



Región de Murcia

Consejería de Agua, Agricultura,
Ganadería, Pesca, Medio Ambiente y Emergencias.



Universidad
Politécnica
de Cartagena

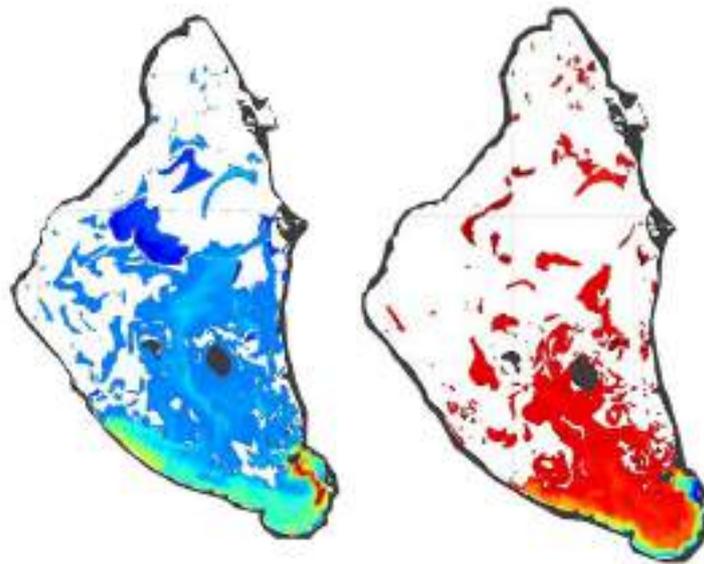


EUROPEAN
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY
"Think human first"

Modelado Hidrodinámico de Alta Resolución del Mar Menor

Estudio del intercambio de agua entre el Mar Menor y el Mediterráneo

Septiembre 2022



Región de Murcia
Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca,
Medio Ambiente y Emergencias
Dirección General del Mar Menor
Plaza Juan XXIII s/n
30071 – Murcia.

Javier Gilabert
Francisco López Castejón
Carolina Rodríguez de Mesas
Bartolomé Morote Sánchez
Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Universidad Politécnica de Cartagena
Paseo Alfonso XIII, 52
30203 – Cartagena
javier.gilabert@upct.es



Contenido

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. OBJETIVOS.....	14
1.2. ESTRUCTURA DEL INFORME.....	14
1.3. EQUIPO DE TRABAJO	14
2. METODOLOGÍA.....	16
2.1. DATOS ATMOSFÉRICOS.....	16
2.2. BATIMETRÍA.....	16
2.3. DATOS OCEANOGRÁFICOS.....	17
2.3.1. <i>Sensores de elevación del nivel del mar</i>	<i>17</i>
2.3.2. <i>Correntímetros</i>	<i>19</i>
2.4. TRATAMIENTO DE DATOS.....	20
2.5. SISTEMA DE MODELADO OCEANOGRÁFICO REGIONAL (ROMS)	21
2.5.1. <i>Implementación del Sistema de Modelado Oceanográfico Regional (ROMS) para el Mar Menor</i>	<i>27</i>
2.5.2. <i>Validación.....</i>	<i>35</i>
2.6. MODELO DE SIMULACIÓN DE OLEAJE.....	38
2.6.1. <i>Modelo espectral JONSWAP.....</i>	<i>39</i>
2.6.2. <i>Modelo numérico SWAN</i>	<i>40</i>
2.6.3. <i>Implementación de SWAM para el Mar Menor</i>	<i>46</i>
2.6.4. <i>Validación del Modelo.....</i>	<i>49</i>
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
3.1. FLUJOS DE INTERCAMBIO MAR MENOR-MEDITERRÁNEO 2021-2022.....	51
3.1.1. <i>Condiciones atmosféricas.....</i>	<i>51</i>
3.1.2. <i>Variaciones del nivel del mar</i>	<i>55</i>
3.1.3. <i>Flujos en los canales</i>	<i>57</i>
3.1.4. <i>Flujos de intercambio mar menor-mediterráneo 2021</i>	<i>77</i>
3.2. ESTUDIO DE FLUJOS EN EL CANAL DE MARCHAMALO	82
3.2.1. <i>Valores utilizados como condiciones de contorno e iniciales en el modelo.....</i>	<i>87</i>
3.2.2. <i>Escenarios simulados</i>	<i>91</i>
3.3. ESTUDIO DE OLEAJE.....	118



Región de Murcia

Consejería de Agua, Agricultura,
Ganadería, Pesca, Medio
Ambiente y Emergencias.



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**



4. CONCLUSIONES.....	124
5. AGRADECIMIENTOS	127
6. BIBLIOGRAFÍA.....	128



INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Estadísticos resultantes para la validación de los datos de salinidad del modelo respecto a los datos registrados para el punto E12.</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 2 Estadísticos resultantes para la validación de los datos de salinidad del modelo respecto a los datos registrados para el punto E11.</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 3. Definiciones de cuadrícula utilizadas para el estudio</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 4. Resumen de los procesos físicos con su formulación</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 5. Resumen estadístico de datos de presión atmosférica registrados (datos suavizados a 12 horas).</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 6. Ángulo que explica la variabilidad máxima de la corriente para los ADCP de Canal de Veneziola, Gola de la Torre y Gola del Charco.</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 7. Anchura y profundidad estimada de cada uno de los canales de Las Encañizadas para el cálculo del caudal.</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 8. Flujo neto en Hm³ a través del Estacio para cada estación de los años 2011, 2021 y 2022.</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 9. Caudales neto (entrada + salida) y % de renovación, teniendo en cuenta todos los canales para primavera de 2021 y 2022.</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 10. Caudales netos (entrada + salida) y % de renovación teniendo en cuenta todos los canales</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 11. Caudales registrados en Marchamalo antes y después del dragado de 2011.</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 12. Escenarios simulados para Marchamalo.</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 13. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en el fondo para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P4.</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 14. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en superficie para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P4.</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 15. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en la columna de agua para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P4.</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 16. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en el fondo para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P9.</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 17. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en superficie para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P9.</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 18. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en la columna de agua para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P9.</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 19. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en la capa de fondo para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P9.</i>	<i>104</i>



Región de Murcia
 Consejería de Agua, Agricultura,
 Ganadería, Pesca, Medio
 Ambiente y Emergencias.



Universidad
 Politécnica
 de Cartagena



<i>Tabla 20. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en la capa de superficie para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P9.</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 21. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en la columna de agua para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P10.</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 29. Valores estadísticos básicos de porcentaje de agua del Mar Menor en el punto P5.</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 30. Valores estadísticos básicos de porcentaje de agua del Mar Menor en el punto P6.</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 31. Valores estadísticos básicos de porcentaje de agua del Mar Menor en el punto P7.</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 32. Valores estadísticos básicos de porcentaje de agua del Mar Menor en el punto P8.</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 22. Estadística básica para los datos de salinidad registrados en el punto de control P4 en cada uno de los escenarios.</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 23. Estadística básica para los datos de salinidad registrados en el punto de control P9 en cada uno de los escenarios.</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 24. Estadística básica para los datos de salinidad registrados en el punto de control P9 en cada uno de los escenarios.</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 25. Estadística básica de la variación de salinidad en el fondo en el punto P1 en cada uno de los escenarios.</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 26. Estadística básica de la variación de salinidad en el punto P2 en cada uno de los escenarios.</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 27. Estadística básica de la variación de salinidad en el punto P3 en cada uno de los escenarios.</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 28. Media de los valores de variación de salinidad en los puntos P1, P2 y P3 para cada uno de los escenarios simulados.</i>	<i>118</i>



Región de Murcia
Consejería de Agua, Agricultura,
Ganadería, Pesca, Medio
Ambiente y Emergencias.



Universidad
Politécnica
de Cartagena



INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Instalación de un sensor de presión LMK807 en la plataforma S-WIDE con célula fotovoltaica...</i>	18
<i>Figura 2. Ejemplo de fondeo de ADCP sobre el lecho en el canal de Marchamalo.</i>	19
<i>Figura 3. Localización de los fondeos de los ADCPs ubicados en Las Encañizadas.</i>	20
<i>Figura 4. Posición del cálculo de las variables en cada una de las variables en una malla tipo Arakawa C.</i>	25
<i>Figura 5. Ejemplo de discretización vertical con coordenadas σ (tomada de https://www.myroms.org/).</i>	28
<i>Figura 6. Izquierda: Batimetría utilizada para crear la malla de cálculo. Derecha: Malla utilizada para las simulaciones con ROMS. El cuadro rojo representa la zona en la que se ha aplicado una malla anidada de mayor resolución.</i>	29
<i>Figura 7. Malla utilizada para la zona de Marchamalo.</i>	29
<i>Figura 8. Elevación del nivel del mar del modelo IBI-MFC (azul) y del sensor de San Pedro del Pinatar (rojo).</i>	33
<i>Figura 9. Componentes u y v barotrópicas utilizadas en los contornos provenientes del modelo IBI-MFC.</i>	34
<i>Figura 10. Velocidad de corriente registrada (azul) y modelada (rojo) en El Estacio. Datos suavizados horariamente.</i>	35
<i>Figura 11. Velocidad de corriente registrada (azul) y modelada (rojo) en Marchamalo. Datos suavizados horariamente.</i>	36
<i>Figura 12. Ubicación de las estaciones de muestreo donde se han obtenido perfiles de salinidad y perfiles en el punto E12 (rojo datos modelados, azul registrados).</i>	37
<i>Figura 13. Ubicación de las estaciones de muestreo donde se han obtenido perfiles de salinidad y perfiles en el punto E11 (rojo datos modelados, azul registrados).</i>	38
<i>Figura 14. Localización de los ADCP fondeados y Altura significativa de oleaje predicho por el modelo SWAN frente al medido por el ADCP.</i>	50
<i>Figura 15. Rosas de oleaje ADCP y SWAN</i>	50
<i>Figura 16. Precipitación acumulada de marzo a mayo de 2022 y mediana de la precipitación acumulada de 1981 a 2010 en el mismo periodo (AEMET).</i>	51
<i>Figura 17. Variación de la presión atmosférica en 2021-2022 (datos suavizados diariamente).</i>	52
<i>Figura 18. Análisis estacional de temperatura para agosto 2022 (AEMET).</i>	53
<i>Figura 19. Variación de temperatura del aire para los años 2021 y 2022, datos suavizados a 12 horas ..</i>	54
<i>Figura 20. Evolución de valores medios de la salinidad del Mar Menor de mayo a septiembre de 2020 (azul), 2021 (rojo) y 2022 (amarillo) (SDC Mar Menor).</i>	54



Figura 21. Velocidad del viento registrada para los años 2021 a 202 (datos suavizado a 12 horas).....	55
Figura 22. Elevación del nivel del mar registrada por los sensores de presión ubicados dentro del Mar Menor.	55
Figura 23. Viento registrado en San Javier durante el episodio de seiche analizado (arriba) y elevación del nivel del mar en La Isleta y Lo Pagán (abajo).	56
Figura 24. Variación del nivel del mar registrada en San Pedro del Pinatar y Lo Pagán.	57
Figura 25. Rosas de corrientes del canal del Estacio a 4.7 m del fondo (superficie), 2.7 m del fondo (capa media) y 0.7 del fondo (capa de fondo).....	58
Figura 26. Variaciones de presión atmosférica (arriba) y corrientes en la capa media el Estacio (abajo) durante 2021.	59
Figura 27. Diferencias de elevación en metros (rojo) y caudal en m ³ /s (azul) en el canal del Estacio.....	59
Figura 28. Regresión polinomial de tercer grado del caudal del canal del Estacio frente a la diferencia de elevaciones.	60
Figura 29. Serie temporal de caudales registrados (rojo) de 2021 en el Estacio con valores calculados ...	60
Figura 30. Caudal calculado a partir de la ecuación empírica (azul datos horarios, rojo datos suavizados diariamente).	61
Figura 31. Rosas de corrientes del canal de Marchamalo a 2.3 m del fondo (superficie), 1.4 m del fondo (capa media) y 0.5 del fondo (capa de fondo).....	61
Figura 32. Variación de la corriente registrada en el canal de Marchamalo durante 2021 en la capa situada a mitad de la columna de agua.	62
Figura 33. Diferencias de elevación (rojo) y caudal (azul) en el canal de Marchamalo.....	63
Figura 34. Regresión polinomial de tercer grado del caudal del canal del Marchamalo frente a la diferencia de elevaciones.	63
Figura 35. Caudal obtenido a partir de la ecuación empírica (rojo) vs caudal calculado a partir de los datos (azul).....	64
Figura 36. Localización del fondeo del ADCP en la Gola de la Torre.....	65
Figura 37. Rosa de corrientes a partir de los datos registrados a 0.8 metros del fondo por el correntímetro de la gola de La Torre y evolución del componente u de la velocidad.	66
Figura 38. Regresión polinomial de tercer grado del caudal de la gola de la Torre frente a la diferencia de elevaciones.	66
Figura 39. Posicionamiento del fondeo del correntímetro en la Gola del Charco	67
Figura 40. Rosa de corrientes a partir de los datos registrados a 0.5 metros del fondo por el correntímetro ubicado en la gola de El Charco y evolución del componente U de la velocidad.....	67
Figura 41. Regresión polinomial de tercer grado	68



Figura 42. Estado del canal en 1956 y estado actual de la bocana a la vertiente Mediterránea del canal de Veneziola.	69
Figura 43. Rosa de corrientes a partir de los datos registrados a 0.8 metros del fondo por el correntímetro ubicado en el canal de Veneziola y evolución del componente u de la velocidad.	70
Figura 44. Ajuste polinomial de tercer grado para los datos del canal de Veneziola.	70
Figura 45. Rosa de corrientes registrada en el correntímetro situado cerca de los Esculls a 1.6 metros de profundidad del fondo y velocidad del componente u de la corriente.	71
Figura 46. Variación de la corriente en el eje principal una vez rotado para el canal de Veneziola, gola de La Torre y Gola de El Charco. Valores positivos indican flujo hacia el Mediterráneo y negativos hacia el Mar Menor.	73
Figura 47. Caudales obtenidos para cada uno de los canales en Las Encañizadas.	74
Figura 48. Desnivel entre Lo Pagán y San Pedro del Pinatar (rojo) y caudal total en Las Encañizadas (azul).	75
Figura 49. Regresión polinomial de tercer grado.	75
Figura 50. Flujos en las encañizadas calculados con la ecuación empírica para los años 2021 y 2022 (azul datos horarios, rojo datos suavizados a 24 horas).	76
Figura 51. Elevación del nivel del mar en el embarcadero de la Encañizada de la Torre.	77
Figura 52. Caudal de entrada (negativo) y salida (positivo) del agua entre el Mar Menor y el Mar Mediterráneo. Azul datos horarios, rojo datos diarios.	78
Figura 53. Caudal neto de intercambio del Mar Menor. En azul las primaveras de 2021 y 2022.	79
Figura 54. Caudal neto de intercambio del Mar Menor. En azul los veranos de 2021 y 2022.	79
Figura 55. Variación nivel del mar en el sensor de Lo Pagán. En azul se indican los meses de febrero.	81
Figura 56. Caudal (azul) e intensidad del viento (rojo) (datos suavizados a 24 horas).	81
Figura 57. Imágenes de la Gola de Marchamalo.	82
Figura 58. Detalles de la bocana del mediterráneo en el canal de Marchamalo.	83
Figura 59. Dragado del canal de Marchamalo en 2017.	85
Figura 60. Área afectada por el episodio de anoxia de 2021.	86
Figura 61. Imágenes aéreas de la mancha de agua en putrefacción observada el verano de 2021 enfilando la salida por el Canal de Marchamalo.	86
Figura 62. Presión atmosférica registrada durante el periodo simulado.	87
Figura 63. Temperatura del aire registrada en el periodo simulado.	88
Figura 64. Precipitaciones en el periodo simulado.	88
Figura 65. Humedad relativa registrada en el periodo simulado.	89
Figura 66. Velocidad del viento registrada en el periodo simulado.	89



<i>Figura 67. Elevaciones del nivel del mar Mediterráneo procedentes del modelo IBI-MFC (azul)) y San Pedro (rojo).....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 68. Componentes Ubar y Vbar utilizados en los contornos provenientes del modelo IBI-MFC.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 69. Batimetría de escenarios simulados.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 70. Puntos de control establecidos en el modelo.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 71. Variación de las tasas de renovación en el fondo entre cada uno de los escenarios y la situación actual (Escenario1).....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 72. Mapa de diferencia de porcentaje de renovación en el fondo en el Escenario 6.</i>	<i>96</i>
<i>Figura 73. Variación de las tasas de renovación en superficie entre cada uno de los escenarios.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 74. Mapa de diferencia de porcentaje de renovación en el fondo en el Escenario 6 en superficie.</i>	<i>98</i>
<i>Figura 75. Evolución temporal de la variación en el porcentaje de renovación en el punto de control P4 en la capa de fondo para cada escenario.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 76. Evolución temporal del porcentaje de renovación en el punto de control P4 en la capa de superficie.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 77. Evolución temporal del porcentaje de renovación en el punto de control P4 en toda la columna de agua.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 78. Variación en el porcentaje de agua renovada para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P9 en la capa de fondo.</i>	<i>101</i>
<i>Figura 79. Variación en el porcentaje de agua renovada para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P9 en superficie.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 80. Variación en el porcentaje de agua renovada para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P9 en la columna de agua.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 81. Variación en el porcentaje de agua renovada para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P10 en la capa de fondo.</i>	<i>103</i>
<i>Figura 82. Variación en el porcentaje de agua renovada para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P10 en la capa de superficie.</i>	<i>104</i>
<i>Figura 83. Variación en el porcentaje de agua renovada para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P10 en la columna de agua.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 84. Incremento de del porcentaje de agua del Mar Meno en el fondo para los Escenarios 2 a 5 con respecto al 1 expresado como tanto por ciento.</i>	<i>106</i>
<i>Figura 85. Variación en el porcentaje de agua del Mar Menor en el punto P5.</i>	<i>107</i>
<i>Figura 86. Variación en el porcentaje de agua del Mar Menor en el punto P6.</i>	<i>107</i>
<i>Figura 87. Variación en el porcentaje de agua del Mar Menor en el punto P7.</i>	<i>108</i>
<i>Figura 88. Variación en el porcentaje de agua del Mar Menor en el punto P8.</i>	<i>108</i>



Región de Murcia
 Consejería de Agua, Agricultura,
 Ganadería, Pesca, Medio
 Ambiente y Emergencias.



**Universidad
 Politécnica
 de Cartagena**



Figura 89. Superior, variación de la corriente entre escenarios. Inferior, corriente obtenida en el canal de El Estacio..... 110

Figura 90. Evolución temporal de perfiles de salinidad en el punto P4 para cada escenario..... 111

Figura 91. Evolución temporal de perfiles de salinidad para cada escenario en el Punto P9..... 112

Figura 92. Evolución temporal de perfiles de salinidad para cada escenario en el Punto P10..... 113

Figura 93. Diferencias de salinidad de fondo entre los Escenarios 2 a 5 con respecto al Escenario 1 para el 24/9/2021 cuando se produjo la mayor entrada de agua del Mediterráneo en el periodo considerado.115

Figura 94. Diferencias de salinidad de fondo entre el Escenario 6 y el 1 para el 24/9/2021 cuando se produjo la mayor entrada de agua del Mediterráneo en el periodo considerado..... 115

Figura 95. Variación de la salinidad en el punto de control P1. 116

Figura 96. Variación de la salinidad en el punto de control P2. 116

Figura 97. Variación de la salinidad en el punto de control P3 117

Figura 98. Altura significativa del oleaje en el periodo considerado. 119

Figura 99. Rosa de oleaje para el periodo considerado. Indica el % de ocurrencia de cada rango de Hs..... 120

Figura 100. Espectros de oleaje de dos días de mayo y junio de máximos Hs cada uno. 121

Figura 101. Espectros bidireccionales de oleaje de dos días de mayo y junio de máximos Hs cada uno. 121

Figura 102. Velocidad orbital del oleaje en el fondo 122

Figura 103. Mapa de los campos de olas para cada una de las fechas..... 123



Región de Murcia
Consejería de Agua, Agricultura,
Ganadería, Pesca, Medio
Ambiente y Emergencias.



Universidad
Politécnica
de Cartagena



ACRÓNIMOS

AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
CHS	Confederación Hidrográfica del Segura
COARE	Coupled Ocean Atmosphere Experiment
ESMF	Earth System Modeling Framework
ETL	Environmental Technology Laboratory
IGN	Instituto Geográfico Nacional
IMIDA	Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration, US
ONR	Office of Naval Research, US Navy
PUV	Presión (P) y componentes horizontales de la velocidad orbital de las olas (U y V).
ROMS	Regional Ocean Model System
SDC	Servidor de Datos Científicos del Mar Menor
TOGA	Tropical Ocean Global Atmosphere
UPCT	Universidad Politécnica de Cartagena
USV	Unmanned surface vehicle
WHOI	Woods Hole Oceanographic Institution



1. INTRODUCCIÓN

Conforme el artículo 8 del Decreto n.º 173/2019 [1], de 6 de septiembre, la Dirección general del Mar Menor asume las competencias y funciones de estudio, planificación, ejecución y desarrollo de los proyectos y actuaciones en el Mar Menor relacionados con la protección y regeneración ambiental de su ecosistema, sin perjuicio de las atribuidas a otros órganos directivos de la Administración Regional. También le corresponde la coordinación con los distintos organismos y direcciones generales de la Comunidad Autónoma, y con otras Administraciones Públicas y entidades públicas o privadas con competencias concurrentes para el desarrollo de dichos proyectos y actuaciones, y el impulso del conocimiento científico y la investigación aplicada en relación con problemas ambientales de la laguna.

En el Decreto n.º 88/2021, de 22 de abril, y Decreto n.º 127/2021, de 25 de junio [2], se establecen las normas especiales reguladoras de una subvención, otorgada mediante concesión directa, por la Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente, a favor de la Universidad Politécnica de Cartagena para el desarrollo y continuación del proyecto sobre modelado hidrodinámico de alta resolución; estudio del intercambio de agua entre el Mar Menor y el Mediterráneo.

La primera aproximación al estudio del intercambio de agua entre el Mar Mediterráneo y el Mar Menor la reporta Arévalo en 1988 [3] con el fondeo de un correntímetro y dos sensores de presión en el canal de El Estacio. Otros trabajos han aportado aspectos parciales, no conclusivos, sobre la hidrodinámica y flujos de intercambio con mar abierto ([4], [5], [6], [7] [8]) siendo la tesis publicada por López-Castejón [9], el primer estudio exhaustivo de los procesos que regulan la entrada y salida de agua por los canales de comunicación.

A partir de este último estudio se concluyó que el intercambio está forzado por las diferencias de nivel del mar entre el Mar Menor y el Mar Mediterráneo, siendo el efecto barométrico el mayor forzante de los cambios de nivel del mar en el Mediterráneo, y por tanto de los flujos de entrada y salida. Los cambios de presión atmosférica son los principales



Región de Murcia
Consejería de Agua, Agricultura,
Ganadería, Pesca, Medio
Ambiente y Emergencias.



Universidad
Politécnica
de Cartagena



reguladores del intercambio entre la laguna y el mar abierto. Las mareas y los vientos también pueden influir sobre este proceso, pero adquieren más importancia en episodios de mayor estabilidad en la presión atmosférica. Su influencia es diferente para cada canal. En Las Encañizadas son el viento y los gradientes de presión horizontal los forzantes dominantes. En El Estacio, sin embargo, el viento ejerce una influencia muy pequeña, mientras que Marchamalo está forzado tanto por viento, como por marea y gradiente horizontal. La mayor tasa de renovación se produce en otoño-invierno donde se producen cambios de presión atmosférica bruscos con fuertes episodios de viento.

A partir de los datos registrados se han obtenido ecuaciones empíricas para determinar el flujo de agua a partir de los sensores de nivel del mar dentro y fuera de la laguna, lo que, debido a la alta confianza del modelo obtenido, permite evitar los inconvenientes de los fondeos de correntímetros que en ocasiones quedan aterrados y requieren operaciones costosas de cambios mantenimiento.

A diferencia de los canales del Estacio y Marchamalo, el complejo de las Encañizadas requiere una atención particular. Se fondearon tres correntímetros adicionales y se ha analizado la serie temporal de imágenes del satélite de Sentinel-2 L1C para observar la dinámica temporal de aterramientos.

Se han realizado diferentes simulaciones para diferentes escenarios de modificación de la sección atravesada del canal de Marchamalo y poder dilucidar el potencial efecto sobre diferentes zonas tanto dentro como fuera del Mar Menor.

Al modelo ROMS se le ha superpuesto el modelo de oleaje, una vez validados los resultados con los datos registrados. El oleaje en el Mar Menor está restringido por la carrera de viento, motivo por el cual la altura de las olas es pequeña y en algunas zonas pueden no influir sobre el fondo, pero en otras, al tratarse de un mar somero y comportarse como olas largas, la corriente de oleaje puede ser significativa, además de tener un efecto importante en la resuspensión del sedimento y su transporte.



Región de Murcia
Consejería de Agua, Agricultura,
Ganadería, Pesca, Medio
Ambiente y Emergencias.



Universidad
Politécnica
de Cartagena



1.1. OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo consiste en investigar el comportamiento de la masa de agua del Mar Menor forzada por el intercambio con el Mediterráneo (interacciones mar-mar), la evaporación y precipitación (interacciones atmósfera-mar) y oleaje mediante simulaciones con el Sistema de Modelado Oceanográfico Regional del Mar Menor.

Este objetivo general se desglosa en los siguientes objetivos particulares:

1. Análisis de datos atmosféricos de 2021-22
2. Análisis de datos de elevación del nivel del mar dentro y fuera del Mar Menor y su correlación con los proporcionados por el sistema CMEMS (Copernicus)
3. Tratamiento de dato oceanográficos registrados
4. Obtención de ecuaciones empíricas para el cálculo de flujos en los canales
5. Estudio de flujos en el canal de Marchamalo bajo diferentes escenarios batimétricos
6. Estudio preliminar del oleaje del Mar Menor.

1.2. ESTRUCTURA DEL INFORME

Este documento consta de varios capítulos además de este primero de Introducción. El segundo capítulo es de metodología donde se explican los métodos de análisis y modelos utilizados. El tercero, de resultados y discusión se divide en tres subapartados: el primero de Flujos de intercambio mar menor-mediterráneo 2021-2022; el segundo sobre Estudio de flujos en el Canal de Marchamalo y el tercero sobre oleaje del Mar Menor. se termina con un apartado de conclusiones y bibliografía.

1.3. EQUIPO DE TRABAJO

El equipo de trabajo está formado por miembros del laboratorio de Ecosistemas del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cartagena bajo la dirección del Dr. Javier Gilabert.

Dr. Francisco López Castejón, Licenciado en Ciencias del Mar, Máster en Informática y Matemática aplicada a la ciencia y la ingeniería por la Universidad de Murcia, y Doctor en



Tecnologías Industriales por la Universidad Politécnica de Cartagena, ha estado al cargo de la gestión de los datos, su tratamiento, implementación del modelo y su validación. Ha contribuido al diseño experimental y en la elaboración de este informe de resultados.

Bartolomé Morote Sánchez, Graduado en Ingeniería Civil por la Universidad Politécnica de Cartagena ha elaborado los datos de oleaje.

Dña. Carolina Rodríguez de Mesas, Ingeniera Naval y Oceánica por la Universidad Politécnica de Cartagena, ha estado al cargo de los equipos fondeados, y la gestión de datos, además de en la toma de muestras, coordinación y archivo de datos y gestión y edición de informe.



Región de Murcia
Consejería de Agua, Agricultura,
Ganadería, Pesca, Medio
Ambiente y Emergencias.



Universidad
Politécnica
de Cartagena



2. METODOLOGÍA

Para la consecución de los objetivos se han obtenido datos meteorológicos y oceanográficos con los que forzar ROMS. Se han actualizado batimetrías y se han tratado los datos obtenidos para forzar y validar las predicciones de los modelos.

2.1. DATOS ATMOSFÉRICOS

Los datos atmosféricos se obtuvieron de la estación meteorológica del aeropuerto de San Javier de la AEMET (Indicador climatológico: 7031X) situada a 37° 46' 42" N y 0° 48' 21". Se obtuvieron datos diezminutales de temperatura del aire, presión atmosférica, precipitación, humedad relativa, cobertura nubosa, dirección y velocidad del viento.

2.2. BATIMETRÍA

Los datos de base oficiales de las batimetrías del Mar Menor son los de la II Edición de febrero de 1998 de la carta náutica del Instituto Hidrográfico de la Marina de 1969.

En 2017 el laboratorio del IEO de San Pedro del Pinatar realizó dos campañas oceanográficas dentro del programa “Estudio Oceanográfico Integral de Alta Resolución de la Laguna Costera del Mar Menor, Murcia” [10] donde se levantó una nueva batimetría mediante equipo GeoSwath que proporciona tanto datos batimétricos de alta resolución como valores de reflectividad acústica del fondo marino, proporcionando una cartografía detallada de los diferentes tipos de sustrato, hábitats y *bedforms*. Los datos obtenidos fueron tratados mediante software CARIS Hips & Sips, generando modelos digitales del terreno y mapa batimétrico. Actualmente es la batimetría más actualizada. No obstante, se realizó únicamente en profundidades mayores de 3 metros por lo que no se incluyó la parte más superficial del Mar Menor.



Recientemente el IMIDA [11, 12] ha aportado la batimetría de mayor resolución actualizada en los canales del Mar Menor obtenidos mediante fotogrametría mediante imágenes de satélite desde 2012 a 2019 validando estos valores con datos *in situ* obtenidos mediante USV.

Algunas zonas más costeras de menor extensión se han levantado también mediante diferentes técnicas de sondado. Reuniendo todos los datos anteriores disponibles se ha elaborado una batimetría que es la más actualizada posible en su conjunto y la que hemos utilizado en este estudio.

No obstante, tras utilizar la batimetría obtenida por el IMIDA mediante fotogrametría para 2019 en el modelo, se observaron resultados con desviaciones mayores de las esperadas en las zonas muy someras de las ecañizadas, por lo que se optó por utilizar esta batimetría sólo para las zonas más profundas de 0.5 m donde el error establecido era menor. Para las zonas con profundidades menores de 0.5 m se utilizaron los datos del levantamiento topográfico realizado por la UPCT en 2016 y algunas comprobaciones adicionales.

2.3. DATOS OCEANOGRÁFICOS

Los datos oceanográficos recogidos en este estudio fueron registrados por equipos en diferentes instalaciones y fondeos. Se han utilizado los datos de elevación del nivel del mar registrados por sensores de presión instalados en los clubs náuticos de Lo Pagán y Villa de San Pedro. Los datos de corrientes en los canales fueron registrados por perfiladores de corriente de efecto Doppler (ADCP), 4 fondeados en la zona de las Encañizadas, uno en el canal del Estacio y otro en el de Marchamalo. Adicionalmente se fondearon ADCPs dentro de la laguna para la medida de oleaje y se han utilizado datos de series históricas.

2.3.1. SENSORES DE ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR

Los sensores instalados, tanto en el Club Náutico de Lo Pagán, como el CN Villa de San Pedro en San Pedro del Pinatar son equipos S-WIDE de Widhoc S.L. equipados con sensores de presión LMK807 corregidos atmosféricamente de BD-Sensors (Alemania).

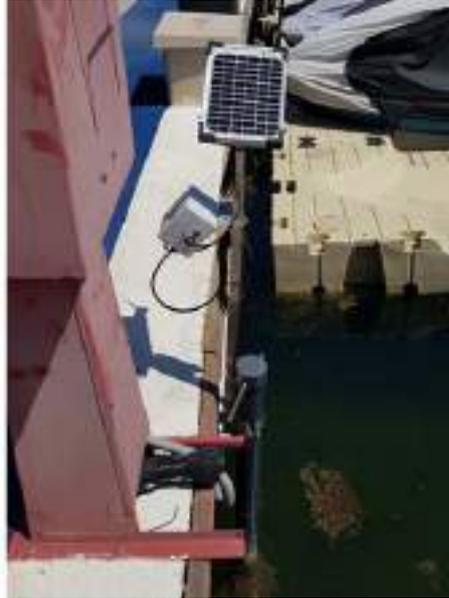


Figura 1. Instalación de un sensor de presión LMK807 en la plataforma S-WIDE con célula fotovoltaica.

2.3.1.1. Nivel de referencia

El origen de altitudes en tierra o cero geodésico en la península lo establece el Instituto Geográfico Nacional (IGN) a partir de datos del *Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA)* durante la década 1870-1880. No obstante, la referencia vertical de la cartografía náutica, el *cero hidrográfico*, que se utiliza en los anuarios de mareas y cartas náuticas viene marcada por el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) como el nivel de agua más bajo (corregido a la más baja bajamar). Por su parte, cada puerto establece y utiliza un nivel de referencia o *cero del puerto*, que puede coincidir o no con el cero hidrográfico. Puertos del Estado gestiona la red de mareógrafos de Puertos del Estado (REDMAR) que se utilizan para el cálculo, monitorización y actualización del cero hidrográfico. Se establece el *cero REDMAR* que se utiliza para cada mareógrafo de la red, de forma que cada mareógrafo de la red utiliza normalmente el Cero del Puerto (comunicado por la Autoridad Portuaria) como cero de las medidas del mareógrafo, cuando éste es conocido.

Por otro lado, se calcula el *Nivel medio del mar en el puerto* en que se encuentra el mareógrafo, calculado a partir de un año concreto de datos de dicho mareógrafo. Este nivel no debe confundirse con el Cero Geodésico (Nivel Medio del Mar en Alicante). En la descripción de todos los mareógrafos de REDMAR que se ofrece en la web de Puertos del Estado se muestra la

relación entre Cero del Puerto y el Cero Geodésico (NMMA) cuando está disponible a partir de nivelaciones de alta precisión realizadas en colaboración con el IGN y con su metodología.

En los puertos del Mar Menor y en el de San Pedro del Pinatar no existen nivelaciones disponibles ni cálculo de los ceros de referencia. Aquí se ha optado por calcular el de referencia como el nivel medio de cada uno de los sensores a partir de la serie temporal disponible y trabajar con el residuo.

2.3.2. CORRENTÍMETROS

Los perfiladores de corrientes de efecto Doppler (ADCP) fondeados en los canales y en zonas próximas de la ribera interna del Mar Menor (San Javier y en Punta Brava) fueron del modelo Aquadopp Profiler (Nortek) de 2 Mhz, con capacidad de medida en un rango de ± 10 m/s y precisión del 1% del valor medio ± 0.005 m/s. Estos equipos disponen de tecnología PUV, que utiliza la presión (P) y los dos componentes horizontales de la velocidad (U y V) orbital generadas por el paso de las olas. Estos equipos disponen de capacidad para discretizar capas de agua de hasta 1 cm, pudiendo además medir simultáneamente el oleaje en superficie. Además, disponen de sensor de presión, brújula magnéticos, sensor de temperatura del agua e inclinómetro para la corrección de medidas en las direcciones u y v , además de baterías de hasta 100W que permite una autonomía estimada según programación de 70 días. La Figura 2 muestra la disposición de los transductores en uno de los fondeos.



Figura 2. Ejemplo de fondeo de ADCP sobre el lecho en el canal de Marchamalo.

En las Encañizadas se ha realizado un fondeo de cuatro ADCPs Figura 3 para entender mejor su funcionamiento.



Figura 3. Localización de los fondeos de los ADCPs ubicados en Las Encañizadas.

2.4. TRATAMIENTO DE DATOS

El análisis de los datos se ha realizado siguiendo la metodología propuesta por [9]. Se han utilizados rutinas, tanto propias como desarrolladas por terceros, para los programas OCTAVE [13] y MATLAB (versión R2014). Todos los datos registrados han pasado un control de calidad que asegure que han sido medidos correctamente y pueden ser usados para su análisis posterior. Por ejemplo, para los datos procedentes de los ADCP, y siguiendo las indicaciones del fabricante [14] se eliminaron los registros con valores de amplitud del ruido de retorno menores de 30 dB en cualquiera de sus haces.

En función del proceso oceanográfico o meteorológico estudiado se ha aplicado un suavizado de los datos, siendo el más frecuente el horario o diario. Esto se realizó mediante un filtro de media móvil de [15] (Ecuación 1), uno de los más utilizados en el tratamiento de series

temporales en oceanográficos para eliminar las oscilaciones menores a una frecuencia determinada.

$$\left\{ A_{n+1}^2 \frac{A_n}{[(n+1)n]} \right\}$$

Ecuación 1

Mediante el suavizado que proporciona este filtro se elimina el riesgo de “aliasing” (creación de oscilación artificial en la serie al decimar sobre una serie no filtrada previamente) en los datos.

En algunos casos, cómo el del estudio de las variaciones del nivel del Mar Mediterráneo y Mar Menor se han realizado análisis de correlación. El coeficiente de correlación de Pearson (r_{xy}) (Ecuación 2) entre dos conjuntos de datos X_n y Y_n proporciona una medida de la similitud de su distribución presentando dos características destacables: es adimensional y puede variar entre -1 y 1. El coeficiente de determinación (r^2) expresa el porcentaje de varianza (%) de la variable dependiente explicado por la variable independiente y es equivalente al cuadrado de r . Aquí se ha utilizado el nivel de confianza estadística (p) del 99 % ($p < 0.01$), así como la función de correlación cruzada para detectar similitudes entre series y su desfase.

$$R_{xy} = \frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x}) \cdot (y_n - \bar{y})}{\sqrt{[\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2 \cdot \sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y})^2]}}$$

Ecuación 2

2.5. SISTEMA DE MODELADO OCEANOGRÁFICO REGIONAL (ROMS)

El Regional Ocean Model System (ROMS) consta de una serie de desarrollos computacionales independientes o acopladas a modelos tanto atmosféricos como de oleaje, de sedimentos, de hielo, biogeoquímicos, bioópticos y biológicos (información adicional puede encontrarse en <https://www.myroms.org/index.php>). Está basado en las convenciones del Earth System Modeling Framework (ESMF) de forma que es un software de código abierto bajo licencia MIT/X es interoperable con protocolos, métodos analíticos y estándares de documentación comunes para datos y flujo de trabajo compartido [16]. Es por tanto un modelo de desarrollo

distribuido y mantenido por la comunidad de desarrolladores y usuarios (más de 6.000 en todo el mundo). El diseño, desarrollo y comprobación ha sido subvencionado por la [Office of Naval Research \(ONR\), Ocean Atmosphere and Space Research Division](#), de la Marina Estadounidense. Los principales desarrolladores proceden de las universidades de Princeton, UCLA, Rutgers y Stanford. Esta iniciativa de la ONR es parte de un esfuerzo mayor para mejorar las capacidades de predicción oceánica.

ROMS es un modelo oceánico de ecuaciones primitivas de superficie libre que sigue el terreno ampliamente utilizado por la comunidad científica para una gran gama de aplicaciones (p.e., [17]; [18]; [19]; [20]; [21]; [22]; [23]; [24]). Se presentan a continuación el grupo de ecuaciones fundamentales que rigen el modelo:

Ecuaciones primitivas de superficie libre

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla u + f v = -\frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{u'w'} - v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u + D_u$$
$$\frac{\partial v}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla v + f u = -\frac{\partial \phi}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{v'w'} - v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v + D_v$$

Ecuación 3

Siendo la ecuación de la evolución con el tiempo de un escalar (Temperatura, Salinidad, trazador):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla C = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{C'w'} - v_\theta \frac{\partial C}{\partial z} \right) + F_c + D_c$$

Ecuación 4

Asumiendo la aproximación hidrostática (las aceleraciones verticales son despreciables en comparación con la aceleración de la gravedad) y la de Boussinesq (solo se tienen en cuenta las variaciones de densidad multiplicadas por la gravedad), las variaciones de presión en la vertical responden a la ecuación:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\rho g}{\rho_0}$$

Ecuación 5



y la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Ecuación 6

siendo:

D_u, D_v, D_c	Términos de difusión horizontal
F_u, F_v, F_c	Fuerzas
$f(x, y)$	Parámetro de Coriolis
ν, ν_θ	Viscosidad molecular y difusividad
$\phi(x, y, z, t)$	Presión dinámica
u, v, w	Componentes u, v y w de la velocidad
x, y	Coordenadas horizontales
z	Coordenada vertical
g	Aceleración de la gravedad
$\rho_0 + \rho(x, y, z, t)$	Densidad total in situ

El núcleo dinámico de ROMS se compone de cuatro algoritmos separados que incluyen el no lineal (NLM) ([25] y [26]), el tangente lineal (TLM), el representante tangente lineal (RPM) y el contiguo (ADM) [27]. A su vez, hay varios algoritmos de control para ejecutar cada uno de ellos, tanto juntos como por separado, que se utilizan para estudiar la dinámica, la sensibilidad y la estabilidad de los resultados ante perturbaciones, errores o incertidumbres que ocurren naturalmente en el sistema de pronóstico y de muestreo adaptativo [27]. El algoritmo adjunto de sensibilidad (ADSEN) calcula la respuesta de una función elegida del modelo de circulación a las variaciones en todos los atributos físicos del sistema [28]. También incluye algoritmos para la asimilación de datos que varían con restricciones fuertes (S4DVAR, IS4DVAR) y débiles (W4DVAR) [29]. Dispone de un algoritmo de control para la predicción de conjunto a través de perturbaciones en el forzamiento y/o las condiciones iniciales a lo largo de las direcciones más



inestables en el espacio, al igual que varios algoritmos de comprobación para probar la precisión y corrección de los algoritmos TLM, RPM y ADM.

Por economía computacional, la ecuación de la cantidad de movimiento con superficie libre se resuelve utilizando un esquema de avance en el tiempo explícito y dividido (*split-explicit time-stepping scheme*), que requiere un tratamiento especial y acoplamiento entre los modos barotrópico (rápido) y baroclínico (lento). Se lleva a cabo un número finito de pasos de tiempo barotrópico, dentro de cada paso baroclínico, para evolucionar las ecuaciones de cantidad de movimiento integradas verticalmente y de superficie libre. Para evitar los errores asociados con el *aliasing* de frecuencias resueltas por los pasos barotrópicos pero no resueltos por el paso baroclínico, los campos barotrópicos se promedian en el tiempo antes de reemplazar aquellos valores obtenidos con un paso baroclínico más largo. Se usa un filtro de tiempo en forma de coseno, centrado en el nuevo nivel de tiempo, para promediar los campos barotrópicos [30]. Además, el intervalo de tiempo separado está limitado a mantener exactamente las propiedades de conservación de volumen y conservación de consistencia que son necesarias para las ecuaciones de trazadores [30]. Actualmente, todas las ecuaciones 2D y 3D se diferencian en el tiempo utilizando un algoritmo de paso de tiempo predictivo (*Leap-Frog*) y corrector (Adams-Molton) que es robusto y estable. La estabilidad mejorada del esquema permite pasos de tiempo más largos, por un factor de aproximadamente cuatro, que compensa con creces el aumento del costo del algoritmo predictor-corrector.

En la vertical, las ecuaciones primitivas se discretizan sobre la topografía variable utilizando coordenadas σ de seguimiento del terreno estiradas [31].

Las coordenadas σ permiten una mayor resolución en áreas de interés, como la termoclina y las capas límite inferiores proporcionando cinco opciones disponibles en función de la zona y detalle que se desee resaltar [31]: 1) $C(\sigma)$ definida como una función por partes; 2) Función de Geyer para alta resolución de capa límite inferior en aplicaciones relativamente poco profundas, también definida como una función por partes; 3) función de Shchepetkin [32] definida como una función continua de doble estiramiento (*stretching*) y 4) función cuadrática polinomial de Legendre que permite mejores resoluciones en capas cercanas a la superficie [33].

La plantilla predeterminada utiliza diferencias finitas centradas de segundo orden en una cuadrícula vertical escalonada. Las opciones para la plantilla de orden superior están disponibles a través de una reconstrucción conservadora y parabólica de derivadas verticales [26]. Esta clase de modelo exhibe una mayor sensibilidad a la topografía, lo que resulta en errores de gradiente de presión. Estos errores surgen debido a la división del término gradiente de presión en un componente a lo largo de σ y una corrección hidrostática (para más detalles, ver [34]). El algoritmo numérico en ROMS está diseñado para reducir estos errores [25].

En la horizontal, las ecuaciones primitivas se evalúan utilizando coordenadas curvilíneas ortogonales ajustadas a los límites en una rejilla Arakawa C escalonada. La formulación general de coordenadas curvilíneas incluye coordenadas cartesianas (métricas constantes) y esféricas (métricas variables). Los límites costeros también se pueden especificar como una cuadrícula finita discretizada a través del enmascaramiento de tierra/mar. Al igual que en la vertical, la plantilla horizontal utiliza diferencias finitas centradas y de segundo orden. Sin embargo, el código está diseñado para facilitar la implementación de plantillas de orden superior. En la rejilla Arakawa C los componentes de velocidad u y v de la corriente se calculan en los laterales de cada uno de los nodos, mientras que la densidad (ρ), la elevación ($zeta$) y la componente w , se calculan en el centro. Está diseñado para utilizar múltiples niveles de anidación y cuadrículas compuestas.

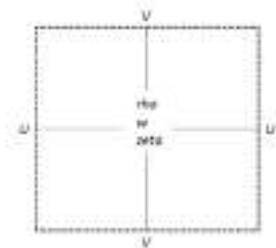


Figura 4. Posición del cálculo de las variables en cada una de las variables en una malla tipo Arakawa C.

ROMS tiene varias opciones para esquemas de advección: diferencias centradas de segundo y cuarto orden; y de tercer orden, en sentido ascendente. El esquema posterior es el modelo predeterminado y tiene una disipación de *hiperdifusión* dependiente de la velocidad como el error de truncamiento dominante [35]. Estos esquemas son estables para la metodología



Región de Murcia
Consejería de Agua, Agricultura,
Ganadería, Pesca, Medio
Ambiente y Emergencias.



Universidad
Politécnica
de Cartagena



predictor-corrector del modelo. Además, existe una opción para la representación conservadora *spline* parabólica de la advección vertical que tiene propiedades de dispersión similares a un esquema convencional preciso de ocho órdenes.

Hay varias parametrizaciones a escala de cuadrícula en ROMS. La mezcla horizontal de impulso y trazadores puede realizarse a lo largo de niveles verticales, superficies geopotenciales (profundidad constante) o superficies isopícnicas (densidad constante). El operador de mezcla puede ser armónico (esténcil de 3 puntos) o biarmónico (esténcil de 5 puntos) [34].

La parametrización de mezcla vertical en ROMS puede ser por esquemas de cierre locales o no locales. Los esquemas de cierre local se basan en las ecuaciones de energía cinética turbulenta de nivel 2.5 de Mellor y Yamada (1982) [36] que presenta una jerarquía de complejidad incremental, ROMS proporciona hasta el nivel 2.5 con las modificaciones de Galperin *et al.* [37] desarrolladas por Allen *et al.* [38] y la parametrización de la Escala de Longitud Genérica (GLS) [39]. El esquema de cierre no local se basa en la formulación de capa límite de perfil K [40]. El esquema de perfil K se ha ampliado para incluir tanto las capas límite oceánicas superficiales como las inferiores. El GLS es un modelo de turbulencia de dos ecuaciones que permite una amplia gama de cierres de mezcla verticales, incluidos los populares esquemas k-kl (Mellor-Yamada nivel 2.5), k- ϵ y k- ω . También se han agregado varias funciones de estabilidad ([37]; [41]; [42]) para proporcionar mayor flexibilidad. En un estudio [23] se evaluó el rendimiento de estos cierres de turbulencia en ROMS en términos de aplicaciones idealizadas de transporte de sedimentos. Además, existe un esquema de capa límite de lecho de olas/corriente que proporciona la tensión del fondo [43] y el transporte de sedimentos, importantes en aplicaciones costeras.

Actualmente, la capa límite de interacción aire-mar en ROMS se basa en la parametrización masiva de Fairall *et al.* [44] adoptando el algoritmo COARE (Experimento de Respuesta de Atmósfera Oceánica Acoplada) para el cálculo de flujos superficiales de cantidad de momento, calor sensible y calor latente. Esta capa límite se utiliza para el acoplamiento de una o dos vías con modelos atmosféricos.

ROMS está escrito en Fortran 90/95. Utiliza el preprocesado en C para activar las diversas opciones físicas y numéricas. El código se puede ejecutar en computadoras en serie o en paralelo.



El código utiliza un paradigma de paralelización de grano grueso que divide la cuadrícula 3D computacional en mosaicos. Cada mosaico es operado por diferentes procesos paralelos. Aunque originalmente el código fue diseñado para arquitecturas informáticas de memoria compartida y las directivas de paralelización que dependen del compilador OpenMP 2.0 Standard está solo en la rutina principal, pero más tarde se desarrolló una versión MPI y ambas posibilidades están ahora incluidas en el programa.

Se han establecido varios estándares de codificación para facilitar la legibilidad, el mantenimiento y la portabilidad del modelo. Todas las variables del modelo de estado se asignan dinámicamente y se pasan como argumentos a las rutinas computacionales a través de estructuras desreferenciadas de puntero. Todas las modificaciones realizadas por usuarios son reutilizables automáticamente. Esta estructura de código facilita los cálculos sobre cuadrículas anidadas y compuestas.

ROMS tiene una interfaz genérica de memoria distribuida que facilita el uso de varios protocolos de paso de mensajes. Actualmente, el intercambio de datos entre nodos se realiza con MPI. Sin embargo, otros protocolos como MPI2, SHMEM y otros pueden codificarse sin excesivo esfuerzo.

El software de procesamiento previo y posterior para la preparación de datos, análisis, trazado y visualización de ROMS es muy extenso. Toda la estructura de datos de entrada y salida del modelo se hace a través de ficheros en formato NetCDF (<https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>), lo que facilita el intercambio de datos entre computadoras, comunidad de usuarios y otro software de análisis independiente.

2.5.1. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MODELADO OCEANOGRÁFICO REGIONAL (ROMS) PARA EL MAR MENOR

En este apartado se describe la discretización horizontal y vertical indicando las mallas utilizadas. También se describen los forzantes atmosféricos utilizados y las condiciones de contorno e iniciales del modelo.

2.5.1.1. Discretización Horizontal y Vertical (Mallas utilizadas)

En esta configuración se ha optado por utilizar una malla que comprendiera todo el Mar Menor y los canales de Encañizadas y El Estacio con una resolución de 66×84 m, y otra anidada a esta de mayor resolución para Marchamalo (22×28 m). Para la discretización vertical se han utilizado 10 capas de tipo sigma, las cuales se acomodan a la forma del fondo permitiendo una mayor resolución en las capas más superficiales y más profundas, tal y como muestra el ejemplo de la Figura 5.

Para el anidamiento se ha utilizado una interpolación del tipo de vecino natural “*Natural Neighbor Interpolation*”, un método basado en una triangulación que tiene un área de influencia pesada asociada con cada punto muestreado. Con el objetivo de evitar la aparición de corrientes artificiales debido a gradientes horizontales de presión ficticios, las mallas se han suavizado hasta obtener un número de Haney ($rx1$) menor de 8 [25]. Las Figura 6 muestran la batimetría y el mallado para el mar menor y la Figura 7 un detalle de la batimetría del canal de Marchamalo.

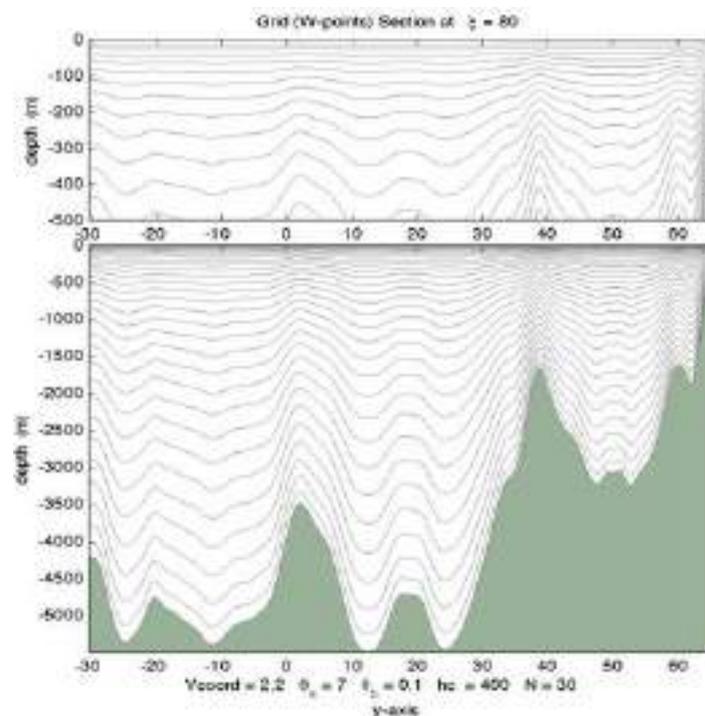


Figura 5. Ejemplo de discretización vertical con coordenadas σ (tomada de <https://www.myroms.org/>).

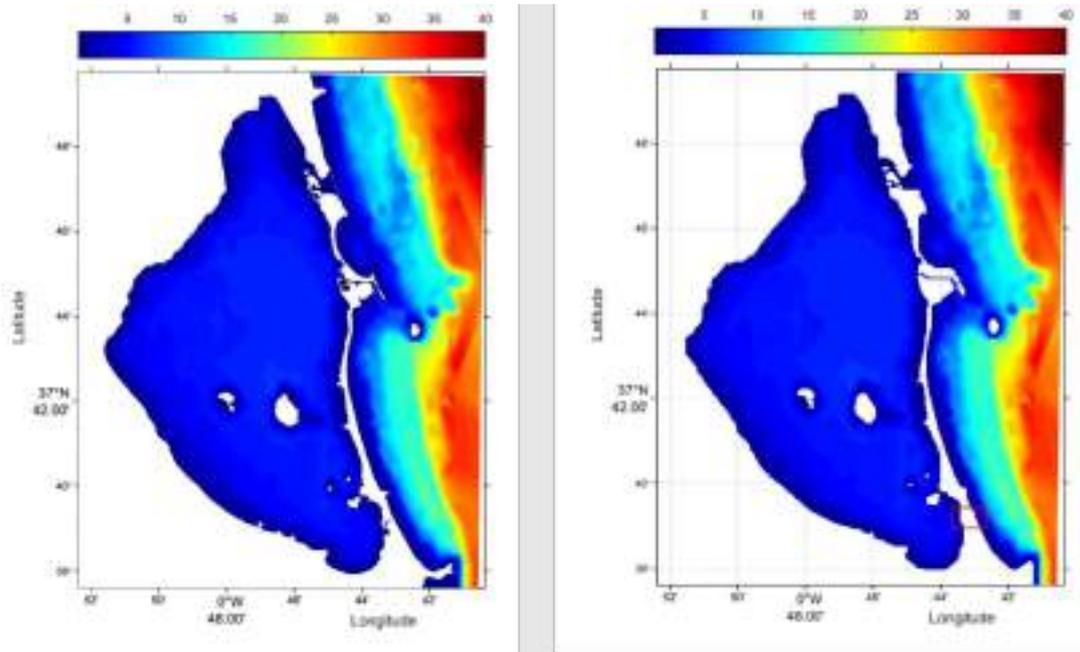


Figura 6. Izquierda: Batimetría utilizada para crear la malla de cálculo. Derecha: Malla utilizada para las simulaciones con ROMS. El cuadro rojo representa la zona en la que se ha aplicado una malla anidada de mayor resolución.

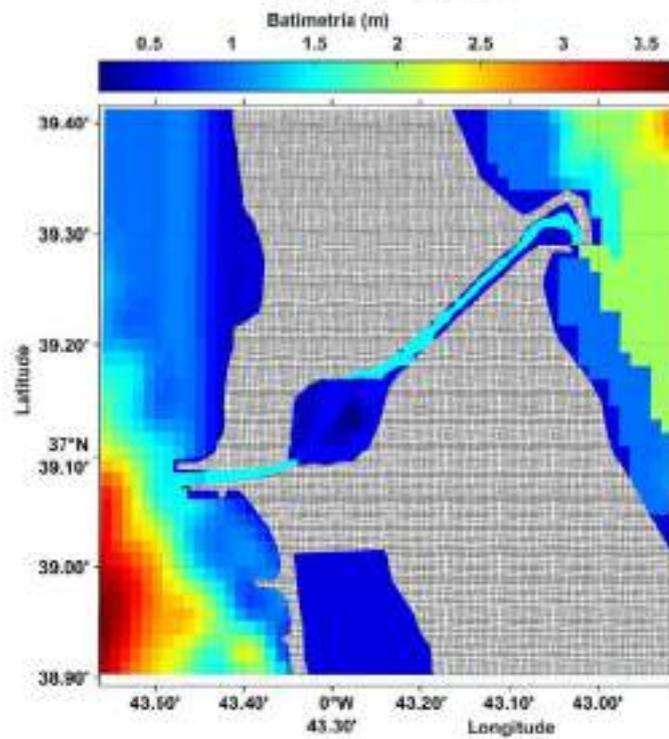


Figura 7. Malla utilizada para la zona de Marchamalo.

2.5.1.2. Forzantes atmosféricos

Para el cálculo de los flujos de calor se ha activado en el modelo el uso de una capa límite atmósfera/océano mediante la cual el modelo calcula el flujo de calor neto y el estrés de viento a partir de los datos meteorológicos facilitados. El cálculo de la transferencia de calor a través de la capa límite está basado en la parametrización del intercambio entre el aire y el mar [45] abreviado como LKB. El calor neto (Q_{NET}) se obtiene a partir del sumatorio del flujo de calor por radiación de onda corta (Q_{SO}), el de radiación de onda larga (Q_{LW}), el calor latente (Q_L), el sensible (Q_S) y la advección del calor por las corrientes (Q_{adv}). A partir de la latitud y la fecha, junto con los datos de humedad relativa y temperatura del aire proporcionados, el modelo es capaz de calcular el valor de estas variables.

$$Q_{NET} = Q_{SW} + Q_{LW} + Q_S + Q_L + Q_{ADV}$$

Ecuación 7

Para ello ROMS utiliza el algoritmo del “*Coupled Ocean Atmosphere Experiment*” (COARE versión 3.0) [46] [47], elaborado a partir del programa TOGA (Tropical Ocean Global Atmosphere) validado con datos tanto del Atlántico (boya de WHOI) como del Pacífico (R/V Flip) [48] entre otras bases de datos (p.e. NOAA/Environmental Technology Laboratory (ETL)).

El algoritmo establece tres categorías de medidas en los flujos turbulentos en la interfase aire / agua: medición directa, estimaciones y modelado. La medición directa de los flujos implica estrictamente el cálculo de la covarianza media de las variables meteorológicas con fluctuaciones relevantes medidas cerca de la superficie del mar. Las estimaciones de flujo implican el cálculo de flujos a partir de datos asociados, como la parte de alta frecuencia del espectro meteorológico (el método de disipación inercial) o la diferencia en la superficie media y los valores meteorológicos medios a cierta altura de referencia. Las estimas son parametrizaciones porque se basan en la similitud de otros procesos y en funciones y coeficientes empíricos [49] que se basan en la aplicación de métodos de estimación de flujos a partir de valores derivados de las variables meteorológicas relevantes en lugar de los datos reales. Las variables derivadas del modelo generalmente se obtienen en escalas espaciales y temporales bastante diferentes de las mediciones utilizadas para obtener las funciones y coeficientes empíricos [50], [45], [51].



Los procesos de transferencia cerca de la superficie se procesan en términos de caracterización de la superficie (rugosidad del mar), resolviendo 1) los problemas que surgen con velocidades muy bajas del viento, 2) las propias constantes termodinámicas para el cálculo del flujo de calor con las correcciones debidas a la humedad relativa y 3) las estimas del enfriamiento de la superficie por la lluvia.

Los datos meteorológicos se obtuvieron de la estación meteorológica del aeropuerto de San Javier de la AEMET (Indicador climatológico: 7031X) situada a 37° 46' 42" N y 0° 48' 21" O. Se obtuvieron datos diezminutales de dirección y velocidad del viento, temperatura del aire, precipitación y humedad relativa, asumiéndose no hay cobertura nubosa permanentemente y que dadas las horas de sol al año de la región puede considerarse cero.

2.5.1.3. Condiciones de contorno

El cálculo de los valores de las variables en las zonas de los contornos presenta una dificultad debido a no tener ningún nodo anexo a partir del cual calcular el valor en el nodo adyacente. Por ello diferentes autores han desarrollado aproximaciones para establecer los valores en los bordes de las mallas, como por ejemplo usar un valor fijo preestablecido (p.e.: velocidad de la corriente igual a cero), formulaciones matemáticas (p.e.: cálculo de la velocidad a partir de la ecuación de propagación de una onda en agua someras) o una combinación de ambos. Los modelos numéricos producen una serie de pequeños errores en sus cálculos debido a las aproximaciones realizadas en las ecuaciones que los rigen, el uso de un número limitado de decimales o por la falta de datos precisos en la zona de estudio. Se utiliza la condición de contorno de Radiación + Anidamiento (*Radiation + Nudging*) [52], que aproxima la propagación de estos errores dentro del dominio de cálculo a una onda y por tanto se podría conocer qué valor tendría en el contorno, permitiendo que el error no vuelva al interior de la malla de cálculo.

Se ha utilizado como esquema de cierre de mezcla turbulenta vertical el *Generic Length Scale* (GLS) [39] que incluye el de Mellor-Yamada 2.5. El estrés de fondo se ha computado mediante una aproximación lineal con un coeficiente constante. Para las Encañizadas se ha utilizado la capacidad de ROMS de poder considerar celdas secas (*dry*) (sin flujo a través de ellas)



o mojadas (*wet*) (con flujo) según la altura del nivel del mar (zeta), de forma que una celda puede quedar seca o volver a inundarse cuando el nivel del mar supera una altura establecida.

En las simulaciones realizadas se han usado diferentes condiciones de contorno para la malla donante en función de la variable: elevación del nivel del mar, cantidad de movimiento (u , v), temperatura y salinidad. En el caso de la malla receptora no es necesario especificar condiciones de contorno, ya que toma sus valores de la malla donante.

En nuestra simulación se han utilizado para los contornos las siguientes variables: elevación del nivel del mar, corriente barotrópica; temperatura y un trazador pasivo.

2.5.1.3.1. Elevación del nivel del mar

Las variaciones del nivel del mar se han extraído del modelo tridimensional operacional IBI-MFC (Iberian Biscay Irish - Ocean Analysis and Forecasting System) de CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). El Sistema está basado en el modelo NEMO forzado por el modelo meteorológico ECMWF y asimila datos *in situ* y de satélite. Tiene una resolución de $1/36^\circ$ con un intervalo entre datos horarios, diarios, semanales y mensuales. El modelo fue originariamente desarrollado por Mercator Océan y Puertos del Estado y actualmente desarrollado y mantenido por un consorcio de centros como Mercator Océan, Nologin Consulting, MeteoFrance y el centro de supercomputación CESGA. Facilita previsiones a 5 días, además de reanálisis de datos previos, de variables como: elevación del nivel del mar, corrientes baroclínicas, corriente barotrópica, temperatura y salinidad del agua.

Para cerciorarse de que las elevaciones del nivel del mar obtenidas de CMEMS se ajustan a las de la zona se contrastaron con las obtenidas del sensor de elevación instalado en el Puerto de San Pedro (Figura 8) obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.89 (RMSE = 0.03, RMSE (%) = 13.6, SD = 1.4).

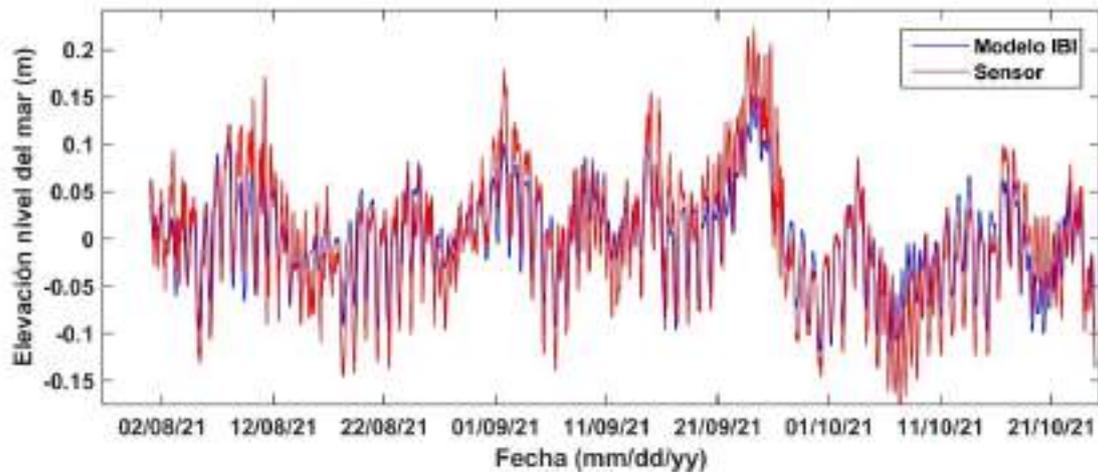


Figura 8. Elevación del nivel del mar del modelo IBI-MFC (azul) y del sensor de San Pedro del Pinatar (rojo).

2.5.1.3.2. Corrientes barotrópicas y baroclínicas

Con el objeto de ahorro computacional, ROMS trabaja simultáneamente en dos modos, uno 2D barotrópico calculado en cada paso de tiempo, y otro 3D baroclínico que se calcula cada cierto número de paso del 2D.

En el modo barotrópico, al no haberse registrado velocidades de corriente en los contornos, se han utilizado condiciones del tipo Flather [53] que permite calcular en los contornos las velocidades a partir de las diferencias de nivel del mar (Ecuación 3), utilizando para ello la ecuación de la velocidad de una onda de gravedad, donde u corresponde a la velocidad de la corriente, u^{ext} a la velocidad en el contorno, g a la fuerzas de la gravedad, D a la profundidad, ζ a la altura del nivel del mar y ζ^{ext} a la altura del nivel del mar en el contorno.

$$u = u^{ext} - \sqrt{\frac{g}{D}}(\zeta - \zeta^{ext})$$

Ecuación 8

La Figura 9 muestra las componentes u y v barotrópicas procedentes del modelo IBI-MFC.

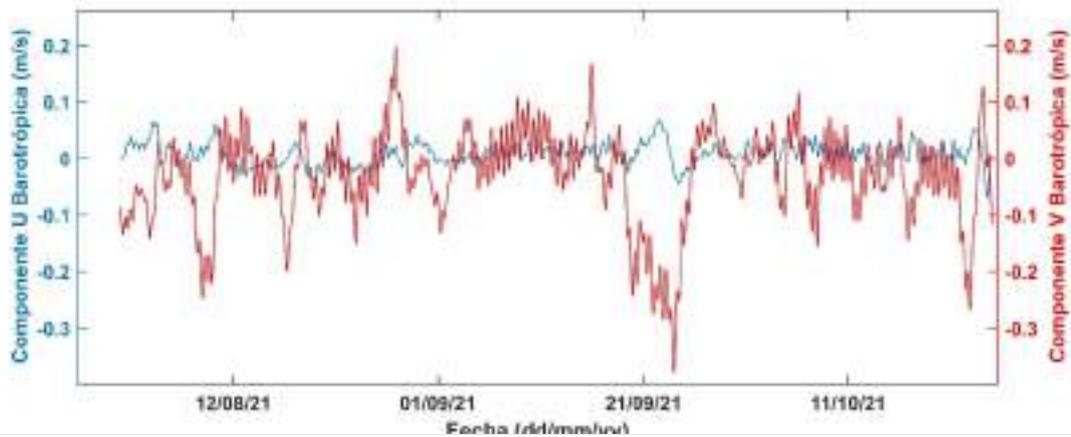


Figura 9. Componentes u y v barotrópicas utilizadas en los contornos provenientes del modelo IBI-MFC.

En el modo baroclínico se han utilizado condiciones de radiación [54] y [55], las cuales, a diferencias de las anteriores, no sólo aproximan el cálculo a una onda perpendicular al contorno, sino que permite adaptarse a ondas que se aproximen en diferentes ángulos.

2.5.1.3.3. Temperatura y Salinidad

Para los contornos de temperatura se han utilizado las condiciones de “*Radiation + Nudging*” forzándolos a tomar en los contornos los valores obtenidos de IBI-MFC.

En cambio, para la salinidad se ha usado un valor constante de salinidad (37.5) y variables de temperatura, cogiendo la temperatura a 10 metros de profundidad.

2.5.1.4. Condiciones iniciales

Cómo condiciones iniciales del modelo se han utilizado los datos registrados en la campaña de CTD del 03/08/2021 realizada por el servicio de pesca (SDC- Servidor de Datos Científicos del Mar Menor), al ser esta la fecha más próxima a la del inicio del periodo modelado. A partir de los datos registrados se ha realizado una aproximación a la heterogeneidad de los campos de temperatura y salinidad con la que iniciar las simulaciones. Esto permite que el modelo se inicie con valores más cercanos a los reales, disminuyendo el tiempo de estabilización y mejorando los resultados obtenidos en las simulaciones.

2.5.2. VALIDACIÓN

Para la validación de los resultados del modelo se han utilizado dos variables: corriente en los canales y perfiles de salinidad. Hay que tener en cuenta que para forzar el modelo se han utilizado como datos atmosféricos los de la estación meteorológica del aeropuerto de San Javier de AEMET asumiendo que son constantes para toda la superficie del Mar Menor. A su vez, las condiciones obtenidas del modelo IBI-MFC son modeladas, no registradas, lo que supone añadir una fuente más de incertidumbre al modelo y finalmente, se ha utilizado la última batimetría de Marchamalo disponible levantada en septiembre de 2021.

2.5.2.1. Corrientes

2.5.2.1.1. Canal de El Estacio

Debido a movimientos de sedimentos, el ADCP fondeado en el canal de El Estacio sufrió frecuentes enterramientos, por lo que gran parte de los datos registrados no han podido ser utilizados debido a no superar los controles de calidad en los análisis. Por tanto, se han usado para la validación solo aquellos datos que lo superaron tal y como indica el fabricante [56]. La Figura 10 muestra la comparación entre los valores de la velocidad de corriente registrados por el ADCP y los modelados. Se ha obtenido una r de 0.75 ($SD = 0.9$; $RMS = 0.30$ y $RMS (\%) = 19$).

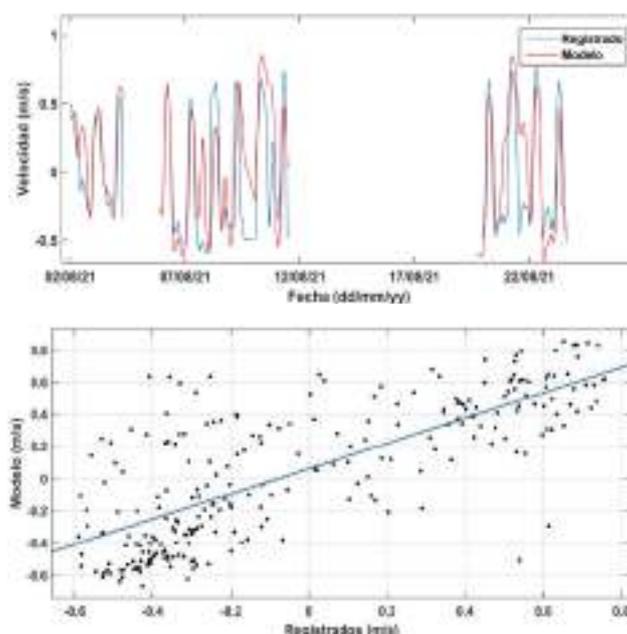


Figura 10. Velocidad de corriente registrada (azul) y modelada (rojo) en El Estacio. Datos suavizados horariamente.

2.5.2.1.2. Canal de Marchamalo

Para validar le modelo frente a las corrientes del canal de Marchamalo se ha tomado la serie de tiempo que abarca desde el 1/08/2021 hasta el 21/10/2021 del ADCP fondeado en el canal. En este periodo se produjo un fenómeno de fuerte entrada de agua a la laguna el 24/09/2021. En la serie utilizada no se observa, en cambio, ningún fenómeno de salida de agua con velocidades altas, siendo la mayor de 0.3 m/s registrada el 04/09/2021. La Figura 11 muestra la comparación de la velocidad de corriente registrada por le ADCP y las predichas por el modelo obteniéndose una r de 0.72 (SD = 0.79; RMS = 0.14 y RMS (%) = 16.2).

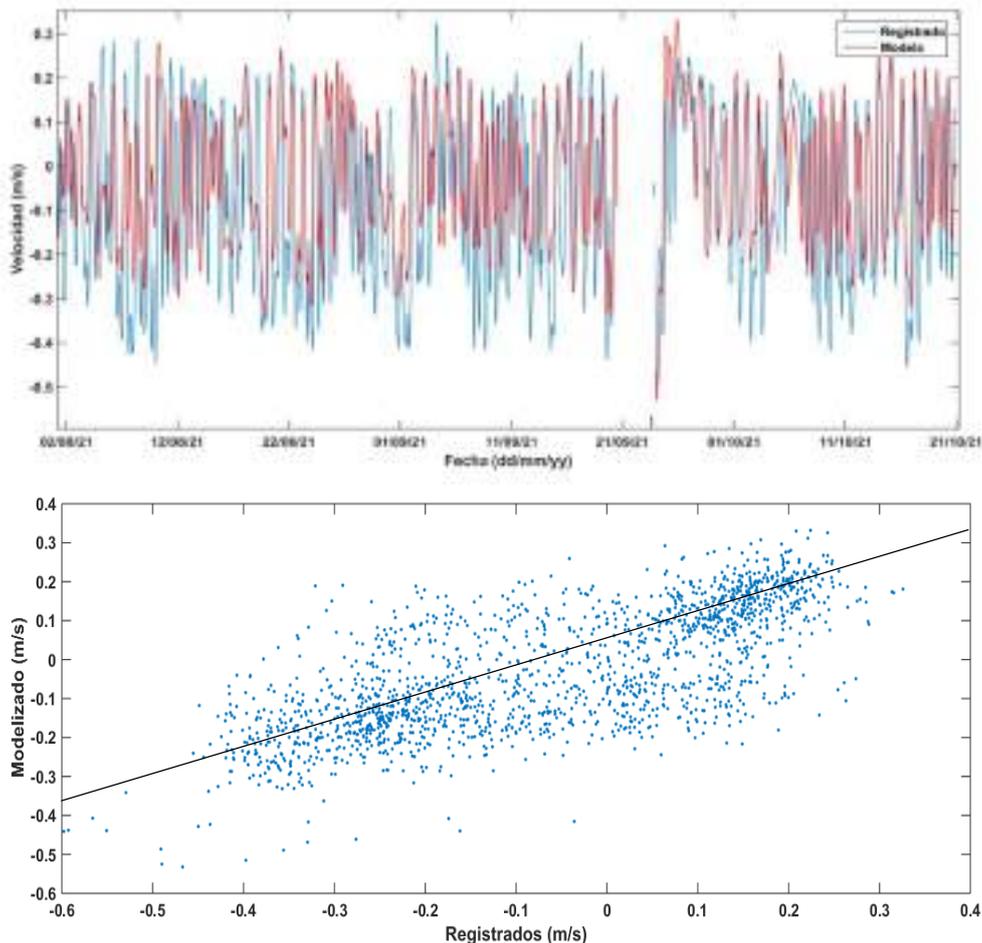


Figura 11. Velocidad de corriente registrada (azul) y modelada (rojo) en Marchamalo. Datos suavizados horariamente.

El modelo tiende a subestimar ligeramente las velocidades máximas de entrada al Mar Menor en el periodo simulado.

2.5.2.2. Salinidad

Debido a la importancia que tienen las variaciones de salinidad en actuaciones como estas se validó el modelo frente a esta variable. Para ello se utilizaron los perfiles de salinidad obtenidos mediante un CTD (SBE39) en las campañas de monitorización realizadas por el Servicio de Pesca de la Comunidad Autónoma en el Mar Menor. La Figura 12 muestra las estaciones de muestreo de este programa de monitorización. Particularmente se ha utilizado la estación E12 por su proximidad a las colonias de *Pinna nobilis* más importantes en el Mar Menor y es una estación próxima a la zona donde se identificaron puntos de inicio de anoxia. Se seleccionaron los perfiles de los días 24/08/2021, 20/09/2021 y 07/10/2021 como más representativos. La Tabla 1 muestra los valores de los ajustes para cada perfil.

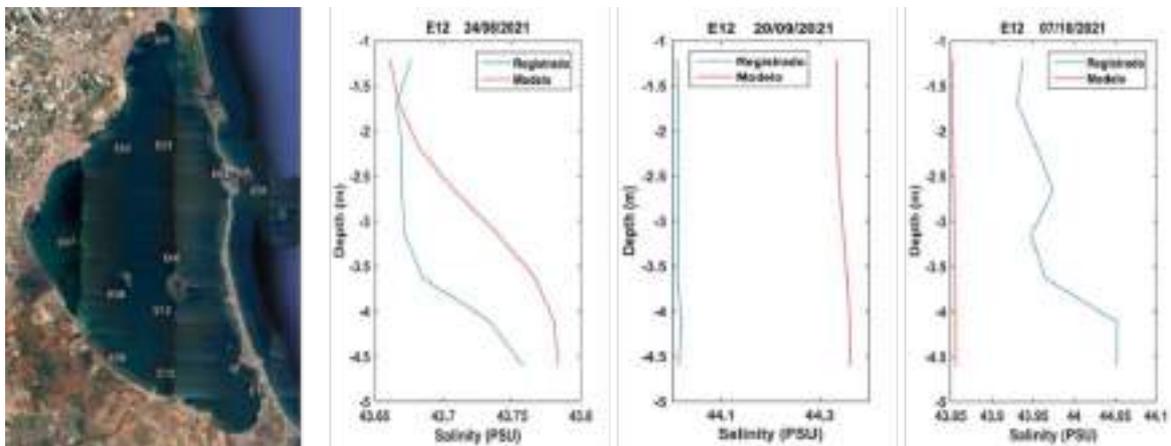


Figura 12. Ubicación de las estaciones de muestreo donde se han obtenido perfiles de salinidad y perfiles en el punto E12 (rojo datos modelados, azul registrados).

Tabla 1 Estadísticos resultantes para la validación de los datos de salinidad del modelo respecto a los datos registrados para el punto E12.

	24/08/2021	20/09/2021	07/10/2021
r	0.76	0.63	0.77
SD	1.4	4.2	0.03
RMSE	0.04	0.33	0.12
RMSE (%)	0.05	0.37	0.14

La validación se ha hecho también para la estación E11, por estar más próximo al canal de Marchamalo (Figura 13 y Tabla 2), resultando en unas desviaciones de lo predicho frente a lo medido del orden de 0.1 - 0.2 PSU.

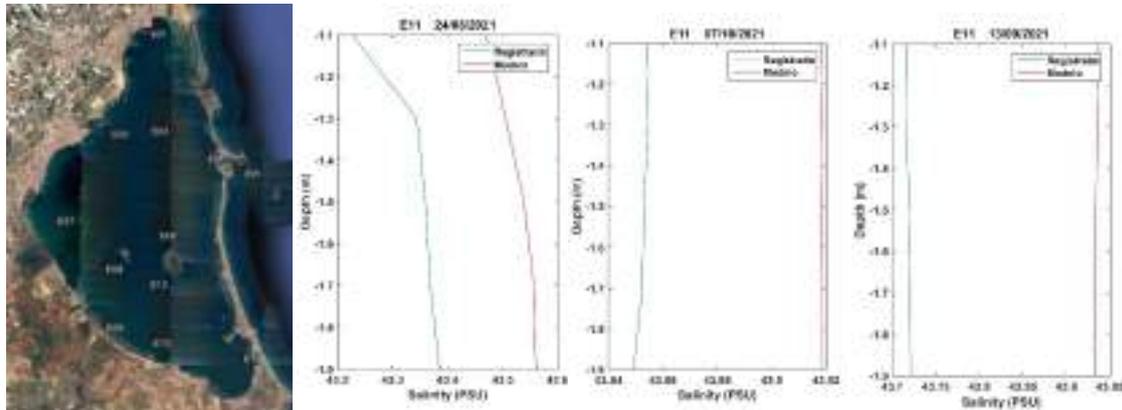


Figura 13. Ubicación de las estaciones de muestreo donde se han obtenido perfiles de salinidad y perfiles en el punto E11 (rojo datos modelados, azul registrados).

Tabla 2 Estadísticos resultantes para la validación de los datos de salinidad del modelo respecto a los datos registrados para el punto E11.

	24/08/2021	20/09/2021	07/10/2021
r	0.92	0.84	0.67
SD	0.60	0.48	0.15
RMSE	0.19	0.21	0.06
RMSE (%)	0.22	0.24	0.07

2.6. MODELO DE SIMULACIÓN DE OLEAJE

La transferencia de energía del viento al mar genera oleaje que, a su vez influye en la resuspensión y transporte de sedimentos, corrientes y otros muchos procesos. En la actualidad hay un amplio rango de modelos empíricos para la predicción del oleaje en la mar, como por ejemplo el de Pierson-Moskowitz (1964), SMB (Bretschneider, 1970), JONSWAP (Hasselmann et al., 1973) o CEM (US Army, 2003) por citar sólo algunos de los más conocidos. Estos métodos entran en la categoría de métodos paramétricos que funcionan razonablemente bien si se utilizan para mares abiertos y vientos constantes, pero no en áreas donde el viento no es uniforme, sopla en diferentes direcciones o a velocidades variables. Para predecir el oleaje en estas condiciones

se utilizan métodos numéricos espectrales como WAM (WAMDI Group, 1988), Wavewatch (Tolman, 1991) o SWAN (Booij et al., 1999).

2.6.1. MODELO ESPECTRAL JONSWAP

En los métodos empíricos, se supone que la generación de olas de viento es principalmente una función de tres parámetros: velocidad del viento, carrera de viento y duración del viento [57].

La carrera de viento (*fetch*) se define como la distancia que el viento puede viajar sobre el agua en una dirección constante. En áreas costeras con irregularidades se define la carrera de viento como la longitud efectiva asumiendo que las olas se generan en un rango de 45° a cada lado de la dirección del viento y la transferencia de energía del viento a las olas es proporcional al coseno del ángulo entre las direcciones del viento y las olas:

$$F_{efectivo} = \frac{\sum F_i \cos^2 \alpha_i}{\sum \cos \alpha_i}$$

Ecuación 9

Donde $F_{efectivo}$ es la longitud efectiva de carrera de viento. F_i y α_i son la longitud y ángulos medidos a intervalos de 7.5° respectivamente [58] [59]

Para determinar la duración del viento, se utiliza la definición de viento constante de acuerdo con (US Army, 2003). De esta manera, la duración del viento es igual al número de horas consecutivas anteriores a la medida que satisfacen los siguientes criterios:

$$|U_i - \bar{U}| < 2.5 \text{ m/s} \quad \text{y} \quad |D_i - \bar{D}| < 15^\circ$$

Ecuación 10

donde u y D son el promedio de la velocidad y dirección del viento por hora consecutivas anteriores a la medida. U_i es la velocidad del viento y D_i la dirección del viento en el punto de medida [60]

Aquí utilizamos el modelo JONSWAP, propuesto por Hasselman *et al.* (1973) y basado en el proyecto Joint North Sea Wave Project de medida de oleaje en el mar del Norte a finales de los años 60. Este modelo se diseñó para condiciones de la mar formadas por viento con *fetch* limitado y una profundidad de agua indefinida. La expresión que representa este espectro es

$$S(f) = \alpha g^2 g f^{-5} (2\pi)^{-4} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}} \gamma e^{\left[\frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right]}$$

Ecuación 11

con los siguientes valores medios de los parámetros:

γ , conocido como el factor de forma pico del espectro, cuyo valor típico es 3.3.

σ , que representa el ancho de la base del espectro antes (σ_A) y después (σ_B) de la frecuencia pico. Los valores más habituales son $\sigma_A = 0.07$ y $\sigma_B = 0.09$.

α , que se conoce como el factor de escala y está asociado con la energía total del espectro. El parámetro α es función directa del *fetch* y de la velocidad del viento en la forma:

$$\alpha = 0.076(\bar{x})^{-0.22}$$

Ecuación 12

De igual forma, la frecuencia pico del espectro está relacionada también con el *fetch* y la velocidad del viento:

$$f_p = 3.5 \left(\frac{g}{U_{10}}\right) (\bar{x})^{-0.33}$$

Ecuación 13

donde $\bar{x} = \frac{gX}{U_{10}^2}$ siendo X el *fetch* y U_{10} la velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie.

2.6.2. MODELO NUMÉRICO SWAN

Los modelos numéricos de oleaje comenzaron a desarrollarse en los años 70 hasta evolucionar a los modelos espectrales actuales de tercera generación como WAM [61], SWAN



Región de Murcia
Consejería de Agua, Agricultura,
Ganadería, Pesca, Medio
Ambiente y Emergencias.



Universidad
Politécnica
de Cartagena



[62] o WAVEWATCH III [63]. Estos modelos se aplican desde escalas oceánicas hasta costeras. La esencia de los modelos de tercera generación es que no se imponen restricciones a la forma espectral y que está totalmente determinada por los términos de origen [64]. El modelo SWAN es uno de ellos que se utiliza ampliamente en todo el mundo en estudios de olas costeras y es el que utilizamos aquí.

Simulating WAVes Nearshore (SWAN) es un modelo numérico de oleaje de tercera generación desarrollado para cálculos de oleaje en regiones costeras en condiciones dadas de viento, profundidad y corrientes. El modelo se basa en una formulación euleriana de la densidad espectral que explica la propagación refractiva sobre una batimetría arbitraria en la que se incluye su campo de corrientes. Puede utilizarse en cualquier escala relevante para las ondas de gravedad superficial generadas por el viento. El modelo se basa en la ecuación de equilibrio de acción de onda (o balance de energía en ausencia de corrientes) con fuentes y sumideros.

Los parámetros de entrada principales para el funcionamiento de SWAN son las condiciones de contorno y vientos. Los procesos de generación de viento, *whitecapping*, interacciones entre cuatro olas, disipación, interacciones entre tres olas. La ruptura del oleaje inducida por la profundidad se calcula explícitamente. SWAN no tiene en cuenta la difracción. El esquema de propagación numérica de SWAN para la propagación y disipación es implícito. Los principios teóricos y numéricos de SWAN se han descrito en diversos trabajos: [65], [62] y [66].

El modelo SWAN calcula el desarrollo de la mar a través de la densidad de acción N (σ , θ) en lugar de la densidad de varianza E (σ , θ). En presencia de corrientes, la densidad de acción se conserva mientras que la densidad de varianza no. La densidad de acción es igual a la densidad de varianza dividida por la frecuencia relativa ($N=E/\sigma$) [62]. Las variables independientes son la frecuencia relativa σ y la dirección de onda θ .

La integración de la ecuación de equilibrio de la densidad de acción se implementa en SWAN con diferencias finitas en las cinco dimensiones: tiempo, espacio geográfico (x , y) y espacio espectral (σ , θ). Las ecuaciones de SWAN se resuelven con un esquema implícito que hace que el modelo sea particularmente robusto y adecuado para aplicaciones costeras. El modelo SWAN tampoco tiene limitación de número de Courant.

2.6.2.1. Ecuación de Balance de Energía

SWAN se basa principalmente en el equilibrio energético del oleaje, añadiendo fuentes y sumideros. La ecuación de equilibrio completa es la siguiente:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma}$$

Ecuación 14

Donde $N(\sigma, \theta; x, y, t)$ es la densidad de acción en función de la frecuencia intrínseca σ , la dirección θ , las coordenadas horizontales x e y , y el tiempo t . El primer término en el lado izquierdo representa la tasa local de cambio de la densidad de acción en el tiempo, el segundo y tercer término representan la propagación de la acción en coordenadas geográficas x e y , respectivamente. C_x y C_y son las velocidades de propagación. El cuarto término representa la modificación de la frecuencia relativa debido a las variaciones en profundidades y corrientes y el quinto término representa la profundidad y la refracción inducida por la corriente. Las cantidades C_σ y C_θ son las velocidades de propagación en el espacio espectral (σ, θ) , con σ y θ indicando la frecuencia y la dirección de propagación, respectivamente. Las expresiones para estas velocidades de propagación se toman de la teoría de ondas lineales [67]. En SWAN no se incluye la difracción.

El lado derecho de la ecuación contiene el término fuente S_{tot} que representa todos los procesos físicos que generan, disipan o redistribuyen la energía de las olas. En aguas poco profundas, seis procesos contribuyen a S_{tot} :

$$S_{tot} = S_{wind} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{wc} + S_{bot} + S_{db}$$

Ecuación 15

Estos términos denotan, respectivamente, la entrada de energía por el viento, la transferencia no lineal de energía de las olas a través de interacciones de tres y cuatro ondas y la desintegración de las olas debido al *whitecapping*, la fricción del fondo y la ruptura de las olas inducida por la profundidad.

Para obtener una solución única de la ecuación de equilibrio de acción espectral, se deben proporcionar condiciones de contorno. Los componentes de las olas entrantes en los

límites del mar se especifican mediante un espectro bidimensional. Se considera que los límites cerrados absorben totalmente la energía de las olas que sale del dominio geográfico. Los límites inferior y superior en el espacio de frecuencia se indican por s_{min} y s_{max} , respectivamente. Estos límites son completamente absorbentes, aunque se agrega una cola de diagnóstico f^4 por encima del corte de alta frecuencia, que se utiliza para calcular las interacciones onda-onda no lineales y para calcular parámetros de onda integral. Dado que el espacio direccional es un dominio circular cerrado, no se necesitan condiciones de contorno [66]

2.6.2.2. Viento

La transferencia de energía eólica a las olas se describe en SWAN con el mecanismo de resonancia de Phillips (1957) y el mecanismo de retroalimentación de Miles (1957). El término fuente correspondiente para estos mecanismos se describe comúnmente como la suma del crecimiento lineal y exponencial:

$$S_{wind}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta)$$

Ecuación 16

en el que A describe el crecimiento lineal y BE el crecimiento exponencial de las olas que dependen de la frecuencia y dirección de las olas y de la velocidad y dirección del viento. Los efectos de las corrientes se describen en SWAN utilizando la velocidad y dirección aparente del viento local. La expresión A se describe en Cavaleri y Malanotte-Rizzoli (1981) con un filtro para evitar el crecimiento a frecuencias inferiores a la frecuencia de Pierson y Moskowitz (1964) [68]. Dos expresiones están disponibles opcionalmente para el coeficiente B. El primero está tomado de una versión temprana del modelo WAM, donde el término l_t (que no se describe aquí) se debe a Snyder et al. (1981), reescalado en términos de velocidad de fricción U^* por Komen et al. (1984). El coeficiente de arrastre para relacionar U^* con la velocidad del viento de conducción a 10 m de altitud U_{10} se toma de Wu (1982). La segunda expresión para B en SWAN se toma del modelo WAM (Komen et al., 1996). Se debe a Janssen (1991), y se basa en una teoría cuasi-lineal de ondas de viento. Este conjunto de ecuaciones se resuelve en SWAN con el procedimiento iterativo de Mastenbroek et al. (1993).

2.6.2.3. Disipación de energía

El término de disipación de la energía de las olas está representado por la suma de tres contribuciones diferentes: S_{ds} de *whitecapping*, $w(\sigma, \theta)$, s de fricción inferior, $b(\sigma, \theta)$, y S_{ds} de ruptura inducida por profundidad, $br(\sigma, \theta)$.

En SWAN, como en otros modelos de ondas de tercera generación, la formulación de *whitecapping* se basa en el modelo basado en pulsos de Hasselmann (1974), adaptado por el Grupo WAMDI (1988):

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{\tilde{k}} E(\sigma, \theta)$$

Ecuación 17

donde $\tilde{\sigma}$ y \tilde{k} denotan la frecuencia media y el número de onda medio, respectivamente, y el coeficiente Γ depende de la pendiente general de la onda. El coeficiente dependiente de la pendiente del grupo WAMDI (1988) se adapta en SWAN conforme Günther et al. (1992) basado en Janssen (1991).

La fricción inferior en SWAN se basa en el modelo empírico de JONSWAP (Hasselmann et al., 1973), el modelo de ley de arrastre de Collins (1972) y el modelo de viscosidad de remolino de Madsen et al. (1988). Las formulaciones para estos modelos de fricción de fondo se pueden expresar en la siguiente ecuación:

$$S_{ds,b} = -C_b \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta)$$

Ecuación 18

En el que C_b es una fricción de fondo que generalmente depende del movimiento orbital inferior de U_{rms} . Hasselmann et al. (1973) encontraron un valor empírico para C_b que concuerda con el resultado de JONSWAP para la disipación del oleaje. Sin embargo, Bouws y Komen (1983) sugieren un valor diferente para C_b en condiciones de viento-mar limitadas en profundidad. Collins (1972) obtuvo el coeficiente de fricción inferior como $C_b = C_f g U_{rms}$ con $C_f = 0.015$ (Collins, 1972). El modelo de viscosidad de remolino de Madsen (1988) obtiene la función del factor de fricción del fondo, de la altura de rugosidad del fondo y las condiciones de onda reales

obtenidas con $C_b = \sqrt{\frac{f_w g}{2}} U_{rms}$ en el que f_w es un factor de fricción no dimensional estimado mediante el uso de la formulación de Jonsson (1966).

$$\frac{1}{4\sqrt{f_w}} + \log_{10}\left(\frac{1}{4\sqrt{f_w}}\right) = m_f + \log_{10}(a_b/K_N)$$

Ecuación 19

con $m_f = -0.08$ [69] y a_b siendo una amplitud representativa cercana al fondo.

El proceso de ruptura de ondas inducido por la profundidad aún no se conoce bien, y se sabe poco sobre su modelado espectral. En contraste con esto, la disipación total debida a este tipo de ruptura de ondas puede ser bien modelada con la disipación de un orificio aplicada a las ondas rompientes en un campo aleatorio [70] [71]. Eldeberky y Battjes (1996) formulan una versión espectral del modelo de perforación de Battjes y Janssen (1978), que conserva la forma espectral. Expandiendo su expresión para incluir direcciones, la expresión que se usa en SWAN es:

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = -\frac{S_{ds,br,tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta)$$

Ecuación 20

en el que E_{tot} es la energía total de las olas y $S_{ds,br,tot}$ es la tasa de disipación de E_{tot} , debido a la ruptura de las olas inducida por la profundidad según Battjes y Janssen (1978). El valor de $S_{ds,br,tot}$ depende críticamente del parámetro de rotura $g = H_{max}/d$ (en el que H_{max} es la altura máxima de ola individual posible en la profundidad de agua local d). En SWAN se utiliza un valor constante $g = 0,73$ (el valor medio del conjunto de datos de Battjes y Stive (1985)) y un valor variable en función de la pendiente inferior (Nelson, 1987, 1994).

2.6.2.1. Interacciones no lineales entre olas.

En aguas profundas, las interacciones entre olas cuádruples dominan la evolución del espectro. Transfieren la energía de las ondas desde el pico espectral a frecuencias más bajas (moviendo así la frecuencia máxima a valores más bajos) y a frecuencias más altas (donde la energía se disipa mediante *whitecapping*). En aguas muy poco profundas, las interacciones entre



tres olas transfieren energía de frecuencias más bajas a frecuencias más altas, lo que a menudo resulta en armónicos más altos [72]. Un cálculo completo de las interacciones entre cuatro olas consume recursos computacionales y tiempo haciéndolo inoperativo. En SWAN se implementan dos métodos para la interacción cuádruple entre olas. El primero se calcula con la Aproximación de Interacción Discreta (DIA) propuesta por Hasselmann et al. (1985) que se basa en la aproximación de la integral de Boltzmann. El segundo se llama el enfoque XNL o método Webb-Resio-Tracy (WRT), que se basa en la formulación integral original de Boltzmann de seis dimensiones de Hasselmann (1962, 1963), y consideraciones adicionales de Webb (1978), Tracy y Resio (1982) y Resio y Perrie (1991). Para calcular las interacciones triples entre olas en términos de una fuente de energía espectral, SWAN implementa la Aproximación de Tríada Agrupada (LTA) de Elderbeky (1996). LTA es una versión ligeramente adaptada de la Aproximación discreta de tríada (DTA) de Eldeberky y Battjes (1995).

2.6.3. IMPLEMENTACIÓN DE SWAN PARA EL MAR MENOR

El modelo SWAN no se ha utilizado anteriormente en el Mar Menor y no ha sido calibrado y validado hasta ahora. En este estudio, se utilizó SWAN ciclo III versión 41.31AB. El modelo se ejecutó en tercera generación y se han seleccionado modalidades no estacionarias, coordenadas cartesianas y convención náutica para la dirección del viento y las olas.

La malla utilizada fue de una resolución de 66.66 x 66.66 m con un total de 334 puntos para latitud y otros 334 en longitud. El número de frecuencias utilizadas para describir el espectro del oleaje es de 36, con las frecuencias más bajas y más altas iguales a 0,04 y 1 Hz respectivamente. El número de direcciones fue también de 36. La resolución temporal fue de 10 minutos para las entradas de viento y el paso de tiempo interno. Las definiciones de cuadrícula utilizadas en este estudio para la discretización computacional se resumen en la Tabla 3. La resolución espacial es de 66.6 m.

Tabla 3. Definiciones de cuadrícula utilizadas para el estudio

Resolución Direccional ($\Delta\theta$)	
Condiciones de viento	10°
Condiciones de mar de fondo	-
Resolución de frecuencias ($\Delta\sigma/\sigma$)	0.09
Rango de Frecuencias (f)	
Mínimo	0.04 Hz
Máximo	1.00 Hz
Resolución espacial ($\Delta x, \Delta y$)	
Condiciones de aguas someras	66.6 m

En el modelo se incluyeron crecimientos lineales y exponenciales de los insumos eólicos. Se utilizó la formulación para la parametrización de entrada de viento desarrollada por Komen et al. (1984) para el crecimiento exponencial de la entrada de viento y el crecimiento lineal de olas desarrollado por Cavaleri y Malanotte-Rizzoli (1981). El coeficiente para determinar la tasa de disipación de whitecapping es $C_{ds}=2.36e^{-5}$ y el valor de la pendiente de onda para un espectro de Pierson-Moskowitz igual a $stpm=3.02e^{-3}$. La disipación debida a la ruptura de ondas inducida por la profundidad es tratada por la formulación espectral de Battjes y Janssen (1978) con $\alpha=1$ y $\gamma=0.73$, la fricción del fondo se modela utilizando la forma de formulación de Collins con un coeficiente de fricción de se agrega con un valor de cero para el coeficiente porque solo se necesita la velocidad orbital cerca del fondo para un primer enfoque. Las interacciones entre tres y cuatro olas se activaron utilizando la configuración predeterminada para la DIA [73] y la LTA [74]. Las formulaciones de los procesos físicos disponibles y sus coeficientes asociados incluidos en el modelo se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Resumen de los procesos físicos con su formulación

Proceso físico	Formulación	Coefficientes
Crecimiento lineal de la ola	Cavaleri and Malanotte-Rizzoli (1981)	
Crecimiento exponencial de la ola	Komen et al. (1984)	
Whitecapping	Komen et al. (1984), WAMDI Group (1988) and Rogers et al. (2003)	$C_{ds}=2.36 \times 10^{-5}$
		$\delta=1$
		$p=4$
		$S_{pm}=3.02 \times 10^{-3}$
Interacciones entre cuatro olas	Hasselmann et al. (1985)	$\lambda=0.25$
		$C_{n/4}=3 \times 10^{-7}$
		$C_{sh1}=5.5$
		$C_{sh2}=6/7$
		$C_{sh3}=1.25$
Fricción de fondo	Hasselmann et al. (1972)	$C_{Collins}=0$
Interacciones entre tres olas	Eldeberky (1996)	$\alpha_{EB}=0.1$
Rotura de ola inducida por profundidad	Battjes and Janssen (1978)	$\alpha_{BJ}=1$
		$\gamma_{BJ}=0.73$

Antes de que se llevara a cabo el hindcast completo con el modelo SWAN, se realizaron algunos análisis de pruebas de sensibilidad para obtener configuraciones óptimas del modelo. Se realizaron pruebas de sensibilidad solo para el postprocesado para el paso de tiempo interno, el intervalo de frecuencia, la resolución de frecuencia y dirección, y el rango de integración para las variables de salida. A partir de estos análisis, se entendió que el intervalo de frecuencia, la frecuencia y la resolución de la dirección casi no tenían impacto en los resultados computacionales. Por lo tanto, en la siguiente sección solo se presentan los resultados de los análisis de sensibilidad realizados para el paso de tiempo interno y el rango de integración.

La difracción se modela en un sentido restrictivo, por lo que el modelo debe usarse en áreas donde las variaciones en la altura de las olas sean grandes en comparación con la escala horizontal de unas longitudes de onda. Sin embargo, el cálculo de la difracción en condiciones geofísicas arbitrarias es bastante complicado y requiere un esfuerzo informático considerable. Para evitar esto, se emplea un desacoplamiento de fase, como se describe en Holthuijsen et al. (2003), de modo que se obtenga el mismo comportamiento cualitativo de redistribución espacial y cambios en la dirección de onda.



Región de Murcia
Consejería de Agua, Agricultura,
Ganadería, Pesca, Medio
Ambiente y Emergencias.



Universidad
Politécnica
de Cartagena



Este enfoque, sin embargo, no maneja adecuadamente la difracción en los puertos o frente a los obstáculos que reflejan.

Los cálculos en SWAN principalmente son estacionarios y, opcionalmente, no estacionarios. Además, se puede aplicar en coordenadas cartesianas o curvilíneas (recomendadas solo para pequeñas escalas) o esféricas (pequeñas escalas y grandes escalas). El modo estacionario debe usarse solo para olas con un tiempo de residencia relativamente corto en el área computacional bajo consideración, es decir, el tiempo de viaje de las olas a través de la región debe ser pequeño en comparación con la escala de tiempo de las condiciones geofísicas (condiciones de contorno de olas, viento, mareas y marejada ciclónica).

2.6.4. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para validar el modelo se fondearon dos perfiladores de corriente acústico de efecto Doppler (ADCP) con capacidad de medida de oleaje mediante algoritmo PUV, que se colocaron en las zonas de máximo oleaje a una profundidad de 3 metros según la Figura 14 para asegurar la calidad de los datos de oleaje registrado y cubrir todo el espectro de oleaje previsible para la zona. Ambos ADCP proporcionan altura de ola, período pico, espectro direccional y otra información relevante del oleaje. La altura mínima medible de las olas y el período pico para 3 m de profundidad son 0.03 m y 3.9 s. También se muestra una superposición de las series temporales de altura del oleaje registradas por el ADCP y predichas por el modelo SWAN, cuyo coeficiente de determinación correlación r^2 es de 0.82 ($DE = 0,137$, $RMS = 0,00363$). El correntímetro tiene una sensibilidad de 0.03 m de H_s y 3.9 s del periodo al estar ubicado a 2 m de profundidad explicando el corte en el extremo izquierdo del gráfico y que no se haya alcanzado un mejor coeficiente de correlación.

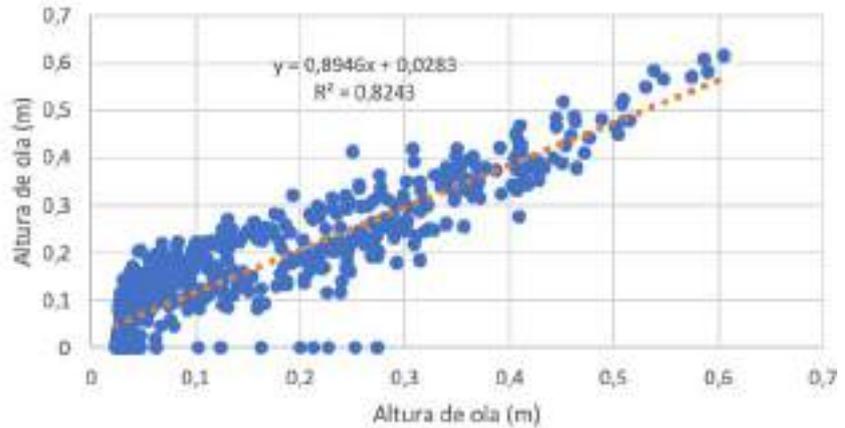


Figura 14. Localización de los ADCP fondeados y Altura significativa de oleaje predicho por el modelo SWAN frente al medido por el ADCP.

La Figura 15 muestra las rosas de oleaje para ambos, los datos predichos por SWAN y los registrados por el ADCP. Muestran la frecuencia de H_s en cada dirección. Hay que tener en cuenta que en SWAN no se ha tenido en cuenta fricción del fondo y se han tomado como constantes algunos valores no contrastados con los del Mar Menor. También influye que se trata de aguas muy someras y que habría que validar estos datos con experimentos de campo.

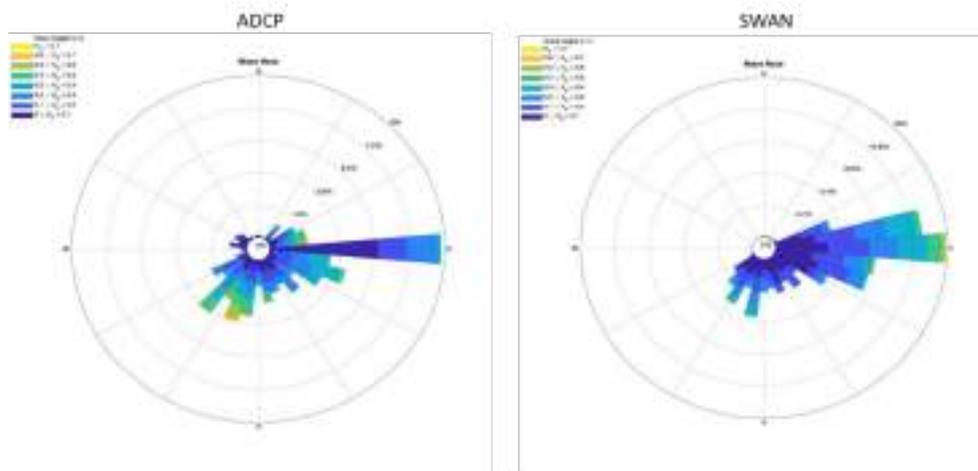


Figura 15. Rosas de oleaje ADCP y SWAN

3. RESULTADOS y DISCUSIÓN

3.1. FLUJOS DE INTERCAMBIO MAR MENOR-MEDITERRÁNEO 2021-2022.

En este apartado se analizan los flujos de intercambio de la serie de 2021-2022. Como resultado se han obtenido una serie de ecuaciones empíricas que permiten calcular el intercambio a partir de los desniveles del mar entre ambos mares. Se parte de las condiciones atmosféricas para explicar las variaciones de nivel del mar que se utilizan para el cálculo de flujos en cada canal.

3.1.1. CONDICIONES ATMOSFÉRICAS

El año 2021 y 2022 hasta la fecha han presentado peculiaridades significativas con respecto a otros años destacando las lluvias continuas de primavera de 2022 (Figura 16) y uno de los veranos más calurosos desde que se tiene registro.

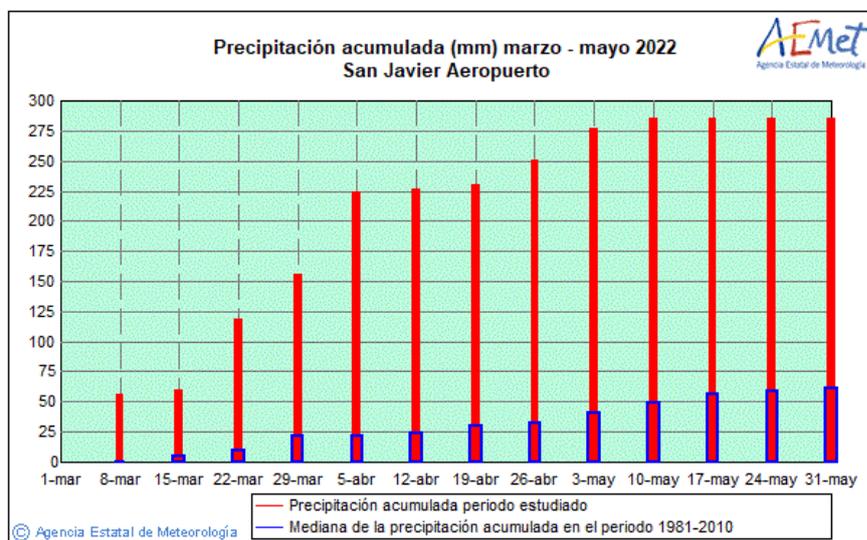


Figura 16. Precipitación acumulada de marzo a mayo de 2022 y mediana de la precipitación acumulada de 1981 a 2010 en el mismo periodo (AEMET).

3.1.1.1. Presión atmosférica

Análisis previos de series temporal de la presión atmosférica indican que las variaciones de presión atmosférica a lo largo del año suponen un 40% de la varianza explicada por fenómenos de baja frecuencia y un 60% por fenómenos de alta frecuencia (p.e. los provocados por gradientes térmicos). La importancia del barómetro invertido está bien documentada ([75] [76] [77]), pero cuando interviene en las inmediaciones de los canales afectan directamente a los gradientes de presión horizontal y consecuentemente a los flujos que los atraviesan.

La Figura 17 muestra la serie temporal de presión atmosférica de los dos años. Si se atiende a valores estadísticos básicos de las dos series (Tabla 5) no se aprecian diferencias significativas. En cambio, sí se aprecia que los meses de enero y febrero de 2022 fueron más anticiclónico (con presiones de hasta 1030 mb) que los de 2021 donde predominaron las bajas presiones (hasta 1005 mb), pero que en marzo de este último año se produjeron dos picos de altas presiones muy por encima de las de 2022. También se observa que entre marzo y abril se produjeron tres episodios alternantes de bajas presiones en 2022 que no se vieron en 2021. Los veranos, en cambio presentan un rango de presiones más ajustado que los inviernos. Desde mediados de junio a principios de agosto se aprecian persistentemente mayores presiones en 2022 que en 2021, donde se observan fluctuaciones mayores con picos de más bajas presiones. En el mes de agosto, no obstante, estuvo dominado por oscilaciones de más altas presiones en 2021 que en 2022 donde se produjo un descenso significativo.

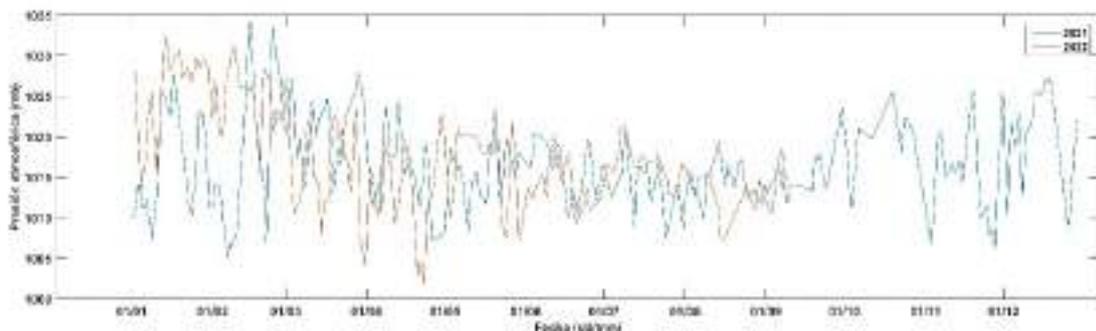


Figura 17. Variación de la presión atmosférica en 2021-2022 (datos suavizados diariamente).

Tabla 5. Resumen estadístico de datos de presión atmosférica registrados (datos suavizados a 12 horas).

	2021	2022
Mínimo	1005	1001
Máximo	1034	1032
Rango	29	30
Media	1017	1018
Desviación estándar	5.4	6.2

3.1.1.2. Temperatura del aire

La evaporación y por tanto la salinidad depende, entre otros factores, de la temperatura del aire. El verano de 2022 ha sido el verano más caluroso en registros según la Agencia Estatal de Meteorología (Figura 18) con la temperatura media de las máximas más altas de 31.5 °C en agosto de 2022 desde que se tiene registros la AEMET.

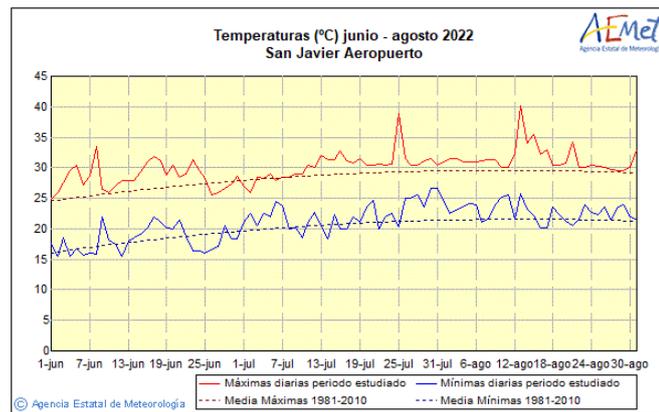


Figura 18. Análisis estacional de temperatura para agosto 2022 (AEMET).

La Figura 19 muestra la variación de temperatura del aire para los años 2021 y 2022 con datos suavizados a 12 horas donde se aprecia que, en dos periodos, de mayo-junio y julio-agosto las temperaturas de 2022 fueron sensiblemente superiores a las de 2021.

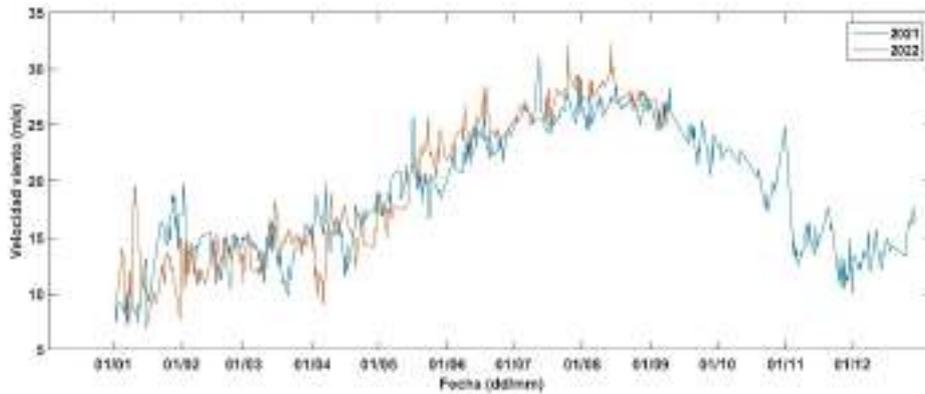


Figura 19. Variación de temperatura del aire para los años 2021 y 2022, datos suavizados a 12 horas

La Figura 20 muestra la salinidad media del Mar Menor desde mayo a septiembre de 2020, 2021 y 2022 (datos SDC) donde se observa una mayor pendiente de recuperación de la salinidad en 2022 que en los años precedentes.

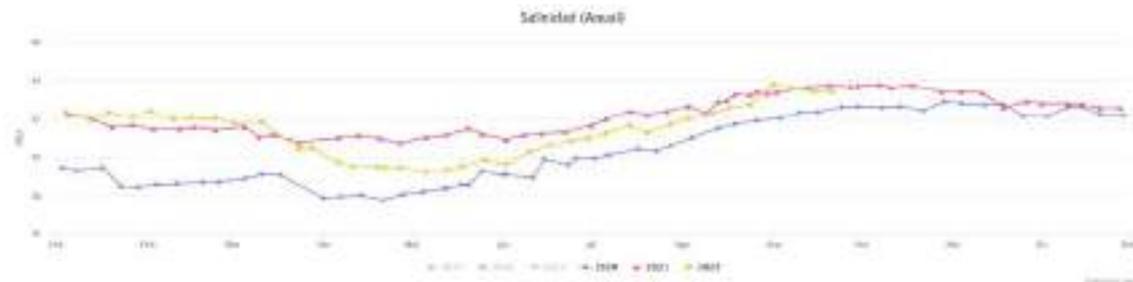


Figura 20. Evolución de valores medios de la salinidad del Mar Menor de mayo a septiembre de 2020 (azul), 2021 (rojo) y 2022 (amarillo) (SDC Mar Menor).

3.1.1.3. Viento

La Figura 21 muestra la velocidad del viento. Se puede observar la mayor intensidad de los vientos en abril de 2022. Los vientos fuertes coinciden habitualmente con cambios brusco de presión atmosférica. En 2022 se han producido los tres episodios de mayor viento en marzo-abril (máximo de 13.4 m/s). El viento es un factor de mezcla que homogeneiza las masas de agua y por tanto son esenciales para la renovación efectiva del Mar Menor [9].

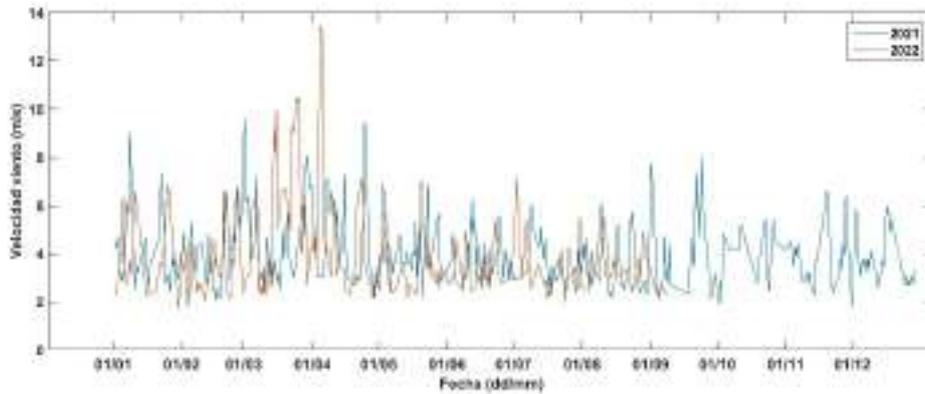


Figura 21. Velocidad del viento registrada para los años 2021 a 202 (datos suavizado a 12 horas).

3.1.2. VARIACIONES DEL NIVEL DEL MAR

3.1.2.1. Dentro de la laguna

Los datos registrados muestran un comportamiento homogéneo en el interior de la laguna. Sólo en episodios puntuales se puede apreciar pequeñas diferencias entre los sensores, indicando que, por lo general, el Mar Menor se comporta con cierta homogeneidad. En la Figura 22 se muestran los registros de datos diezminutales de los sensores en el interior del Mar Menor de febrero de 2021 a junio 2022.

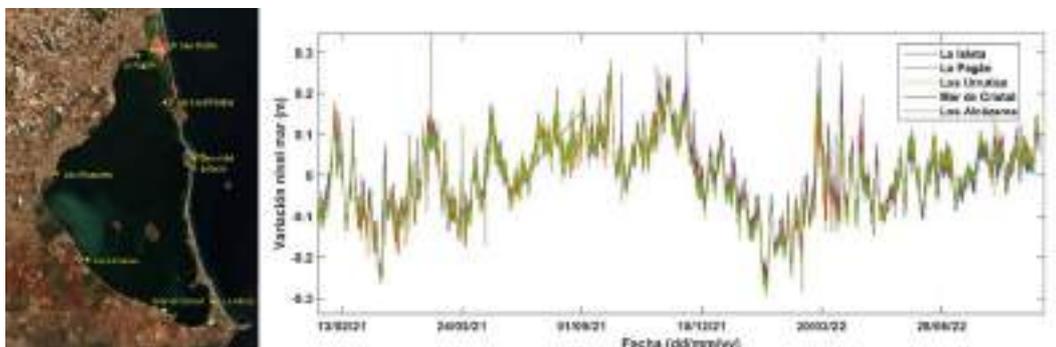


Figura 22. Elevación del nivel del mar registrada por los sensores de presión ubicados dentro del Mar Menor.

Las diferencias entre sensores se acentúan en episodios de viento muy fuerte de poca duración que genera un *seiche* desplazándose la onda a través del Mar Menor. Como ejemplo de este tipo de fenómenos se muestra que los días 27-28/11/2021 se produjo una bajada de presión atmosférica que originó una racha de vientos del NW fuertes (superiores a 12 m/s el 27/11/2021 16:00) (Figura 23) que, a su vez generó una onda que fue propagándose por el Mar Menor generando un *seiche* con desniveles de hasta 0.4 m de carrera. Los registros del nivel del mar muestran un desfase entre sensores en la parte norte (Lo Pagán y los Alcázares) y en la sur (Mar de Cristal y La Isleta) con el de Los Urrutias quedando en una posición intermedia. La Figura 23 muestra la velocidad del viento del periodo indicado y las oscilaciones desfasadas de los sensores de Lo Pagán y La Isleta.

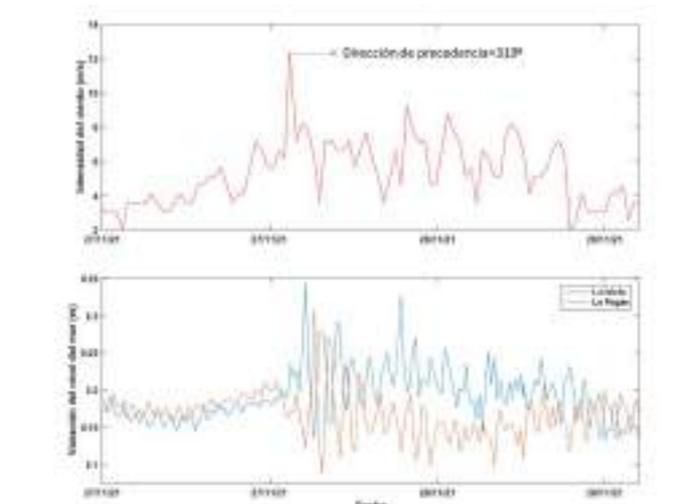


Figura 23. Viento registrado en San Javier durante el episodio de *seiche* analizado (arriba) y elevación del nivel del mar en La Isleta y Lo Pagán (abajo).

3.1.2.2. Desnivel entre el mar Mediterráneo y el Mar Menor

Los desniveles entre el mar Mediterráneo y el Mar Menor son los responsables de flujo de agua en los canales. Ambos niveles quedan representados por los sensores de elevación del puerto de San Pedro del Pinatar y Lo Pagán. La Figura 24 muestra los niveles desde febrero a junio de 2021. Se pueden apreciar las oscilaciones de mareas en el Mediterráneo (línea roja).

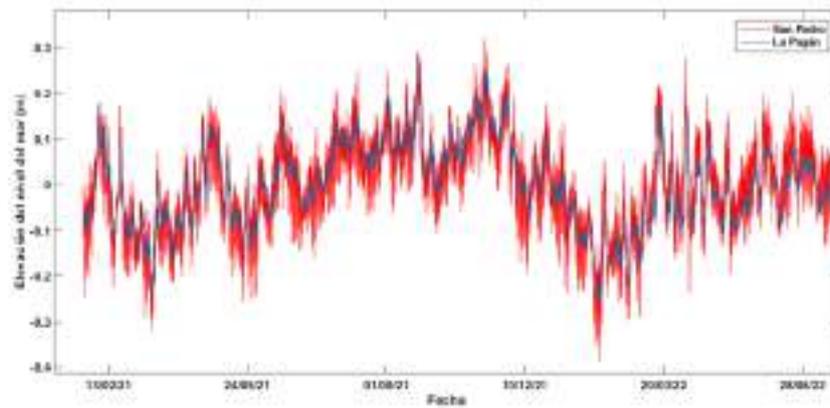


Figura 24. Variación del nivel del mar registrada en San Pedro del Pinatar y Lo Pagán.

El análisis de correlación cruzada entre ambas series muestra un coeficiente de correlación $r = 0.86$ con un desfase entre 4 y 6. El desfase encontrado está en el rango de los obtenidos para diferentes componentes de marea entre el Mar Mediterráneo y el Mar Menor [9].

3.1.3. FLUJOS EN LOS CANALES

Seguidamente se analizan los flujos en los canales registrados por los correntímetros para obtener un modelo empírico de flujo para cada canal a partir de la diferencia de elevaciones. Para ello se caracterizan primero las corrientes y posteriormente se calculan los flujos.

3.1.3.1. EL Estacio

3.1.3.1.1. Corrientes 2021

La Figura 25 muestra las rosas de corrientes del canal del Estacio a 4.7 m del fondo (superficie), 2.7 m del fondo (capa media) y 0.7 del fondo (capa de fondo). En ella se aprecia que la corriente de salida al Mediterráneo es ligeramente superior a la de entrada en las tres capas con un incremento progresivo hacia el fondo.

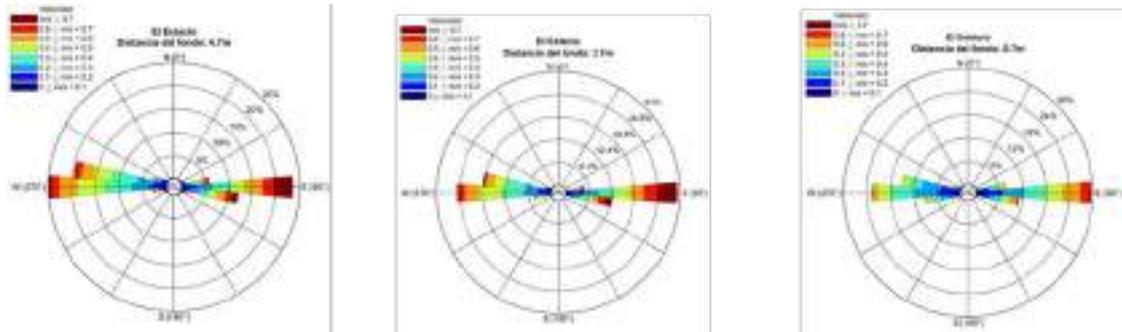


Figura 25. Rosas de corrientes del canal del Estacio a 4.7 m del fondo (superficie), 2.7 m del fondo (capa media) y 0.7 del fondo (capa de fondo).

Dada la orientación del canal, se representa la variación de la intensidad de corriente (componente U) registrada en El Estacio. En 2021 se han destacado tres eventos de fuertes corrientes de entrada o salida de agua que, como se ha comentado están asociadas a cambios bruscos en la presión atmosférica, tal y cómo muestra la

Figura 26.

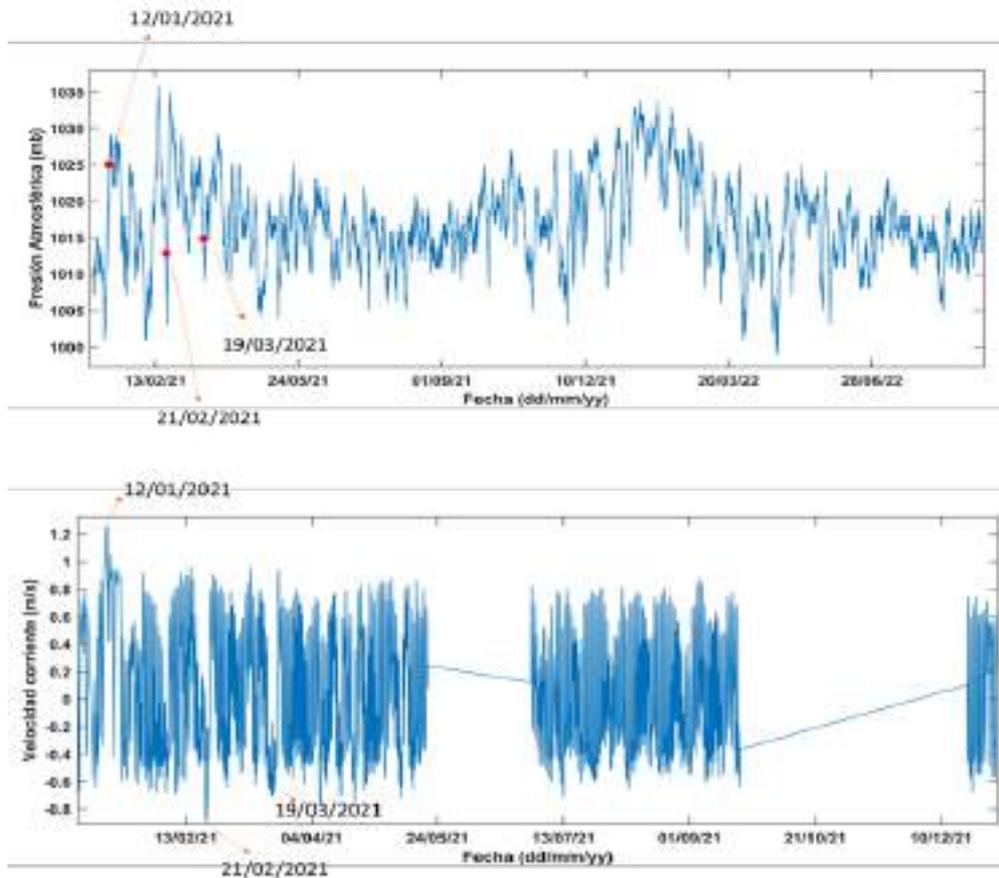


Figura 26. Variaciones de presión atmosférica (arriba) y corrientes en la capa media el Estacio (abajo) durante 2021.

3.1.3.1.2. Cálculo de caudales a partir de elevaciones.

La Figura 27 muestra una serie temporal de diferencia de elevaciones horarias registradas por los sensores de presión (color rojo) y caudal calculado a partir del registro de corrientes en el canal (color azul). Diferencias de nivel del mar positivas indican que el nivel en Lo Pagán está por encima del de San Pedro y por tanto sale agua del Mar Menor al Mediterráneo, y diferencias negativas indican que el nivel en el Mediterráneo está por encima del nivel del Mar Menor y por tanto el flujo será de entrada del Mediterráneo al Mar Menor.

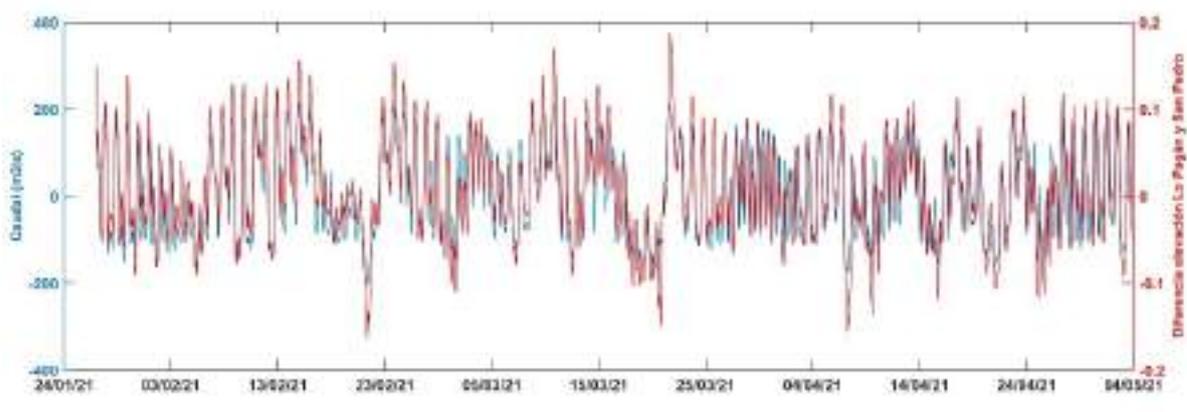


Figura 27. Diferencias de elevación en metros (rojo) y caudal en m³/s (azul) en el canal del Estacio.

Una regresión polinomial de tercer grado entre ambas variables (Figura 28) proporciona el siguiente modelo de flujo en El Estacio:

$$Caudal\ Estacio = -3.948 + 1602 \Delta\eta + 1954 \Delta\eta^2 - 8.6 \Delta\eta^3$$

Ecuación 21

con los siguientes parámetros del ajuste: $r^2 = 0.80$; RMS = 44.8; SSE = 4.6e+06; DFE = 2325 (SSE = suma de cuadrados del error, DFE = grados de libertad en el error)

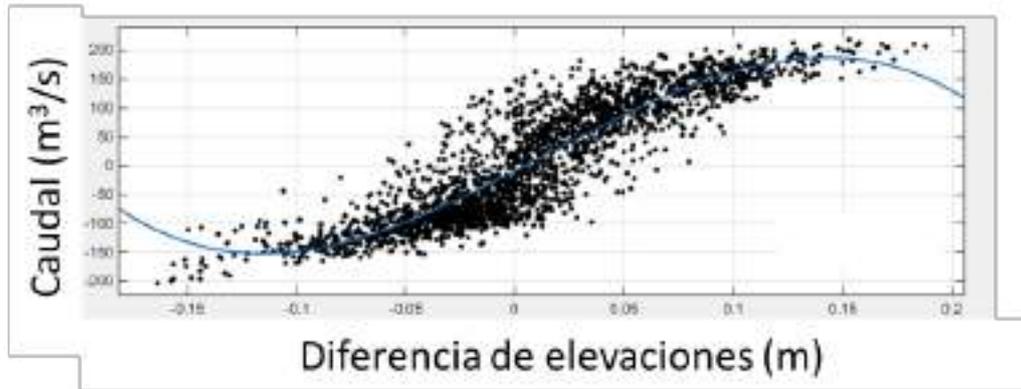


Figura 28. Regresión polinomial de tercer grado del caudal del canal del Estacio frente a la diferencia de elevaciones.

La bondad del modelo obtenida permite interpolar los datos de caudal cuando los ADCP no registraron en el canal, bien por enterramiento tras una tormenta, por *fouling*, agotamiento de batería o cualquier otro posible fallo. La Figura 29 muestra la recomposición de la serie con los datos calculados y la serie calculada con datos horarios (azul) y diarios (rojo).

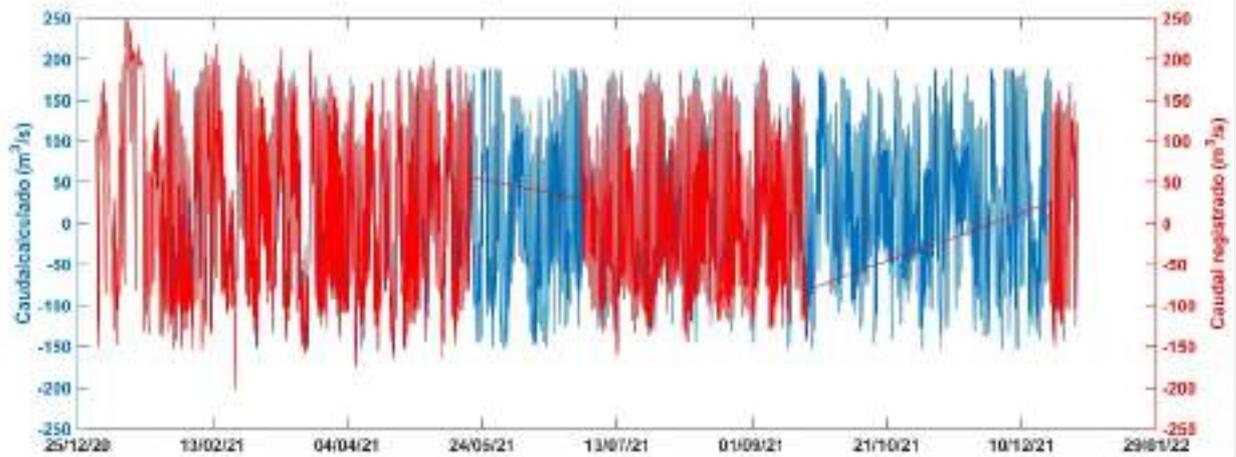


Figura 29. Serie temporal de caudales registrados (rojo) de 2021 en el Estacio con valores calculados e interpolados (azul).

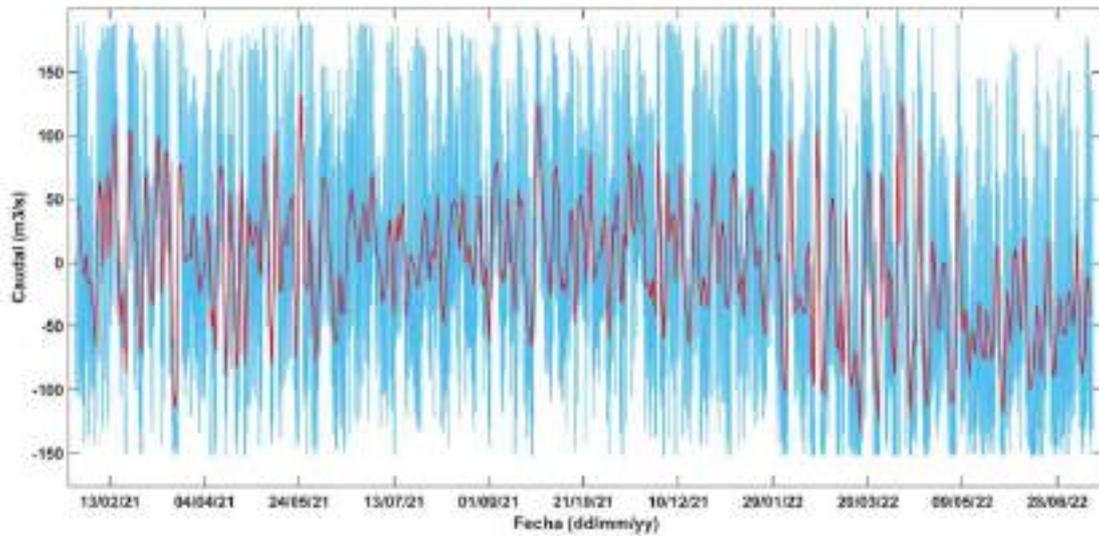


Figura 30. Caudal calculado a partir de la ecuación empírica (azul datos horarios, rojo datos suavizados diariamente).

3.1.3.2. Marchamalo

3.1.3.2.1. Corrientes 2021

Al igual que con el canal del Estacio, para el de Marchamalo se muestran las rosas de corrientes registrada en la capa más cercana a superficie, intermedia y de fondo para el año 2021.

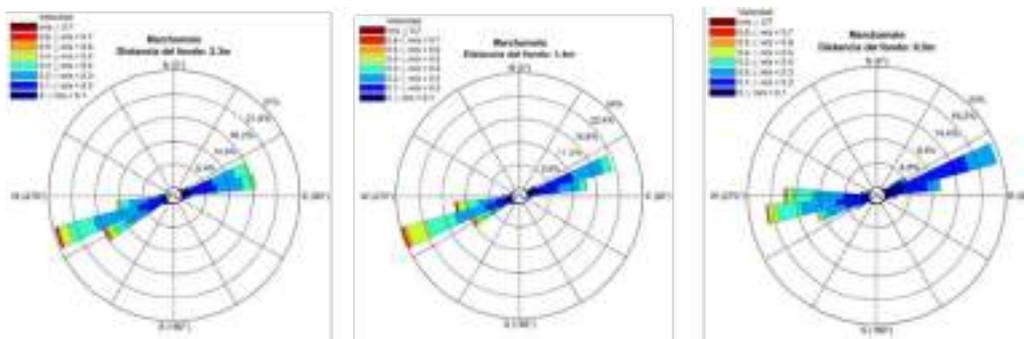


Figura 31. Rosas de corrientes del canal de Marchamalo a 2.3 m del fondo (superficie), 1.4 m del fondo (capa media) y 0.5 del fondo (capa de fondo).

Se observan en las tres capas valores de corrientes mayores en la dirección de entrada hacia el Mar Menor que en la de salida. Esto puede estar directamente relacionado con la morfología del canal que presenta una zona de poca profundidad hacia el Mediterráneo, lo que frenaría la corriente, mientras que hacia el Mar Menor presenta una batimetría homogénea en torno al metro de profundidad y bien configurada a lo largo del canal.

A excepción de la capa más cercana al fondo se puede observar un mayor porcentaje de eventos de entrada de agua que de salida como también queda registrado en la Figura 32.

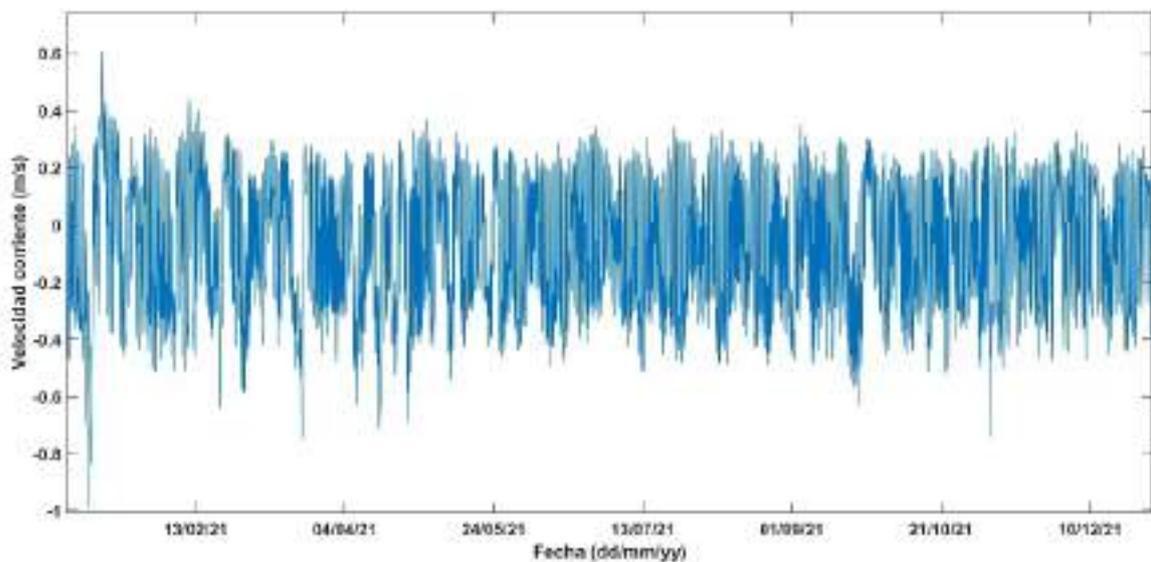


Figura 32. Variación de la corriente registrada en el canal de Marchamalo durante 2021 en la capa situada a mitad de la columna de agua.

En este canal se ha detectado, al igual que en El Estacio, eventos de entrada/salida del agua destacados el 12/01/2021, 21/02/2021 y 19/03/2021.

3.1.3.2.2. Cálculo de caudales a partir de elevaciones

La Figura 33 muestra, al igual que se hizo para el Estacio, las diferencias de elevaciones y los caudales medidos sobre datos horarios.

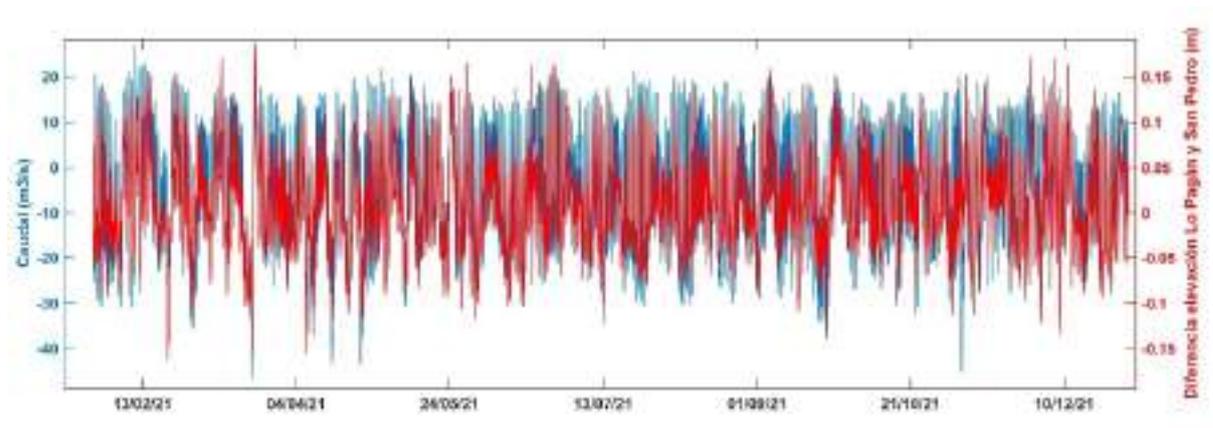


Figura 33. Diferencias de elevación (rojo) y caudal (azul) en el canal de Marchamalo.

El ajuste polinomial de tercer orden con robustez LAR (Least Absolute Residual) entre ambas variables proporciona el modelo (Figura 34):

$$Caudal\ Marchamalo = -6.05 + 276.9 \Delta\eta + 53.53 \Delta\eta^2 - 6279 \Delta\eta^3$$

Ecuación 22

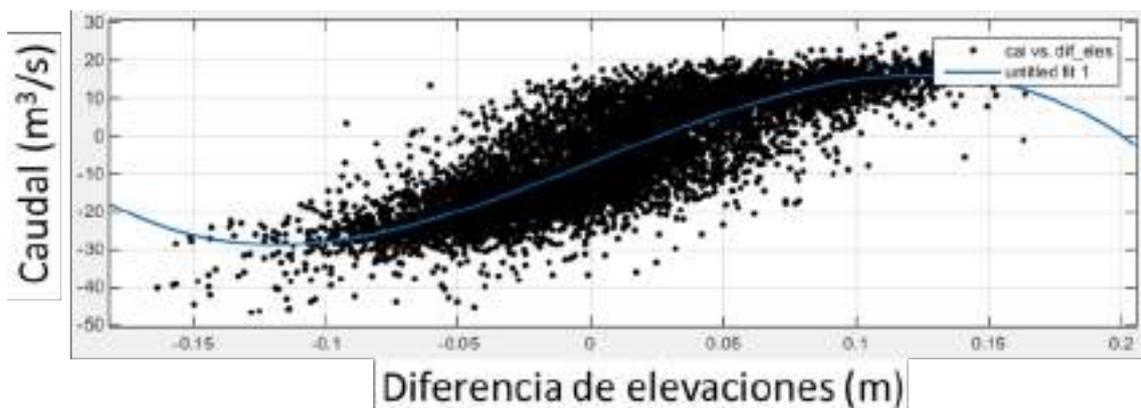


Figura 34. Regresión polinomial de tercer grado del caudal del canal del Marchamalo frente a la diferencia de elevaciones.

con los siguientes parámetros de ajuste: $r^2=0.85$; $RMSE=5.4$; $SSE = 2.37e+05$; $n = 8083$.

Se suele asumir que los errores de respuesta siguen una distribución normal y que los valores extremos no son habituales. Aun así, los valores extremos llamados atípicos sí pueden aparecer. La principal desventaja del ajuste por mínimos cuadrados es su sensibilidad a los valores atípicos. Los valores atípicos tienen una gran influencia en el ajuste porque cuadrar los valores residuales magnifica los efectos de estos puntos de datos extremos. Para minimizar la influencia de los valores atípicos, se puede ajustar sus datos con la regresión de mínimos cuadrados robusta (LAR). Los mejores resultados se han obtenido mediante LAR. El mínimo de valores residuales absoluto (LAR). El método LAR identifica una curva que minimiza la diferencia absoluta de los valores residuales, en lugar de las diferencias cuadráticas. Por lo tanto, los valores extremos tienen una menor influencia en el ajuste.

La Figura 35 muestra la superposición de las series de caudal calculado y registrado.

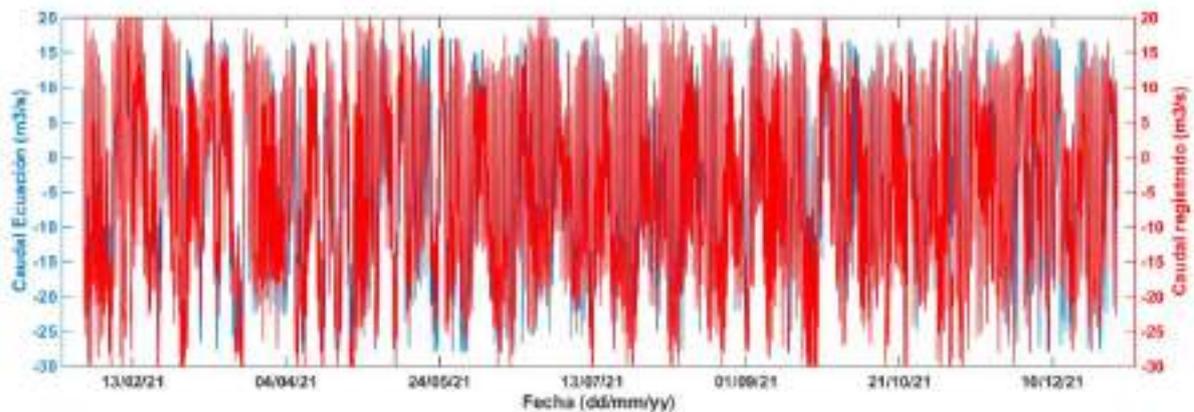


Figura 35. Caudal obtenido a partir de la ecuación empírica (rojo) vs caudal calculado a partir de los datos (azul).

3.1.3.3. Encañizadas

Durante 2021 estuvieron fondeados 4 ADCPs (véase Figura 3). Este sistema de canales consta básicamente de tres canales: la gola de La Torre; la gola del Charco y el canal de Veneziola, y uno próximo a los Esculls. No se considera la gola del Ventorrillo, porque durante 2021 y 2022 ha estado colapsada por sedimentos.

Se analizan primero las corrientes de cada canal o gola en particular para, posteriormente hacer una aproximación al estudio del caudal conjunto de las Encañizadas.

3.1.3.3.1. Corrientes

3.1.3.3.1.1. GOLA DE LA TORRE

Esta zona presenta una gran movilidad de sedimento, mayormente fangos. La gola tiene una sección vertical muy heterogénea que dificultó el fondeo de los sensores quedando enterrado con frecuencia, por lo que muchos datos no pasaron el control de calidad y se perdieron. La zona es muy somera y está sujeta a dragados de mantenimiento por lo que su batimetría puede cambiar periódicamente. En nuestro caso analizamos las corrientes en la capa a 0.8 m del fondo en la posición del ADCP (Figura 36).



Figura 36. Localización del fondeo del ADCP en la Gola de la Torre.

La Figura 37 muestra la rosa de corrientes y la evolución de la velocidad de la corriente.

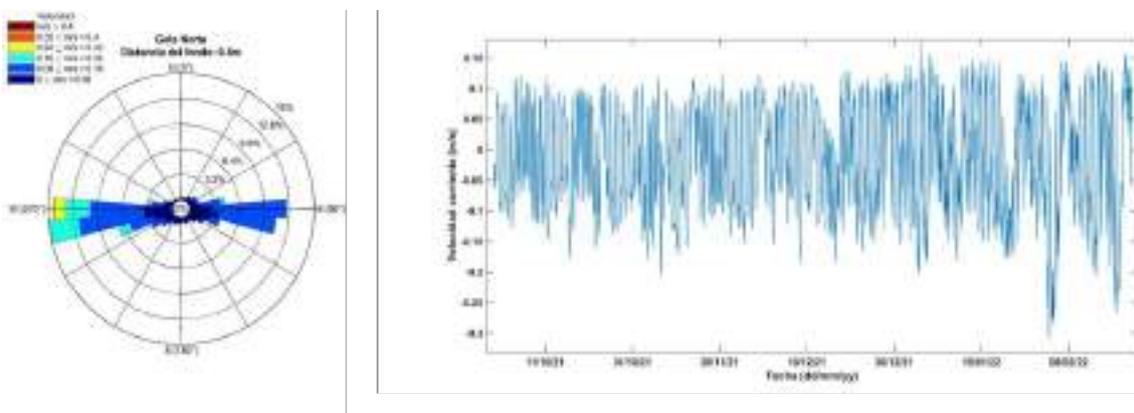


Figura 37. Rosa de corrientes a partir de los datos registrados a 0.8 metros del fondo por el correntímetro de la gola de La Torre y evolución del componente u de la velocidad.

El modelo obtenido a partir de una regresión polinomial de tercer grado con robustez de tipo LAR es:

$$\text{Caudal Gola de La Torre} = -0.5267 + 114.9 \Delta\eta - 187.7 \Delta\eta^2 - 2481 \Delta\eta^3$$

Ecuación 23

con los siguientes parámetros de ajuste: $r^2=0.82$; RMSE=2.5; SSE = 5.5e+03; DFE = 837.

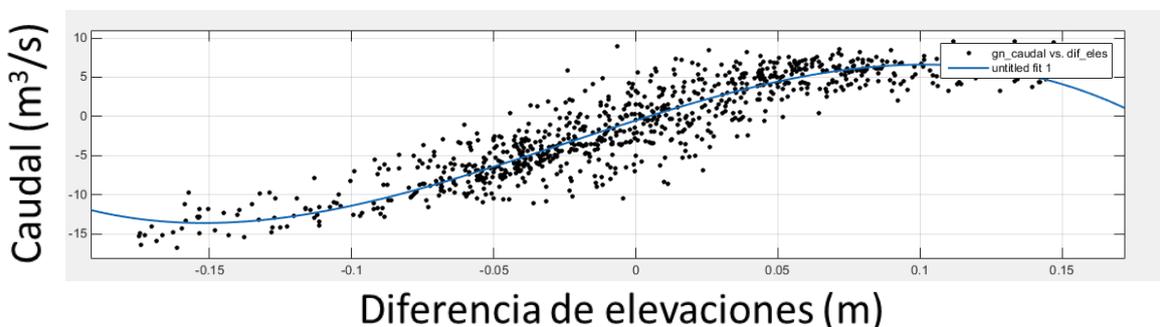


Figura 38. Regresión polinomial de tercer grado del caudal de la gola de la Torre frente a la diferencia de elevaciones.

3.1.3.3.1.2. GOLA DEL CHARCO

Al igual que en la gola de La Torre esta zona presenta fondos fangosos y movimientos de sedimentos, lo que dificulta tener series largas de datos, quedando con frecuencia el sensor casi al descubierto. La muestra la localización del correntímetro. El análisis se hace sobre el tramo de valores registrados más fiables abarcando el periodo del 12/05/2021 al 22/02/2022 (Figura 39). Aunque la dinámica de esta gola es muy similar a la de La Torre, se observan mayores corrientes de salida que de entrada al Mar Menor con velocidades ligeramente inferiores.



Figura 39. Posicionamiento del fondeo del correntímetro en la Gola del Charco

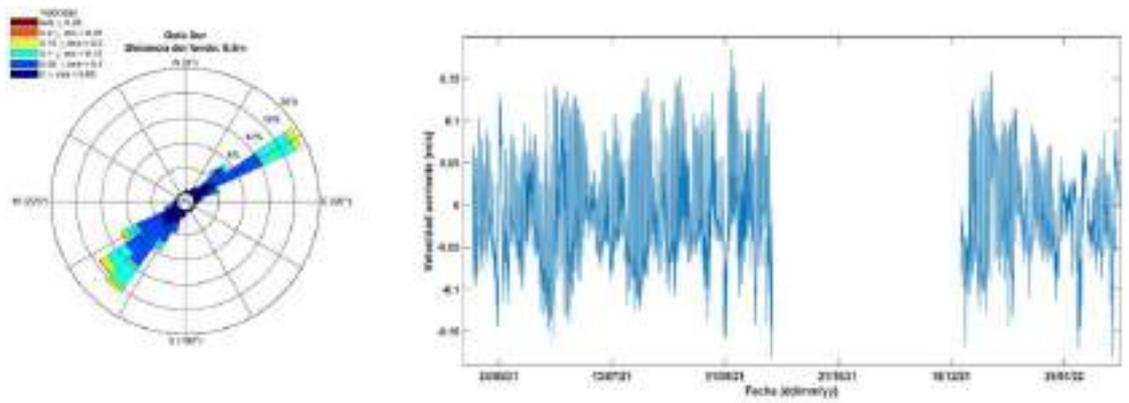


Figura 40. Rosa de corrientes a partir de los datos registrados a 0.5 metros del fondo por el correntímetro ubicado en la gola de El Charco y evolución del componente U de la velocidad.

La ecuación para la Gola de El Charco a partir de una regresión polinomial de tercer orden con robustez de tipo LAR (Figura 40) es:

$$\text{Caudal Gola de El Charco} = -1.082 + 68.1 \Delta\eta - 153.8 \Delta\eta^2 - 1000 \Delta\eta^3$$

Ecuación 24

con los siguientes parámetros de ajuste: $r^2=98$; RMSE=0.46; SSE = 178; DFE = 837

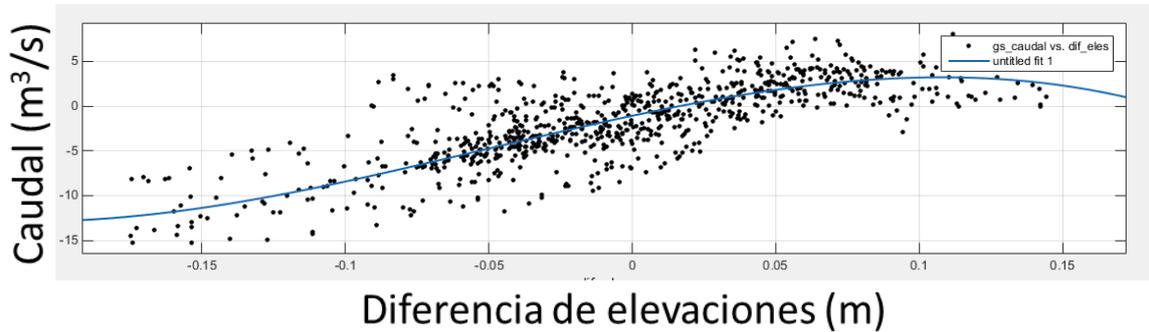


Figura 41. Regresión polinomial de tercer grado

3.1.3.3.1.3. CANAL DE VENEZIOLA

El canal de Veneziaola era en su origen una gola similar a las de La Torre o El Charco cuando existían las antiguas salinas sobre las que se construyó la urbanización que da nombre al canal. No obstante, cuando se construyó la urbanización y se remodeló el canal se instaló una compuerta que lo mantenía cerrado. La bocana a mar abierto quedó cegada por el transporte de sedimentos al no haber flujo por el canal, dejando el canal sin función. Con el tiempo la compuerta quedó completamente oxidada de forma que en la actualidad ya no existe. Con las sucesivas tormentas, especialmente la DANA de septiembre de 2019, la bocana se abrió y en la actualidad es de nuevo un canal completamente funcional. La Figura 41 muestra la imagen aérea de 1956 de las Encalizadas (Vuelo Americano, Serie B (1956-1957) y el estado actual de la bocana a la vertiente Mediterránea.



Figura 42. Estado del canal en 1956 y estado actual de la bocana a la vertiente Mediterránea del canal de Veneziaola.

El correntímetro fondeado en este canal se ubicó inicialmente en la zona más cercana al Mar Mediterráneo, sin embargo, a partir del 23/03/2021 y debido a que quedó enterrado en algas y fango se trasladó a la parte más cercana a la bocana del Mar Menor donde también se encontró enterrado en fango.

La

Figura 42 muestra la rosa de corriente y la componente u de velocidad de esta canal. En este canal se observan valores de corriente negativos mayores que positivos indicando predominancia de flujos de entrada.

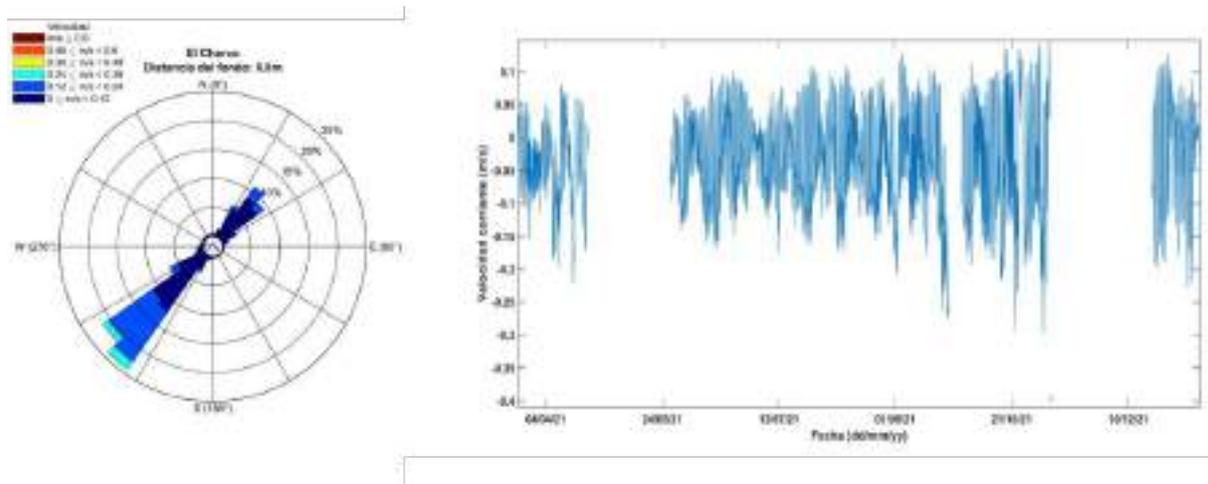


Figura 43. Rosa de corrientes a partir de los datos registrados a 0.8 metros del fondo por el correntímetro ubicado en el canal de Venezia y evolución del componente u de la velocidad.

De nuevo una regresión polinomial de tercer grado con ajuste tipo LAR proporciona el modelo para el canal de Venezia (Figura 43):

$$\text{Caudal Canal de Venezia} = 0.28 + 3.44 \Delta\eta - 127.2 \Delta\eta^2 + 813.7 \Delta\eta^3$$

Ecuación 25

con los siguientes parámetros de ajuste: $r^2=98$; RMSE=0.46; SSE = 178; DFE = 837.

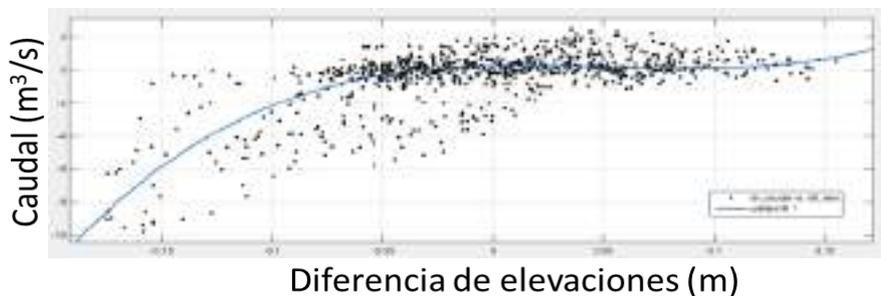


Figura 44. Ajuste polinomial de tercer grado para los datos del canal de Venezia.

3.1.3.3.1.4. ESCULLS

El ADCP fondeado en esta zona fue diferente a los fondeados en los otros canales. Se trata de un ADCP Sontek con una capa de blanco de 0.8 m. Por este motivo se optó por tomar la primera capa registrada a 1.6 metros del fondo, sobre una profundidad que oscila entre los 2.3 y 2.8 metros. Capas superiores pueden quedar fuera del agua en determinados periodos. No obstante, se observa una diferencia de velocidades en los años 2021 y 2022 que pudiera ser atribuida al uso de diferentes correntímetros con criterios diferentes de capas. Se ha considerado eliminar estos datos, pero finalmente se decidió mostrarlos para tener una visión de conjunto más amplia y que miden a

La Figura 45 muestra la rosa de corrientes y la evolución del componente u de velocidad.

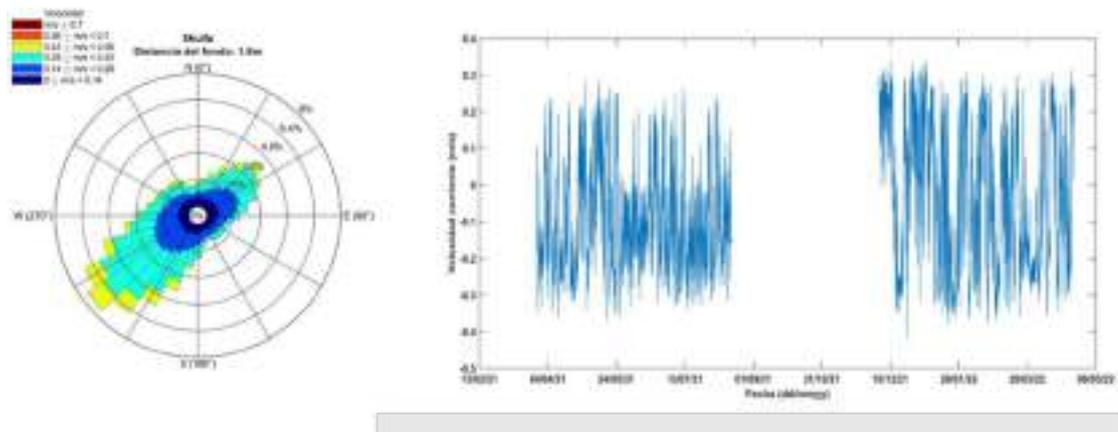


Figura 45. Rosa de corrientes registrada en el correntímetro situado cerca de los Esculls a 1.6 metros de profundidad del fondo y velocidad del componente u de la corriente.

Por la situación del correntímetro en la ensenada de los Esculls, difícilmente se recoge la velocidad de la corriente en el sentido de las golgas de La Torre y El Charco. Con vientos de NE la corriente tiende a entrar entre los Esculls del norte y salir entre los del sur. Este correntímetro sólo se ha utilizado para validaciones del modelo hidrodinámico no incluidas aquí.

3.1.3.3.2. Caudal en Las Encañizadas

La morfología actual de Las Encañizadas, con la gola del Ventorrillo prácticamente cerrada, permite restringir el cálculo de los caudales a la suma de los flujos en las golas de La Torre, el Charco y el canal de Veneziaola.

Para el estudio de caudales se ha considerado desde 18/01/2022 al 22/02/2022 por ser la serie donde se disponía de todos los datos necesarios conjuntamente: elevaciones del nivel del mar y corrientes en cada canal. Debido a que la orientación de los canales es diferente para cada uno de ellos, se han realizado rotaciones de ejes en los datos de corriente conforme a su variabilidad máxima. Para ello se ha realizado un análisis de componentes principales que determina los rangos de máxima variabilidad a partir del cual se han calculado los ángulos de rotación de rotación (Tabla 6).

Tabla 6. Ángulo que explica la variabilidad máxima de la corriente para los ADCP de Canal de Veneziaola, Gola de la Torre y Gola del Charco.

Correntímetro	Ángulo variabilidad máxima (º)	Variabilidad explicada (%)	Ángulo de rotación (º)
Gola de La Torre	90-270	98	0
Gola del Charco	46-226	98	43
Canal de Veneziaola	54 - 234	93	35.75

Una vez rotados los ejes de cada uno de los canales los valores de corriente positivos indican agua que fluye hacia el Mar Mediterráneo y negativos agua hacia el Mar Menor. En la Figura 46 se puede observar cómo los 3 canales presentan un comportamiento homogéneo, siendo el de Veneziaola el que presenta menores velocidades de corriente.

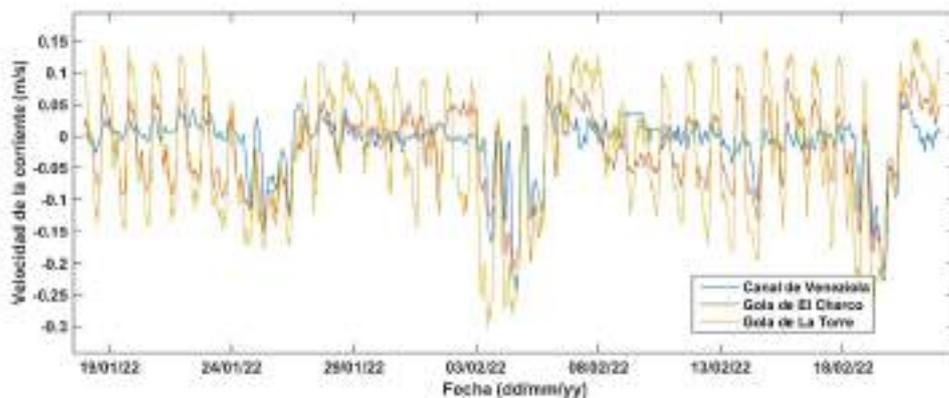


Figura 46. Variación de la corriente en el eje principal una vez rotado para el canal de Veneziaola, gola de La Torre y Gola de El Charco. Valores positivos indican flujo hacia el Mediterráneo y negativos hacia el Mar Menor.

Se observa como los valores positivos de corriente (dirección hacia el Mar Mediterráneo) están limitados, siendo los valores mayores los registrados en la Gola de La Torre (0.1 m/s). Esto puede ser debido, además de la forma geométrica de las golas, al efecto limitador que la aparición de secos tiene en la zona de Las Encañizadas. Por el contrario, durante periodos de entrada de agua al Mar Menor, el nivel del mar aumento, y zonas secas pasan a tener un papel activo en el intercambio; por tanto, desaparece esta limitación en la velocidad de la corriente, llegando a alcanzarse hasta 0.3 m/s en la Gola de La Torre. Esta situación se puede observar también en la Gola de El Charco. Esta Gola presenta una menor profundidad que la de La Torre, de hecho, el ADCP quedó durante periodos fuera del agua en el tiempo en el que estuvo fondeado. Esta situación hace que durante periodos de salida el flujo se limite y no alcance valores similares a los de El Charco, sin embargo, durante periodos de entrada ambos correntímetros presentan valores similares. Esta situación es aún más limitante en el canal de Veneziaola ya que la zona de conexión con el Mar Mediterráneo es muy somera pudiendo quedar en ocasiones en seco.

Para el cálculo de la sección atravesada de cada canal se ha utilizado como una profundidad homogénea en cada uno de ellos como la media de la serie proporcionada por su correspondiente ADCP. Así mismo se asume que el comportamiento de la corriente es homogéneo en la sección atravesada. La Figura 47 muestra una comparativa del caudal entre los tres canales. La Tabla 7 recoge la anchura de cada uno de los canales, su profundidad media y el porcentaje de flujo de cada uno de los canales con respecto al total de la Encañizadas.

Tabla 7. Anchura y profundidad estimada de cada uno de los canales de Las Encañizadas para el cálculo del caudal.

Canal	Anchura (m)	Profundidad media (m)	% del Caudal total de las Encañizadas
Gola de La Torre	52	1.13	48.2
Gola del Charco	83	0.8	40.12
Canal de Veneziaola	27	1.4	11.6

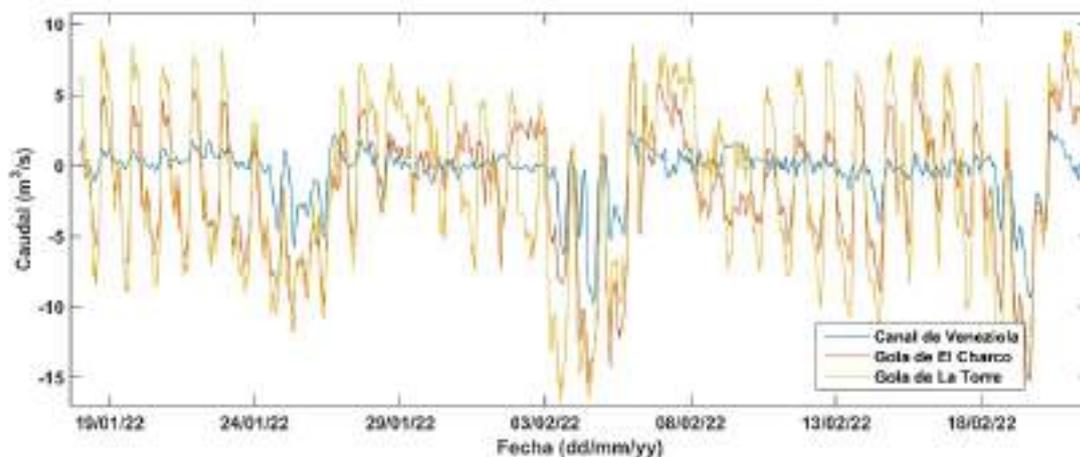


Figura 47. Caudales obtenidos para cada uno de los canales en Las Encañizadas.

Una vez calculados los caudales, se observa que el de Gola de La Torre y Gola de El Charco tienen un flujo similar mientras que el del canal de Veneziaola presenta un flujo menor. También se pueden observar valores mayores de caudal de entrada hacia el Mar Menor (negativos) que de salida. Como ya se ha comentado esto puede ser debido a la aparición de secos durante los periodos de salida que actúan limitando el flujo máximo hacia el Mediterráneo, no produciéndose esa situación en los periodos de entrada.

De otro lado, la Figura 48 muestra las diferencias de nivel del mar y las del flujo en Las Encañizadas vistas en su conjunto donde se observa que ambas series presentan el mismo comportamiento.

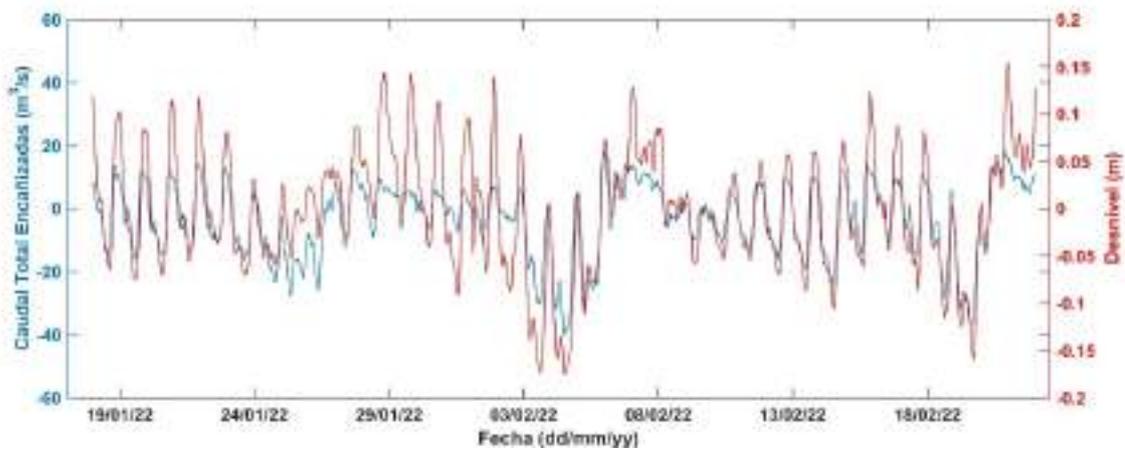


Figura 48. Desnivel entre Lo Pagán y San Pedro del Pinatar (rojo) y caudal total en Las Encañizadas (azul).

El modelo proporcionado por un ajuste polinomial de tercer grado con robustez tipo LAR es (Figura 49):

$$Caudal\ Encañizadas = -1.248 + 195.4 \Delta\eta - 470.3 \Delta\eta^2 - 3528 \Delta\eta^3$$

Ecuación 26

con los siguientes valores del ajuste: $r^2=0.99$; $RMSE = 0.9381$; $SSE = 736.51$; $n = 837$

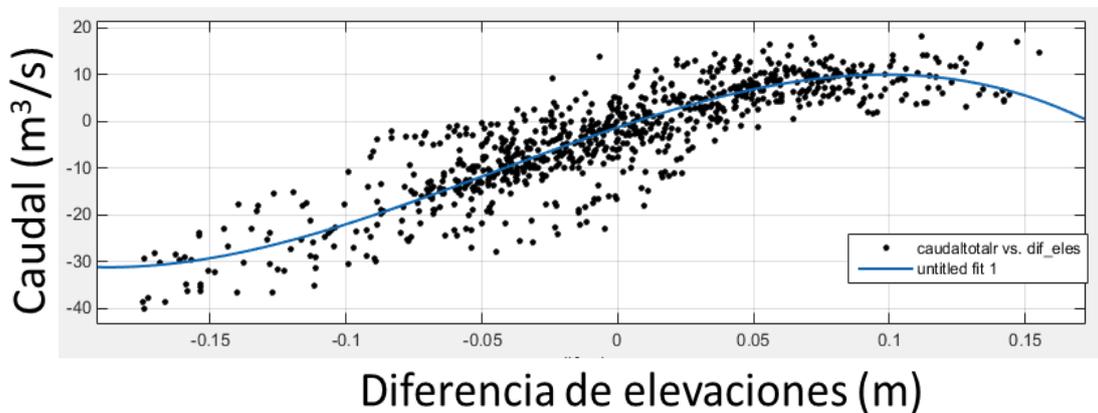


Figura 49. Regresión polinomial de tercer grado.

Tal y cómo se observaba en apartados anteriores, los flujos de salida al Mediterráneo están limitados a un valor máximo en torno a $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 51), que podría deberse a la bajada de nivel del mar, aparición de secos y consecuente reducción del flujo. No ocurriendo lo mismo en el caso de corrientes de entrada. Los datos empíricos parecen indicar que si el nivel sube no hay límite para la entrada de agua, sin embargo, si el nivel del mar baja, la velocidad de salida sólo puede alcanzar un máximo. Estos datos requieren un análisis más detallado a partir de modelo hidrodinámico en 3D para su validación.

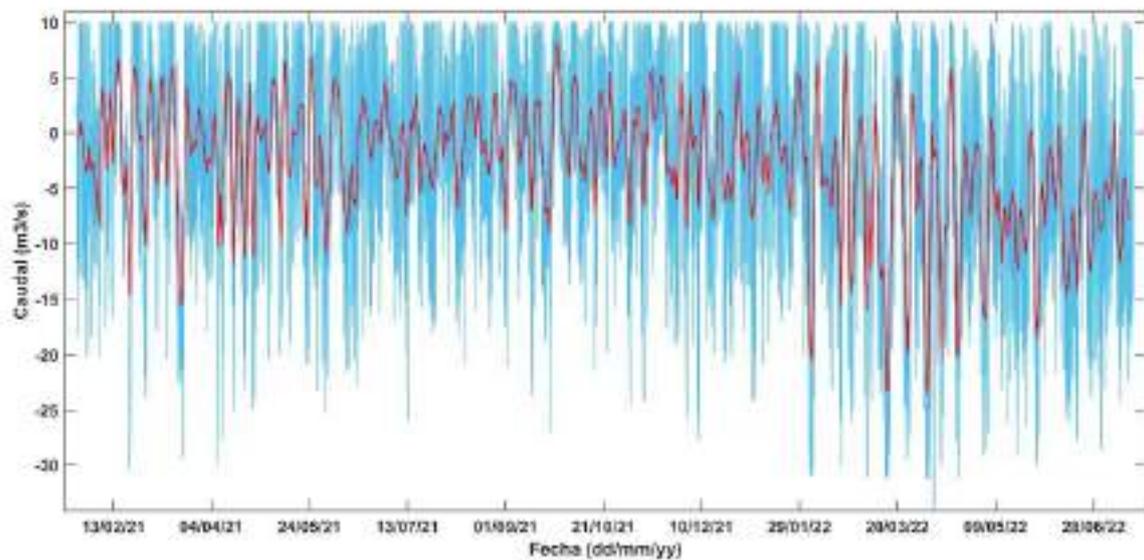


Figura 50. Flujos en las encañizadas calculados con la ecuación empírica para los años 2021 y 2022 (azul datos horarios, rojo datos suavizados a 24 horas).

3.1.3.3.3. Elevación nivel del mar

Para analizar las variaciones del nivel del mar en las Encañizadas se han utilizado los datos registrados por el sensor de presión ubicado en el embarcadero de la Encañizada de La Torre. El máximo nivel se encontró el 25/09/21 y el mínimo el 01/02/2022 con una oscilación máxima de 0.5 metros (Figura 52).

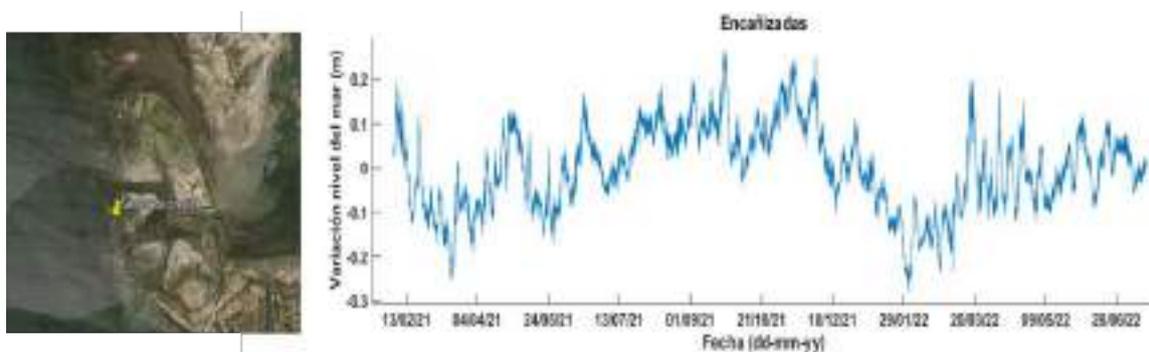


Figura 51. Elevación del nivel del mar en el embarcadero de la Encañizada de la Torre.

Un rango de elevaciones superior a la profundidad de los canales en muchas zonas puede dejar zonas inundadas y zonas secas con un flujo extremadamente variable. Este flujo adquiere, además, un componente de variación con el transporte sedimentos y arribazones de *Posidonia* y otras fanerógamas y algas que generan secciones atravesadas de los canales variables. Se ha hipotetizado que la playa de la Llana se erosiona por el efecto del puerto de San Pedro del Pinatar transportándose su arena hacia las encañizadas y colapsándola. No obstante, y revisando las imágenes de los satélites Sentinel 2 – L1C y L2A – se puede apreciar que en el colapso de las encañizadas hay que tener en cuenta también el transporte de sedimentos de las corrientes de salida, especialmente cuando el nivel del Mar Menor ha ascendido significativamente.

3.1.4. FLUJOS DE INTERCAMBIO MAR MENOR-MEDITERRÁNEO 2021

El flujo entre el Mar Menor y el Mediterráneo se puede calcular a partir de los flujos de cada uno de los canales. La Figura 53 muestra el flujo de intercambio entre el Mar Menor y el Mediterráneo debido a la acción conjunta de todos los canales desde el 19/01/2021 hasta el 14/09/2022. En este periodo el caudal máximo de entrada al Mar Menor fue de 165 m³/s y el de salida de 149 m³/s.

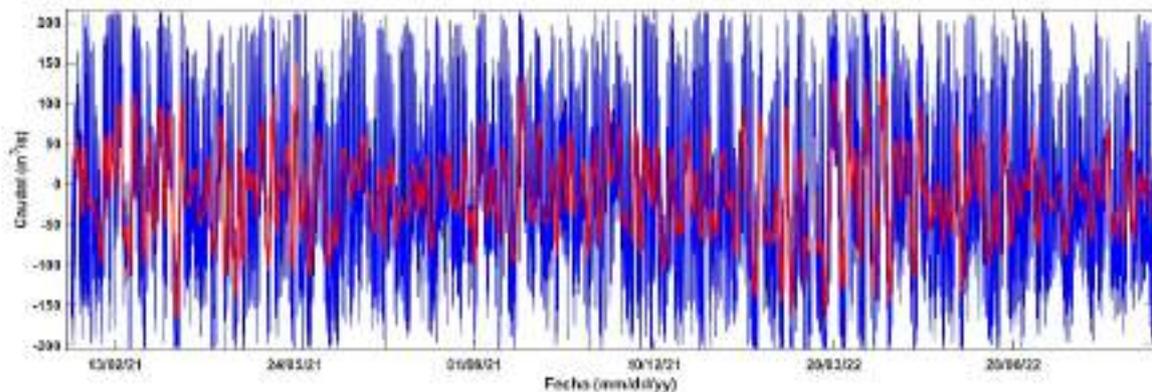


Figura 52. Caudal de entrada (negativo) y salida (positivo) del agua entre el Mar Menor y el Mar Mediterráneo. Azul datos horarios, rojo datos diarios.

En la Tabla 8 se comparan los flujos estacionales de los años 2021 y 2022 junto a los datos de 2011. Para estos cálculos se ha considerado primavera de marzo a mayo, verano de junio a agosto, otoño de septiembre a noviembre e invierno de diciembre a febrero. Se entiende por flujo neto la suma de los flujos de entrada más los de salida, flujo negativo indica entrada de agua y flujo positivo salida.

Tabla 8. Flujo neto en Hm^3 a través del Estacio para cada estación de los años 2011, 2021 y 2022.

	2011	2021	2022
Primavera	-24	-22.2	-40
Verano	-41	-29.9	-43.6
Otoño	92	53.16	
Invierno	59	-85	

La Figura 54 muestra el caudal (m^3/s) neto (entradas + salidas) teniendo en cuenta todos los canales para las primaveras de 2021 y 2022 representándose este periodo en color azul.

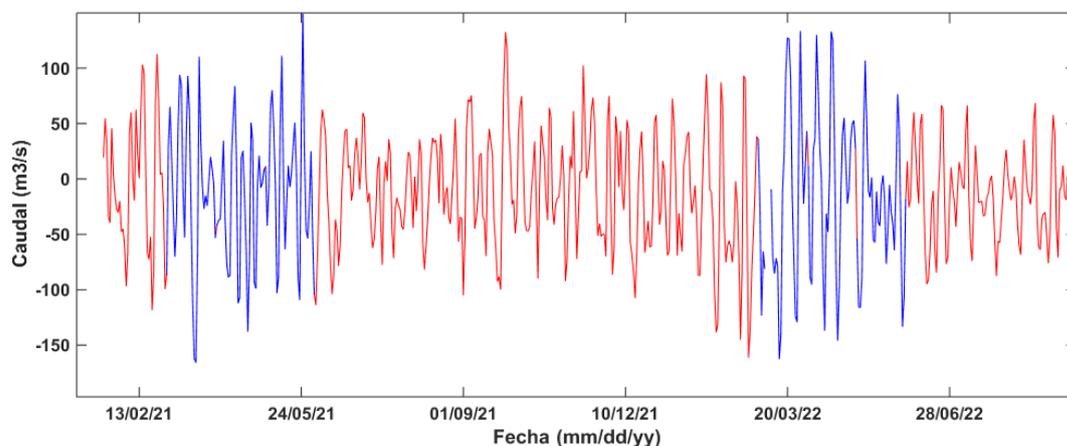


Figura 53. Caudal neto de intercambio del Mar Menor. En azul las primaveras de 2021 y 2022.

Como indica la Tabla 9 los flujos netos de primavera fueron de -95 Hm^3 para 2021 y de -118 para 2022. Considerando un volumen del Mar Menor de 580 Hm^3 el porcentaje de renovación en la primavera de 2021 fue de un 16.3%, mientras que en la de 2022 lo fue del 20.3%.

Tabla 9. Caudales neto (entrada + salida) y % de renovación, teniendo en cuenta todos los canales para primavera de 2021 y 2022.

	Flujo neto entrada/salida (Hm^3)	% renovación
Primavera 2021	-95	16.3
Primavera 2022	-118	20.3

Del mismo modo, la Figura 55 muestra el caudal para los veranos de 2021 y 2022 en azul.

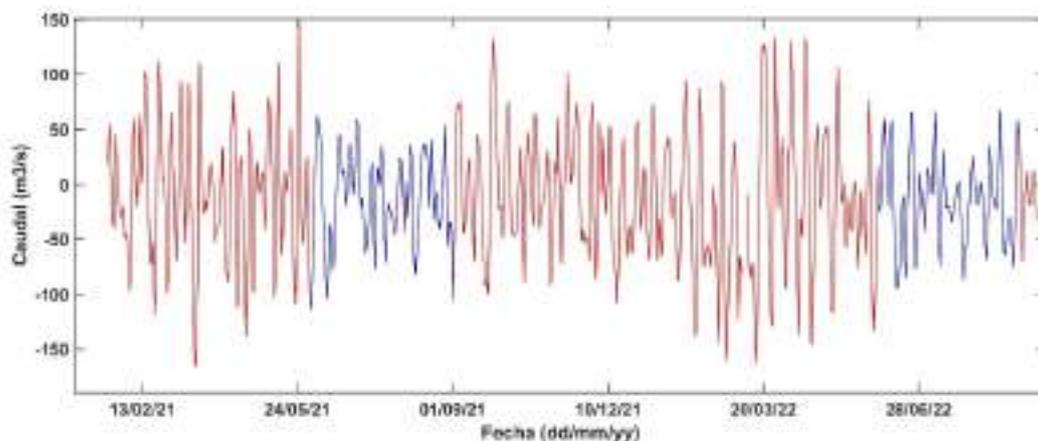


Figura 54. Caudal neto de intercambio del Mar Menor. En azul los veranos de 2021 y 2022.

Como indica la Tabla 10 los flujos netos de verano fueron de -99.7 Hm^3 para 2021 y de -116 para 2022, acordes con las diferencias de evaporación entre ambos años debido a diferencias térmicas. Considerando un volumen del Mar Menor de 580 Hm^3 el porcentaje de renovación en verano de 2021 fue de un 17.18%, mientras que en verano de 2022 lo fue del 20%.

Tabla 10. Caudales netos (entrada + salida) y % de renovación teniendo en cuenta todos los canales para los veranos de 2021 y 2022

	Flujo neto entrada/salida (Hm3)	% renovación
Verano 2021	-99.7	17.18
Verano 2022	-116	20

Las diferencias de flujo más importantes entre 2021 y 2022 se dieron en el mes de febrero con -11.9 Hm^3 en 2021 y -111.5 Hm^3 en 2022.

La Figura 56 representa las diferencias de elevación del nivel del mar entre Lo Pagán y San Pedro del Pinatar donde se representa en azul los meses de febrero de ambos años, poniendo de manifiesto que la seca de febrero se retrasó a marzo en 2022. Tras las secas, cuando se alcanzan los niveles más bajos es cuando mayor cantidad de agua entra al Mar Menor siendo el desnivel entre el punto más bajo alcanzado durante las secas de 2022 de -0.25m y el más alto de 0.15 m (20/3/2022). Esto supone un incremento del nivel del mar en torno a 0.4 m , lo que equivale a una entrada de agua de unos 68 Hm^3 . Las secas del 2022 alcanzaron nivel del mar menores que los del 2021, siendo el valor medio durante las secas de 2021 en torno a -0.13 m y en 2022 de 0.2 m manteniéndose por más tiempo.

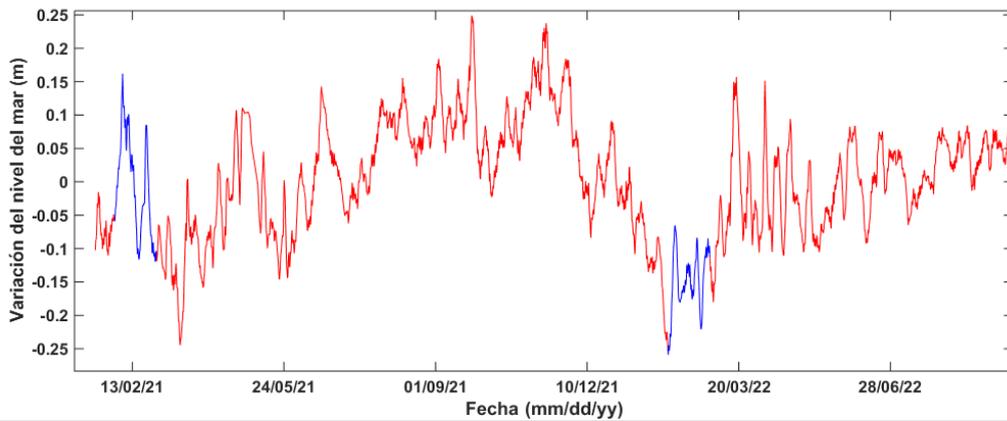


Figura 55. Variación nivel del mar en el sensor de Lo Pagán. En azul se indican los meses de febrero.

Otro factor importante a tener en cuenta para valorar la renovación del agua dentro de la laguna es el viento, ya que para que exista una renovación efectiva del agua en el Mar Menor, han de darse dos circunstancias: que exista un flujo neto de entrada y fuertes vientos que mezclen el agua entrante horizontal y verticalmente [9].

En ausencia de vientos, la renovación del agua se produce en la zona más cercana a los canales, tal y cómo ocurrió mayormente en 2021. Sin embargo, durante la primavera de 2022 hubo fuertes episodios de viento mantenidos a lo largo de varios días, tal y cómo se puede observar en la Figura 57. Los datos de viento se han suavizado a 24 horas y se puede observar cómo a partir del 20/3/2022 hubo periodos con vientos mayores de 10 m/s mantenidos durante varios días. Esto unido a una mayor entrada de agua en 2022 que en 2021, apuntan a una mayor renovación efectiva en 2022 que en 2021 durante la primavera.

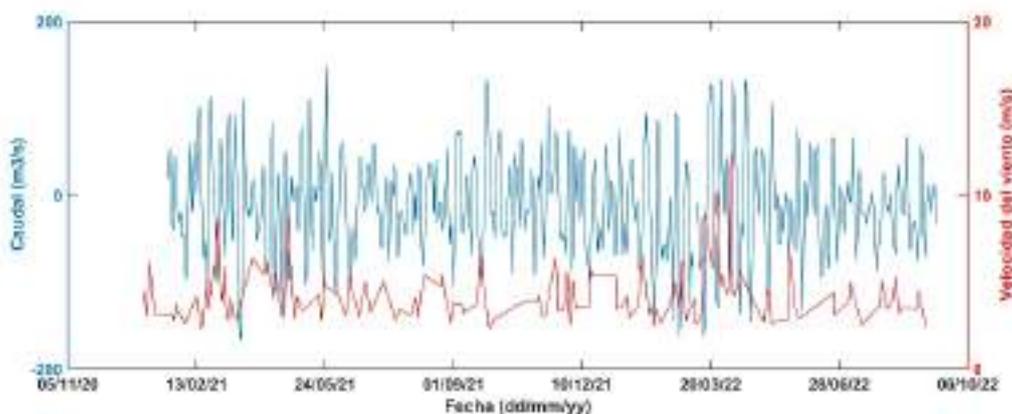


Figura 56. Caudal (azul) e intensidad del viento (rojo) (datos suavizados a 24 horas).

3.2. ESTUDIO DE FLUJOS EN EL CANAL DE MARCHAMALO

La gola de Marchamalo (Figura 58) se abrió artificialmente en el siglo XVI para la construcción de una encañizada con licencia de explotación al Hospital de Caridad de Cartagena para proveerle de pescado. Las imágenes aéreas del vuelo americano de 1956 (IGME) muestran el canal colapsado por la arena, indicando que durante algunas épocas estuvo cerrado. No obstante, debió rehabilitarse años después y seguir la encañizada en explotación hasta que dejó de utilizarse con la expansión urbanística de la Manga, dejando el canal para paso de embarcaciones deportivas ligeras al Mediterráneo. Desde los años ochenta, además, se ha utilizado como depósito de arena para reposición de las playas del interior del Mar Menor creadas artificialmente en esos años.



Figura 57. Imágenes de la Gola de Marchamalo.

Originalmente, la bocana al Mediterráneo estaba formada por dos espigones paralelos, pero posteriormente se modificó eliminando parte de uno de ellos y utilizando al menos parte de las rocas removidas para formar el espigón de cierre que nunca se terminó correctamente (Figura 59).



Figura 58. Detalles de la bocana del mediterráneo en el canal de Marchamalo.

El espigón roto facilita la entrada de arenas desde el Mediterráneo y la zona donde se ubicaba la encañizada de mayor anchura ralentiza las corrientes haciendo que se deposite más fácilmente el sedimento transportado, motivo por el cual se fue dragando para la extracción de arenas y conseguir que hubiera un mínimo flujo de agua que impidiera también el estancamiento y la putrefacción de restos de algas que provocaban malos olores en la zona.

Los dragados periódicos fueron por lo general someros, sin afectar excesivamente las secciones atravesadas del canal. No obstante, cada cierto tiempo, quizá después de tormentas importantes en invierno que colapsaban más el canal, se procedía a dragados de mayor envergadura. Los dos últimos de este tipo fueron en 2011 y 2017.

En el de 2011 se pudo medir el flujo de agua antes y después del dragado. Observándose cómo (Tabla 11), el flujo medio neto diario (agua de entrada - agua de salida) no ha variado mucho después del dragado (incremento de $-0.04 \text{ Hm}^3/\text{d}$), sin embargo, la cantidad de agua total que ha entrado o ha salido a lo largo de un día en aproximadamente el doble después del dragado. Esto indica, por ejemplo, que en un ciclo de marea ha entrado y salido más agua después del dragado, pero el balance neto no ha variado significativamente.

Tabla 11. Caudales registrados en Marchamalo antes y después del dragado de 2011.

	Antes del dragado de 2011	Después del dragado de 2011
Flujo medio neto diario (Hm^3/d)	-0.43 ± 0.70	-0.47 ± 1.04
Flujo medio total diario (Hm^3/d)	0.73	1.57
Flujo neto entrada/salida anual ($\text{Hm}^3/\text{año}$)	-157	-171.04

En 2017 se procedió a otro dragado intensivo que quedó inconcluso dejando una batimetría muy modificada e irregular con secos que nunca antes había tenido el canal. La Figura 58 muestra algunas fotografías. Aunque no se dispone de datos para el cálculo de los flujos inmediatamente después del dragado, el volumen total del canal con la batimetría después del dragado se incrementó en un 9%.

En el verano de 2021 se produjo la segunda mortandad masiva de peces en el Mar Menor con un total de más de 4 Tm recogidas. El episodio se produjo en el arco sur del Mar Menor, entre la Isla del Ciervo y la Punta de Lengua de Vaca (Figura 59).

Una de las propuestas que surgieron tras la observación de imágenes aéreas en que se veía una mancha de agua en descomposición enfilando el canal con corriente de salida fue la de aumentar ligeramente su sección transversal con el fin de incrementar temporalmente el intercambio de agua y favorecer así la renovación de la zona afectada por la anoxia.

Para estudiar el alcance y los posibles efectos que pudieran derivarse de diferentes escenarios de modificaciones de la batimetría del canal se han realizado simulaciones numéricas sobre las fechas del episodio de anoxia.

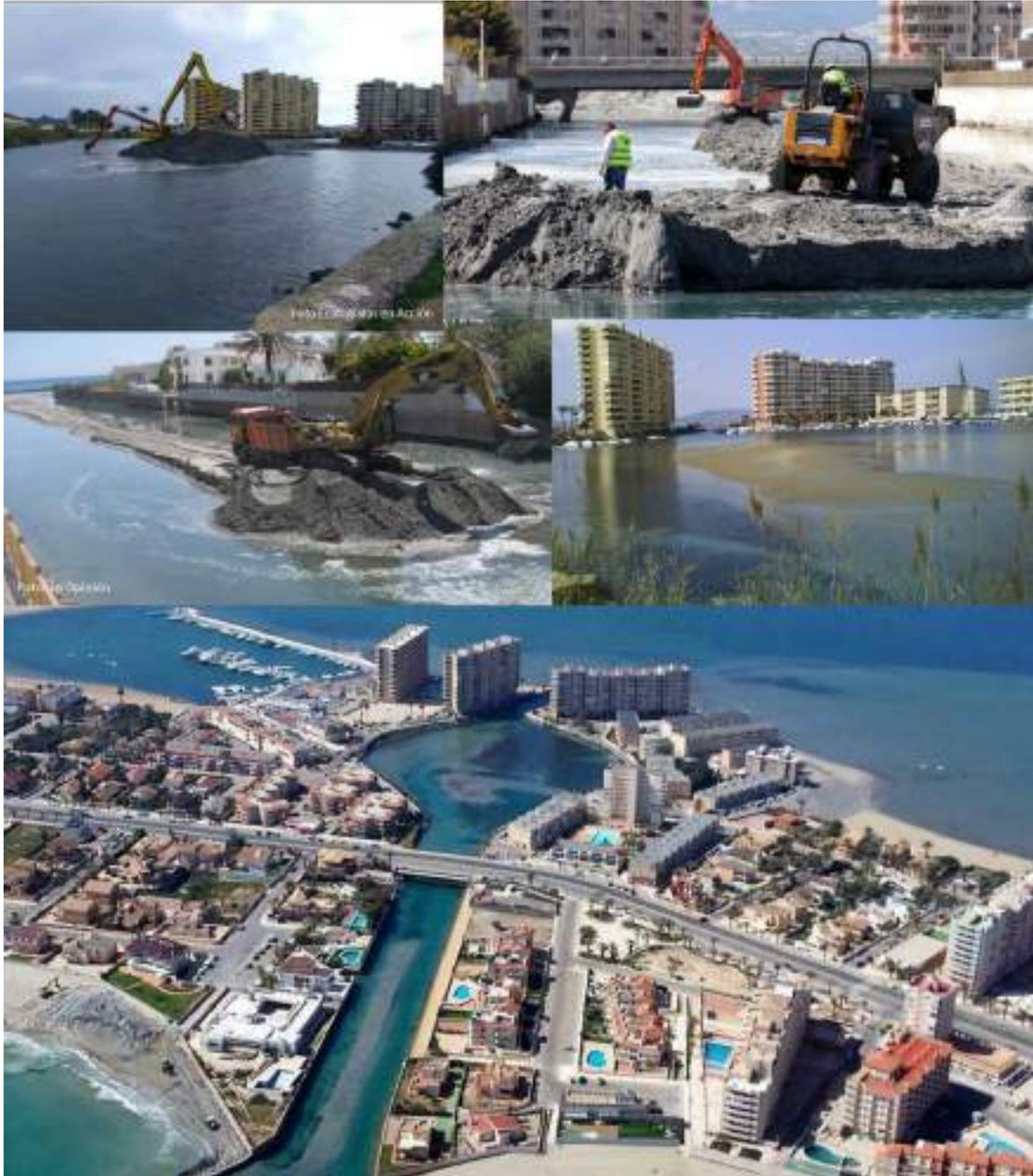


Figura 59. Dragado del canal de Marchamalo en 2017.



Figura 60. Área afectada por el episodio de anoxia de 2021.

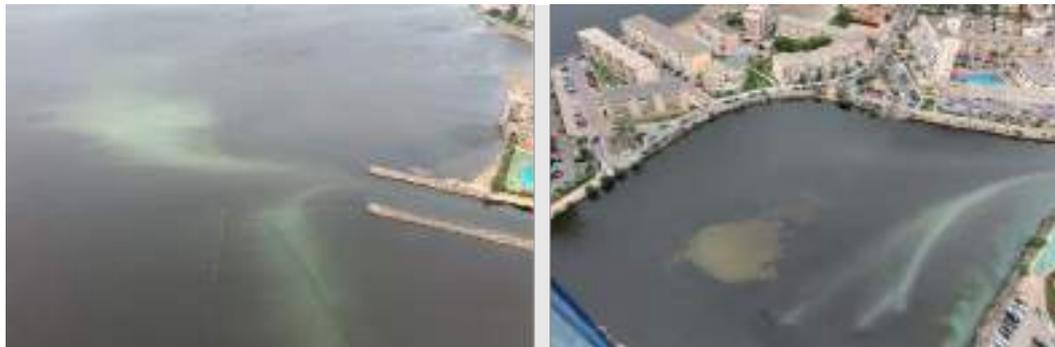


Figura 61. Imágenes aéreas de la mancha de agua en putrefacción observada el verano de 2021 enfilando la salida por el Canal de Marchamalo.

Medidas de gestión como estas deben evaluarse con detenimiento y sobre datos que aporten información relevante sobre las posibles consecuencias no deseadas que pudieran derivarse alterando los sutiles equilibrios que configuran la propia naturaleza del Mar Menor. Desde diferentes estamentos se han vertido opiniones a favor y en contra de este tipo de medidas, en ocasiones sin disponer de datos que indiquen el potencial alcance e impacto. Aquí se pretende obtener simulaciones numéricas para mostrar el alcance, tanto en flujos en el canal

como en la distribución espacial del agua de entrada y de salida para proporcionar información adicional para la posible consideración de este tipo de medidas.

3.2.1. VALORES UTILIZADOS COMO CONDICIONES DE CONTORNO E INICIALES EN EL MODELO

En la sección de metodología se ha descrito la implementación del modelo ROMS para el Mar Menor. A su vez, en el apartado 3.1. - Flujos de intercambio mar menor-mediterráneo 2021 - de este capítulo de resultados, se han descrito las variables atmosféricas que se han utilizado en las simulaciones numéricas. Se indican en este apartado las series de variables utilizadas para las simulaciones, es decir desde el 1/8/2021 al 27/10/2021.

Las condiciones de contorno para la presión atmosférica se han obtenido de la estación meteorológica de San Javier (AEMET). La Figura 61 muestra la serie temporal. El valor medio fue de 1016.20 mb (DE = 3.58) con un rango entre el máximo (1027.09 mb) y el mínimo (1005.07 mb) de 22.01 mb. Se puede observar un descenso brusco de la presión del 30/09/2021 al 3/10/2021, con una variación de casi 20 mb en 4 días.

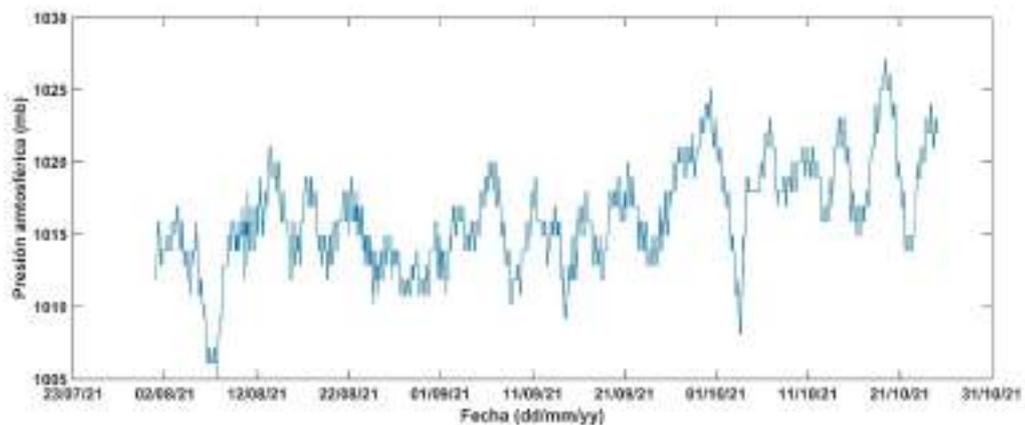


Figura 62. Presión atmosférica registrada durante el periodo simulado.

La Figura 64 muestra la serie temporal de temperatura del aire utilizada como condición de contorno y obtenida de la estación de San Javier con una media de 24.5°C (DE = 4.02 °C) y un rango de 24.5°C entre sus valores máximo (37°C) y mínimo (13°C)

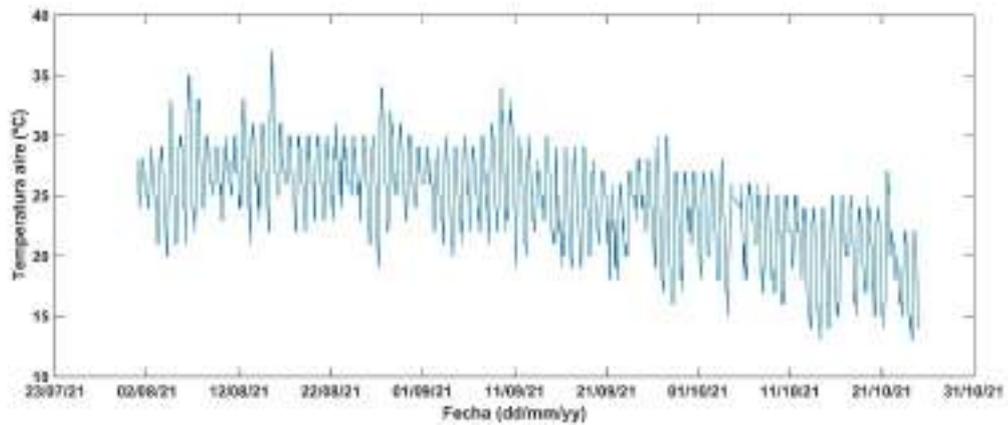


Figura 63. Temperatura del aire registrada en el periodo simulado.

En cuanto a las precipitaciones se registró un valor máximo de 43.3 mm/m² el 20 de septiembre de 2021.

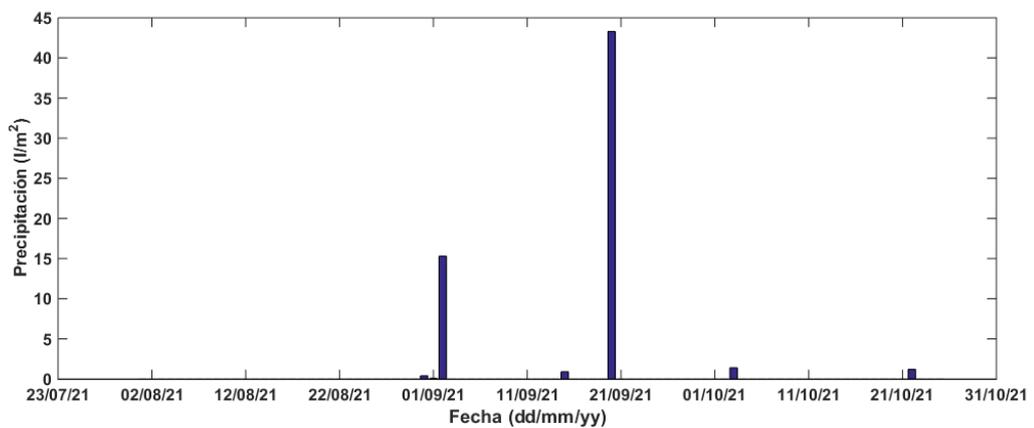


Figura 64. Precipitaciones en el periodo simulado.

La humedad relativa se obtuvo también de la estación de la AEMET situada en aeropuerto de San Javier presentando una media de 73.3 (DE = 13.5) (Figura 66).

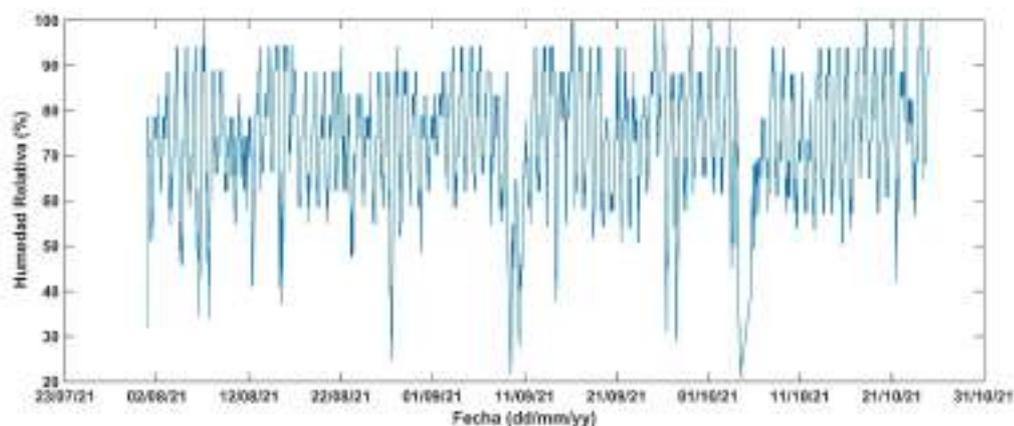


Figura 65. Humedad relativa registrada en el periodo simulado.

En cuanto a la velocidad del viento se obtuvieron los datos de la estación de la AEMET situada en San Javier. El valor medio fue de 3.3 m/s ($DE = 1.8$) con una velocidad máxima de 13.3 m/s. Se puede observar que en el periodo que abarca desde el 21/09/2021 hasta el 24/09/2021 un 11% de los datos registrados superan el valor de 6 m/s, con episodios continuados de vientos superiores a los 8 m/s sin llegar a bajar de los 4 m/s durante esos episodios (Figura 67).

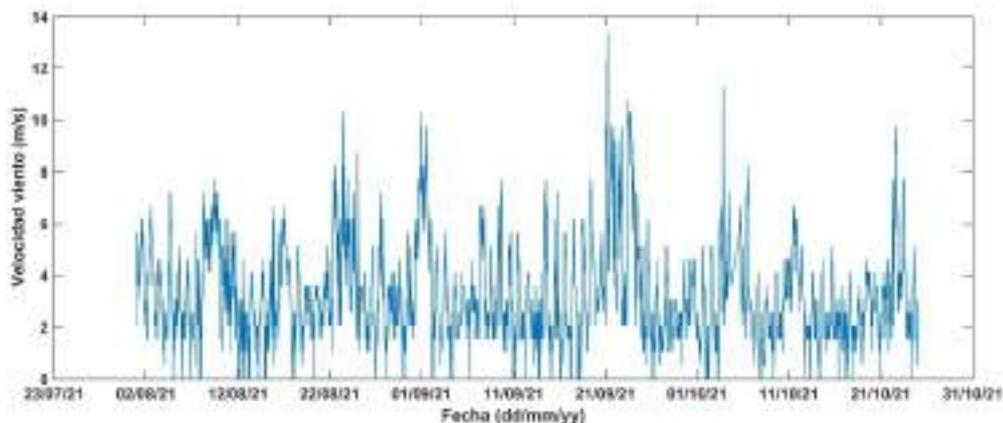


Figura 66. Velocidad del viento registrada en el periodo simulado.

En cuanto a la elevación del nivel del mar se realizó una comparación entre los valores registrados por el sensor de San Pedro del Pinatar y los proporcionados por el modelo IBI-MFC

(Figura 68). El coeficiente de correlación r fue de 0.84 ($SD = 1.4$; $RMS = 0.03$ y $RMS (\%) = 13.6$). Su utilizó la serie procedente del modelo IBI-MFC.

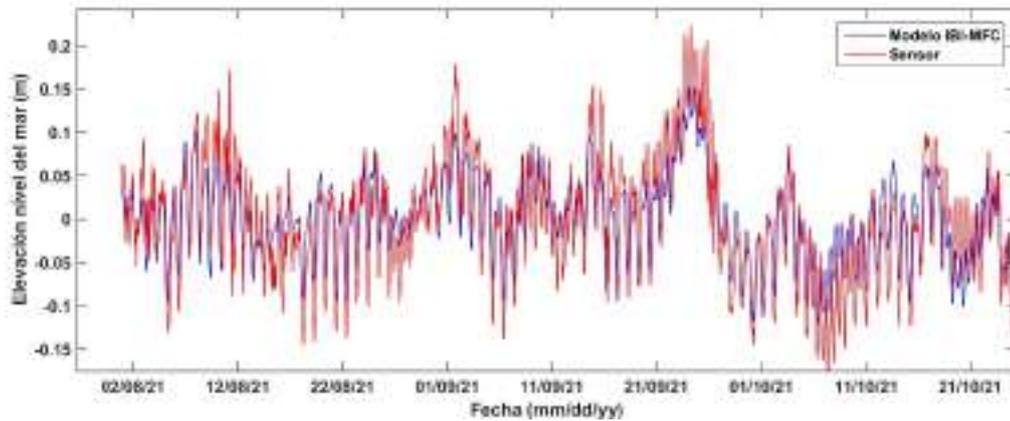


Figura 67. Elevaciones del nivel del mar Mediterráneo procedentes del modelo IBI-MFC (azul) y San Pedro (rojo).

También del modelo IBI-MFC se obtuvieron las corrientes barotrópicas (Figura 69). Se observa que el episodio que provocó la mayor corriente barotrópica de entrada al Mar Menor el 20/9/2021 fue provocado por un cambio brusco en el nivel del mar con fuertes vientos y precipitaciones.

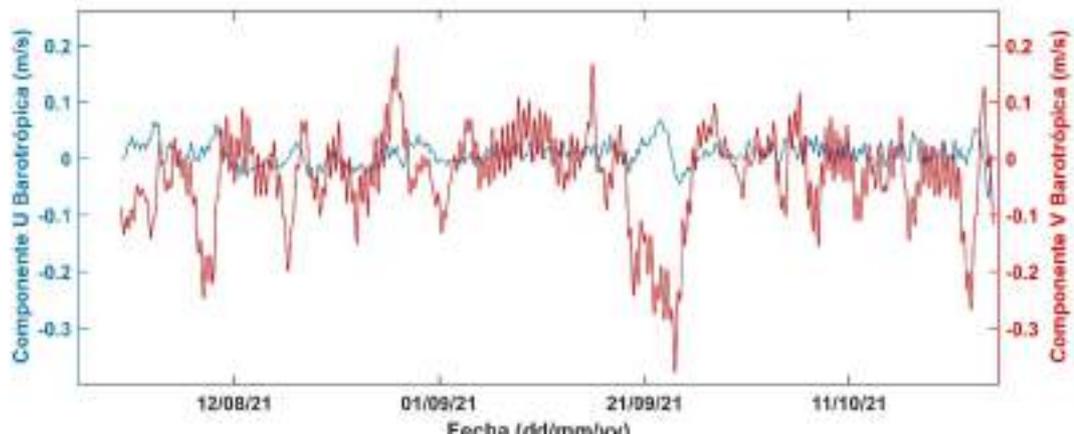


Figura 68. Componentes U_{bar} y V_{bar} utilizados en los contornos provenientes del modelo IBI-MFC.

3.2.2. ESCENARIOS SIMULADOS

Con el objetivo de abarcar diferentes posibles situaciones se ha trabajado con batimetrías de 6 escenarios que se resumen en la Tabla 12 y muestran en la Figura 70.

Tabla 12. Escenarios simulados para Marchamalo.

ESCENARIO 1	Batimetría actual
ESCENARIO 2	Canal navegable de 2 metros de profundidad situado en la zona Norte del canal. El resto se mantiene como el Escenario 1
ESCENARIO 3	Batimetría homogénea de 1.5 metros
ESCENARIO 4	Batimetría homogénea de 2.5 metros
ESCENARIO 5	Batimetría homogénea de 4 metros
ESCENARIO 6	Canal cerrado

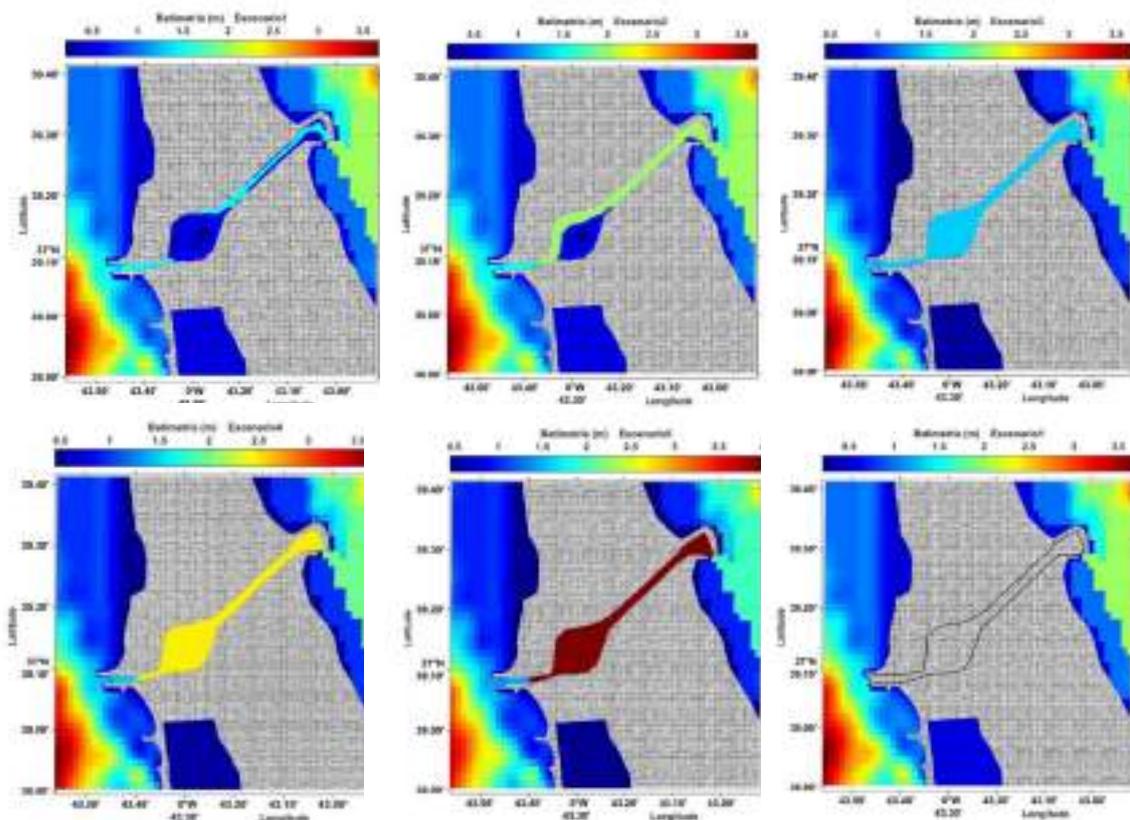


Figura 69. Batimetría de escenarios simulados.

El periodo simulado abarca desde el 1/08/2021 hasta el 25/10/2021. Los resultados se muestran mediante la diferencia entre escenarios: comparación del escenario simulado respecto a la batimetría actual (Escenario 1).

El modelo se ha configurado para generar una salida de datos cada seis horas, pero se han establecido una serie de puntos de control (Figura 71) que proporcionan información cada minuto de los valores calculados. Estas series de datos de alta frecuencia permiten visualizar cambios a muy corto plazo de la evolución de los parámetros. Se han establecido tres puntos en la parte sur de la Isla del Barón (P1 a P3), un punto en una zona cercana al canal de Marchamalo en el interior de la laguna (P4), cuatro puntos en el Mediterráneo entre Cabo de Palos, las Islas Hormigas y el canal de Marchamalo (P5 a P8) y dos puntos en zonas someras de influencia del canal en el interior (P9 y P10). Con las tres primeras (P1 a P3) se pretende analizar la posible influencia que tendrían los diferentes escenarios en una zona de campo de *Pinna nobilis* como es la Isla del Barón. El punto 4 (P4) es representativo de la zona más confiada de la cubeta sur del Mar Menor, y los cuatro últimos puntos (P5 a P8) la influencia sobre la reserva marina de Cabo de Palos – Islas Hormigas.



Figura 70. Puntos de control establecidos en el modelo.



Para dilucidar la extensión y el efecto de los distintos escenarios sobre la salinidad en el fondo se analizan los mapas de diferencias entre escenarios tanto en el interior del Mar Menor como en el Mediterráneo. Para ellos se elaboran mapas y se analizan series temporales en los puntos de control correspondientes.

3.2.2.1. Influencia en las Tasas de Renovación del Agua en el Mar Menor.

Para analizar el posible efecto de los diferentes escenarios sobre la tasa de renovación del agua en la zona sur del Mar Menor, y en qué medida hubiera podido afectar cada escenario a la renovación del agua disminuyendo la anoxia ocurrida en el verano de 2021, se ha utilizado como indicador la capa de fondo que sería la de menor renovación y que sería la más afectada por la influencia del sedimento y concentración de materia orgánica. Se ha computado el porcentaje de agua Mediterránea en la capa del fondo al final de los 3 meses de simulación para cada escenario y se ha comparado con la situación actual. Este valor proporciona una idea del porcentaje de agua se habría renovado en ese periodo de tiempo en esa capa. Un valor de un incremento por ejemplo del 10% en la diferencia entre Escenario 2 y Escenario 1 significa que se habría incrementado en un 10% la cantidad de agua del Mar Mediterráneo que hubiera llegado a esa zona, es decir, se hubiera renovado un 10%.

La Figura 72 muestra los mapas de diferencia en porcentaje de renovación en la capa de fondo con respecto al Escenario 1 (batimetría de 2021) de los Escenarios 2 a 5. Los valores por debajo del 1% se han eliminado de los gráficos para facilitar su lectura. Hay que tener en cuenta que cada uno de los gráficos de la figura tiene una escala diferente. Se han representado así para visualizar la heterogeneidad espacial. La comparación entre los distintos mapas no es directa y no puede basarse en las barras de color de los mapas (por ejemplo, el color rojo del mapa Escenario 5 – Escenario 1 indica un valor de renovación de 25%, mientras que en otro mapa puede significar otro porcentaje diferente. En el mapa Escenario 6 – Escenario 1 se muestran valores negativos. Un valor de -5% indica que el agua se renovarían un 5% menos).

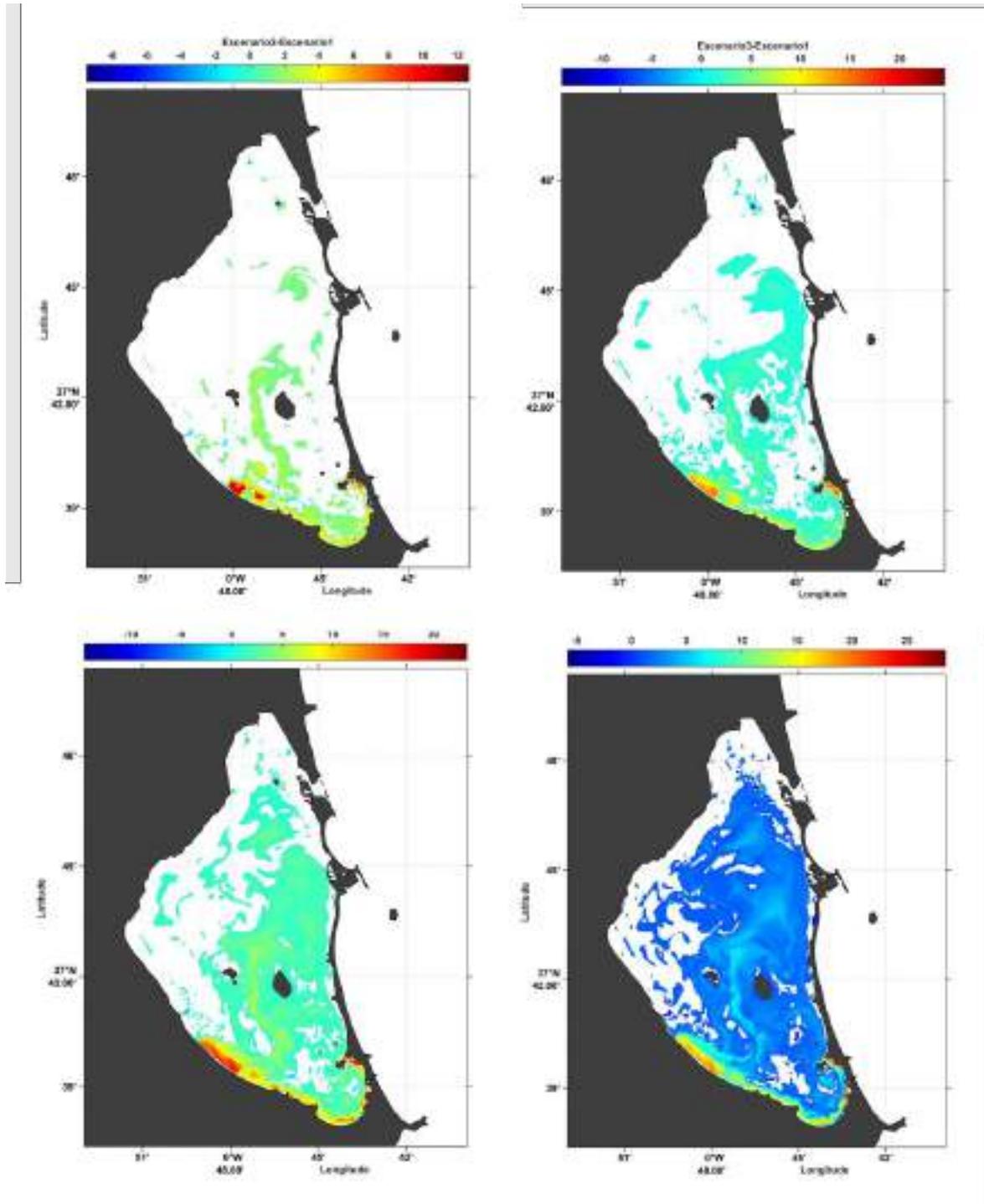


Figura 71. Variación de las tasas de renovación en el fondo entre cada uno de los escenarios y la situación actual (Escenario1).



Los mapas muestran que, en la capa de fondo, el agua que entra del Mediterráneo alcanza una franja por el fondo pegada a la costa tanto en dirección norte como sur. El ramal norte tiene una mayor influencia hasta la Isla del Ciervo, zona por lo general muy somera, donde queda mayormente embalsada. En el ramal sur sigue bordeando la línea de costa hacia el noroeste sin llegar hasta Los Urrutias. Este es el motivo por el cual las playas comprendidas entre la Isla del Ciervo y la punta de Lengua de Vaca disponen habitualmente de aguas más limpias.

La explicación de por qué se encuentra una mayor renovación en una zona tan alejada del canal, habría que encontrarla en el efecto de la corriente pegada a la línea de costa en dirección norte-sur que al chocar con el ramal de agua que sube por la línea de costa impide que se propague hasta la zona de Los Nietos y Los Urrutias, quedando frenada y en parte embalsada y por tanto incrementando el porcentaje de influencia de agua mediterránea procedente del canal de Marchamalo.

También se observa que el agua mediterránea se adentra hacia el norte a través del canal entre las islas Perdiguera y del Barón, de forma que cuanto mayor sea el porcentaje de mezcla de agua de mediterránea (aumento de caudal en Marchamalo) se va dispersando hacia el Este viéndose forzada por la corriente pegada a la costa Oeste desde el Norte. La corriente del canal entre islas puede originarse por la contracorriente de fondo con vientos de componente norte.

La Figura 73 muestra el mapa de diferencia con en el Escenario 6. La zona de influencia parece ser similar a la del Escenario 3, aunque inversa.

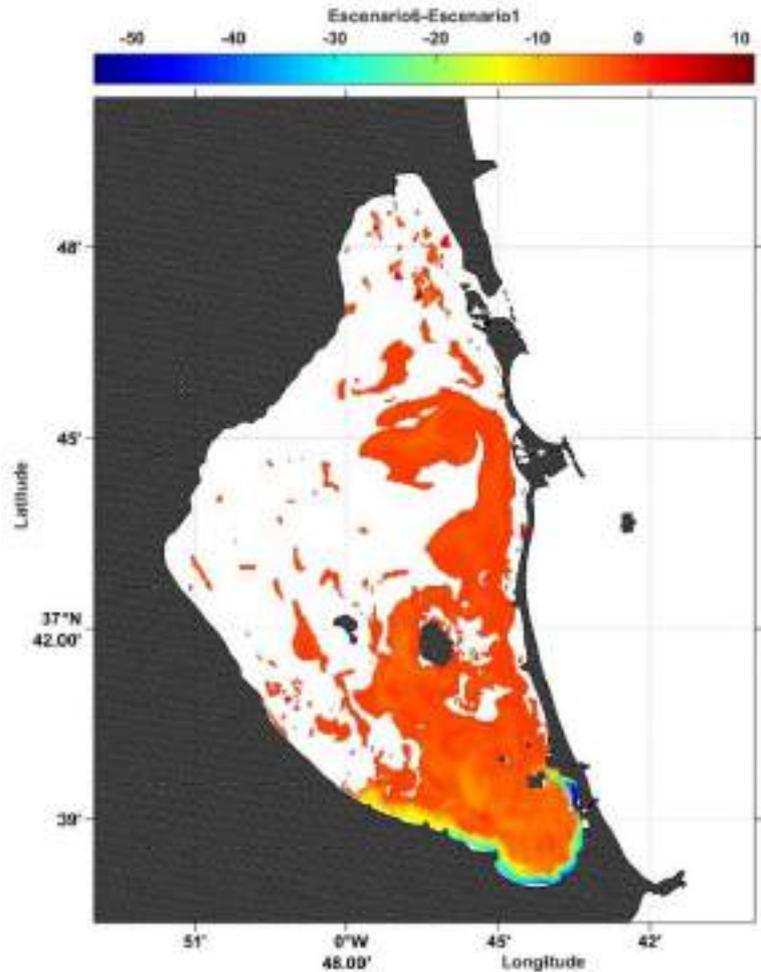


Figura 72. Mapa de diferencia de porcentaje de renovación en el fondo en el Escenario 6.

En la capa de superficie se aprecian patrones similares, aunque con mayor porcentaje, como es propio de aguas menos saladas que se desplazan por con mayor facilidad por la superficie como muestra la Figura 74.

Igualmente, la Figura 75 muestra el mapa de diferencia con en el Escenario 6 en la capa superficial.

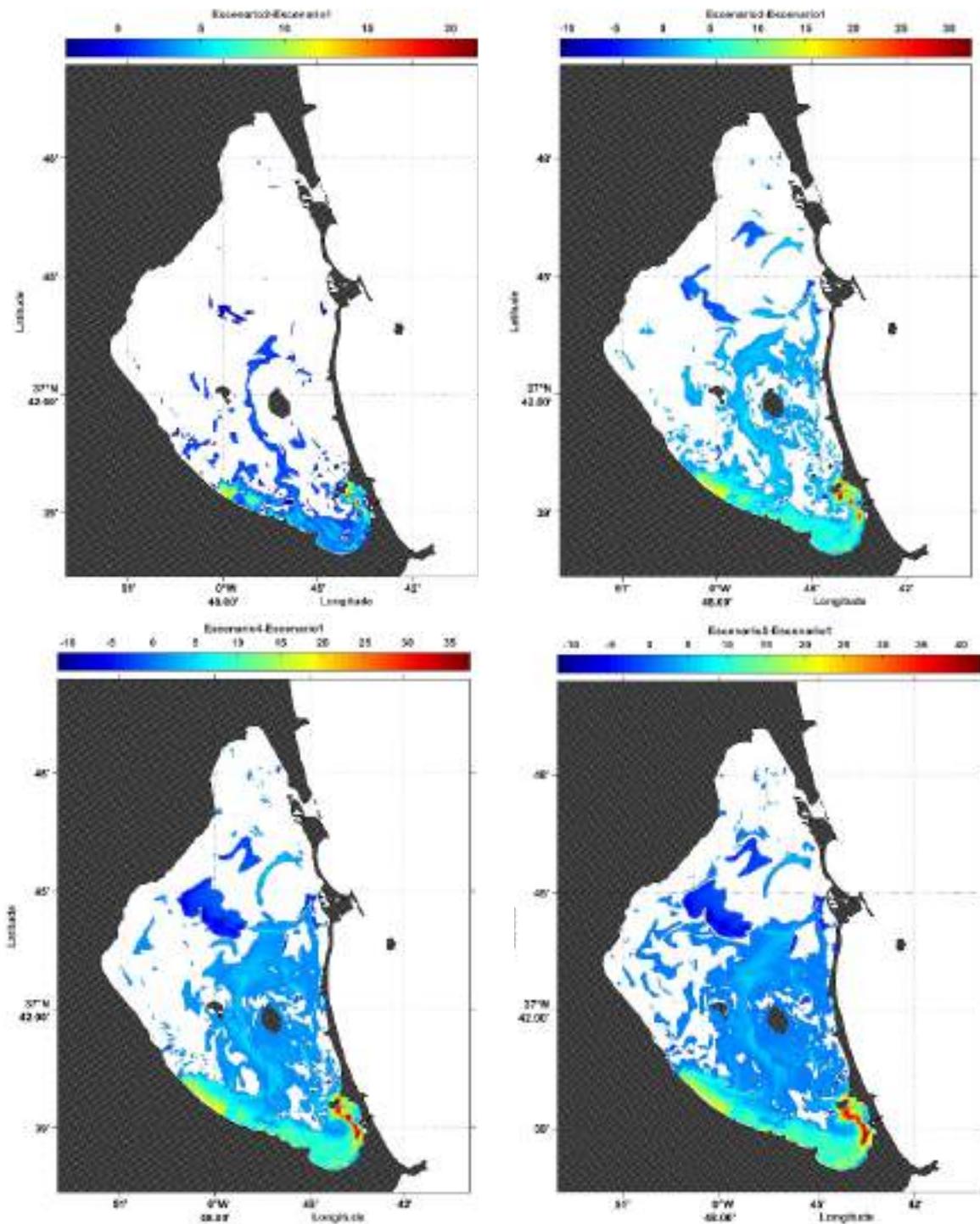


Figura 73. Variación de las tasas de renovación en superficie entre cada uno de los escenarios y la situación actual (Escenario1).

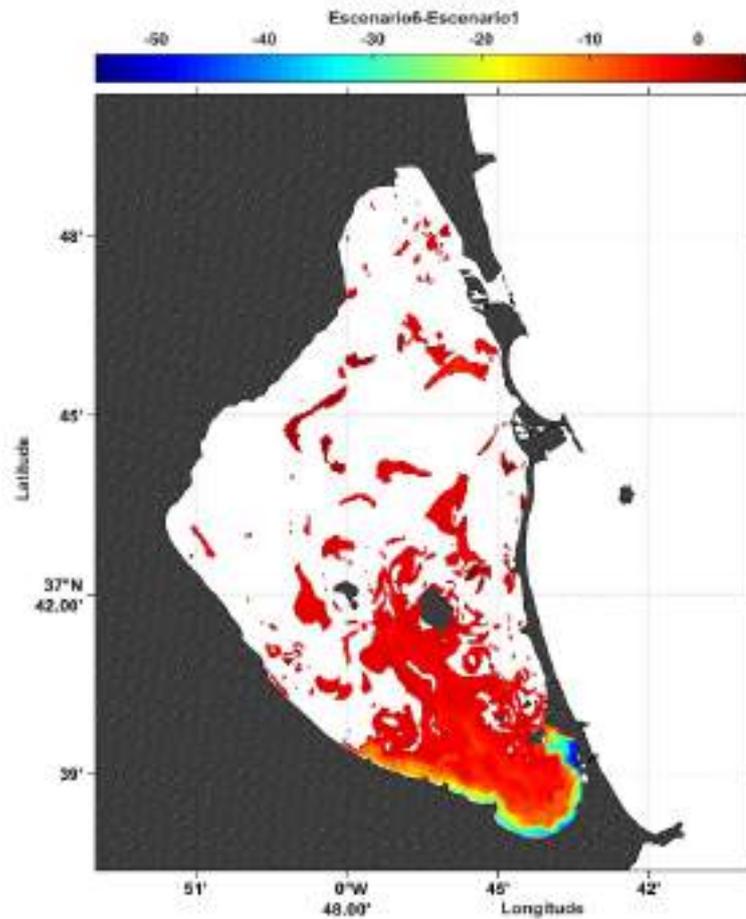


Figura 74. Mapa de diferencia de porcentaje de renovación en el fondo en el Escenario 6 en superficie.

La evolución temporal del porcentaje de renovación en el punto de control P4 en la capa de fondo se muestra en la Figura 76, con los valores indicados en la Tabla 13. Con respecto a la capa de fondo se muestra, por lo general, un mayor efecto de la situación actual sobre el escenario de canal cerrado (Escenario 6) donde se superan valores medios de -3.3%, cuando el resto de los escenarios oscila entre 0.5% y 1.5%. En situaciones puntuales se supera el umbral del 10% en episodios de muy corta duración, únicamente en los Escenarios 3 a 5.

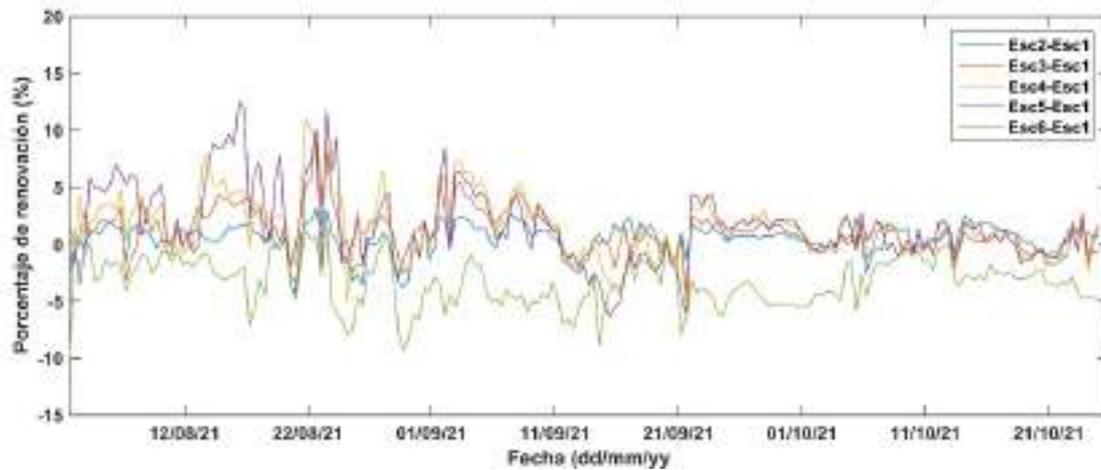


Figura 75. Evolución temporal de la variación en el porcentaje de renovación en el punto de control P4 en la capa de fondo para cada escenario.

Tabla 13. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en el fondo para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P4.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	DE
Esc2-Esc1	-4.29	3.16	7.45	0.522	1.28
Esc3-Esc1	-4.23	10.14	14.37	1.04	2.02
Esc4-Esc1	-5.81	11.01	16.83	1.50	2.68
Esc5-Esc1	-6.38	12.49	18.88	1.59	3.37
Esc6-Esc1	-9.29	2.05	11.35	-3.30	2.07

Igualmente, la Figura 77 y la Tabla 14 muestran la variación en el tiempo de las diferencias en la capa de superficie.

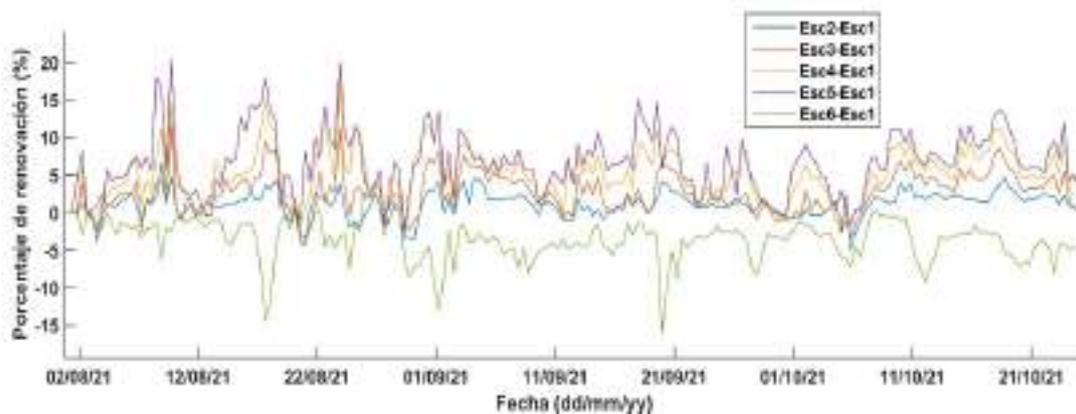


Figura 76. Evolución temporal del porcentaje de renovación en el punto de control P4 en la capa de superficie.

Tabla 14. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en superficie para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P4.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	DE
Esc2-Esc1	-5.01	6.68	11.69	1.16	1.71
Esc3-Esc1	-3.28	11.78	15.06	2.73	2.63
Esc4-Esc1	-2.33	17.27	19.60	5.20	3.45
Esc5-Esc1	-3.80	20.61	24.41	6.73	4.27
Esc6-Esc1	-15.90	2.92	18.83	-3.62	2.76

Finalmente, la Figura 78 y la Tabla 15 muestran la variación en el tiempo de las diferencias integrando para toda la columna de agua. Las variaciones promedio hubieran oscilado entre 0.8 y 4 en los Escenarios 2 a 5 respectivamente y en el Escenario 6 de -3.4%. Las mayores oscilaciones se hubieran producido en el mes de agosto.

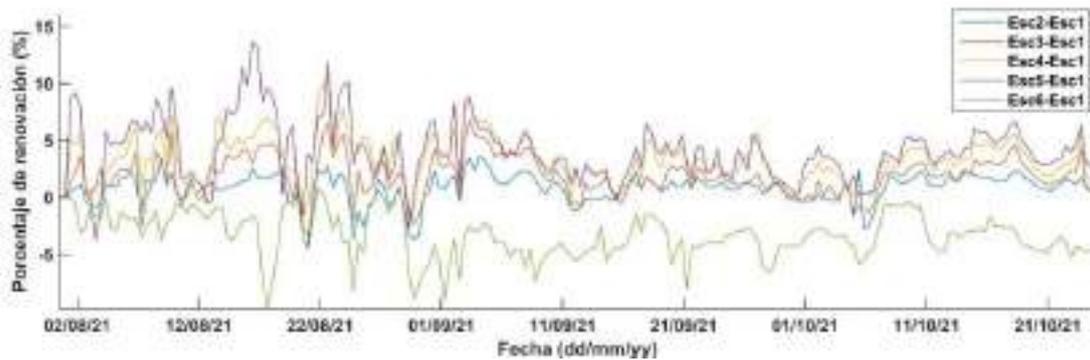


Figura 77. Evolución temporal del porcentaje de renovación en el punto de control P4 en toda la columna de agua.

Tabla 15. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en la columna de agua para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P4.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	DE
Esc2-Esc1	-4.31	3.60	7.92	0.83	1.31
Esc3-Esc1	-3.31	6.82	10.13	1.87	1.78
Esc4-Esc1	-2.44	10.70	13.15	3.32	2.08
Esc5-Esc1	-3.75	13.70	17.45	4.07	2.67
Esc6-Esc1	-9.73	1.08	10.82	-3.40	1.97

Comparando las capas de fondo y superficie se observa un mayor porcentaje de cambio en superficie en todos los escenarios (exceptuando el 6), con valores intermedios en la integración para la columna de agua. En cambio, en el Escenario 6, no se observa diferencias

significativas entre superficie, fondo o la integración de toda la columna de agua. Tal y cómo era de esperar las variaciones de la renovación más altas se encontrarían con el Escenario 5 pudiendo alcanzar valores máximos de 13.7%, oscilando el máximo de variación entre los 3.6% (Escenario 2) y el 13.7% comentado. Así mismo podemos observar cómo el escenario de cierre del canal de Marchamalo supondría una disminución de la tasa de renovación con un valor medio de un 3.4%.

Los valores obtenidos para la superficie y fondo presentan diferencias, dándose los mayores valores de variación en superficie. Esto es debido a que el agua entrante por Marchamalo, menos densa, tiende a discurrir por la superficie siendo más difícil llegar a las capas profundas, y requiriendo de una mezcla vertical en la columna de agua.

En el punto P9 (Figura 79), situado en Playa Honda con 1 m de profundidad, donde hay un mayor porcentaje de mezcla que en el punto P4, los valores están por debajo del 20% la mayor parte del tiempo, con dos episodios cortos que superarían el 40% en los Escenarios 4 y 5 en la capa de fondo. La Tabla 16 muestra la comparativa de algunos valores de la serie.

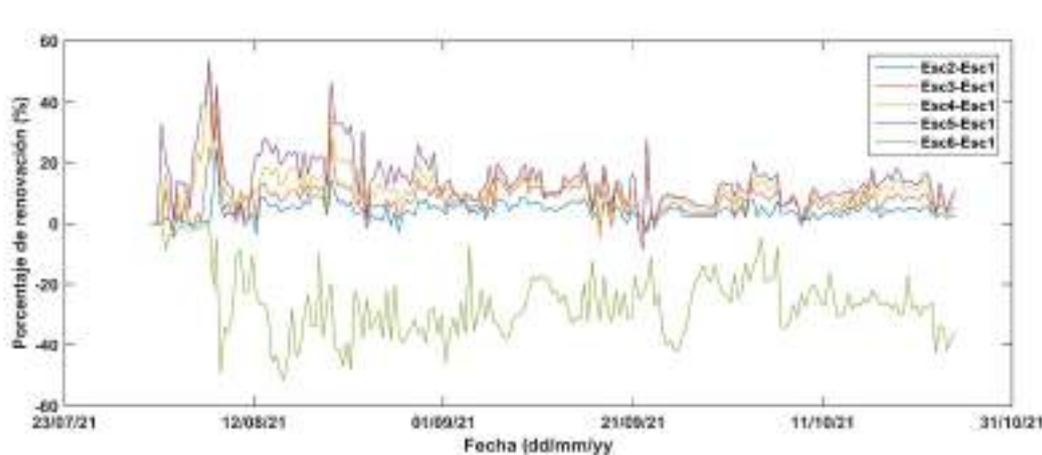


Figura 78. Variación en el porcentaje de agua renovada para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P9 en la capa de fondo.

Tabla 16. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en el fondo para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P9.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación
Esc2-Esc1	-3.56	24.66	28.22	4.36	3.01
Esc3-Esc1	-4.55	36.57	41.13	7.91	4.80
Esc4-Esc1	-3.74	48.98	52.72	11.20	6.51
Esc5-Esc1	-8.54	54.04	62.58	14.33	8.56
Esc6-Esc1	-51.58	-0.468	51.11	-26.61	10.61

De igual modo, la Figura 80 y Tabla 17 muestran los valores para la capa de superficie en el punto P9.

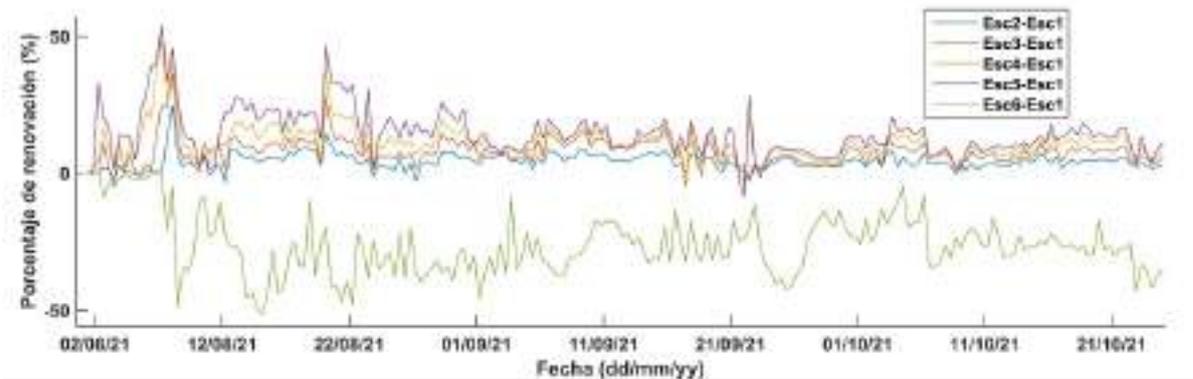


Figura 79. Variación en el porcentaje de agua renovada para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P9 en superficie.

Tabla 17. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en superficie para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P9.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación
Esc2-Esc1	-3.56	24.66	28.22	4.40	3.04
Esc3-Esc1	-4.55	36.57	41.13	7.96	4.86
Esc4-Esc1	-3.74	48.98	52.72	11.28	6.59
Esc5-Esc1	-8.54	54.04	62.58	14.41	8.64
Esc6-Esc1	-51.58	-0.468	51.11	-26.72	10.63

Y finalmente, la Figura 81 y Tabla 18 muestran los valores para la integración en toda la columna de agua en el punto P9.

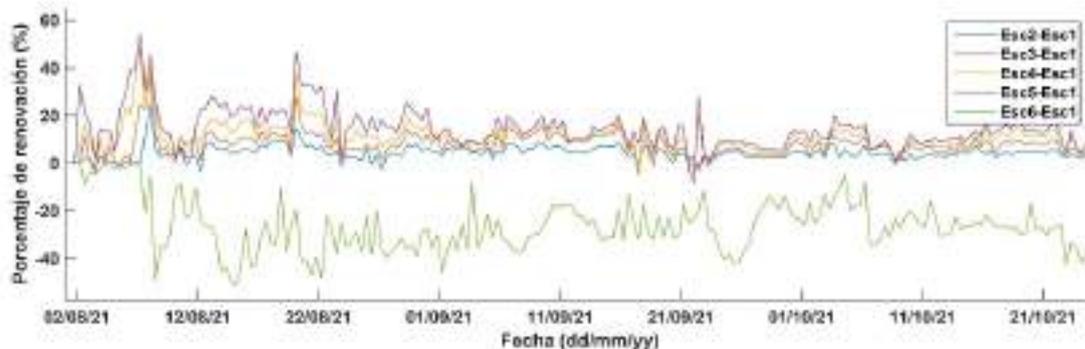


Figura 80. Variación en el porcentaje de agua renovada para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P9 en la columna de agua.

Tabla 18. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en la columna de agua para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P9.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación
Esc2-Esc1	-3.56	24.66	28.22	4.38	3.02
Esc3-Esc1	-4.55	36.57	41.13	7.94	4.83
Esc4-Esc1	-3.74	48.98	52.72	11.24	6.54
Esc5-Esc1	-8.54	54.04	62.58	14.37	8.59
Esc6-Esc1	-51.58	-0.46	51.11	-26.67	10.61

Se puede observar claramente que habría una gran diferencia entre el Escenario 5, con un importante dragado, frente al cierre completo del canal ya que pasaría de incrementarse la renovación en un 54% a disminuir en un 51% en el caso de la colmatación completa del canal. Los Escenarios 2 y 3 presentan valores medios de renovación similares en torno al 4 y 7%, mientras que los Escenarios 4 y 5 presentan valores medios mayores de un 10% de media.

En el caso del punto P9, ubicado en una zona de menor profundidad y mayor influencia del agua entrante, los valores de superficie y fondo presentan pequeñas diferencias. Esto es debido a la homogenización de la columna de agua debido a los procesos de mezcla que se dan en las zonas más someras.

Los mismos valores se muestran para el punto P10, frente a Lo Pollo. La Figura 82 y Tabla 19 muestran los valores para la capa de fondo.

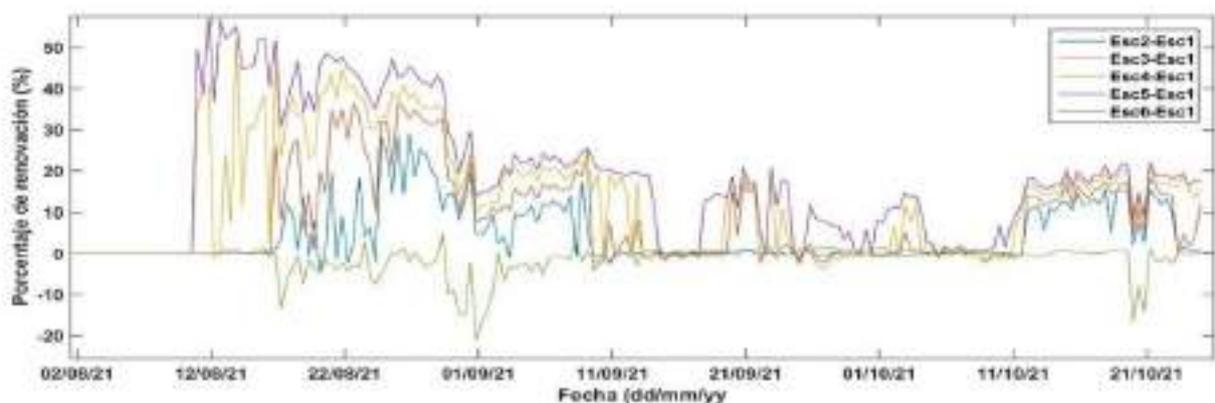


Figura 81. Variación en el porcentaje de agua renovada para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P10 en la capa de fondo.

Tabla 19. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en la capa de fondo para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P9.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación
Esc2-Esc1	-4.06	29.20	33.26	4.46	7.11
Esc3-Esc1	-3.94	36.74	40.68	8.34	10.74
Esc4-Esc1	-3.52	52.00	55.52	13.70	13.95
Esc5-Esc1	-2.04	57.01	59.06	19.03	16.01
Esc6-Esc1	-21.09	4.63	25.72	-1.24	3.70

Para la capa de superficie, los valores se muestran en la Figura 83 y Tabla 20.

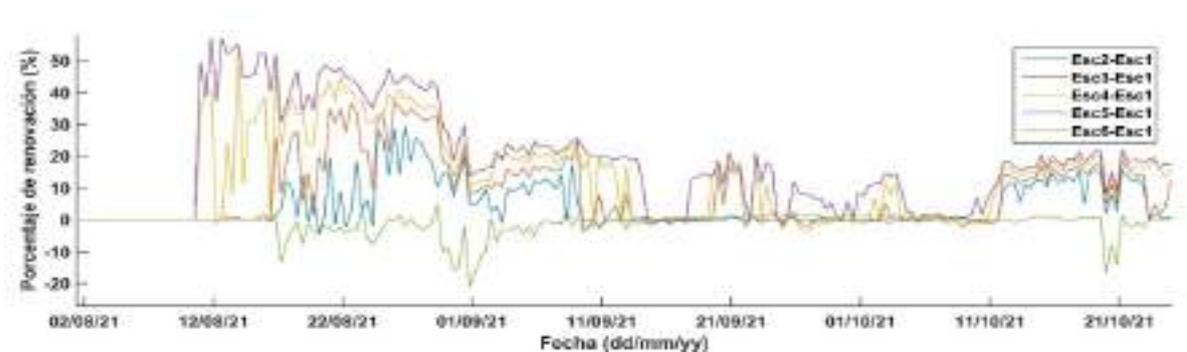


Figura 82. Variación en el porcentaje de agua renovada para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P10 en la capa de superficie.

Tabla 20. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en la capa de superficie para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P9.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación
Esc2-Esc1	-4.06	29.20	33.26	4.45	7.11
Esc3-Esc1	-3.83	36.74	40.57	8.32	10.71
Esc4-Esc1	-3.52	52.00	55.52	13.70	13.96
Esc5-Esc1	-2.04	57.07	59.12	19.03	16.01
Esc6-Esc1	-21.08	4.64	25.73	-1.22	3.68

Los valores correspondientes a la integración de la columna de agua se muestran en la Figura 84 y Tabla 21.

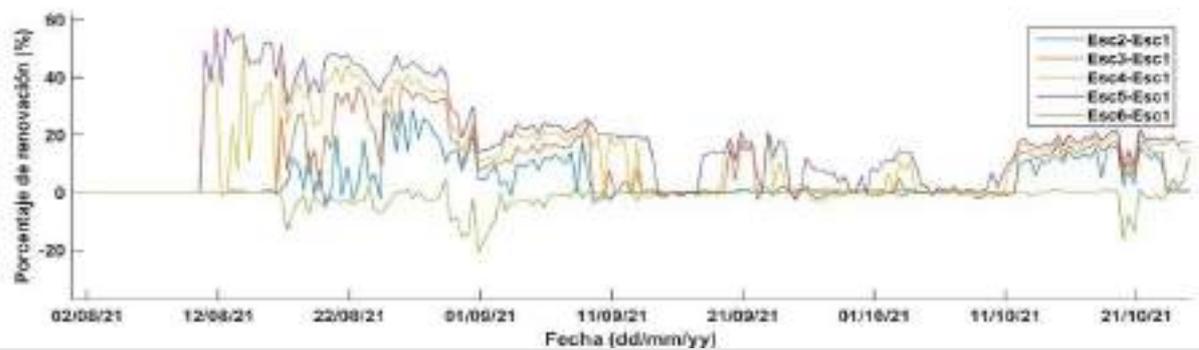


Figura 83. Variación en el porcentaje de agua renovada para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P10 en la columna de agua.

Tabla 21. Estadística básica de variación del porcentaje de agua renovada en la columna de agua para cada escenario respecto a la situación actual en el punto P10.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación
Esc2-Esc1	-4.06	29.20	33.26	4.45	7.11
Esc3-Esc1	-3.89	36.74	40.63	8.34	10.73
Esc4-Esc1	-3.52	52.00	55.52	13.70	13.95
Esc5-Esc1	-2.04	57.04	59.09	19.03	16.01
Esc6-Esc1	-21.09	4.64	25.73	-1.23	3.69

Al igual que con el punto P9, el punto P10 también se encuentra ubicado en una zona somera, lo que facilita la homogenización de la columna de agua. Este punto se encuentra más alejado de la influencia del canal de Marchamalo, llegando solo a verse afectado durante episodios puntuales de viento que empujan el agua entrante a lo largo de la costa. Es durante estos episodios en los que se dan mayores valores de variación, siendo similares a los alcanzados en el punto P9, con un máximo de un 57% en el Escenario 5, y agrupándose los Escenarios 2 y 3 en torno a valores medios entre 4% y 8%, y los Escenarios 4 y 5 entre 13% y 19%.

3.2.2.2. Influencia en las Tasas de Renovación del Agua en el Mediterráneo

Para visualizar la extensión de agua del Mar Menor que saldría al Mediterráneo en cada escenario, se han utilizado en las simulaciones trazadores pasivos. Al igual que para ver la influencia de entrada al Mar Menor se usó el episodio de mayor entrada de agua a la laguna, para ver la influencia del agua del Mar Menor sobre el Mediterráneo se utiliza aquí el episodio de máxima salida de agua a partir de los datos registrados el día 04/09/2021 (con una velocidad máxima de salida de 0.3 m/s).

La Figura 94 muestra los resultados obtenidos para el incremento del porcentaje de agua del Mar Menor hacia el Mediterráneo durante este periodo. Obsérvese que no se pueden hacer comparaciones directas entre los diferentes escenarios ya que las escalas de color varían entre ellos. Se aprecia que el alcance del agua del Mar Menor hacia el Mediterráneo puede ser ligeramente superior al 10% sólo en la zona de la bocana, en el resto del área está en torno al 10% o inferior.

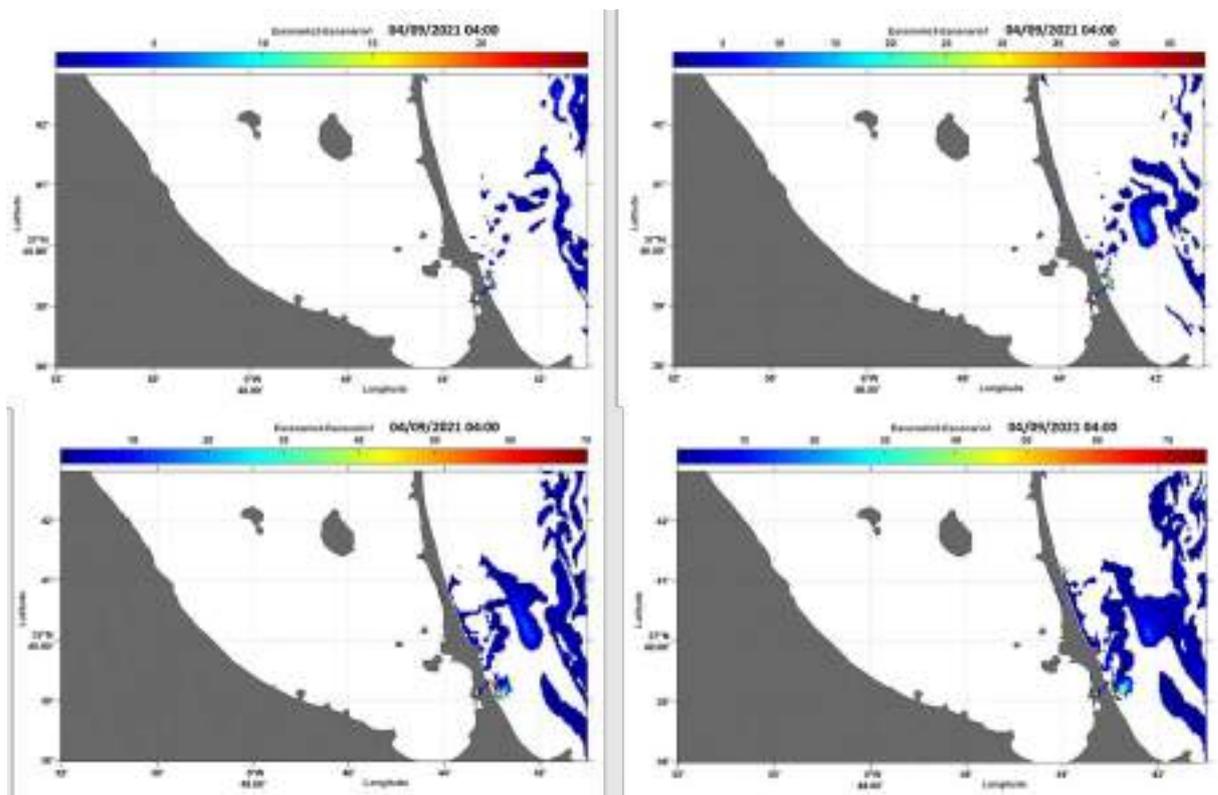


Figura 84. Incremento de del porcentaje de agua del Mar Meno en el fondo para los Escenarios 2 a 5 con respecto al 1 expresado como tanto por ciento.

Las Figura 95 a Figura 98 y Tabla 29 a Tabla 32 muestran las diferencias de salinidad del fondo en los cuatro puntos de control (P5, P6, P7 y P8) situados en el Mediterráneo.

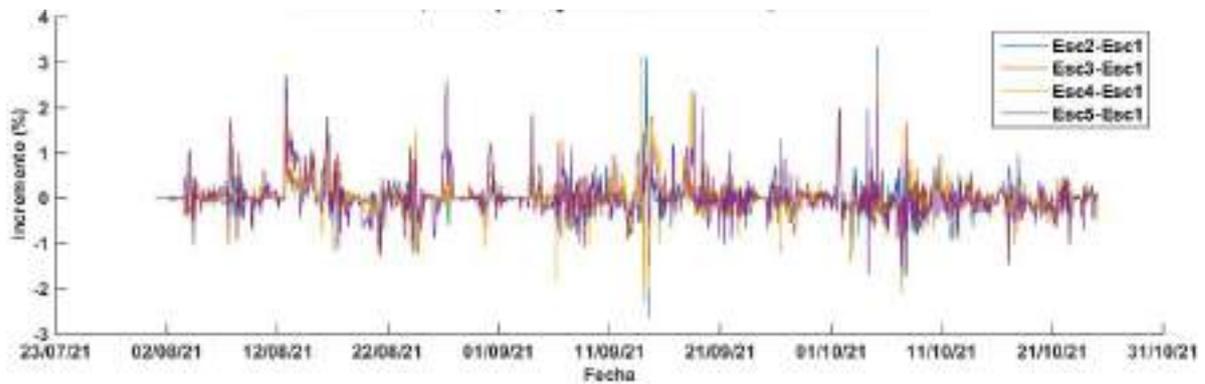


Figura 85. Variación en el porcentaje de agua del Mar Menor en el punto P5.

Tabla 22. Valores estadísticos básicos de porcentaje de agua del Mar Menor en el punto P5.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación
Esc2 -Esc 1	-2.65	3.35	6.01	0.006	0.32
Esc3 -Esc 1	-1.48	3.10	4.58	0.007	0.31
Esc4 -Esc 1	-2.31	2.97	5.28	0.02	0.39
Esc5 -Esc 1	-1.70	2.71	4.42	0.03	0.41

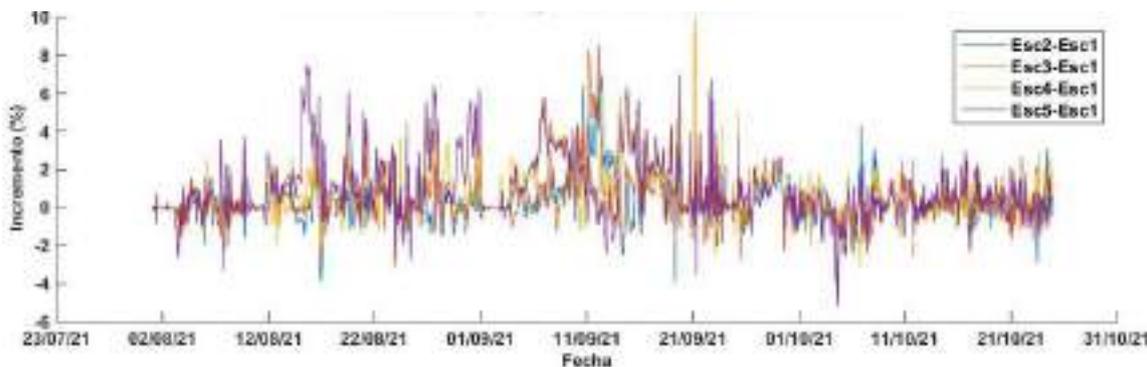


Figura 86. Variación en el porcentaje de agua del Mar Menor en el punto P6.

Tabla 23. Valores estadísticos básicos de porcentaje de agua del Mar Menor en el punto P6.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación
Esc2 -Esc 1	-3.96	7.03	11.00	0.33	1.11

Esc3 -Esc 1	-3.56	8.55	12.12	0.44	1.15
Esc4 -Esc 1	-3.05	9.94	12.99	0.77	1.38
Esc5 -Esc 1	-5.20	7.49	12.70	0.98	1.63

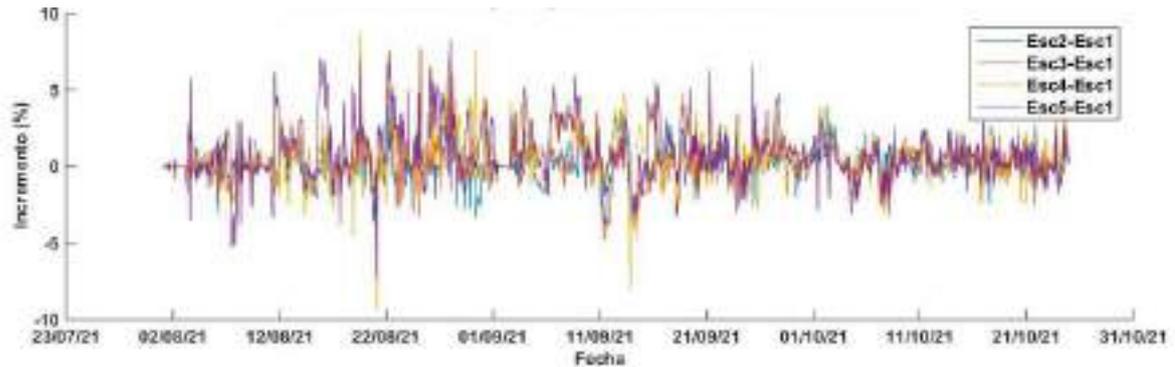


Figura 87. Variación en el porcentaje de agua del Mar Menor en el punto P7.

Tabla 24. Valores estadísticos básicos de porcentaje de agua del Mar Menor en el punto P7.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación
Esc2 -Esc 1	-5.54	5.83	11.37	0.20	1.12
Esc3 -Esc 1	-7.14	7.75	14.89	0.25	1.25
Esc4 -Esc 1	-9.38	8.84	18.23	0.77	1.65
Esc5 -Esc 1	-7.29	8.32	15.61	0.91	1.73

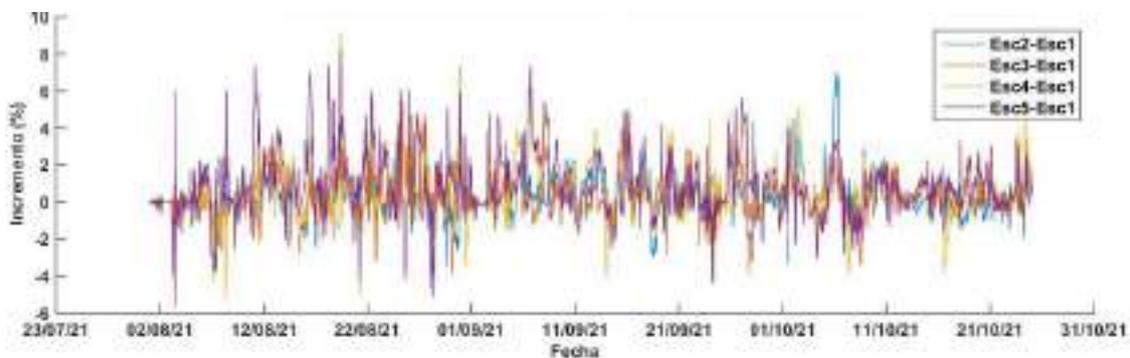


Figura 88. Variación en el porcentaje de agua del Mar Menor en el punto P8.

Tabla 25. Valores estadísticos básicos de porcentaje de agua del Mar Menor en el punto P8.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación
Esc2 -Esc 1	-4.32	7.01	11.34	0.37	1.14
Esc3 -Esc 1	-3.83	7.32	11.15	0.38	1.11
Esc4 -Esc 1	-5.17	9.17	14.35	0.70	1.48
Esc5 -Esc 1	-5.65	8.26	13.91	0.91	1.67

Los resultados muestran una gran variedad entre los puntos P5, P6, P7 y P8. Aunque separados aproximadamente unos 700 metros unos de otros, las variaciones temporales de cada uno de ellos presentan una evolución diferente. Esto es debido a la gran variabilidad horizontal de la pluma de salida del canal de Marchamalo una vez que abandona la zona cercana a la bocana (véase Figura 92), siendo el patrón de corrientes junto con la batimetría la que determina su heterogeneidad. Es el punto P6 (Tabla 30) el que registra unos mayores incrementos de porcentaje de agua del Mar Menor, oscilando entre valores de 7% para la comparativa con el Escenario 2 y 9.9% con el Escenario 5. Igualmente, es este punto el que presenta mayores valores medios: 0.33% (Escenario 2) y 0.98 % (Escenario 5). Otro de los efectos de esta variabilidad espacial es que en ciertos momentos haya puntos que reciban un menor porcentaje de agua del Mar Menor de la que reciben en el Escenario 1, pudiendo llegar a recibir un 9% menos de agua del Mar Menor en un momento puntual en el punto P7.

3.2.2.3. Influencia sobre las Corrientes en los Otros Canales

La entrada de agua por cualquiera de los canales produce gradientes horizontales en el interior de la laguna modifican los flujos en los otros canales. Para estudiar cómo pueden afectar los diferentes escenarios planteados a las corrientes en El Estacio se ha comparado la velocidad registrada en este canal con las diferencias de velocidades entre escenarios (Figura 85). En el panel inferior de la Figura se muestra la velocidad de corriente en el canal de El Estacio. En la parte superior las diferencias con respecto a la velocidad registrada de El Estacio, es decir con el Escenario 1 de Marchamalo, de forma que cada línea representa la diferencia de velocidad de la corriente simulada menso la corriente registrada también en El Estacio, para cada escenario de Marchamalo.

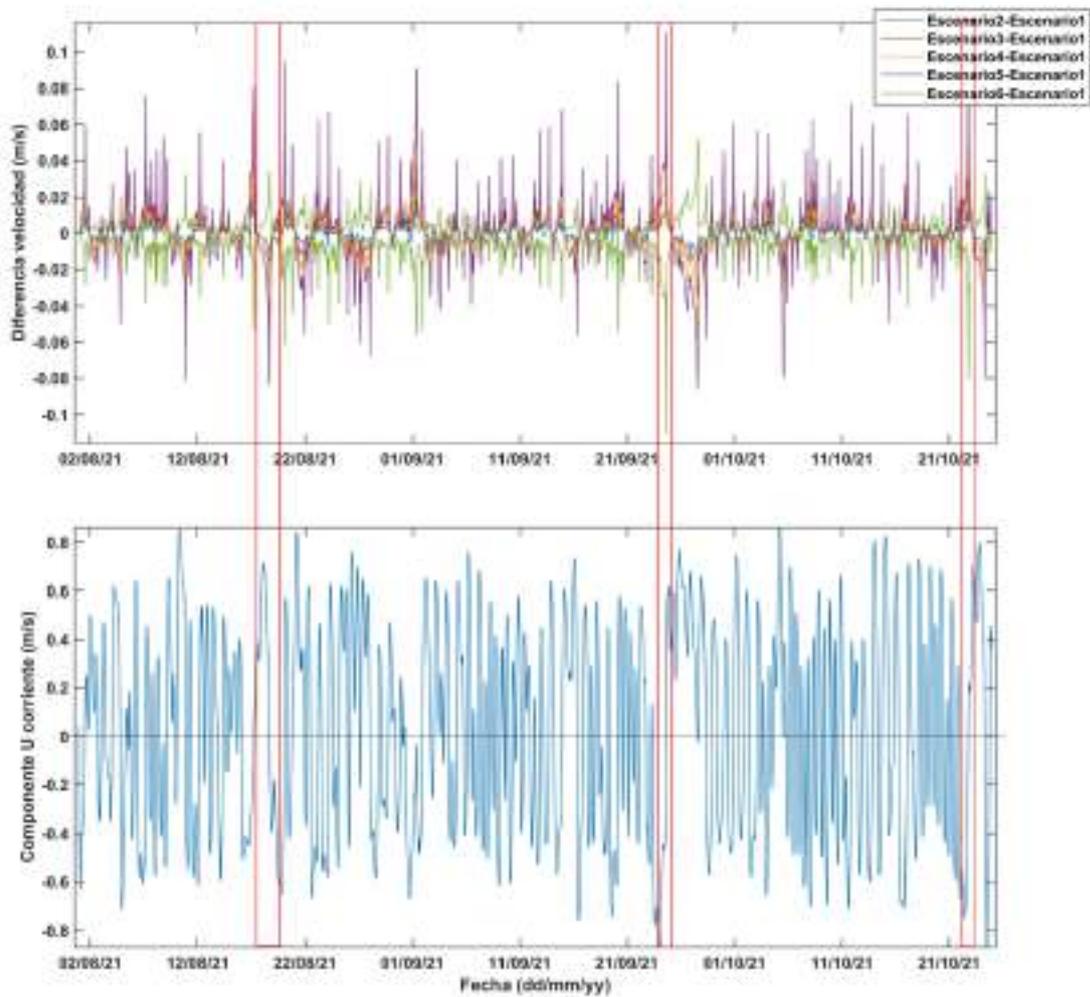


Figura 89. Superior, variación de la corriente entre escenarios. Inferior, corriente obtenida en el canal de El Estacio.

Los resultados muestran cómo, en las situaciones de aumento del caudal en Marchamalo, se produce una disminución en la velocidad de la corriente en El Estacio. Se aprecia cómo en el Escenario 6, si el canal de Marchamalo se cerrase, las corrientes en El Estacio aumentarían e incluso pudieran cambiar de signo. Este análisis preliminar también muestra desfases entre la influencia de unos canales con otros. Un estudio más detallado de las variaciones de corrientes permitirá determinar con más exactitud el efecto de estas posibles modificaciones.

3.2.2.4. Influencias sobre la Estratificación de la Columna de Agua

La Figura 86 muestra la evolución en el tiempo de los perfiles de salinidad en el punto de control P4. La Tabla 22 muestra los valores mínimo, máximo, rango, medio y desviación estándar. Se observa que la entrada de agua mediterránea puede provocar en algunos días de mayor flujo una estratificación que no dura en el tiempo más que el propio del impulso de agua que, además de restringido al metro y medio de profundidad. Una estratificación somera se mantiene en situaciones de calma y se desvanece por acción del viento. El hecho de que no se prolongue la estratificación por periodo de varios días indica que el efecto de la energía cinética - por movimiento del agua, fundamentalmente debido al viento - sobre la potencial desestabiliza la estratificación - por efecto de las fuerzas de cizalla sobre la tendencia del agua a permanecer estratificada por el gradiente de densidad -.

De otro lado, los datos muestran que si el canal permaneciera cerrado se incrementaría sensiblemente la salinidad.

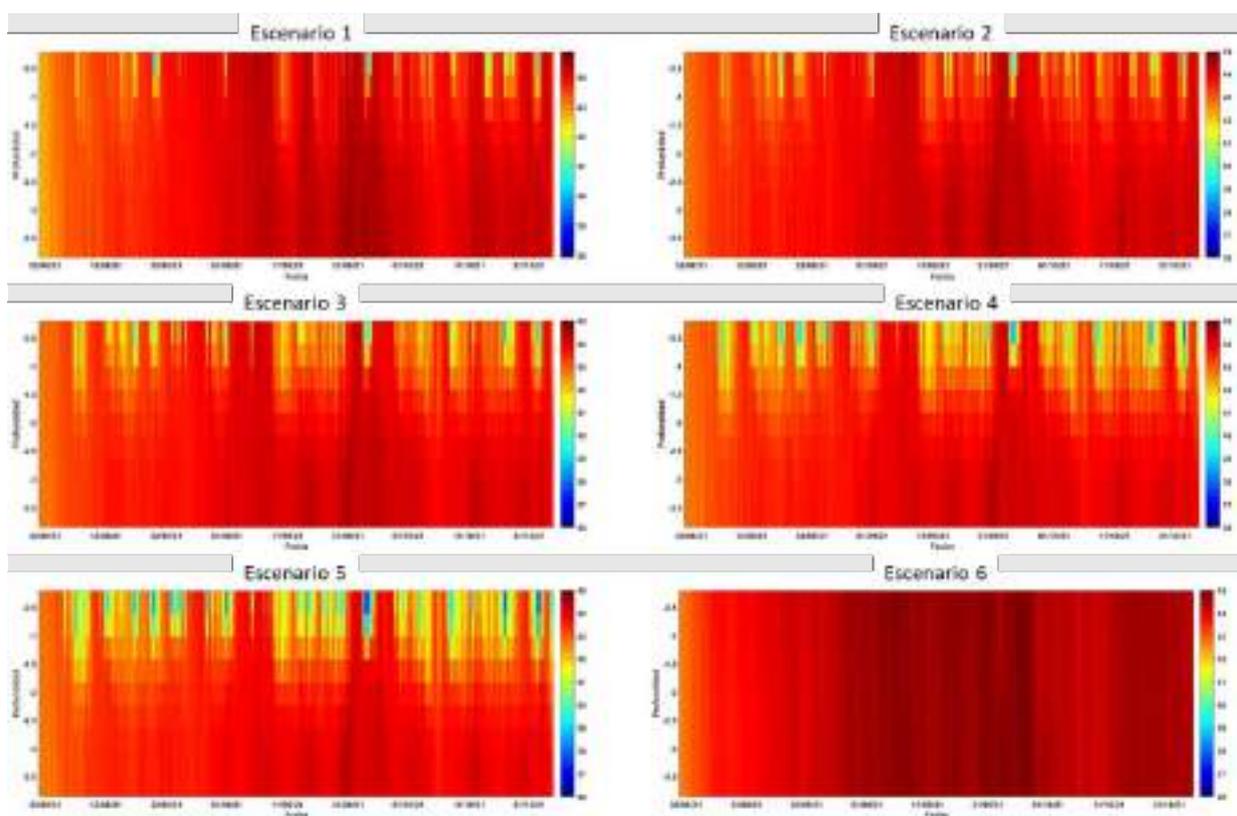


Figura 90. Evolución temporal de perfiles de salinidad en el punto P4 para cada escenario.

Tabla 26. Estadística básica para los datos de salinidad registrados en el punto de control P4 en cada uno de los escenarios.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación
Escenario 1	42.3	44.8	2.5	44.1	0.4
Escenario 2	42.3	44.7	2.4	44.0	0.4
Escenario 3	42.3	44.5	2.2	43.9	0.3
Escenario 4	42.1	44.5	2.4	43.8	0.4
Escenario 5	41.8	44.4	2.5	43.7	0.4
Escenario 6	42.3	45.2	2.9	44.4	0.4

En el punto P9 la diferencia de los valores de salinidad se muestran en la Figura 87 y Tabla 23. El punto P9 es muy somero (menos de 1 m de profundidad), por lo que no sería susceptible de estratificación por efecto del oleaje y corrientes en la zona.

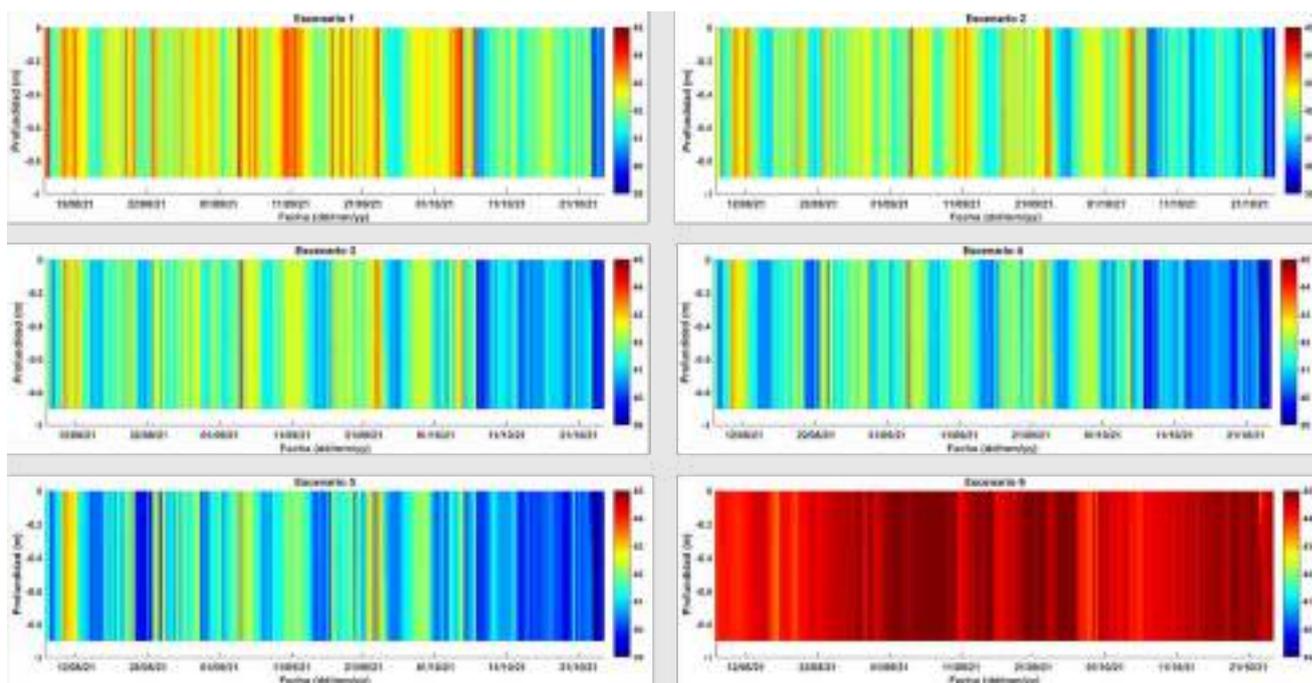


Figura 91. Evolución temporal de perfiles de salinidad para cada escenario en el Punto P9.

Tabla 27 Estadística básica para los datos de salinidad registrados en el punto de control P9 en cada uno de los escenarios.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación
Escenario 1	39.5	44.2	4.7	42.4	0.8
Escenario 2	39.2	43.9	4.6	41.9	0.8
Escenario 3	39.1	43.9	4.8	41.6	0.9
Escenario 4	39.0	43.6	4.6	41.3	0.9
Escenario 5	39.0	43.3	4.3	41.1	0.9
Escenario 6	42.3	45.8	3.5	44.4	0.5

Igualmente, para el punto P10 (Figura 88,Tabla 24), también un punto muy somero (menos de 1 m de profundidad) se obtiene:

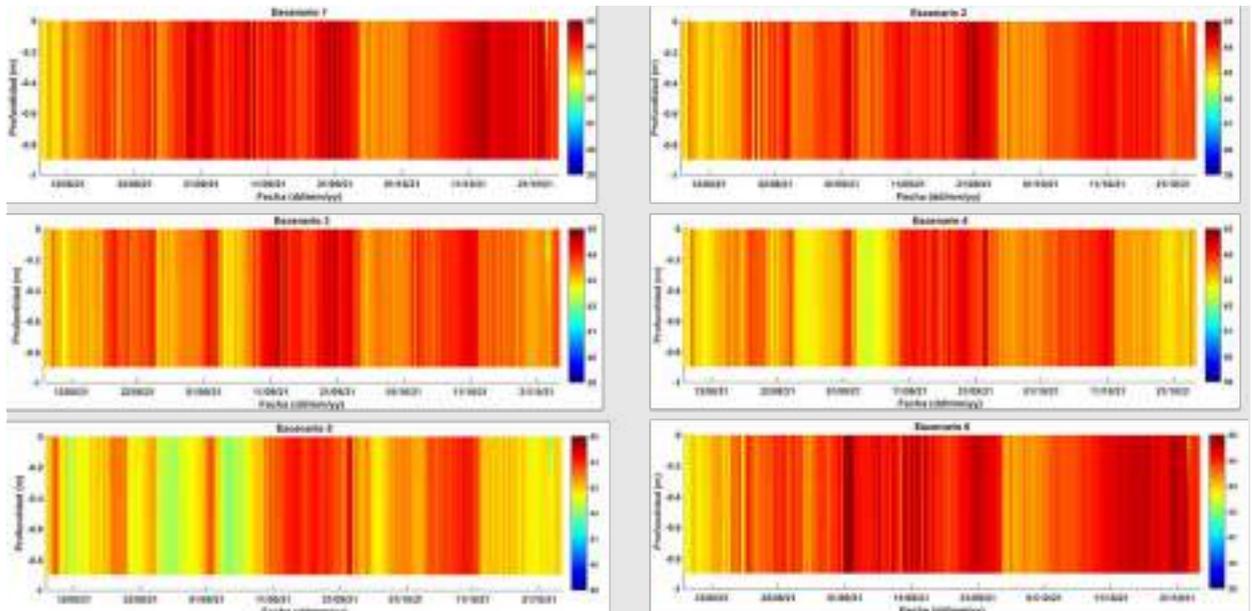


Figura 92. Evolución temporal de perfiles de salinidad para cada escenario en el Punto P10.

Tabla 28 Estadística básica para los datos de salinidad registrados en el punto de control P9 en cada uno de los escenarios.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación
Escenario 1	42.3	44.7	2.4	43.8	0.4
Escenario 2	42.3	44.9	2.6	43.7	0.4
Escenario 3	42.1	44.7	2.6	43.5	0.4
Escenario 4	41.8	44.4	2.5	43.3	0.4
Escenario 5	41.6	44.3	2.7	43.1	0.5
Escenario 6	42.3	44.9	2.6	43.8	0.5



Se puede observar claramente dos distribuciones de salinidad completamente diferentes, por un lado, el punto P4 y por otro los puntos P9 y P10. El P4, a mayor profundidad y en la zona central del sur de la cubeta sur, recibe muy poco influjo del agua entrante por el canal de Marchamalo, siendo el punto P9 en los que se puede observar claramente la presencia de entradas de agua Mediterránea, alcanzado salinidades cercanas a la 39 PSU y un rango de variación de la salinidad cercano a 5 PSU. Esto es debido a la dinámica de la pluma de agua Mediterránea entrante que tiende a seguir la forma de la costa y discurrir pegada a esta. El punto P10, a pesar de encontrarse cerca de la costa está situado más alejado de Marchamalo, lo que hace que su rango de variación de salinidad en todos los escenarios estudiados este en torno a 2 PSU. Este punto está influido por corrientes pegadas a la costa del norte que impiden que se desplace y que se hay un mayor intercambio. Sin embargo, a diferencia del punto P4 con un rango de variación similar, se puede observar una distribución homogénea de la salinidad en la columna de agua. Por el contrario, el punto P4, sí presenta diferencias entre los valores de superficie (agua mediterránea entrante) y los de fondo (agua Mar Menor), dándose estas diferencias de 2 PSU entre los valores de superficie y los del fondo. Sin embargo, este gradiente salino se mantiene por poco tiempo, mezclándose en la columna de agua por efecto del viento. Trabajos previos realizados indican valor de 6 m/s de viento mezclan la columna de agua rompiendo la estratificación. Destacar el incremento de salinidad que se produciría en la zona de la cuenca sur debido al cierre de Marchamalo (Escenario 6), pudiéndose alcanzar salinidades de 45.2 PSU en el punto P4, lo que supone un incremento de 0.4 PSU respecto a la situación actual.

3.2.2.5. Influencia sobre los cambios de salinidad en el fondo del Mar Menor

Las mayores diferencias de salinidad se detectaron el 24/09/2021 tras un episodio de lluvias, tal y cómo se puede ver en las figuras 91 y 92 debido una fuerte entrada de agua menos salada. Esta entrada de agua se refleja en un descenso significativo de la salinidad. Se ha elegido aquí este episodio de mayor entrada de agua de la serie para determinar el máximo alcance. En la Figura 89 se representan las diferencias de salinidad de los Escenarios 2 a 5 con respecto al Escenario1, para conocer el área que se vería afectada en el punto de máxima entrada de agua mediterránea. Los valores por debajo de una variación de 0.5 PSU se han eliminado de los gráficos para facilitar su lectura. Como se puede apreciar, los cambios de salinidad quedan restringidos al

área de mayor influencia de agua mediterránea pegada a la costa. La Figura 90 muestra la diferencia entre el Escenario 6 y el 1.

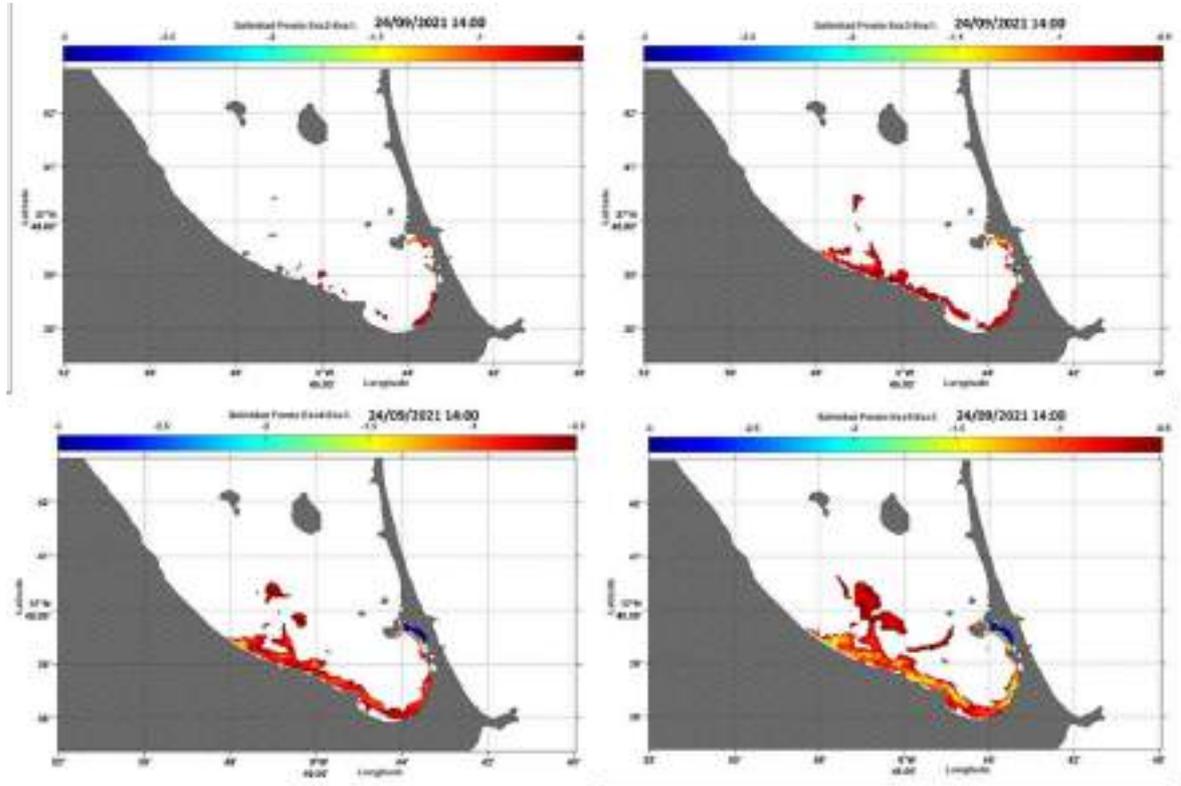


Figura 93. Diferencias de salinidad de fondo entre los Escenarios 2 a 5 con respecto al Escenario 1 para el 24/9/2021 cuando se produjo la mayor entrada de agua del Mediterráneo en el periodo considerado.

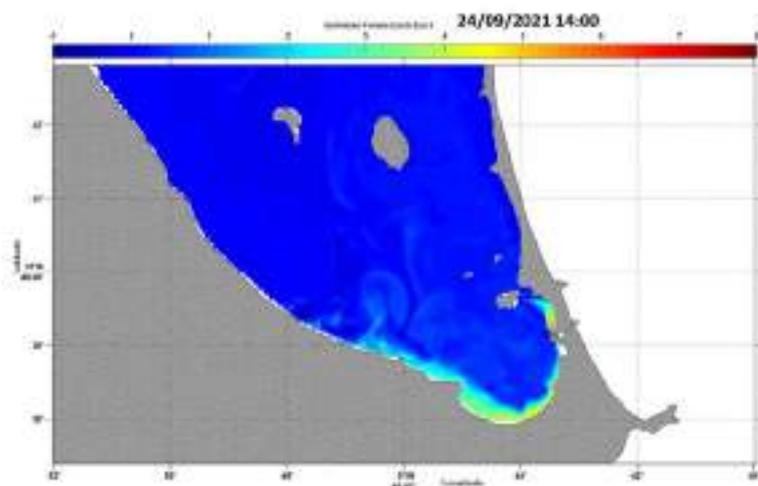


Figura 94. Diferencias de salinidad de fondo entre el Escenario 6 y el 1 para el 24/9/2021 cuando se produjo la mayor entrada de agua del Mediterráneo en el periodo considerado.

Las Figura 91 a Figura 93 muestran las diferencias de salinidad del fondo en los tres puntos de control (P1, P2 y P3) situados en las proximidades de la Isla de Barón. Las Tabla 25 a Tabla 27 muestran valores estadísticos básicos de cada punto para cada escenario.

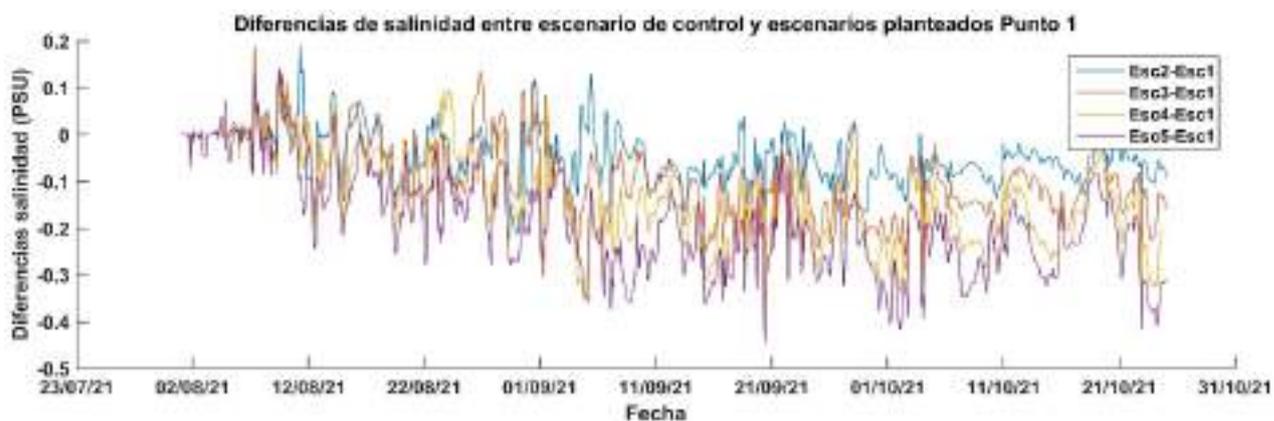


Figura 95. Variación de la salinidad en el punto de control P1.

Tabla 29 Estadística básica de la variación de salinidad en el fondo en el punto P1 en cada uno de los escenarios.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación
Esc2 -Esc 1	-0.29	0.12	0.42	-0.04	0.05
Esc3 -Esc 1	-0.38	0.14	0.53	-0.08	0.07
Esc4 -Esc 1	-0.49	0.13	0.62	-0.13	0.09
Esc5 -Esc 1	-0.59	0.17	0.77	-0.17	0.11



Figura 96. Variación de la salinidad en el punto de control P2.

Tabla 30 Estadística básica de la variación de salinidad en el punto P2 en cada uno de los escenarios.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación
Esc2 -Esc 1	-0.18	0.13	0.31	-0.04	0.04
Esc3 -Esc 1	-0.30	0.21	0.52	-0.08	0.07
Esc4 -Esc 1	-0.37	0.13	0.50	-0.13	0.08
Esc5 -Esc 1	-0.45	0.16	0.61	-0.17	0.11

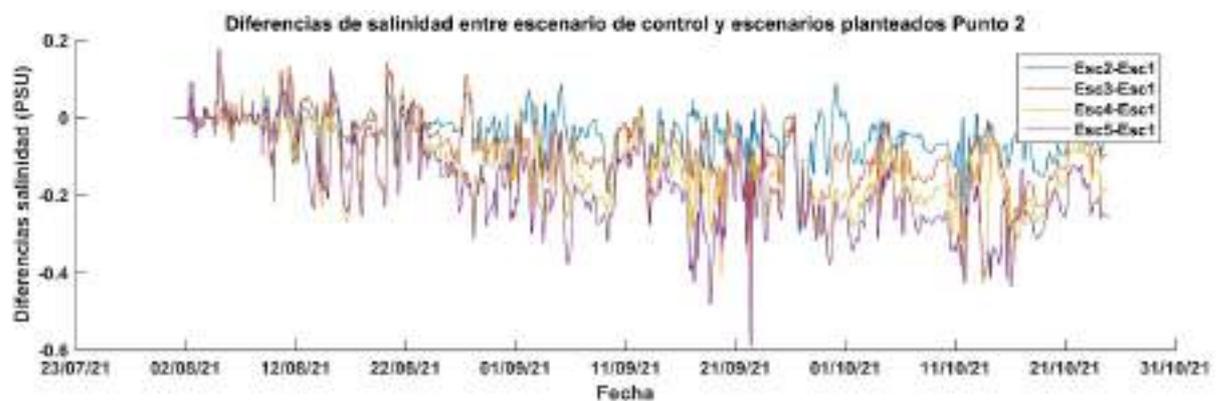


Figura 97. Variación de la salinidad en el punto de control P3

Tabla 31 Estadística básica de la variación de salinidad en el punto P3 en cada uno de los escenarios.

	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación
Esc2 -Esc 1	-0.30	0.08	0.38	-0.05	0.05
Esc3 -Esc 1	-0.31	0.12	0.44	-0.10	0.07
Esc4 -Esc 1	-0.39	0.09	0.48	-0.15	0.08
Esc5 -Esc 1	-0.46	0.09	0.55	-0.20	0.10

Las mayores variaciones de salinidad se registraron en torno al 21/09/2021. Antes y después de esas fechas se dieron varios episodios de entrada de agua importantes, lo que determina la zona de influencia del agua del Mediterráneo. El agua del Mediterráneo, de menor densidad, queda en la capa superior, llegando solo hasta las capas inferiores mediante fenómenos de mezcla por viento, lo que hace que vaya incrementándose su salinidad al mezclarse con el agua del Mar menor.

Aunque con pequeñas variaciones los 3 puntos de control presentan un comportamiento bastante homogéneo, siendo el máximo de descenso de la salinidad el registrado para el punto P2 con valores de -0.45 PSU en la comparativa con el Escenario 5 y correspondiendo a un pico de corta duración. Esta situación se da en todos los puntos presentando una alta variabilidad temporal, con pequeños cambios en la salinidad de corta duración. Observando los valores medios de descenso de salinidad (Tabla 28) se puede observar que oscila entre -0.044 (Esc2) y -0.20 PSU (esc5).

Tabla 32 Media de los valores de variación de salinidad en los puntos P1, P2 y P3 para cada uno de los escenarios simulados.

	P1	P2	P3
Esc2 -Esc 1	-0.04	-0.04	-0.05
Esc3 -Esc 1	-0.08	-0.08	-0.10
Esc4 -Esc 1	-0.13	-0.13	-0.15
Esc5 -Esc 1	-0.17	-0.17	-0.20

3.3. ESTUDIO DE OLEAJE

El periodo simulado corresponde a datos históricos desde el 22/5/2019 al 24/7/2019. La Figura 99 muestra la Hs del periodo simulado que fue de 0.15 de media (DE = 0.13) con un valor máximo de 0.614 m. Se aprecian dos picos en los que se superó una altura de 0.6 m coincidente con dos picos de máxima velocidad del viento. También se aprecian oscilaciones diarias, indicativas de calmas nocturnas y vientos térmicos durante el día.

La Figura 100 muestra la rosa de oleaje para el periodo considerado. Indicando que claramente una dirección de procedencia del oleaje dominante que sería la del Este (63%), con una pequeña proporción del SW (10%). Esto coincide con el patrón de vientos dominantes en la zona, en la que los vientos con origen NE son los más frecuentes. La altura de ola obtenida oscila mayoritariamente en un rango entre 0.1 y 0.3 m, superándose esporádicamente valores mayores de 0.4 m/s. Los resultados obtenidos concuerdan con las características del Mar Menor, con vientos de intensidad moderada en torno a los 7 m/s, y un *fetch* (distancia en la que el viento

sopla sin ningún elemento que lo obstaculice) pequeño en la dirección del viento dominante (10 Km), lo que tiene como resultado un oleaje de alta frecuencia con altura de ola pequeña.

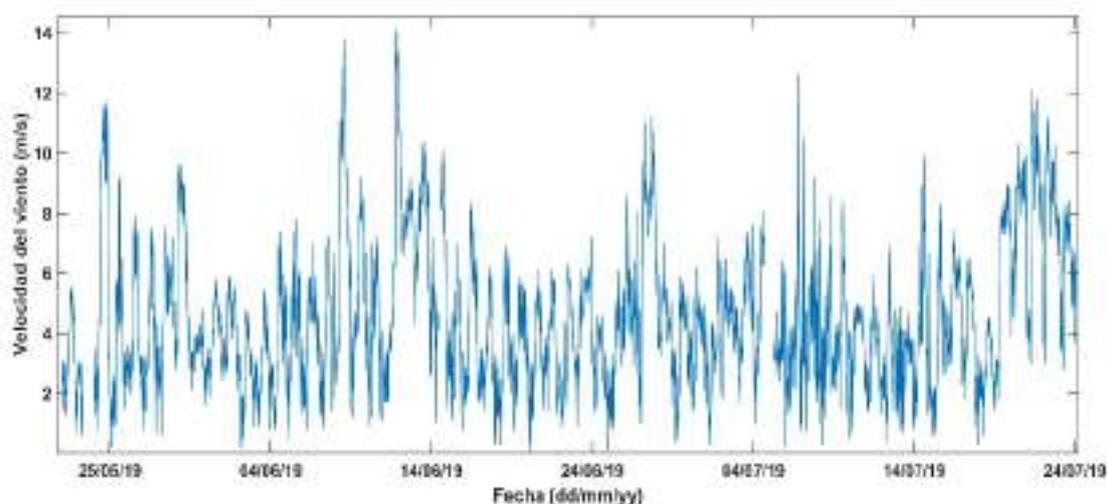
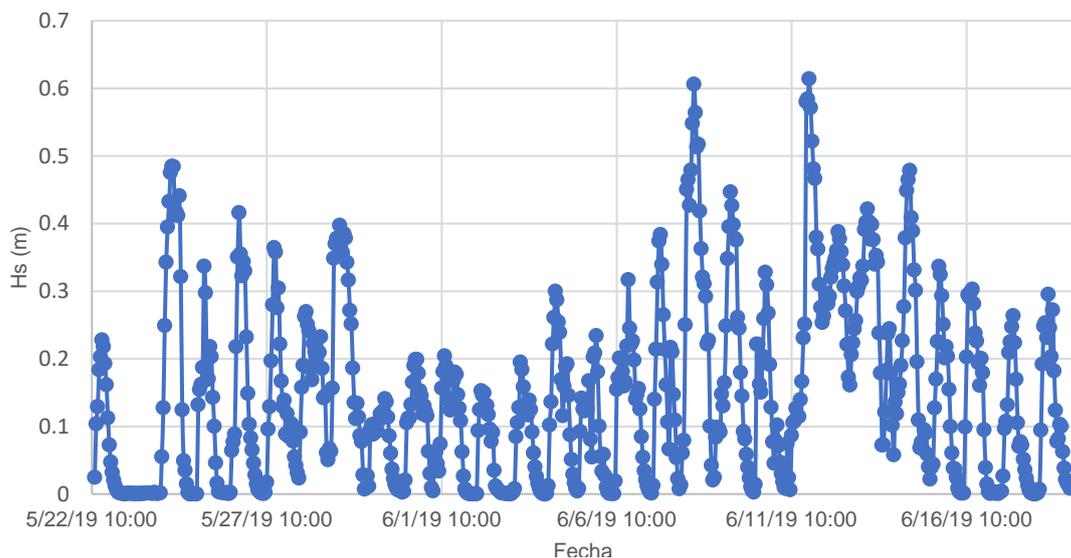


Figura 98. Altura significativa del oleaje en el periodo considerado.

En la Figura 101 se muestran los espectros del oleaje en los cuatro picos máximos de Hs. Cabe observar el desplazamiento de la frecuencia de pico de 0.3 Hz en los días de mayo y de 0.4 Hz en los de junio. Se observa también una mayor densidad de energía en la frecuencia de pico el 11/6/2019 cuando la Hs fue máxima, al igual que se configura un espectro más puntiagudo.

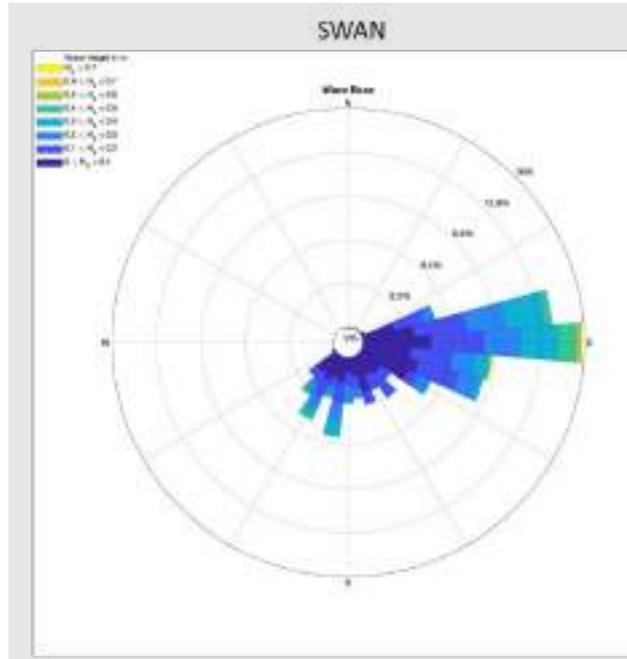


Figura 99. Rosa de oleaje para el periodo considerado. Indica el % de ocurrencia de cada rango de Hs.

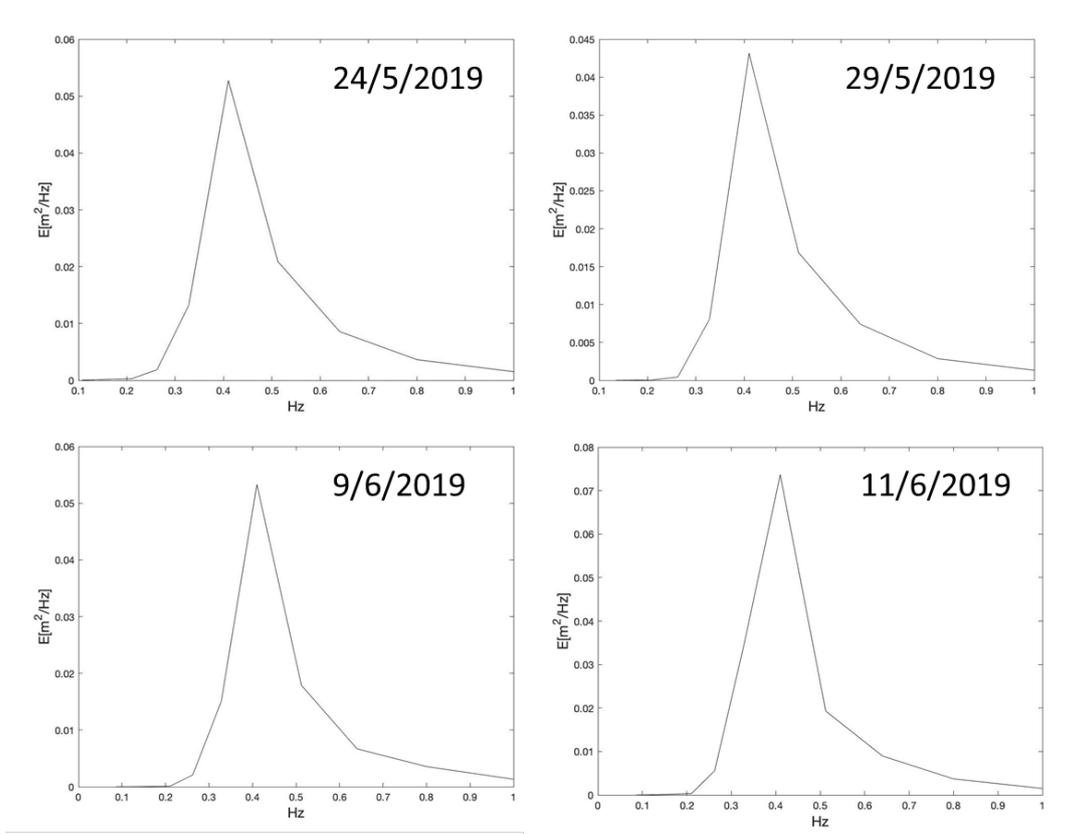


Figura 100. Espectros de oleaje de dos días de mayo y junio de máximos Hs cada uno.

La Figura 102 muestra los espectros de oleaje bidireccionales de los días 24 y 29 de mayo y 8 y 11 de junio de 2019. La dirección es en los cuatro casos es dirección suroeste excepto el 29/5 que es sur.

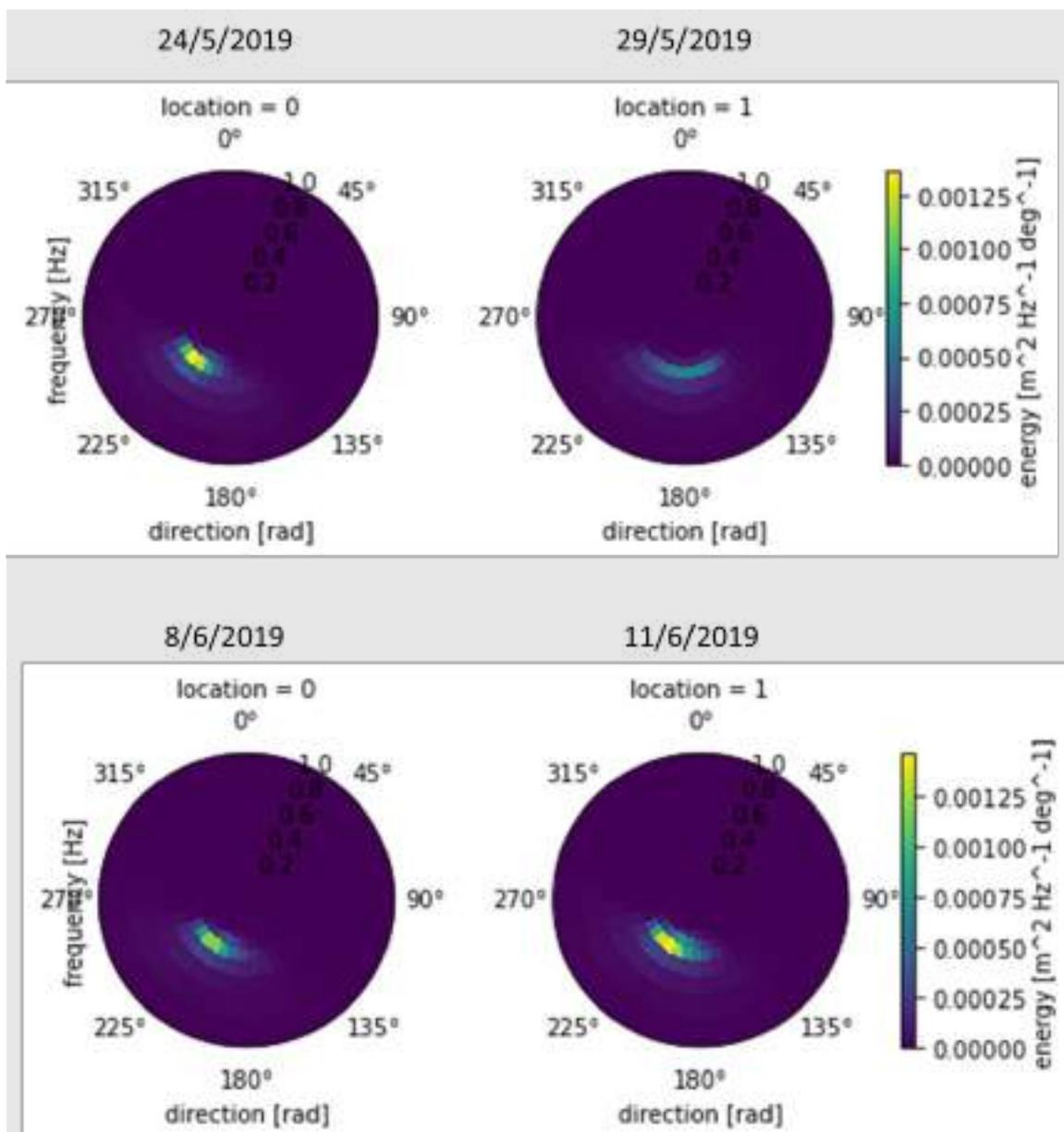


Figura 101. Espectros bidireccionales de oleaje de dos días de mayo y junio de máximos Hs cada uno.

Respecto a la velocidad orbital en el fondo en el período simulado (Figura 103) se ha obtenido para este periodo de tiempo y este punto de muestreo una media de 0.006 m/s (DE = 0.010) con un máximo de 0.08 m/s.

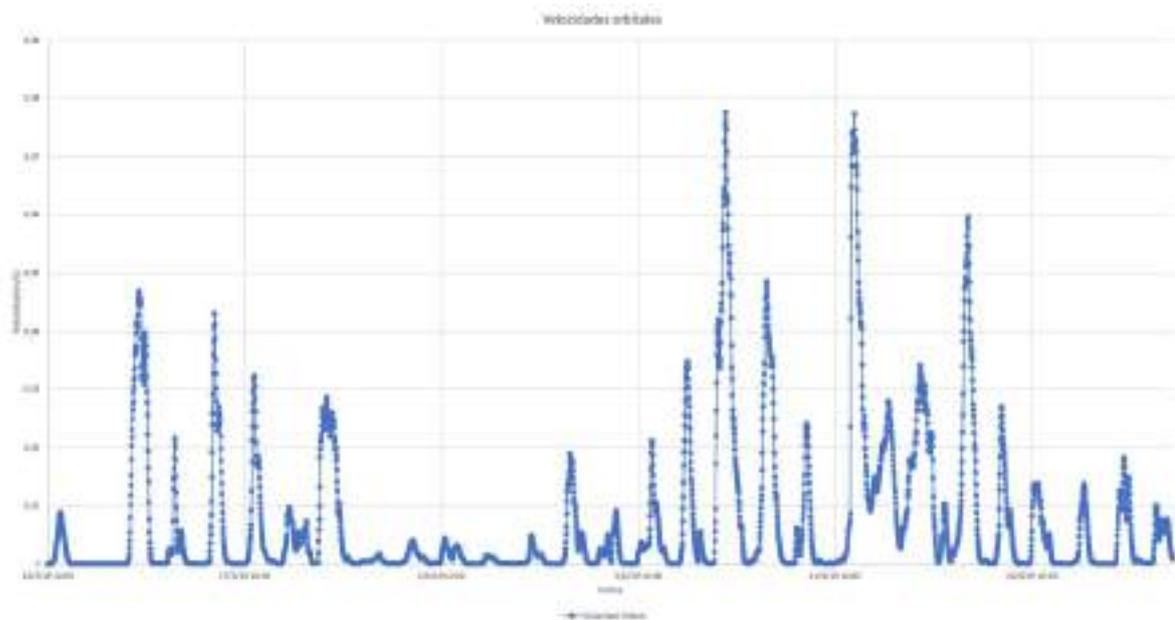


Figura 102.Velocidad orbital del oleaje en el fondo

La Figura 102 muestra los campos de olas para las cuatro fechas indicadas anteriormente. En los cuatro casos se observa que la mayor altura de oleaje se concentra en la zona de la desembocadura de la rambla de El Albujón. Esto es debido a que esta zona se encuentra en la dirección del mayor fetch del viento dominante (línea roja en la Figura 103 superior izquierda), lo que permite un mayor desarrollo del oleaje y por tanto una mayor altura de ola.

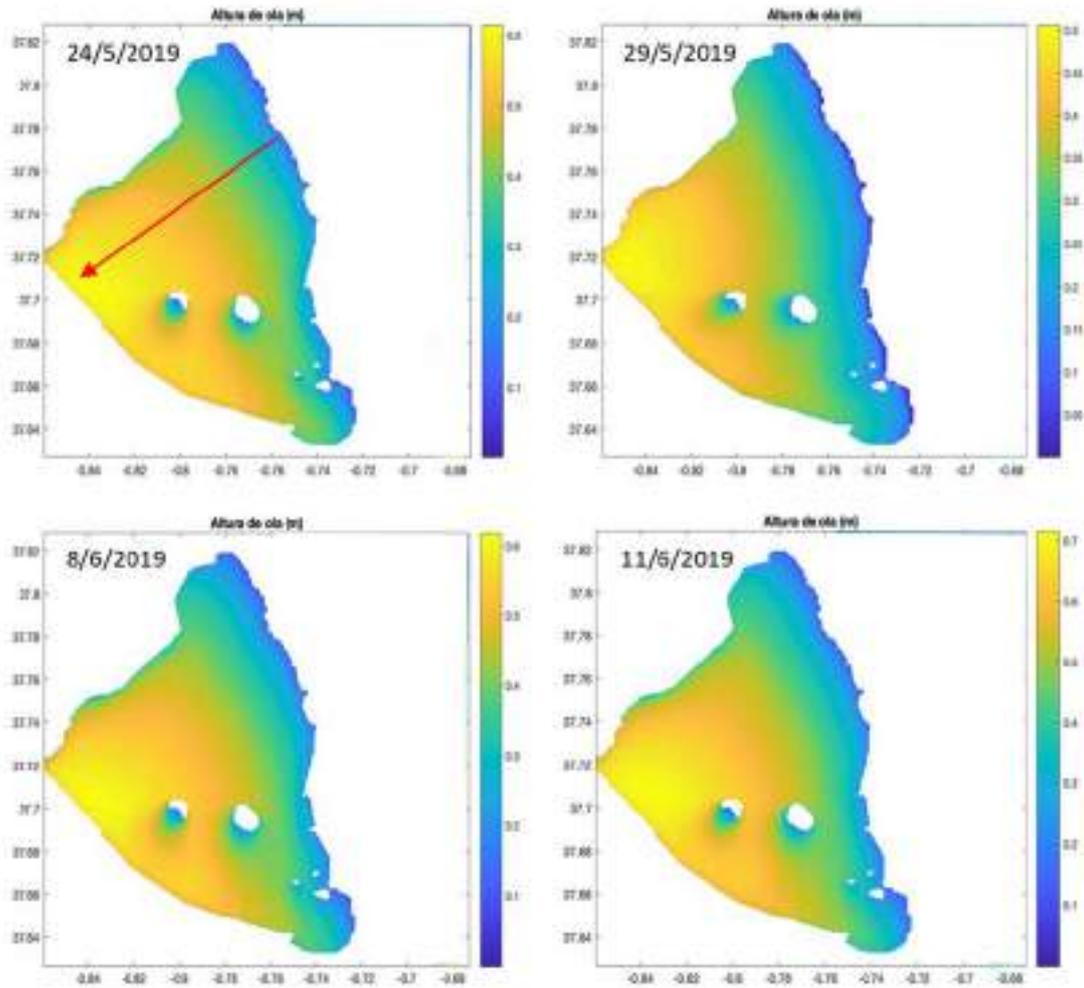


Figura 103. Mapa de los campos de olas para cada una de las fechas.

4. CONCLUSIONES

A modo de conclusiones preliminares y sin intención de ser exhaustivos los resultados indican que la primavera de 2022 fue una de las más lluviosas registradas. El verano de 2022, con sucesivas olas de calor, ha sido el más caluroso desde que se tienen registros, lo cual ha llevado a una mayor evaporación incrementando el ritmo de recuperación de salinidad en el Mar Menor, si bien todavía no se han alcanzado los valores habituales. El invierno de 2022 fue más anticiclónico que el de 2021 presentando una tendencia de caída de presión atmosférica de febrero a mayo más pronunciada que la de 2021 y con cuatro mínimos por debajo de la línea de 2021. En marzo y abril también se produjeron tres episodios de viento fuerte, uno de ellos de más de 13 m/s.

Tras sucesivas tormentas y episodios de transporte de sedimentos el canal de Venezia quedó abierto siendo en la actualidad funcional y contribuyendo aproximadamente en un 12% al flujo neto total de las Encañizadas, cuando la gola de La Torre lo hace en un 48% y la de El Charco en un 40%.

En la primavera de 2021 el flujo neto de entrada de agua al Mar Menor a través del Estacio fue de 22.2 Hm³ mientras que en la primavera de 2022 fue de 40 Hm³ cuando hace diez años (2011) fue de 24 Hm³. En el de verano de 2011 fue de 29.9 Hm³ mientras que en el de 2022 fue de 43.6 Hm³, cuando en 2011 fue de 41 Hm³, indicando que en 2022 el flujo neto de primavera y verano prácticamente se duplicó con respecto al de 2021. En términos de tasa de renovación el intercambio de primavera y verano de 2022 supuso un 5% del volumen total del Mar Menor más que en el mismo periodo de 2021.

Si se consideran los caudales de todos los canales de comunicación totales en la primavera de 2022 entraron al Mar Menor 23 Hm³ más que en la de 2021, lo que supuso un incremento de la tasa de renovación del Mar Menor durante ese periodo de un 4%. En verano de 2022 entraron 16 Hm³ de más que en 2021 suponiendo un incremento en la renovación de un 3% aproximadamente.



Región de Murcia
Consejería de Agua, Agricultura,
Ganadería, Pesca, Medio
Ambiente y Emergencias.



Universidad
Politécnica
de Cartagena



Se han simulado seis escenarios de modificación de batimetría del canal de Marchamalo en el periodo de tres meses desde agosto a octubre de 2022. De los datos se desprende que el mayor efecto en cuanto a tasa de renovación del agua en la capa del fondo del Mar Menor se hubiera producido a escasos 300 metros de la línea de costa desde Isla del Ciervo a Lo Pollo. Este efecto no se extiende más allá en dirección hacia Los Urrutias por el choque con las corrientes pegadas a la costa procedentes del norte que frenan su expansión.

En la zona central del área afectada por la anoxia producido en el verano de 2021, la renovación se hubiera incrementado entre un 0.5 y un 1.5 % de media - con valores puntuales de entre un 3 y un 12% - en la capa de fondo, entre un 1 y un 6% en promedio – también con valores puntuales máximos de entre un 6 y un 20% - en la capa de superficie, y entre 0.8 y 4% - con valores máximos entre un 3 y un 13% - si se integrara toda la columna de agua.

En la franja de 300 de la costa, en la zona de Playa Honda, se hubiera incrementado de un 4 a un 14% con picos entre 24 y 54% dependiendo del tiempo. Al tratarse de una columna de agua muy somera queda prácticamente homogenizada. En la zona de Lo Pollo, también una zona muy somera, la renovación se hubiera incrementado de un 4 a un 19% con valores puntuales máximos de entre un 29 y un 57% en toda la columna de agua.

Los datos sugieren que en una franja de unos 300 m de la línea de costa hacia el interior de la laguna los diferentes escenarios podrían tener efecto, de un lado sobre la transparencia de las aguas en las playas de la zona, y de otro en cuanto a que esa franja podría estar mejor oxigenada al tener una mayor renovación.

Considerando la posibilidad de cerrar el canal, la renovación en la zona central del área afectada por la anoxia en el fondo se hubiera renovado un 3% menos de media (con un máximo de un 15% menos), mientras que en los 300 m del litoral la renovación hubiera sido de un 26% menor (con un máximo puntual de un 51%) en la zona de Playa Honda y un 1% menos en promedio en Lo Pollo con un máximo puntual de un 21%.

Con respecto la salida de agua hacia el Mediterráneo en la capa de fondo el incremento medio de porcentaje de renovación con agua del Mar Menor se situaría entre 0 y 0.03% (con máximos aislados entre 2.7 y 3.3%) en función del escenario en el punto P5. En el punto P6 sería de entre 0.3 y 0.9 (valores extremos puntuales de entre 7 y 9%), en el punto P7 entre 0.2 y 0.9



(con valores máximos puntuales de 5.8 y 8.3%) y en el punto P8 entre 0.3 y 09% (con valores máximos de 7 a 9.9%), abarcando en todos los puntos un rango máximo de 2.7 a 9.9%.

En la situación actual no se produce una estratificación permanente en la columna de agua debida a la entrada de agua mediterránea por Marchamalo. La estratificación en el punto P4 se reduce puntualmente en la capa del primer metro y sólo en días de máximo flujo sin permanecer más de un día. El aumento del caudal al aumentar la batimetría hace que en el caso más extremo la estratificación pudiera llegar hasta la mitad de la columna de agua (2 m), pero de nuevo con duración no mayor de 1-2 días, de forma que cuanto mayor es el gradiente, como ocurrió tras las lluvias del 20 de septiembre, que introdujo agua de menor salinidad que la habitual en el Mediterráneo, la estratificación hubiera alcanzado 1.5 m de profundidad en el escenario de mayor batimetría. Como promedio en este punto la salinidad hubiera disminuido desde 0.09 a 0.42 PSU en función del escenario. Estas diferencias en la zona de los 300 m de la línea de costa hubieran podido variar de 0.42 a 1.25 PSU en Playa Honda y de 0.12 a 0.68 en Lo Pollo.

En cambio, si se considerara el escenario de cerrar el canal, en el punto P4 la salinidad se incrementaría como promedio en 0.3 PSU, en Playa Honda 2 PSU y en Lo Pollo quedaría sin modificarse prácticamente.

En la capa de fondo de los Puntos P1, P2 y P3 - donde los cambios la salinidad podrían tener mayor efecto sobre los organismos - la salinidad disminuiría entre 0.04 y 0.2 PSU en función del escenario.

El análisis preliminar de oleaje incide en que la zona de mayor resuspensión en el Mar Menor coincide con la de mayor intensidad del campo de oleaje en una zona situada entre la desembocadura de la rambla del Albujón, los Urrutias y la Isla Perdiguera.



5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Servicio de Pesca de la Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca, Medio Ambiente y Emergencias, por la toma de datos disponibles en el Servidor de Datos Científicos del Mar Menor (SDC). Al equipo de SIGyT del IMIDA por la elaboración de las batimetrías actualizadas. Al equipo del Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría de la UPCT por su ayuda en la georreferenciación de los sensores. A los puertos deportivos por albergar los sensores de elevación del nivel del mar.



6. BIBLIOGRAFÍA

- 1] [«Decreto n.º 173/2019,» de 6 de septiembre, del Consejo de Gobierno, por el que se establecen los Órganos Directivos de la Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería, Pesca y Medio Ambiente.
- 2] [«Decreto n.º 274/2018,» de 27 de diciembre, por el que se establecen las normas reguladoras de subvención, otorgada mediante concesión directa, por la Consejería de Empleo, Universidades y Medio Ambiente, a favor de la Universidad Politécnica de Cartagena para el desarrollo del proyecto sobre modelado hidrodinámico de alta resolución, estudio del intercambio de agua entre el Mar Menor y el Mediterráneo.
- 3] [L. Arévalo, «El Mar Menor como sistema forzado por el Mediterráneo.,» *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, vol. 5 , nº (1), pp. 61-95, 1988.
- 4] [A. Pérez-Ruzafa, «Estudio ecológico y bionómico de los poblamientos bentónicos del Mar Menor,» Tesis Doctoral, Universidad de Murcia, 1989.
- 5] [E. Sánchez-Badorrey, M. Losada y J. Rodero, «Sediment transport patterns in front of reflective structures under wind wave-dominated conditions,» Grupo de Puertos y Costas, Universidad de Granada, 2008.
- 6] [CARM, «ervicio de información oceanografica de la Region de Murcia,» 2005. [En línea]. Available: <https://caamext.carm.es/siom/>.
- 7] [G. Umgiesser, «Comparative hydrodynamics of 10 Mediterranean lagoons by means of numerica modeling,» *AGU publications*, p. pp.2121–2128, 2013.



- 8] [García-Oliva, M. Á. Pérez-Ruzafa, G. Umgiesser, W. McKiver, M. Ghezzi, F. D. Pascalis y C. Marcos, «Assessing the Hydrodynamic Response of the Mar Menor Lagoon to Dredging Inlets Interventions through Numerical Modelling,» p. 959, 2018.
- 9] [F. López-Castejón, «Caracterización de la hidrodinámica del Mar Menor y los flujos de intercambio con el Mediterráneo mediante datos in situ y modelado numérico.,» Tesis Doctoral, 2017.
- 10] [E. Fraile-Nuez, F. Machín y J. Santa-Casiano, Estudio oceanográfico integral de alta resolución de la laguna costera del Mar Menor, Murcia: Campaña MM1116, 2017.
- 11] [M. Erena, J. Domínguez, F. Aguado-Giménez, J. Soria y S. García-Galiano, «Monitoring Coastal Lagoon Water Quality through Remote Sensing: The Mar Menor as a Case Study,» vol. 11, p. 1468, 2019.
- 12] [M. Erena, J. Dominguez, J. Atenza, S. García-Galiano, J. Soria y A. Pérez-Ruzafa,, «Bathymetry Time Series Using High Spatial Resolution Satellite Images. Water,» vol. 12, p. 531, 2020.
- 13] [J. e. a. Eaton, «GNU Octave version 4.0.0 manual: a high-level interactive language for numerical computations.,» 2015.
- 14] [«Aquadopp Current Profiler User Guide,» 2008. [En línea].
- 15] [G. Godin y L. Trotti, «Trieste, water levels 1952–1971: a study of the tide, mean level and seiche activity.,» *Miscellaneous Special Publication*, vol. 28, pp. 1-24, 1975.
- 16] [C. Hill, C. DeLuca, Balaji, A. Da Silva y M. Suarez, The architecture of the Earth System Modeling Framework, vol. 6, in *Computing in Science & Engineering*, Jan-Feb 2004, pp. 18-28.



- 17] [D. B. Haidvogel, H. G. Arango, K. Hedstrom, A. Beckmann, P. Malanotte Rizzoli y A. F. Shchepetkin, Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates., vol. 32, Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2000, pp. 239-281.
- 18] [P. Marchesiello, J. C. McWilliams y A. Shchepetkin, «Equilibrium structure and dynamics of the California Current System,» pp. 753-783, 2003.
- 19] [A. Peliz, J. Dubert y D. B. Haidvogel, «Subinertial Response of a Density-Driven Eastern Boundary Poleward Current to Wind Forcing,» pp. 1633-1650, 2003.
- 20] [E. Di Lorenzo, «Seasonal dynamics of the surface circulation in the southern California Current System,» pp. 2371-2388, 2003.
- 21] [M. S. Dinniman, J. M. Klinck y W. O. S. Jr, «Cross shelf exchange in a model of the Ross Sea circulation and biogeochemistry,» pp. 3103-3120, 2003.
- 22] [W. Budgell, «Numerical simulation of ice-ocean variability in the Barents Sea region,» 2005.
- 23] [J. C. Warner, C. R. Sherwood, H. G. Arango y R. P. Signell, «Performance of four turbulence closure methods implemented using a generic length scale method,» Ocean Modelling, 2005a.
- 24] [J. L. Wilkin, H. G. Arango, D. B. Haidvogel, C. S. Lichtenwalner, S. M. Durski y K. S. Hedstrom, «A regional Ocean Modeling System for the Long-term Ecosystem Observatory,» J. Geophys. Res., 2005.
- 25] [A. F. Shchepetkin y J. C. McWilliams, «A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate,» 2003.



- [26] A. F. Shchepetkin y J. C. McWilliams, The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model., *Ocean Modelling*, 2005, p. 347–404.
- [27] A. Moore, H. Arango, . A. Miller, B. Cornuelle, E. Di Lorenz y D. Neilson, A Comprehensive Ocean Prediction and Analysis System Based on the Tangent Linear and Adjoint Components of a Regional Ocean Model, vol. 7, *Ocean Modelling*, 2004, pp. 227-258.
- [28] A. Moore, H. Arango, E. D. Lorenzo, A. Miller y B. Cornuelle, «An adjoint sensitivity analysis of the southern portion of the California Current circulation and ecosystem,» vol. Part I: The physical circulation, p. *J. Phys. Oceanogr*, 2006.
- [29] E. Di Lorenzo, A. Moore, H. Arango, B. Cornuelle, A. Miller, B. Powell, B. Chua y A. Bennett, «Weak and Strong Constraint Data Assimilation in the inverse Regional Ocean Modeling System (ROMS): development and applications for a baroclinic coastal upwelling system,» *Ocean Modelling*, 2006.
- [30] A. F. Shchepetkin y J. C. McWilliams, The Regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model, *Ocean Modelling*, 2005, pp. 347-404.
- [31] Y. Song y D. Haidvogel, A Semi-implicit Ocean Circulation Model Using a Generalized Topography-Following Coordinate System, vol. 115, *Journal of Computational Physics*, 1994, p. 228–244.
- [32] A. F. Shchepetkin y J. C. McWilliams, «An Accurate Boussinesq oceanic model with a practical, "Stiffened" equation of state,» *Ocean Modeling*, pp. 41-70, 2011.
- [33] J. M. Souza, B. Powell, A. C. Castillo-Trujillo y P. Flament, «The Vorticity Balance of the Ocean Surface in Hawaii from a Regional Reanalysis,» *J. Phys. Oceanogr*, pp. 424-440, 2015.



- [34] D. B. Haidvogel y A. Beckmann, «Numerical Ocean Circulation Modeling. Series on Environmental Science and Management,» *Imperial College Press*, p. 319, 1999.
- [35] A. F. Shchepetkin y J. C. McWilliams, «Quasi-monotone advection schemes based on explicit locally adaptive dissipation,» *Monthly Weather Rev*, vol. 126, pp. 1541-1580, 1998.
- [36] G. L. a. T. Y. Mellor, «velopment of a turbulence closure model for geophysical fluid problems,,» *Geophys. Space Phys*, vol. 20, pp. 851-875, 1982.
- [37] B. Galperin, L. H. Kantha, S. Hassid y A. Rosati, «A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows,» *J. Atmos. Sci*, vol. 45, pp. 55-62, 1988.
- [38] J. S. Allen, P. A. Newberger y J. Federiuk, «Upwelling circulation on the Oregon continental shelf. Part I: Response to Idealized Forcing,» *J. Phys. Oceanogr*, vol. 35, pp. 1843-1866, 1995.
- [39] L. Umlauf y H. Burchard, «A generic length-scale equation for geophysical turbulence models,» *J. Marine Res.*, vol. 61, pp. 235-265, 2003.
- [40] W. G. Large, J. C. McWilliams y S. C. Doney, «Oceanic vertical mixing: a review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization,» *Geophys*, vol. 32, pp. 363-403, 1994.
- [41] L. Kantha y C. Clayson, «Numerical Models of Oceans and Oceanic Processes,» *Academic Press*, vol. 66, p. 940 , 1994.
- [42] V. M. Canuto, Y. C. A. Howard y M. S. Dubovikov, «Ocean turbulence I: one-point closure model. Momentum and heat vertical diffusivities,» *J. Phys. Oceanogr*, vol. 31, pp. 1413-1426, 2001.



- [43] R. Styles y S. M. Glenn, «Modeling stratified wave and current bottom boundary layers in the continental shelf,» *J. Geophys. Res.*, vol. 105, pp. 24119-24139, 2000.
- [44] C. W. Fairall, E. F. Bradley, D. P. Rogers, J. B. Edson y G. S. Young, «Bulk parameterization of air-sea fluxes for tropical ocean-global atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment,» *Geophys.*, vol. 101, pp. 3747-3764, 1996.
- [45] W. Liu, K. Katsaros y J. A. Businger, Bulk parameterization of the air-sea exchange of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface., vol. 36, *J. Atmos. Sci.*, 1979, p. 2052–2062.
- [46] WCRP, Scientific plan for the TOGA Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment., World Climate Research Program Publication Series, N. 3 Addendum, 1990, p. 94.
- [47] P. Webster y R. Lukas, TOGA COARE: The coupled ocean atmosphere response experiment., vol. 73, *Bull. Am. Met. Soc.*, 1992, pp. 1377-1416.
- [48] A. A. Grachev y C. W. Fairall, «Dependence of the Monin–Obukhov Stability Parameter on the Bulk Richardson Number over the Ocean,» *NOAA Environmental Technology Laboratory*, vol. 36, p. 406, 1997.
- [49] G. Geernaert, Bulk parametrizations for the wind stress and heat fluxes., vol. Volume I — Current Theory. Springer., S. W. a. Fluxes, Ed., Geernaert, G.L.: Plant, W.J., 1990.
- [50] K. Hanawa y Y. Toba, «Critical examination of estimation methods of long-term mean air sea heat and momentum transfers.,» *Ocean-air Interactions*, vol. 1, pp. 79-93, 1987.



- [51] D. Ledvina, G. Young y C. Fairall, «The effect of averaging on bulk estimates of heat and momentum fluxes for the tropical Western Pacific Ocean.,» *J. Geophys. Res.*, vol. 98, pp. 20211-20217, 1993.
- [52] P. Marchesiello, J. C. McWilliams y A. F. Shchepetkin, «Open boundary conditions for long-term integration of regional ocean models,» *Ocean Modelling*, vol. 3, pp. 1-20, 2001.
- [53] R. A. Flather y A. M. Dame, «Note on a preliminary scheme for storm surge prediction using numerical models,» *J. R. Met. Soc.*, pp. 123-132, 1976.
- [54] I. Orlanski, «A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows,» *J. Comp. Sci.*, vol. 21(3), pp. 251-269, 1976.
- [55] W. H. Raymond y H. L. Kuo, «A radiation boundary condition for multi-dimensional flows, Quart,» *J. R. Met. Soc.*, vol. 110, pp. 535-551, 1984.
- [56] «The Comprehensive Manual. Aquadopp,» Nortek, 2017. [En línea]. Available:
https://www.nortekgroup.com/assets/documents/ComprehensiveManual_Oct2017_compressed.pdf.
- [57] M. Özger y Z. Şen, «Triple diagram method for the prediction of wave height and period,» *Ocean Engineering*, vol. 34, nº 7, pp. 1060-1068, 2007.
- [58] Y. Yüksel y E. Çevik, *Coastal Engineering, Marine Engineering Series*, Beta Publishing, 2009.
- [59] D. Reeve, A. Chadwick y C. Fleming, «Coastal Engineering: Processes, Theory, and Design Practice.,» *Spon Press, Taylor and Francis Group, London and New York.*, 2004.



- [60] M. H. Kazeminezhad, A. Etemad-Shahidi y S. J. Mousavi, «Application of fuzzy inference system in the prediction of wave parameters,» *Ocean Engineering*, vol. 32, nº 14-15, pp. 1709-1725, 2005.
- [61] W. Group, «The WAM model—A third generation ocean wave prediction model,» *Journal of Physical Oceanography*, vol. 18, nº 12, pp. 1775-1810, 1988.
- [62] N. Booij, R. C. Ris y L. H. Holthuijsen, «A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation,» *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 104, nº C4, pp. 7649-7666, 1999.
- [63] H. Tolman, «User manual and system documentation of WAVEWATCH III,» 1998.
- [64] A. Akpınar, G. P. van Vledder, M. I. Kömürçü y M. Özger, «Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea,» *Continental Shelf Research*, Vols. %1 de %250-51, nº 80-99, 2012.
- [65] L. H. Holthuijsen, N. Booij y R. C. Ris, «The "SWAN" wave model for shallow water,» *Coastal Engineering Proceedings*, 1996.
- [66] M. Zijlema y A. J. van der Westhuysen, «On convergence behaviour and numerical accuracy in stationary SWAN simulations of nearshore wind wave spectra,» *Coastal Engineering*, vol. 52, nº 3, pp. 237-256, 2005.
- [67] G. B. Airy, «Tides and waves,» *Metropolitana*, vol. 5, 1845.
- [68] H. L. Tolman, «Effects of numerics on the physics in a third-generation wind-wave model,» *Journal of physical Oceanography*, vol. 22, nº 10, pp. 1095-1111, 1992.
- [69] I. G. Jonsson y N. A. Carlsen, «Experimental and theoretical investigations in an oscillatory turbulent boundary layer,» *Journal of Hydraulic Research*, vol. 14, nº 1, pp. 45-60, 1976.



- [70] J. A. Battjes y J. Janssen, «Energy loss and set-up due to breaking of random waves,» *Coastal Engineering Proceedings*, vol. 16, p. 32, 1978.
- [71] E. B. Thornton y R. T. Guza, «Transformation of wave height distribution,» *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 88, nº C10, pp. 5925-5938, 1983.
- [72] S. Beji y J. A. Battjes, «Experimental investigation of wave propagation over a bar,» *Coastal engineering*, vol. 19, nº 1-2, pp. 151-162, 1993.
- [73] K. Hasselmann, «On the spectral dissipation of ocean waves due to white capping,» *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 6, nº 1, pp. 107-127, 1974.
- [74] Y. Eldeberky, «Nonlinear Transformation of Wave Spectra in the Nearshore Zone Ph. D,» 1996.
- [75] P. Oddo, Sensitivity of the Mediterranean sea level to atmospheric pressure and free surface elevation numerical formulation in NEMO, Geoscientific Model Development, 2014, p. pp.3001–3015.
- [76] D. Gomis, «Mediterranean Sea level and barotropic flow through the Strait of Gibraltar for the period 1958-2001 and reconstructed since 1659,» *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 111, nº (11), 2006.
- [77] R. Ponte, «Low-frequency sea level variability and the inverted barometer effect.,» *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 23, p. pp.619–629, 2006.
- [78] «Decreto n.º 53/2018, de 27 de abril, por el que se establecen los Órganos Directivos de la Consejería de Empleo, Universidades, Empresa y Medio Ambiente.,» Boletín Oficial de la Región de Murcia, 2018.
- [79] «Monitorización Costera para el Mar Menor,» ,CMS (463.01-08_CLUSTER). Plan de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia 2007-2010, Comunidad Autónoma de Murcia, 2008.



- [80] B. Haidvogel, H. Arango, W. Budgell, B. Cornuelle, E. Curchitser, E. Di Lorenzo, K. Fennel, W. Geyer, A. Hermann, L. Lanerolle, J. Levin, J. McWilliams, A. Miller, A. Moore, T. Powell, A. Shchepetkin, C. Sherwood, R. Signell, J. Warner y J. Wilkin, Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System, vol. 227, *Journal of Computational Physics*, 2008, p. 3595–3624.
- [81] C. Fairall, E. Bradley, J. Hare, A. Grachev y J. Edson, Bulk Parameterization of Air–Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm., *Journal of Climate*, 2003, pp. 571-591.
- [82] J. C. Warner, C. R. Sherwood, R. P. Signell, C. K. Harris y H. G. Arango, Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model., vol. 34, *Computers & Geosciences*, 2008, p. 1284–1306.
- [83] W. Emery y R. Thomson, «Data Analysis Methods in Physical Oceanography Second,» 2001.
- [84] V. Koutitonsky, «Time series analysis of lagoon variables. In Assessment of the Fate and Effects of Toxic Agents on Water Resources,» p. 127–142, 2007.
- [85] D. Pugh, «Tides, surges and mean sea-level (reprinted with corrections),» *John Wiley & Sons Ltd.*, 1996.
- [86] R. Pawlowicz, B. Beardsley y S. Lentz, «Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE.,» *Computers & Geosciences*, vol. 28(8), p. 929–937, 2002.
- [87] M. Foreman, «Manual for tidal heights analysis and prediction.,» *Pacific Marine Science Report*, vol. 97, p. 1–66, 1977.
- [88] G. Godin, *The analysis of tides and currents*, New York: B.B. Parker: In John Wiley & Sons, ed. *Tidal hydrodynamics*, 1991, p. 675–690.



- 89] [A. Gargett y G. Holloway, «Dissipation and diffusion by internal wave breaking,» *J. Mar. Res.*, vol. 42, pp. 15-27, 1984.
- 90] [W. Liu, «Moisture and latent heat flux variabilities in the tropical Pacific derived from satellite data.,» *J. Geophys. Res.*, vol. 93, pp. 6749-6760, 1988.
- 91] [H. Nepf, «Flow and Transport in Regions with Aquatic Vegetation.,» *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 44(1), p. 123–142, 2012a.
- 92] [H. Nepf, «Hydrodynamics of vegetated channels,» *Journal of Hydraulic Research*, vol. 50(3), p. 262–279, 2012b.
- 93] [M. Luhar y H. Nepf, «From the blade scale to the reach scale: A characterization of aquatic vegetative drag.,» *Advances in Water Resources*, vol. 51, p. 305–316, 2013.
- 94] [I. Orlanski, «A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows.,» *J. Comp. Sci.*, vol. 21, nº (3), pp. 251-269, 1976.
- 95] [R. A. Flather, «A tidal model of the northwest European continental shelf.,» *Memoires de la Societe Royale de Sciences de Liege*, 1976, 6, pp. 141-164.
- 96] [J. Gilabert, F. López, D. Tudela y C. Rodríguez, «Modelado hidrodinámico de alta resolución del Mar Menor- Estudio del intercambio de agua entre el Mar Menor y el Mediterráneo,» 2019.
- 97] [«Sentinel Hub Playground,» [En línea]. Available: <https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground/?source=S2&lat=37.65773212628274&lng=-0.6866455078125&zoom=10&preset=1-NATURAL-COLOR&layers=B01,B02,B03&maxcc=40&gain=1.0&gamma=1.0&time=2019-03-01%7C2019-09-13&atmFilter=&showDates=false>.
- 98] [S. (. W. Nearshore), «a third generation wave model,» Delft University of Technology, 1993-2020.



[[En línea]. Available: http://www.aemet.es/es/conocermas/borrascas/2019-2020/estudios_e_impactos/gloria.
99]