por el mareógrafo que la Dirección de Puertos del Estado tiene instalado en el Puerto exterior de Bilbao, cercano a la zona de estudio. De este modo, la profundidad del fondo marino obtenida se encuentra relacionada con la cota cero de Bilbao que actúa de referencia.

Debido a que el GPS se referencia mediante radiofaro (WGS84), se realizó la conversión de coordenadas a ED50, de manera que los planos realizados sean compatibles con la cartografía europea.

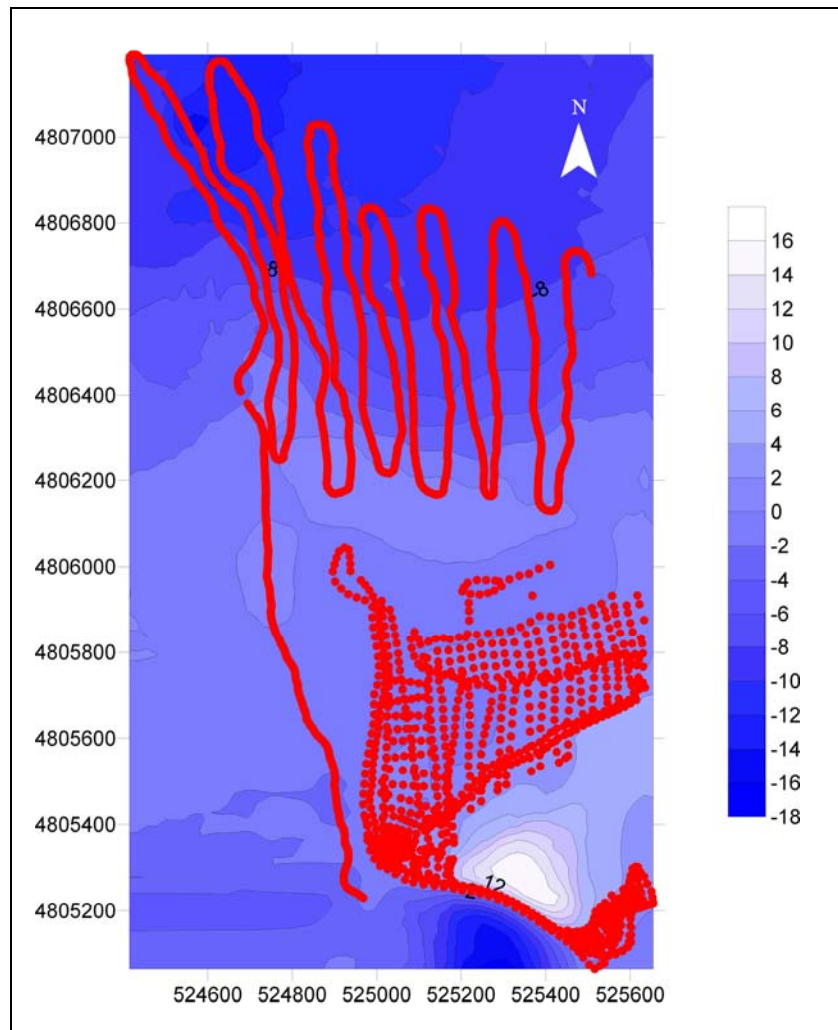


Figura 19. Nube de puntos tipo para cada campaña batimétrica y topográfica.

Utilizando software especializado, se realizaron planos relativos a cada batimetría mediante la técnica de *kriging*. Adicionalmente, durante los meses de Mayo, Julio, Septiembre, Octubre y Diciembre 2005, Febrero y Abril 2006 se llevaron a cabo mediciones topográficas de la zona intermareal de la playa de Laida con una estación total Leyca que permitieron complementar la información batimétrica (Figura 19).

La Figura 20 muestra la situación de la barra de desembocadura previa a la intervención antrópica de 2003 en condiciones invernales (Diciembre 2002) que va a ser comparada con la morfología que ha ido adoptando durante el periodo de estudio. En la situación

previa la barra muestra una morfología cóncava basculada hacia el Norte en su margen Oeste, situando su zona distal frente al puerto de Mundaka. Ese desarrollo facilita la rotura del oleaje a lo largo de la misma durante aproximadamente unos 400 m posibilitando las características óptimas de la "ola de Mundaka".

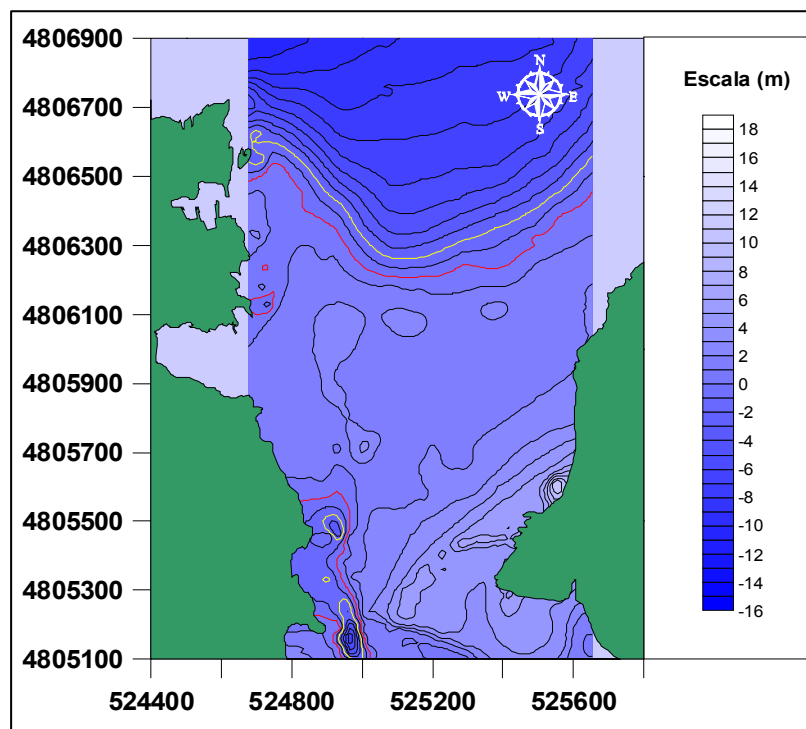
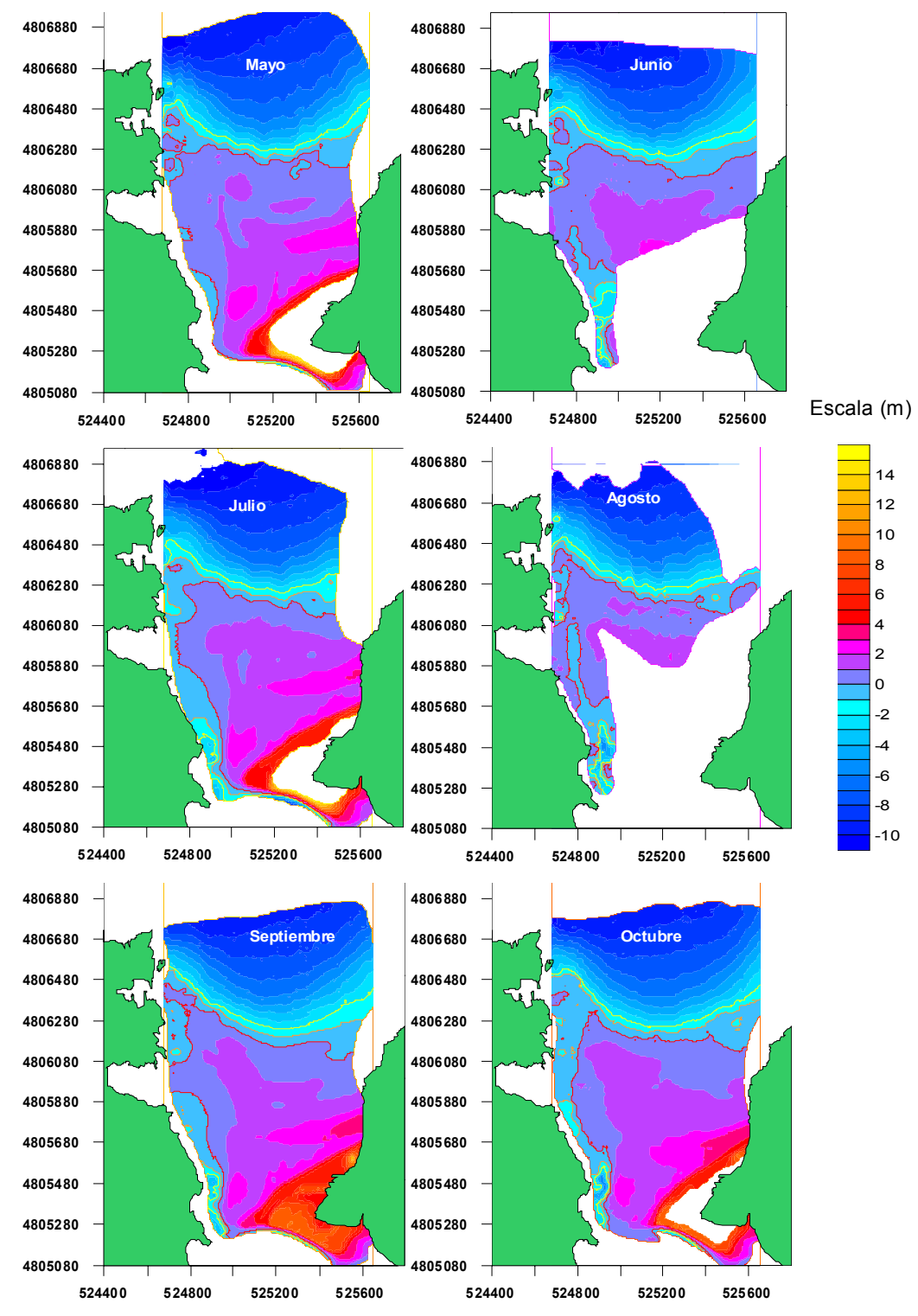


Figura 20. Batimetría previa de la desembocadura del estuario que muestra las condiciones en Diciembre 2002. La línea roja indica la cota 0 y la amarilla la batimétrica 2 del puerto de Bilbao.

Durante las condiciones estivales (Figura 21), en la zona intermareal frente a la playa de Laida se observa un paulatino desplazamiento hacia el Suroeste ($N220^{\circ}E$) de distintas barras arenosas que transportan sedimento desde la zona Este de la bahía hacia la playa y la bocana. De este modo se obtiene un perfil de playa típico de la estación estival caracterizado por valles y crestas (*ridge* y *runnell*) en la zona intermareal y un escalón en el límite entre las zonas inter y supramareales de la playa propiciado por la rotura del oleaje en las citadas crestas.

El nuevo canal generado a partir del tapón arenoso en el canal habitual de desembocadura, mostrado en la fotografía aérea de la Figura 4, desaparece entre los meses de Julio y Agosto gracias al desplazamiento de las barras arenosas descrito anteriormente y al transporte de agua y sedimento inducido por la vaciante de la marea. Estos procesos fortalecen el desarrollo de la barra de Mundaka y desplazan el canal de

desagüe hacia su posición habitual en el margen rocoso Oeste. Por último, destaca la continua erosión del margen Sur de la playa de Laida y el aporte de arena que este proceso genera en la desembocadura (ver discusión específica en el apartado 2.2.3).



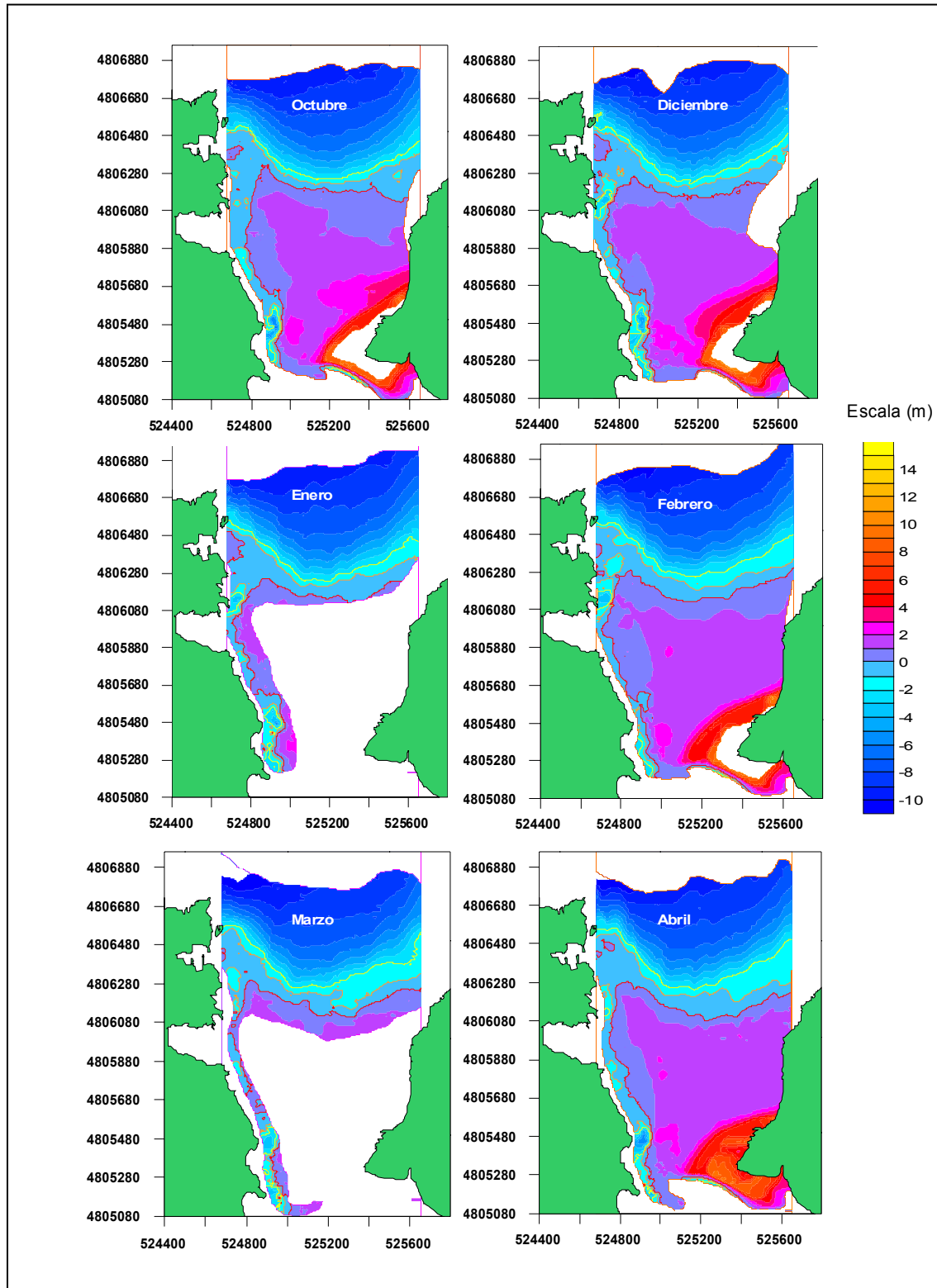


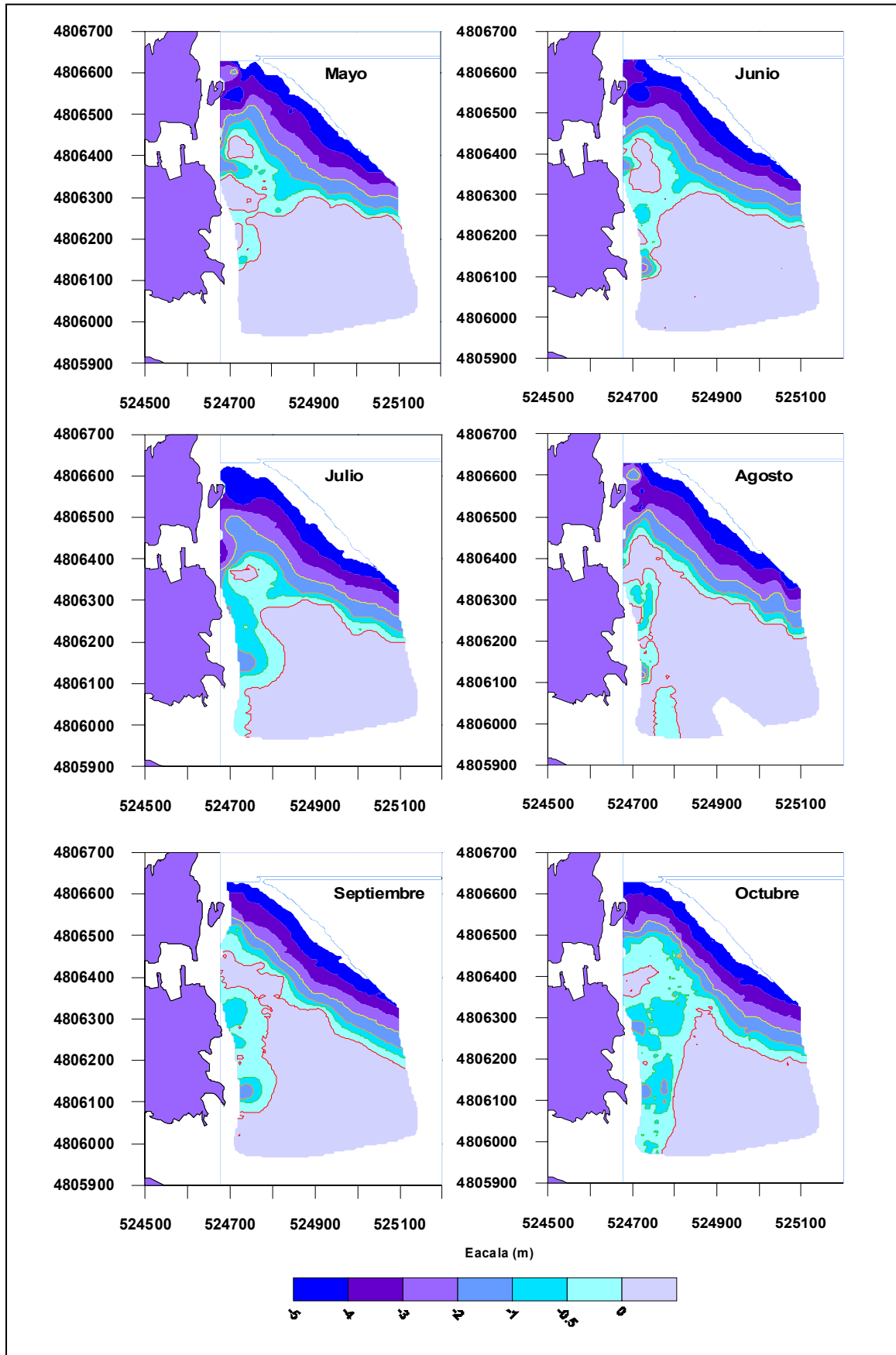
Figura 21. Batimetrías mensuales de la desembocadura del estuario. Los meses de Mayo, Julio, Septiembre, Octubre y Diciembre de 2005, Febrero y Abril 2006 incluyen la información topográfica de las zonas intermareales. La línea roja indica la cota 0, la naranja la batimétrica 1 y la amarilla la batimétrica 2 del puerto de Bilbao.

A partir del mes de Octubre hasta Abril (condiciones invernales), las barras formadas en la zona intermareal de la playa de Laida durante el verano se van dismantelando desplazándose hacia el canal de desembocadura donde una parte del sedimento se introduce dentro del estuario y el resto es transportado hacia la zona proximal de la barra, generándose así una zona intermareal amplia con fondos planos (Figura 21). Además, se hacen más pronunciadas las pendientes entre las zonas sub-intermareal e inter/supramareal (berma) dando lugar a rupturas de pendiente típicas del perfil de invierno. Durante este periodo la erosión de la berma ha sido especialmente activa mostrando un mayor desarrollo lateral hacia el Oeste (Figura 22).



Figura 22. Vista general de la erosión producida en el límite inter/supramareal (berma) de las zonas Noreste (A) y Oeste (B) de la playa de Laida

En la zona de la barra, durante los meses estivales de estudio, se observa su evolución morfológica a partir de una situación en la que se encuentra retrasada con respecto a su posición habitual y con una línea batimétrica 0 (línea de rotura de oleaje, línea roja en la Figura 23) fragmentada. Además, frente a la playa de Laidatxu se observa una acumulación excepcional de arena dentro del canal de desembocadura que actúa como un tapón e impide la salida del agua estuarina en las condiciones habituales, es decir, adyacente al margen rocoso Oeste. Con el paso del tiempo esta disposición morfológica se va modificando hasta alcanzar en el mes de Agosto una configuración similar a la previa que va mejorando en Septiembre con la profundización del canal de desagüe y una importante acumulación de arena hacia el Noroeste en la posición habitual de la barra.



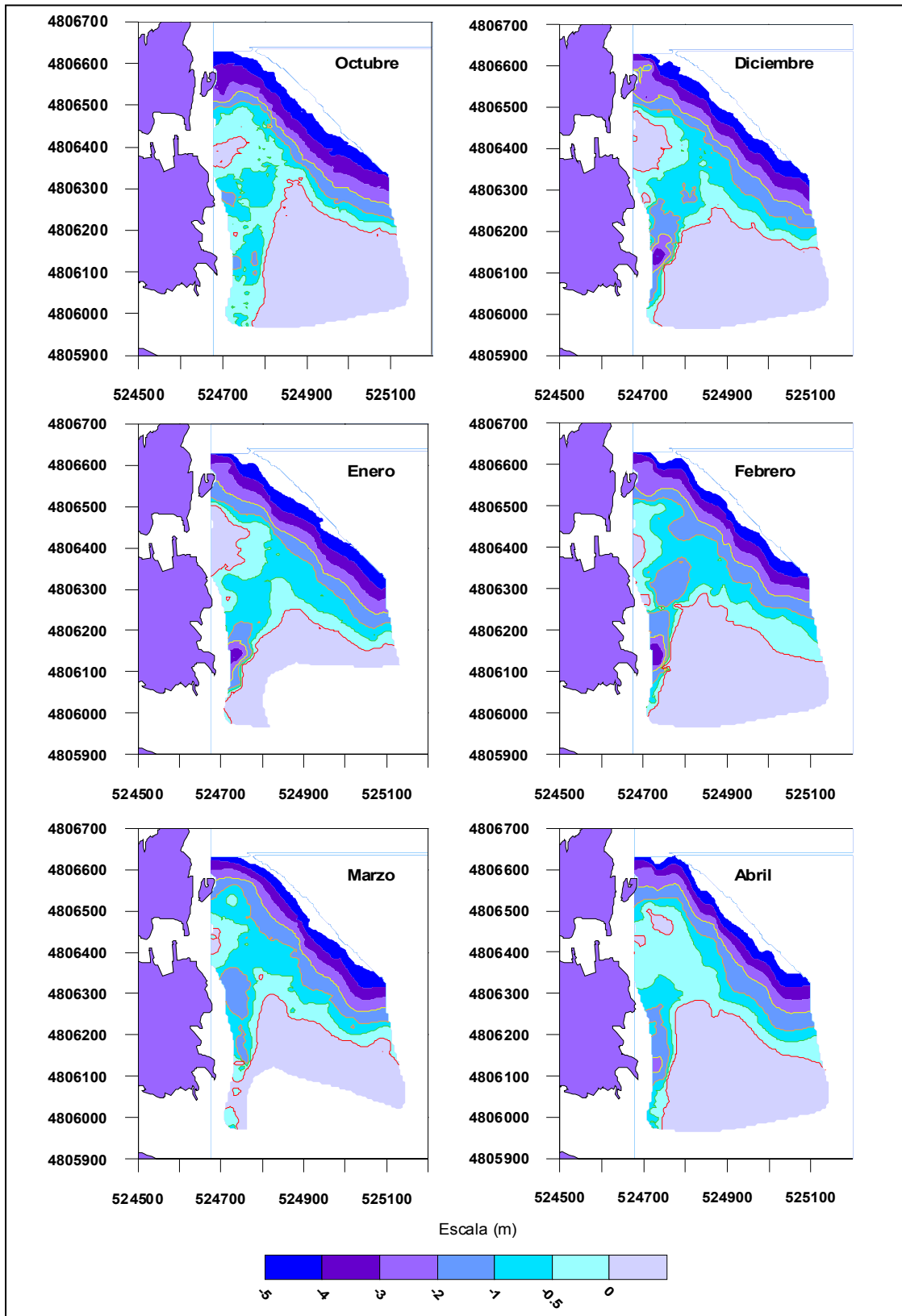


Figura 23. Detalle de las batimetrías mensuales en la barra de Mundaka. La línea roja indica la cota 0, la naranja la batimétrica 1 y la amarilla la batimétrica 2 del puerto de Bilbao.

Paralelamente a este proceso, en el conjunto evolutivo de mapas batimétricos se observa en la barra un acercamiento de las líneas batimétricas entre sí que da lugar en las condiciones finales del estudio a una barra arenosa más uniforme y con mayor pendiente, que ha adquirido unas condiciones muy similares a las habituales aunque ligeramente retrasada todavía (30 m aproximadamente hacia el Sur) con respecto a la situación idónea.

A partir de la época estival la orientación del margen Este de la barra muestra un basculamiento disponiéndose más alineada en la dirección Norte-Sur y, por lo tanto, más oblicua a la dirección de propagación del oleaje.

El sedimento que está alimentando la zona proximal de la barra da lugar a una disminución en la sección del canal de desembocadura, aumentando así la velocidad de desagüe de la corriente vaciante. En consecuencia, se produce una ligera migración lateral del canal y una paulatina profundización entre las zonas distal y proximal de la barra desde Octubre hasta el mes de Marzo. A partir de Abril aumenta la sección del canal de desagüe desplazándose el canal hacia el Oeste y colmatándose la depresión anteriormente creada (Figura 23).

2.2.2. Fotografía aérea oblicua

Con el objetivo de conocer las variaciones morfológicas y la tendencia evolutiva de las macroestructuras sedimentarias en la zona de desembocadura a lo largo del período de estudio, se han realizado 12 fotografías aéreas mensuales desde una avioneta a una altura aproximada de 6.500 m y con un ángulo de 45° (Figura 24).

En esta secuencia de imágenes se observa cualitativamente el desplazamiento hacia el Suroeste de las barras arenosas, la desaparición del nuevo canal de desembocadura, el fortalecimiento de la barra arenosa, la desaparición del tapón arenoso frente a Laidatxu y la migración lateral hacia el margen rocoso del canal de desagüe de este estuario, procesos ya descritos en el apartado anterior para las condiciones estivales.

Del mismo modo, durante la fase invernal se puede observar la erosión de los márgenes de la playa de Laida, el desmantelamiento de las barras arenosas y la creación de lechos planos en la zona intermareal norte, el estrechamiento del canal de desembocadura y la migración del mismo hacia el Este.





Figura 24. Evolución mensual de la desembocadura del estuario a través de fotografías aéreas oblicuas (Mayo 2005-Abril 2006).

2.2.3. Evolución temporal del margen Sur de la playa de Laida

El análisis de la evolución temporal del margen Sur de la playa de Laida ha sido distribuido en cuatro etapas principales que incluyen, en primer lugar, la fase inicial del proyecto de regeneración dunar (Diciembre 2001-Marzo 2003); en segundo lugar, el periodo posterior al vertido arenoso procedente del último dragado del canal principal del estuario (Junio-2003-Mayo 2005); a continuación, el periodo estival de estudio de este trabajo (Mayo-Octubre 2005); y, por último, la etapa invernal de estudio de este trabajo (Octubre 2005-Abril 2006). Comparando las mediciones topográficas obtenidas durante el inicio y el final de cada uno de estos intervalos se ha obtenido la diferencia en el volumen de sedimento desde la base del talud sur hasta su coronación a lo largo del tiempo. En todas estas etapas se ha observado una actividad erosiva en esta zona aunque de diferente entidad en cada intervalo analizado (Figuras 25 y 26).

Durante la primera etapa, la actividad erosiva se concentraba en el margen Sur y Noroeste de Laida adyacente a la bocana como consecuencia de la migración lateral del margen erosivo del meandro de Arketa (en el Sur) y de las corrientes mareales (en el Noroeste). Esta actividad ha sido cuantificada en un total de 52.500 m³ de arena durante este período de 15 meses, que suponen una media de 3.500 m³/mes erosionados (Tabla 7).

A partir del último vertido arenoso, el volumen de sedimento erosionado por unidad de tiempo aumentó sustancialmente alcanzando durante el segundo semestre de 2003 (Junio-Diciembre 2003) un valor de 65.500 m³ de arena (11.000 m³/mes). Este incremento en la tasa de erosión en tan corto lapso de tiempo introdujo en el sistema una enorme cantidad de arena que atravesó la bocana y se depositó frente a Laidatxu, taponando el canal de desagüe de la ría y alterando la disposición habitual del canal estuarino de desagüe, y en el delta de reflujos frente a la isla de Txatxarramendi (Figura 1). A partir de entonces, la tasa de erosión descendió significativamente (5.600 m³/mes) (Tabla 7).

Durante la fase estival del estudio esta tendencia erosiva ha continuado con un ligero incremento (7.000 m³/mes), aunque los valores se han ido haciendo progresivamente más bajos (4.700 m³/mes) durante la fase invernal, pero aún sin alcanzar la tasa de erosión mínima registrada con anterioridad al último vertido de 2003. Se ha observado además un desplazamiento de la zona de máxima erosión desde la parte central del margen Sur de Laida hacia el Oeste donde ha confluído con la actividad erosiva producida

en el margen Noroeste por las corrientes mareales mencionada anteriormente (Figuras 25, 26 y 27).

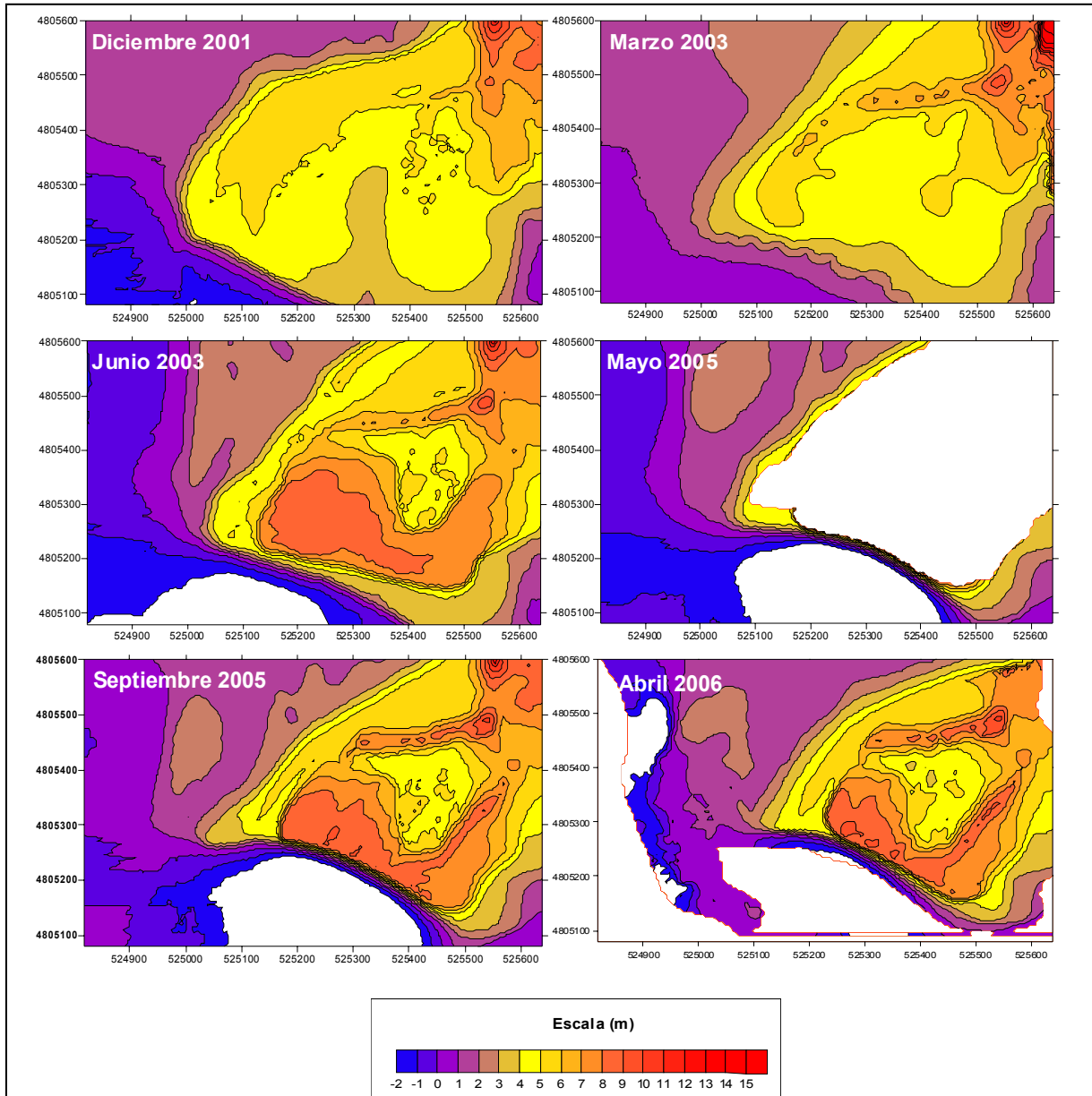


Figura 25. Evolución temporal de la zona Sur de la playa de Laida (Diciembre 2001-Abril 2006).

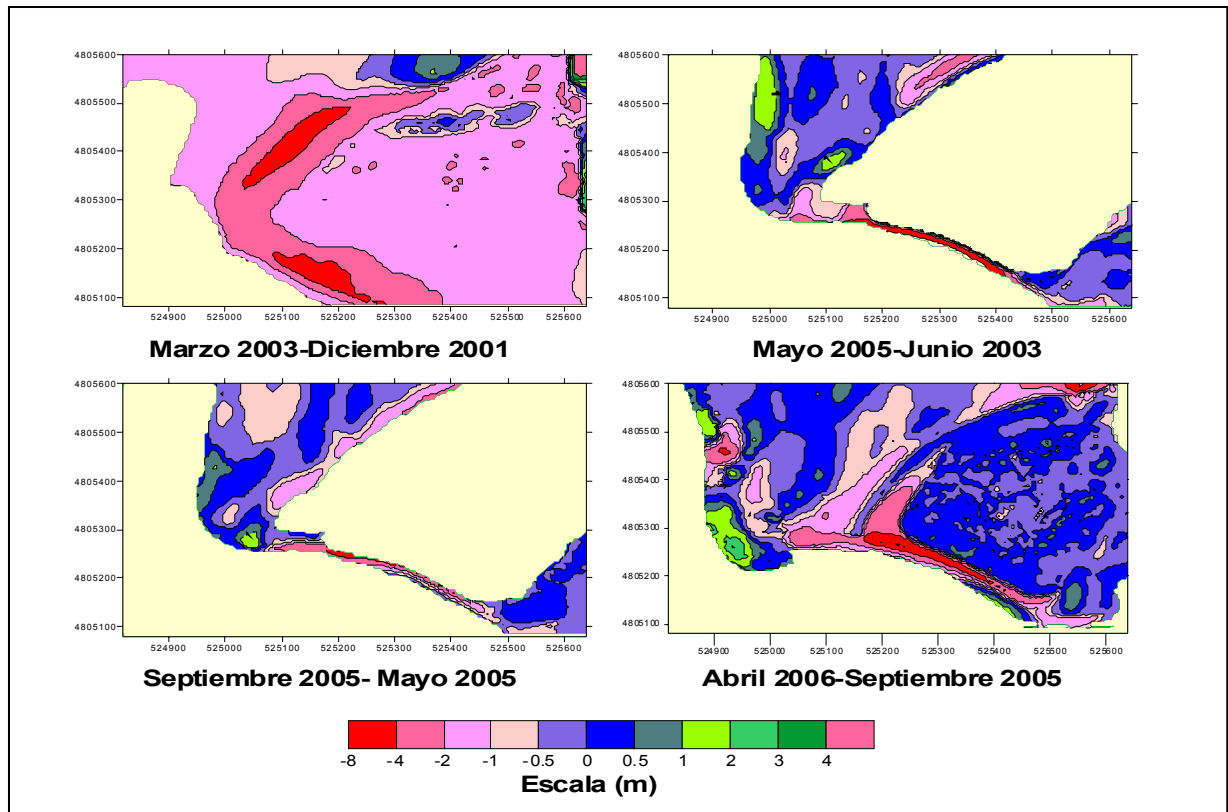


Figura 26. Evolución temporal del balance sedimentario en la zona Sur de Laida (Diciembre 2001-Abril 2006).



Figura 27. Vista aérea de la playa de Laida en Diciembre 2005.

| Tiempo (mes) | Erosión total (m ³) | Erosión media (m ³ /mes) |
|--|---------------------------------|-------------------------------------|
| Diciembre 2001-Marzo 2003 (inicio regeneración dunar) | 52.500 | 3.500 |
| Junio 2003-Diciembre 2003 (post-vertido dragado) | 65.500 | 11.000 |
| Diciembre 2003-Junio 2004 | 33.000 | 5.500 |
| Junio 2004-Marzo 2005 | 51.400 | 5.700 |
| Marzo 2005-Mayo 2005 | 11.000 | 5.500 |
| Mayo-Septiembre 2005 (etapa estival) | 35.700 | 7.000 |
| Septiembre 2005- Abril 2006 (etapa invernal) | 32.800 | 4.700 |

Tabla 7. Volumen de arena erosionado en el margen Sur de Laida (Diciembre 2001-Abril 2006).

2.3. Dinámica sedimentaria

2.3.1. Oleaje y corrientes mareales: bocana exterior

Con el fin de conocer la hidrodinámica de la zona exterior del estuario se realizaron ocho campañas de medidas de corrientes y oleaje en las inmediaciones de la desembocadura mediante la colocación de tres correntímetros Valeport 808 (4 campañas de verano) y tres correntímetros Valeport 730D (4 campañas de invierno) (Figura 28).

Los correntímetros Valeport son unos instrumentos electromagnéticos dotados de sensores de velocidad y dirección de la corriente, conductividad, temperatura y turbidez, además de sensor de alta resolución de presión (Figura 28).

Los aparatos se colocaron sucesivamente en distintas configuraciones intentando abarcar la zona de desembocadura y cubrir las posibles variaciones tanto en el rango mareal (mareas vivas, intermedias y muertas) como en la morfología transversal y longitudinal del entorno.

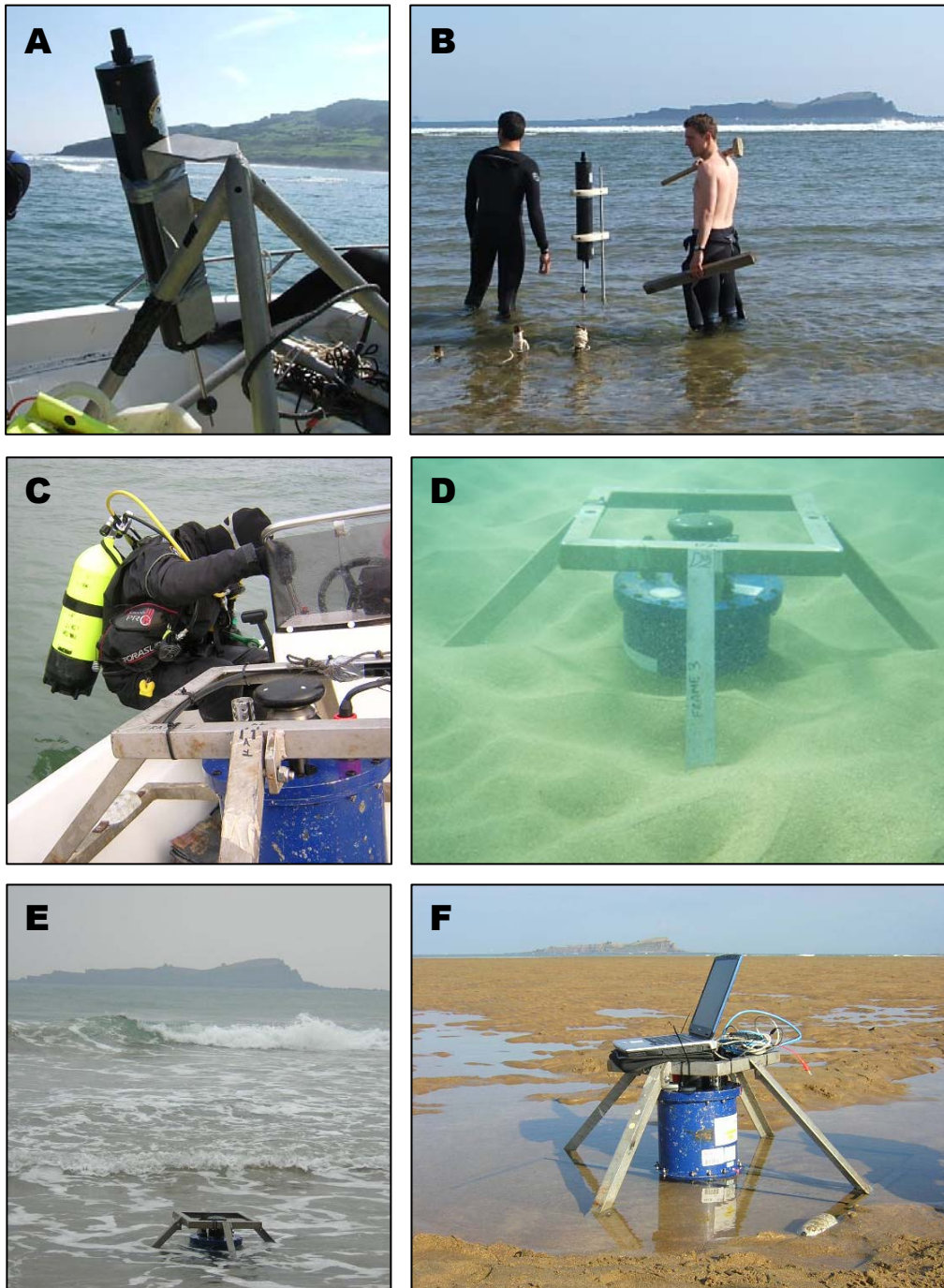


Figura 28. Campaña de correntímetros Valeport. A: Detalle del Valeport 808. B: Valeport 808 en la playa de Laida. C: Colocación del Valeport 730D en el canal de desembocadura. D: Valeport 730D bajo el agua. E: Oleaje incidente sobre el Valeport 730D. D: Descarga de datos del Valeport 730D.

Se realizaron así 4 campañas de medida sucesivas durante los meses de Mayo (condiciones estivales) y Febrero (condiciones invernales) que se describen a continuación:

VERANO

-Campaña I: MAREAS VIVAS. Instalación: 06/05/05 en marea baja. Bajamar: 9:58 h (0.62 m), Pleamar: 16:17 h (3.96 m). Altura del sensor de presión V1, V2 y V3: 50 cm. Muestras de sedimento (MUN I – V*A). Recuperación: V2 y V3 09/05/05 (marea baja). Bajamar: 11:49 h (0.62 m), Pleamar: 05:49 h (4.07 m); V1 10/05/05 (marea baja). Pleamar: 06:25 h (3.93 m), Bajamar: 12:24 h, (0.76 m). Altura del sensor de presión: V1: 50 cm, V2: 42 cm, V3: 47 cm. Muestras de sedimento (MUN I – V*B) (Figura 29).



Figura 29. Localización de los correntímetros Valeport 808 durante las 4 campañas de medida estivales. En color blanco la posición V1, en color rojo la posición V2, y en color verde la posición V3.

-Campaña II: PERFIL DE PLAYA. Instalación: 10/05/05 V2 y V3 en marea baja; V1 después de la marea alta. Bajamar: 12:24 h (0.76 m), Pleamar: 18:37 h (3.96 m). Altura del sensor de presión V1, V2 y V3: 50 cm. Muestras de sedimento (MUN II – V*A). Recuperación: V2 y V3 11/05/05 (marea baja). Bajamar: 12:24 h (0.76 m), Pleamar: 18:37 h (3.96 m). V1 10/05/05 (marea baja). Bajamar: 12:59 h (0.94 m), Pleamar: 07:01 h (3.76 m) (Figura 29).

-Campaña III: LONGITUDINAL PLAYA. Instalación: V1, V2 y V3 11/05/05 en marea baja. Bajamar: 12:59 h (0.94 m), Pleamar: 19:11 h (3.83 m). Altura del sensor de presión V1, V2 y V3: 50 cm. Recuperación: V1, V2 y V3 12/05/05 (marea baja). Bajamar: 13:36 h

(1.50 m), Pleamar: 07:38 h (3.55 m). Altura del sensor de presión: V1: 42,5 cm, V2: 39 cm, V3: 47,5 cm. Muestras de sedimento (MUN III – V1 y V2 A) (Figura 29).

-Campaña IV: MAREAS MUERTAS. Instalación: V1, V2 y V3 13/05/05 en marea baja. Bajamar: 14:16 h (1.37 m), Pleamar: 20:29 h (3.47 m). Altura del sensor de presión V1, V2 y V3: 50 cm. Muestras de sedimento (MUN IV – V*A). Recuperación: 16/05/05 V1 (marea alta), V2 y V3 (marea baja). Pleamar: 11:17 h (2.93 m), Bajamar: 17:14 h (1.80 m). Muestras de sedimento (MUN IV – V*B) (Figura 29).

A continuación se representan los datos de oleaje exterior (boya de Bilbao-Vizcaya) y marea (mareógrafo de Bilbao) correspondientes al periodo en el que se realizaron estas campañas de medidas (Figura 30).

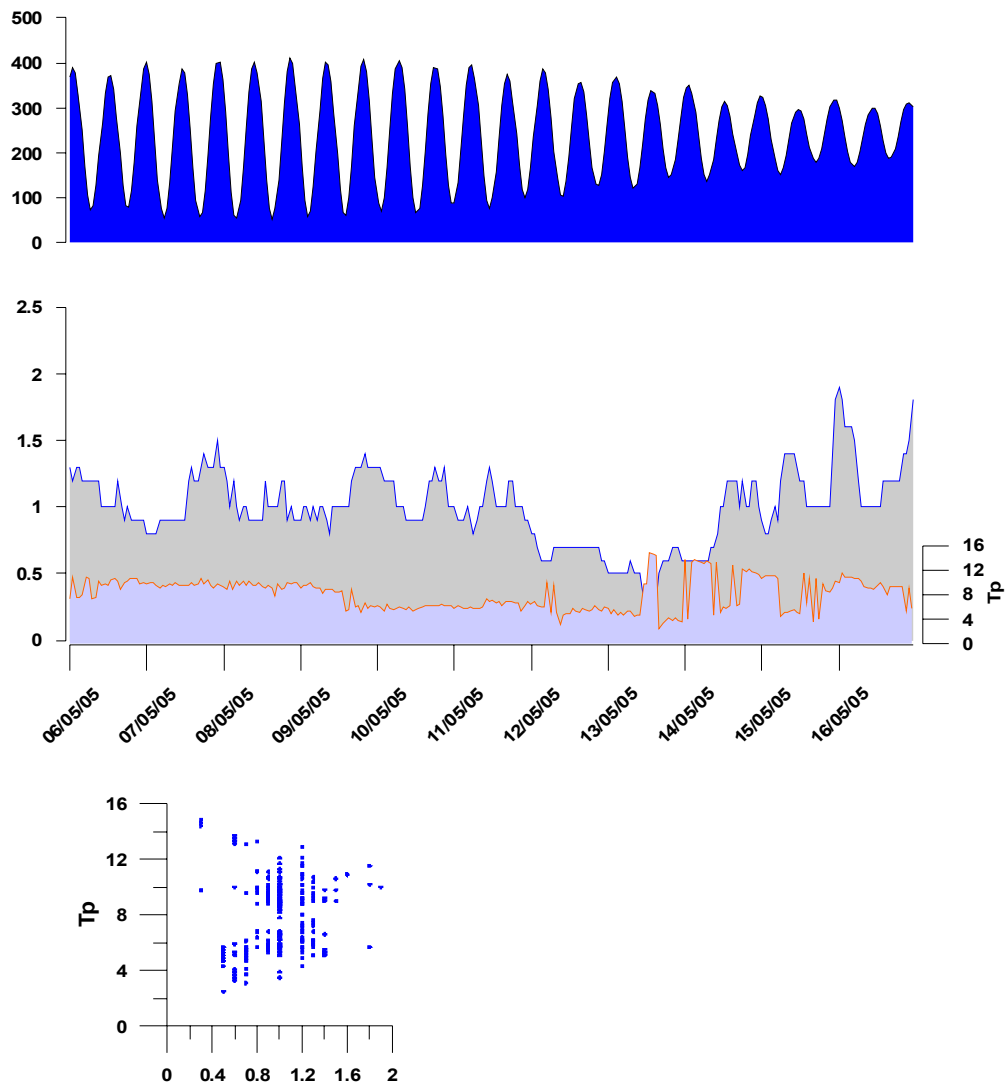


Figura 30. Parámetros de oleaje exterior (periodo y altura significativa) y nivel del mar (respecto al 0 de Bilbao) obtenidos a partir de la boya y mareógrafo de Bilbao durante las campañas estivales.

Asimismo, se muestran detalladamente los datos de oleaje y corrientes obtenidos en las campañas de verano. Además se presenta un gráfico integrado de la velocidad y dirección de la corriente en todos los sensores a lo largo de un ciclo de marea con el fin de ayudar a la comprensión del esquema funcional de la parte exterior de la desembocadura (Figuras 31-42).

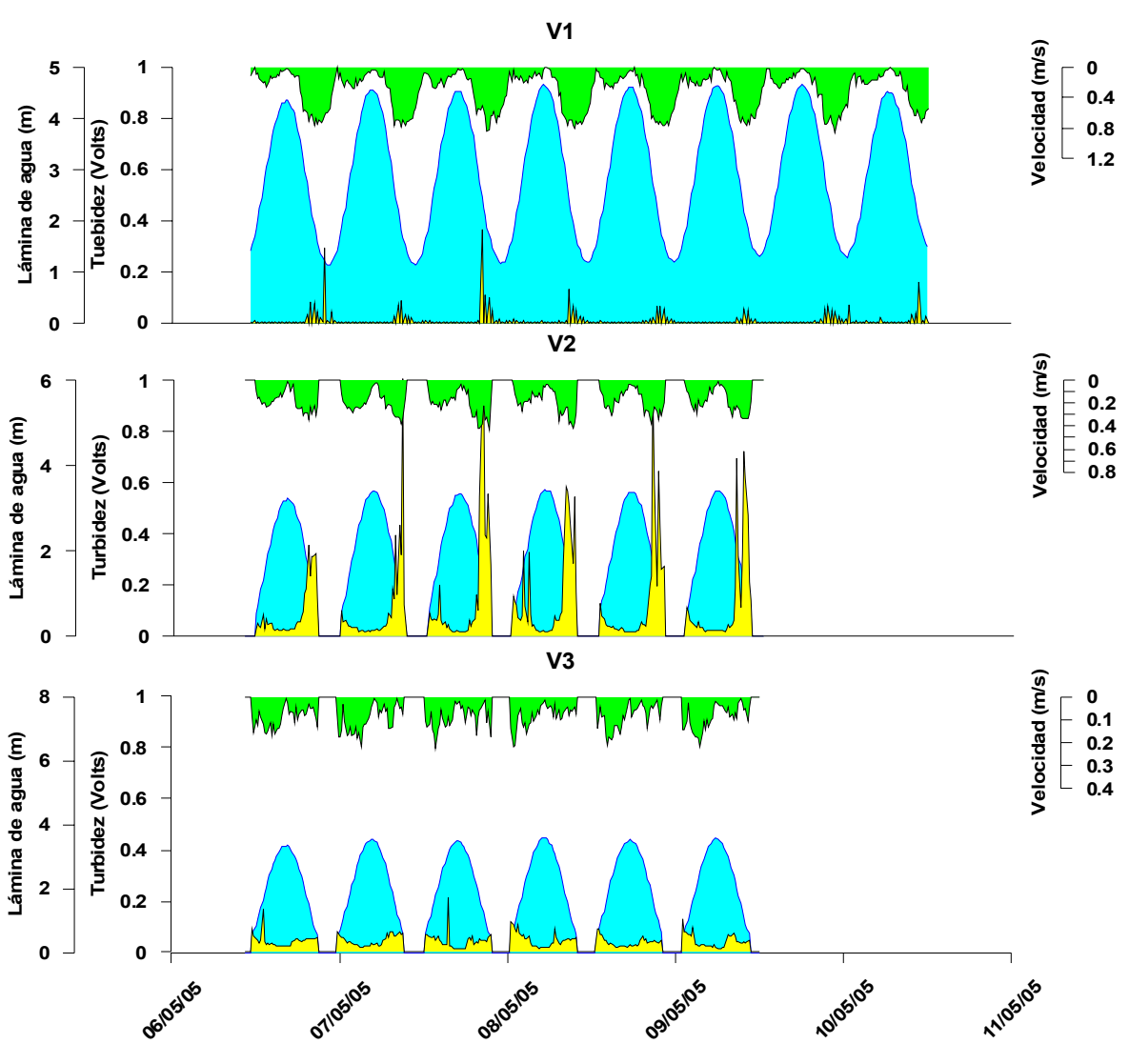


Figura 31. Velocidad de corriente (verde), altura de lámina de agua (azul) y turbidez (amarillo) registradas durante la Campaña I de verano.

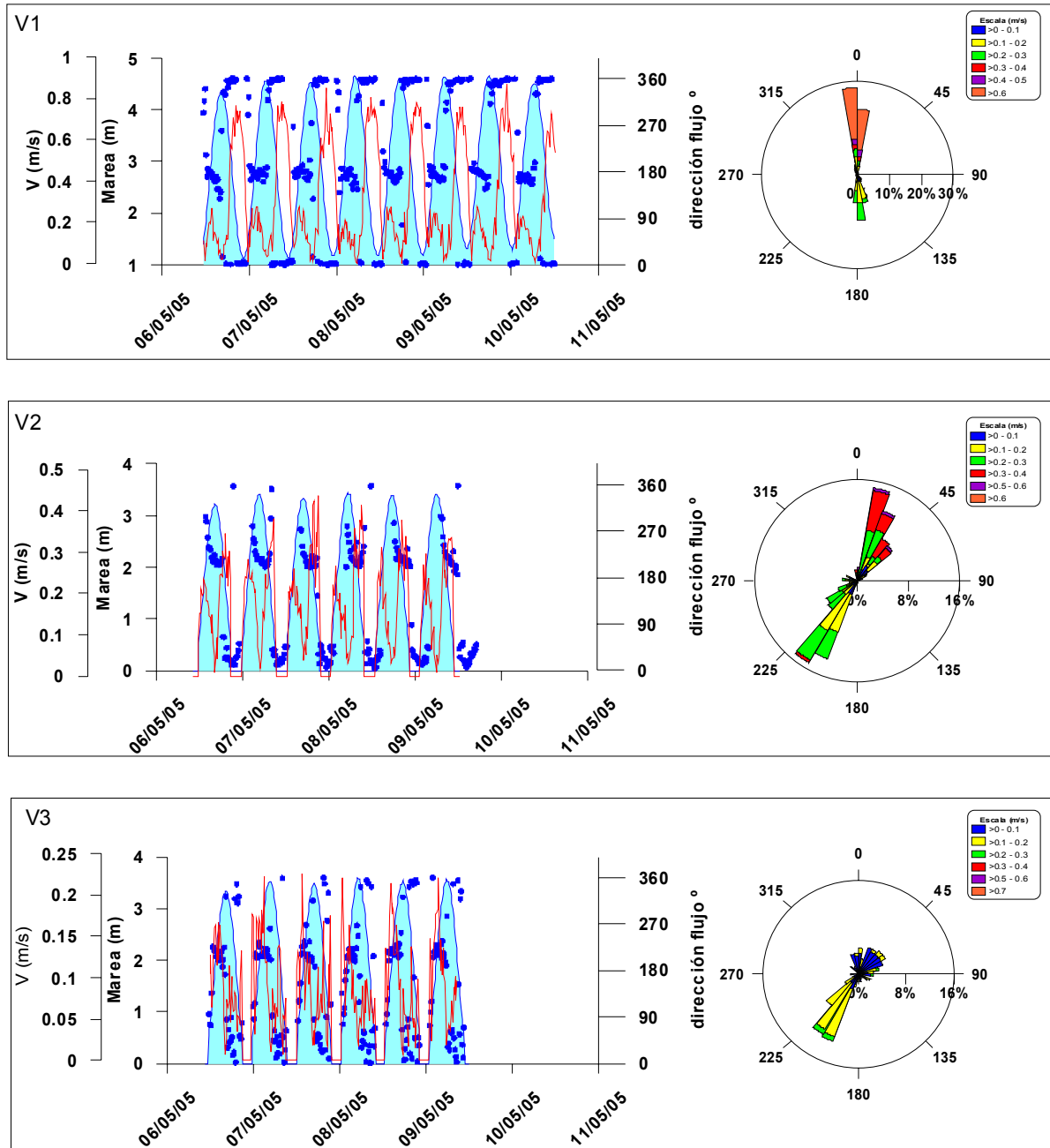


Figura 32. Velocidad y dirección de corriente vs. altura de lámina de agua registradas durante la Campaña I de verano.

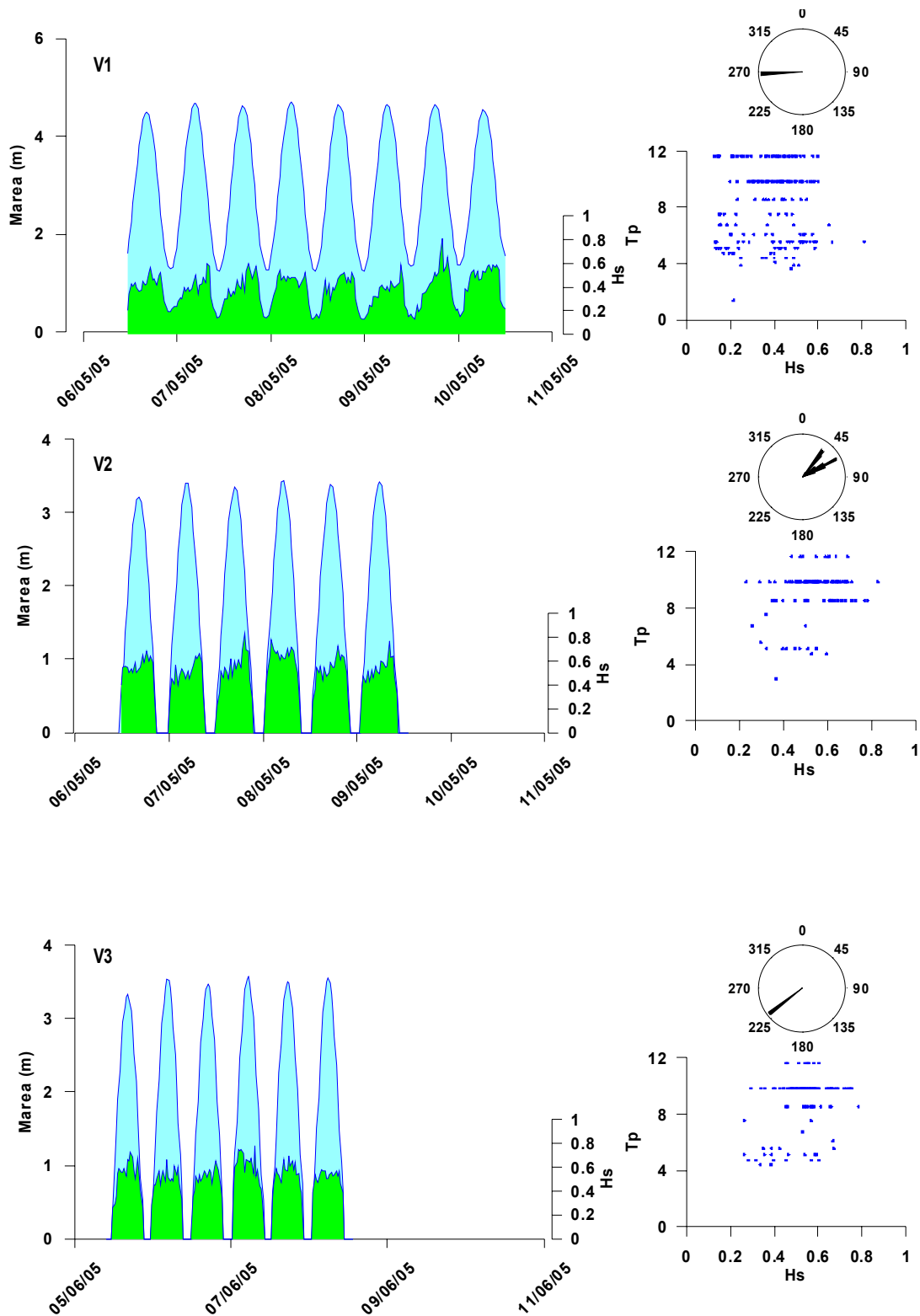


Figura 33. Altura de lámina de agua (azul) vs. altura significativa de ola (verde) y parámetros del oleaje (dirección, periodo vs. altura significativa) registrados durante la Campaña I de verano.

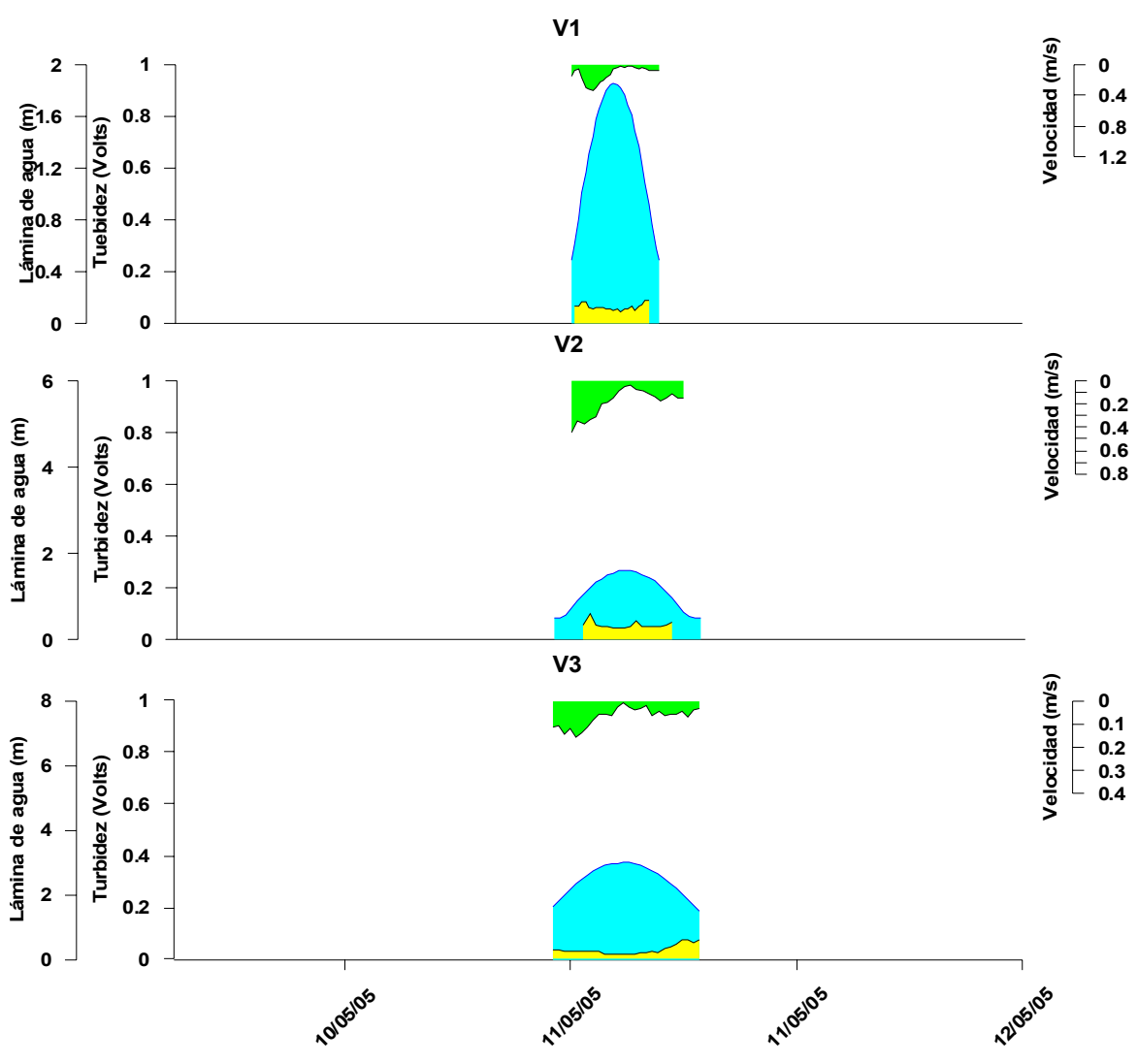


Figura 34. Velocidad de corriente (verde), altura de lámina de agua (azul) y turbidez (amarillo) registradas durante la Campaña II de verano.

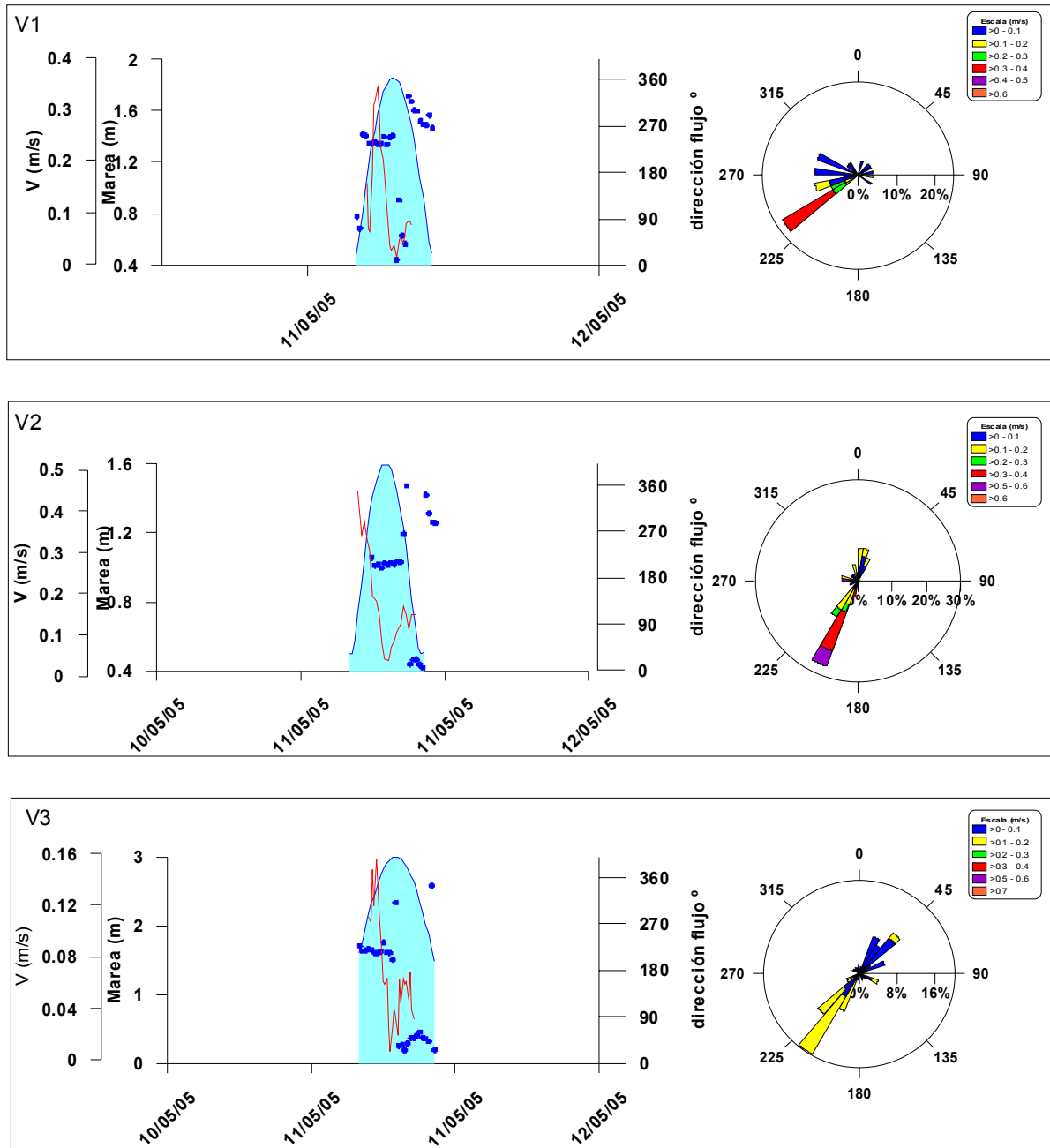


Figura 35. Velocidad y dirección de corriente vs. altura de lámina de agua registradas durante la Campaña II de verano.

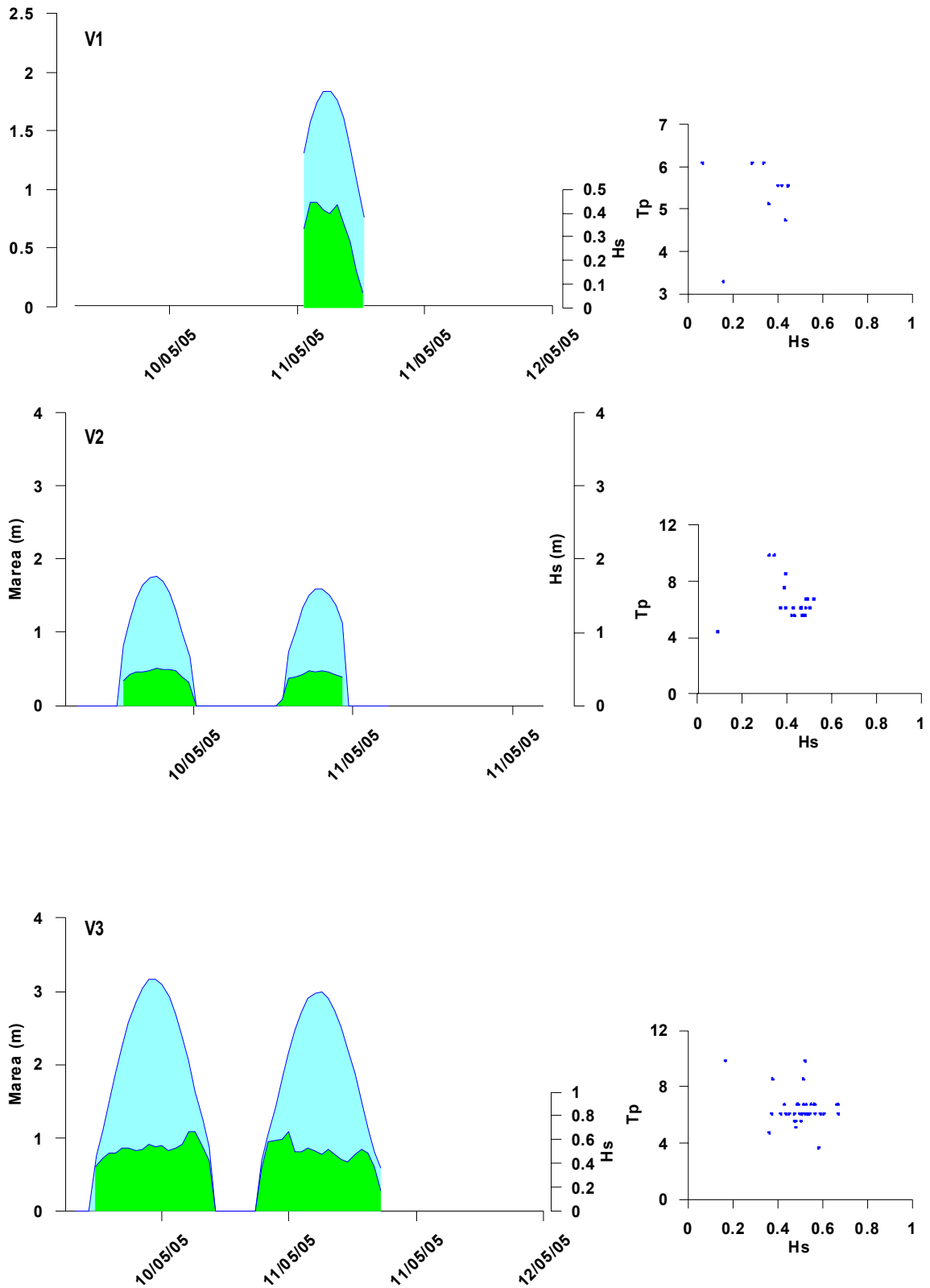


Figura 36. Altura de lámina de agua (azul) vs. altura significativa de ola (verde) y parámetros del oleaje (dirección, periodo vs. altura significativa) registrados durante la Campaña II de verano.

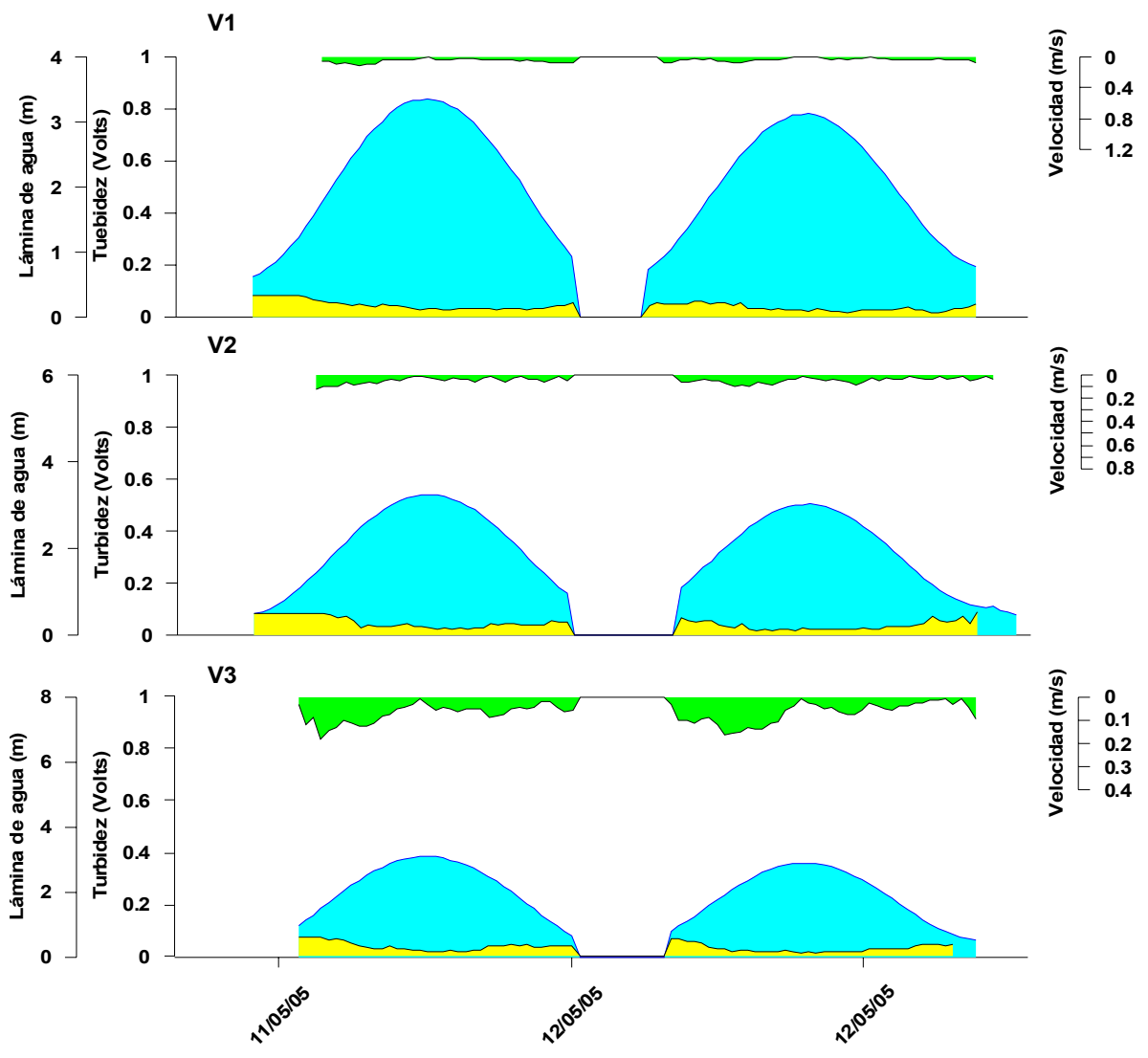


Figura 37. Velocidad de corriente (verde), altura de lámina de agua (azul) y turbidez (amarillo) registradas durante la Campaña III de verano.

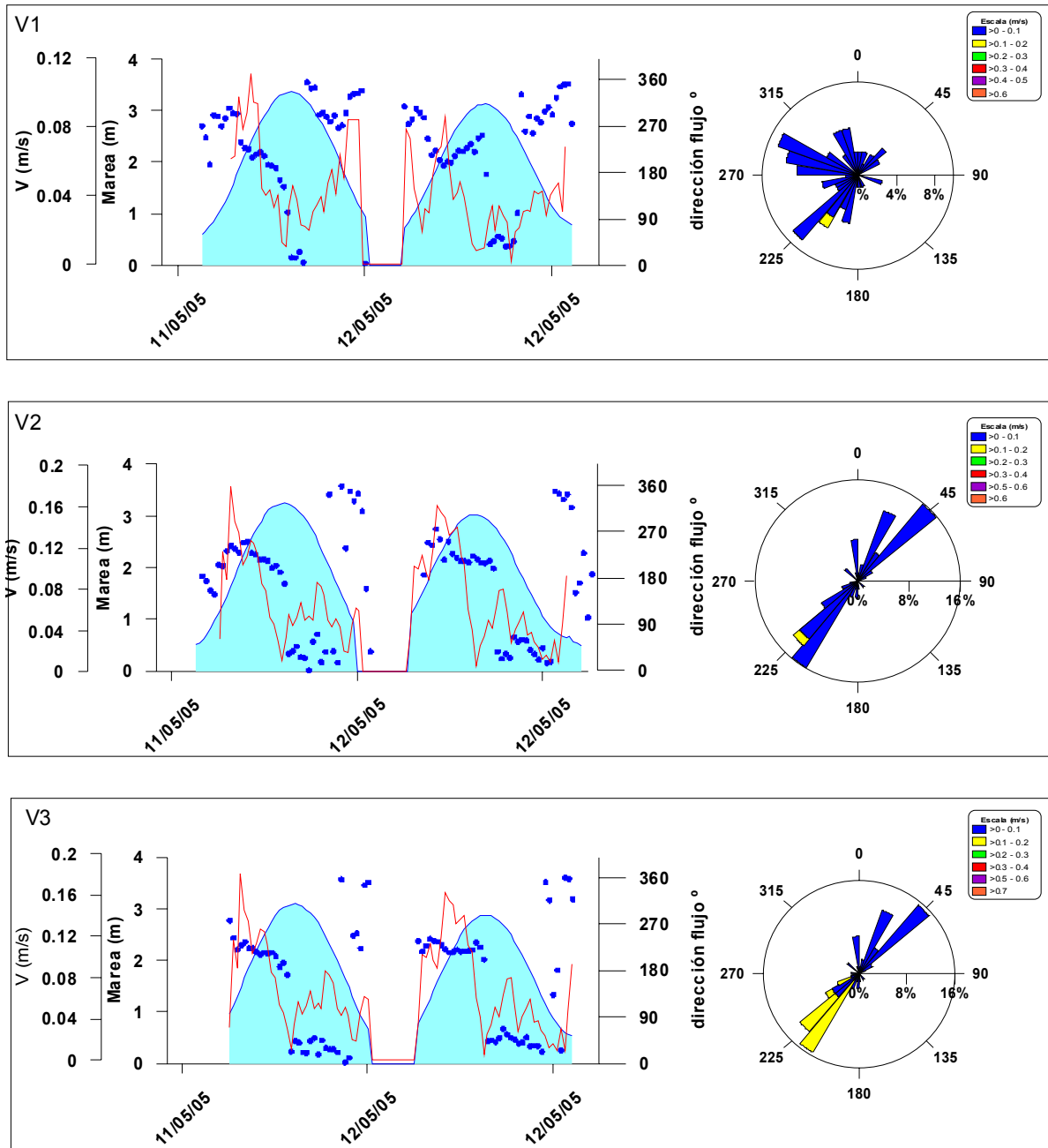


Figura 38. Velocidad y dirección de corriente vs. altura de lámina de agua registradas durante la Campaña III de verano.

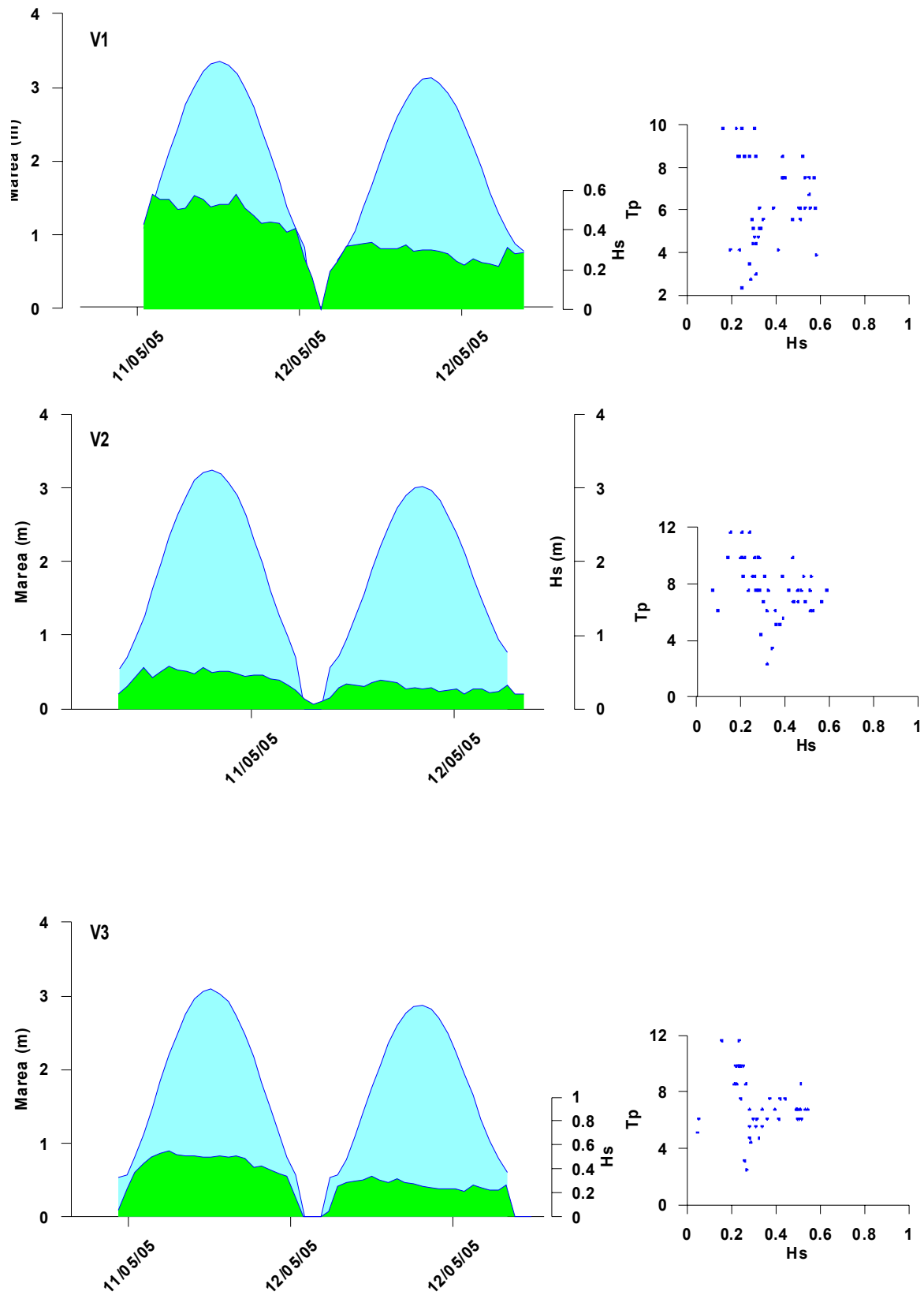


Figura 39. Altura de lámina de agua (azul) vs. altura significativa de ola (verde) y parámetros del oleaje (dirección, periodo vs. altura significativa) registrados durante la Campaña III de verano.

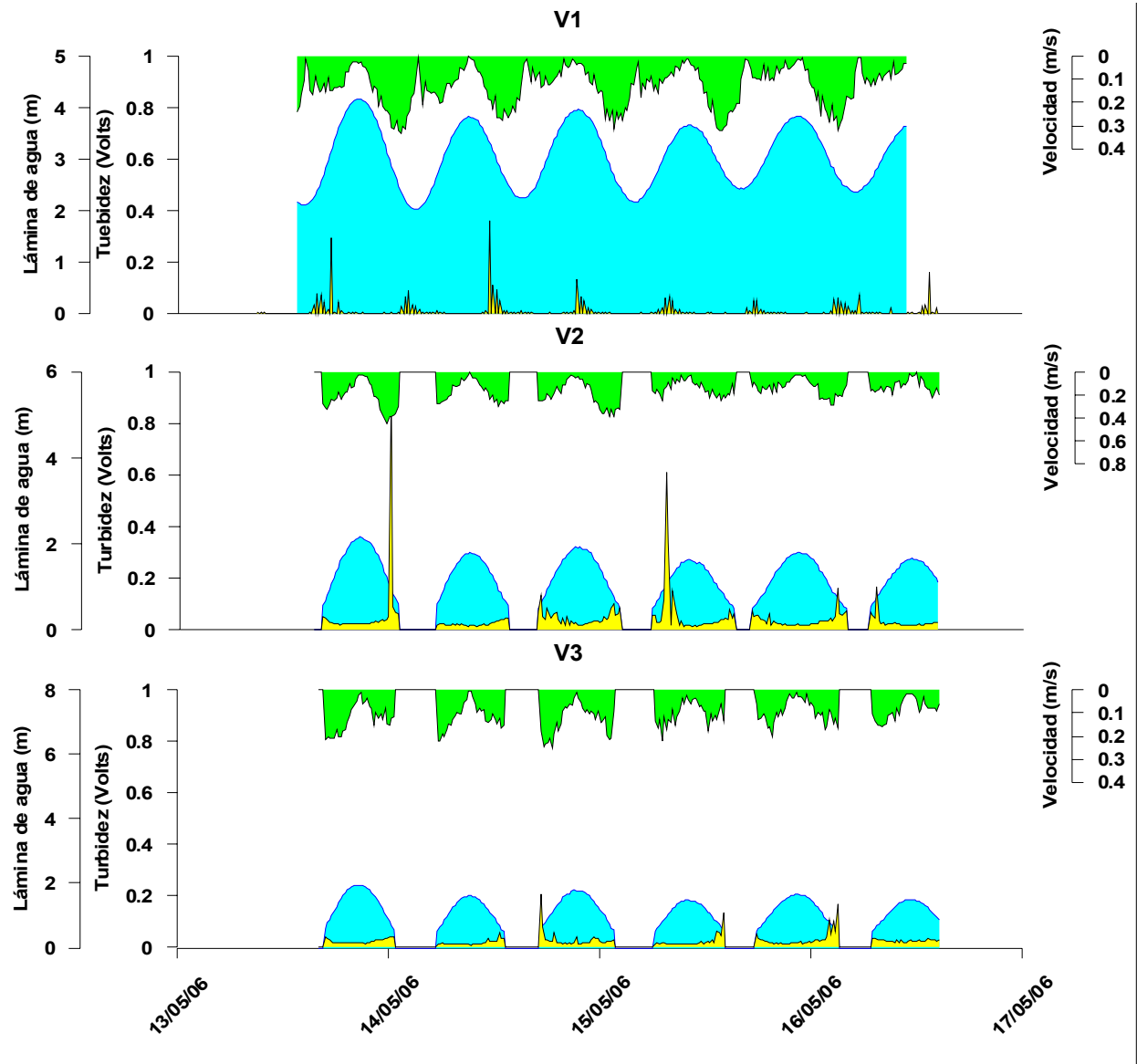


Figura 40. Velocidad de corriente (verde), altura de lámina de agua (azul) y turbidez (amarillo) registradas durante la Campaña IV de verano.

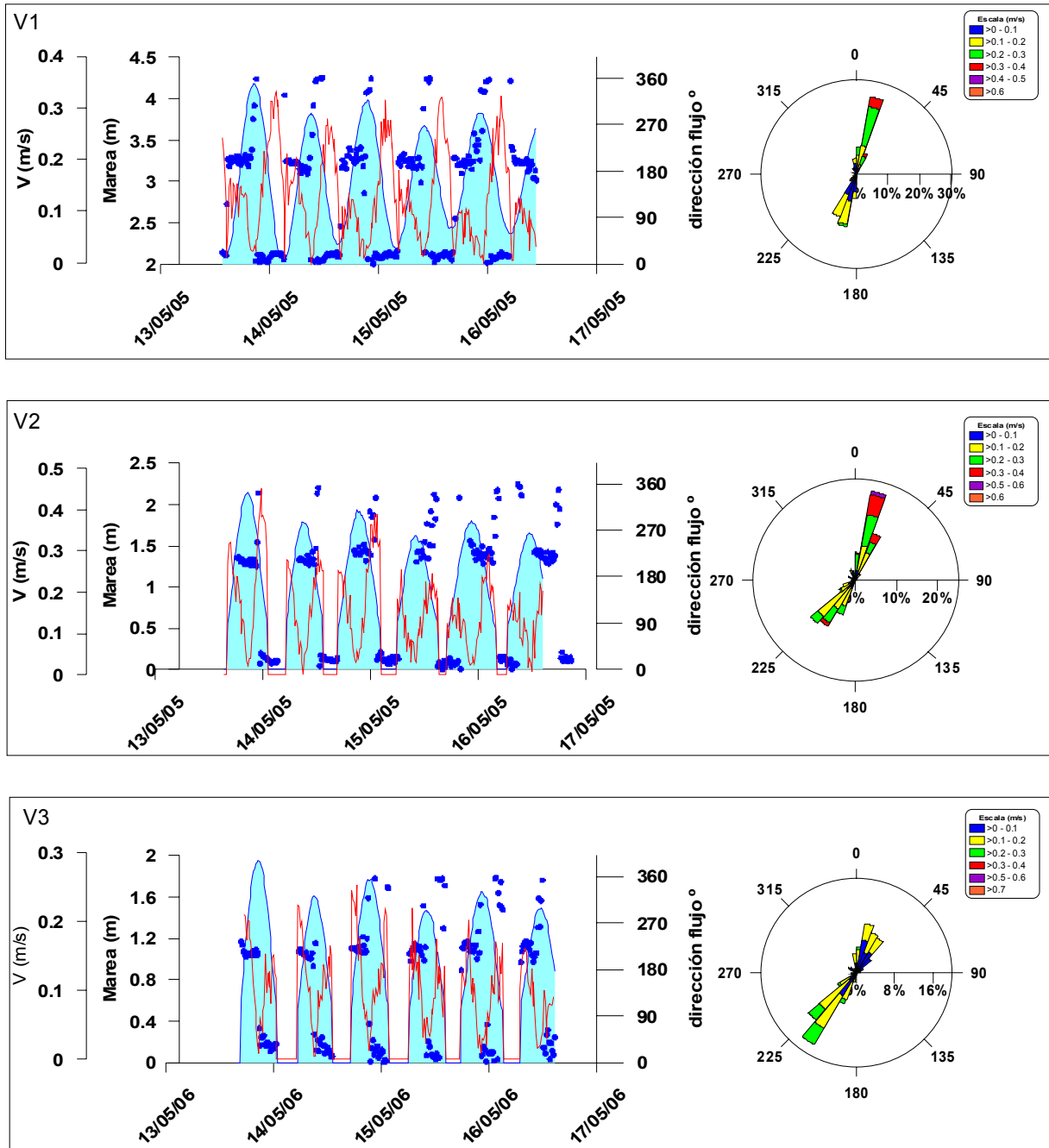


Figura 41. Velocidad y dirección de corriente vs. altura de lámina de agua registradas durante la Campaña IV de verano.

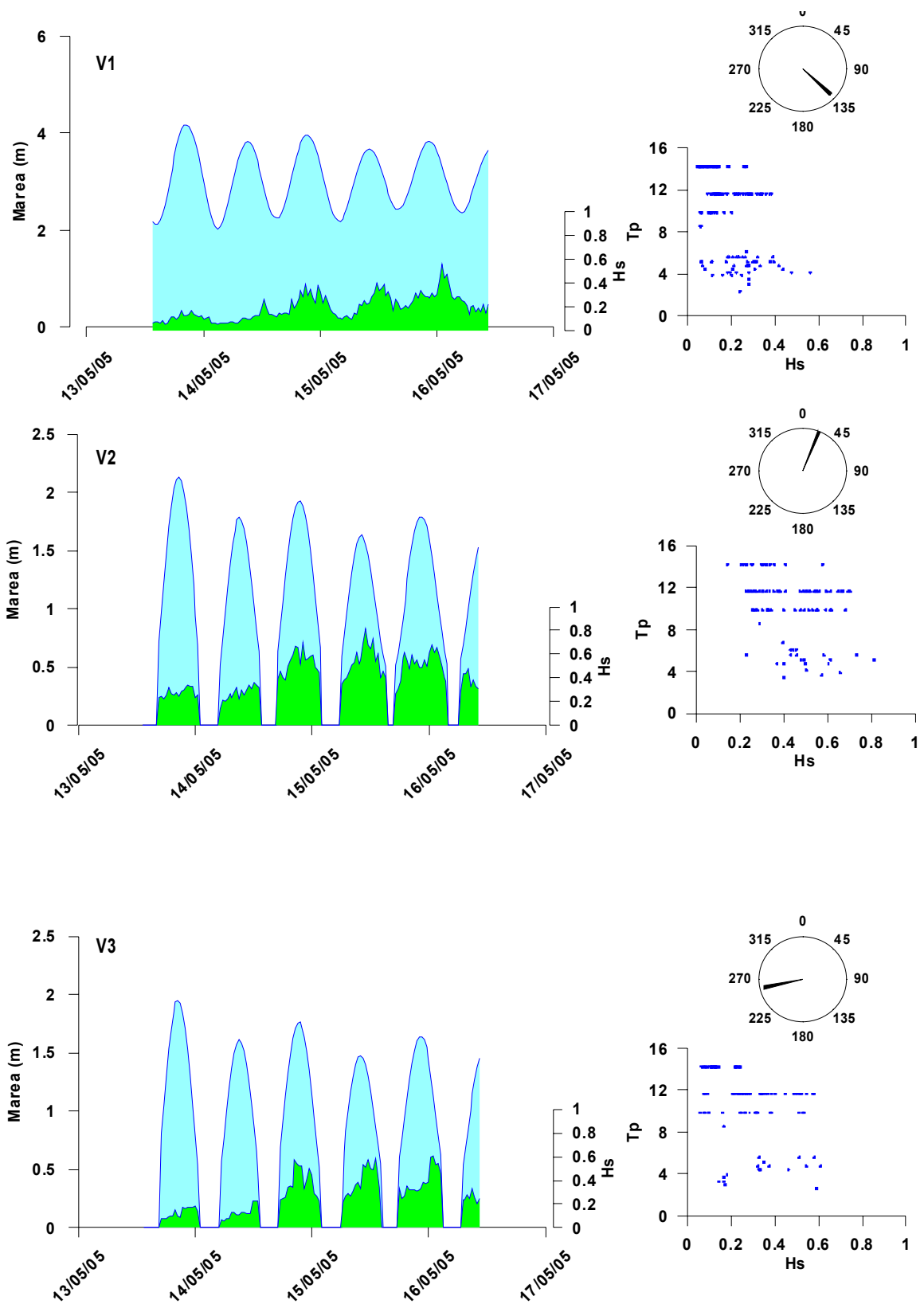


Figura 42. Altura de lámina de agua (azul) vs. altura significativa de ola (verde) y parámetros del oleaje (dirección, periodo vs. altura significativa) registrados durante la Campaña IV de verano.

INVIERNO

-Campaña I: MAREAS VIVAS. Instalación: V1, V2 y V3 28/01/06 en marea baja. Bajamar: 8:25 h (0.90 m), Pleamar: 14:45 h (4.00 m). Altura del sensor de presión V1, V2 y V3: 35 cm. Muestras de sedimento (MUN I – V*A). Recuperación: V1 y V3 31/01/06 (marea baja). Bajamar: 10:44 h (0.22 m), Pleamar: 17:01 h (4.43 m). V2 29/01/06 (marea baja). Bajamar: 09:14 h (0.59 m), Pleamar: 15:32 h (4.22 m). Altura del sensor de presión: V2 y V3: 35 cm y V1: 5 cm debido al progresivo enterramiento del equipo. Muestras de sedimento (MUN I – V*B) (Figura 43).

-Campaña II: PERFIL DE PLAYA. Instalación: V1, V2 y V3 31/01/06 en marea baja; Bajamar: 10:44 h (0.22 m), Pleamar: 17:01 h (4.43 m). Altura del sensor de presión V1, V2 y V3: 35 cm. Muestras de sedimento (MUN II – V*A). Recuperación: 02/02/06 (marea baja). Bajamar: 12:13 h (0.42 m), Pleamar: 18:28 h (4.22 m). Muestras de sedimento (MUN II – V*B) (Figura 43).

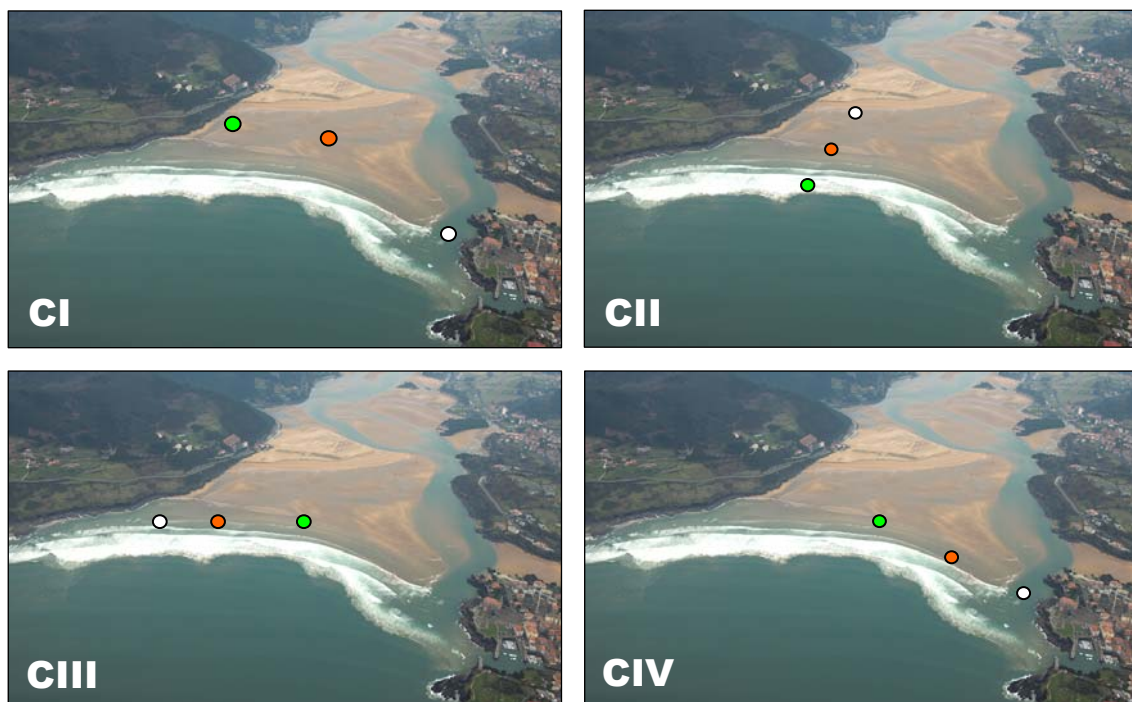


Figura 43. Localización de los correntímetros Valeport 730D durante las 4 campañas de medida invernales. En color blanco la posición V1, en color rojo la posición V2 y en color verde la posición V3.

-Campaña III: LONGITUDINAL PLAYA. Instalación: V1, V2 y V3 02/02/06 en marea baja. Bajamar: 12:13 h (0.42 m), Pleamar: 18:28 h (4.22 m). Altura del sensor de presión V1, V2 y V3: 35 cm. Muestras de sedimento (MUN III – V1 y V2 A). Recuperación: 03/02/06 (marea baja). Pleamar: 06:51 h (4.46 m), Bajamar: 12:59 h (0.71 m). Altura del sensor

de presión: V1, V2 y V3: 35 cm. Muestras de sedimento (MUN III – V1 y V2 B) (Figura 43).

-Campaña IV: MAREAS MUERTAS. Instalación: V1, V2 y V3 03/02/02 en marea baja. Bajamar: 12:59 h (0.71 m), Pleamar: 19:14 h (3.99 m). Altura del sensor de presión V1, V2 y V3: 35 cm. Muestras de sedimento (MUN IV – V*A). Recuperación: 07/02/06 V1, V2 y V3 (marea alta). Pleamar: 11:14 h (3.24 m), Bajamar: 17:13 h (1.79 m). Muestras de sedimento (MUN IV – V*B) (Figura 43).

A continuación se representan los datos de oleaje exterior (boya de Bilbao-Vizcaya) y marea (mareógrafo de Bilbao) correspondientes al periodo en el que se realizaron estas campañas de medidas (Figura 44).

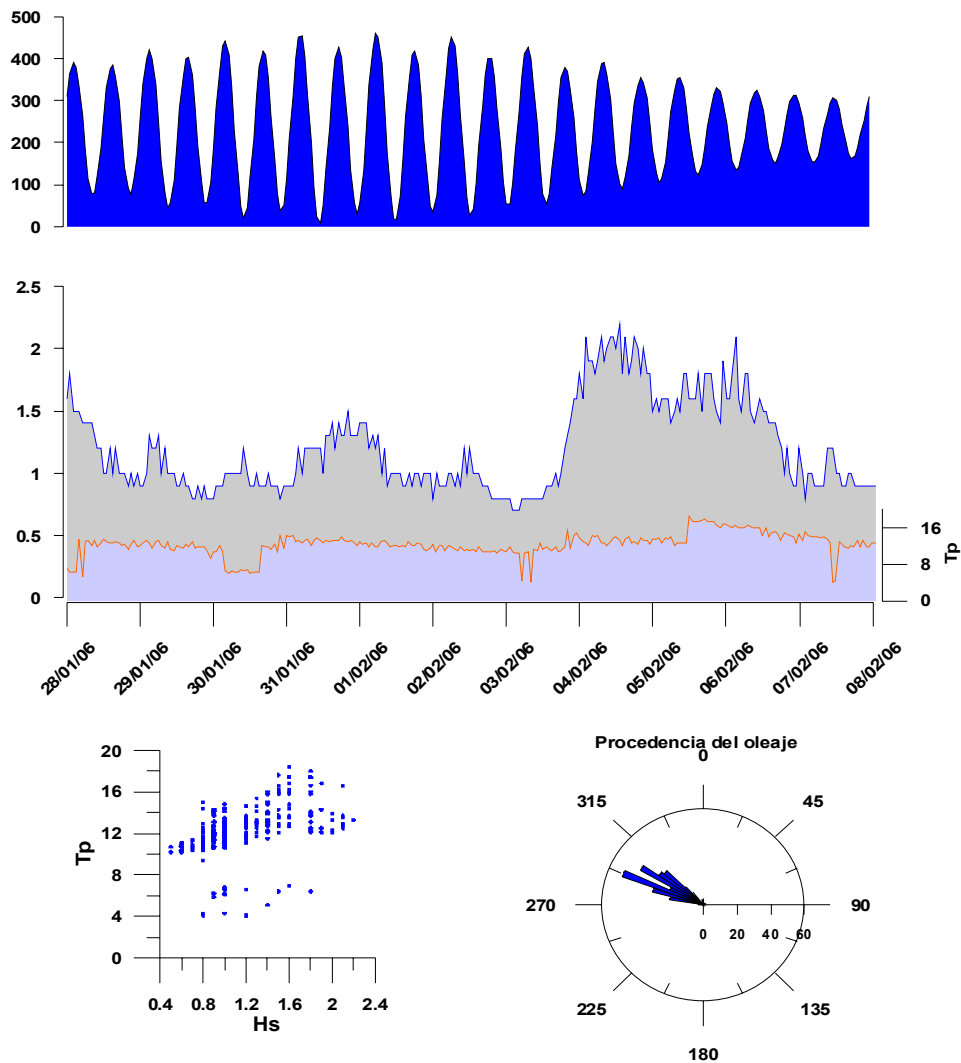


Figura 44. Parámetros de oleaje exterior (dirección, periodo y altura significativa) y nivel del mar (respecto al 0 de Bilbao) obtenidos a partir de la boya y mareógrafo de Bilbao durante las campañas invernales.

Asimismo, se muestran detalladamente los datos de oleaje y corrientes obtenidos en las campañas de invierno. Además se presenta un gráfico integrado de la velocidad y dirección de la corriente en todos los sensores a lo largo de un ciclo de marea con el fin de ayudar a la comprensión del esquema funcional de la parte exterior de la desembocadura (Figuras 45-56).

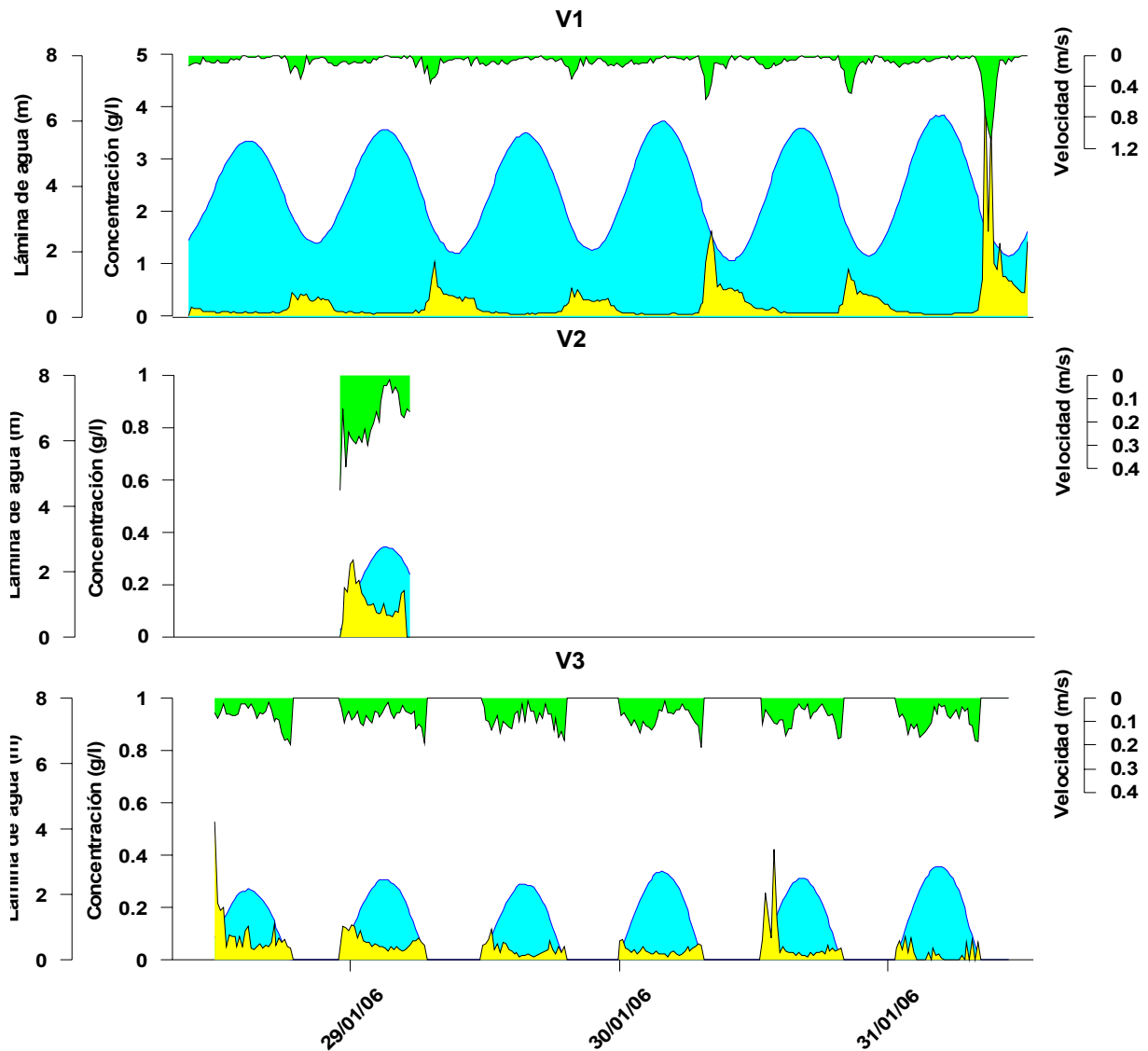


Figura 45. Velocidad de corriente (verde), altura de lámina de agua (azul) y turbidez (amarillo) registrados durante la Campaña I de invierno.

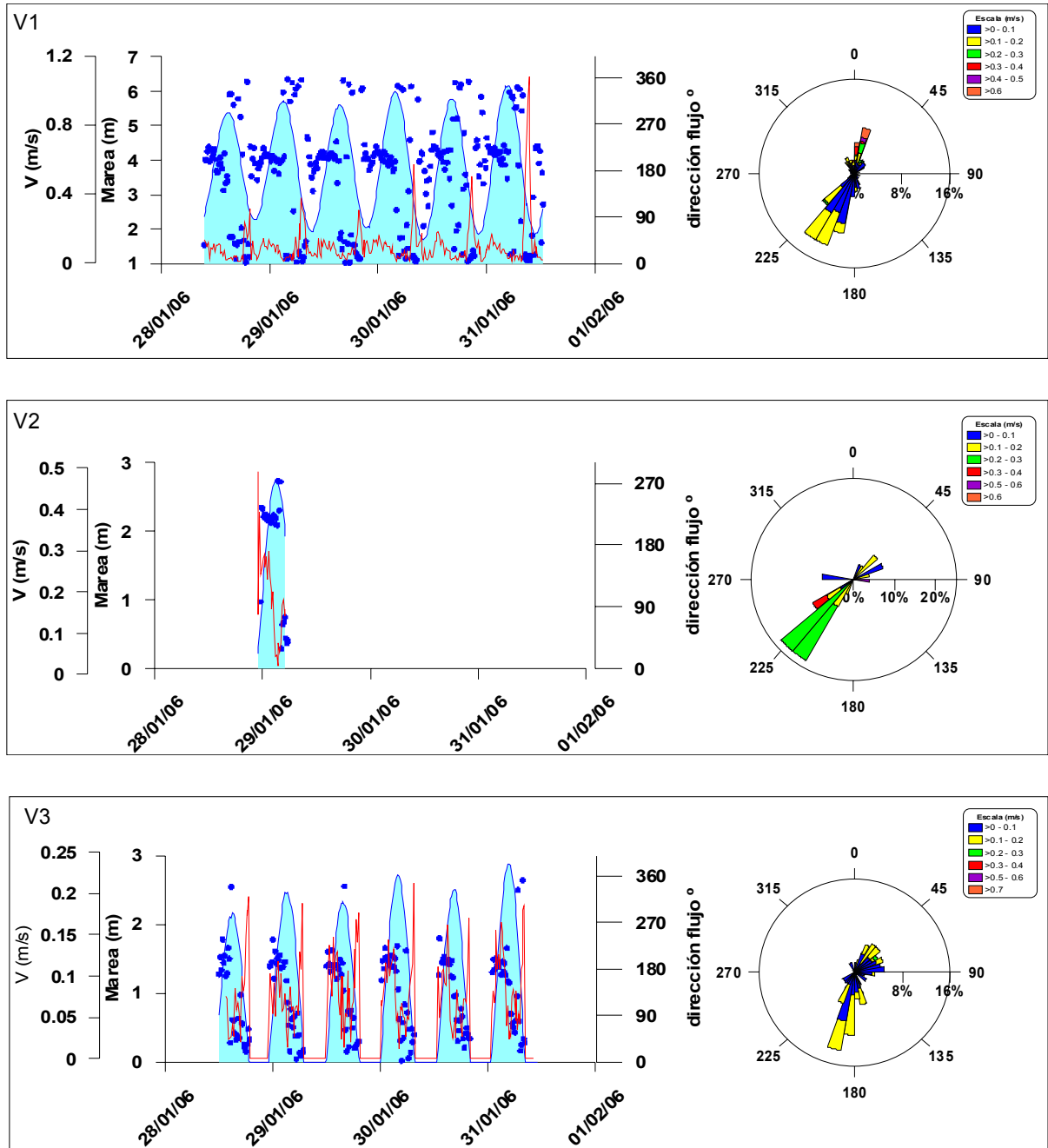


Figura 46. Velocidad y dirección de corriente vs. altura de lámina de agua registradas durante la Campaña I de invierno.

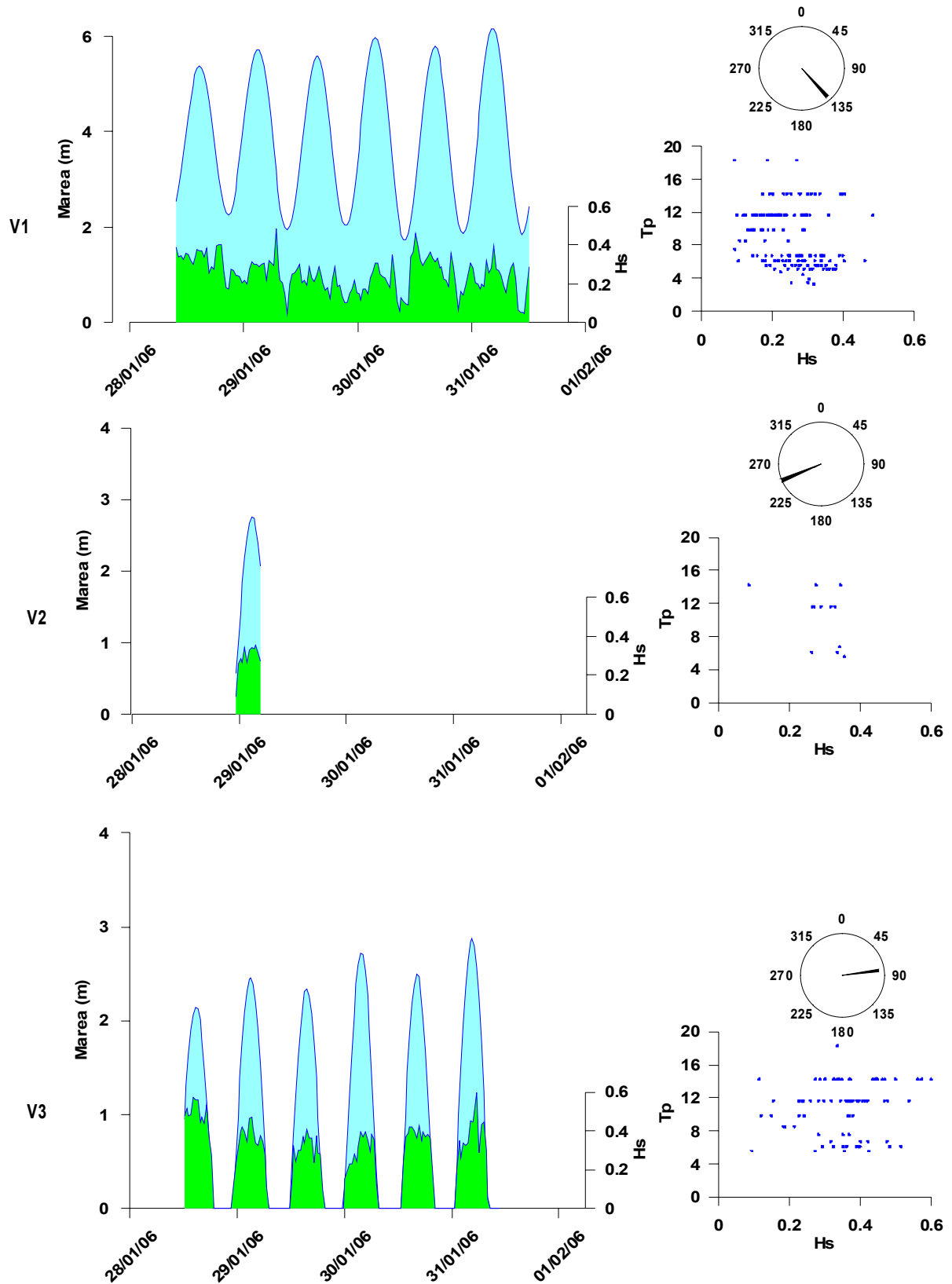


Figura 47. Altura de lámina de agua (azul) vs. altura significativa de ola (verde) y parámetros del oleaje (dirección, periodo vs. altura significativa) registrados durante la Campaña I de invierno.

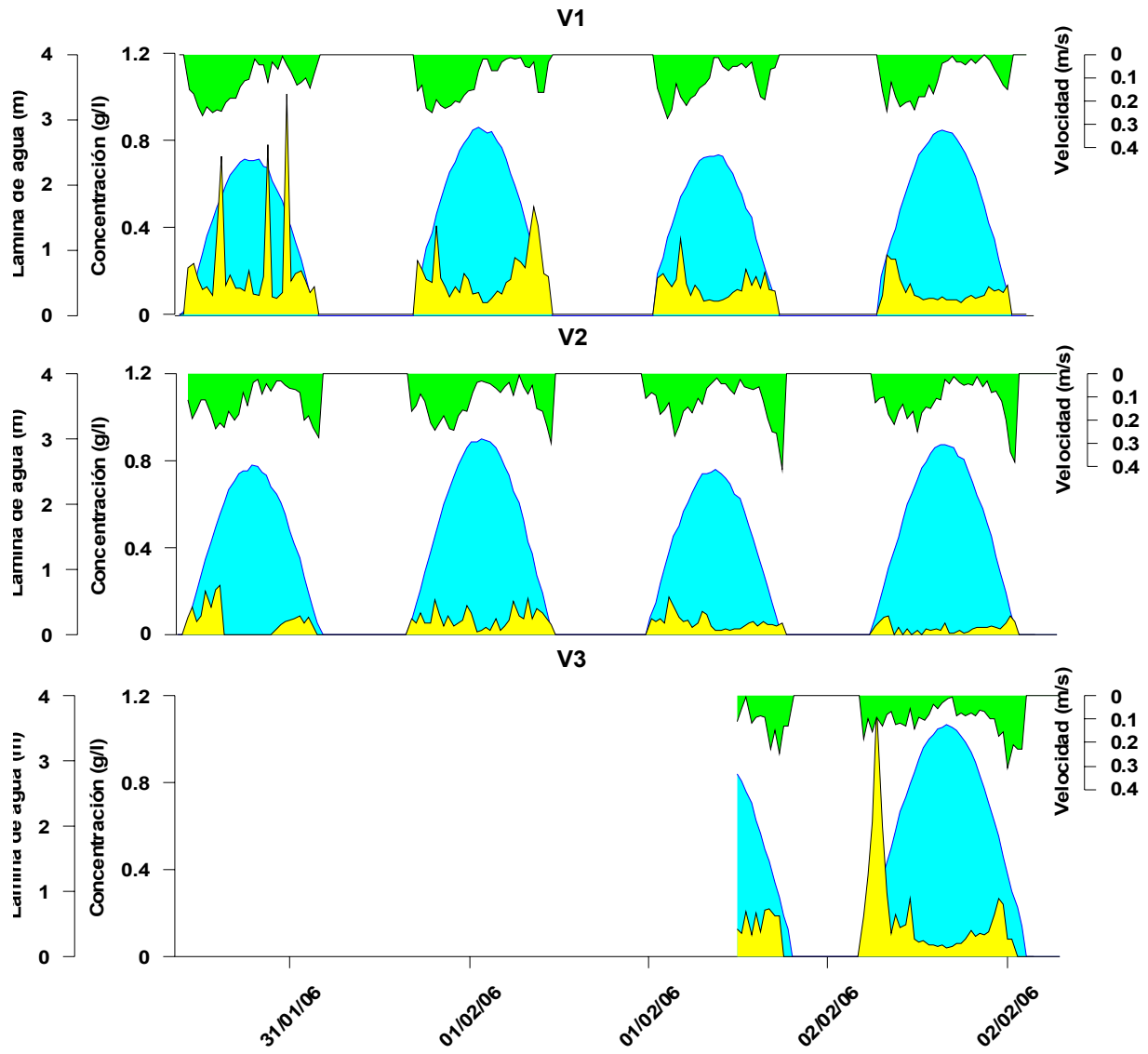


Figura 48. Velocidad de corriente (verde), altura de lámina de agua (azul) y turbidez (amarillo) registradas durante la Campaña II de invierno.

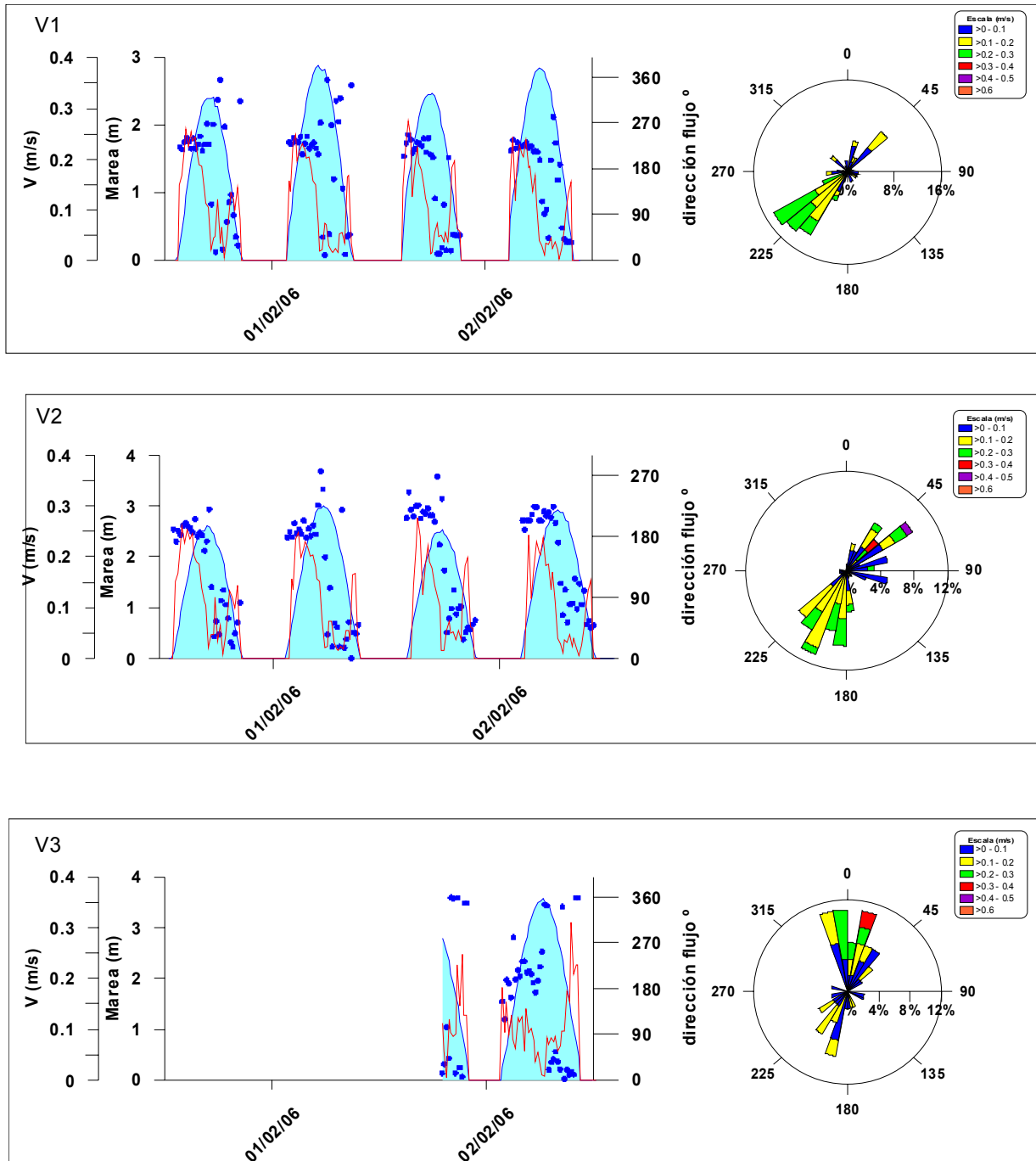


Figura 49. Velocidad y dirección de corriente vs. altura de lámina de agua registradas durante la Campaña II de invierno.

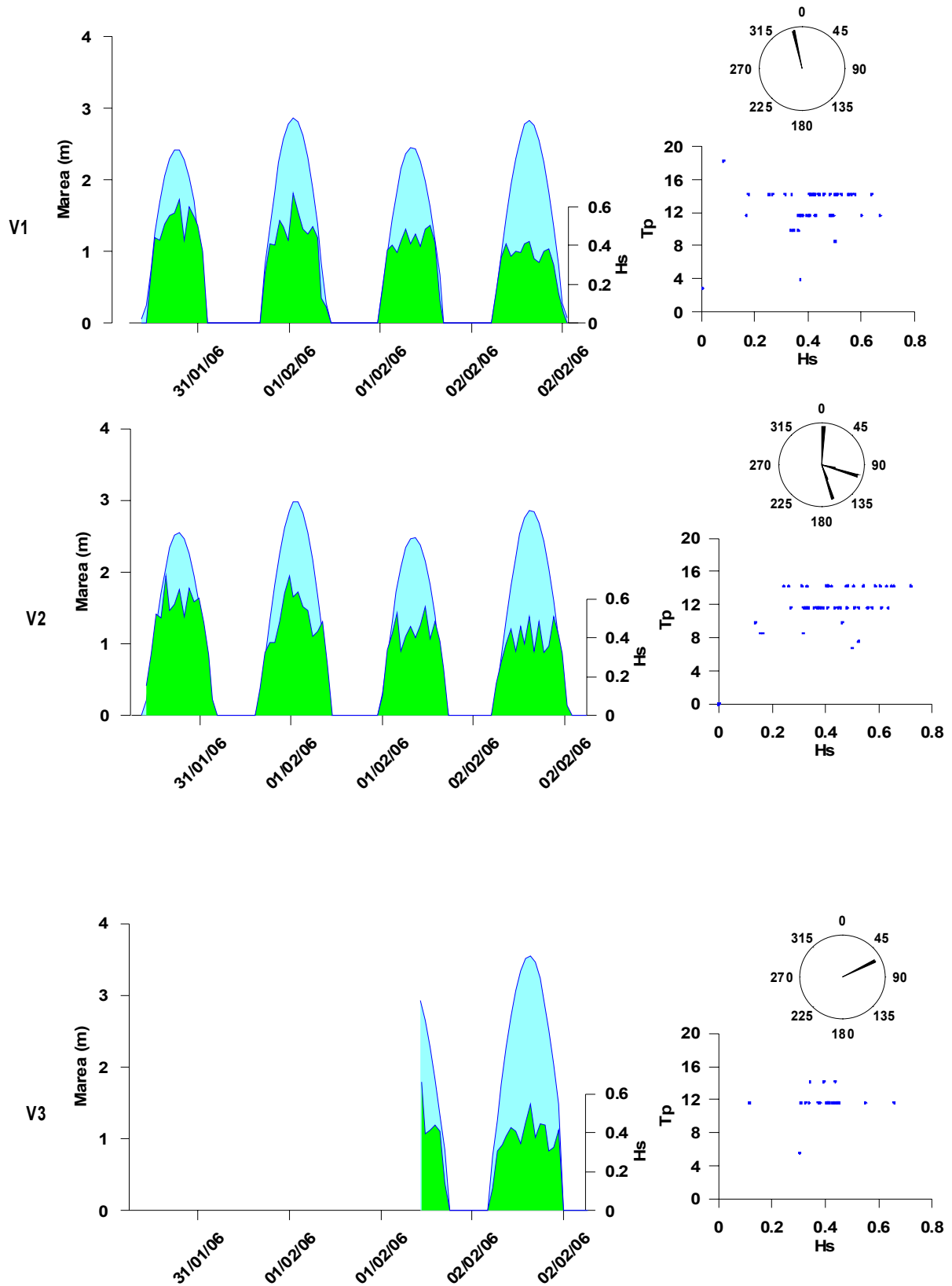


Figura 50. Altura de lámina de agua (azul) vs. altura significativa de ola (verde) y parámetros del oleaje (dirección, periodo vs. altura significativa) registrados durante la Campaña II de invierno.

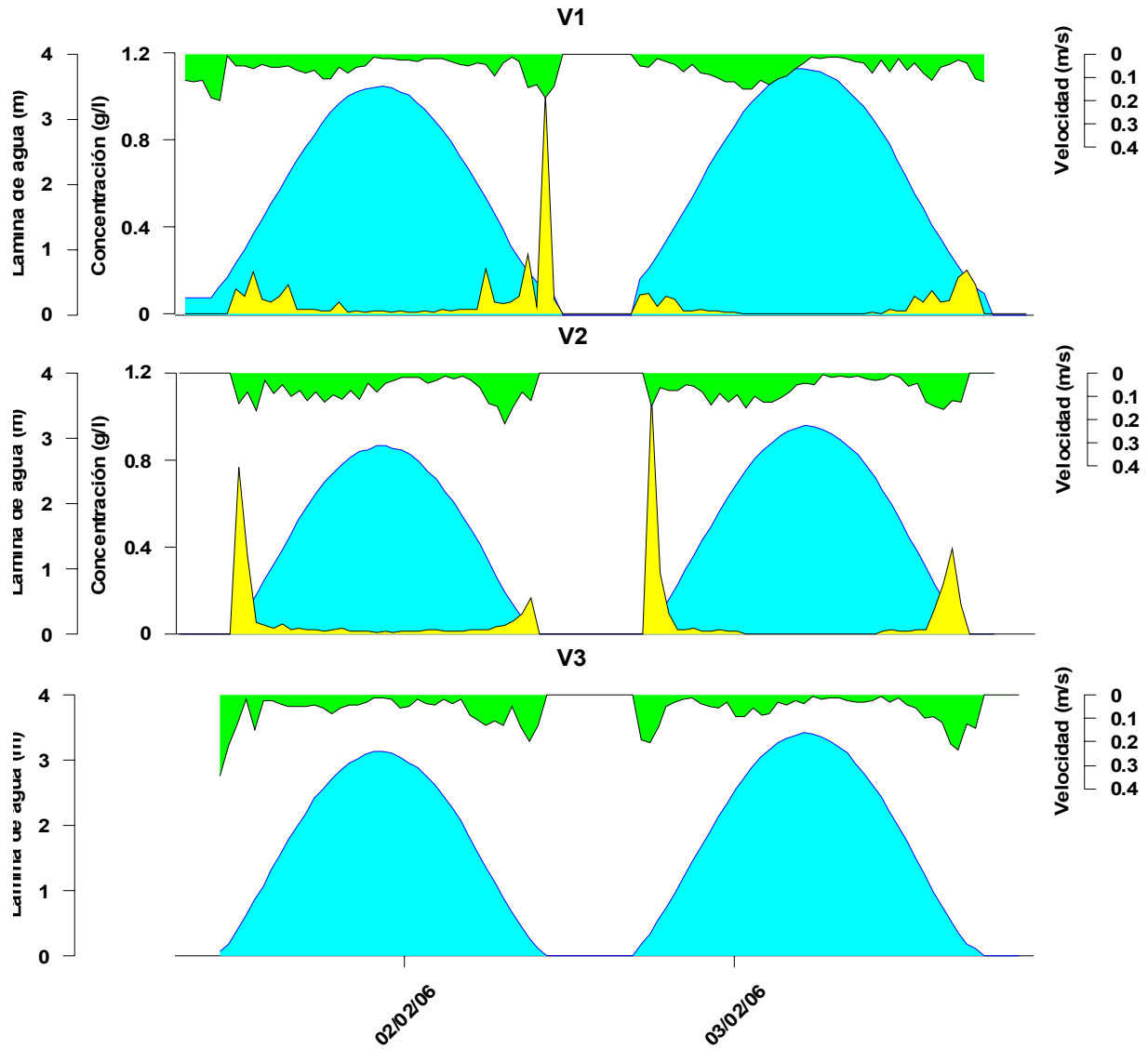


Figura 51. Velocidad de corriente (verde), altura de lámina de agua (azul) y turbidez (amarillo) registradas durante la Campaña III de invierno.

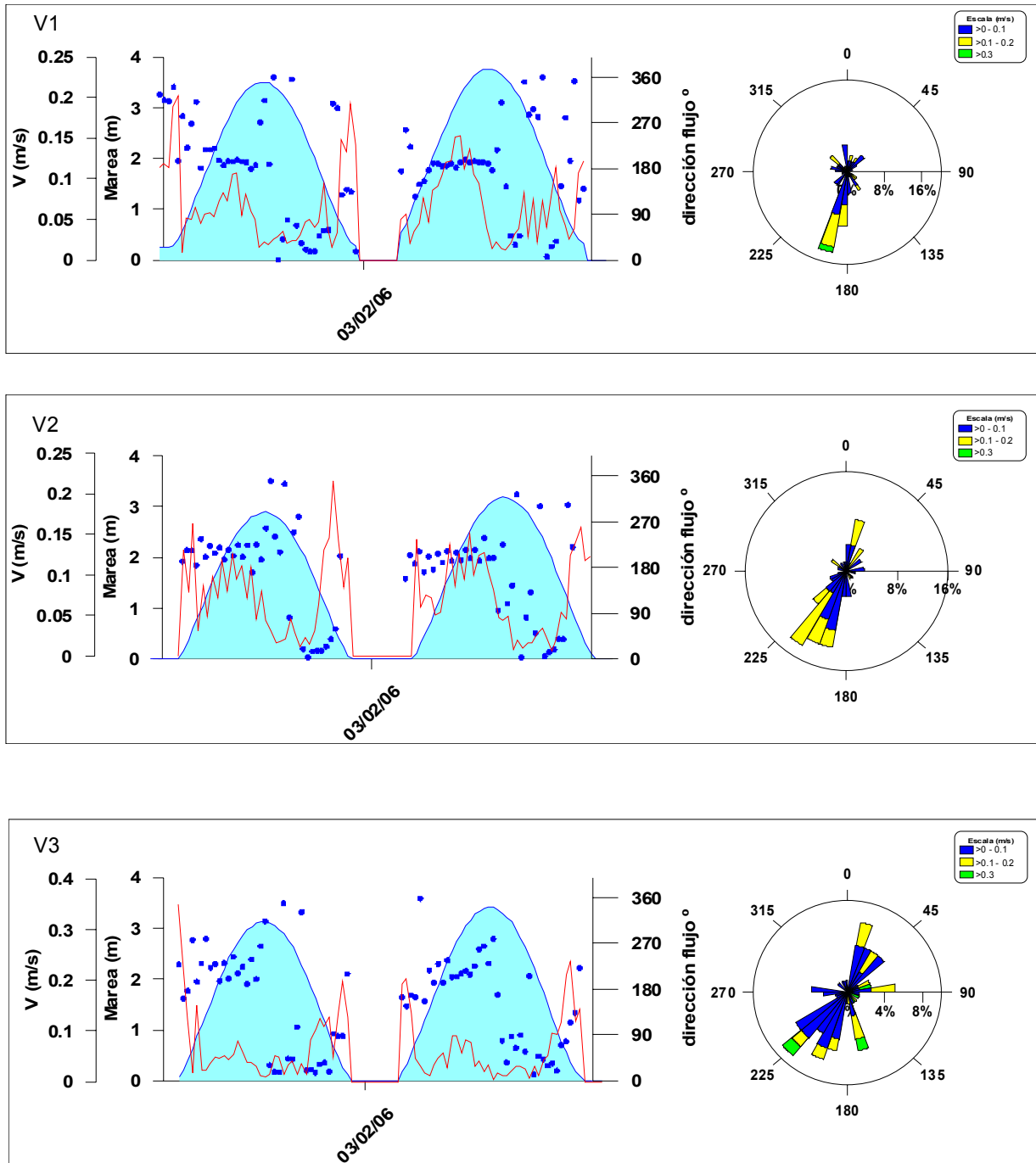


Figura 52. Velocidad y dirección de corriente vs. altura de lámina de agua registradas durante la Campaña III de invierno.

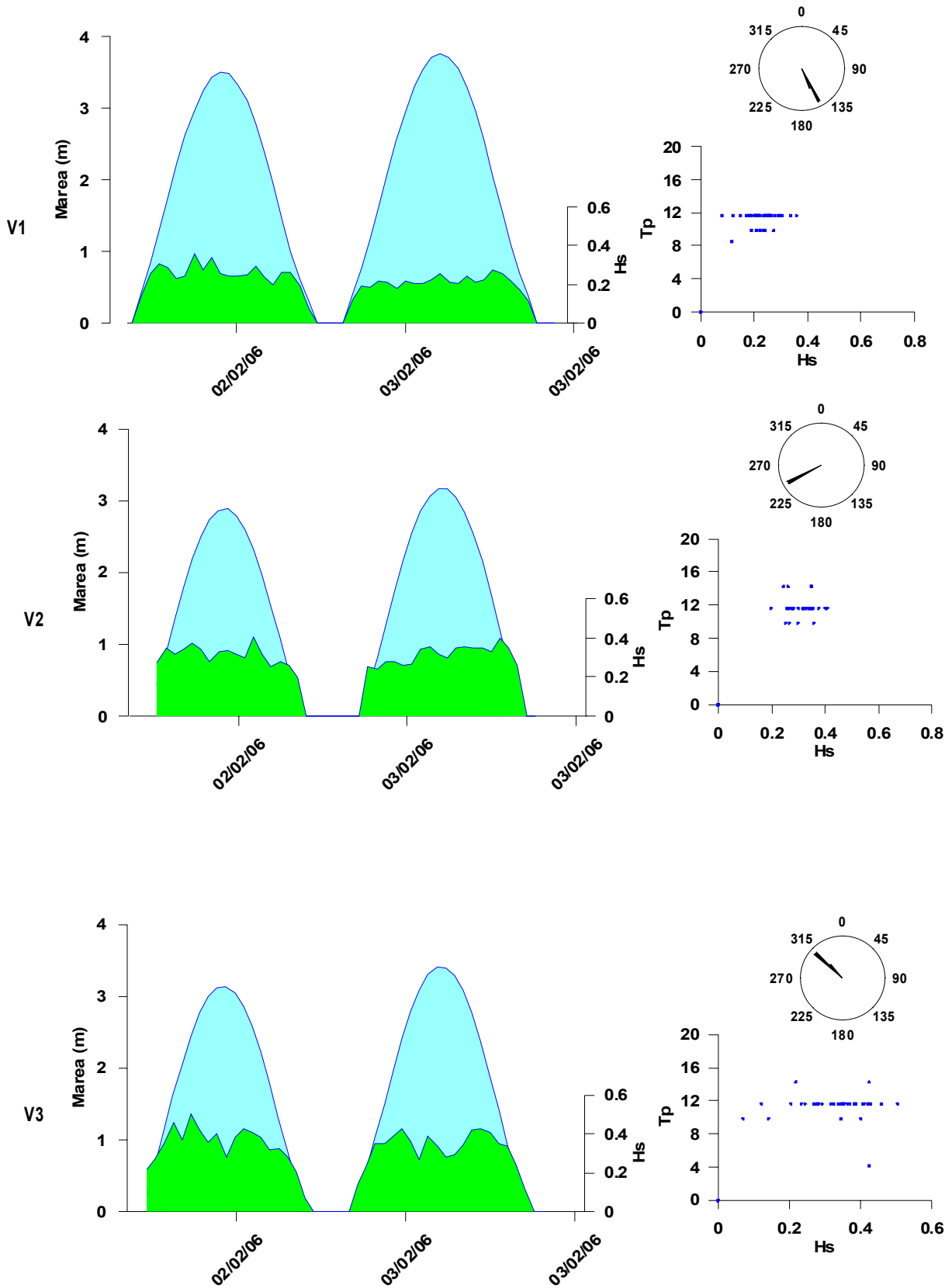


Figura 53. Altura de lámina de agua (azul) vs. altura significativa de ola (verde) y parámetros del oleaje (dirección, periodo vs. altura significativa) registrados durante la Campaña III de invierno.

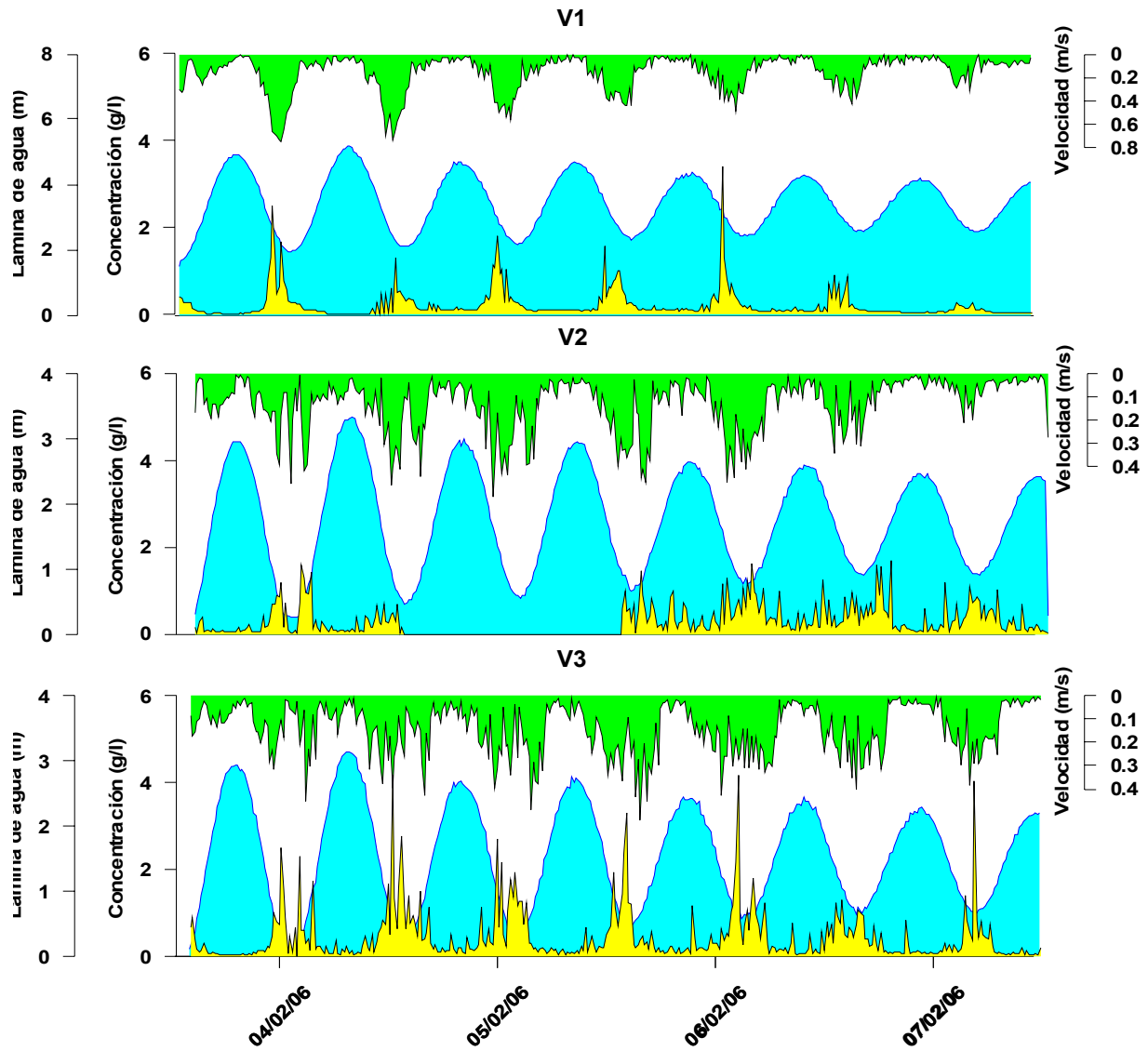


Figura 54. Velocidad de corriente (verde), altura de lámina de agua (azul) y turbidez (amarillo) registradas durante la Campaña IV de invierno.

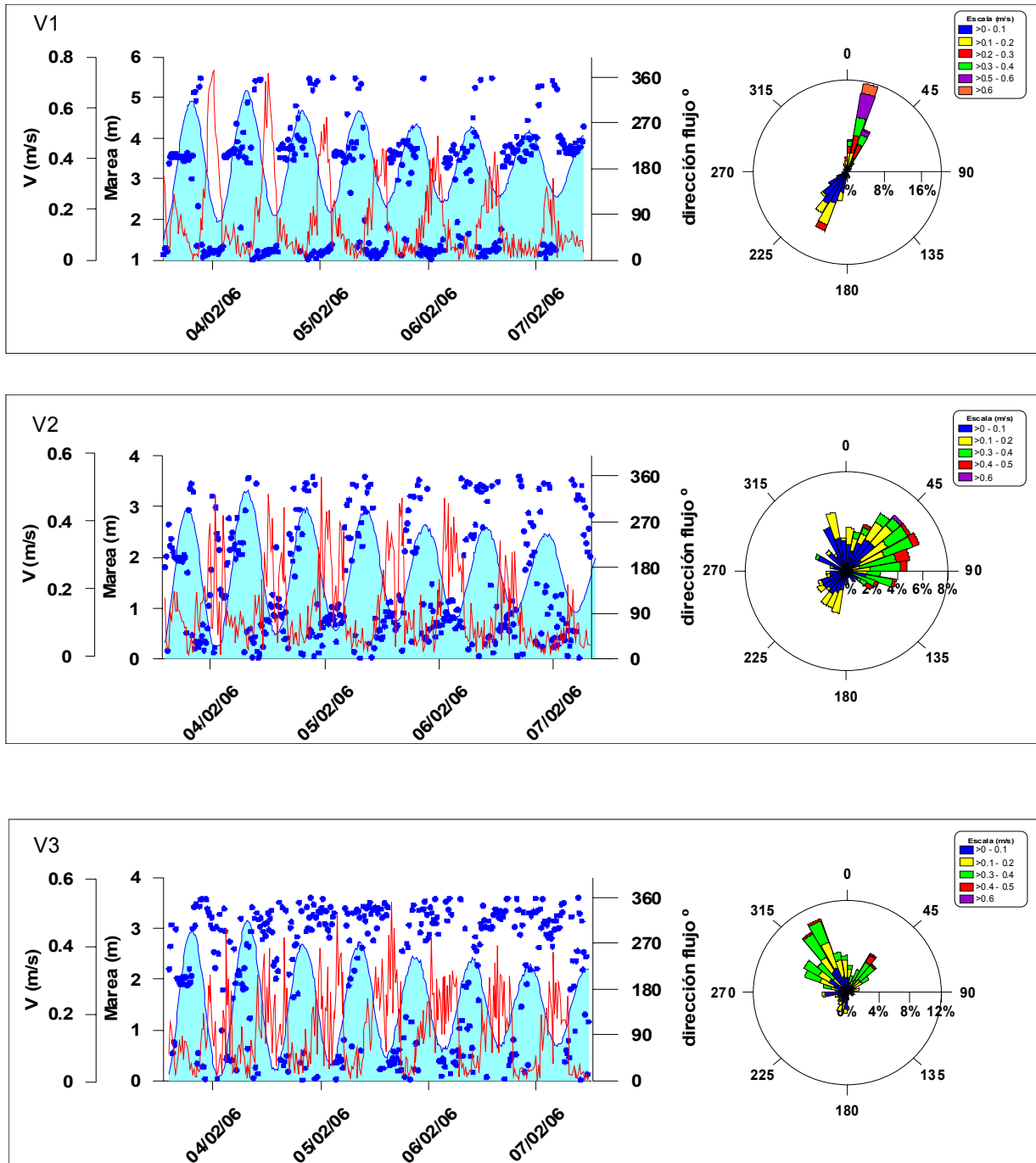


Figura 55. Velocidad y dirección de corriente vs. altura de lámina de agua registradas durante la Campaña IV de invierno.

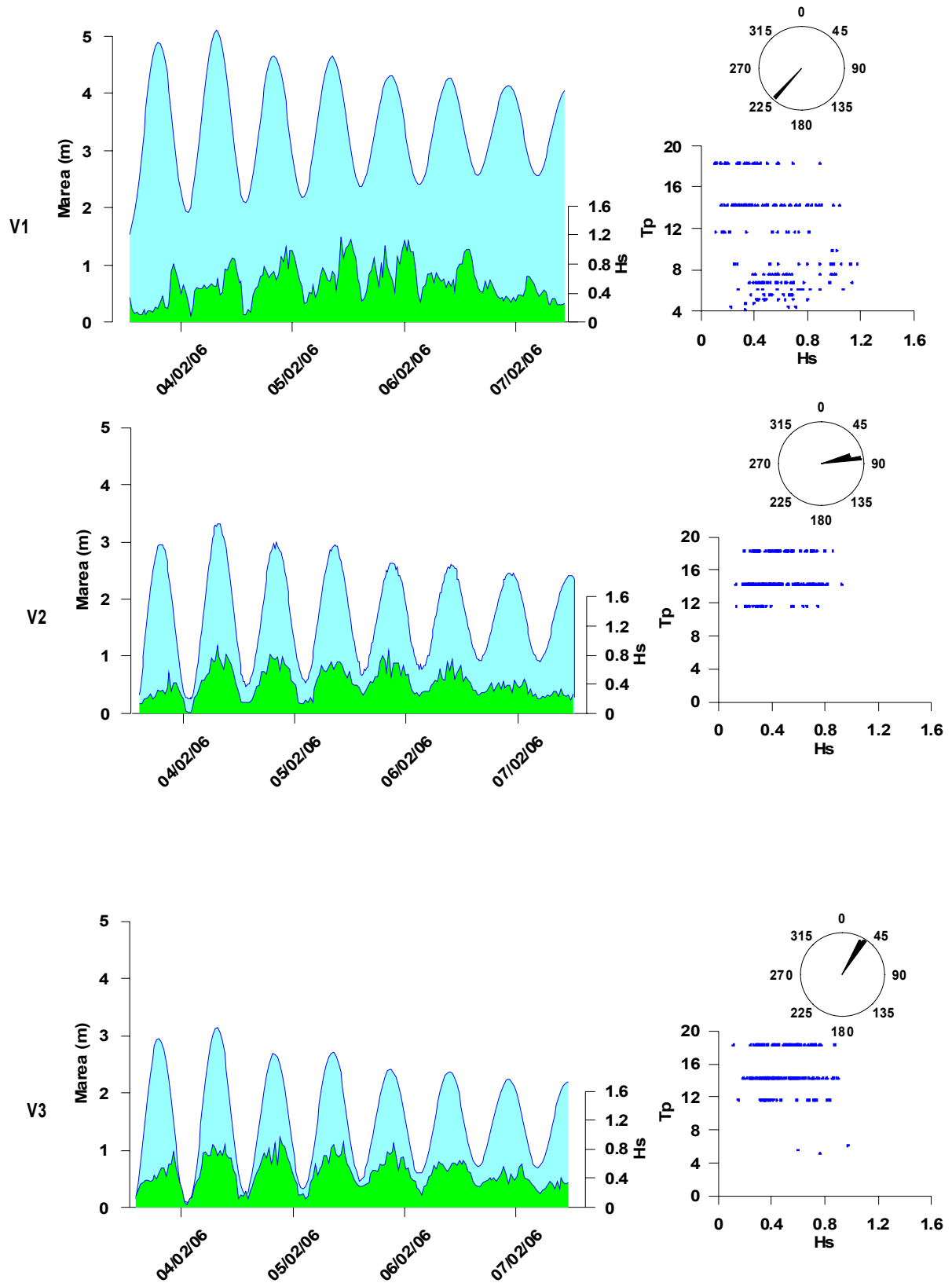


Figura 56. Altura de lámina de agua (azul) vs. altura significativa de ola (verde) y parámetros del oleaje (dirección, periodo vs. altura significativa) registrados durante la Campaña IV de invierno.

El sensor de turbidez instalado en los correntímetros Valeport 730D utilizados durante las campañas de invierno registra la información en voltios. Con el objetivo de convertir esos valores en unidades g/l se realizaron en el laboratorio de la UPV/EHU y bajo condiciones controladas una serie de ensayos de calibración. A modo de ejemplo, se muestran en la Figura 57 los resultados obtenidos para los equipos ubicados en las posiciones V2 y V3 durante la campaña IV. Los valores calibrados para todos los instrumentos han sido aplicados a la información mostrada en los gráficos correspondientes a las condiciones de invierno.

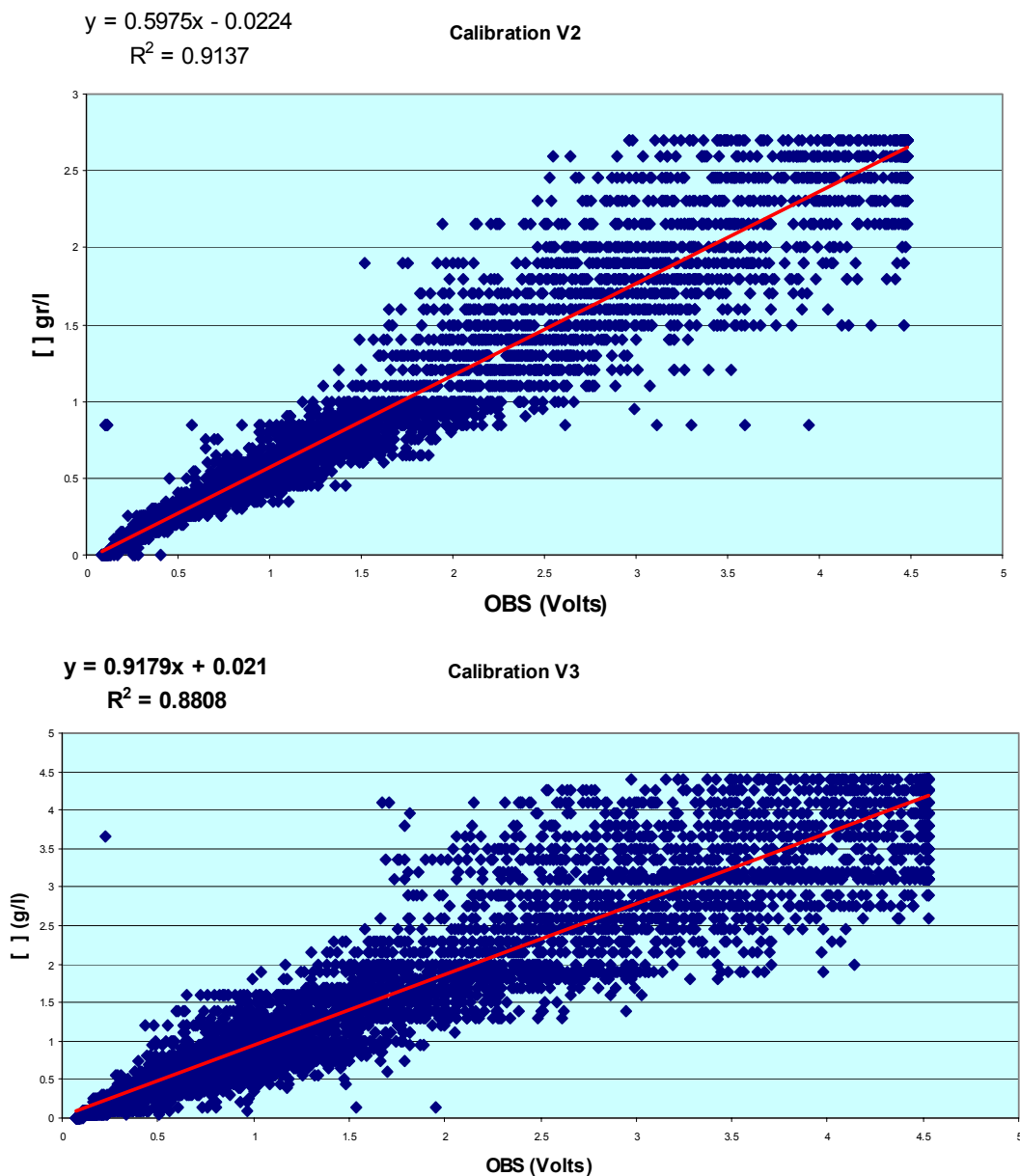


Figura 57. Ejemplos de calibración de las medidas de turbidez desde OBS en voltios a gramos /litro.

Con el fin de mostrar la distribución de las corrientes en la zona de la desembocadura durante un ciclo de marea completo, se ha representado de forma integrada el conjunto de valores registrados para la dirección y velocidad de las corrientes medidas en cada uno de los equipos (a 50 cm del fondo) durante el periodo estival sobre la batimetría típica de verano (Figura 58).

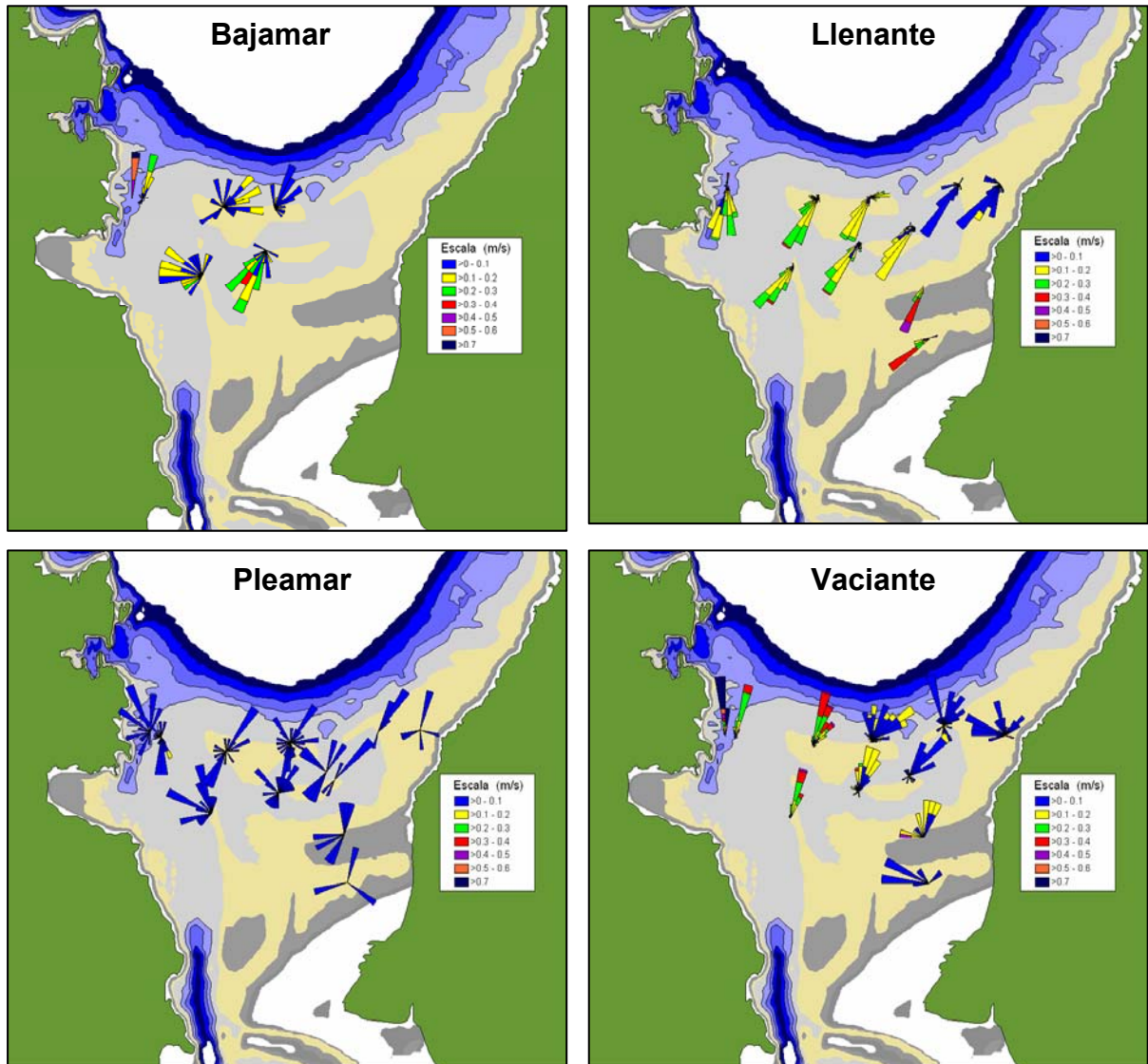


Figura 58. Distribución y magnitudes de la corriente durante las 4 campañas de medición correspondientes al periodo estival.

A la vista de la información obtenida es posible afirmar, en primer lugar, que las condiciones de clima marino durante toda la campaña fueron muy benignas con oleaje escaso. En estas condiciones, las corrientes máximas se produjeron junto al contorno Oeste de la desembocadura (localidad de Mundaka) durante la vaciante y hasta la

bajamar. El retardo de la onda de marea durante la vaciante fue de aproximadamente 1 hora en la zona de la barra. Estas corrientes llegaron a superar los 0,8 m/s (a 50 cm del fondo) en mareas vivas y disminuyeron rápidamente hacia el Este, siendo prácticamente nulas en la zona intermareal de Laida. En la zona donde se encontraba el nuevo canal durante el pasado invierno las corrientes no sobrepasaron los 0,4 m/s en esta misma fase de la marea. Durante la llenante, por el contrario, las corrientes fueron de dirección muy uniforme en toda la zona y se dirigieron claramente hacia la bocana aumentando además su velocidad desde valores comprendidos entre 0-0,1 m/s en el margen Noreste hasta 0,3-0,4 m/s en la zona intermareal de Laida siendo prácticamente nulas en el entorno de la pleamar.

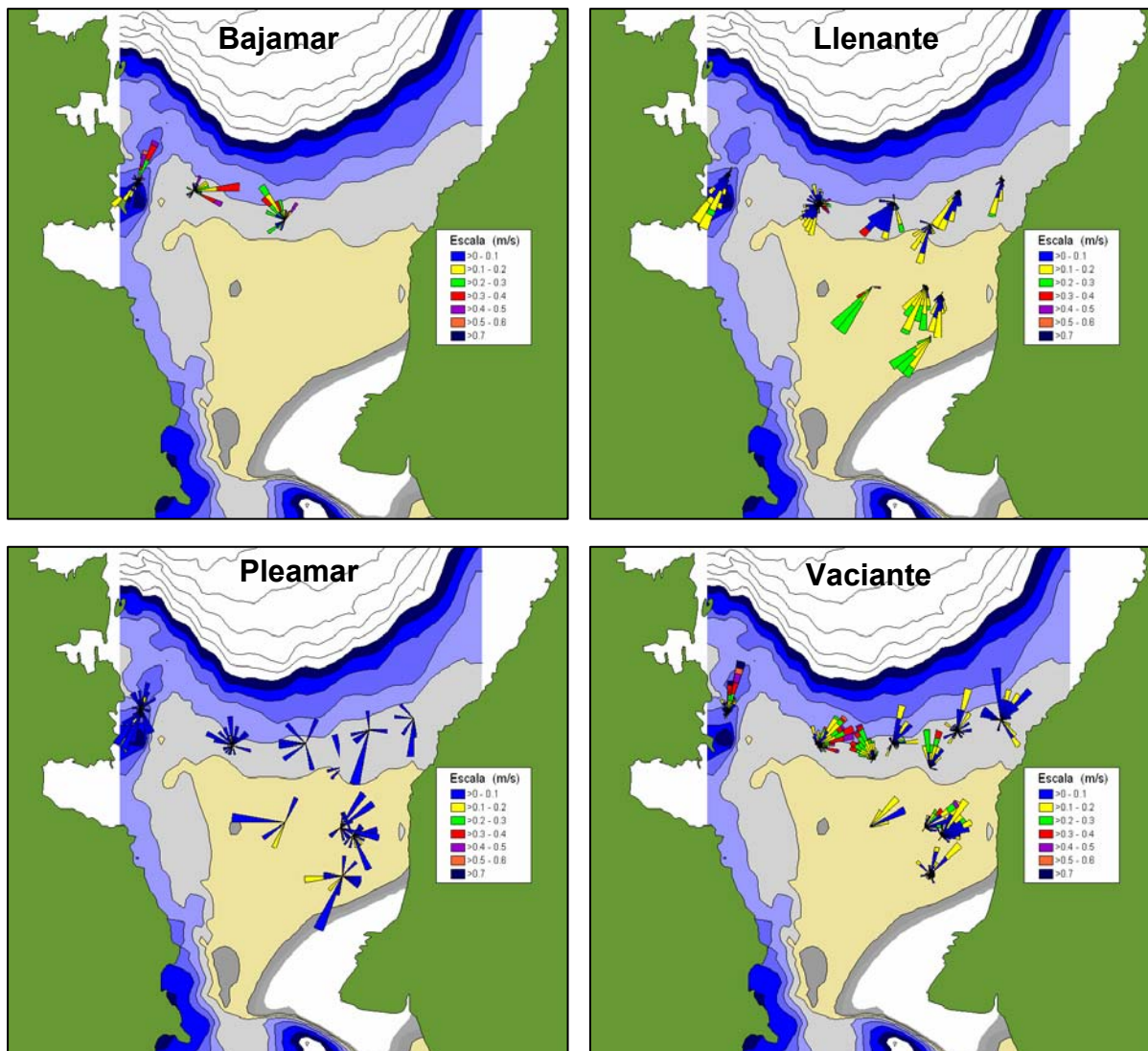


Figura 59. Distribución y magnitudes de la corriente durante las 4 campañas de medición correspondientes al periodo invernal.

Del mismo modo, la Figura 59 muestra la distribución de las corrientes en la zona de la desembocadura durante un ciclo de marea medidas en cada uno de los equipos (a 35 cm del fondo) durante el periodo invernal sobre la batimetría típica de invierno. Las condiciones de clima marino durante toda la campaña mostraron un oleaje muy intenso típico de condiciones invernales. Las corrientes máximas durante la vaciante y la bajamar se produjeron en el canal de desembocadura en dirección Norte y a lo largo del contorno de la zona intermareal externa con un patrón convergente. Estas corrientes llegaron a alcanzar los 0,7 m/s (a 35 cm del fondo). Durante la fase llenante, por el contrario, las corrientes fueron de dirección muy uniforme en toda la zona y se dirigieron claramente hacia la bocana aumentando además su velocidad desde valores comprendidos entre 0,1-0,2 m/s en el margen Noreste hasta 0,2-0,3 m/s hacia el Suroeste, en las zonas más someras, siendo prácticamente nulas en el entorno de la pleamar.

2.3.2. Corrientes mareales: bocana interior

Se realizaron transectos perpendiculares a la bocana interior del estuario bajo condiciones de mareas vivas (8 de Mayo) y de mareas muertas (14 de Mayo) durante el periodo estival (Figura 60). Durante el invierno los transectos se realizaron los días 12 de Noviembre (mareas muertas) y 19 de Noviembre (mareas vivas). Para ello, se utilizó la embarcación HAREA dotada de ADCP y GPS diferencial. El ADCP permite conocer la velocidad y la dirección de las corrientes en la masa de agua situada debajo del equipo para cada unidad de tiempo por medio del efecto Doppler. Asimismo, realiza un perfilado del fondo del canal (*bottom tracking*) además de una estimación cualitativa de la cantidad de sólidos en suspensión (*backscatter*) transportados en la masa de agua. De este modo permite calcular cuantitativamente el volumen de agua que entra o sale del estuario durante un período de tiempo determinado.

En consecuencia, realizando transectos a lo largo de un ciclo de marea (12 horas y 30 minutos) es posible conocer la variación y evolución de los parámetros mencionados durante ese intervalo de tiempo. En el período estival, durante las mareas vivas se llevaron a cabo 58 transectos en grupos de 4 transectos a intervalos de una hora. En mareas muertas se realizaron 118 transectos en grupos de 8 transectos a intervalos de una hora. En este caso se dobló la cantidad de transectos con el objetivo de obtener un conjunto de datos de mayor precisión.

Durante el periodo invernal se efectuaron 106 transectos en mareas muertas y 92 transectos durante las mareas vivas, todos ellos medidos en grupos de 8 transectos a intervalos de una hora. La menor cantidad de horas de luz diurna y las condiciones

oceanográficas adversas durante la campaña de mareas vivas invernal impidió la monitorización de la fase de bajamar.



Figura 60. Bocana interior donde se realizaron los transectos e imagen del equipo ADCP.

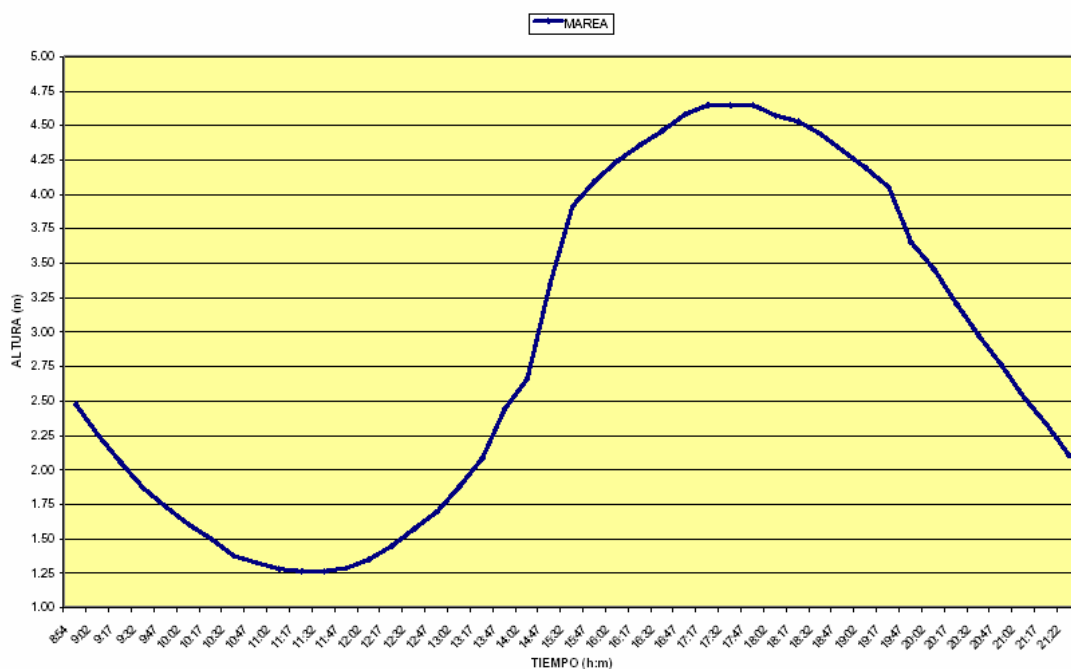
2.3.2.1. Prisma de marea

El cálculo del prisma de marea se efectuó en las condiciones estivales dominadas casi exclusivamente por la oscilación mareal ya que las campañas realizadas en condiciones invernales resultaron afectadas por el oleaje incidente que interfirió en los registros de medida de la descarga mareal.

Bajo condiciones de mareas vivas, el rango mareal medido en el punto V1 de la Campaña I (Figura 29) de la bocana exterior fue de 3,40 m. El volumen de agua calculado que penetró en el estuario durante la fase llenante fue de $6,14 \times 10^6 \text{ m}^3$, mientras que el volumen de agua que salió del estuario durante la fase vaciante del ciclo mareal fue de $5,88 \times 10^6 \text{ m}^3$. Esta diferencia entre los volúmenes de entrada y de salida en el estuario es debida a que el nivel entre dos bajamares o pleamares consecutivas varía por causas astronómicas. Durante las condiciones de bajamar se produjeron flujos de agua contrapuestos que entraron y salieron del estuario (Figuras 61 y 62). Esta situación se prolongó durante 2 horas y 15 minutos e incluyó una parte del período de llenante. El

resultado neto, en términos de volumen de agua, fue cercano a cero. A partir de entonces, comenzó a entrar el agua marina dentro del estuario alcanzando su máximo caudal ($560 \text{ m}^3/\text{s}$) después de 3 horas y 10 minutos. Posteriormente comenzó a descender el caudal entrante hasta que, bajo condiciones de pleamar, se detuvo bruscamente y se invirtió el sentido del flujo de la corriente. Durante la vaciante, de nuevo aumentó el caudal alcanzándose los valores máximos ($490 \text{ m}^3/\text{s}$) tras 1 hora y 15 minutos. Estos valores se mantuvieron durante aproximadamente 2 horas. Desde ese momento, los valores de caudal descendieron y comenzó un nuevo ciclo mareal.

En condiciones de mareas muertas el rango mareal medido en el punto V1 de la bocana exterior fue de 1,73 m. El volumen de agua calculado que se introdujo en el estuario fue de $3,20 \times 10^6 \text{ m}^3$, mientras que el volumen de agua que salió del estuario durante ese ciclo mareal fue de $2,72 \times 10^6 \text{ m}^3$ debido a la variación del nivel entre dos bajamares o pleamares consecutivas. Durante la bajamar la dirección de flujo se invirtió con respecto al ciclo mareal previo y alcanzó valores casi nulos (Figura 62). Tras 3 horas de incremento paulatino del caudal durante la fase llenante se alcanzaron los máximos valores de caudal ($240 \text{ m}^3/\text{s}$, menos de la mitad de su valor en condiciones de mareas vivas) que se mantuvieron durante 1 hora. Posteriormente, el caudal disminuyó de modo paulatino hasta alcanzar la pleamar donde se invirtió el sentido del flujo y comenzó la



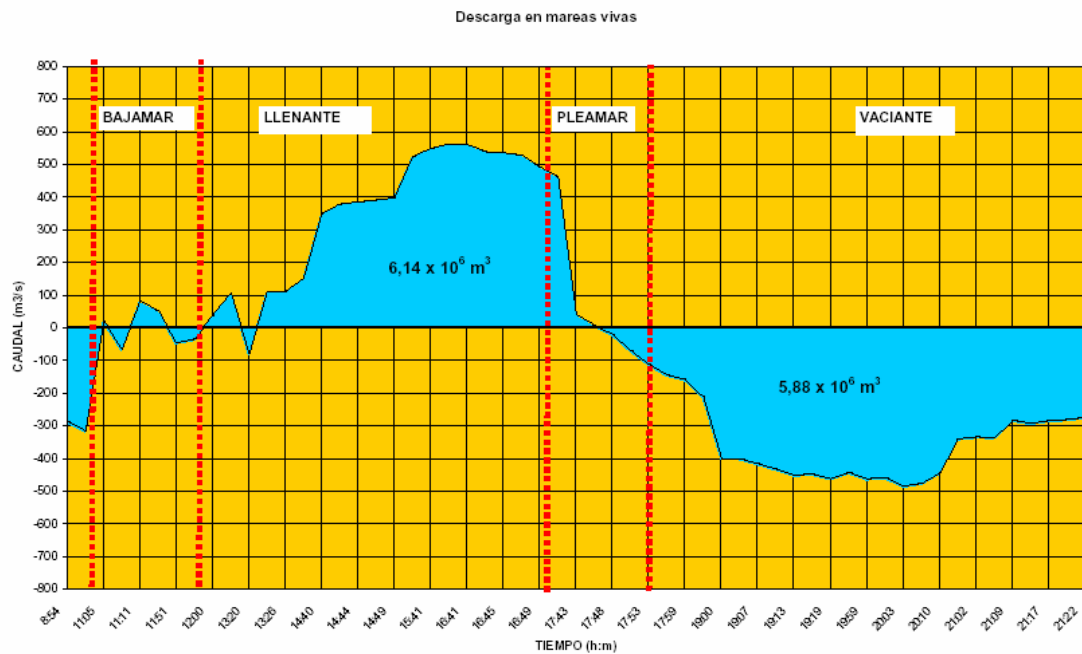
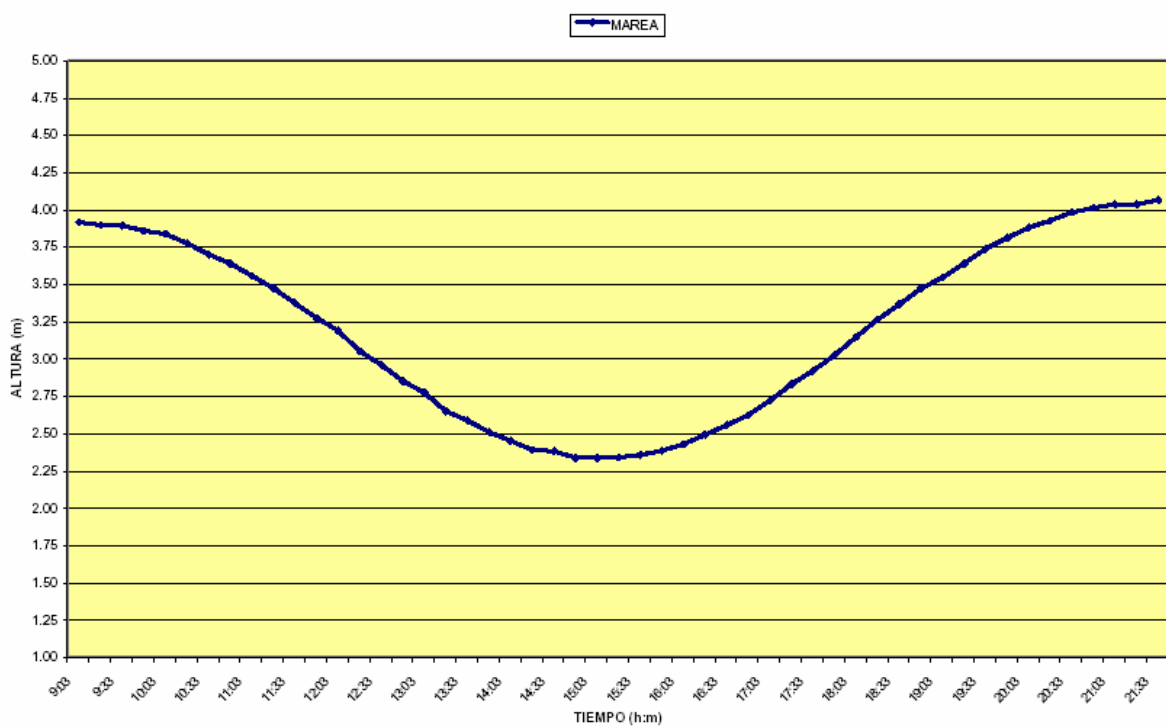


Figura 61. Ciclo de marea y volumen de agua entrante y saliente a través de la bocana en condiciones de mareas vivas (8 de Mayo 2005).

fase vaciante, que tras 2 horas alcanzó sus valores máximos de caudal ($216 \text{ m}^3/\text{s}$) que permanecieron estables durante 1 hora. A partir de ese momento el caudal disminuyó paulatinamente hasta alcanzar valores nulos durante la bajamar.



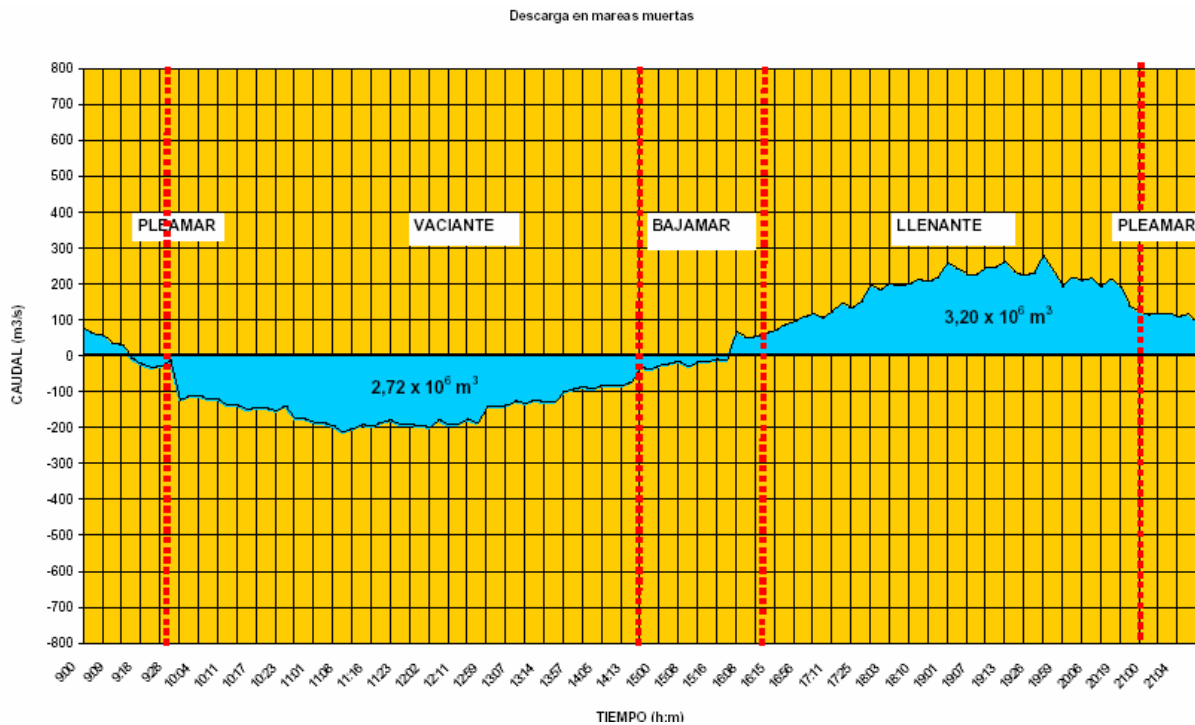


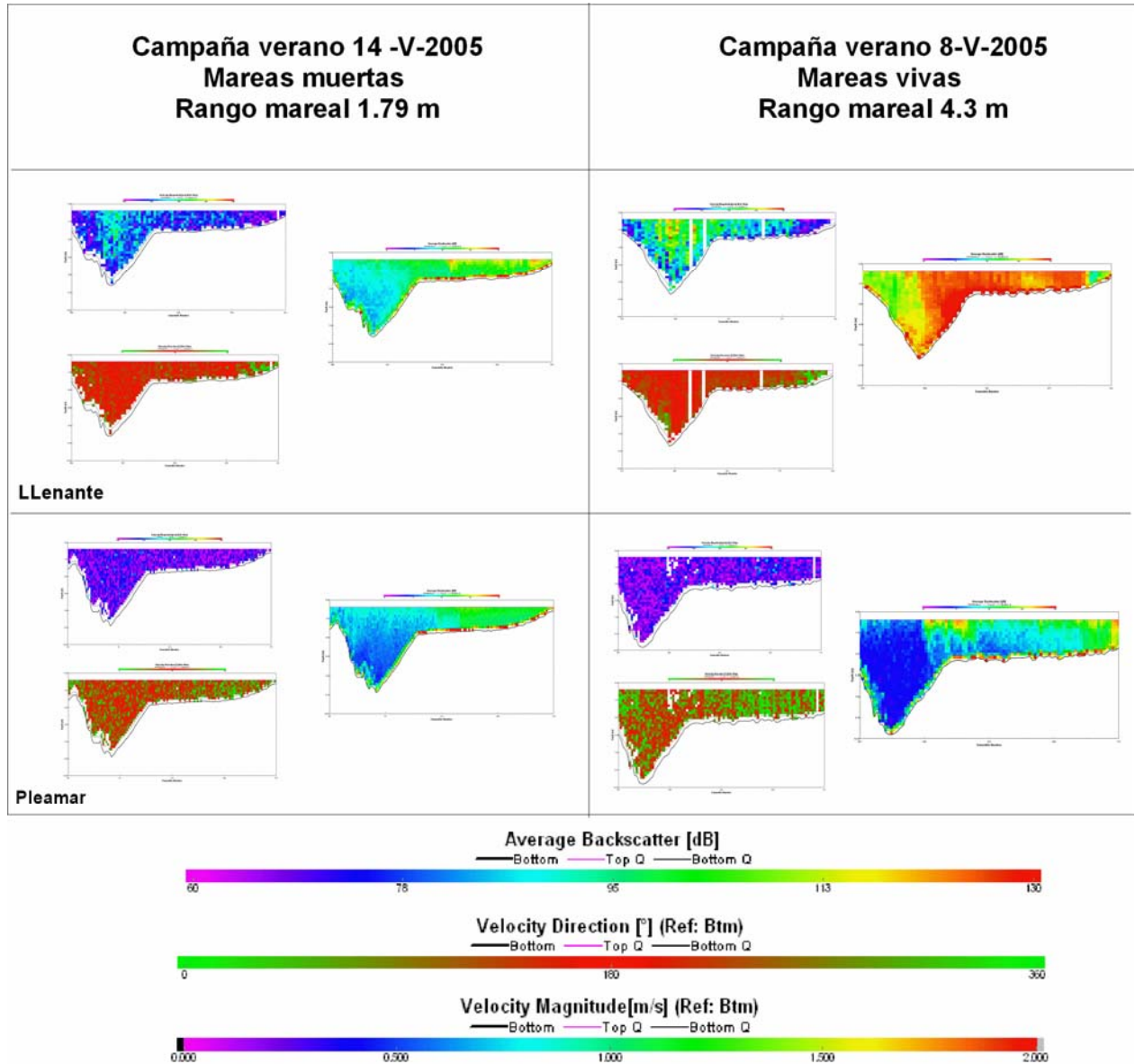
Figura 62. Ciclo de marea y volumen de agua entrante y saliente a través de la bocana en condiciones de mareas muertas (14 de Mayo 2005).

Estos valores, $6 \times 10^6 \text{ m}^3$ de prisma de marea en mareas vivas y $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ en mareas muertas, concuerdan con los obtenidos previamente mediante estimaciones teóricas por Villate, F. *et al.* (1989) quienes calcularon un prisma mareal medio en este estuario de $4,9 \times 10^6 \text{ m}^3$.

2.3.2.2. Velocidad y dirección

Durante la época estival, el análisis de los datos obtenidos bajo condiciones de mareas vivas muestra importantes variaciones en la velocidad y dirección de las corrientes a lo largo de un ciclo mareal (Figura 63). Así, durante la bajamar se obtuvieron en todo el transecto de la bocana interior unas velocidades bajas que oscilaron entre 0-0,7 m/s y la dirección mostró componentes tanto Norte como Sur, siendo dominantes las primeras. Durante la fase llenante, los márgenes de la bocana interior mostraron unas velocidades inferiores (0-0,5 m/s) a las observadas en la parte central de la misma (1-1,8 m/s) cuyos valores registrados fueron los más elevados de todo el ciclo mareal. En esta fase, la dirección del flujo fue netamente de componente Norte aunque se observaron remolinos de sentido contrario en la zona Este de la bocana. Durante la pleamar se midieron en la bocana velocidades de flujo muy bajas comprendidas entre 0-0,4 m/s, mientras que la dirección presentó tanto componentes Norte como Sur, siendo dominantes estas últimas.

Por último, durante la fase vaciante, se observaron velocidades comprendidas entre 0,5-1 m/s con una dirección de flujo totalmente Sur.



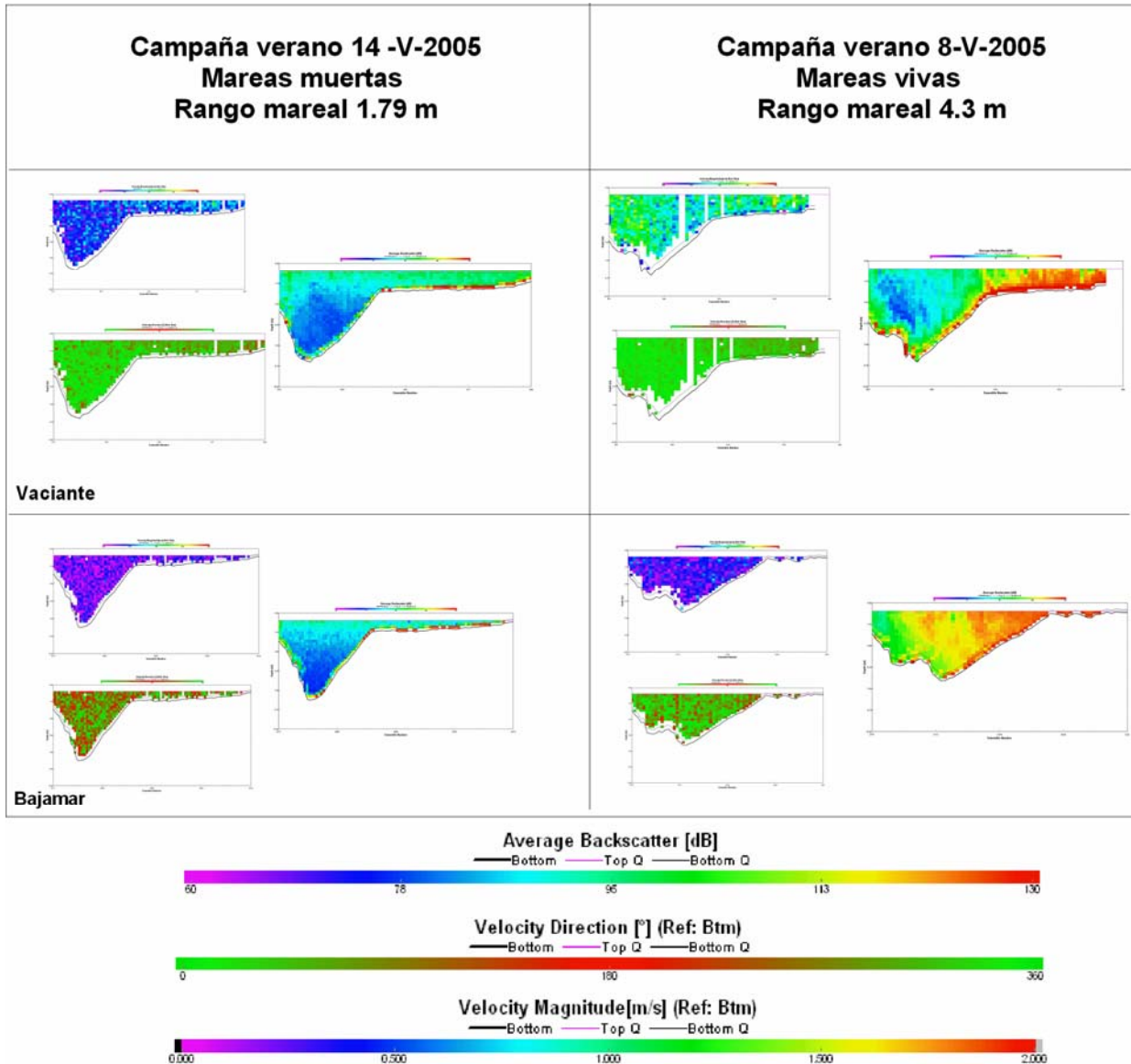
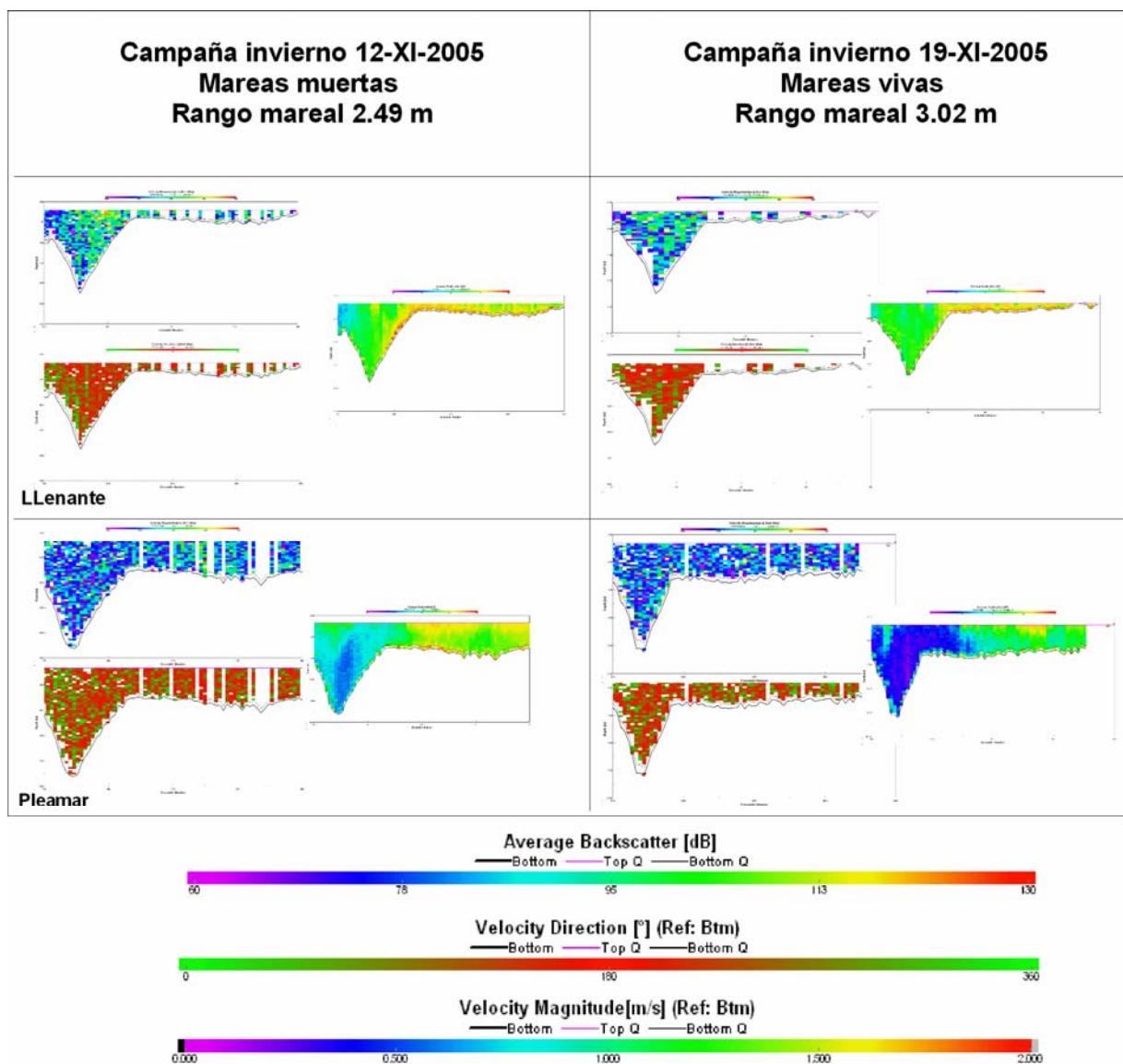


Figura 63. Velocidad y dirección de las corrientes mareales, y transporte sedimentario a lo largo de un ciclo mareal completo en la bocana interior bajo condiciones de mareas muertas y vivas en verano.

Durante las mareas muertas, en líneas generales, se repitió el esquema descrito anteriormente para las condiciones de mareas vivas aunque la magnitud de los procesos apareció atenuada (Figura 63). Así, durante la bajamar la velocidad de la corriente fue pequeña en toda la sección (0-0,5 m/s) y la dirección presentó un dominio Norte aunque también apareció cierta componente de sentido contrario. Durante la fase llenante los

márgenes presentaron menores velocidades (0-0,5 m/s) que la zona central de la bocana, con valores que oscilaron de media entre 0,8-1 m/s. La dirección fue netamente Norte con algún remolino de sentido contrario en la zona Este. En pleamar, la velocidad de la corriente osciló entre 0-0,4 m/s a lo largo de toda la sección y la dirección presentó componentes tanto Norte como Sur, con un dominio de estas últimas. Por último, durante la fase vaciante las velocidades observadas oscilaron entre 0,3-0,7 m/s y la dirección del flujo fue totalmente Sur.



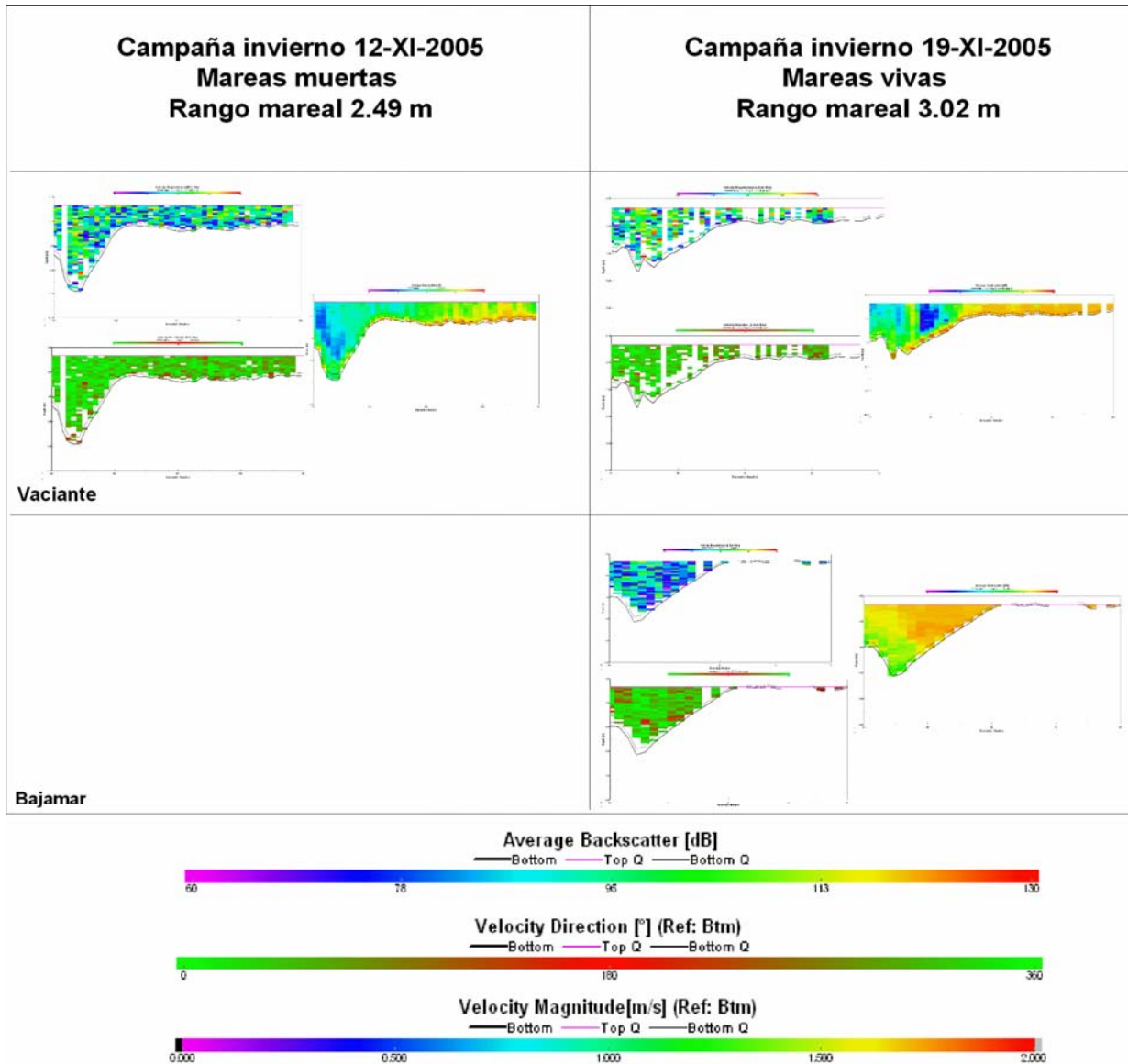


Figura 64. Velocidad y dirección de las corrientes mareales, y transporte sedimentario a lo largo de un ciclo mareal completo en la bocana interior bajo condiciones de mareas muertas y vivas en invierno.

Bajo las condiciones invernales se ha mantenido el patrón de funcionamiento presentado para la dirección y velocidad de las corrientes mareales durante el verano (Figura 64).

2.3.3. Transporte sedimentario

Con el fin de caracterizar el sedimento transportado en la columna de agua, se recogieron muestras de sedimento en suspensión mediante botella Niskin de 1,7 l (Figura 65). El muestreo se realizó a diferentes profundidades e intensidades de turbidez que fueron registradas a lo largo de los transectos.



Figura 65. Toma de muestras de sedimento en suspensión y aspecto del sedimento recogido bajo la lupa binocular.

Las muestras fueron filtradas a través de luz de malla de 45 micras, y el sedimento recogido en los mismos fue secado y pesado, obteniéndose para cada muestra su concentración en mg/l (Figura 65). El sedimento obtenido se caracterizó por un predominio de los tamaños de grano correspondientes a arena media-fina constituida mayoritariamente por cuarzo y bioclastos de organismos carbonatados marinos. Los tamaños de grano más finos estaban dominados por minerales de la arcilla (filosilicatos).

El ADCP registra la cantidad de sólidos que son transportados dentro de la columna de agua en suspensión a lo largo de cada transecto en términos de intensidad (*Backscatter*, dB).

Tanto en condiciones estivales como invernales, durante las mareas vivas se registraron importantes diferencias en las distintas fases del ciclo mareal (Figuras 63 y 64). Así, durante la bajamar se observó un importante gradiente negativo desde el Este hacia el Oeste de la bocana tanto en los sólidos en suspensión como en la carga de fondo, pasando de valores alrededor de 120 dB hasta valores de 90 dB. Durante la fase llenante del ciclo mareal se extendió hacia el Oeste la pluma de sedimentos con valores de 120 dB en prácticamente toda la sección, excepto en el margen Oeste donde alcanzó la mitad de ese valor. En el margen Este donde se situaba el remolino se produjo una disminución importante del transporte sedimentario (110-80 dB). Durante la pleamar, el transporte mediante carga de fondo fue importante en el margen Este (120 dB) mientras que alcanzó valores netamente inferiores en el canal (90 dB). Del mismo modo, el transporte

en suspensión tuvo lugar principalmente en el margen Este (90 dB) y apenas se produjo en el canal (60 dB). Por último, durante la fase vaciante, el sedimento se transportó abundantemente como carga de fondo por toda la sección (120 dB) mientras que el transporte en suspensión mostró un gradiente negativo desde el Este más somero (120 dB) hacia el Oeste más profundo (60 dB).

Por otra parte, bajo condiciones de mareas muertas se observó un transporte sedimentario de características similares al registrado durante las mareas vivas, aunque con una intensidad más atenuada (Figuras 63 y 64). Así, durante la bajamar se observó un gradiente negativo de Este a Oeste de la bocana tanto en la carga de fondo como en el transporte en suspensión, oscilando los valores entre 120 dB en la zona Este más somera y 90 dB en la zona Oeste más profunda para la carga de fondo. Los materiales en suspensión mostraron una oscilación en el mismo sentido con valores comprendidos entre 70 dB y 60 dB. Durante la fase llenante, también se observó un gradiente desde las zonas más someras a las más profundas con valores que alcanzaron entre 120-70 dB para la carga de fondo y una variación entre 100-60 dB para los sedimentos en suspensión. Durante la pleamar se mantuvo el gradiente antes mencionado oscilando los valores en sentido Este-Oeste entre los 120 dB del primer caso y los 90 dB del segundo para la carga de fondo. Los materiales en suspensión oscilaron entre los 90 dB de las zonas someras y los 60 dB medidos en el canal, concentrándose en este último caso principalmente dentro de los dos primeros metros de la columna de agua. Por último, durante la fase vaciante, la situación fue similar a la anterior pero los materiales en suspensión se concentraron en los dos primeros metros de toda la sección transversal a la bocana interior.

Tras realizar la suma de los valores de *Backscatter* obtenidos para cada transecto realizado en condiciones estivales, cada registro aporta una indicación cualitativa del sedimento que se transporta durante los ciclos mareales estudiados. En estos registros de transporte sedimentario, se observa claramente una diferenciación entre la fase llenante y vaciante del ciclo mareal produciéndose un punto de inflexión durante las fases de bajamar y pleamar. Así, durante las mareas vivas se obtuvieron mayores valores absolutos de *Backscatter* debido al mayor volumen de agua movilizado y a la mayor capacidad tractiva de esta masa de agua con respecto a las condiciones de mareas muertas (Figura 66). Dentro de cada ciclo mareal se diferencian claramente los flujos de entrada (Sur) y salida (Norte) presentando cada uno de ellos dos etapas netamente diferentes. Así, el flujo sedimentario de entrada muestra los mayores valores de transporte durante las fases llenante y pleamar mientras que durante la vaciante la

cantidad de sedimento transportado es casi nula en mareas vivas y pequeña en mareas muertas. Por el contrario, el flujo de salida estuarino presenta su mayor capacidad de transporte durante la fase vaciante.

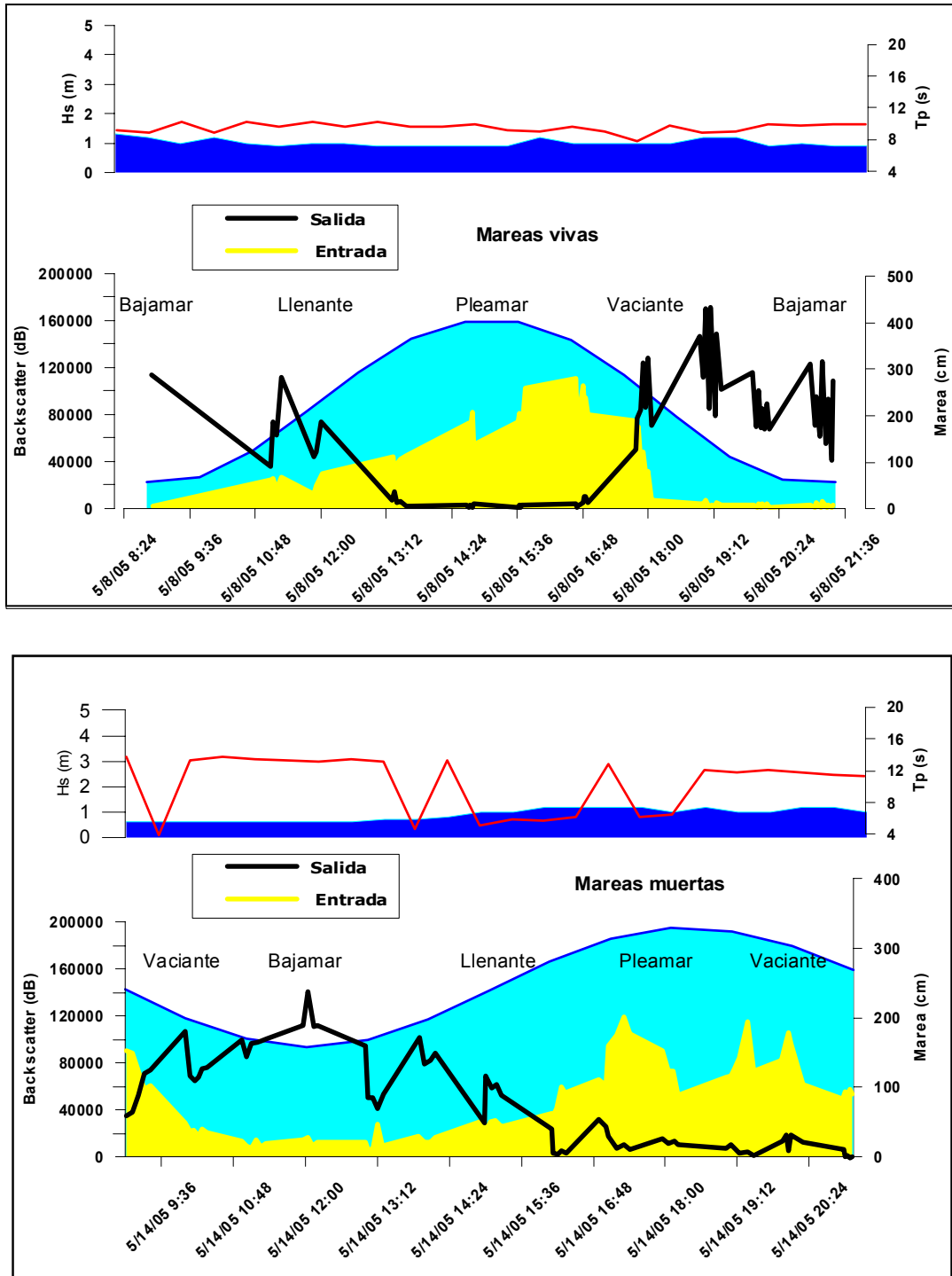


Figura 66. Backscatter del sedimento transportado a través de la bocana del estuario a lo largo de un ciclo mareal bajo condiciones de mareas vivas y muertas en verano. Se muestran además los parámetros del oleaje medidos en la boya de Bilbao-Vizcaya durante la campaña.

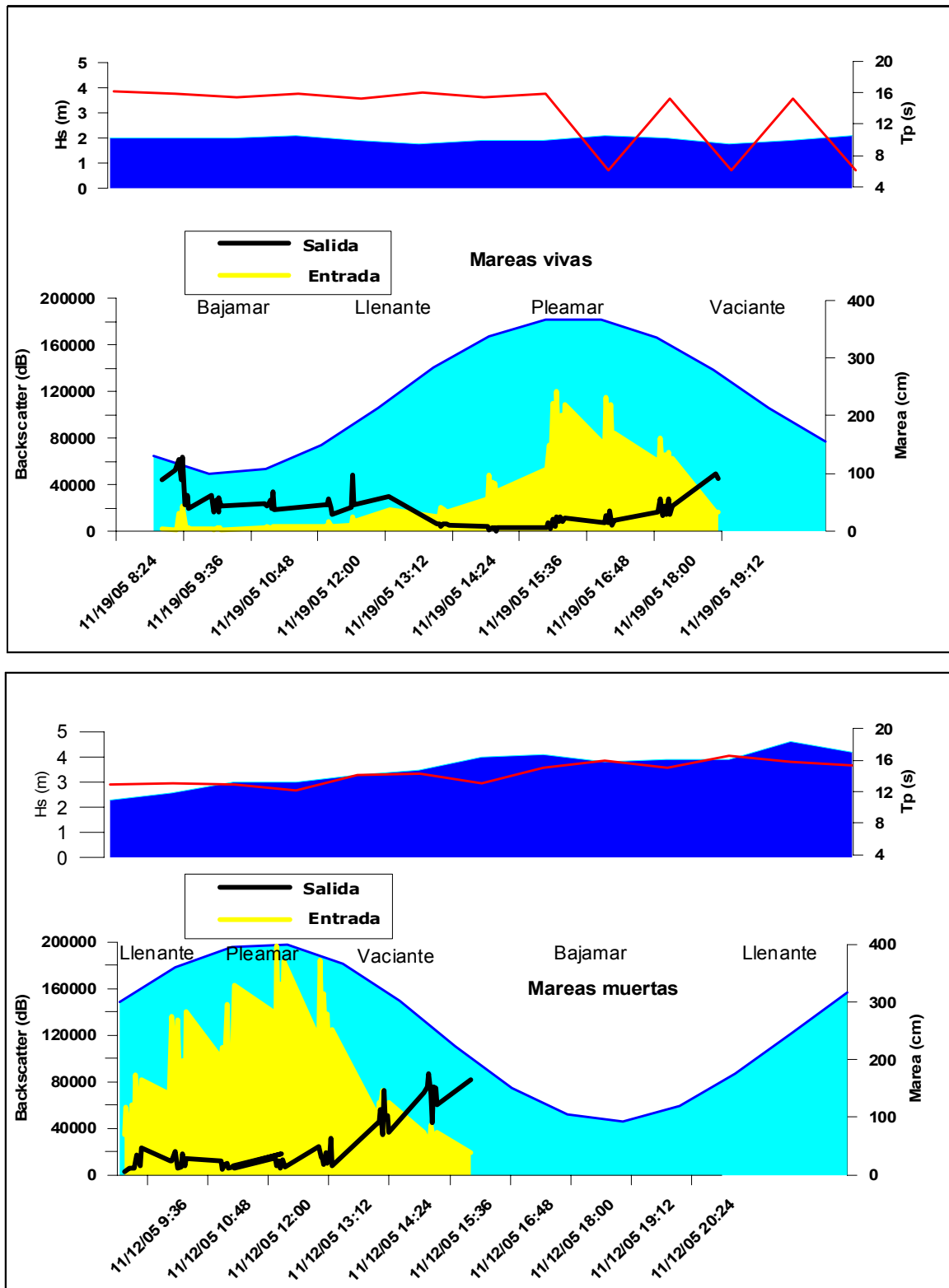


Figura 67. Backscatter del sedimento transportado a través de la bocana del estuario a lo largo de un ciclo mareal bajo condiciones de mareas vivas y muertas en invierno. Se muestran además los parámetros del oleaje medidos en la boya de Bilbao durante la campaña.

A partir de los datos obtenidos durante los transectos invernales se observa claramente una diferenciación entre la fase llenante y vaciante del ciclo mareal produciéndose un punto de inflexión durante las fases de bajamar y pleamar. Así, durante las mareas vivas se obtuvieron menores valores absolutos de *Backscatter* debido a la menor incidencia del oleaje a pesar del mayor volumen de agua movilizado (Figura 67). Por el contrario, los mayores valores de *Backscatter* registrados durante las mareas muertas han sido consecuencia del elevado aporte de sedimento por las corrientes producidas por rotura del oleaje. Dentro de cada ciclo mareal se diferencian claramente los flujos de entrada (Sur) y salida (Norte) presentando cada uno de ellos dos etapas netamente diferentes. Así, el flujo sedimentario de entrada muestra los mayores valores de transporte durante las fases llenante y pleamar mientras que es casi nulo durante la vaciante y pequeño en bajamar. Por el contrario, el flujo de salida estuarino presenta su mayor capacidad de transporte durante la fase vaciante.



Figura 68. Porcentaje de sedimento transportado durante un ciclo mareal bajo condiciones de mareas vivas, un ciclo mareal bajo condiciones de mareas muertas y durante el período estival (Mayo-Octubre 2005).

Si comparamos estos resultados, observamos que durante el período estival caracterizado por la ausencia de oleaje significativo predomina ligeramente el transporte sedimentario hacia fuera del estuario (55%), con respecto a la cantidad de sedimento que entra hacia el interior (45%) (Figura 68). Este predominio se debe a la erosión del margen Sur de Laida que introduce dentro de la fase vaciante sedimento que va a ser exportado hacia la zona exterior del estuario a través de la desembocadura. Si analizamos las diferentes condiciones de marea, se observa que durante las mareas muertas el balance sedimentario de entrada en el estuario es dominante con respecto al

de salida, mientras que durante las mareas vivas, por el contrario, predomina la salida de sedimento hacia fuera del estuario.

Por el contrario, durante el periodo invernal caracterizado por la presencia de oleaje significativo predomina el transporte sedimentario hacia dentro del estuario (69%) con respecto a la cantidad de sedimento que sale hacia el exterior (31%) (Figura 69). Este predominio se debe a la erosión del margen Norte de Laida que introduce dentro de las fases llenante y pleamar sedimento que va a ser importado hacia la zona interior del estuario a través de la desembocadura. Si analizamos las diferentes condiciones de marea, se observa que durante las mareas muertas el balance sedimentario de entrada en el estuario es muy dominante con respecto al de salida, mientras que durante las mareas vivas se mantiene el mismo patrón pero con una entidad ligeramente menor.

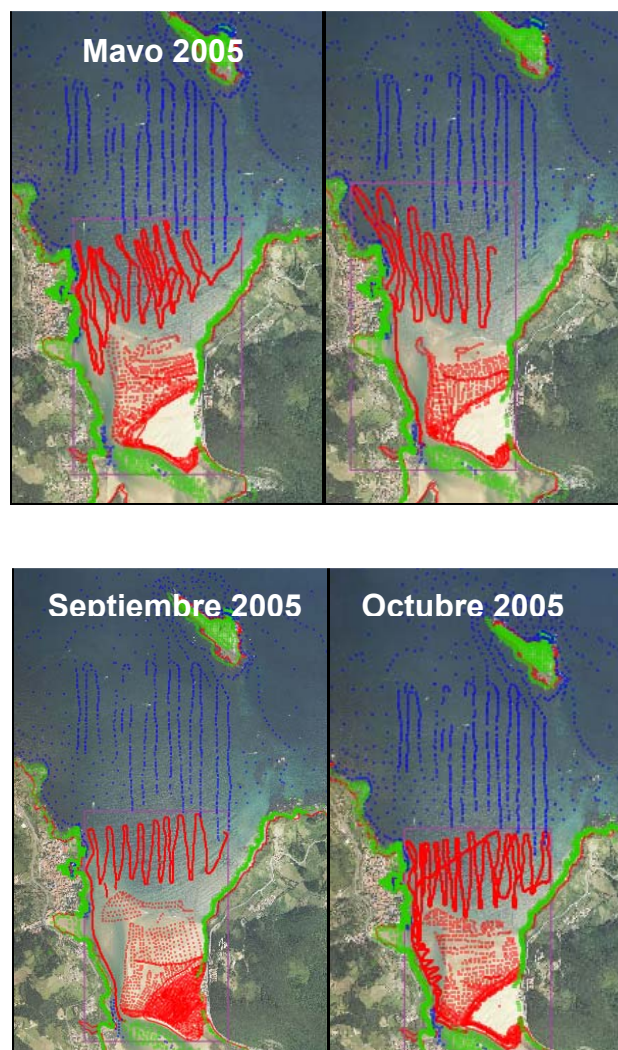


Figura 69. Porcentaje de sedimento transportado durante un ciclo mareal bajo condiciones de mareas vivas, un ciclo mareal bajo condiciones de mareas muertas y durante el período invernal (Noviembre 2005-Abril 2006).

3. Discusión

3.1. Modelo de evolución temporal del oleaje

Mediante la simulación numérica se pretenden propagar los oleajes registrados en la boya exterior del Puerto de Bilbao (Red de Puertos del Estado) hasta la zona exterior de la desembocadura del Oka, obteniendo así las características principales del oleaje y su participación en la dinámica sedimentaria de esa desembocadura tanto para condiciones de pleamar como de bajamar. Se han simulado los oleajes correspondientes a los meses para los que se dispone simultáneamente de información batimétrica y topográfica del área de estudio (Figura 70).



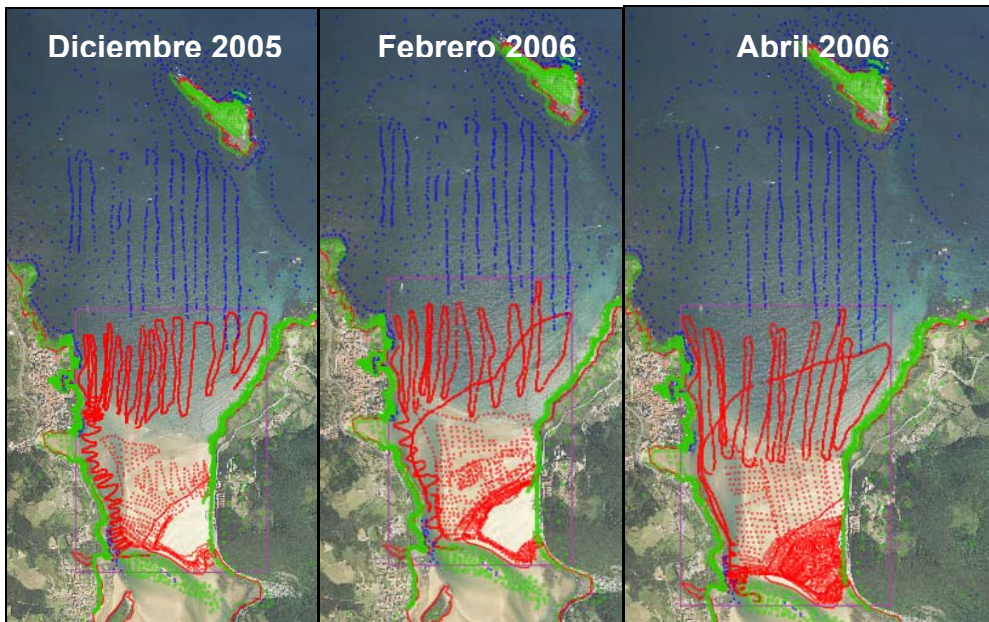


Figura 70. Nubes de puntos batimétricos y topográficos utilizadas en las simulaciones de propagación del oleaje.

En la simulación se ha empleado el programa MOPLA que es una herramienta numérica que forma parte de las herramientas de análisis morfodinámico en una escala espacio-temporal a corto plazo de playas (Acordes) del Sistema de Modelado Costero (SMC) desarrollado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (GIOC) de la Universidad de Cantabria para la Dirección General de Costas del Ministerio de Medio Ambiente. Este programa se compone de 6 modelos numéricos que simulan la propagación del oleaje (tanto monocromático como espectral), el sistema de corrientes

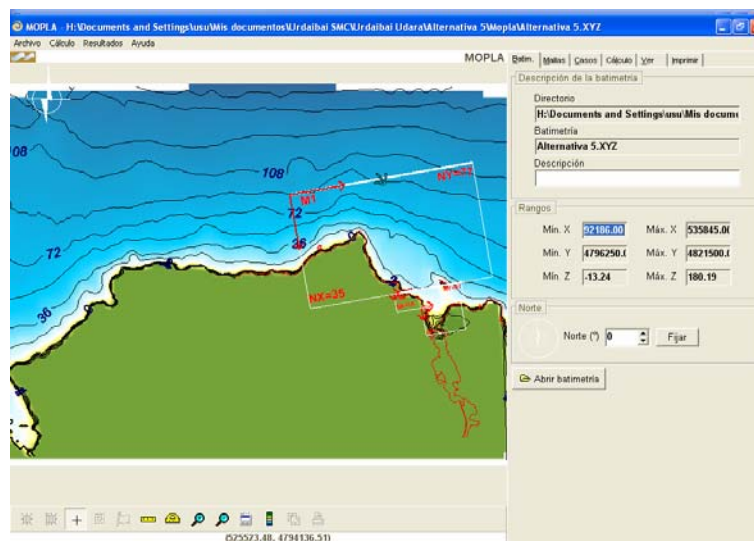
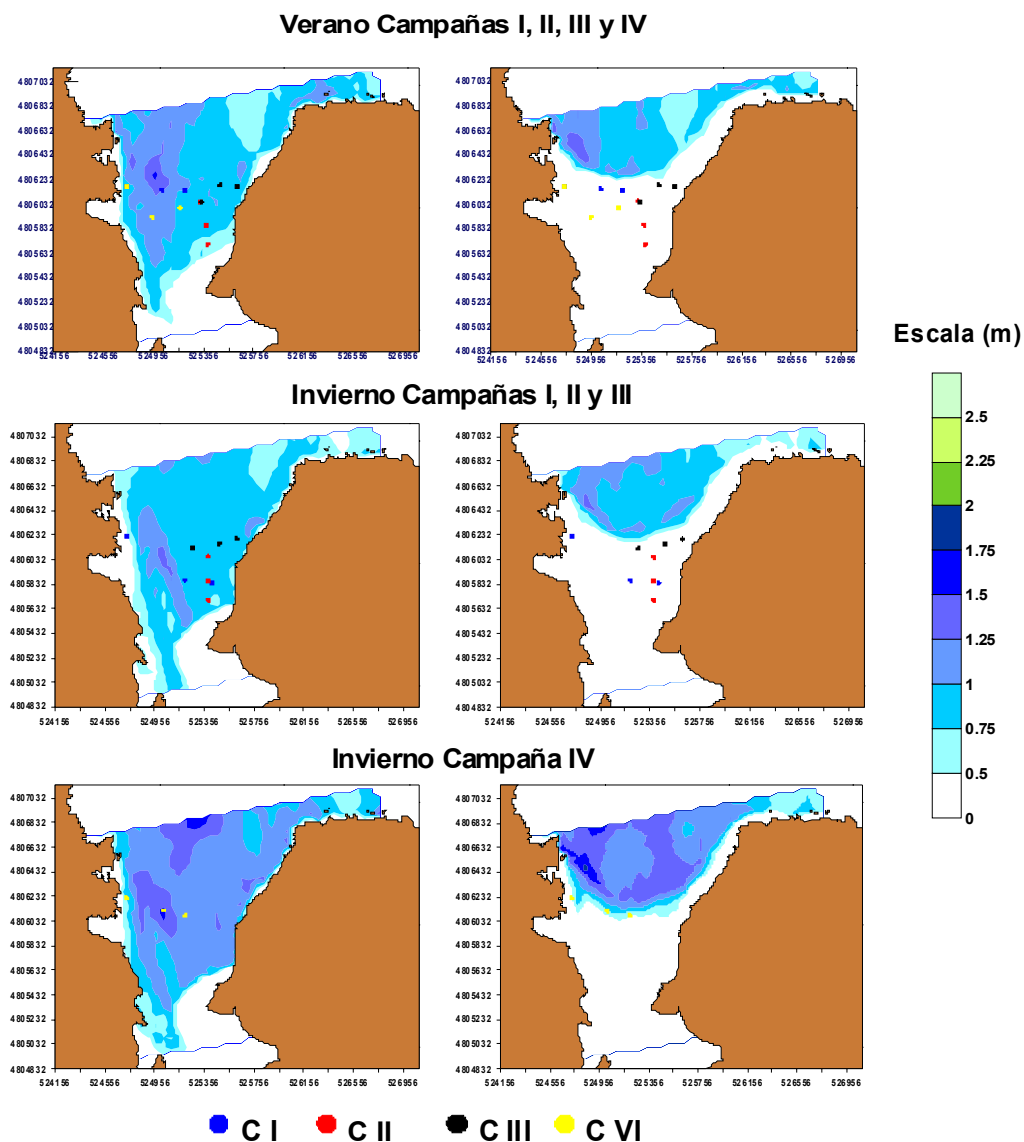


Figura 71. Herramienta de simulación de oleaje MOPLA.

inducido por la rotura del oleaje, el cálculo del transporte de sedimentos y la evolución de la batimetría (Figura 71).

MOPLA permite definir mallas anidadas de diferentes tamaños para poder ajustar el nivel de detalle a la escala de variación del oleaje en cada profundidad, optimizando así el tiempo de cálculo. Para propagar el oleaje desde profundidades indefinidas (fuera de la plataforma) hasta la zona de detalle se han utilizado 3 mallas.

Una vez definidas las mallas, se realizó la calibración del modelo utilizando para ello los resultados de las campañas de medidas de alta frecuencia llevadas a cabo durante los meses de Mayo 2005 y Febrero 2006 (Figura 72). Se muestra separadamente la calibración de la campaña IV de invierno ya que sus condiciones de oleaje contrastan con las del resto de las campañas invernales (Figura 44).



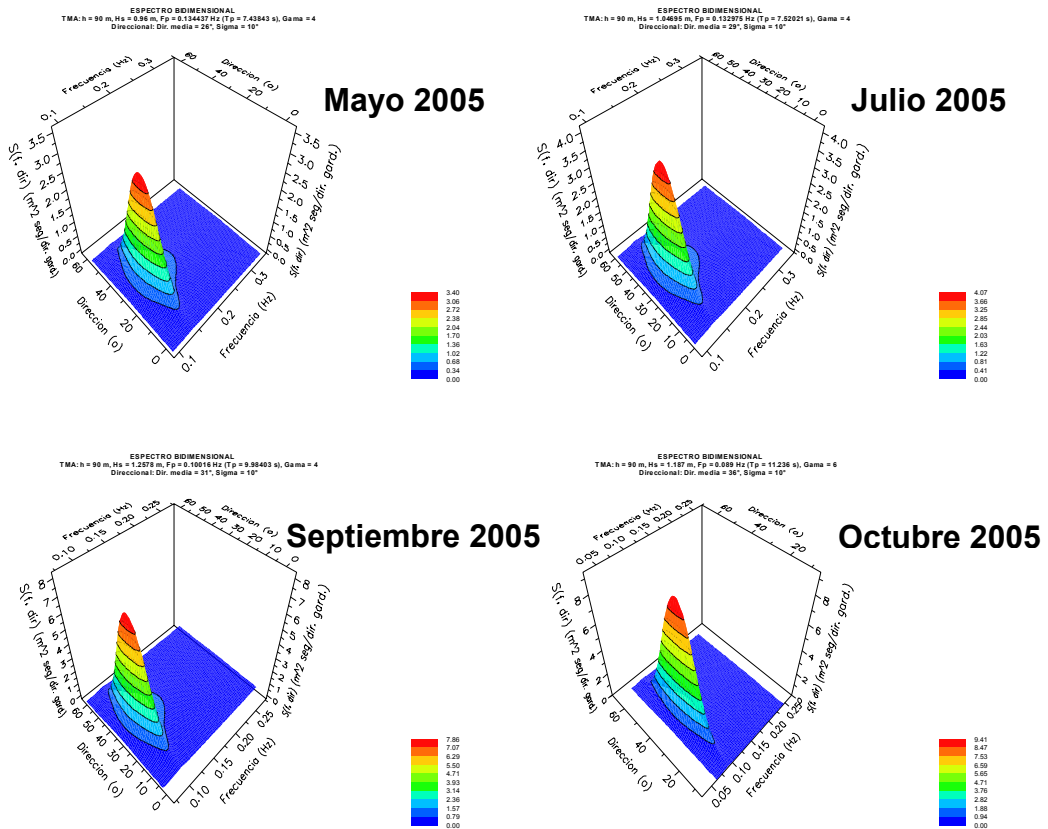
| Campaña y número de aparato | Altura significativa modelo | | Altura significativa aparato | |
|-----------------------------|-----------------------------|---------|------------------------------|---------|
| | pleamar | bajamar | pleamar | bajamar |
| VERANO | | | | |
| C1V1 | 0,5-0.75 | 0-0.1 | 0,50 | 0,15 |
| C1V2 | 0,5-0.75 | 0 | 0,60 | 0 |
| C1V3 | 0,5-0.75 | 0 | 0,65 | 0 |
| C2V1 | 0,50-0,75 | 0 | 0,40 | 0 |
| C2V2 | 0,50-0,75 | 0 | 0,50 | 0 |
| C2V3 | 0,50-0,75 | 0 | 0,55 | 0 |
| C3V1 | 0,50-0,75 | 0 | 0,40 | 0 |
| C3V2 | 0,50-0,75 | 0 | 0,40 | 0 |
| C3V3 | 0,50-0,75 | 0 | 0,40 | 0 |
| C4V1 | 0,50-0,75 | 0-0.1 | 0,20 | 0,10 |
| C4V2 | 0.75-1,0 | 0 | 0,40 | 0 |
| C4V3 | 0,50-0,75 | 0 | 0,30 | 0 |

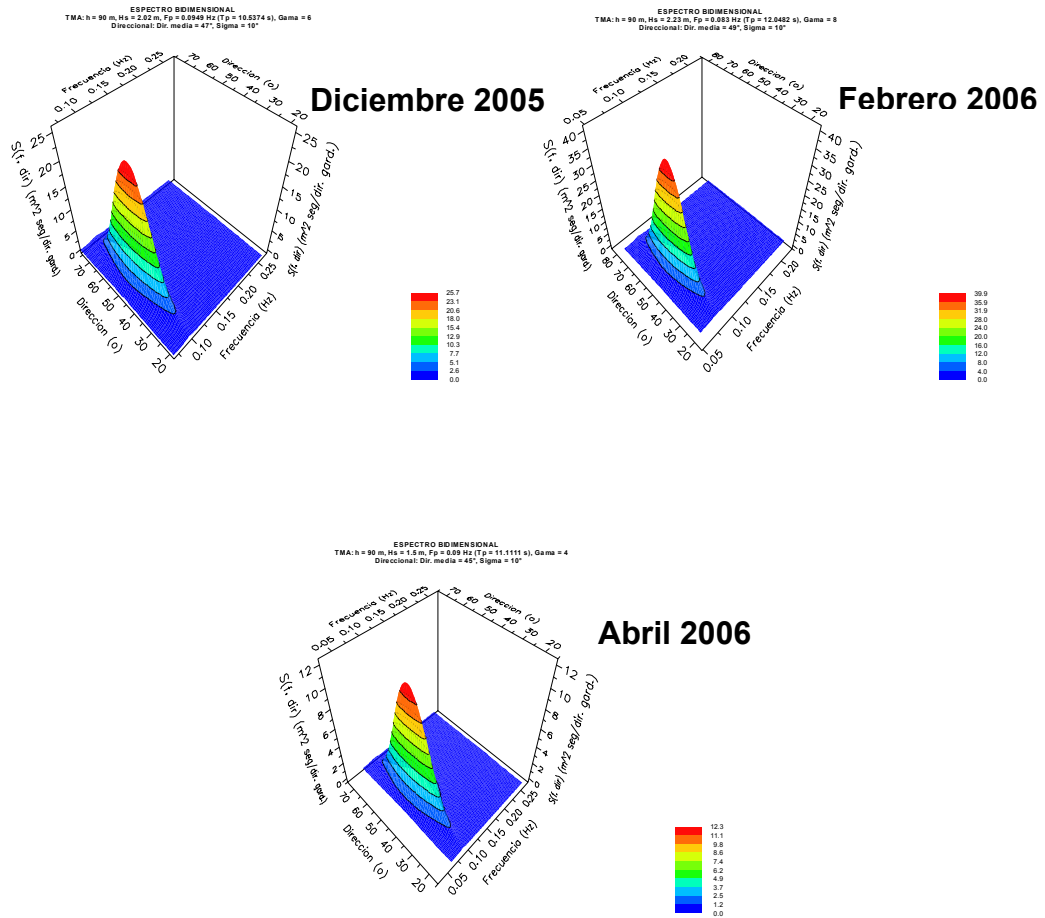
| Campaña y número de aparato | Altura significativa modelo | | Altura significativa aparato | |
|-----------------------------|-----------------------------|---------|------------------------------|---------|
| | pleamar | bajamar | pleamar | bajamar |
| INVIERNO | | | | |
| C1V1 | 0-0,5 | 0-0,5 | 0,37 | 0,10 |
| C1V2 | 0,75-1,0 | 0 | 0,34 | 0 |
| C1V3 | 0,75-1,0 | 0 | 0,50 | 0 |
| C2V1 | 0,75-1,0 | 0 | 0,50 | 0 |
| C2V2 | 0,75-1,0 | 0 | 0,60 | 0 |
| C2V3 | 0,75-1,0 | 0 | 0,60 | 0 |
| C3V1 | 0,75-1,0 | 0 | 0,33 | 0 |
| C3V2 | 0,75-1,0 | 0 | 0,31 | 0 |
| C3V3 | 0,75-1,0 | 0 | 0,30 | 0 |
| C4V1 | 0,75-1,0 | 0-0,5 | 0,50 | 0 |
| C4V2 | 1,25-1,5 | 0 | 0,70 | 0 |
| C4V3 | 1,0-1,25 | 0 | 0,68 | 0 |

Figura 72. Calibración de la altura significativa de ola.

La calibración realizada ha mostrado una pequeña diferencia entre los valores reales y los propuestos por el modelo que en casi todos los casos fueron ligeramente superiores (Figura 72). En consecuencia, el modelo se considera adecuado para el área estudiada.

Tomando como base el modelo calibrado, se simuló el oleaje registrado en la boya exterior de Bilbao-Vizcaya durante dichas campañas de medida y se eligieron los distintos parámetros del modelo que mejor ajustaban la distribución del oleaje a los datos reales (Figura 73).





| | Hs: Altura significativa (m) | Tp: Periodo de pico (s) | Dirección de propagación | Rangos de marea (pleamar/bajamar) (m) |
|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--|
| Mayo 2005 | 0,96 | 7,44 | N26°W | 4,41/0,64 |
| Julio 2005 | 1,04 | 7,52 | N29°W | 4,72/0,33 |
| Septiembre 2005 | 1,26 | 9,98 | N31°W | 4,91/0,23 |
| Octubre 2005 | 1,19 | 11,24 | N36°W | 4,79/0,46 |
| Diciembre 2005 | 2,02 | 10,54 | N47°W | 4,45/0,78 |
| Febrero 2006 | 2,23 | 12,05 | N49°W | 4,81/0,13 |
| Abril 2006 | 1,50 | 11,11 | N45°W | 4,62/0,37 |

Figura 73. Espectros de oleaje utilizados para las simulaciones de propagación en la zona exterior del estuario y rangos de marea durante el periodo de estudio.

Las figuras que se muestran a continuación representan los resultados de la altura de ola en pleamar y bajamar una vez ajustados los distintos parámetros del modelo. Estos parámetros son los siguientes y serán utilizados posteriormente en las propagaciones de los distintos oleajes estudiados:

-Según la formulación empleada, en la propagación del oleaje el modelo puede ser: lineal, compuesto (modelo elegido en el estudio) o Stokes.

-La formulación empleada para simular la rotura puede ser: Thornton y Guza, Battjes y Janssen o Winyu y Tomoya (modelo elegido en el estudio).

-La formulación para simular la disipación por el fondo puede ser la correspondiente a: fondo poroso, capa límite turbulenta (modelo elegido en el estudio) o capa límite laminar.

Dada la gran importancia que posee la variabilidad estacional en las características del régimen de oleaje y en la distribución del sedimento en las playas y desembocaduras de la costa vasca, se han simulado los oleajes representativos medios de cada mes analizado (Figura 73).

En todos los casos se utilizaron oleajes espectrales con unas características adecuadas a su tipo, es decir, con unos parámetros de variabilidad direccional y frecuencial típicos de cada tipo de oleaje: baja variabilidad para el oleaje tipo *swell* y alta variabilidad para el oleaje tipo *sea*. Además, en cada caso se simularon las condiciones hidrodinámicas generadas por el oleaje en la zona de interés en dos estados de la marea (pleamar y bajamar).

En la situación característica de los meses de verano (Figuras 74 y 75) existe una gradación en la altura de ola a lo largo de la línea de costa en dirección Este-Oeste (de más a menos altura de ola) debida a la difracción de Matxitxako. Así, frente a los acantilados del margen rocoso de Ibarrangelu tenemos una altura de ola en torno a los 0,75-1 m, en la playa de Laida la altura de ola está alrededor de 0,50-0,75 m, y en la zona de la barra sobre los 1,50-1,75m.

En contraste, durante los meses de invierno la altura significativa del oleaje es muy superior respecto a la observada en condiciones estivales. Su distribución es similar en ambos extremos de la zona exterior del estuario con valores comprendidos entre 1,50-1,75 m encontrándose los valores más elevados en la zona central que superan los 2,25 m.

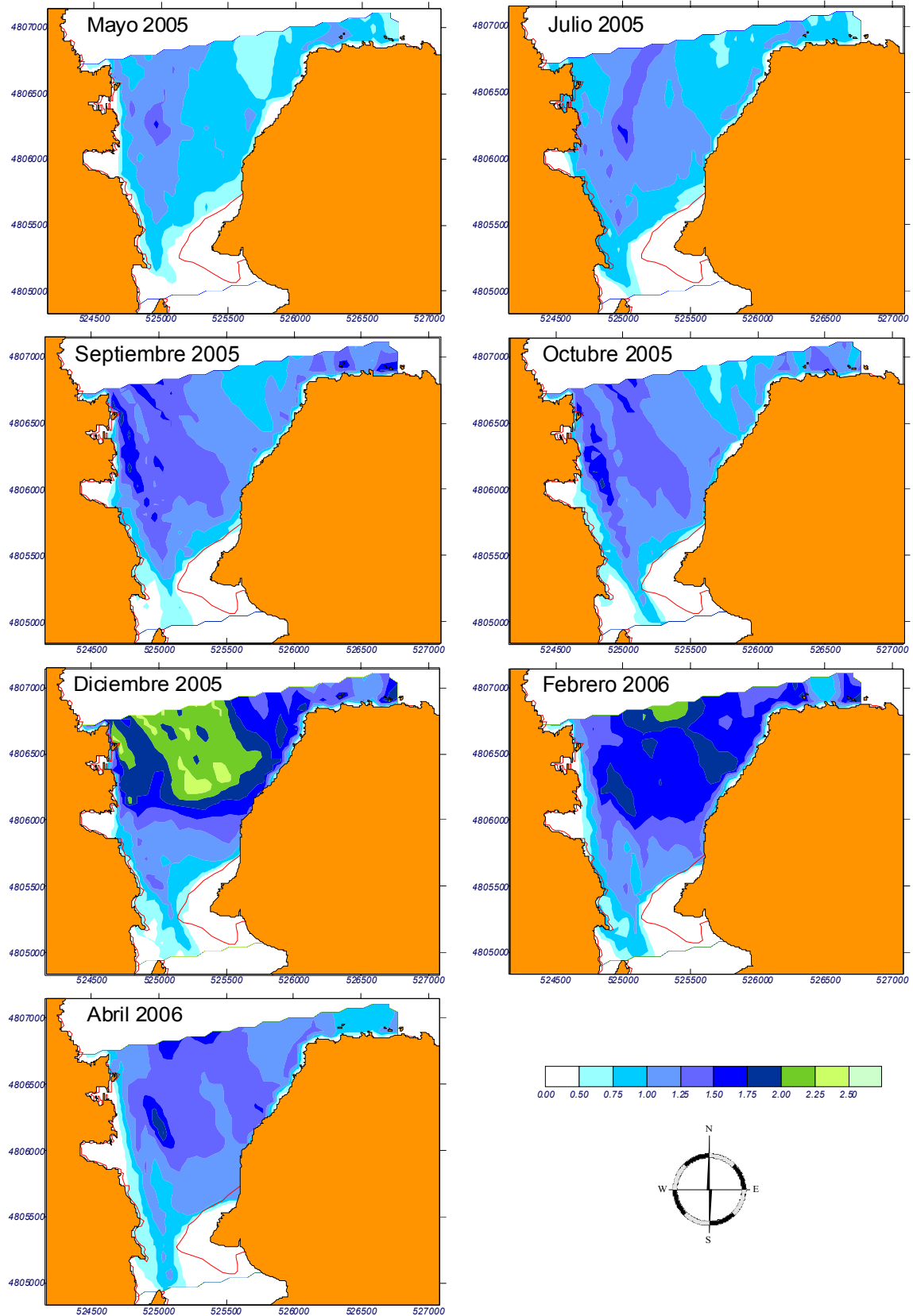


Figura 74. Altura significativa (H_s) del oleaje simulado durante la pleamar para la zona exterior del estuario a lo largo del periodo de estudio.

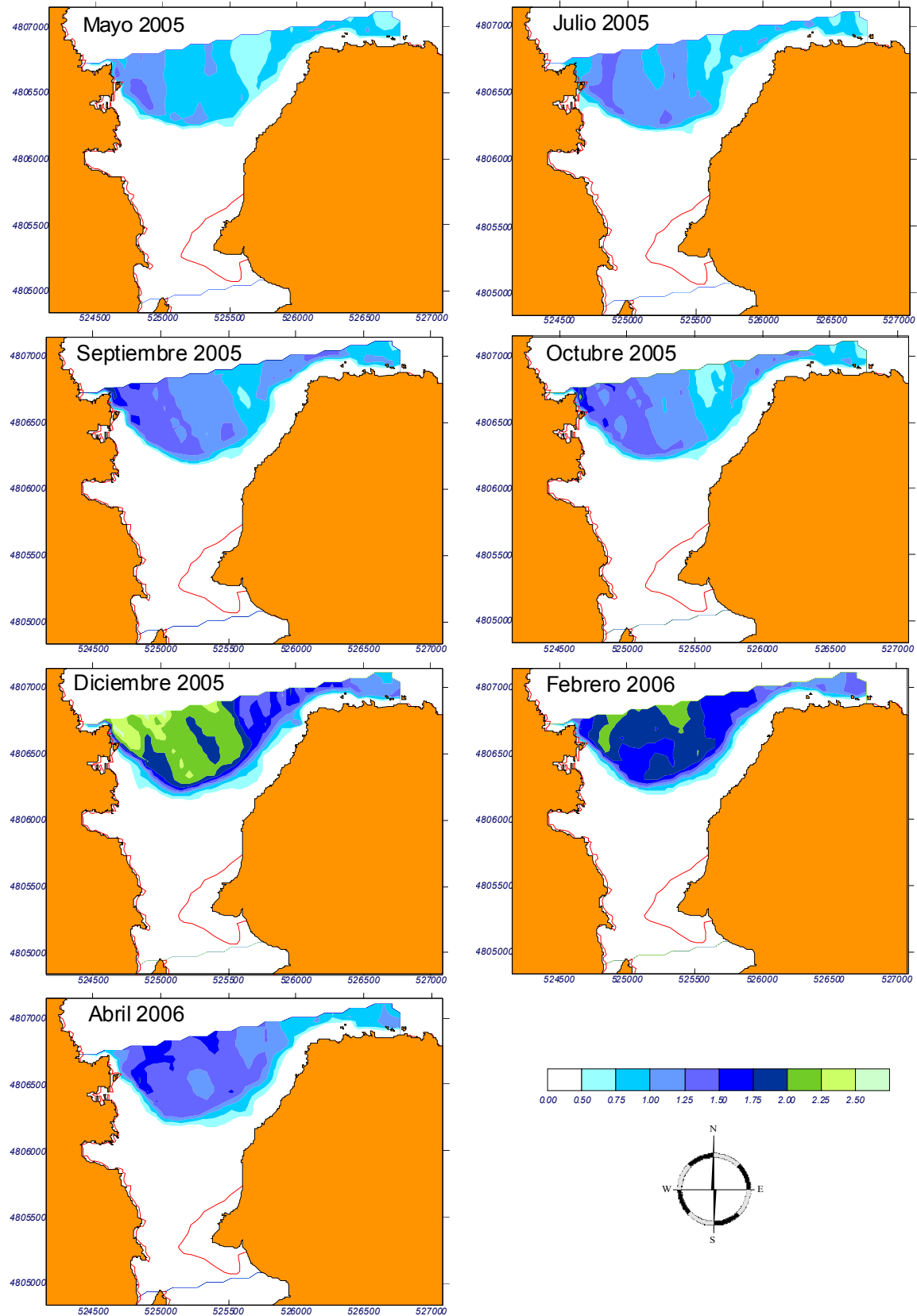


Figura 75. Altura significativa (H_s) del oleaje simulado durante la bajamar para la zona exterior del estuario a lo largo del periodo de estudio.

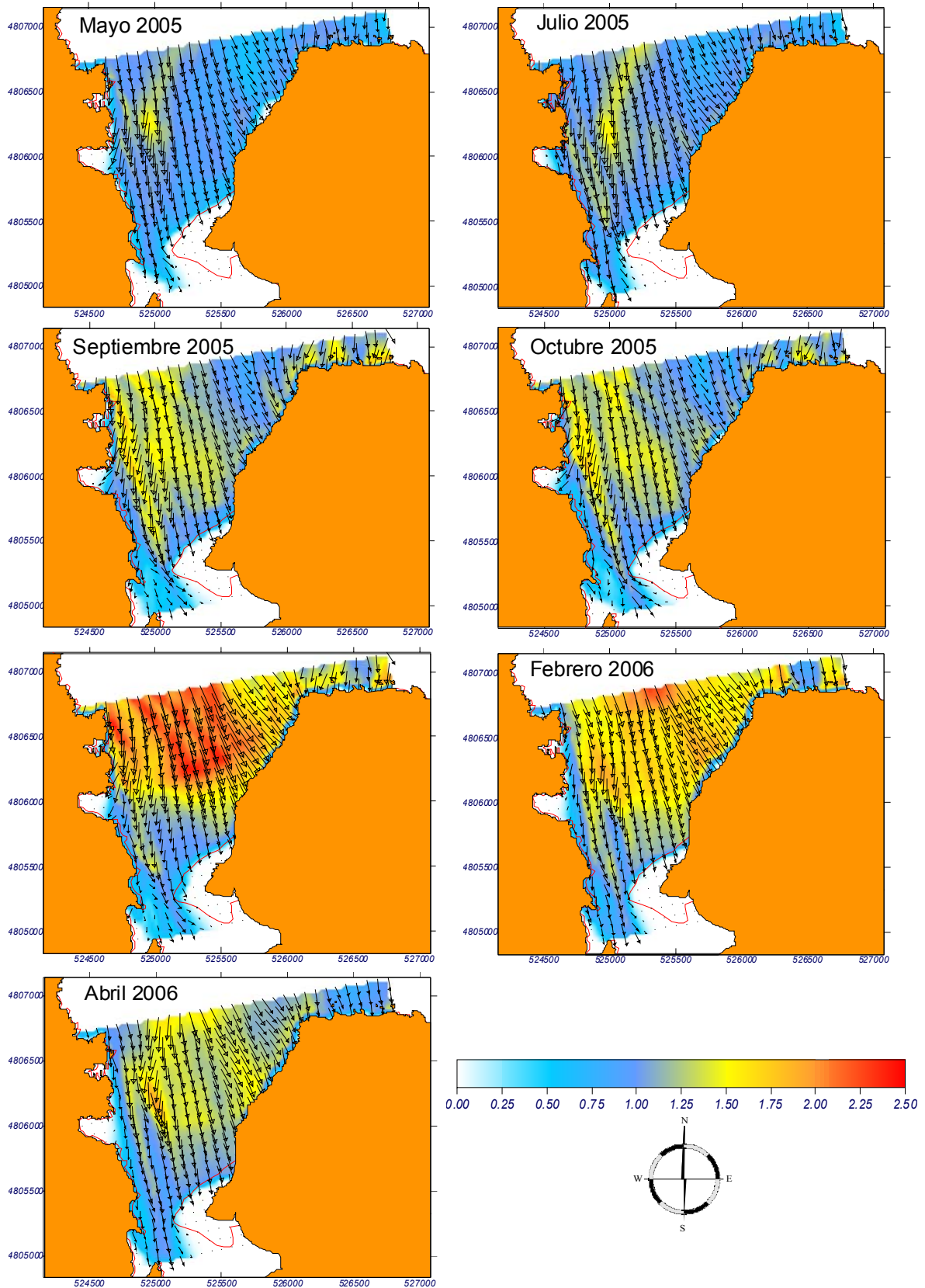


Figura 76. Altura significativa (H_s) y vectores de dirección de propagación del oleaje simulado durante la pleamar para la zona exterior del estuario a lo largo del periodo de estudio.

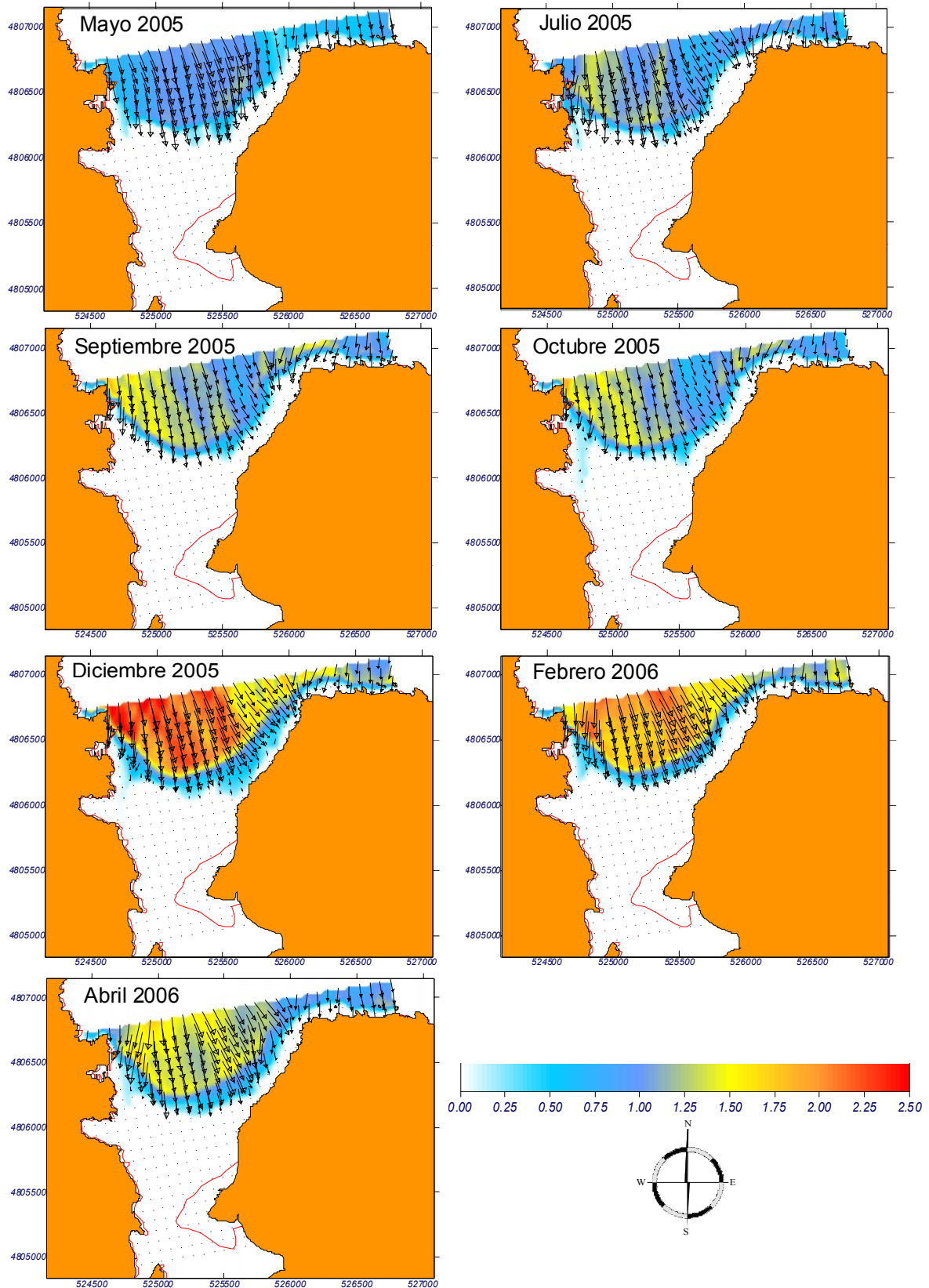


Figura 77. Altura significativa (H_s) y vectores de dirección de propagación del oleaje simulado durante la bajamar para la zona exterior del estuario a lo largo del periodo de estudio.

En cuanto a la dirección de propagación del oleaje, se observa una disposición perpendicular a las líneas batimétricas que genera, en consecuencia, una morfología en planta cóncava hacia el Norte que en la zona de la barra de Mundaka permite a los frentes de oleaje incidir oblicuamente a la barra generando la conocida ola de Mundaka (Figuras 76,77 y 78).



Figura 78. Vista aérea oblicua del oleaje incidente en el estuario exterior el día 14 de Enero 2006.

En cuanto a las corrientes en pleamar (Figuras 79), en general se aprecia un patrón de circulación Este-Oeste en todo el área de estudio generado por una célula convectiva localizada en el margen Este que va cambiando su tamaño e intensidad a lo largo del año dependiendo del espectro y de la dirección de propagación del oleaje. Así, durante el verano se alcanzan los valores mínimos de tamaño y velocidad (0-0,1 m/s), mientras que en invierno se extiende a lo largo de todo el margen Norte de la playa de Laida alcanzando valores de 0,5 m/s. En condiciones de bajamar se producen dos células convectivas que generan sendas corrientes de retorno localizadas en la zona proximal de la barra de Mundaka y en el margen Este de la bahía. Durante el verano las corrientes alcanzan valores de 0,1-0,2 m/s que van aumentando paulatinamente durante el tránsito verano/invierno (Septiembre-October) con velocidades de 0,3 m/s hasta llegar a las condiciones de invierno cuando la velocidad es de 0,4 m/s.

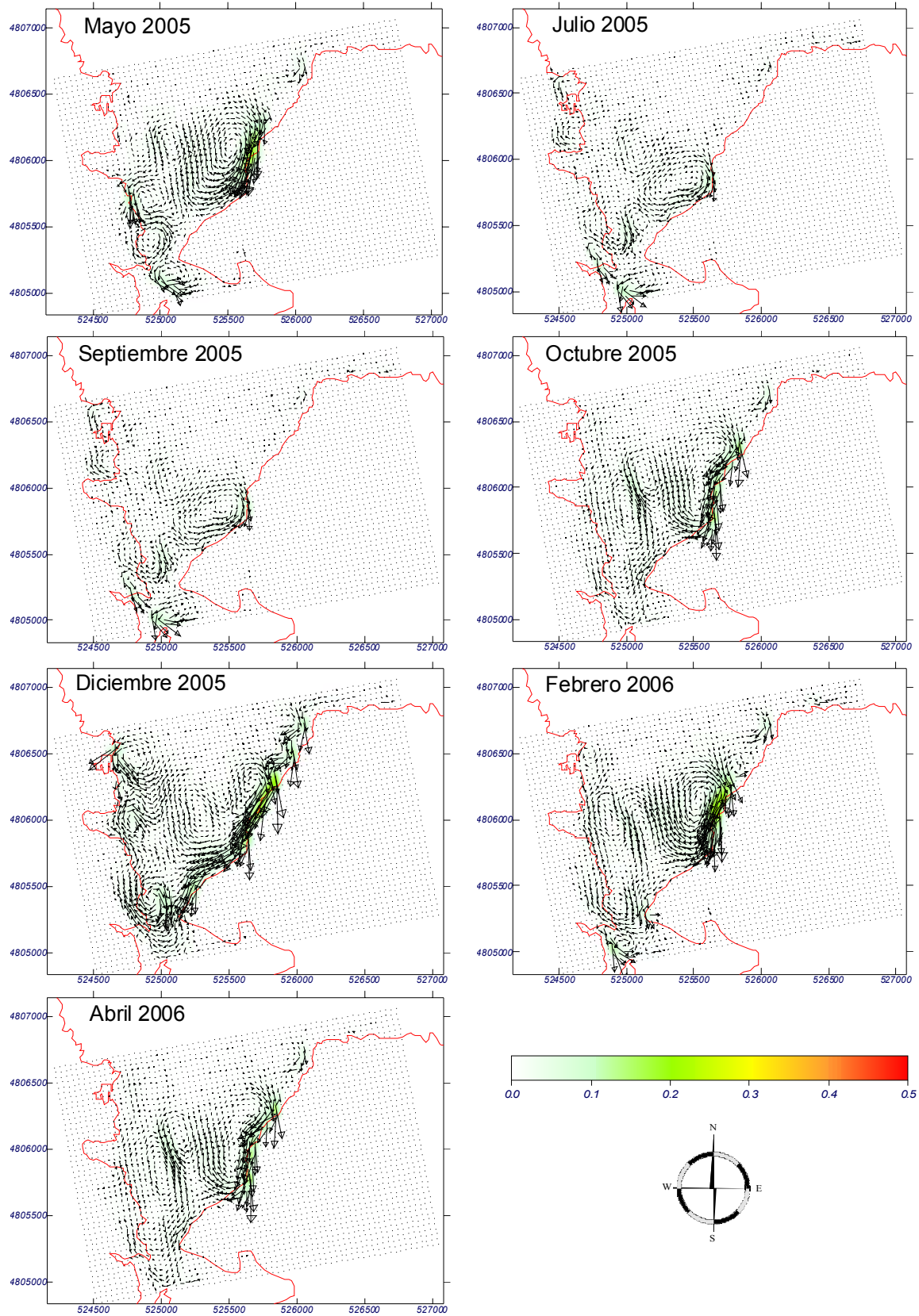


Figura 79. Vectores y magnitud de las corrientes de rotura del oleaje simulado durante la pleamar para la zona exterior del estuario a lo largo del periodo de estudio.

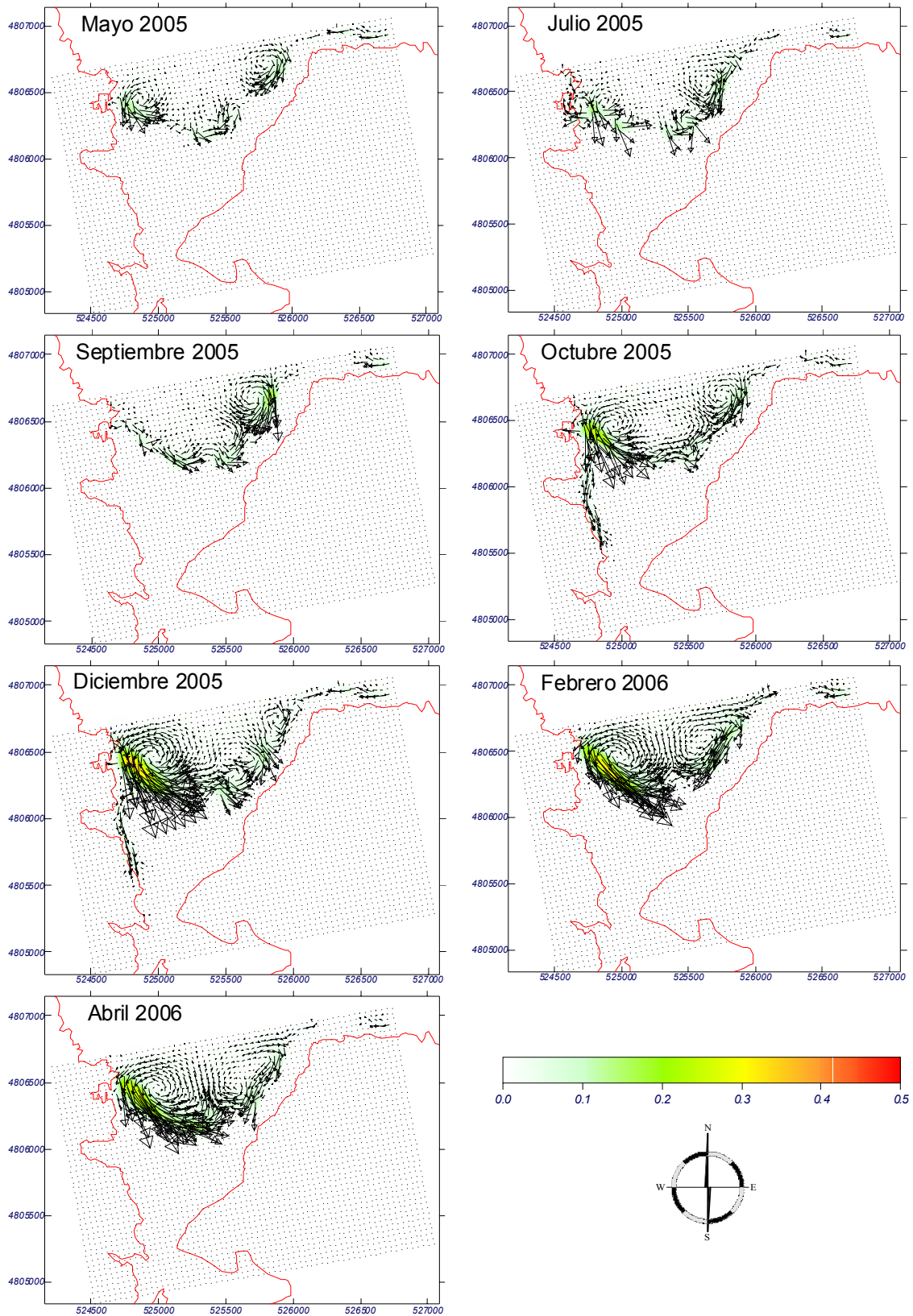


Figura 80. Vectores y magnitud de las corrientes de rotura del oleaje simulado durante la bajamar para la zona exterior del estuario a lo largo del periodo de estudio.

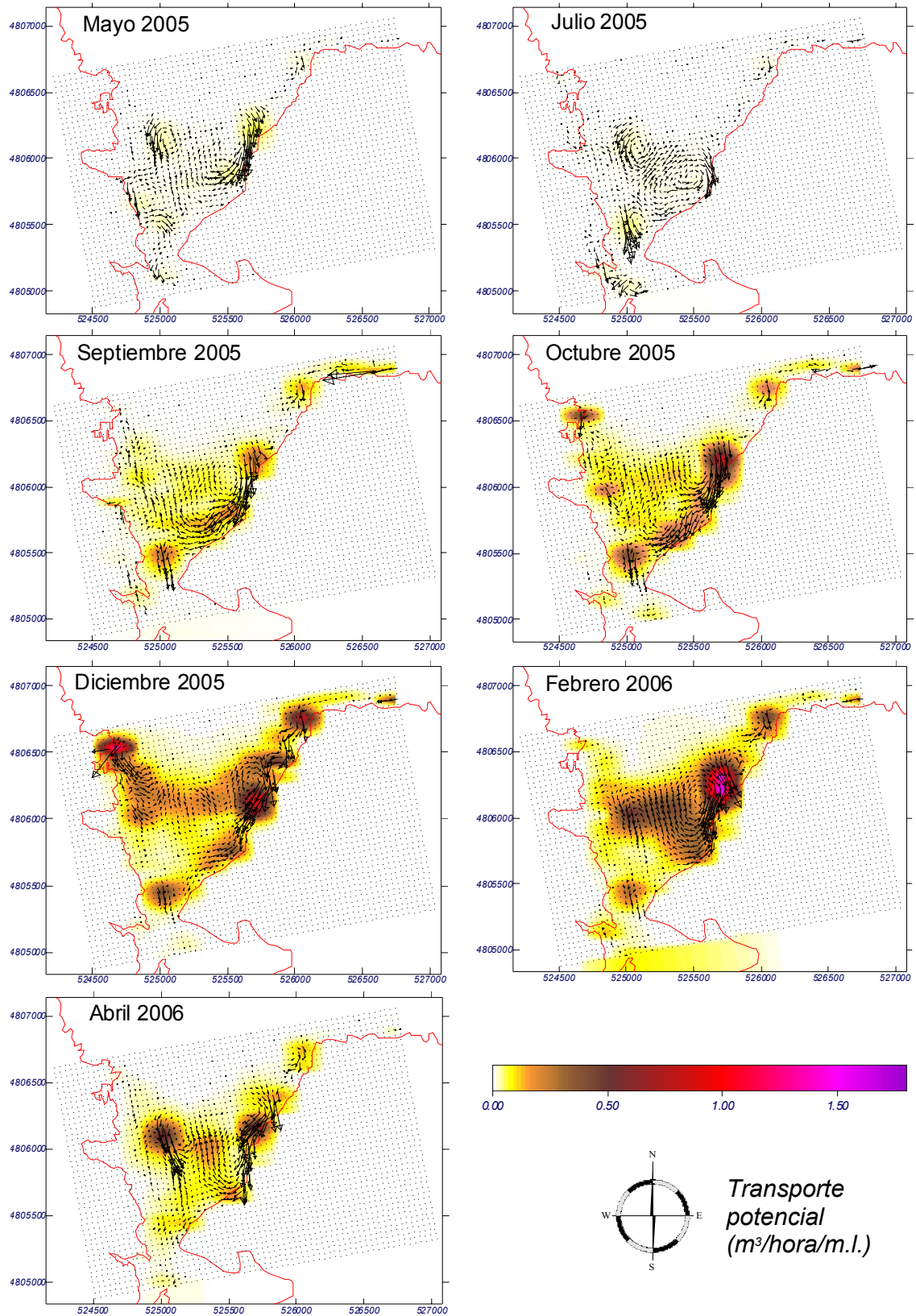


Figura 81. Transporte potencial simulado durante la pleamar para la zona exterior del estuario a lo largo del periodo de estudio.

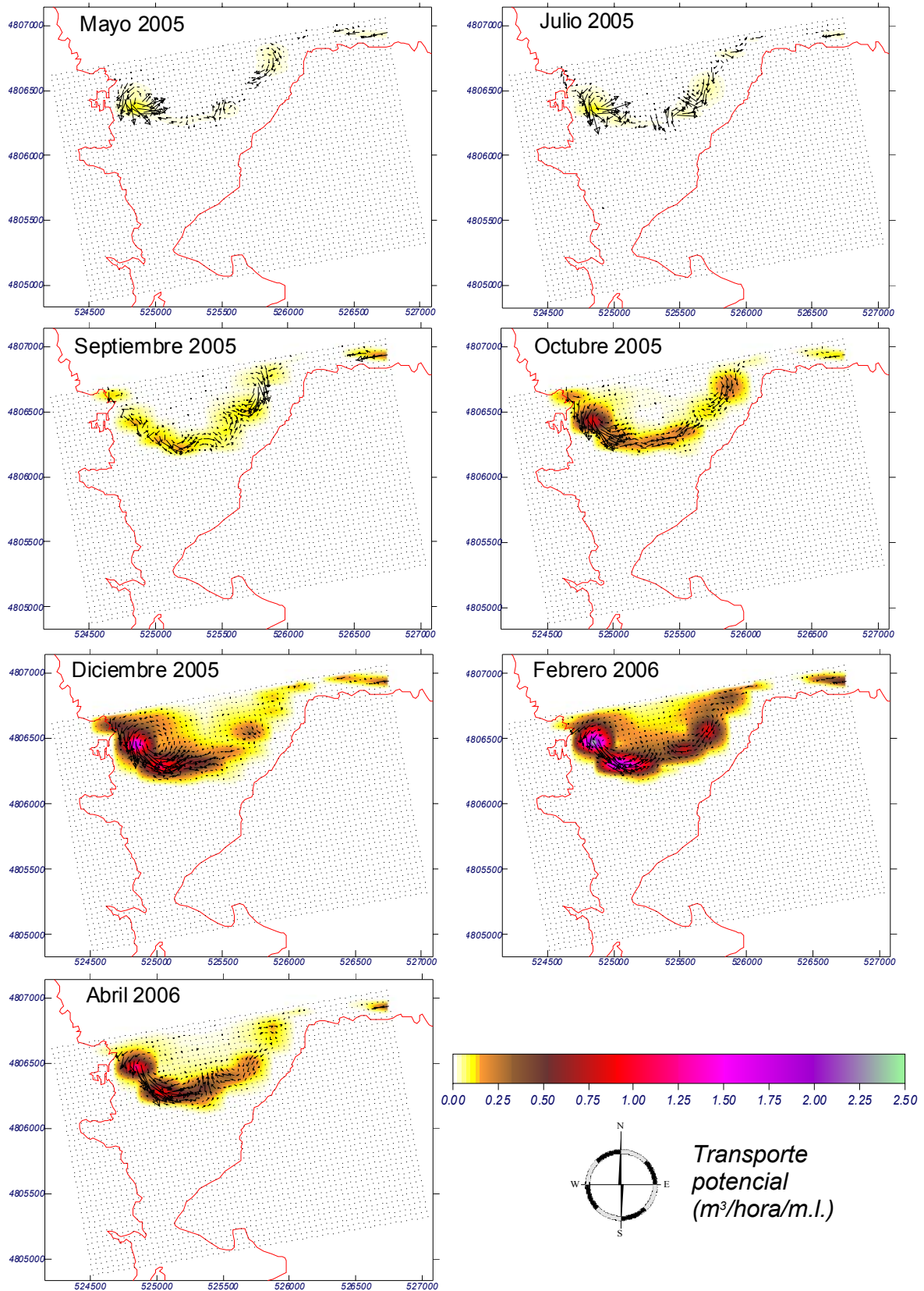


Figura 82. Transporte potencial simulado durante la bajamar para la zona exterior del estuario a lo largo del periodo de estudio.

Los patrones generales de transporte de sedimento se muestran en las Figuras 81 y 82 en las que se ha simulado el transporte potencial en función de las condiciones de oleaje propagado (Figuras 74 y 75). Durante la pleamar se observan dos direcciones de transporte, una más importante en sentido E-W que dirige el sedimento hacia la bocana del estuario y otra más modesta que transporta sedimento desde la barra hacia la zona central de la playa. Durante los meses estivales el transporte es casi nulo (0-0,1 m³/h/m.l.) debido a la mínima entidad del oleaje durante esta época del año. Por el contrario, durante el invierno el transporte de arena es muy efectivo y se cuantifica en torno a 1,25 m³/h/m.l.

Por otra parte, durante la bajamar el transporte de sedimento es aún más intenso que en condiciones de marea alta particularmente durante los meses invernales cuando la erosión de la barra de Mundaka es muy efectiva transportando un volumen de arena cuantificado en 2 m³/h/m.l. Este sedimento se desplaza hacia el centro de la bahía y es posteriormente transportado hacia el exterior por la corriente de retorno situada en el margen Este. En verano, en cambio, al igual que ocurre en la situación de pleamar el transporte es mínimo (0-0,1 m³/h/m.l.).

3.2. Evolución temporal de la morfología del fondo

Es posible analizar los procesos de acumulación y erosión de sedimento en la zona de desembocadura a lo largo del período de estudio a diferentes escalas temporales (bimensual y semestral) mediante el estudio de la variación morfológica del fondo marino al inicio y al final de cada uno de los intervalos considerados (Figuras 83 y 84 respectivamente).

Durante los meses de verano, en el margen Este de la bahía se observa un desplazamiento de barras hacia el Sur en dirección a la playa de Laida (55.000 m³, zona 1) y, asimismo, erosión en los márgenes Norte y Oeste de la playa (-80.500 m³, zona 2). Simultáneamente, se produce acumulación de sedimento en la zonas proximal (54.000 m³, zona 3) y distal de la barra de Mundaka (24.000 m³, zona 4) entre los meses de Julio y Septiembre.

Por otra parte, durante el invierno se produce una importante erosión en el límite entre las zonas sub-intermareal de la desembocadura y una deposición de ese sedimento en zonas más profundas situadas al Norte, en el área previa al nivel de base de acción del oleaje (55.300 m³, zona 1a), y hacia el Sur frente a la zona Este de la playa de Laida (47.500 m³ zona 1b). Igualmente tiene lugar una intensa erosión en los márgenes Este

(entre Febrero y Abril 115.000 m^3 , zona 2) y Noroeste (entre Noviembre y Diciembre 23.000 m^3 , zona 3) de la playa. El resto es reintroducido en la bahía por la corriente marea vaciante y redirigido hacia la zona distal y proximal de la barra (94.000 m^3 , zona 4). Se detecta además erosión en la zona distal más somera de la barra que va a aportar sedimento a la zona submareal localizada al pie de la misma (43.000 m^3 , zona 5).

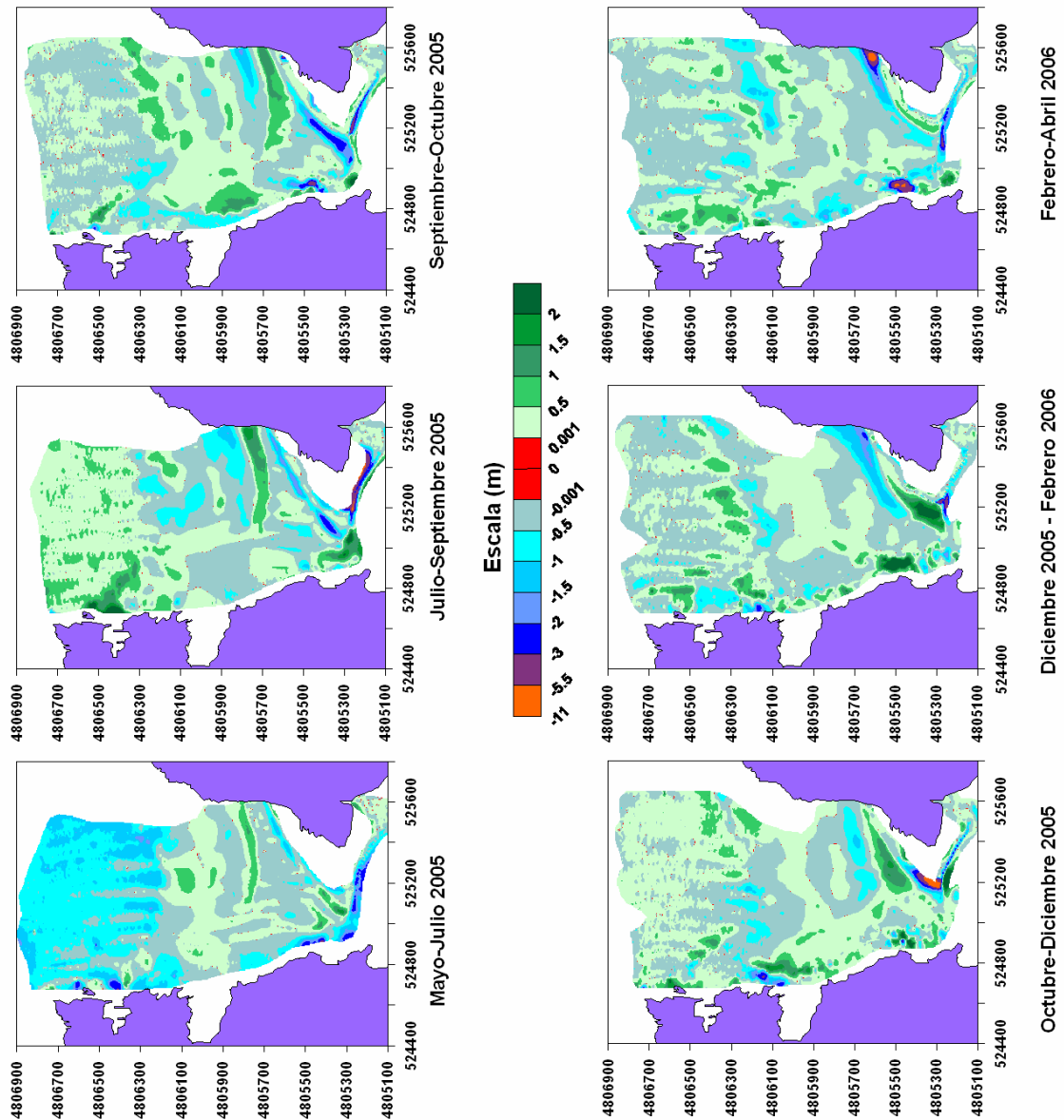


Figura 83. Balance sedimentario (sedimentación/erosión) bimensual entre los meses de Mayo 2005 y Abril 2006 para la zona exterior del estuario.

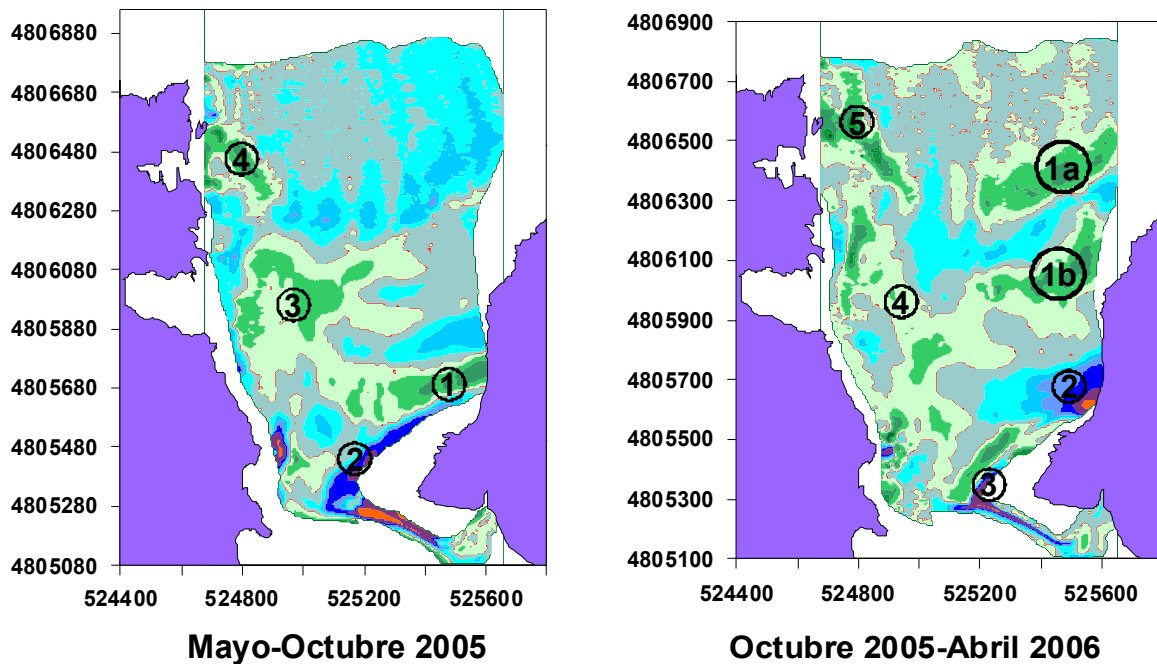


Figura 84. Balance sedimentario (sedimentación/erosión) semestral (verano e invierno) entre los meses de Mayo 2005 y Abril 2006 para la zona exterior del estuario.

Si analizamos en detalle el área de la barra (Figura 85) se observa que las zonas proximal (zona 1) y distal (zona 2) muestran una acumulación de arena durante los meses de Julio y Agosto, a la vez que se profundiza el canal de desembocadura (zona 3) al Oeste de la barra y desaparece la acumulación de arena provocada anteriormente por la formación del nuevo canal de desembocadura anómalo (zona 4).

Por el contrario, durante el invierno (Figura 86) se observa sedimentación en la zona proximal de la barra, particularmente entre Octubre y Diciembre (zona 1), acumulación de arena en el área de rotura de pendiente de la zona distal de la barra (zona 2) contemporánea con la erosión de la superficie de la zona distal de la barra entre los meses de Octubre-Diciembre y Enero-Febrero coincidiendo con temporales significativos (zona 3). Además, se profundiza un canal que separa las zonas proximal y distal de la barra entre sí durante los meses de Octubre a Febrero (zona 4), y tiene lugar una importante erosión en la base de la zona proximal de la barra (zona 5).

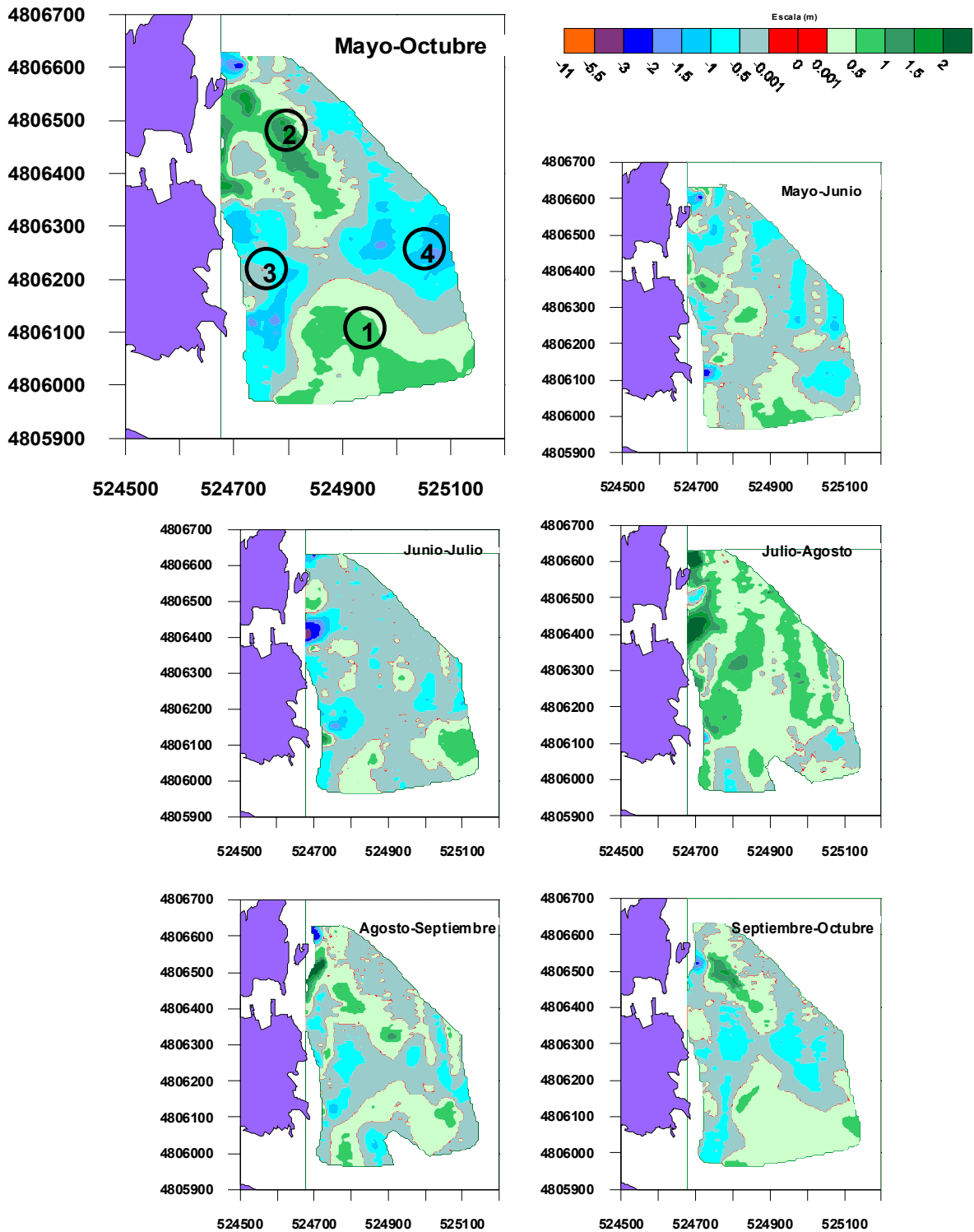


Figura 85. Balance sedimentario (sedimentación/erosión) mensual entre los meses de Mayo 2005 y Octubre 2005 (verano) para la zona de la barra de Mundaka.

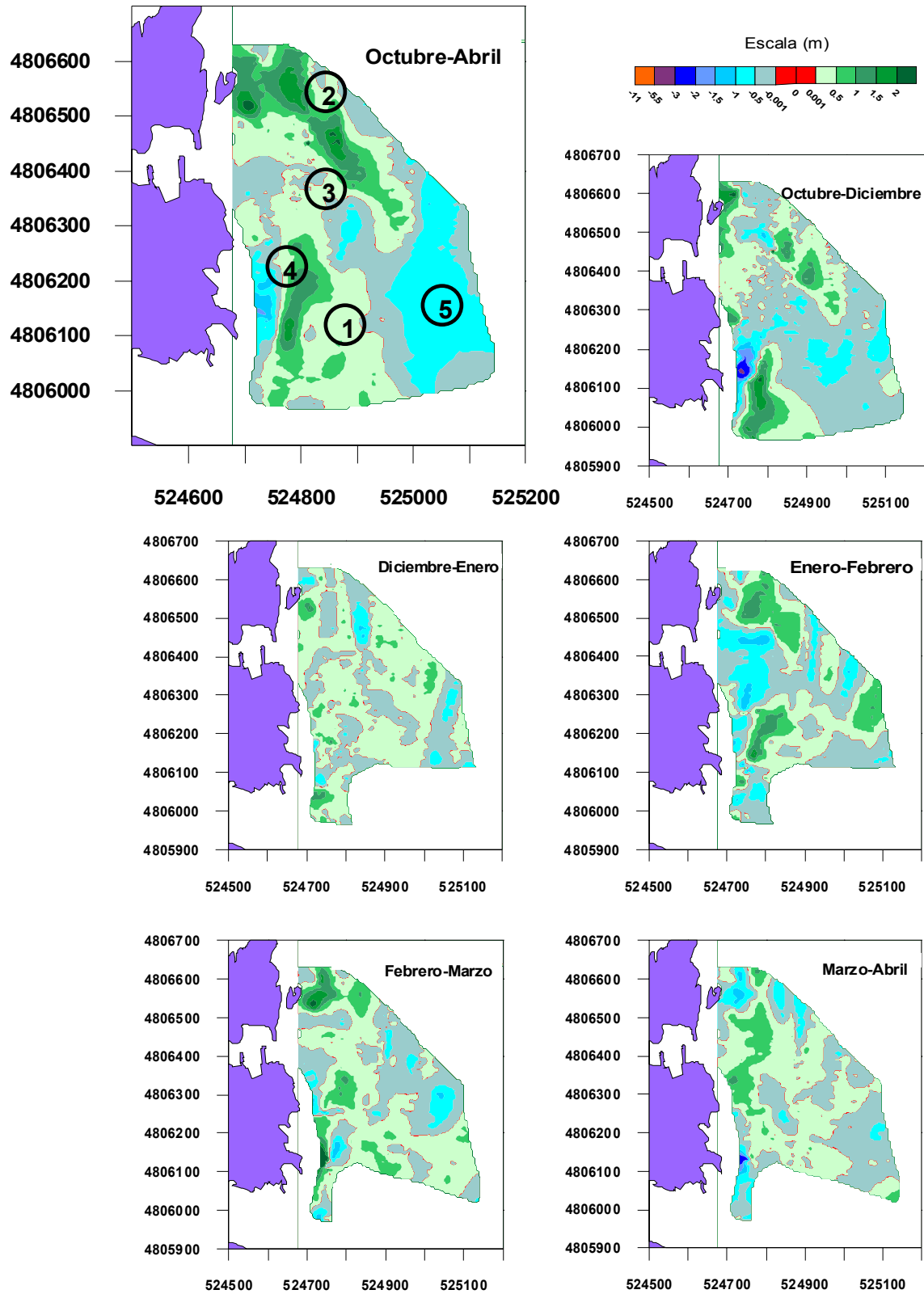


Figura 86. Balance sedimentario (sedimentación/erosión) mensual entre los meses de Octubre 2005 y Abril 2006 (invierno) para la zona de la barra de Mundaka.

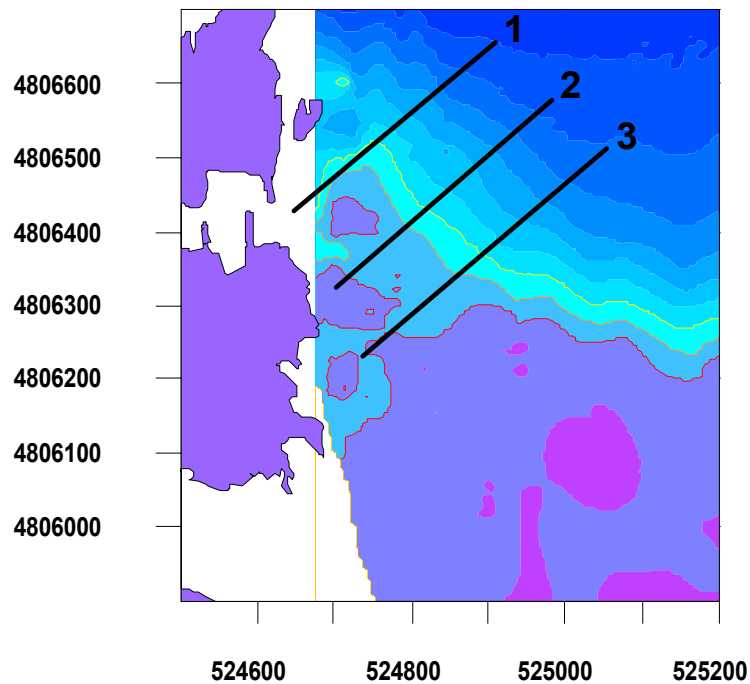
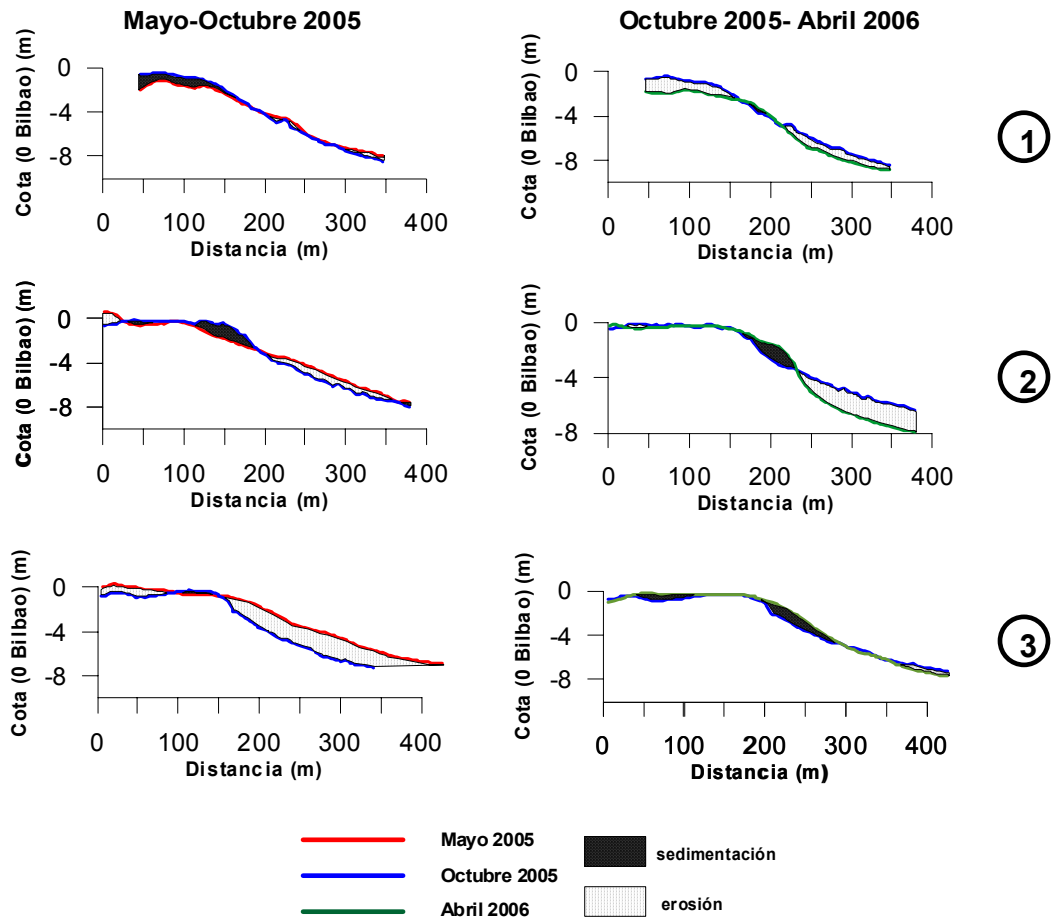


Figura 87. Balance sedimentario (sedimentación/erosión) en tres perfiles de la barra de Mundaka para los periodos estival (Mayo-October 2005) e invernal (October 2005-Abril 2006).

Si analizamos tres perfiles transversales a la zona distal de la barra donde se produce la rotura del oleaje (Figura 87), a lo largo del período de estudio se observa que durante el verano (Mayo-Octubre) se deposita sedimento en la zona superficial de la barra mientras que la erosión se localiza en la zona basal de la misma. En contraste con este hecho, durante el invierno (Octubre-Abril) la superficie y la zona basal de la barra experimentan una erosión mientras que el sedimento se acumula en la zona de rotura de pendiente.

3.3. Evolución en la calidad de la ola

Este apartado se centra en el análisis de la evolución que ha experimentado la calidad de la ola de Mundaka para la práctica del surf a lo largo del período de estudio y se compara con la situación previa.

Los cambios más significativos se han producido para las menores alturas de ola. Así, en Diciembre 2002 con unas condiciones de dirección, periodo y marea adecuadas, se producía una rotura progresiva desde un punto situado, según el tamaño de las olas, entre las rocas aisladas y la ermita situadas al N del puerto de Mundaka hasta más allá de la iglesia.

En Mayo 2005, sin embargo, la rotura prácticamente no se producía hasta pasada la bocana del puerto, y ésta era muy suave o casi inexistente hasta llegar a la altura de la iglesia en la que tenía lugar con gran intensidad pero con un ángulo entre los frentes y la zona de rotura muy pequeño, lo que indica que la ola era demasiado rápida en esta zona para surfear.

En la situación de Septiembre 2005 se observa una clara mejoría y una evolución de la ola hacia la situación previa de Diciembre de 2002, aunque todavía el inicio de la rotura se encuentra desplazado hacia el Suroeste. Además, la rotura progresiva acaba antes de lo habitual (más al Norte) por lo que el recorrido de la ola era menor y menos intenso, ya que las pendientes de la cara exterior de la barra mostradas en el seguimiento batimétrico aún no se habían recuperado. También el ángulo entre los frentes y la zona de rotura era menor, lo que indica que la progresión de la rotura era más rápida. Este hecho, unido a una rotura más suave, hacía que la ola fuera difícil de seguir en toda su longitud.

A lo largo del período Octubre-Febrero la aparición del canal que separa las zonas distal y proximal de la barra da lugar a un comienzo de la rotura de la ola, de nuevo, desplazado unos 50 m hacia el Sureste provocando una reducción en la longitud de la rotura. Sin

embargo, las líneas batimétricas, como consecuencia de la erosión producida en la cara exterior de la barra, adquieren una pendiente adecuada para la rotura del oleaje que se va haciendo más oblicua conforme transcurre el invierno, permitiendo la formación de una ola progresivamente de mayor calidad (Figura 88).



Figura 88. Ola de Mundaka en Febrero 2006.

Durante el invierno, la continua degradación de la superficie de la barra como consecuencia de su erosión por el oleaje incidente perjudica la calidad de la rotura de la ola especialmente para alturas de ola pequeñas.

A partir del mes de Marzo se va cerrando el canal formado sobre la barra y comienza la reconstrucción de ésta dando lugar al inicio del ciclo de recuperación estival que permitirá al final de esta temporada una calidad de ola potencialmente excepcional. Las circunstancias anómalas que existían al comienzo del estudio (tapón arenoso en Laidatxu, nuevo canal de desembocadura anómalo hacia el Este, pérdida generalizada de arena y fragmentación de la superficie de la barra, acumulación de arena al final del recorrido de la ola,...) han sido progresivamente eliminadas durante este período de modo natural por el propio sistema de desembocadura estuarino.

3.4. Modelo morfodinámico de funcionamiento del estuario exterior

Las características del oleaje incidente en la zona se han descrito en el apartado 1.4. El oleaje rompe en la línea de costa provocando un transporte neto de arena desde el margen Este de la bahía hacia la bocana (Figura 79). Este transporte responde a las corrientes de rotura del oleaje generadas en sentido Noreste-Suroeste y a la morfología de fondo con batimetrías menores en la zona Oeste (barra de Mundaka) que en la Este (Figura 21). La cantidad de material transportado hacia la bocana y la reducción de la sección de la misma dependerá, por lo tanto, de las características del oleaje en términos de altura, período y dirección del mismo el cual varía estacionalmente.

Durante el verano (Mayo-Septiembre), con ausencia de temporales y predominio de oleaje tipo *sea* de poca intensidad, la playa recibe sedimento en forma de barras arenosas que migran desde la zona Noreste de la bahía hacia la orilla de la playa de Laida (Figura 83 y 88) y que probablemente obedecen a la acción de las corrientes producidas en las zonas de rotura del oleaje, *surf* (flujo turbulento) y *swash* (flujo laminar). Se pueden formar hasta tres barras que progresan hacia el litoral uniéndose a él, dando lugar a un perfil con mayor volumen de arena en la parte alta de la zona intermareal (berma). Estas barras son tridimensionales con crestas que apuntan en dos sentidos, hacia el Sur-Suroeste (en la parte Oeste) y hacia el Sureste (en la parte Este), evidenciando la acción combinada del oleaje (rotura + gradiente de altura) y de la marea (efecto embudo). En esta época la barra Mundaka es alimentada por la corriente de marea que en ausencia de temporales encaja el canal en la boca de desembocadura depositando el sedimento erosionado y transportado en la barra tras la expansión del flujo (efecto chorro).

Durante el invierno (Octubre-Abril), debido a la energía del oleaje producido por los temporales, el perfil de la zona intermareal de la playa de Laida es erosionado y la arena es transportada hacia el interior del estuario (Figura 69) y hacia las zonas submareales (Figura 84) alejadas de la acción del oleaje y dentro de la batimétrica 25 que es la línea de cierre teórica del estuario (Iberinsa, 1992). Este proceso da lugar a un talud inclinado de altura variable (0.2-8 m) en la zona litoral al Norte de la playa de Laida. En la zona intermareal en cambio se observarán fondos planos (Figura 89). Este oleaje tiende a erosionar la barra de Mundaka, que progresivamente perderá material y modificará su morfología (Figuras 86 y 87).

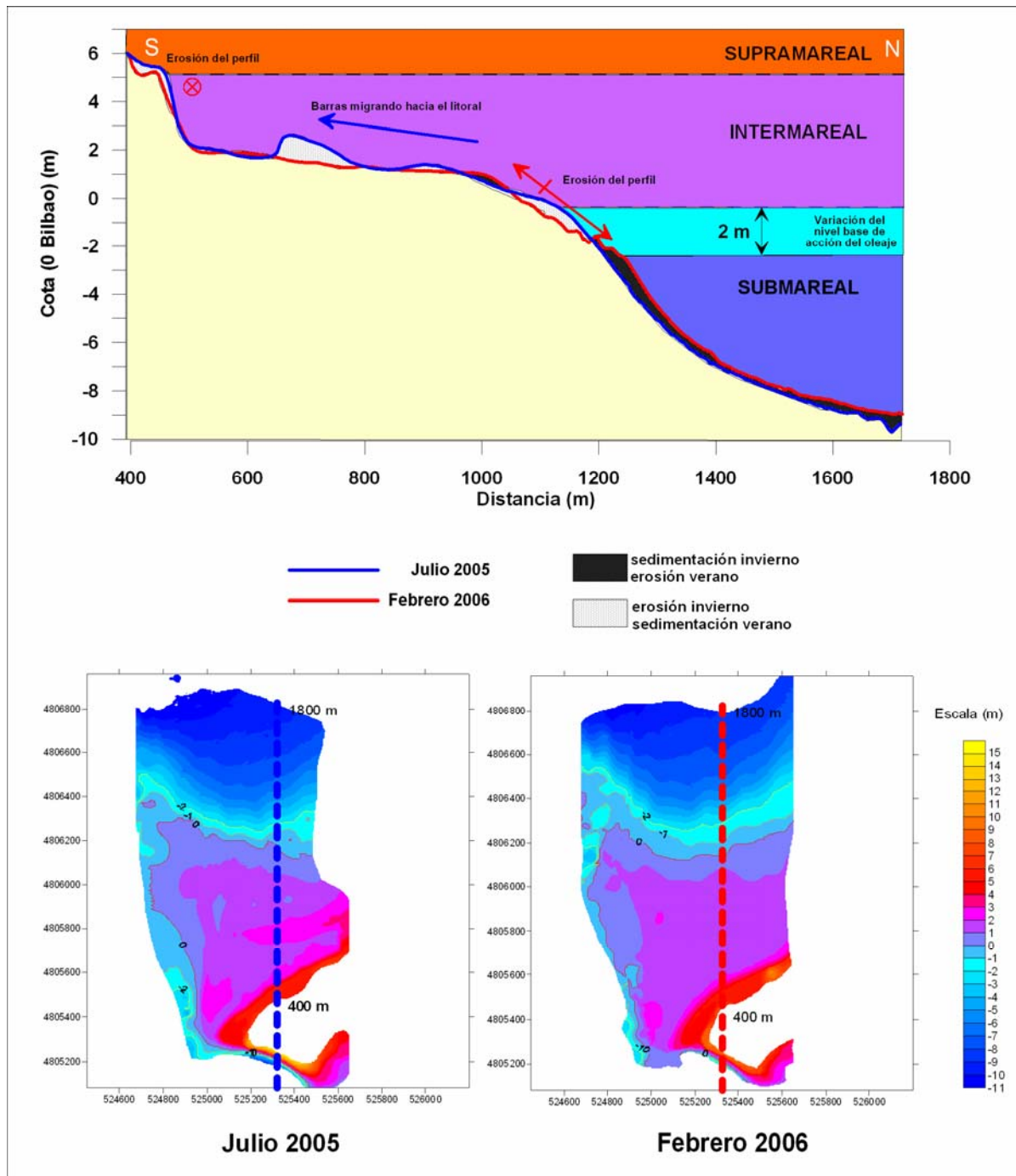


Figura 89. Balance sedimentario (sedimentación/erosión) de un perfil N-S en el área central de la zona exterior del estuario para los periodos estival (Julio 2005) e invernal (Febrero 2006).

A escala de un ciclo mareal, se observa que al iniciarse la vaciante comienzan a tomar protagonismo las corrientes de marea que alcanzan su máxima intensidad a media carrera de marea (Figuras 58 y 59). Las corrientes de vaciante limpiarán de la bocana el material depositado por el oleaje arrastrando el sedimento hacia el exterior y depositándolo en la barra de Mundaka. En estas circunstancias actúa el efecto chorro

(Mota-Oliveira, 1973). Este efecto se produce cuando la corriente que fluye por la bocana al exterior se encuentra con una gran masa de agua que está bajo el influjo del oleaje incidente. El flujo va progresivamente decelerándose creando un canal en la zona Oeste, donde la altura de ola es menor, y una acumulación arenosa en la barra lateral Este, la denominada barra de Mundaka (Figura 90).

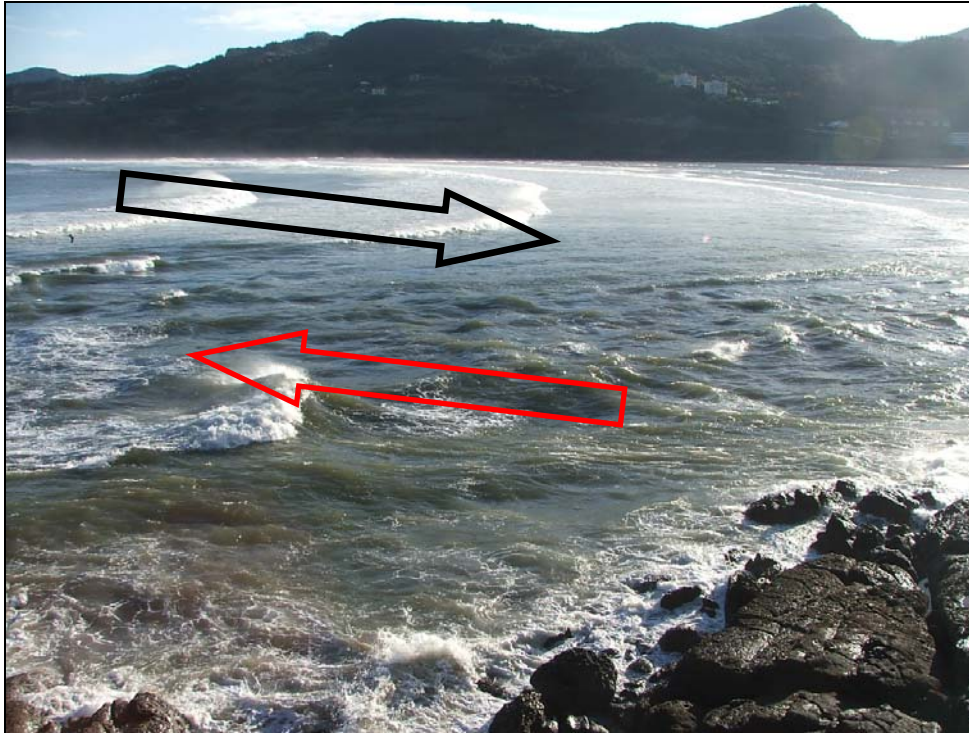


Figura 90. Interacción entre el oleaje incidente en la bahía y la corriente mareal vaciante en el canal de desembocadura (efecto chorro).

En la zona Este del flujo se produce un efecto turbulento que da lugar a la formación de un vórtice o remolino. En el momento inicial del estudio (Mayo 2005) esta situación no se generaba debido a que se había formado dentro del canal habitual un tapón arenoso que impedía su normal funcionamiento. Esta situación se ha ido corrigiendo paulatinamente durante el período de estudio.

Al alcanzarse la bajamar, las corrientes se detienen y el oleaje toma de nuevo el protagonismo. En este momento el oleaje rompe contra la barra de Mundaka al Oeste y el límite de la zona intermareal de la playa de Laida al Este. Estos procesos dan lugar a la erosión de estas zonas y al transporte del material erosionado hacia la playa (Figura 82).

Durante la llenante, la masa de agua arrastrada debe entrar por la bocana del estuario y se produce el efecto embudo (French, 1960) (Figuras 58 y 59). Bajo estas circunstancias

se produce un flujo gradual en el que las líneas de corriente van convergiendo en la bocana. Este flujo transporta la arena hacia ahí alimentando la barra lateral del canal y configurando el perfil de la playa junto con la acción del oleaje (Figura 81). Una vez que la masa de agua pasa por la bocana, el flujo se expande y da lugar al delta de flujo frente a la isla de Txatxarramendi, sedimentando la arena transportada desde la parte interior de la bocana.

La interacción entre la corriente y el oleaje afecta a ambos. En el caso del oleaje, se producen modificaciones en la propagación de éste debidas a la marea. En vaciante, frente a la bocana, se produce una refracción suplementaria del mismo. Al fluir la corriente en contra de la dirección de propagación de oleaje se produce una disminución de su velocidad y de su longitud de onda (Dean y Dalrymple, 1984). Así, los trenes de oleaje varían su morfología y dirección de propagación influenciados por la corriente vaciante. La corriente, que debido al efecto chorro se canaliza hacia el margen rocoso Oeste, produce una focalización del oleaje que tiende a concentrarse frente al chorro y una deformación de los frentes de oleaje que se desplazan hacia el Este creando la "ola izquierda" de fama mundial.

Las corrientes vaciantes también son alteradas por la presencia del oleaje (Grant y Madsen, 1979). En el estuario del Oka, el oleaje procedente principalmente del Noroeste ejerce sobre la corriente una fuerza contraria obligándola a tender hacia la zona en la que la altura del oleaje es menor, es decir, hacia el Oeste pegada al margen rocoso. Este proceso, junto con el anterior, es el que ha dado lugar a la migración hacia el Oeste del canal de desagüe en una paulatina recuperación del sistema hacia la situación previa.

La evolución morfodinámica de la barra de Mundaka durante el periodo de estudio (Figuras 85, 86, 87 y 91) ha mostrado su reconstrucción a partir de una situación inicial (Mayo 2005) en la que se encontraba fragmentada, con un déficit de arena en superficie y una orientación no adecuada para la formación y desarrollo de la característica ola de Mundaka. El aporte de sedimento durante los meses de verano ha supuesto la reconstrucción de la barra dando lugar a una acumulación y crecimiento de la misma tanto en la horizontal como en la vertical. A finales de la temporada estival llegó a presentar características propicias para la formación de la Ola de Mundaka y la práctica del surf, aunque su rotura estaba ligeramente desplazada al Sureste y su recorrido era más corto. Durante el periodo invernal la dirección del margen Este ha adquirido una orientación más oblicua a la dirección de propagación del oleaje permitiendo una rotura de la ola más progresiva y aumentando la longitud de la zona surfable. Sin embargo,

contemporáneamente el posicionamiento del canal de desembocadura sobre la barra entre los meses de Diciembre y Febrero perturbó la progresión de la rotura de olas de pequeña altura. A partir de Marzo el canal se desplazó al oeste recuperando la barra una morfología y volumen más adecuados para la generación de la ola. Tomando como base la evolución morfodinámica observada para el conjunto del estuario exterior, cabría esperar a lo largo del próximo periodo estival un aporte de sedimento a la barra que de lugar a una morfología adecuada para la generación de la Ola de Mundaka en otoño, siempre que las condiciones océano-meteorológicas sean favorables.

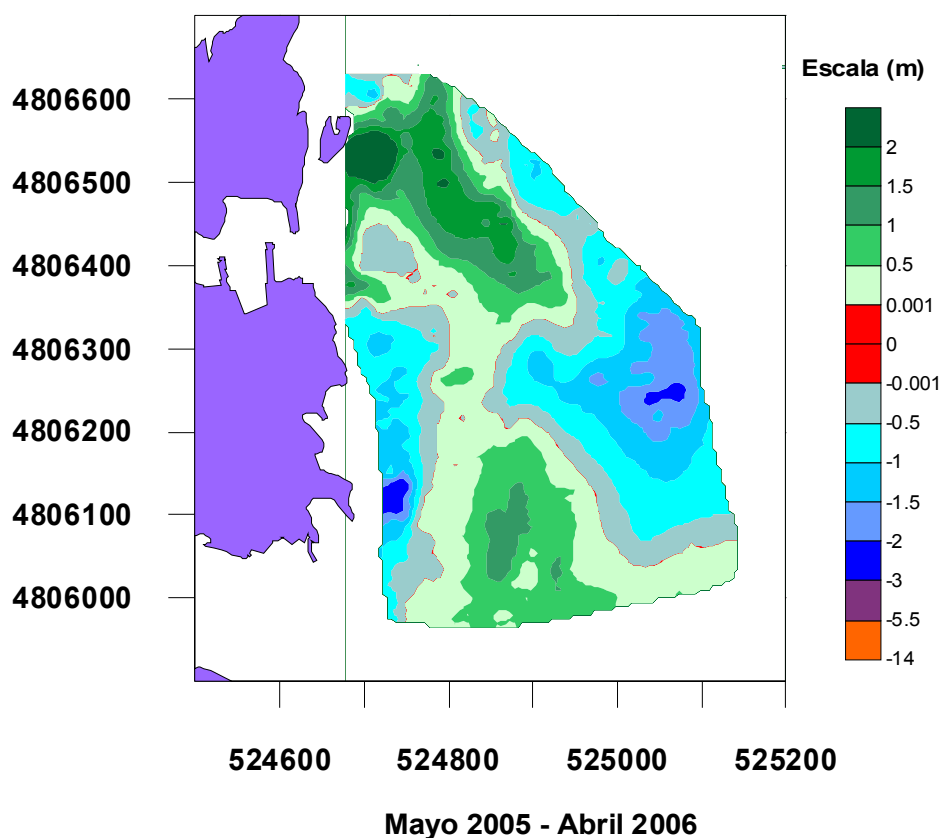


Figura 91. Balance sedimentario (sedimentación/erosión) entre los meses de Mayo 2005 (inicio de estudio) y Abril 2006 (fin de estudio) para la zona de la barra de Mundaka.

En síntesis, el proceso general en la zona exterior del estuario muestra un transporte de sedimento desde el Noreste hacia el Suroeste recorriendo el margen rocoso Este y el frente de la playa de Laida hacia la bocana. Desde ahí, parte del sedimento se introduce en el estuario alimentando el delta de flujo y otra parte se transporta hacia el Norte alimentando la barra de Mundaka. Este proceso es operativo a lo largo de todo el año aunque semestralmente varía el agente predominante en el mismo: la dinámica mareal durante el verano y el oleaje incidente durante el invierno (Figura 92).

El carácter variable de los diferentes parámetros que controlan este modelo de funcionamiento da lugar a una intensa variabilidad morfodinámica en la zona exterior del estuario. En general, esta zona exterior presenta siempre los mismos elementos constitutivos pero, en detalle, estos elementos muestran una gran variación a diferentes escalas temporales, desde diaria a plurianual, siempre dentro de un equilibrio dinámico y en ausencia de intervenciones antrópicas.

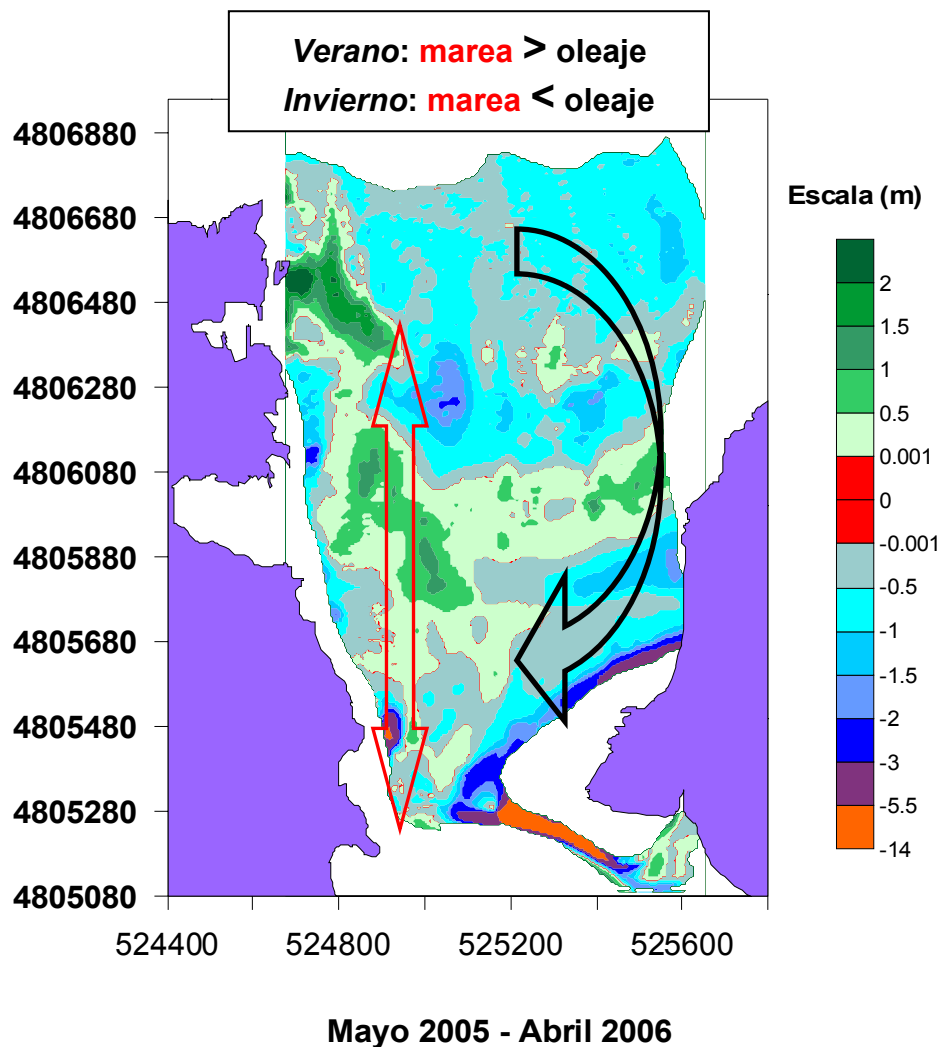


Figura 92. Balance sedimentario (sedimentación/erosión) entre los meses de Mayo 2005 (comienzo estudio), y Abril 2006 (fin estudio) para la zona exterior del estuario.

4. Conclusiones

- El equilibrio sedimentario de esta desembocadura se encuentra condicionado por un continuo movimiento de arena entre sus diferentes elementos constitutivos. Se trata de un equilibrio dinámico debido a que la intensidad de los agentes involucrados cambia a lo largo del tiempo. Para la práctica del surf en la ola de Mundaka son necesarias condiciones de oleaje moderado a intenso (típicas de otoño-invierno), marea baja (a ser posible mareas vivas) y vientos de componente Sur u Oeste. La calidad de la barra, al tratarse de un bajo arenoso, varía a lo largo del año presentando mejores características inmediatamente después del verano, y perdiéndolas poco a poco a lo largo del invierno.
- A partir del último vertido arenoso, el volumen de sedimento erosionado en el margen Sur de Laida por unidad de tiempo aumentó sustancialmente alcanzando durante el segundo semestre de 2003 un valor de 11.000 m³/mes. Este incremento en la tasa de erosión en un corto lapso de tiempo introdujo en el sistema una enorme cantidad de arena que atravesó la bocana y se depositó frente a Laidatxu (taponando el canal de desagüe de la ría y alterando la disposición habitual del canal estuarino) y en el delta de flujo frente a la isla de Txatxarramendi. A partir de entonces, la tasa de erosión descendió y regresó a valores muy próximos a los detectados antes del vertido de arena.
- Durante las condiciones estivales en la zona intermareal frente a la playa de Laida se observó un paulatino desplazamiento hacia el Suroeste de distintas barras arenosas que transportaron sedimento desde la zona Noreste de la bahía hacia la bocana. De este modo se obtuvo un perfil de playa típico de la estación estival caracterizado por valles y crestas (*ridge y runnell*) en la zona intermareal y un escalón en el límite entre las zonas inter y supramareales de la playa. El nuevo canal generado a partir del tapón arenoso en el canal habitual de desembocadura desapareció entre los meses de Julio y Agosto gracias a este desplazamiento de las barras arenosas y al transporte de agua y sedimento inducido por la vaciante de la marea. Estos procesos fortalecieron el desarrollo de la barra de Mundaka y desplazaron el canal de desagüe hacia su posición habitual en el margen rocoso Oeste.
- Durante las condiciones invernales, las barras formadas en la zona intermareal de la playa de Laida durante el verano se fueron desmantelando y desplazando hacia el canal de desembocadura donde una parte del sedimento se introdujo dentro del estuario y el resto fue transportado hacia la zona proximal de la barra, generándose así una zona intermareal amplia con fondos planos. Además, se hicieron más pronunciadas las

pendientes entre las zonas sub/intermareal e inter/supramareal (berma) dando lugar a rupturas de pendiente típicas del perfil de playa en invierno.

- En la zona de la barra, durante los meses estivales de estudio se observó su evolución morfológica a partir de una situación en la que se encontraba retrasada con respecto a su posición habitual y con una línea batimétrica 0 (línea de rotura de oleaje) fragmentada. Con el paso del tiempo esta disposición morfológica se fue modificando hasta alcanzar en el mes de Agosto una configuración similar a la previa, que fue mejorando en Septiembre con la profundización del canal de desagüe y una importante acumulación de arena hacia el Noroeste en la posición habitual de la barra.
- Durante la época invernal la orientación del margen Este de la barra mostró un basculamiento disponiéndose más alineada en la dirección Norte-Sur y, por lo tanto, más oblicua a la dirección de propagación del oleaje. El sedimento que estaba alimentando la zona proximal de la barra dio lugar a una disminución en la sección del canal de desembocadura, aumentando así la velocidad de desagüe de la corriente vaciante. En consecuencia, se produjo una ligera migración lateral del canal y una paulatina profundización del fondo arenoso entre las zonas distal y proximal de la barra desde Octubre hasta Marzo. A partir de Abril aumentó la sección del canal de desagüe desplazándose éste hacia el Oeste y colmatándose la depresión anteriormente creada.
- Durante el período estival, caracterizado por la ausencia de oleaje significativo, predominó ligeramente el transporte sedimentario hacia el exterior del estuario (55%), con respecto a la cantidad de sedimento que penetró en el mismo (45%). Este predominio se debió a la erosión del margen Sur de Laida que introdujo dentro de la fase mareal vaciante sedimento que fue exportado a través de la desembocadura.
- Durante el periodo invernal, caracterizado por la presencia de oleaje significativo, predominó el transporte sedimentario hacia dentro del estuario (69%) con respecto a la cantidad de sedimento que salió hacia el exterior (31%). Este predominio fue debido a la erosión del margen Norte de Laida que introdujo dentro de las fases llenante y pleamar de la marea sedimento que fue importado a través de la desembocadura.
- Respecto al transporte sedimentario en la zona exterior del estuario, durante la pleamar se observaron dos direcciones de transporte, una de mayor entidad en sentido E-W que dirigió el sedimento hacia la bocana del estuario y otra más modesta que transportó sedimento desde la barra hacia la zona central de la playa. Durante los meses estivales el transporte fue casi nulo (0-0,1 m³/h/m.l.) debido a la mínima competencia

del oleaje durante esta época del año. Por el contrario, durante el invierno, el transporte de arena fue muy efectivo y se cuantificó en torno a $1,25 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m.l.}$ Por otra parte, durante la bajamar el transporte de sedimento fue aún más intenso que durante las condiciones de marea alta, particularmente durante los meses invernales cuando la erosión de la barra de Mundaka fue muy intensa. El volumen de arena transportado fue de $2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m.l.}$ que se desplazó hacia el centro de la bahía y fue posteriormente removilizado hacia el exterior por la corriente de retorno situada en el margen Este. En verano en cambio, al igual que ocurrió en la situación de pleamar, el transporte fue mínimo ($0-0,1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m.l.}$).

- Durante los meses de verano en el margen Este de la bahía se observó un desplazamiento de barras arenosas hacia el Sur en dirección a la playa de Laida (55.000 m^3) y erosión en los márgenes Norte y Oeste de la playa (-80.500 m^3). Simultáneamente, se produjo acumulación de sedimento en la zonas proximal (54.000 m^3) y distal de la barra de Mundaka (24.000 m^3) entre los meses de Julio y Septiembre.
- Durante el invierno se produjo una importante erosión en el límite entre las zonas sub- e intermareal de la desembocadura y deposición de ese sedimento en zonas más profundas situadas al Norte previas al nivel de base de acción del oleaje (55.300 m^3) y hacia el Sur frente a la zona Este de la playa de Laida (47.500 m^3). Igualmente tuvo lugar una intensa erosión en los márgenes Este (entre Febrero y Abril 115.000 m^3) y Noroeste (entre Noviembre y Diciembre 23.000 m^3) de la playa. El resto fue reintroducido en la bahía por la corriente mareal vaciante y redirigido hacia la zona distal y proximal de la barra (94.000 m^3). Se detectó erosión en la zona distal más somera de la barra que aportó sedimento a la zona submareal localizada al pie de la misma (43.000 m^3).
- La evolución morfodinámica de la barra de Mundaka durante el periodo de estudio experimentó una reconstrucción a partir de una situación inicial (Mayo 2005) fragmentada, con un déficit de arena en superficie y una orientación no adecuada para la formación y desarrollo de la característica Ola de Mundaka. El aporte de sedimento durante los meses de verano supuso la reconstrucción de la barra dándose una acumulación y crecimiento de la misma tanto en la horizontal como en la vertical. A finales de la temporada estival presentaba unas características propicias para la formación de la Ola de Mundaka y la práctica del surf, aunque su rotura estaba ligeramente desplazada al Sureste y su recorrido era más corto. Durante el periodo

invernal, la dirección del margen Este adquirió una orientación más oblicua a la dirección de propagación del oleaje dando lugar a una rotura de la ola más progresiva, aumentando la longitud de la zona surfeable. Contemporáneamente, el posicionamiento del canal de desembocadura sobre la barra entre los meses de Diciembre y Febrero perturbó la progresión de la rotura de olas de pequeña altura. A partir de Marzo el canal se desplazó al Oeste recuperando la barra una morfología y volumen más adecuados para la generación de la Ola. Tomando como base la evolución morfodinámica observada durante este estudio anual para el conjunto del estuario exterior, cabría esperar a lo largo del próximo periodo estival un aporte de sedimento a la barra que genere una morfología adecuada para la aparición de la Ola de Mundaka en otoño, siempre que las condiciones océano-meteorológicas sean favorables.

- En síntesis, el proceso general ha mostrado un transporte de sedimento desde el Noreste hacia el Suroeste recorriendo el margen rocoso Este y el frente de la playa de Laida hacia la bocana. Desde ahí, una parte del sedimento se introdujo en el estuario alimentando el delta de flujo y otra parte se transportó hacia el Norte alimentando la barra de Mundaka. Este proceso fue operativo a lo largo de todo el año aunque semestralmente cambió el agente predominante en el mismo: la dinámica mareal durante el verano y el oleaje incidente durante el invierno.
- El carácter variable de los diferentes parámetros que controlaron este modelo de funcionamiento dio lugar a una intensa variabilidad morfodinámica en la zona exterior del estuario. Esta zona exterior presentó siempre los mismos elementos constitutivos pero, en detalle, estos elementos mostraron una gran variación morfológica a diferentes escalas temporales (desde diaria a plurianual) siempre dentro de un equilibrio dinámico y en ausencia de intervenciones antrópicas.
- El modelo morfodinámico de funcionamiento del estuario exterior incluyó la marea, el oleaje y el transporte sedimentario provocado por estos agentes. Este modelo ha permitido identificar las causas desencadenantes de la alteración ambiental en la desembocadura del estuario (vertido masivo de arena en el margen Sur de Laida y rápida erosión del mismo) y, asimismo, ha hecho posible descartar las posibles afecciones negativas del proyecto de regeneración dunar en curso.
- Como consecuencia de no haber adoptado ninguna medida correctora o actuación directa en la zona exterior de la desembocadura (barra de Mundaka), el propio sistema y sus diferentes elementos constitutivos están consiguiendo de modo natural unas características morfológicas similares a las habituales en esta zona. Este proceso natural

es mucho más estable, duradero y seguro de cara a garantizar el futuro de la Ola de Mundaka.

- Ante la posibilidad de futuros dragados en el estuario inferior, y a la vista de los resultados obtenidos en este estudio, el volumen de arena a extraer debería ser el mínimo posible y responder exclusivamente a las necesidades reales de calado de ese momento, ya que el concepto de "dragado definitivo" no existe y cuanto más sedimento se extraiga y vierta más severa será la respuesta del sistema estuarino como consecuencia de su elevado dinamismo.

En cuanto al trazado de los mismos, deberían respetar la disposición natural del canal principal del estuario y particularmente del meandro final de Arketa que ha de discurrir apoyado sobre el margen rocoso Este con el fin de minimizar su capacidad erosiva contra la zona Sur de Laida.

Por lo que respecta al vertido de las arenas de dragado, teniendo en cuenta el modelo morfodinámico propuesto, sería necesario depositarlas en la zona arenosa del estuario exterior en una ubicación a determinar de modo preciso en base al volumen concreto de sedimento involucrado y a la época del año propuesta para el vertido, con el fin de minimizar las alteraciones que seguramente provocará sobre el equilibrio natural del sistema sedimentario. Tras el último vertido, el sistema natural ha necesitado 3 años para equilibrar de nuevo las dramáticas consecuencias generadas sobre la calidad de la Ola de Mundaka.

5. Bibliografía

Banco de datos Oceanográficos de Puertos del Estado (<http://www.puertos.es>) Ministerio de Fomento (2003): *Clima medio de oleaje, Boya de Bilbao-Vizcaya*.

Blott, S.J. y Pye, K. (2001): Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1237-1248.

Cearreta, A, Monge-Ganuzas, M., Iriarte (2004): *Seguimiento y evaluación sedimentológica del proyecto de regeneración dunar en Laida (Reserva de la Biosfera de Urdabai). Informe final (Octubre 2001-Diciembre 2004)*. Informe inédito para el Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio del Gobierno Vasco, 42 pp.

Cearreta, A, Monge-Ganuzas, M., Iriarte, E. Uriarte, A. y Liria, P. (2005): *Seguimiento morfodinámico de la desembocadura del estuario del Oka (Reserva de la Biosfera de Urdabai) Mayo-Septiembre 2005*. Informe inédito para el Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio del Gobierno Vasco, 94 pp.

French, J.L. (1960): *Tidal flow in entrances*. U.S. Army Corps of Eng., Committee on tidal Hydraulics. Technical Bulletin 3.

Dean, R. y Dalrymple, R.A. (1984): *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Prentice-Hall Inc, 353 pp.

Grant, W.D. y Madsen, O.S. (1979): Combined wave and current interaction with a rough bottom. *Journal of Geophysical Research*, 84, 1797-1808.

Iberinsa (1992): *Estudio geofísico marino de la costa de Vizcaya*. Informe elaborado para la Dirección General de Costas del MOPT.

Mota-Oliveira, I.B. (1973): *Embocaduras lagunares*. Laboratorio Nacional de Engenharia. Civil. Lisboa, 434 pp.

Open University, Oceanography Course Team (1989): *Waves tides and shallow-water processes*.

SMC (*Sistema de Modelado Costero*). Ministerio de Medio Ambiente (Dirección General de Costas) y Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C.) de la Universidad de Cantabria.

Van Dongeren, A. (1992): *A model of the morphological behaviour and stability of channels and flats in tidal basins*. MSc Thesis. TU Delft, The Netherlands.

Villate, F., Franco, J., Ruiz, A. y Orive, E. (1989): Caracterización geomorfológica e hidrológica de cinco sistemas estuáricos del País Vasco. *Kobie*, 18, 157-170.

6. Agradecimientos

El equipo redactor de este informe quiere expresar su reconocimiento al Director-Conservador del Patronato de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai, Xabier Arana, por su apoyo decidido a este proyecto y la infraestructura puesta a nuestra disposición,

haciendo que el trabajo se realizara en las mejores condiciones posibles. Asimismo, nuestro agradecimiento al Prof Mike Collins, al Dr Erwan Garel, a Haris Plomarttis y a Andy Symonds (National Oceanography Centre, Southampton, UK) que hicieron posible el trabajo con los Valeports en la bocana exterior durante la época estival. Antonio Girona (Hydroacoustics S.L.) suministró los equipos Valeport durante la época invernal y Francisco González se encargó de su mantenimiento y puesta a punto. El Prof Raúl Medina y su equipo (GIOC, Universidad de Cantabria) amablemente introdujeron al equipo redactor en el uso del Sistema de Modelado Costero. El Dr A. Uriarte y P. Liria (AZTI) colaboraron en la redacción de algunos capítulos del informe previo correspondiente al período estival de este estudio. Joseba Abaitua produjo una excelente información topográfica. Los buzos Miguelo Santesteban y Pedro Losa (AZTI) y Xabier Uribarri (URSUB) colaboraron en la ubicación de los equipos oceanográficos en la zona submareal. Ane García, Izaskun García y Haizea Quintas (estudiantes de 1º ciclo de C. Geológicas) colaboraron en las labores de campo. Pilar Gil (Puertos del Estado) amablemente aportó los datos oceanográficos de la boya de Bilbao-Vizcaya. Mariví Albizu (Calidad Ambiental, Gobierno Vasco) suministró datos meteorológicos de la estación de Mundaka. Las empresas FOAT y AeroLink realizaron las fotografías aéreas oblicuas. Julien Mader (AZTI) y Fernando Ruiz colaboraron en aspectos informáticos e Iñigo Martínez de Alegría (UPV/EHU) con algunos cálculos matemáticos. A Marijo Artetxe (patrona de la embarcación UKABI) y Xabier Gandarias "Lete" (PRBU) por su saber hacer. Este trabajo ha sido financiado con cargo a un Convenio entre el Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio del Gobierno Vasco y el Departamento de Estratigrafía y Paleontología de la Universidad del País Vasco/EHU.

En Leioa, 29 de Mayo 2006

Dr. Alejandro Cearreta

(Investigador Principal)

**A person can live on a mountain, in a desert, or on a suburban lot, and after a few years he can say: "I know every inch of this place, every rock, tree, weed, and fold of earth."
No one can say that about the shoreline or the beaches.**

Kaufman, W. & Pilkey, O.H.Jr. (1979) *The Beaches Are Moving*. Duke University Press



**EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO**

INGURUMEN ETA LURRALDE
ANTOLAMENDU SAILA
DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE
Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO