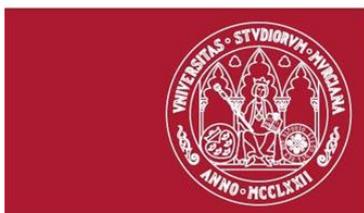
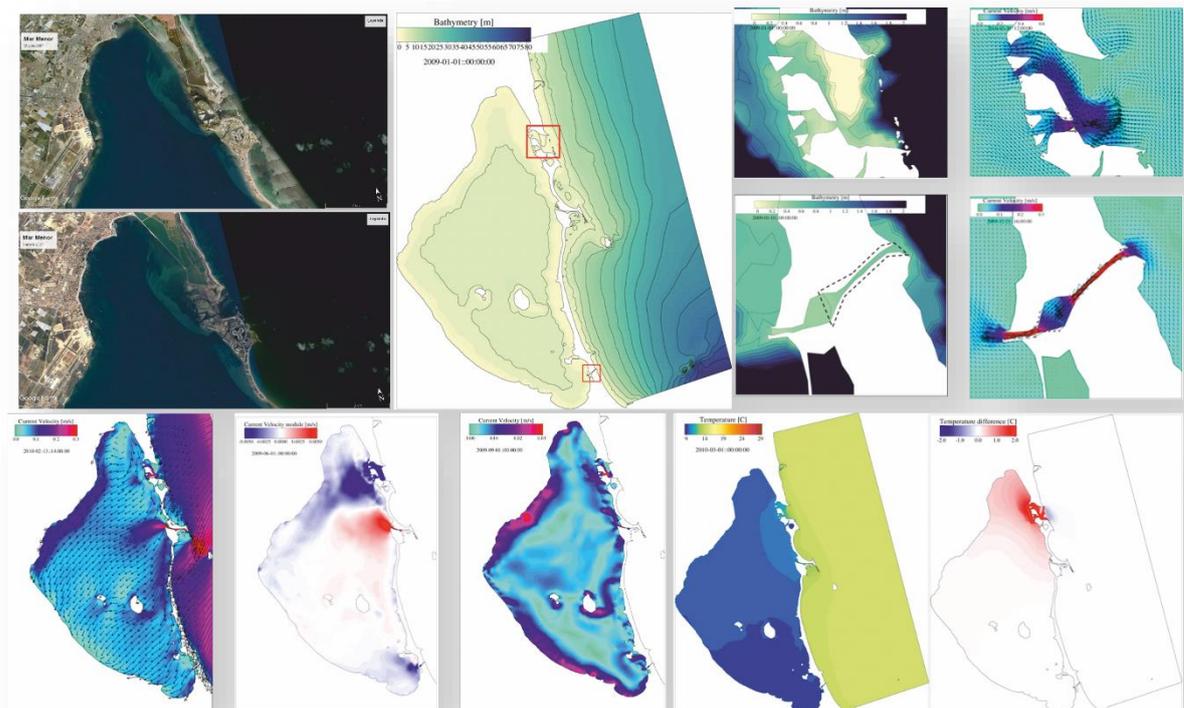


# Monitorización y modelado de la calidad de aguas y estado ecológico del MAR MENOR y prevención de impactos.

Desarrollo de modelos numéricos para la caracterización hidrodinámica del Mar Menor

1 de diciembre de 2017



**UNIVERSIDAD DE MURCIA**  
**GRUPO DE INVESTIGACIÓN “ECOLOGÍA Y ORDENACIÓN DE ECOSISTEMAS MARINOS COSTEROS”**

*Monitorización y modelado de la calidad de las aguas y estado ecológico del Mar Menor*

EQUIPO INVESTIGADOR:

Universidad de Murcia

INVESTIGADOR RESPONSABLE

Dr. Ángel Pérez Ruzafa

Departamento de Ecología e Hidrología, Universidad de Murcia

INVESTIGADORES:

Dra. Miriam García Oliva

Concepción Marcos Diego

Departamento de Ecología e Hidrología, Universidad de Murcia

COLABORADORES:

Dr. Georg Umgiesser

Dr. William McKiver

Dra. Francesca De Pascalis

Lda. Michol Ghezzeo

Istituto di Scienze Marine (Consiglio Nazionale delle Ricerche, CNR) (Sezione di Venezia), Italia.

*FONDO EUROPEO DE DESARROLLO REGIONAL: Una manera de hacer Europa*

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,**

**Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

## **- INTRODUCCIÓN**

La monitorización de la calidad de aguas del Mar Menor debe ir asociada a la elaboración de modelos predictivos que permitan anticipar problemas que podrían afectar no solo a la integridad ecológica del ecosistema, sino también a los numerosos bienes y servicios que presta y que repercuten en el rendimiento pesquero, la calidad de aguas para el baño, la estabilidad y dinámica de las playas y, en definitiva, a la actividad turística, uno de los principales motores económicos de la Región de Murcia. De hecho, la concentración de usos en las riberas del Mar Menor hace que la propia actividad económica asociada a la laguna de lugar a la demanda de actuaciones y a la descarga de diversas sustancias tanto de forma directa, como indirectamente a través de las distintas ramblas, que pueden tener consecuencias negativas en el funcionamiento del ecosistema e, incluso, en la propia actividad que las genera.

Por ello, es importante la implementación y puesta a punto de modelos que predigan las condiciones hidrográficas, la dinámica de las aguas y el transporte de partículas para el estudio de la conectividad entre poblaciones biológicas. Para ello, en el contexto de la implementación de un plan de monitorización se ha desarrollado el modelado hidrodinámico del Mar Menor, utilizando el modelo SHYFEM.

Los modelos numéricos son una herramienta muy potente para el estudio y la comprensión de diversos procesos relacionados con los movimientos de las masas de agua, como la influencia del mar abierto, el transporte de sedimentos o la dispersión de sustancias y organismos. Dicha herramienta se basa en el conocimiento de las interacciones entre los distintos elementos del sistema y permite evaluar la interacción entre los procesos naturales y los impactos antropogénicos. De este modo, los modelos numéricos permiten simular y anticipar los efectos de las diferentes actividades humanas.

Básicamente, la aplicación de los modelos numéricos se efectúa a través de tres fases: la elección del modelo adecuado para la cuenca estudiada, la discretización espacial mediante una rejilla numérica (grid) y la calibración y validación de los resultados obtenidos en la simulación utilizando datos de campo obtenidos in situ. Una vez implementado el modelo su aplicación puede realizarse para anticipar las consecuencias de distintos escenarios y así facilitar la toma de decisiones adecuadas.

## **1.- SIMULACIONES NUMERICAS DEL MAR MENOR**

### **1.1.- METODOLOGÍA**

#### **1.1.1.- Modelo Numérico**

El modelo numérico del Mar Menor y la zona adyacente del Mar Mediterráneo ha sido creado a través del software 3D SHYFEM (Shallow water hydrodynamic finite element model), desarrollado por ISMAR-CNR y en colaboración con el equipo de investigación del grupo de Modelado SHYFEM del departamento de Sistemi costieri e impatti antropici del ISMAR-CNR dirigido por el Dr. Georg Umgiesser. Más detalles sobre este programa se pueden encontrar en Umgiesser et al. (2004).

Inicialmente, los datos de entrada han sido tratados para conseguir la calidad y el formato requeridos por el modelo. La batimetría y el contorno en la línea de costa, obtenidos por el Dpto. de Ecología e Hidrología de la Universidad de Murcia, han sido interpolados sobre una malla computacional de elementos triangulares cuyo tamaño va desde 10 a 1800 m. Además, se ha tenido en cuenta la deposición de arenas en la zona de Encañizadas, como muestran las fotografías aéreas de fechas cercanas al período de la simulación, ya que en anteriores estudios no se habían considerado. La extensión de dichos bancos de arenas se han representado a partir de las fotografías aéreas de Google-Earth como elementos de escasa elevación sobre el nivel del mar (0.2 m en una primera aproximación) que pueden estar parcialmente parte del tiempo sumergidos. Posteriores simulaciones deberán realizarse sobre una batimetría y topografía más precisas de la zona.

El modelo consta de 10 capas verticales tipo z (véase Figura 1) de espesor uniforme de 1 m en las 7 capas más superficiales y de 13, 20 y 36 m en las restantes, hasta la zona más profunda.

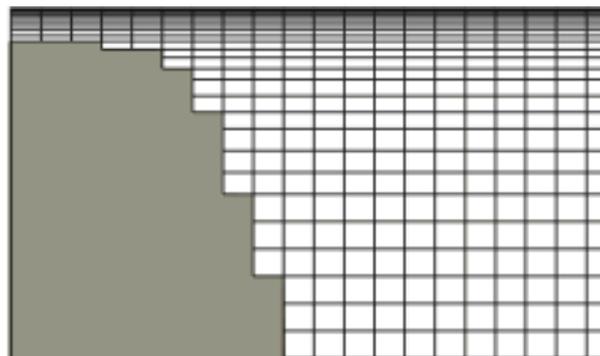


Fig.1 – Esquema de capas verticales de espesor uniforme (tipo z)

El contorno de mar abierto ha sido forzado con niveles de agua observados en la zona Suroeste del Mediterráneo por el sistema de Boyas de Puertos del Estado. Los caudales de los cursos de agua que vierten a la laguna han sido obtenidos a través del Método

*FONDO EUROPEO DE DESARROLLO REGIONAL: Una manera de hacer Europa*

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

*Monitorización y modelado de la calidad de las aguas y estado ecológico del Mar Menor*

Racional para cálculo de escurrentía, de acuerdo con los datos del estudio de De Pascalis et al. (2012). Los datos meteorológicos (viento, precipitación, evaporación, etc.) de la estación de la Academia General del Aire en San Javier han sido proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología.

La Figura 2 presenta la malla computacional del modelo del Mar Menor, identificando los canales que lo conectan con el Mar Mediterráneo así como los puntos de vertido de las ramblas que han sido consideradas en las simulaciones.

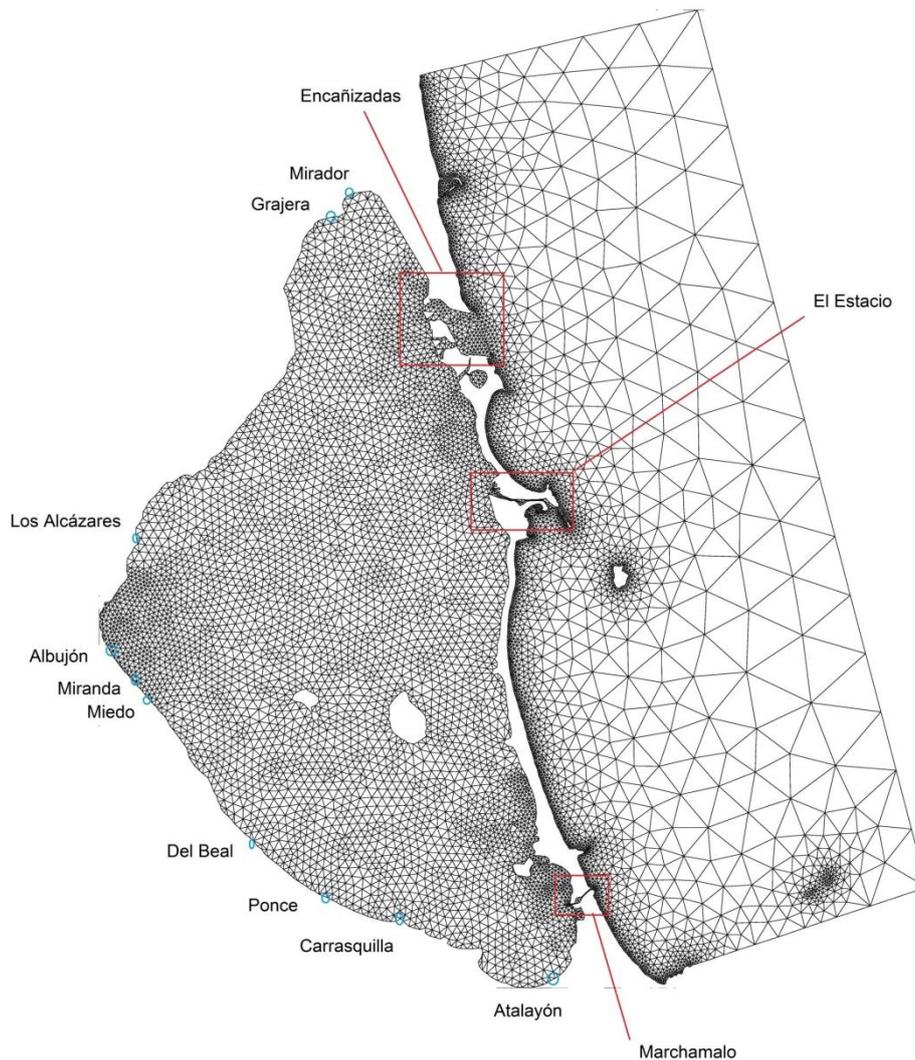


Fig. 2 – Malla computacional, ramblas y canales en el modelo del Mar Menor.

*Monitorización y modelado de la calidad de las aguas y estado ecológico del Mar Menor*

En relación a los datos de salinidad y temperatura en el contorno del modelo, se han utilizado los ficheros obtenidos por medio del proyecto Copérnicus para la zona del Mediterráneo (<http://marine.copernicus.eu/>). En la zona interior del Mar Menor, para los datos iniciales de la temperatura y salinidad del modelo se han usado los valores reales de campo obtenidos por el grupo de investigación Ecología y ordenación de ecosistemas marinos costeros y ya utilizados previamente en un modelo 2D de conectividad del Mar Menor (Ghezzi et al., 2015).

### 1.1.2.- Calibración

#### Rozamiento de fondo y turbulencia

Inicialmente, el rozamiento de fondo y la turbulencia del modelo han sido calibrados por comparación de los resultados del modelo hidrodinámico con datos observados de corrientes y niveles del agua en las cercanías del Canal de El Estacio durante el periodo 25/12/1985 al 25/04/1986, recogidos por Arévalo (1988). La calibración del modelo permite acotar los parámetros para los cuales no se dispone de suficiente información para obtener resultados ajustados a la realidad.

Respecto a la Turbulencia, inicialmente se usaron coeficientes fijos de viscosidad turbulenta vertical y difusividad turbulenta de valor 0,1 (m<sup>2</sup>/s) pero dichos valores dan lugar a inestabilidades en el modelo. Por ello, se cambió el valor de dichos coeficientes a 0,001, resultando la simulación igualmente inestable. Finalmente, se adoptó el uso del modelo GOTM (General Ocean Turbulence Model), descrito por Burchard et al. (1999) y basado en el método k-ε, permitiendo una solución estable para la simulación.

En cuanto al rozamiento de fondo, se adoptaron los valores recogidos en la Tabla 1 para el coeficiente de Strickler. El ajuste de cada solución se observa a través de los coeficientes de determinación, calculados para los resultados del modelo y las medidas en campo de los niveles de agua y las velocidades anteriormente descritos.

Como puede verse en la Tabla 1, el coeficiente de Strickler de 30 m<sup>1/3</sup>/s da una mejor aproximación para los niveles de agua, mientras el mejor ajuste con las velocidades de corriente se observa para un coeficiente de 27 m<sup>1/3</sup>/s. El coeficiente menor sería más representativo de la zona del canal de El Estacio, donde se han realizado las medidas, mientras que el coeficiente de 30 m<sup>1/3</sup>/s sería más representativo para el resto de la laguna, de acuerdo con el estudio de De Pascalis et al. (2012).

*Monitorización y modelado de la calidad de las aguas y estado ecológico del Mar Menor*

Tabla 1: Coeficientes de Rozamiento de Strickler y coeficientes de determinación de la comparación entre el modelo y los datos observados.

Coef. Strickler	R <sup>2</sup> niveles	R <sup>2</sup> velocidades
27	0.9424	0.7560
30	0.9426	0.7554
32	0.9425	0.7546
36	0.9417	0.7523

Por tanto, el uso de un coeficiente de Strickler de 30 m<sup>1/3</sup>/s y del modelo GOTM para la representación de la turbulencia se han adoptado para el resto de simulaciones.

Las Figuras 3 y 4 muestran la comparación entre los resultados del modelo calibrado y las medidas observadas en El Estacio para los niveles de agua y las velocidades de corriente, respectivamente, durante el período 25-12-1985 y 25-04-1986.

Las medias y las desviaciones estándar también han sido calculadas para los resultados del modelo y los datos observados, como puede verse en la Tabla 2.

El modelo representa adecuadamente la tendencia de los valores observados, ya que las desviaciones estándar tienen rangos similares tanto para el caso de los niveles de agua como para las velocidades de corriente.

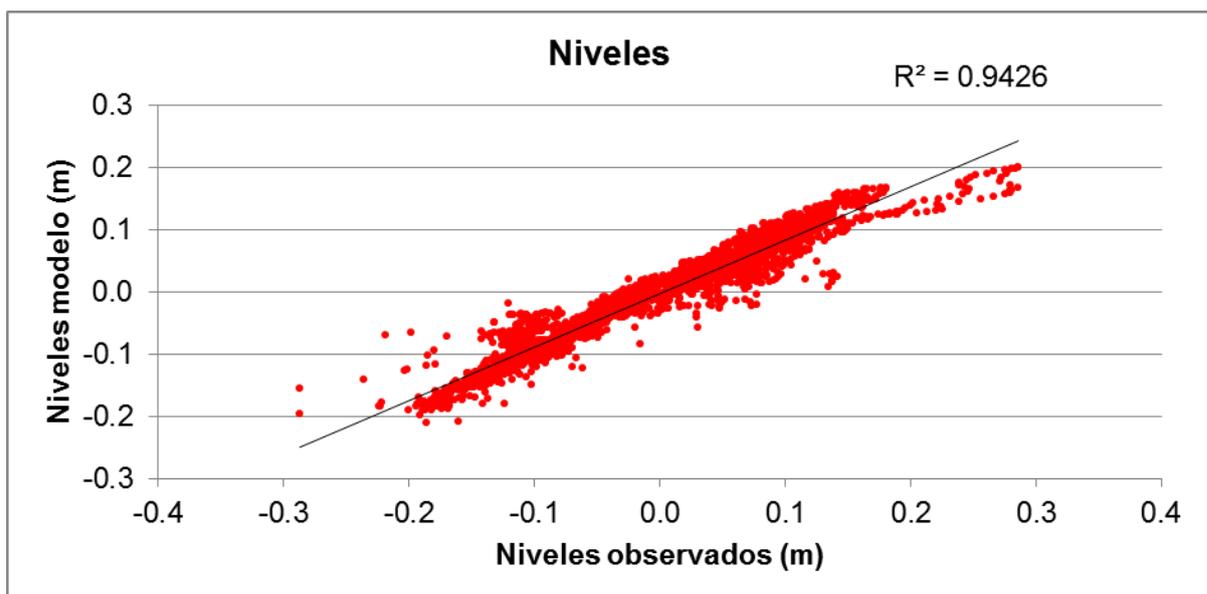


Fig. 3 – Comparación entre niveles de agua medidos en campo y resultados del modelo.

FONDO EUROPEO DE DESARROLLO REGIONAL: Una manera de hacer Europa

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

Monitorización y modelado de la calidad de las aguas y estado ecológico del Mar Menor

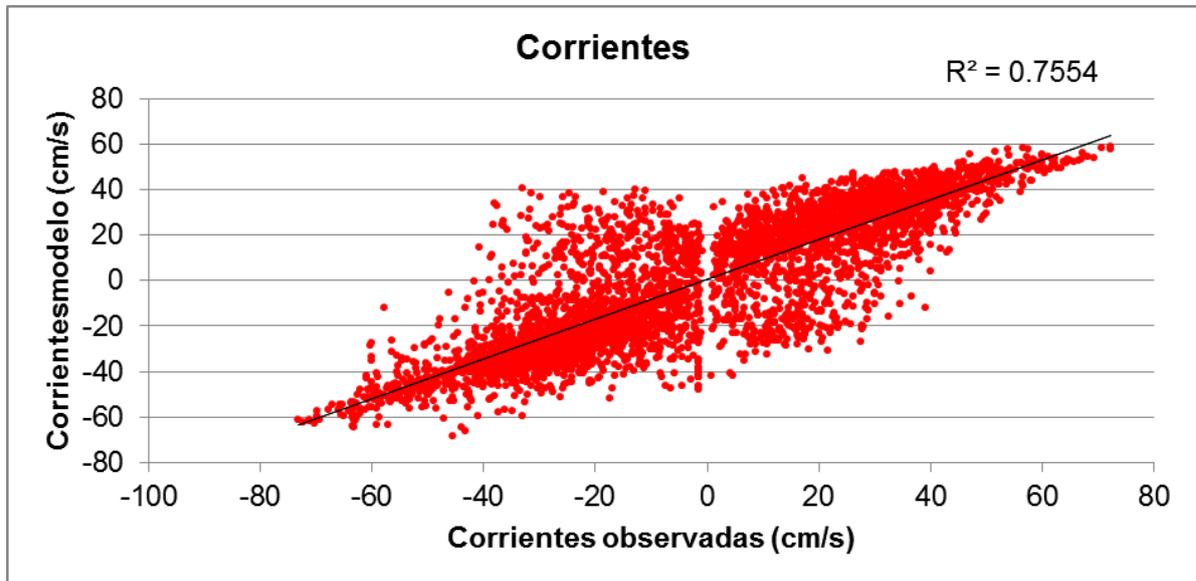


Fig. 4 – Comparación entre velocidades de corriente medidas en campo y resultados del modelo

Tabla 2: Valores medios y Desviación Estándar de las medidas de campo y los resultados del modelo durante el período de la simulación.

	Niveles de agua (m)		Corrientes (m/s)	
	Observados	Modelo	Observados	Modelo
<b>Media</b>	0,000	0,008	-0,008	-0,001
<b>Desviación Estándar</b>	0,100	0,079	0,295	0,297

Coeficiente de Escorrentía y salinidad en las ramblas

Por motivos de simplicidad y reducción del tiempo de cálculo del modelo, el coeficiente de escorrentía en la cuenca de los cursos de agua vertientes a la laguna se ha considerado espacialmente homogéneo y constante a lo largo del tiempo. En un futuro, se contempla la mejora de este aspecto del modelo a través de la implementación de un coeficiente de escorrentía dinámico, basado en estudios anteriores sobre modelado de la cuenca hidrográfica que rodea el Mar Menor (véase Martínez *et al.*, 2005). Para comprobar si dicho coeficiente ofrece una representación realista del efecto de la escorrentía en el modelo de

FONDO EUROPEO DE DESARROLLO REGIONAL: Una manera de hacer Europa

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

*Monitorización y modelado de la calidad de las aguas y estado ecológico del Mar Menor*

la laguna se han comparado los resultados del modelo y los datos de campo para dos valores distintos del coeficiente con el fin de encontrar el valor que da un mejor ajuste. La salinidad en algunas de las ramblas también ha sido ajustada en base a datos de campo con este propósito.

Dado que las medidas de salinidad y temperatura obtenidas en campo para distintos puntos a lo largo de la extensión de la laguna muestran que no existe estratificación, inicialmente, la comparación de los resultados del modelo con los datos observados se ha realizado promediando verticalmente.

Las figuras 5 y 6 muestran la estimación inicial del ajuste del modelo a los datos reales de salinidad y temperatura, en base a las medias mensuales, promediando los resultados del modelo y las medidas de campo sobre la extensión de la cuenca lagunar.

En el modelo inicial, el caudal de escorrentía que aportan las ramblas se consideró como agua dulce y para el coeficiente de escorrentía se tomó un valor de 6.5 %, siguiendo el estudio de De Pascalis et al. (2012). El caudal total de entrada de agua dulce en el modelo inicial supone aproximadamente 44 hm<sup>3</sup> durante el periodo de análisis (01/04/2009 al 31/03/2010).

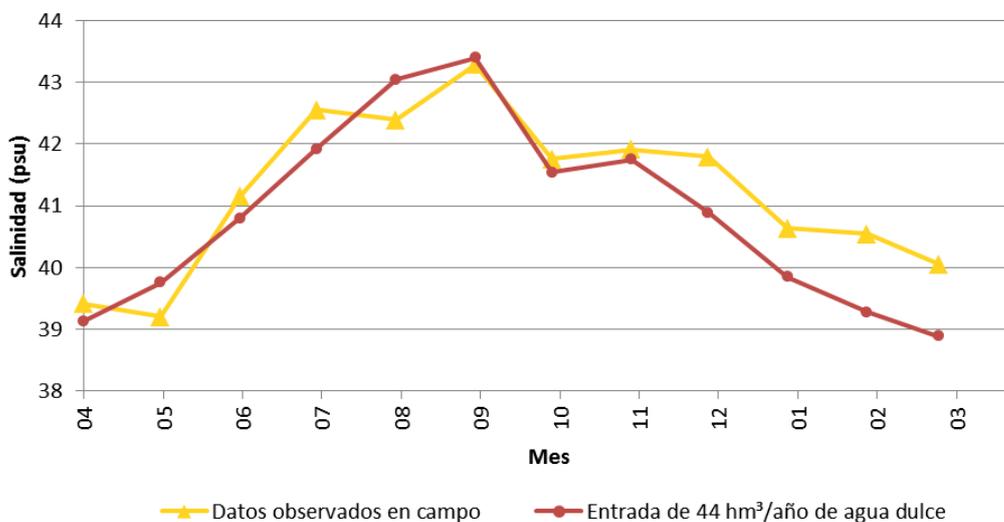


Fig. 5 – Medias mensuales de salinidad observadas y calculadas a partir del modelo inicial.

Monitorización y modelado de la calidad de las aguas y estado ecológico del Mar Menor

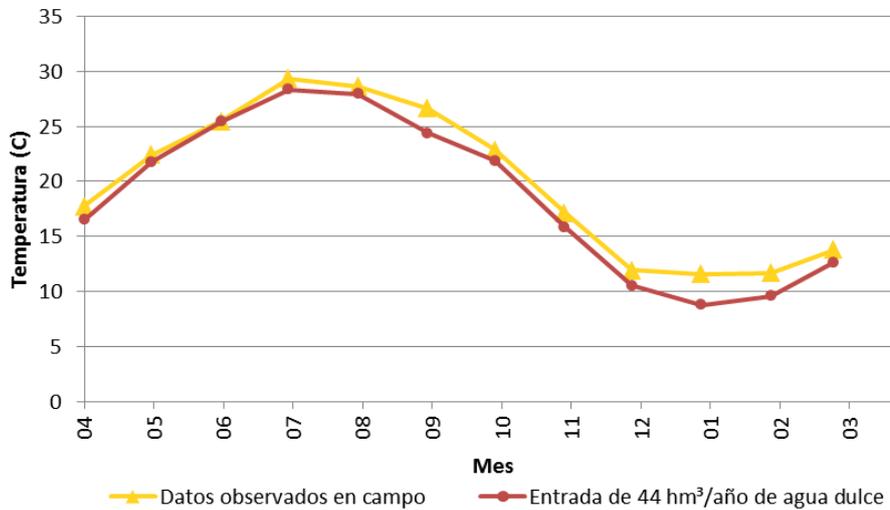


Fig. 6 – Medias mensuales de temperatura observadas y calculadas a partir del modelo inicial.

Las diferencias entre los resultados del modelo inicial y los datos observados se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3.- Diferencias entre valores medios mensuales del modelo inicial y observados en campo.

Salinidad (psu)		Temperatura (C)	
Desviación Estándar	Diferencia Máxima	Desviación Standard	Diferencia Máxima
0.614	-1.260	0.769	-2.817

Se observa un déficit tanto de salinidad como de temperatura en el modelo especialmente durante ciertos meses del año. Una de las causas puede ser la consideración de las ramblas como aportes de agua dulce. Sin embargo, los datos de campo obtenidos por el grupo de investigación en 2010 (Pérez-Ruzafa *et al.*, 2010), muestran que algunas de las ramblas presentaban un nivel de salinidad importante en el período de la simulación. Por tanto, se ajustó un nuevo modelo en el cual la salinidad de las ramblas de Alcázares,

Monitorización y modelado de la calidad de las aguas y estado ecológico del Mar Menor

Albujón, Miranda, Miedo, Del Beal, Ponce y Carrasquilla ha sido definida a partir de los datos de dicho informe.

Aun así, de la comparación de las medias mensuales de salinidad de los modelos con los datos de campo se observa que aunque el déficit de salinidad para el nuevo modelo es menor aún existen diferencias perceptibles durante varios meses del año (Figura 7). En cuanto a la temperatura, la Figura 8 muestra un buen ajuste entre los resultados del modelo inicial y del nuevo modelo.

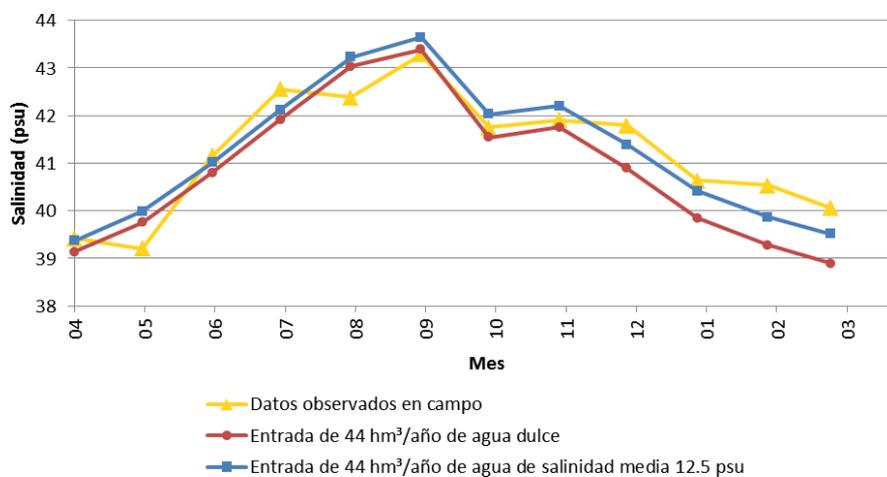


Fig. 7 – Medias mensuales de salinidad observadas y calculadas a partir del modelo inicial y del modelo con medidas de salinidad en las ramblas.

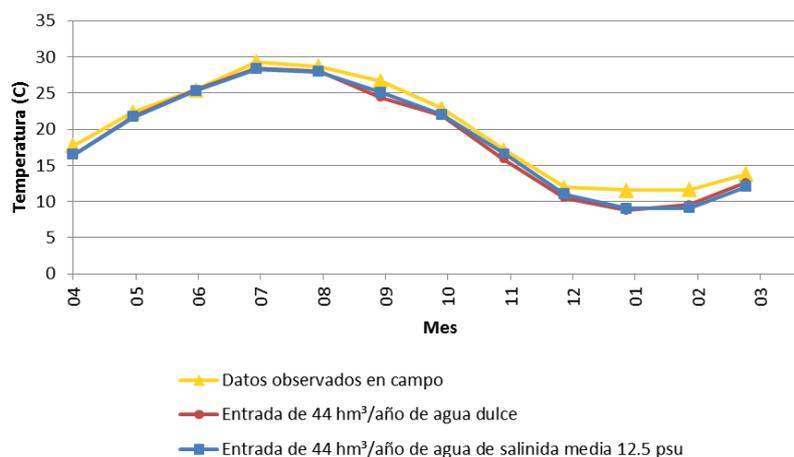


Fig. 8 – Medias mensuales de temperatura observadas y calculadas a partir del modelo inicial y del modelo con medidas de salinidad en las ramblas.

FONDO EUROPEO DE DESARROLLO REGIONAL: Una manera de hacer Europa  
 Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
 Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
 T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

Monitorización y modelado de la calidad de las aguas y estado ecológico del Mar Menor

En relación al déficit de salinidad del nuevo modelo, señalado anteriormente, si se comparan las medias mensuales de salinidad entre las medidas en campo y el modelo con salinidad en ramblas y la curva de escorrentía (Figura 9) se observa que el mayor déficit de salinidad del modelo se da en la época del año donde se concentran las aportaciones más altas y más frecuentes de los caudales de escorrentía lo que puede ir asociado a fluctuaciones en la salinidad de los vertidos dependiendo de que dominen las aguas de lluvia o vertidos de salmueras con salinidades superiores a las consideradas.

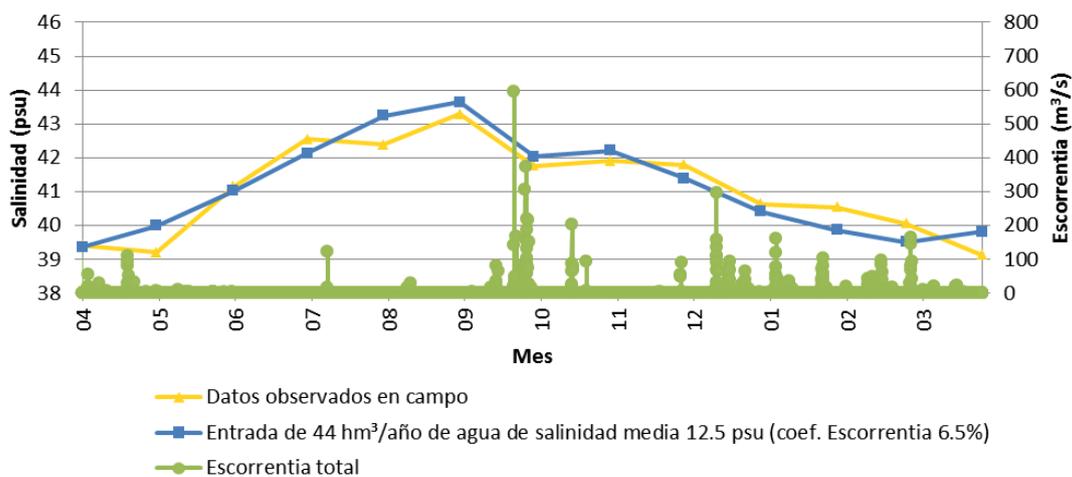


Fig. 9 – Medias mensuales de salinidad observadas y calculadas a partir del modelo con medidas de salinidad en las ramblas y superposición de la escorrentía total.

Por otro lado, el déficit de salinidad del modelo podría ser debido también a una sobreestimación de la escorrentía, ya que algunos autores mencionan valores del coeficiente de escorrentía menores de los que se han usado para el modelo inicial (Martínez *et al.*, 2005). Para comprobar dicho efecto, se realizó una nueva simulación donde los caudales de escorrentía fueron calculados con un coeficiente de 1.6 %, como indica el proyecto Lagoons (Hesse *et al.*, 2013).

Los resultados (Figura 10) muestran que el mejor ajuste se consigue un coeficiente de escorrentía de 6.5 % (o en todo caso una entrada de aguas salobres procedentes de la cuenca de drenaje de 44 hm<sup>3</sup>) y dicho valor ha sido el utilizado para el resto de simulaciones en este estudio.

Monitorización y modelado de la calidad de las aguas y estado ecológico del Mar Menor

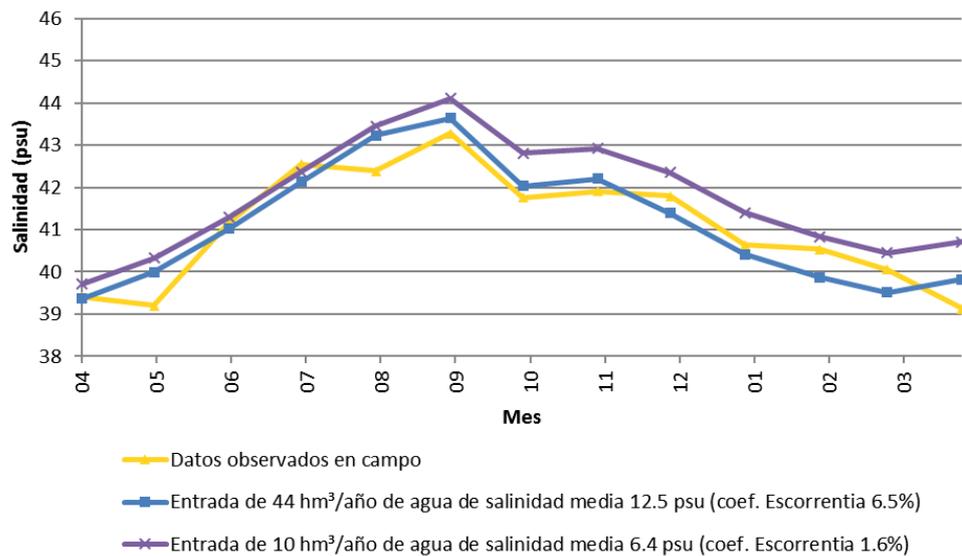


Fig. 10- Salinidad media mensual: observaciones en campo y resultados del modelo con coeficientes de escorrentía 1.6 % y 6.5 %.

### 1.1.3.- Validación

A continuación, el modelo ha sido validado por comparación de los resultados con observaciones de salinidad y temperatura en distintas estaciones a lo largo del Mar Menor y varias épocas del año durante 2009. La ubicación de las estaciones se muestra en la Figura 11. Cada estación es representativa de cada una de las zonas en las que se ha dividido el área de la laguna durante estudios previos (Pérez-Ruzafa, 2005).

*Monitorización y modelado de la calidad de las aguas y estado ecológico del Mar Menor*

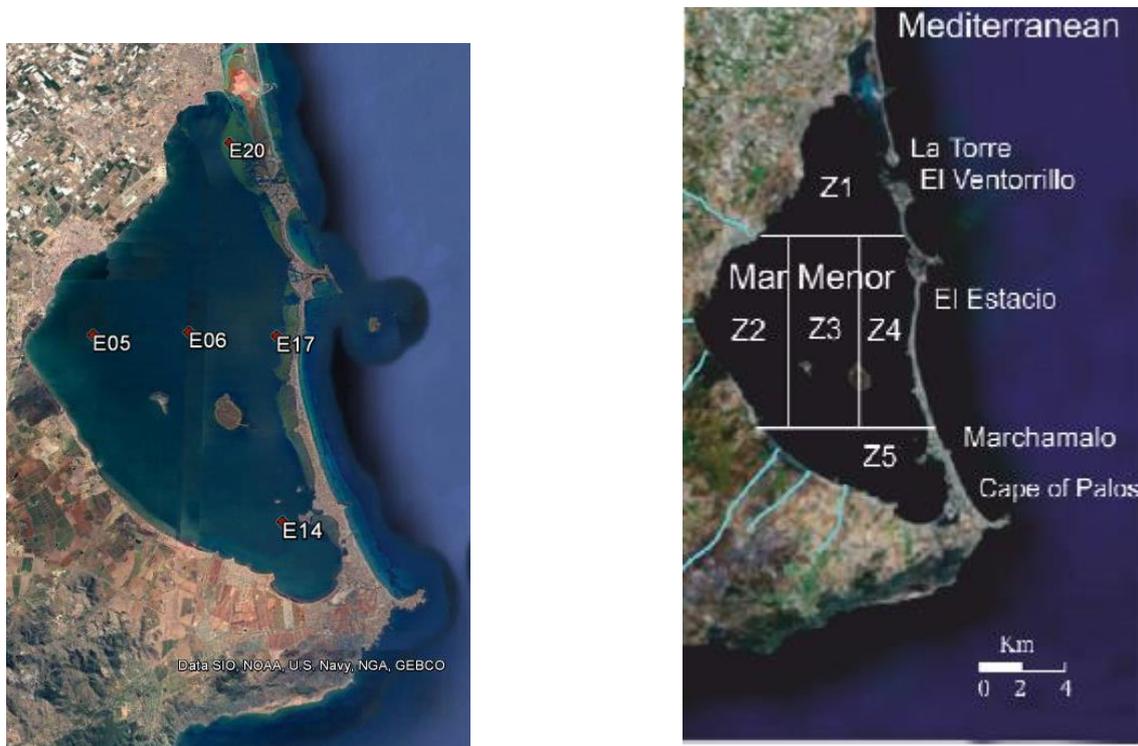


Fig. 11- Estaciones de muestreo consideradas en la validación del modelo y zonas a las cuales representan.

Las Figuras 12 a 16 presentan la comparación entre los resultados de temperatura y salinidad del modelo calibrado en el apartado anterior y los datos de campo medidos en la capa superficial de 1 m de profundidad.

Dada la estructura tridimensional del modelo, se han comparado también los perfiles verticales de salinidad y temperatura obtenidos en el modelo con los datos medidos en campo, como se muestra en las Figuras 17 a 21. Se han obtenido los valores para tres fechas distintas, a modo de ejemplo sobre las variaciones a lo largo del año.

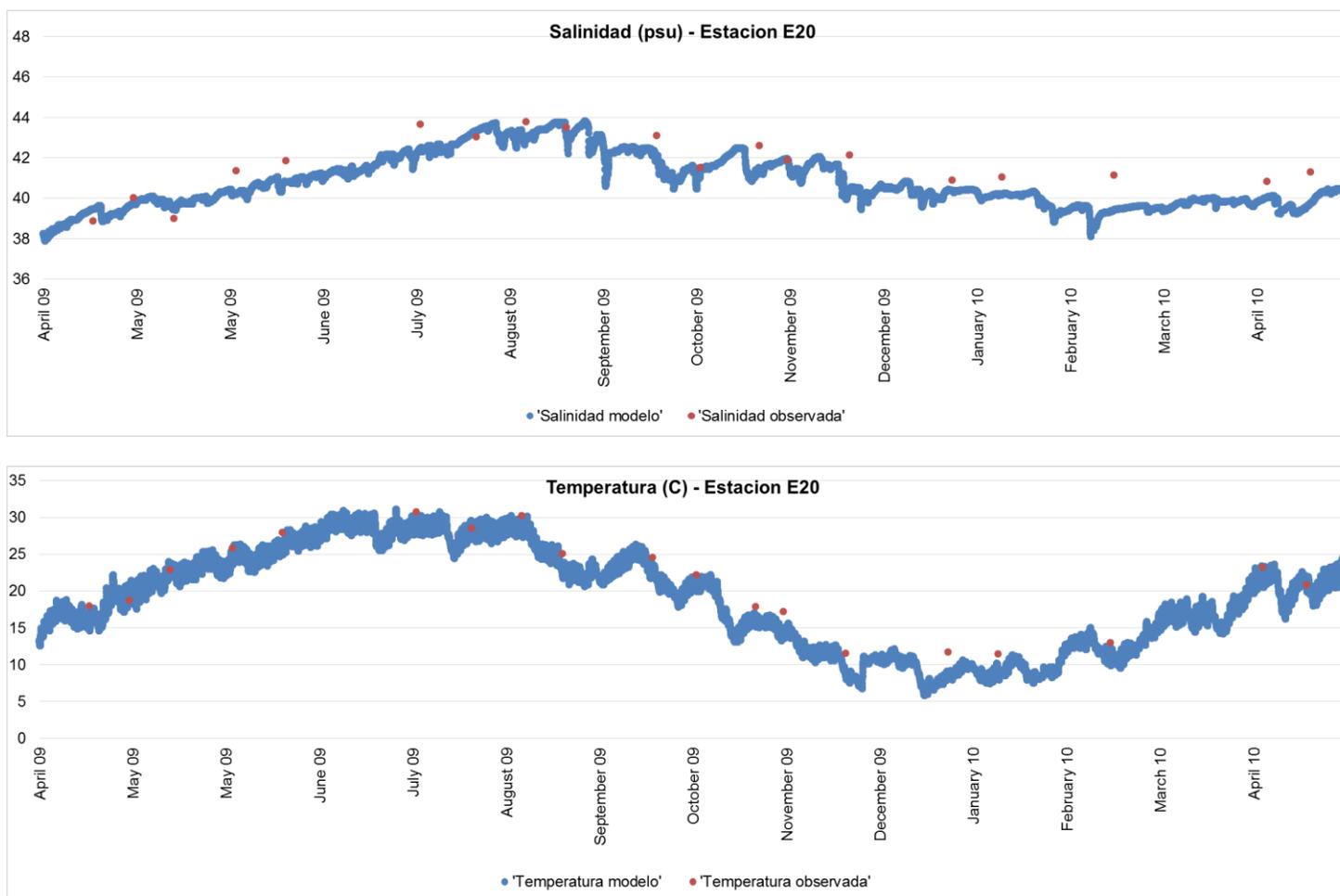


Fig. 12 – Salinidad y temperatura observadas y modeladas en la capa superficial de la Zona 1.

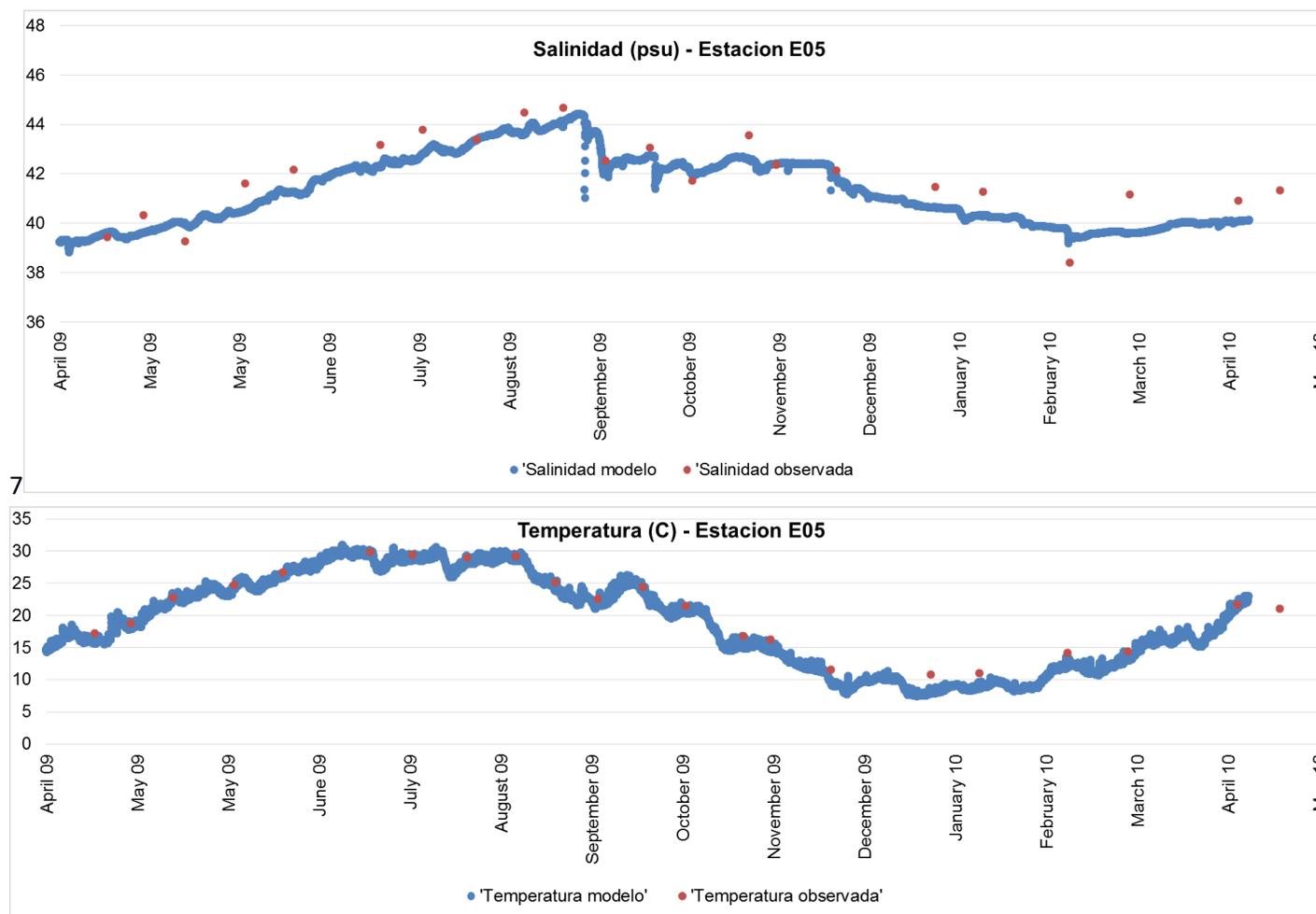


Fig.13 – Salinidad y temperatura observadas y modeladas en la capa superficial de la Zona 2.

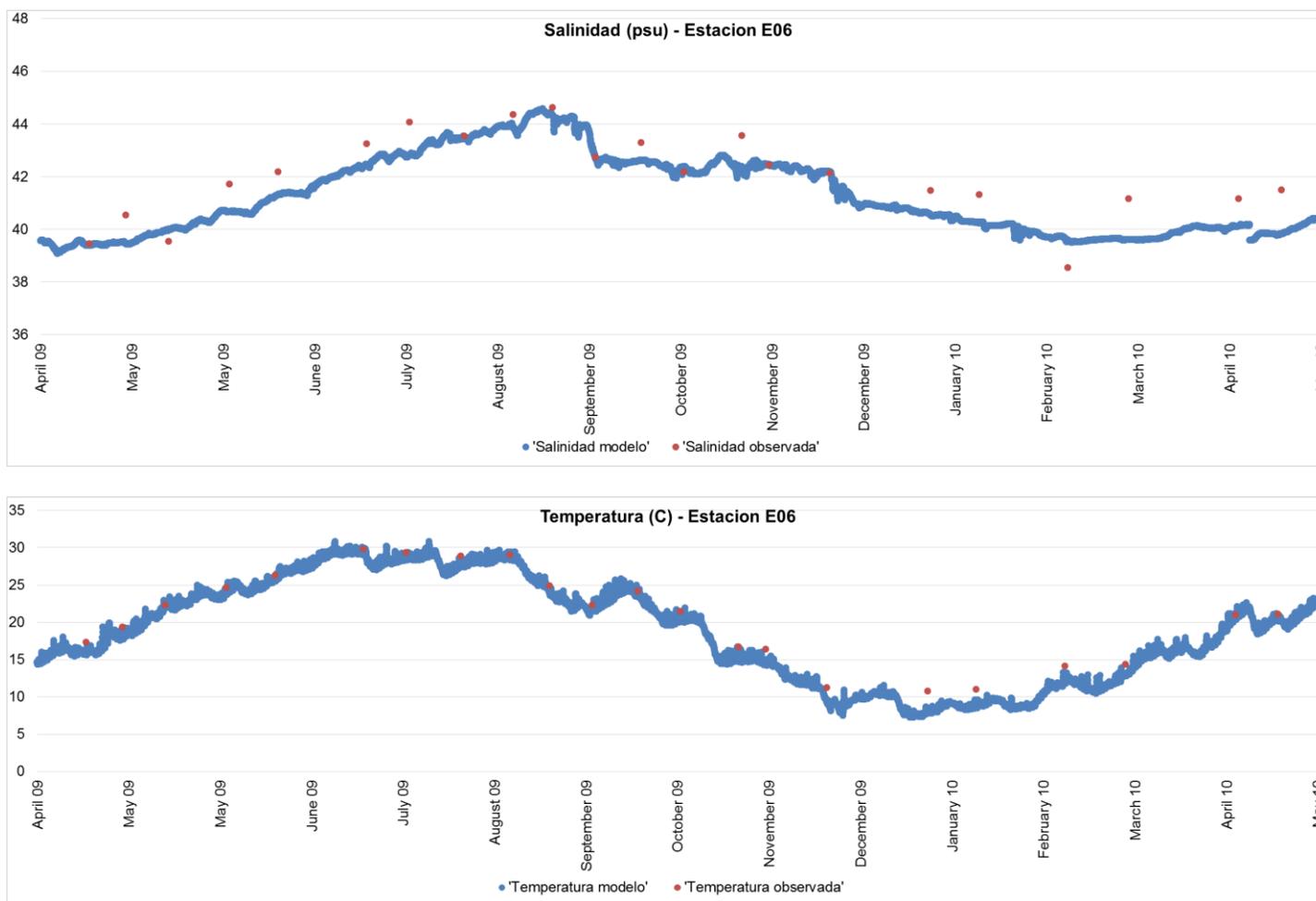


Fig. 14 – Salinidad y temperatura observadas y modeladas en la capa superficial de la Zona 3.

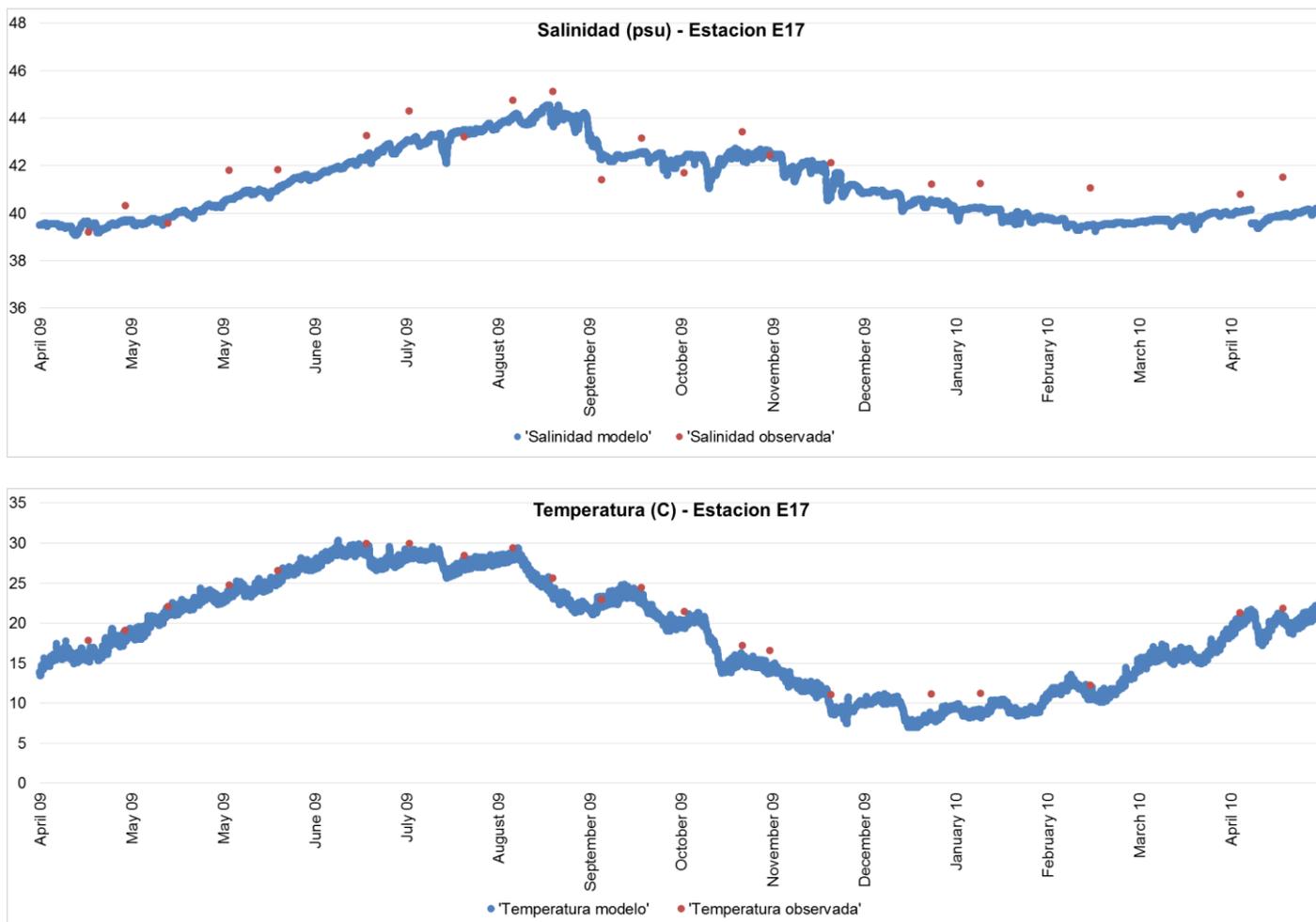


Fig. 15 – Salinidad y temperatura observadas y modeladas en la capa superficial de la Zona 4.

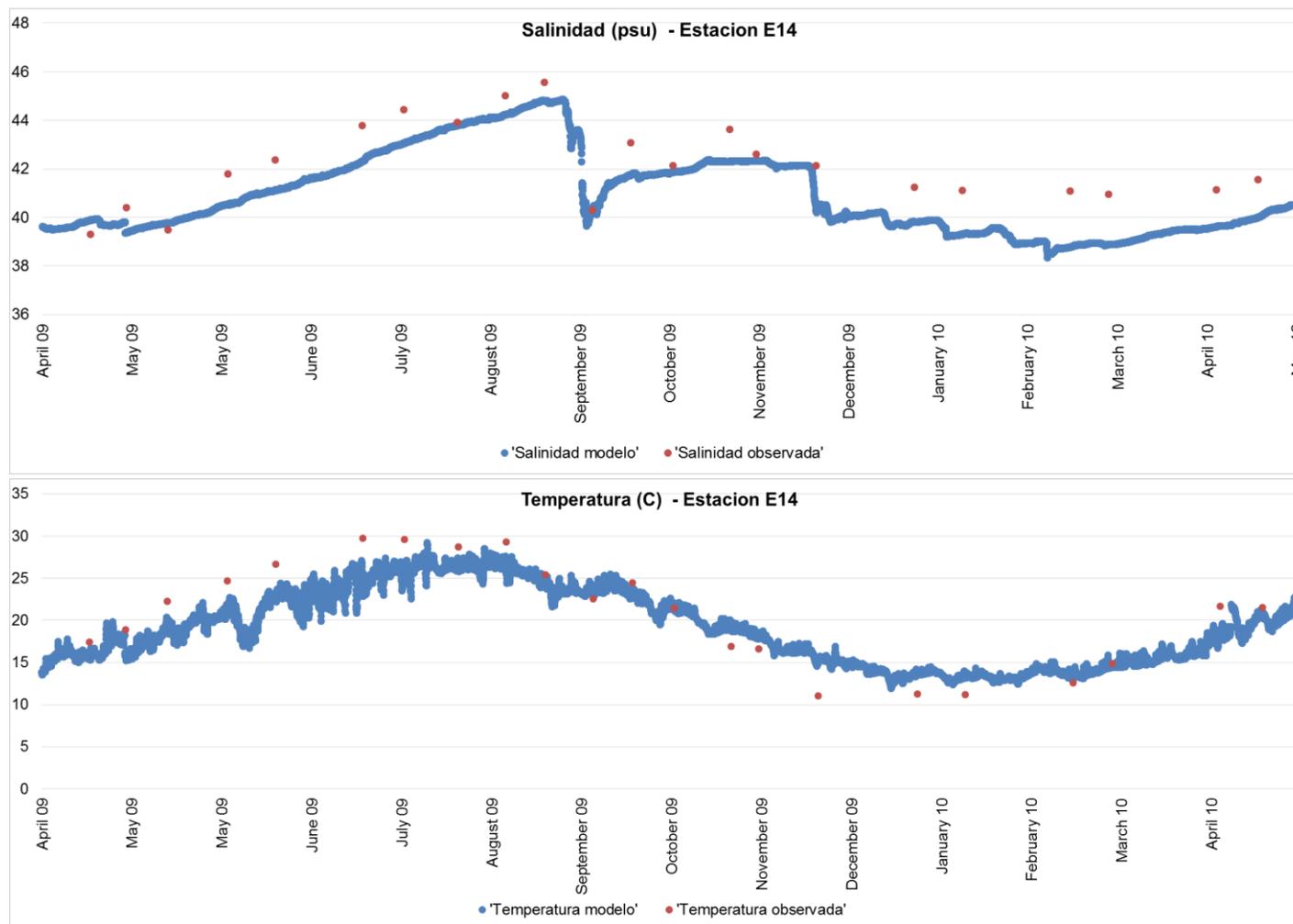


Fig. 16 – Salinidad y temperatura observadas y modeladas en la capa superficial de la Zona 5

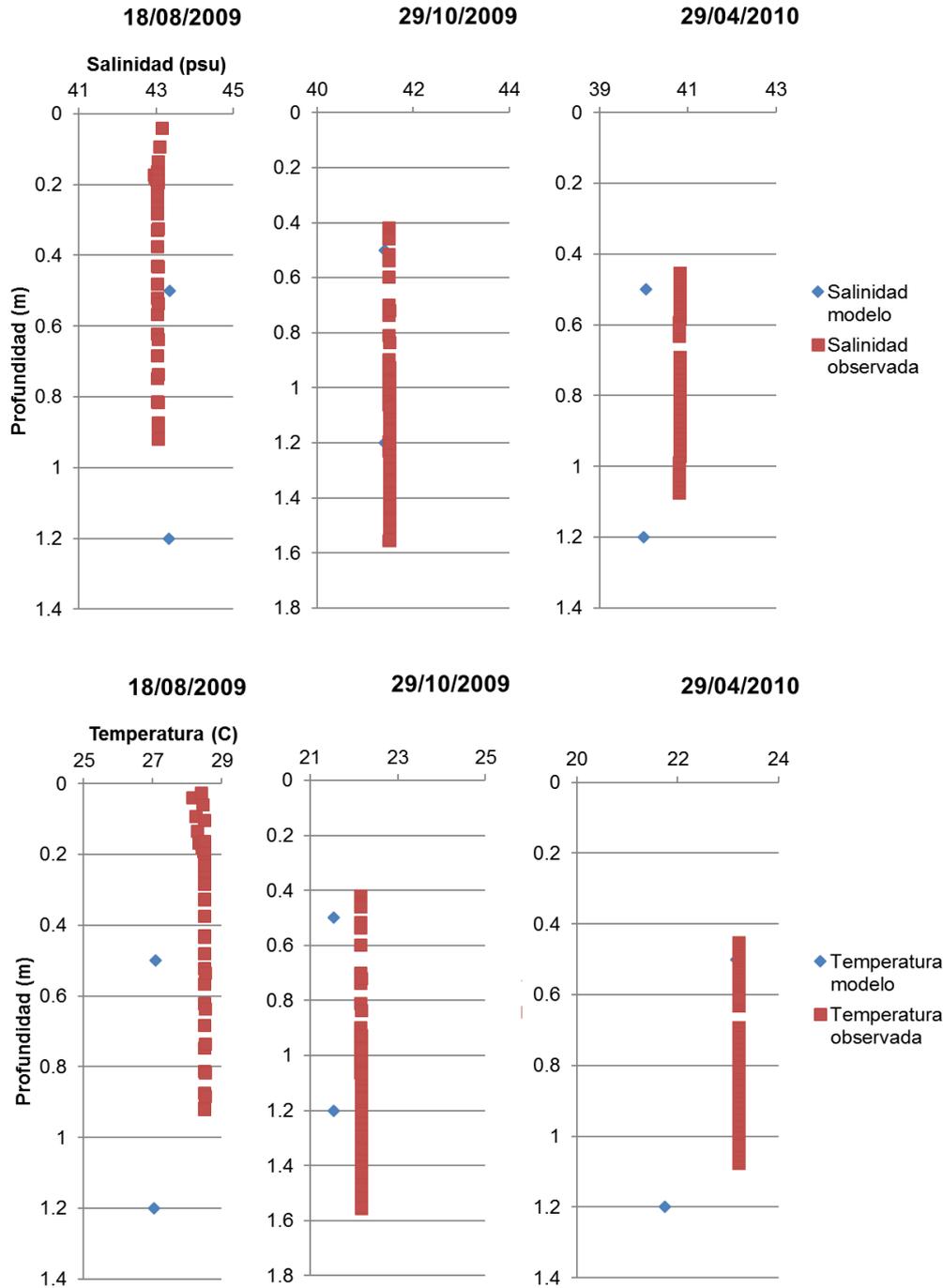


Fig. 17 – Perfiles verticales de salinidad y temperatura observados y modelados en distintas fechas para la estación E20 (Zona 1).

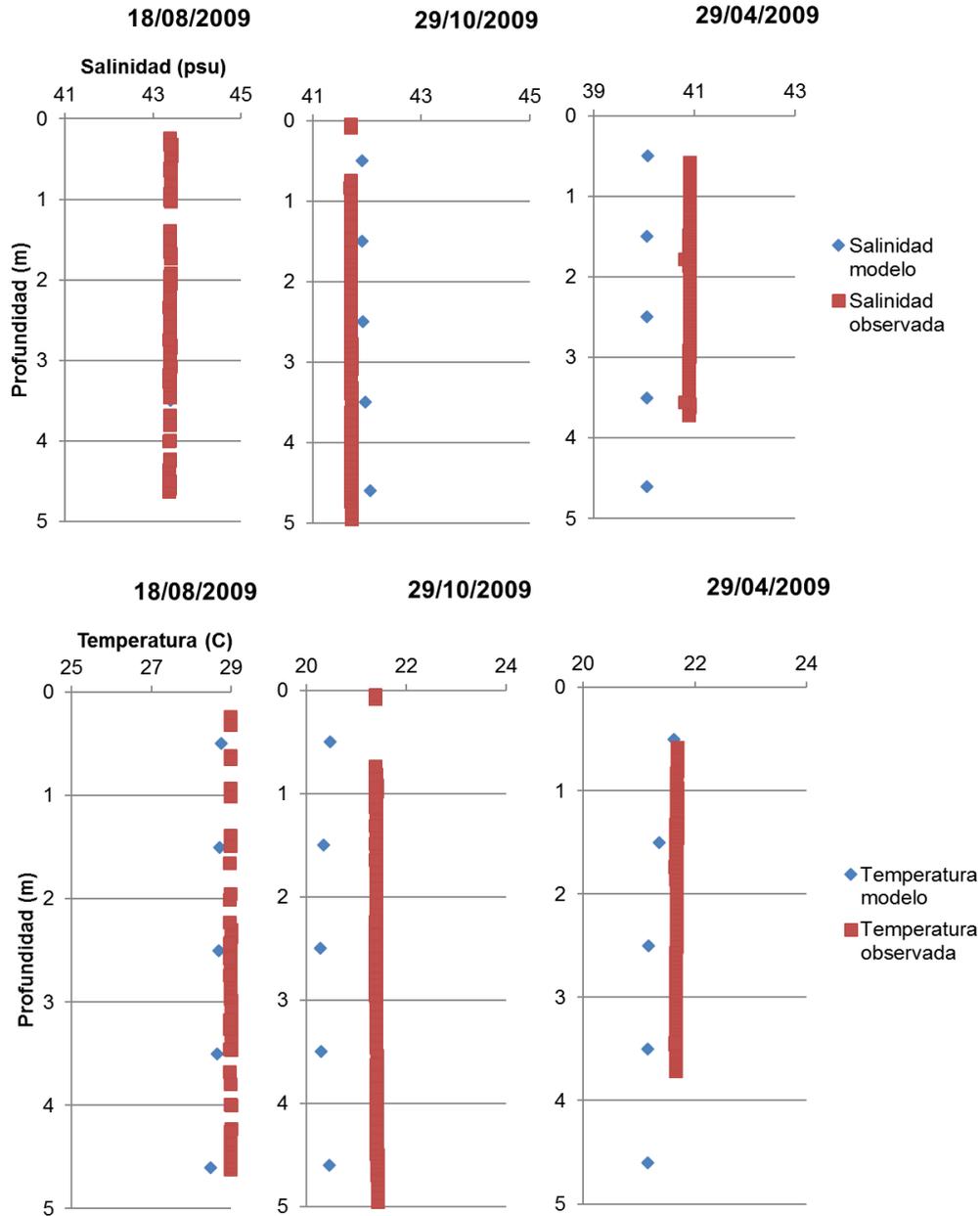


Fig. 18 – Perfiles verticales de salinidad y temperatura observados y modelados en distintas fechas para la estación E05 (Zona 2).

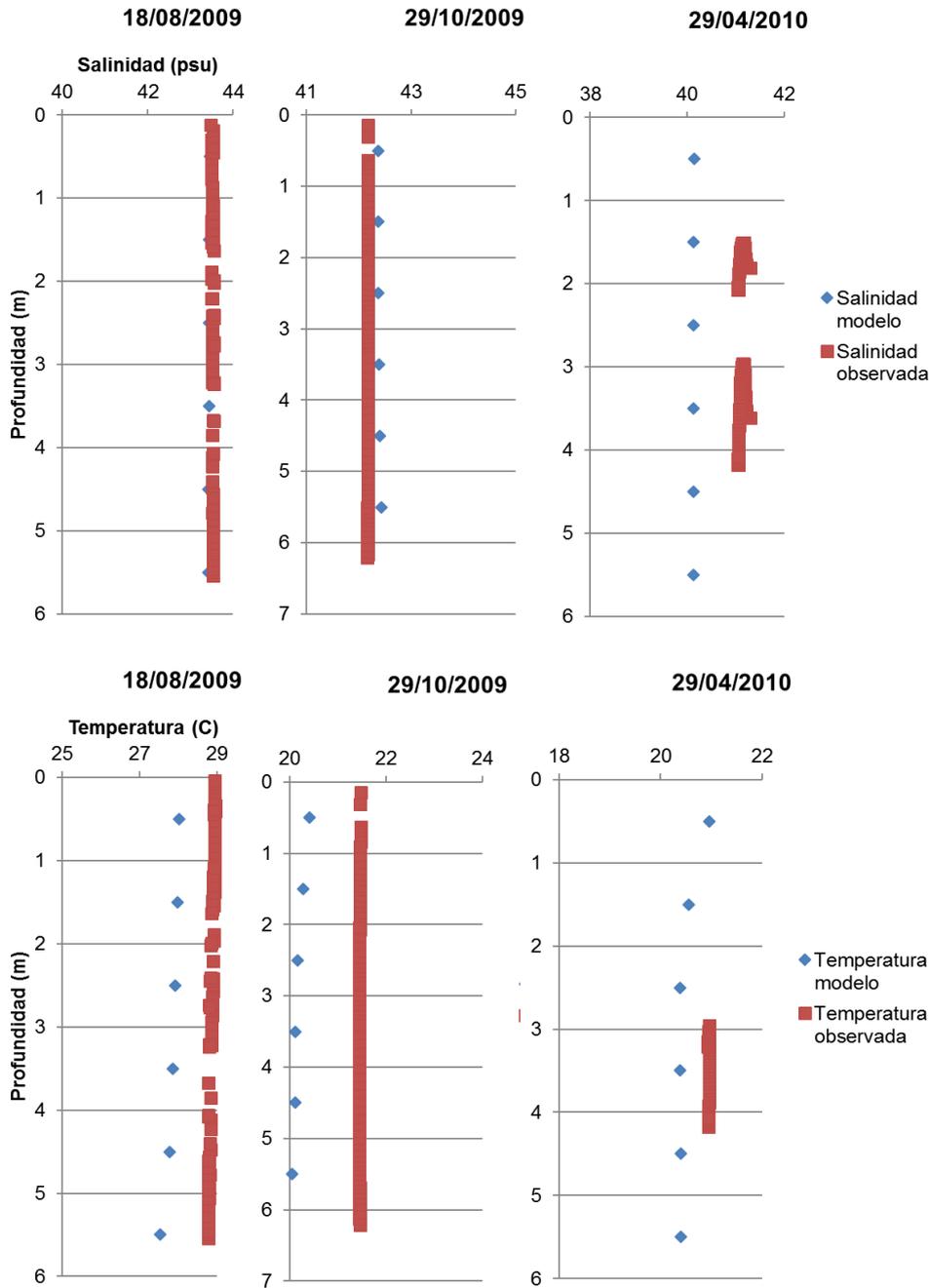


Fig. 19 – Perfiles verticales de salinidad y temperatura observados y modelados en distintas fechas para la estación E06 (Zona 3).

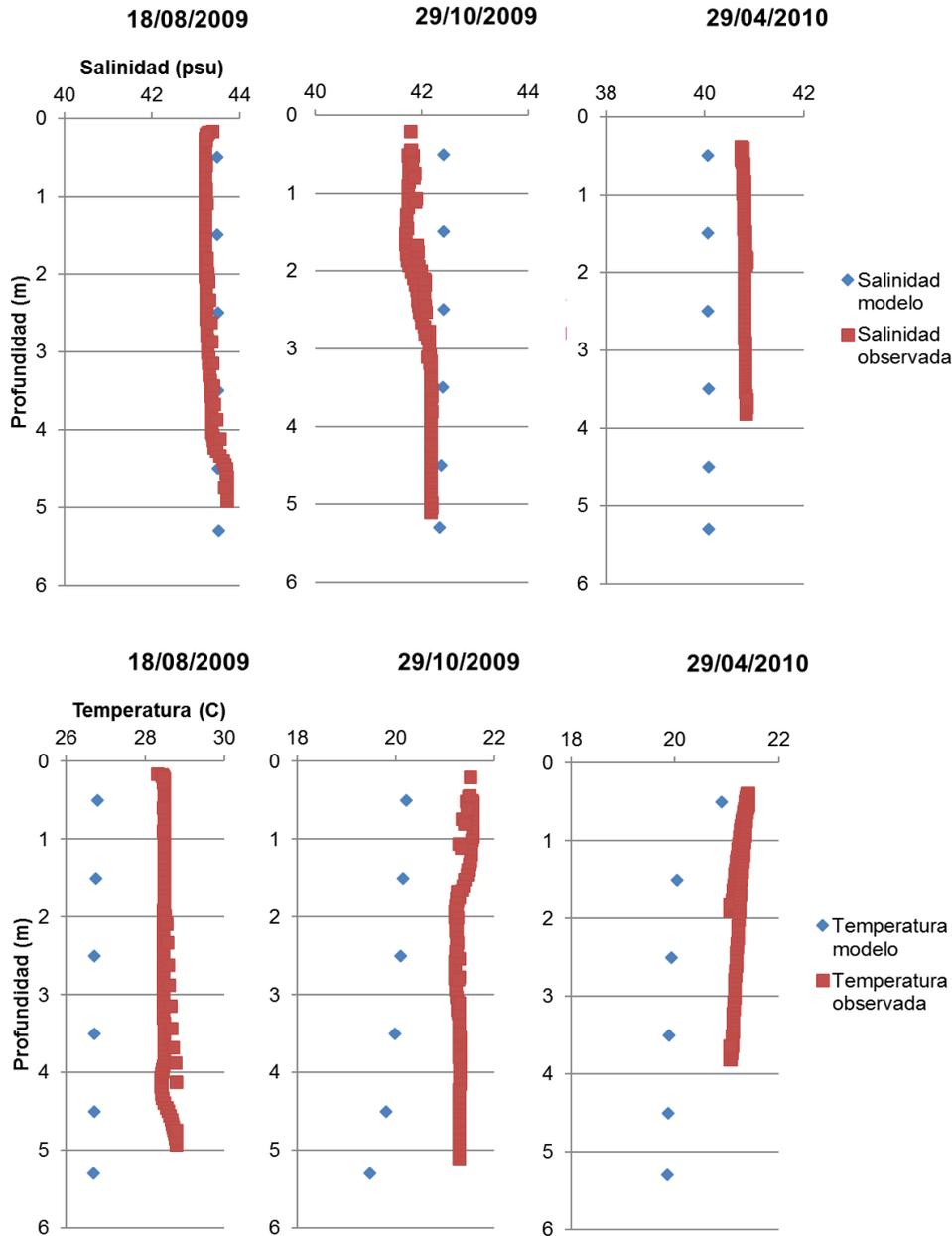


Fig. 20 – Perfiles verticales de salinidad y temperatura observados y modelados en distintas fechas para la estación E17 (Zona 4).

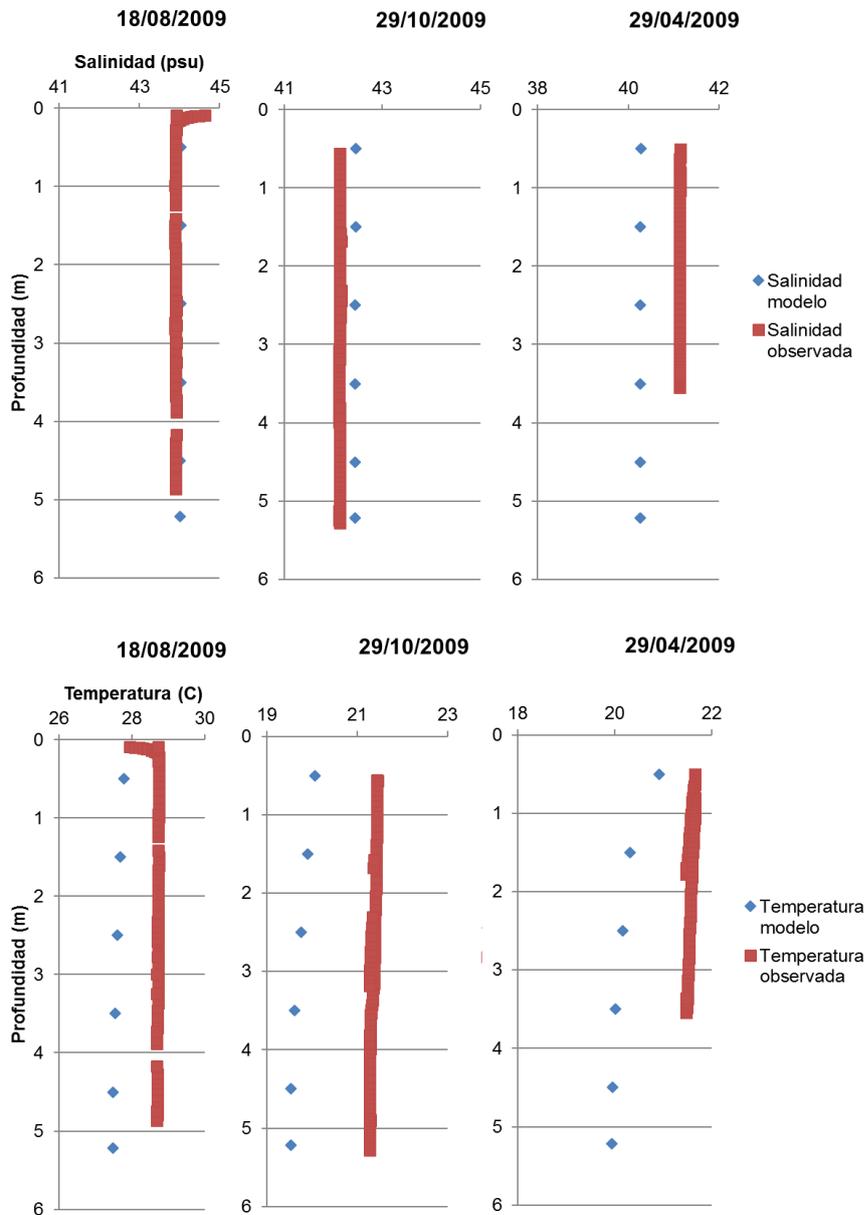


Fig. 21 – Perfiles verticales de salinidad y temperatura observados y modelados en distintas fechas para la estación E14 (Zona 5).

Se observa buen ajuste de los resultados del modelo con los datos de campo tanto para las series temporales en la capa superficial como para los perfiles verticales.



#### 1.1.4.- Escenarios de Dragado

Con el fin de investigar el efecto del dragado de los canales de Encañizadas y Marchamalo sobre el comportamiento de la laguna y su potencial impacto en su funcionamiento ecológico, se han creado otras 7 batimetrías reflejando posibles escenarios.

La Tabla 4 muestra las profundidades máximas de dragado en cada escenario. Para cada batimetría se ha creado un modelo con los mismos parámetros que el modelo base de la laguna en el año 2009-2010, descrito anteriormente.

Dado que en años recientes ha ocurrido una importante acumulación de sedimentos en el canal de Encañizadas, se ha considerado un caso que contempla el mantenimiento del canal de Encañizadas por medio del ensanchamiento de la sección más estrecha, dejando dicho sub-canal a cotas similares a la zona adyacente (0.5 m de profundidad). De forma similar, se ha contemplado el mantenimiento en el canal de Marchamalo, dragando la parte exterior del canal o el canal completo hasta 0.5 m. Se considera también la combinación de ambas tareas de mantenimiento en Encañizadas y Marchamalo.

Tabla 4.- Profundidades máximas de dragado para cada escenario simulado.

Caso	Prof. Encañizadas (m)		Prof. Marchamalo (m)	
	Media	Máxima	Media	Máxima
Sin_dragado	0.8	3.0	0.4	0.6
Mant_Enc	0.8	3.0	0.4	0.6
Enc_1m	0.9	1.0	0.4	0.6
Enc_1.5m	1.4	1.5	0.4	0.6
Mar_parc_0.5m	0.8	3.0	0.4	0.6
Mar_0.5m	0.8	3.0	0.5	0.5
Mar_1m	0.8	3.0	1.0	1.0
Mar_1.5m	0.8	3.0	1.5	1.5
Mant_Enc-Mar_0.5m	0.8	3.0	0.5	0.5
Enc_Mar_1m	0.9	1.0	1.0	1.0
Enc_Mar_1.5m	1.4	1.5	1.5	1.5

Para las situaciones Enc\_1m, Enc\_1.5m, Mar\_0.5m, Mar\_1m y Mar\_1.5m, que representan actuaciones de mayor magnitud, se ha considerado que el terreno se regulariza en la zona de dragado en torno a la profundidad máxima, de 0.5, 1.0 y 1.5 m, respectivamente. En todas las simulaciones que afectan a las Encañizadas, las zonas parcialmente emergidas, como el banco de arenas que parece estar colmatando el canal, se ha aplicado también el mismo

aumento de profundidad aplicado a cada simulación, considerando que su cota inicial es de 0.2 m sobre el nivel medio del mar.

Las Figuras 22 a 30 muestran la batimetría general en el dominio del modelo y en los canales de Encañizadas y Marchamalo para los distintos escenarios contemplados en este estudio.

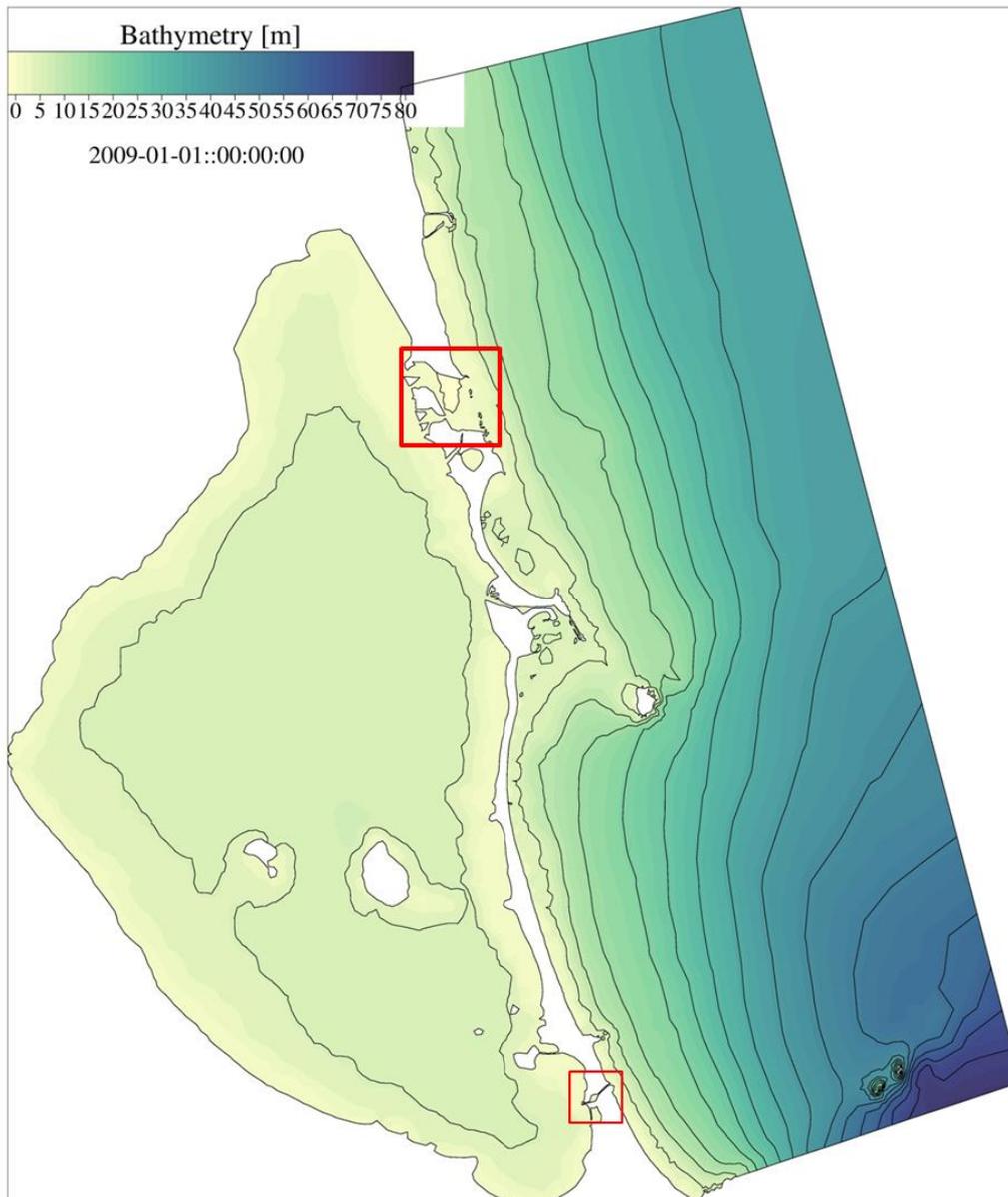


Fig. 22 – Batimetría en el dominio del modelo

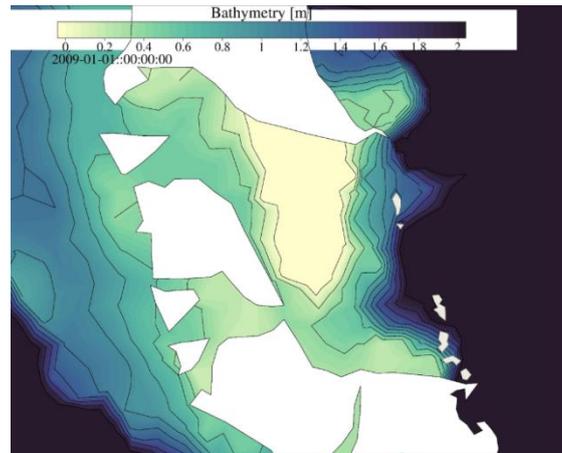
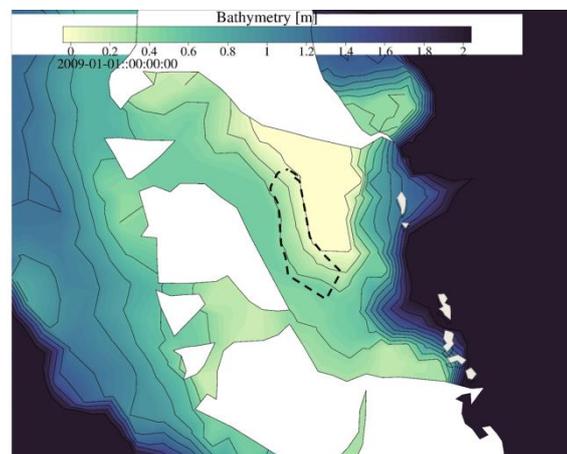
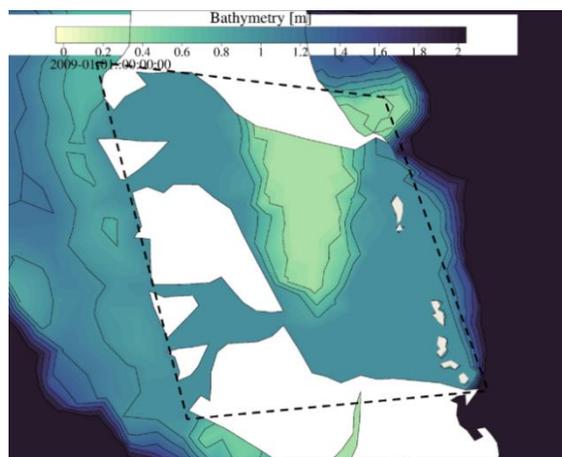


Fig. 23– Batimetría en el canal de Encañizadas – Situación sin dragado



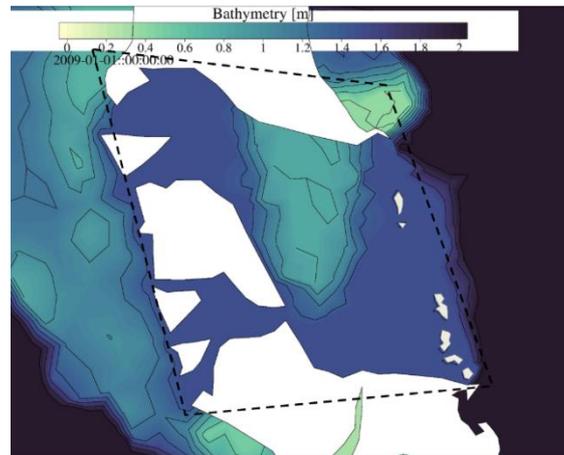
----- Zona de dragado

Fig. 24 – Batimetría en el canal de Encañizadas – Mant\_Enc



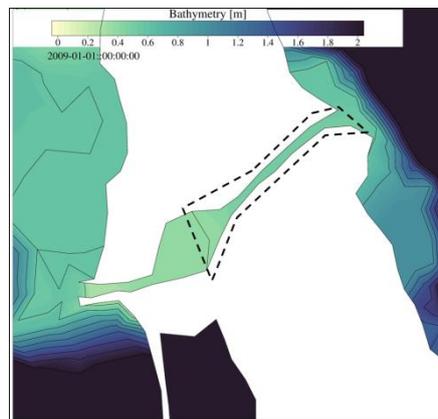
----- Zona de dragado

Fig. 25– Batimetría en el canal de Encañizadas – Enc\_1m



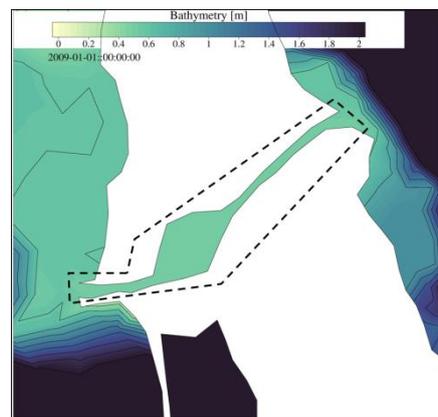
--- Zona de dragado

Fig. 26 – Batimetría en el canal de Encañizadas – Enc\_1.5m



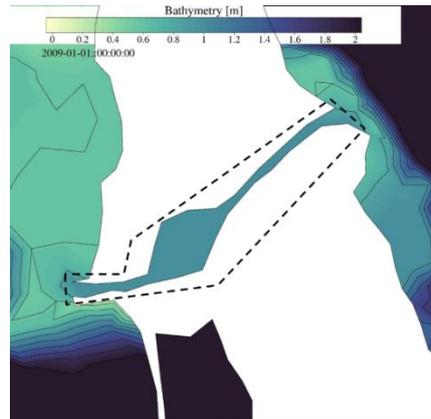
--- Zona de dragado

Fig. 27– Batimetría en el canal de Marchamalo con dragado parcial – Mar\_parc\_0.5m



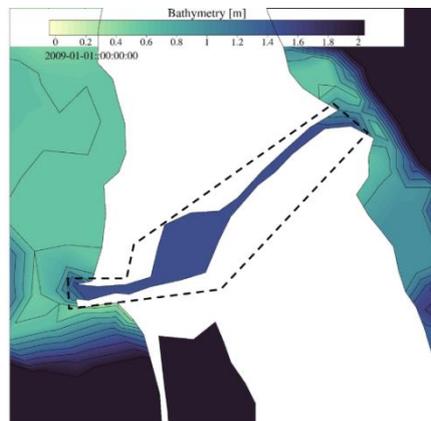
--- Zona de dragado

Fig. 28– Batimetría en el canal de Marchamalo – Mar\_0.5m



--- Zona de dragado

Fig. 29– Batimetría en el canal de Marchamalo – Mar\_1m



--- Zona de dragado

Fig. 30– Batimetría en el canal de Marchamalo – Mar\_1.5m



## 1.2.- RESULTADOS

El procedimiento seguido se basa en la comparación de los resultados del modelo entre cada uno de los escenarios de dragado y el escenario base de la situación sin modificación alguna. Se han comparado los campos de salinidad y temperatura a lo largo del dominio del modelo y del periodo de la simulación. Los valores mensuales de temperatura y salinidad se promedian en las dimensiones vertical y horizontal del dominio del modelo, permitiendo la comparación directa de los casos con y sin dragado (Figuras 31 y 32).

En la Tabla 5 se pueden observar la desviación media y las mayores diferencias entre los resultados de los modelos sin dragado y en cada uno de los casos de dragado propuestos.

Se ha llevado a cabo también una evaluación de los cambios por estaciones del año, dada su influencia potencial sobre la movilidad de las especies que presentan periodos de colonización o hábitos migratorios estacionales, mostrando las variaciones espaciales en la extensión de la laguna. Se han representado en forma de mapas los promedios estacionales de salinidad y temperatura para cada simulación, así como las diferencias entre los promedios de salinidad y temperatura estacionales de cada escenario de dragado con respecto al caso sin dragado.

Además, se ha analizado la circulación general de las corrientes en la laguna y los efectos que los distintos casos de dragado tendrían sobre las medias estacionales de velocidad.

Por último, se incluye el análisis de dos parámetros que influyen en los patrones biológicos de la laguna: las tasas de renovación y los flujos de agua en los canales. Aún estaría por modelar el efecto directo sobre las probabilidades de colonización larvaria considerada en base a la conectividad lagrangiana.

La tasa de renovación es el tiempo que tarda en disiparse la concentración de un trazador con una nueva masa de agua en cada elemento del modelo. Se han obtenido mapas de los valores de la tasa de renovación para cada escenario simulado con el objetivo de comprender las variaciones espaciales de dicho parámetro, así como el valor medio para el conjunto de la laguna en cada caso.

También se han calculado los flujos de intercambio de agua a través de los canales y los volúmenes totales de entrada y salida de agua a lo largo del año.

### 1.2.1.- Salinidad y temperatura

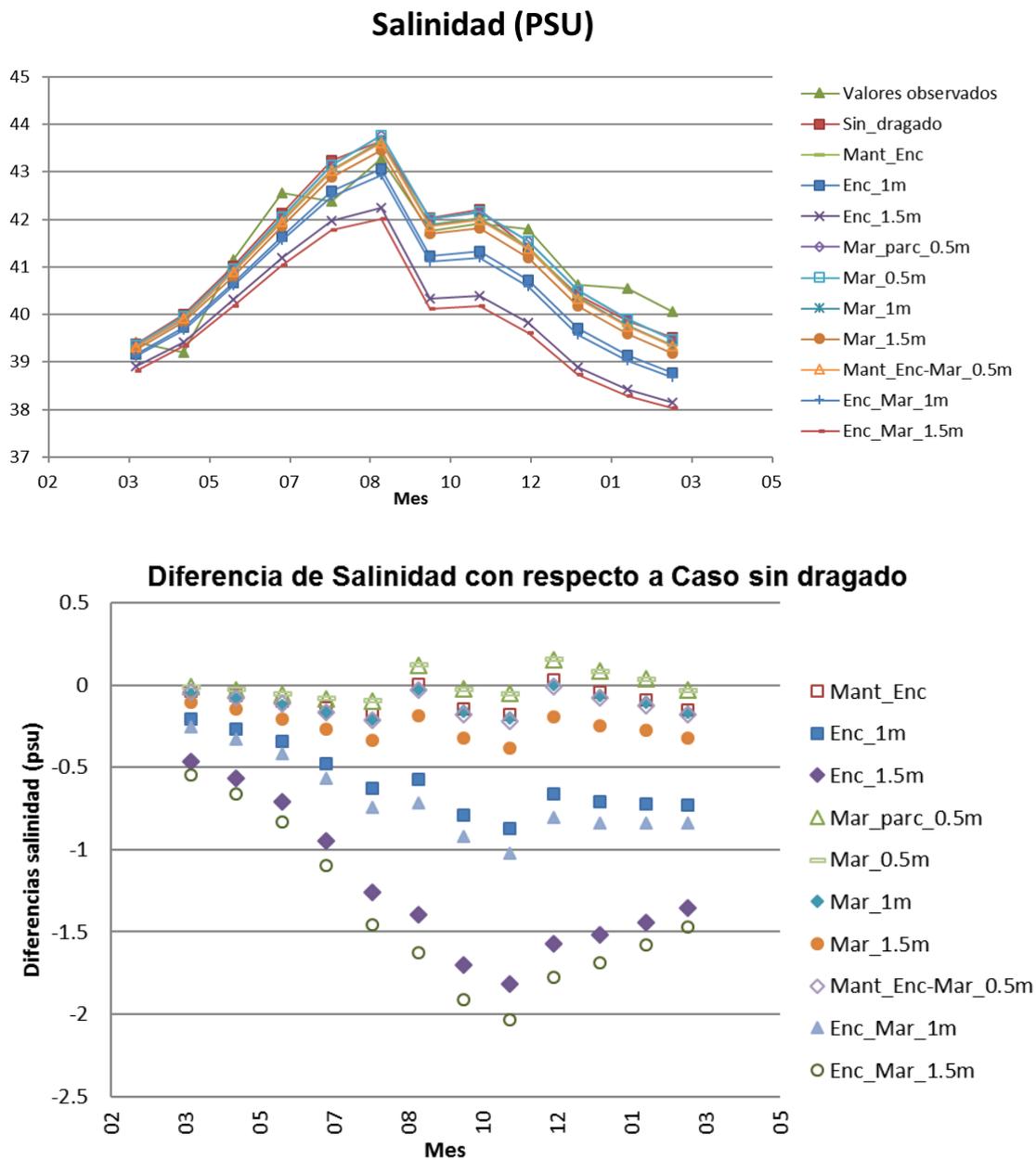


Fig.31 – Medias mensuales y diferencias de salinidad observadas y modeladas con y sin dragado.

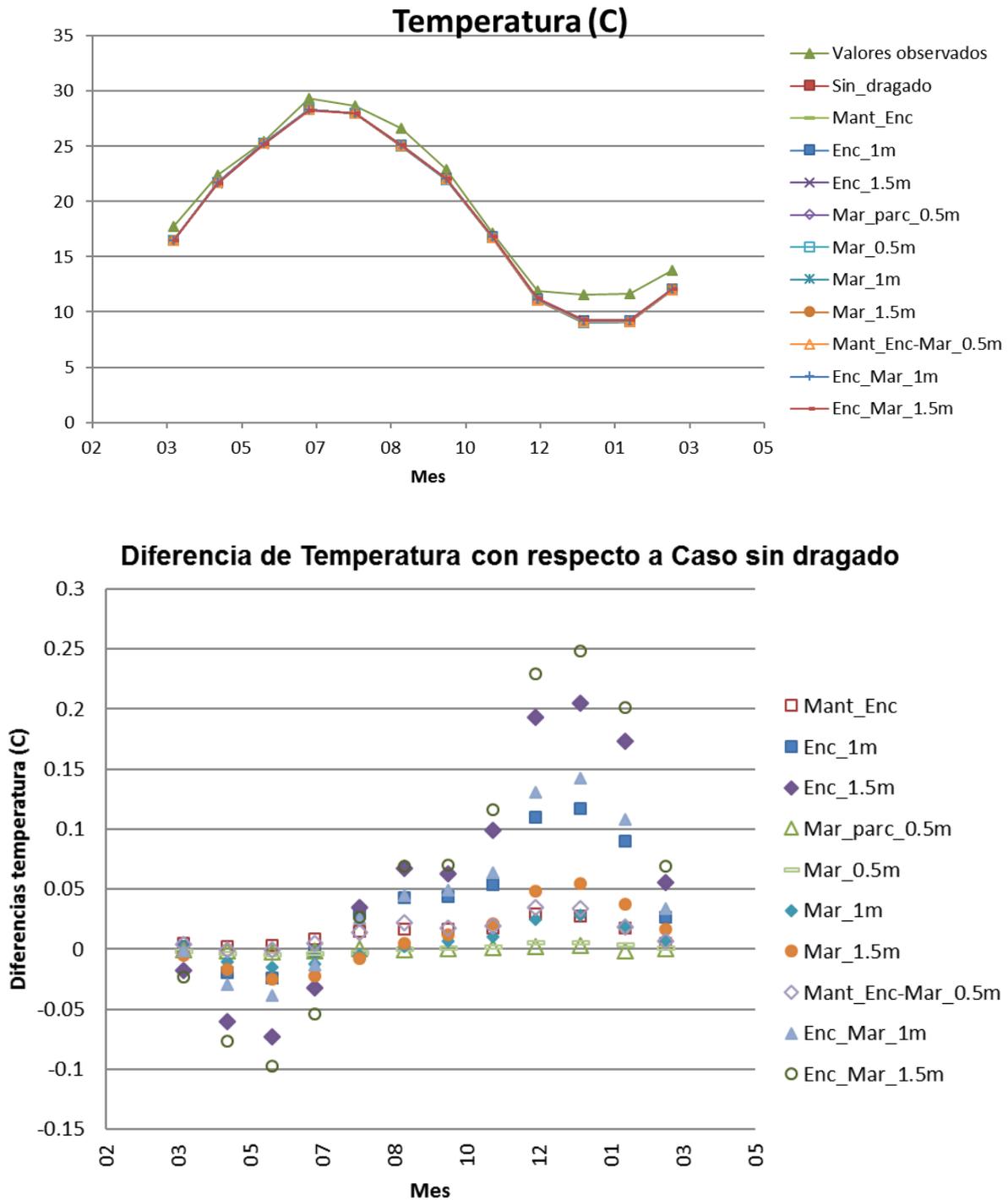


Fig. 32 – Medias mensuales y diferencias de temperatura observadas y modeladas con y sin dragado.



Tabla 5 – Desviaciones estándar y diferencias máximas en los valores medios mensuales de temperatura y salinidad entre los casos de dragado y la situación sin dragado.

Caso	Salinidad		Temperatura	
	Desviacion Media (PSU)	Diferencia Maxima (PSU)	Desviacion Media (C)	Diferencia Maxima (C)
Sin_dragado	1.21	-	6.33	-
Mant_Enc	1.19	0.18	6.33	0.03
Enc_1m	1.12	0.88	6.30	0.12
Enc_1.5m	1.07	1.82	6.27	0.21
Mar_parc_0.5m	1.21	0.16	6.33	0.00
Mar_0.5m	1.21	0.16	6.33	0.01
Mar_1m	1.19	0.21	6.32	0.03
Mar_1.5m	1.17	0.38	6.31	0.05
Mant_Enc-Mar_0.5m	1.19	0.22	6.33	0.03
Enc_Mar_1m	1.11	1.02	6.29	0.14
Enc_Mar_1.5m	1.04	2.03	6.26	0.25

Lógicamente la magnitud de los efectos está relacionada con la de las operaciones de dragado. Sin embargo, la sensibilidad del sistema no es la misma para las dos golas. Se observa que los mayores cambios ocurren en los escenarios Enc\_1.5m y Enc\_Mar\_1.5m, debido a la gran magnitud del dragado hasta 1.5 m en toda la extensión del canal de Encañizadas. Como consecuencia, podría darse una diferencia máxima de 1.8 y 2.0 psu de salinidad como promedio en la extensión de la laguna, lo cual puede conllevar importantes cambios en la composición y estructura de las comunidades biológicas.

En cuanto a la temperatura, no parece que el efecto sea tan importante, siendo la mayor magnitud del cambio de 0.25 C en el promedio del área de la laguna para el caso de dragado Enc\_Mar\_1.5m.

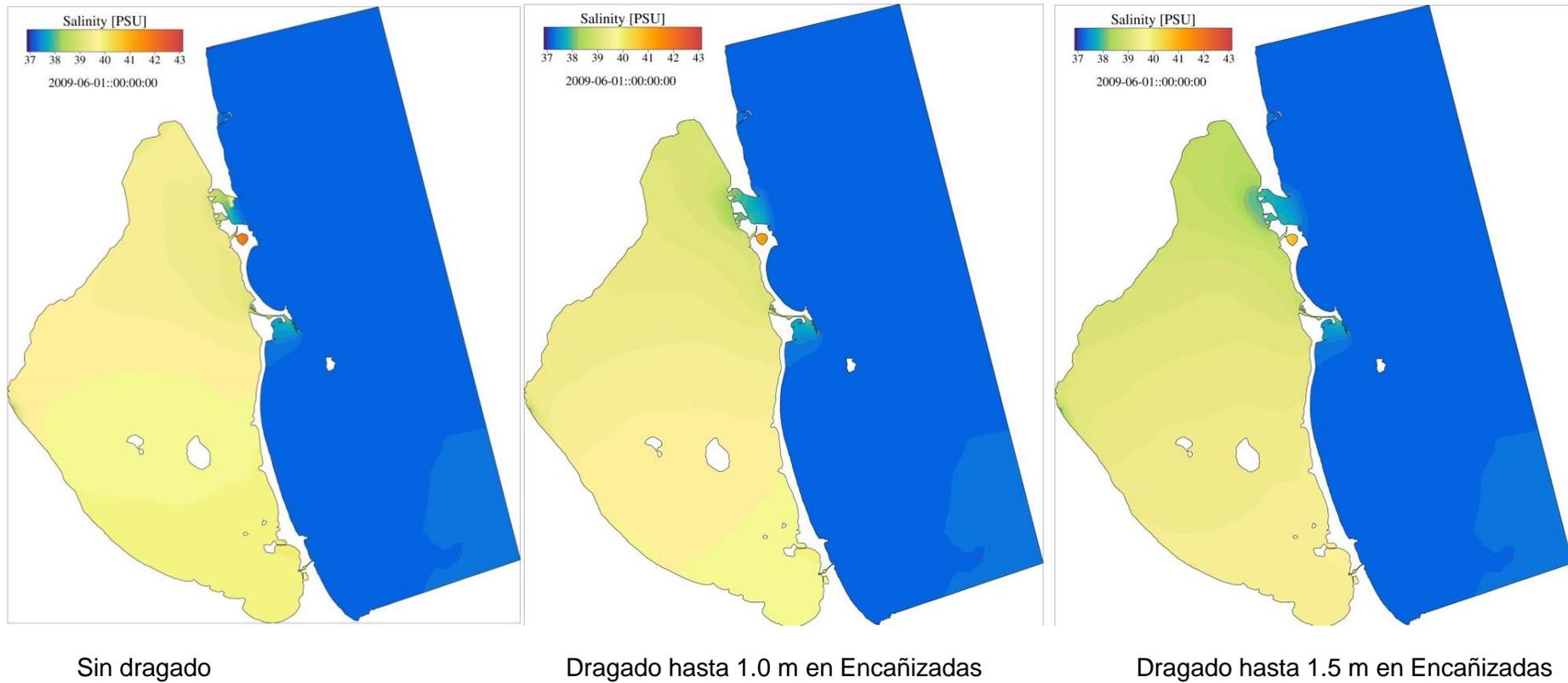


Fig. 33.- Promedios de salinidad en Primavera para los distintos escenarios simulados.

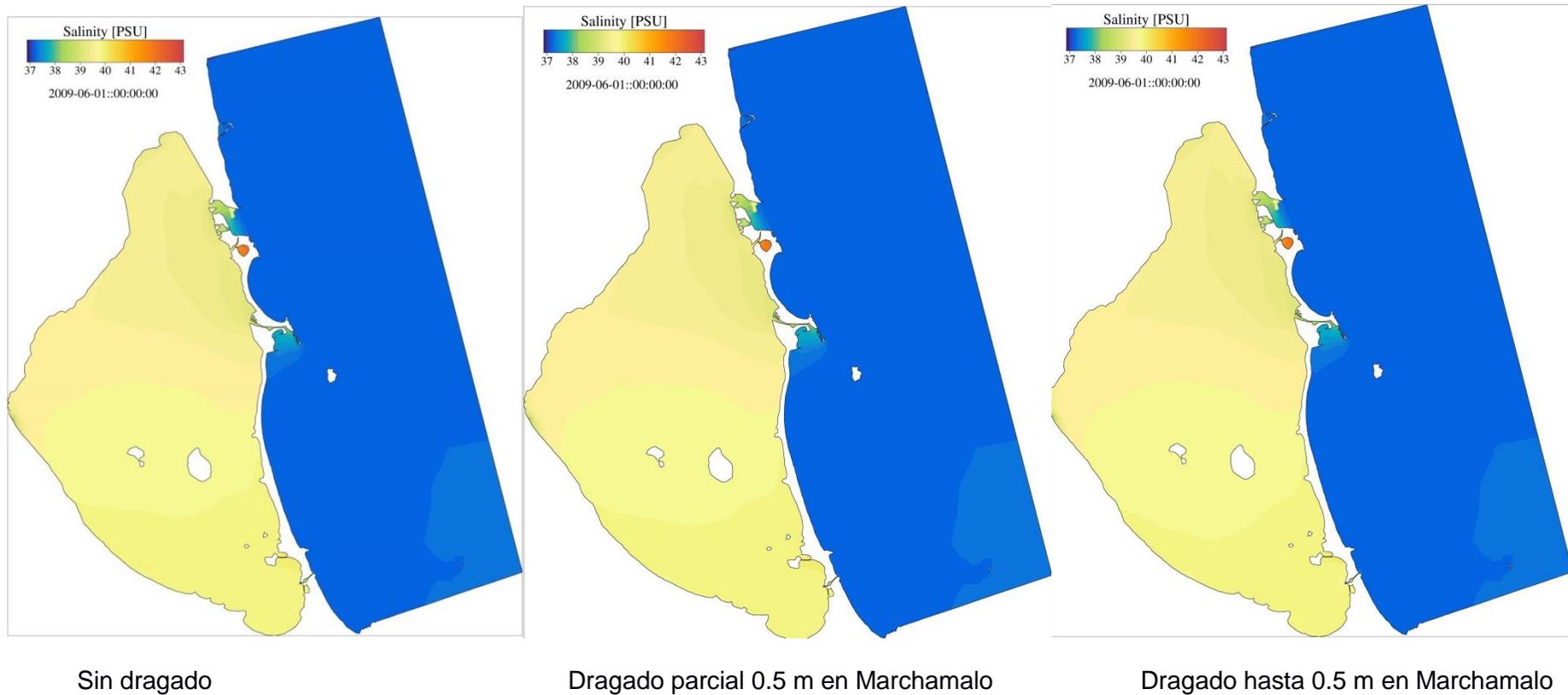


Fig. 33.continuación- Promedios de salinidad en Primavera para los distintos escenarios simulados

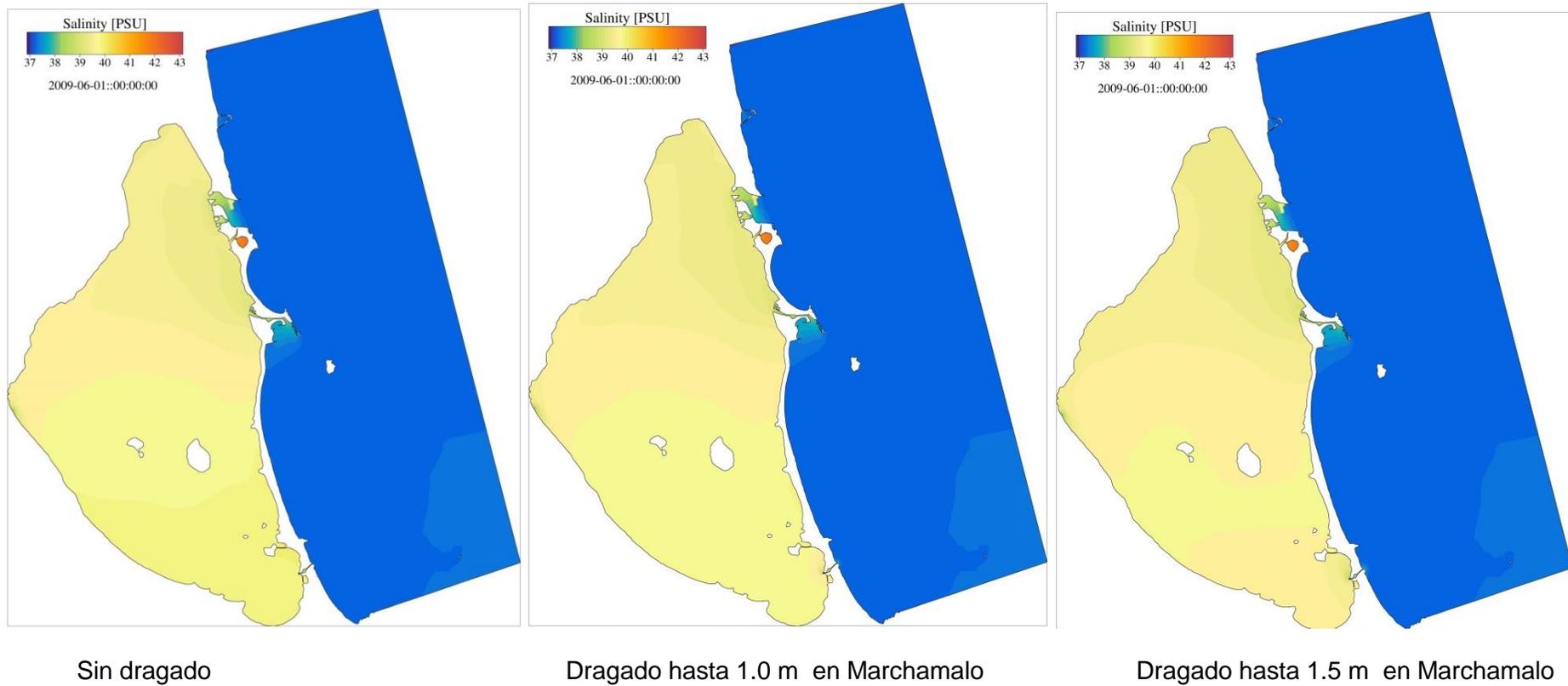
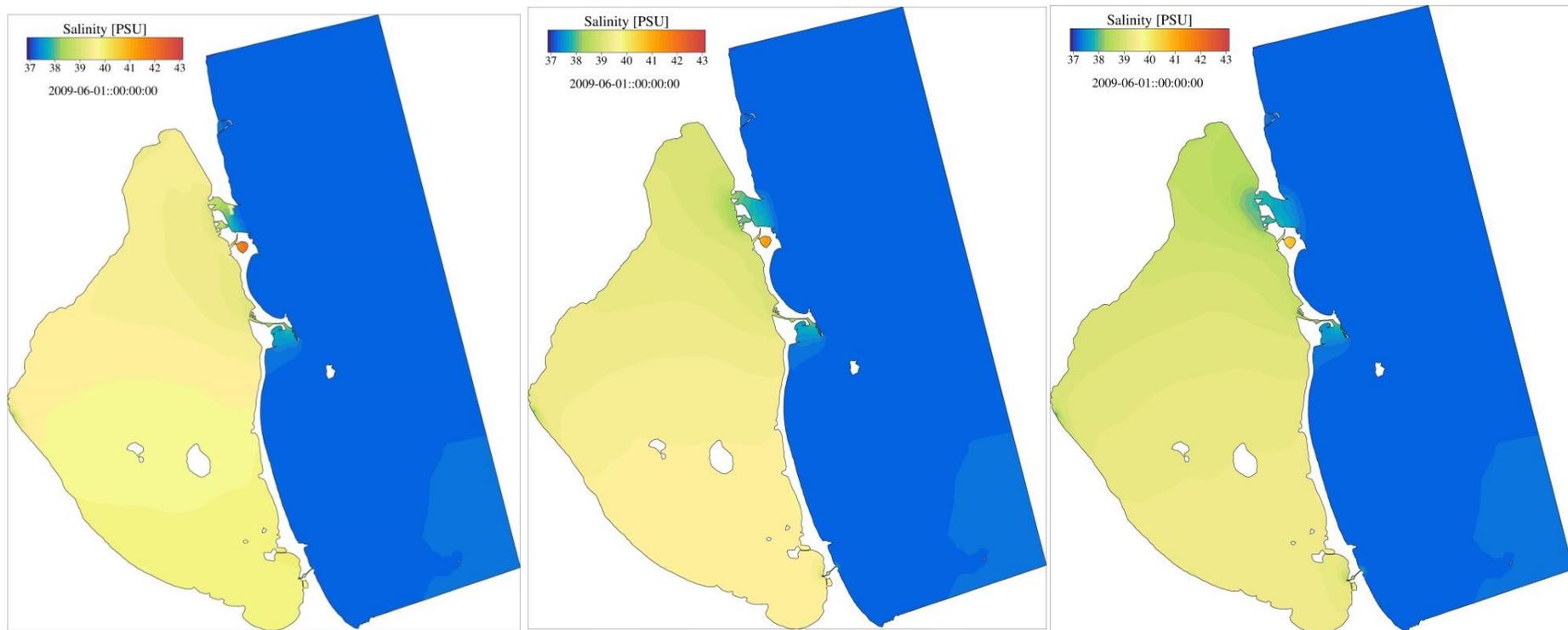


Fig. 33. continuación- Promedios de salinidad en Primavera para los distintos escenarios simulados



Sin dragado

Dragado hasta 1.0 m en ambos canales

Dragado hasta 1.5 m en ambos canales

Fig. 33. continuación- Promedios de salinidad en Primavera para los distintos escenarios simulados

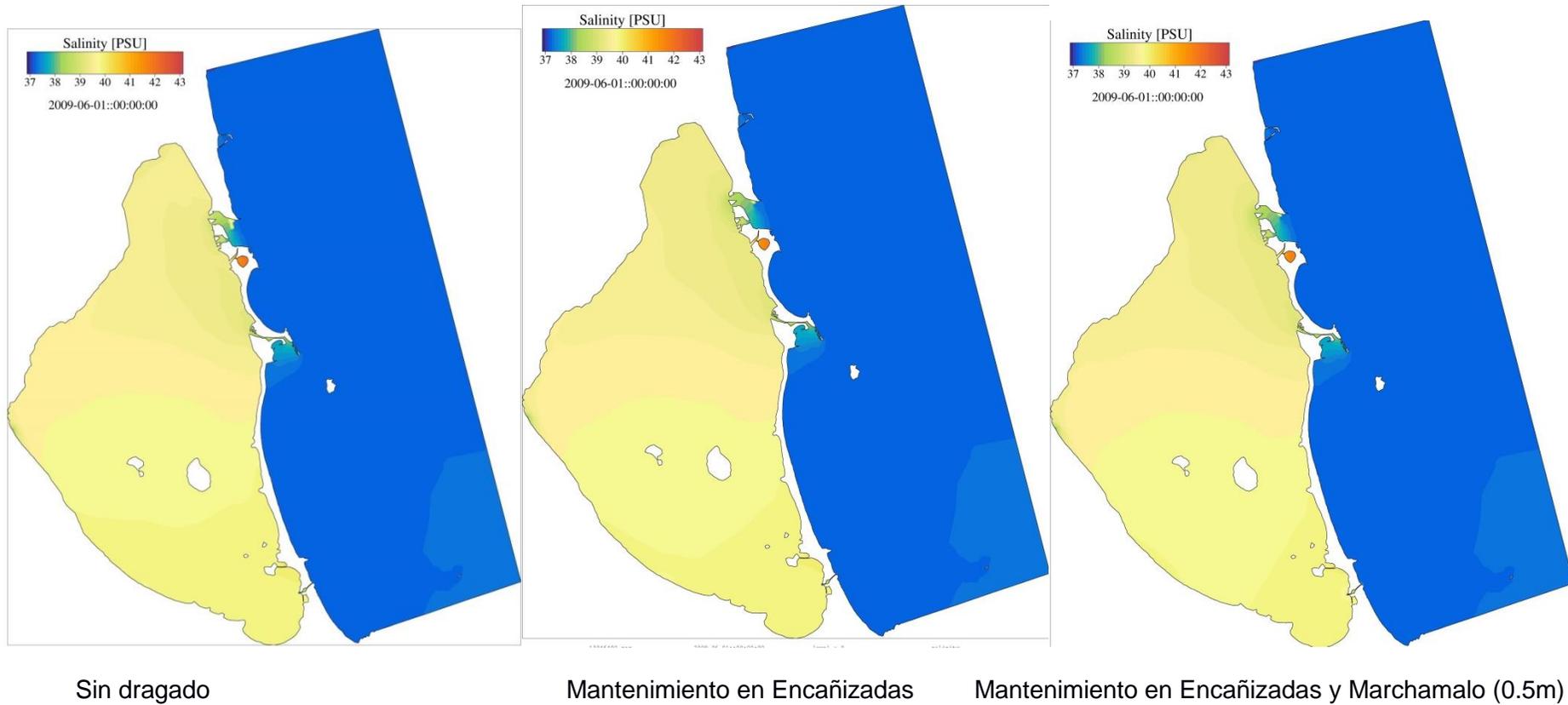


Fig. 33. continuación- Promedios de salinidad en Primavera para los distintos escenarios simulados



Fig. 34.- Promedios de salinidad en Verano para los distintos escenarios simulados.

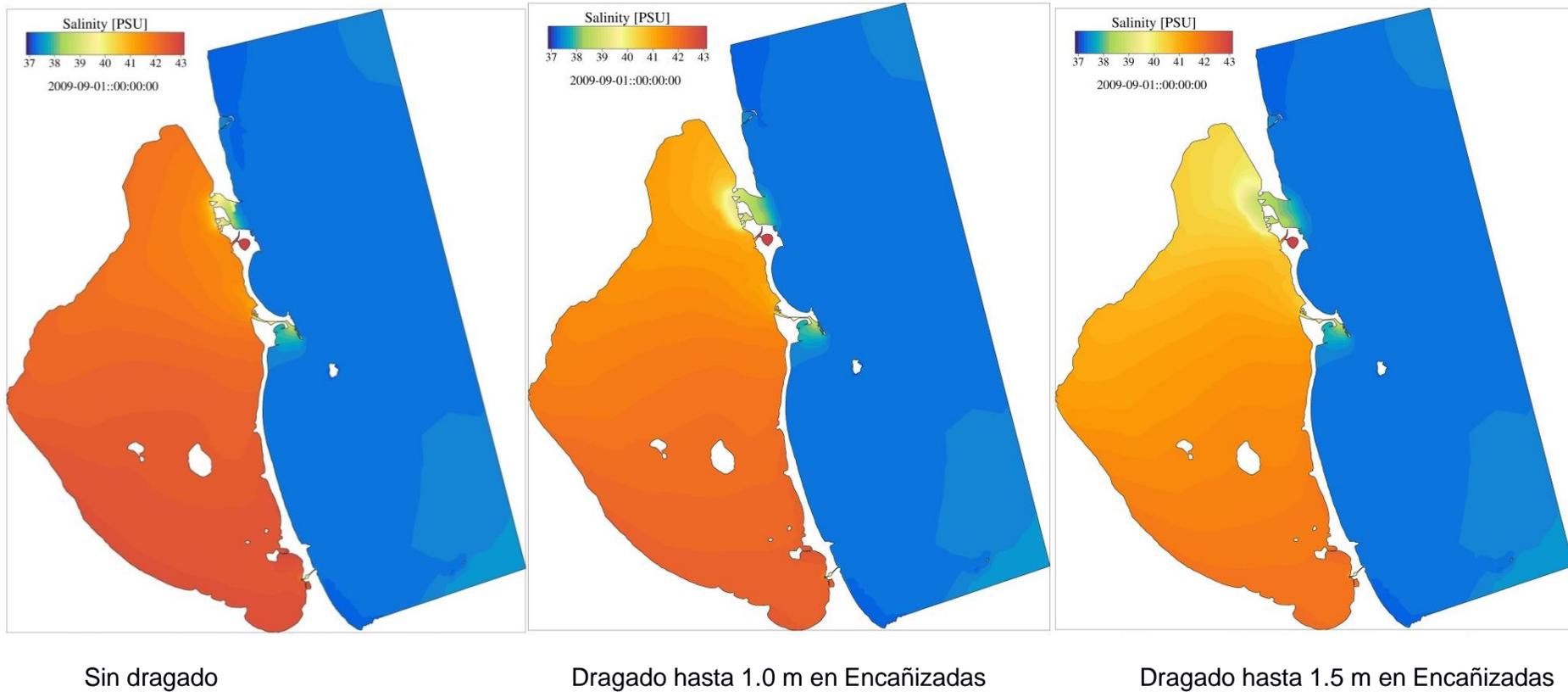
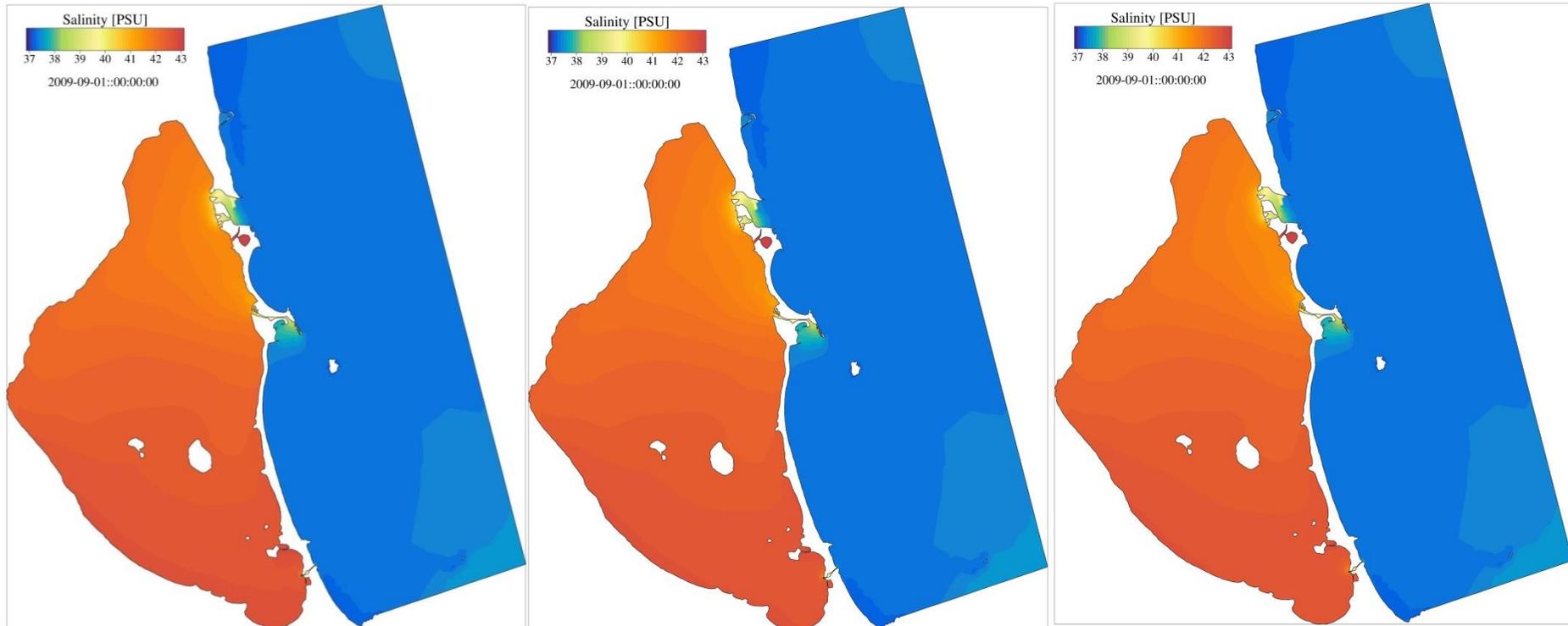


Fig. 34.- Promedios de salinidad en Verano para los distintos escenarios simulados.

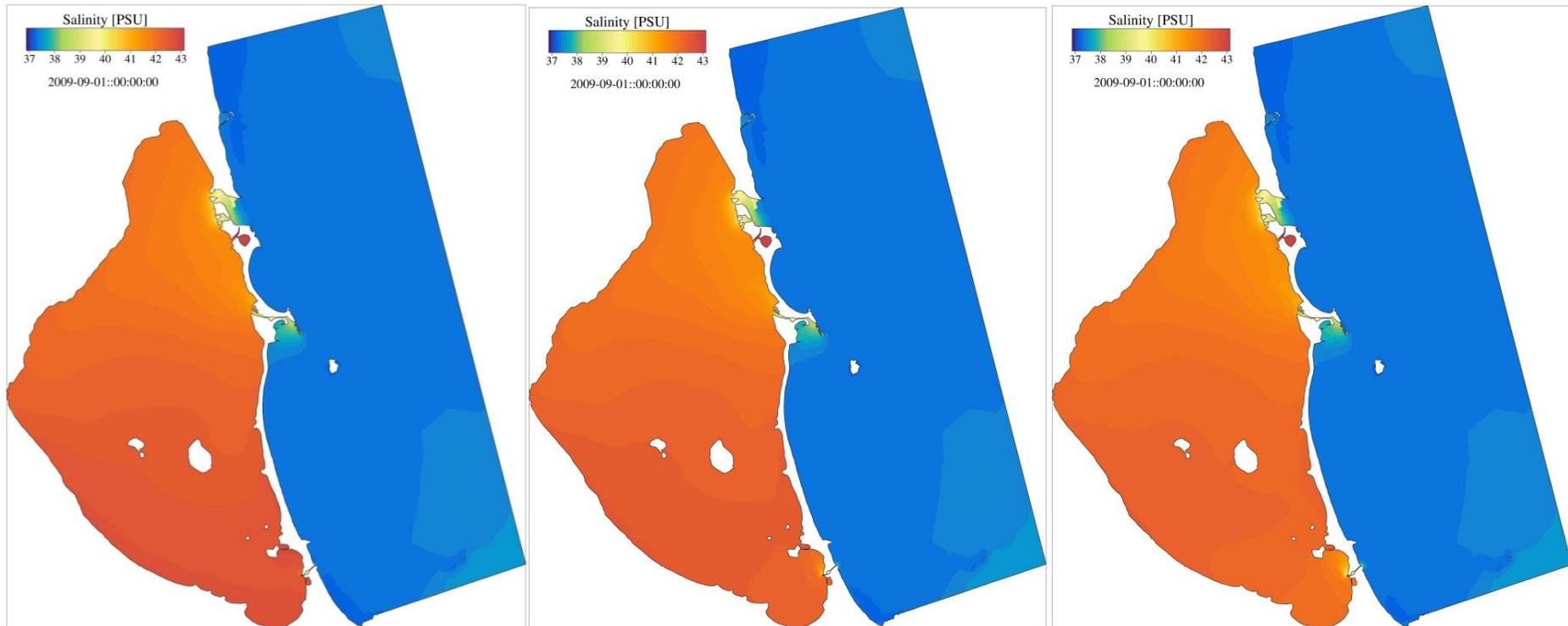


Sin dragado

Dragado parcial 0.5 m en Marchamalo

Dragado hasta 0.5 m en Marchamalo

Fig. 34.cont.- Promedios de salinidad en Verano para los distintos escenarios simulados.



Sin dragado

Dragado hasta 1.0 m en Marchamalo

Dragado hasta 1.5 m en Marchamalo

Fig. 34.cont.- Promedios de salinidad en Verano para los distintos escenarios simulados.

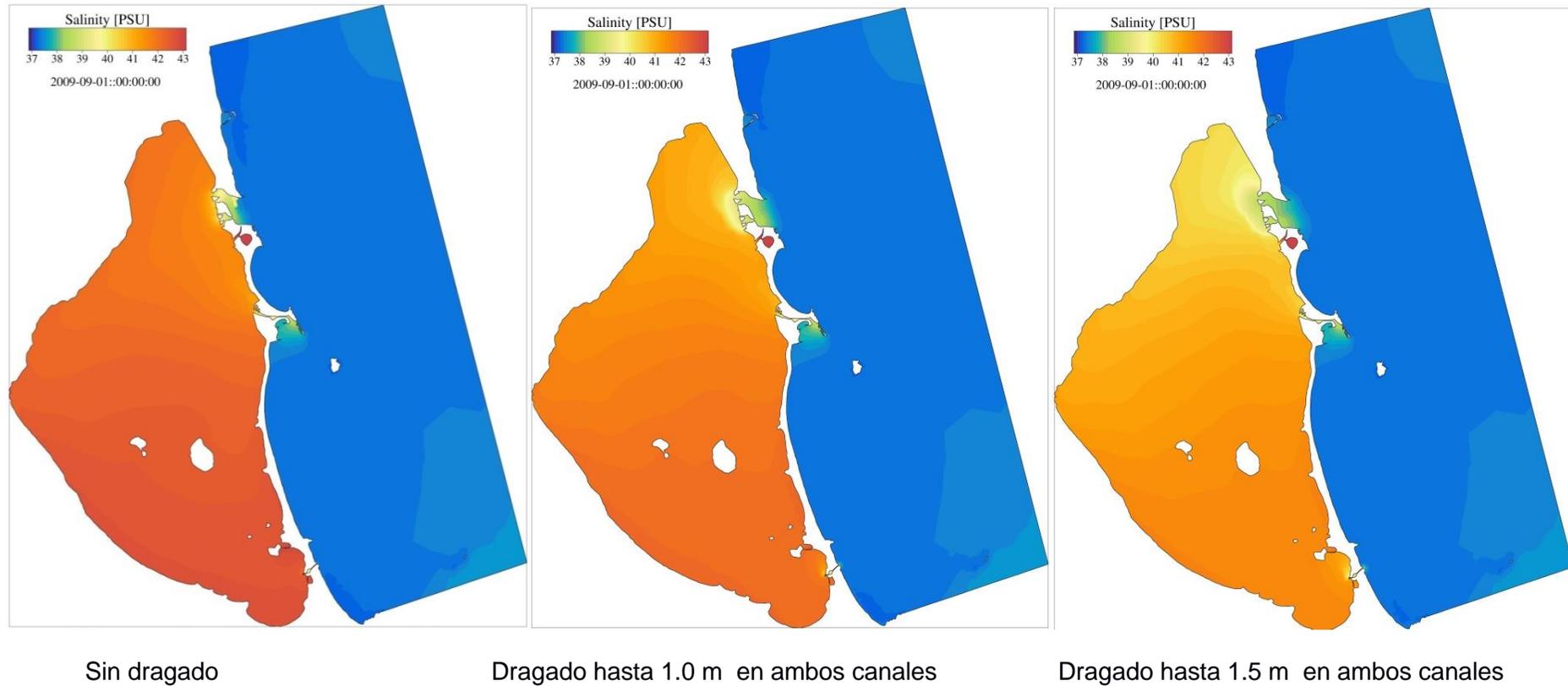
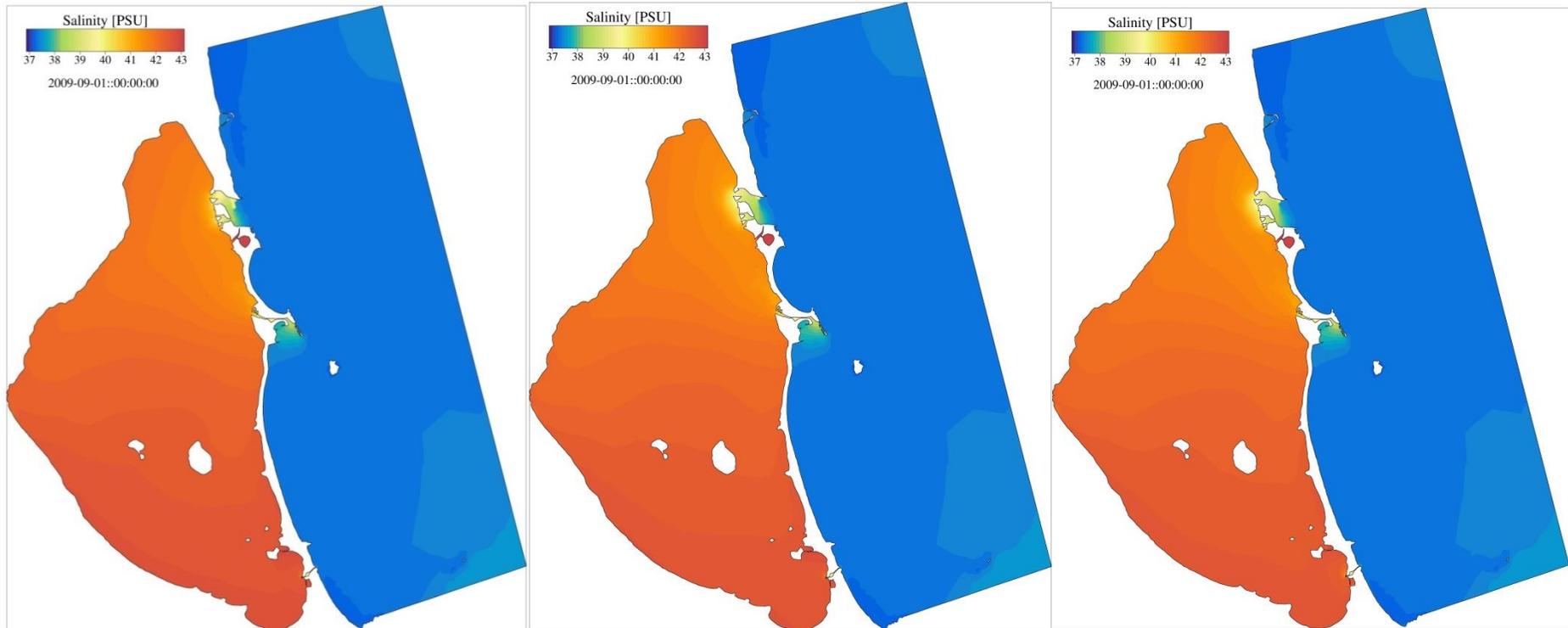


Fig. 34.cont.- Promedios de salinidad en Verano para los distintos escenarios simulados.



Sin dragado

Mantenimiento en Encañizadas

Mantenimiento en Encañizadas y Marchamalo (0.5m)

Fig. 34.cont.- Promedios de salinidad en Verano para los distintos escenarios simulados.



Fig. 35.- Promedios de salinidad en Otoño para los distintos escenarios simulados.

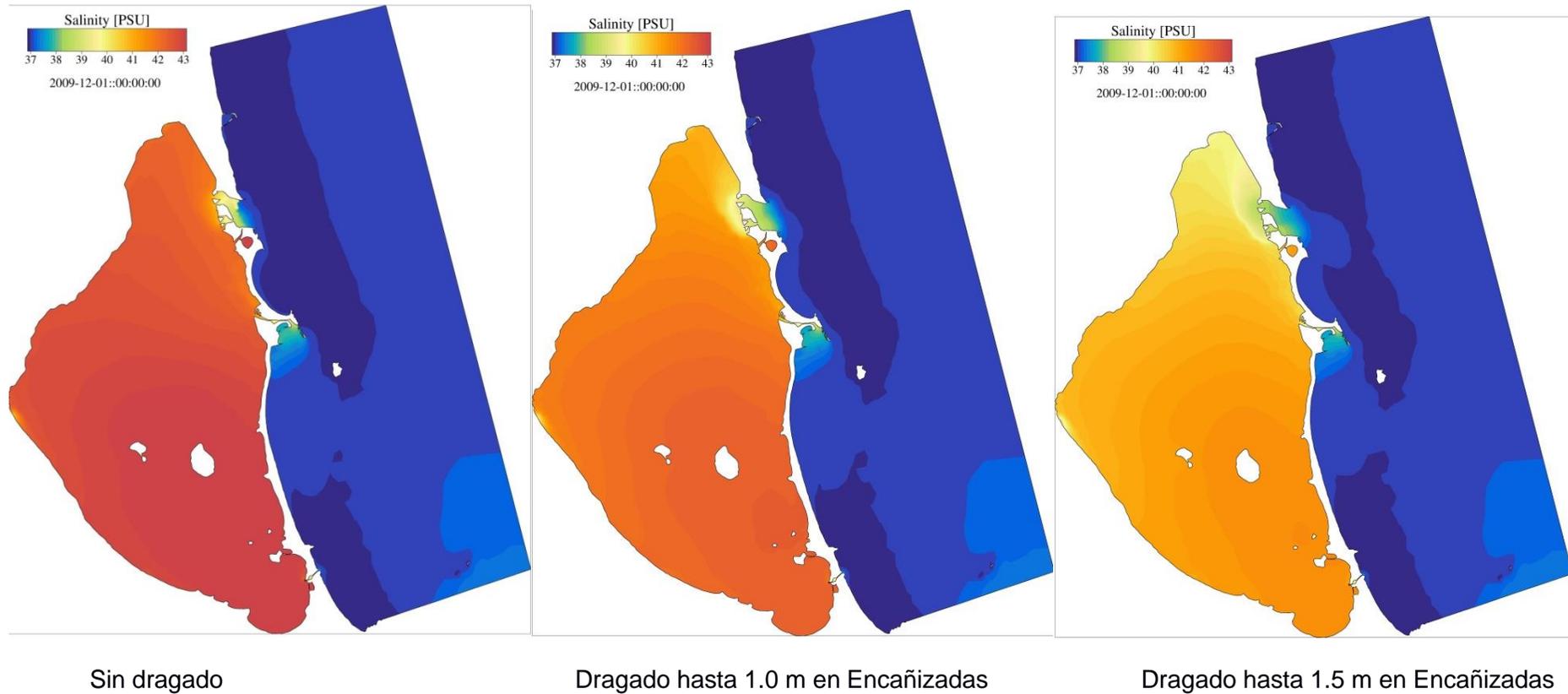


Fig. 34.cont.- Promedios de salinidad en Verano para los distintos escenarios simulados.

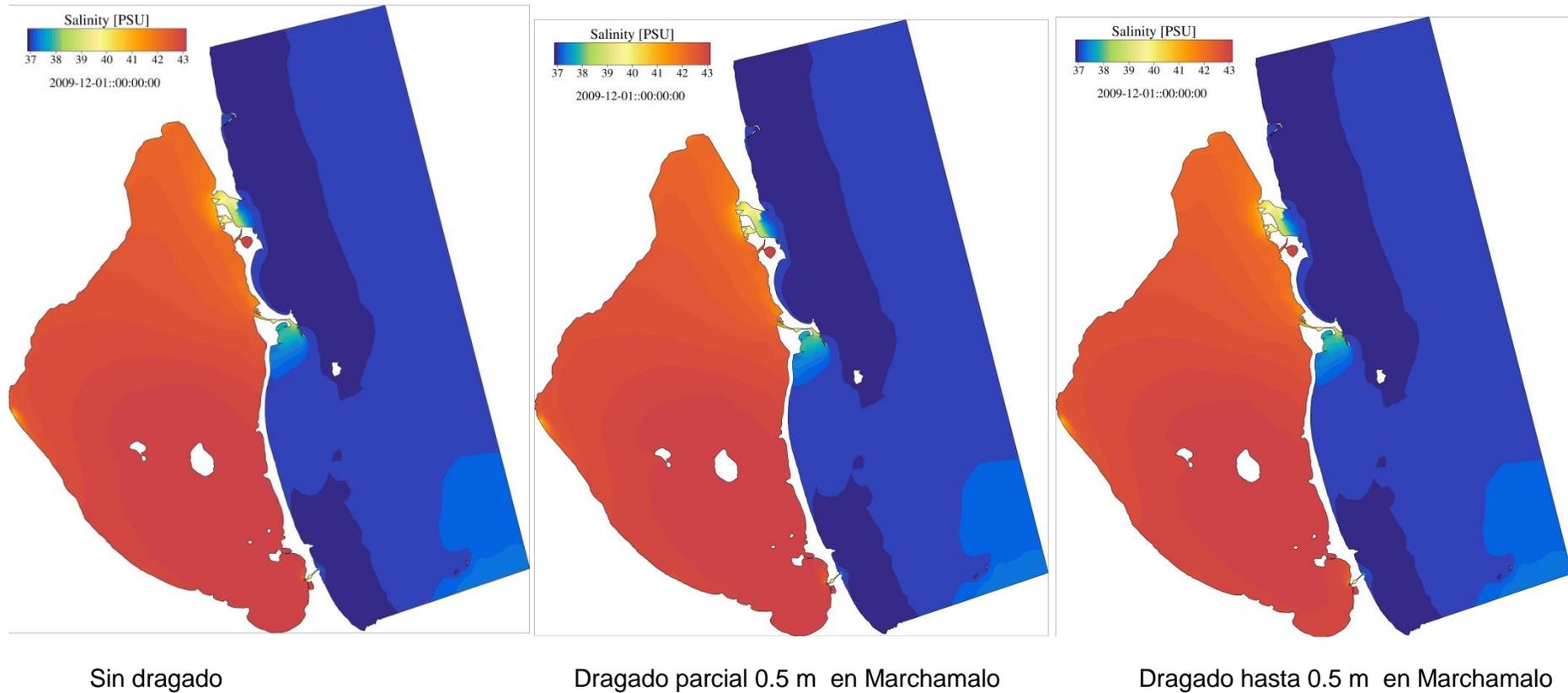


Fig. 34.cont.- Promedios de salinidad en Verano para los distintos escenarios simulados.

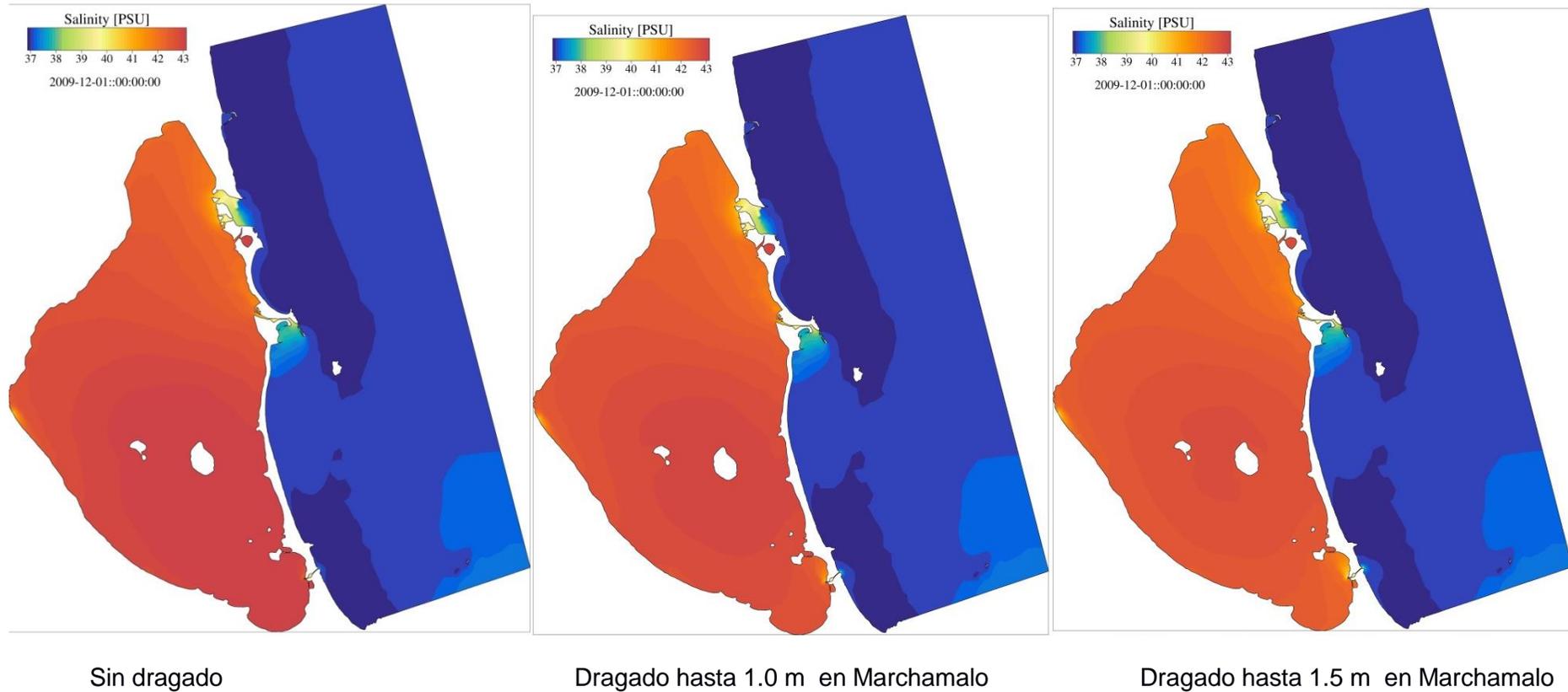


Fig. 34.cont.- Promedios de salinidad en Verano para los distintos escenarios simulados.

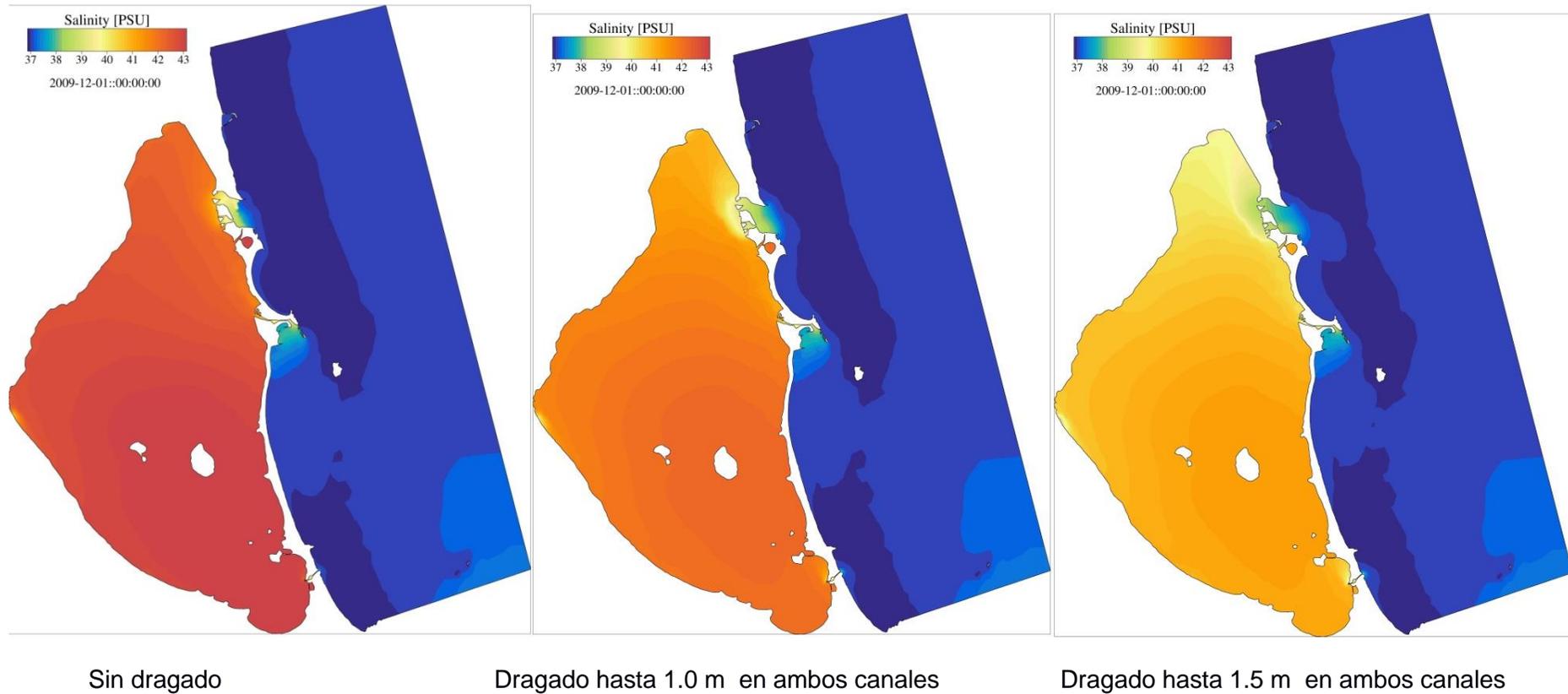


Fig. 34.cont.- Promedios de salinidad en Verano para los distintos escenarios simulados.

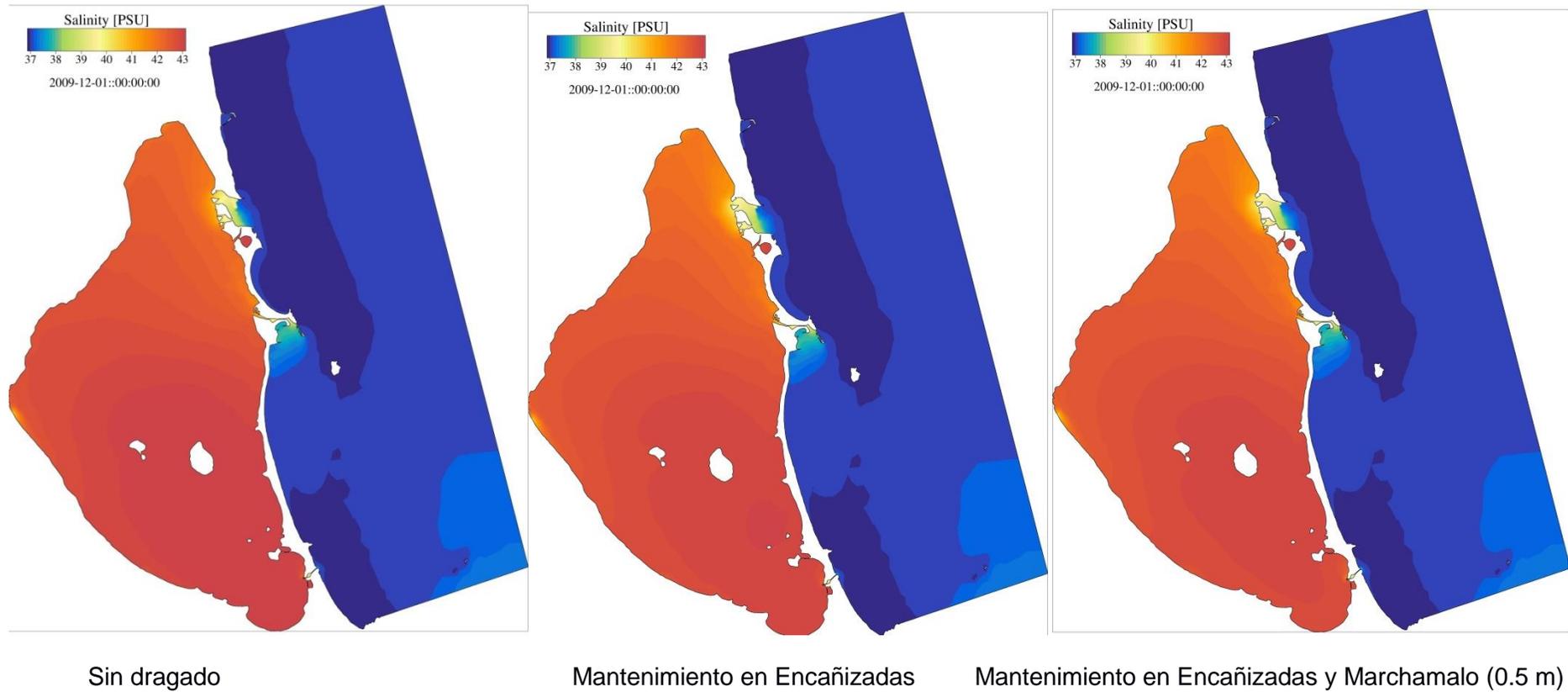


Fig. 34.cont.- Promedios de salinidad en Verano para los distintos escenarios simulados.

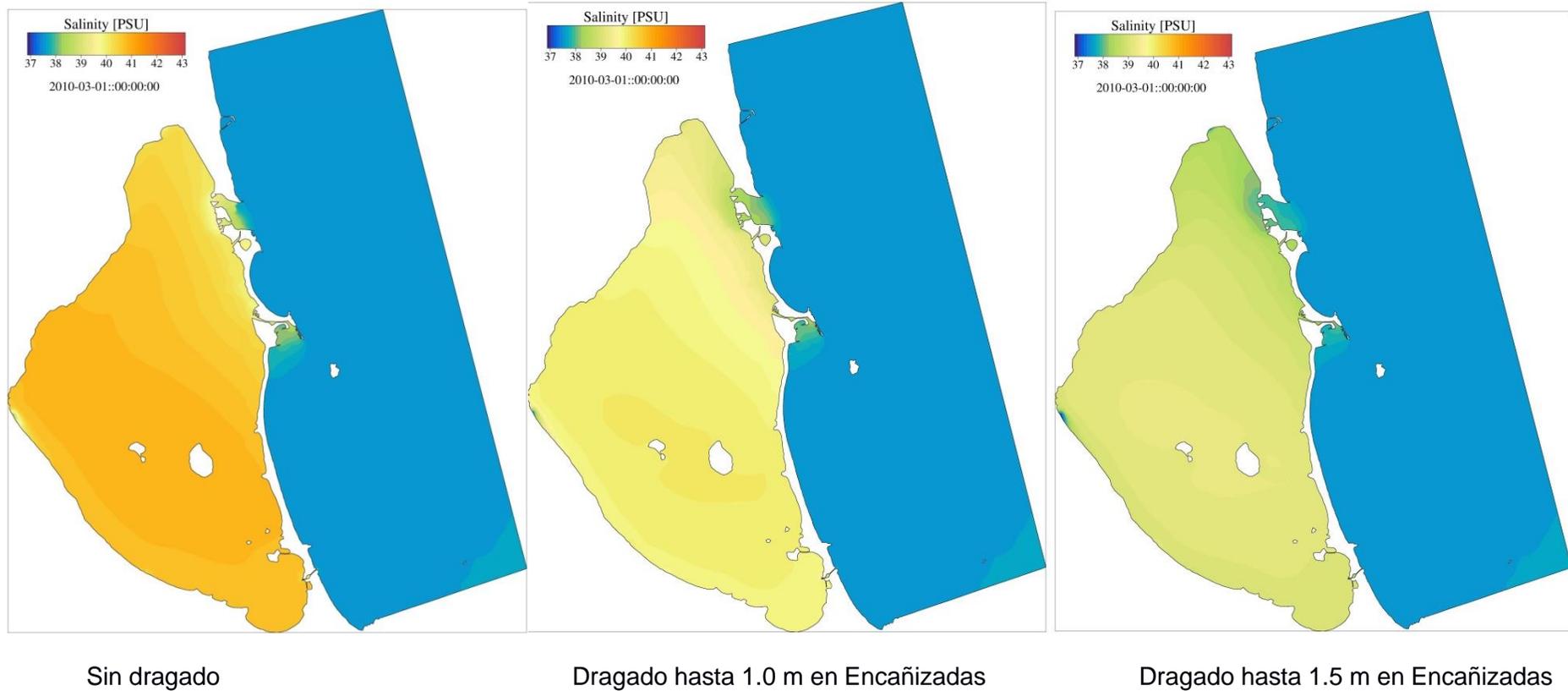


Fig. 36.- Promedios de salinidad en Invierno para los distintos escenarios simulados.

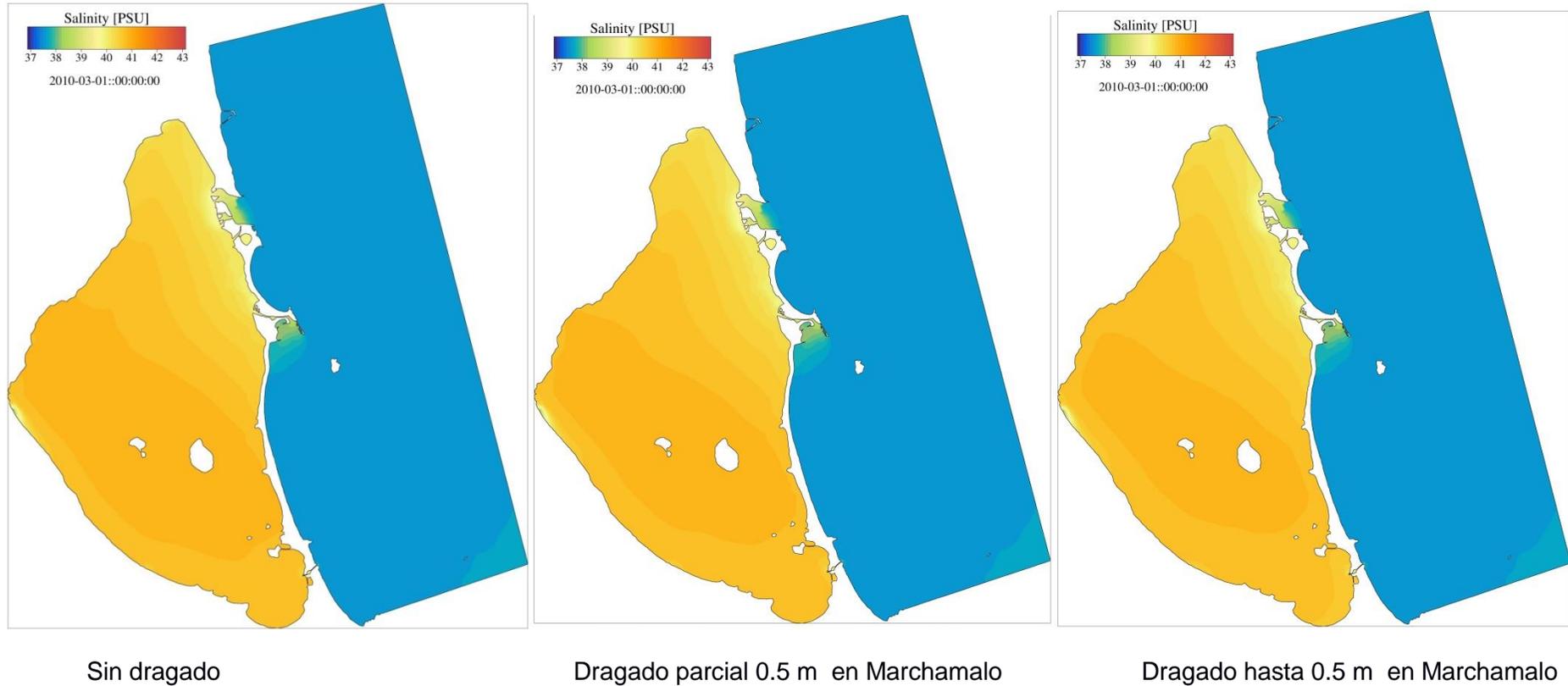
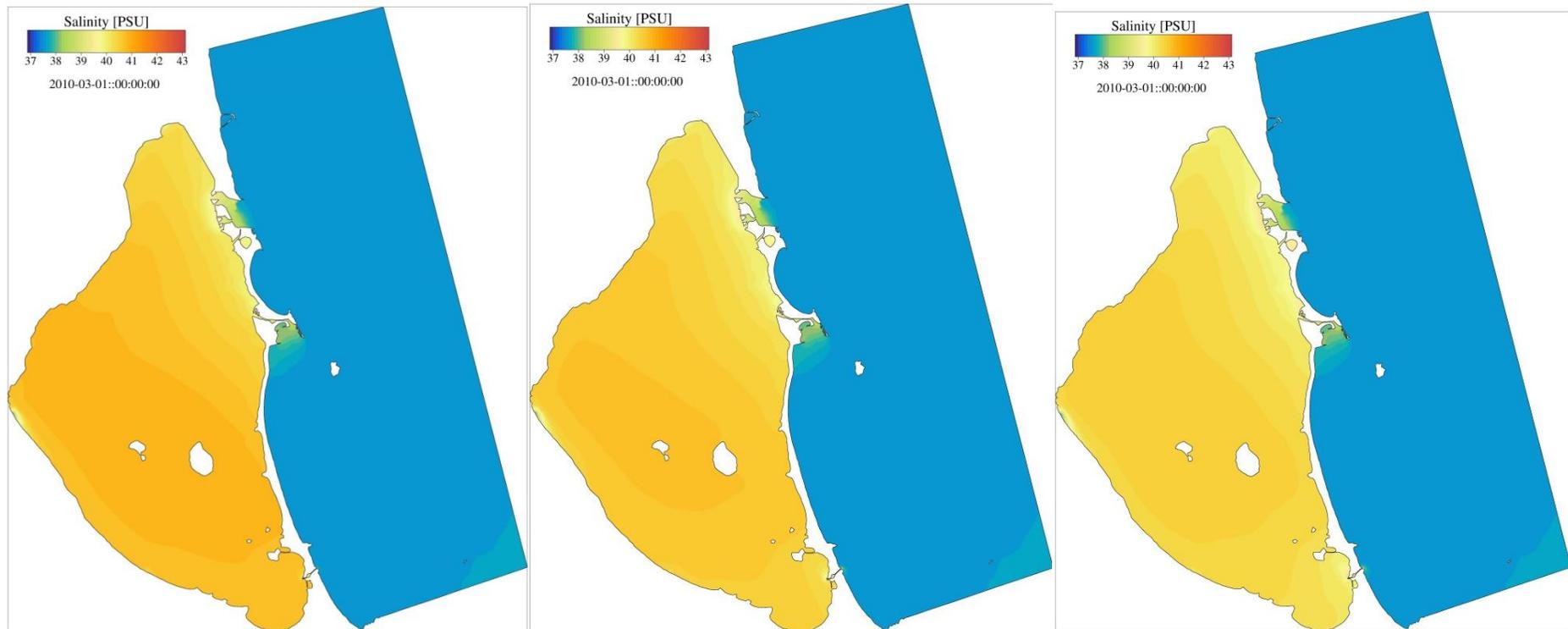


Fig. 36.cont.- Promedios de salinidad en Invierno para los distintos escenarios simulados



Sin dragado

Dragado hasta 1.0 m en Marchamalo

Dragado hasta 1.5 m en Marchamalo

Fig. 36.cont.- Promedios de salinidad en Invierno para los distintos escenarios simulados

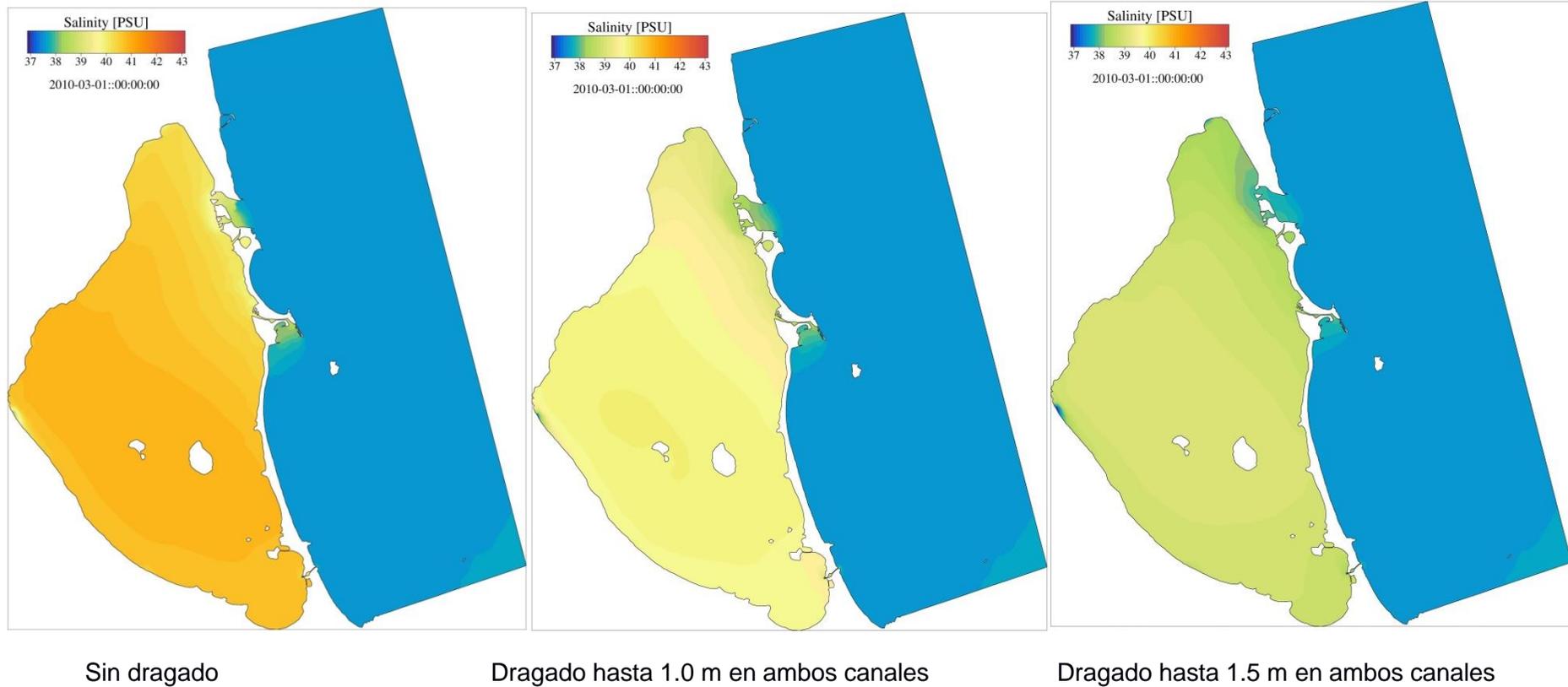


Fig. 36.cont.- Promedios de salinidad en Invierno para los distintos escenarios simulados

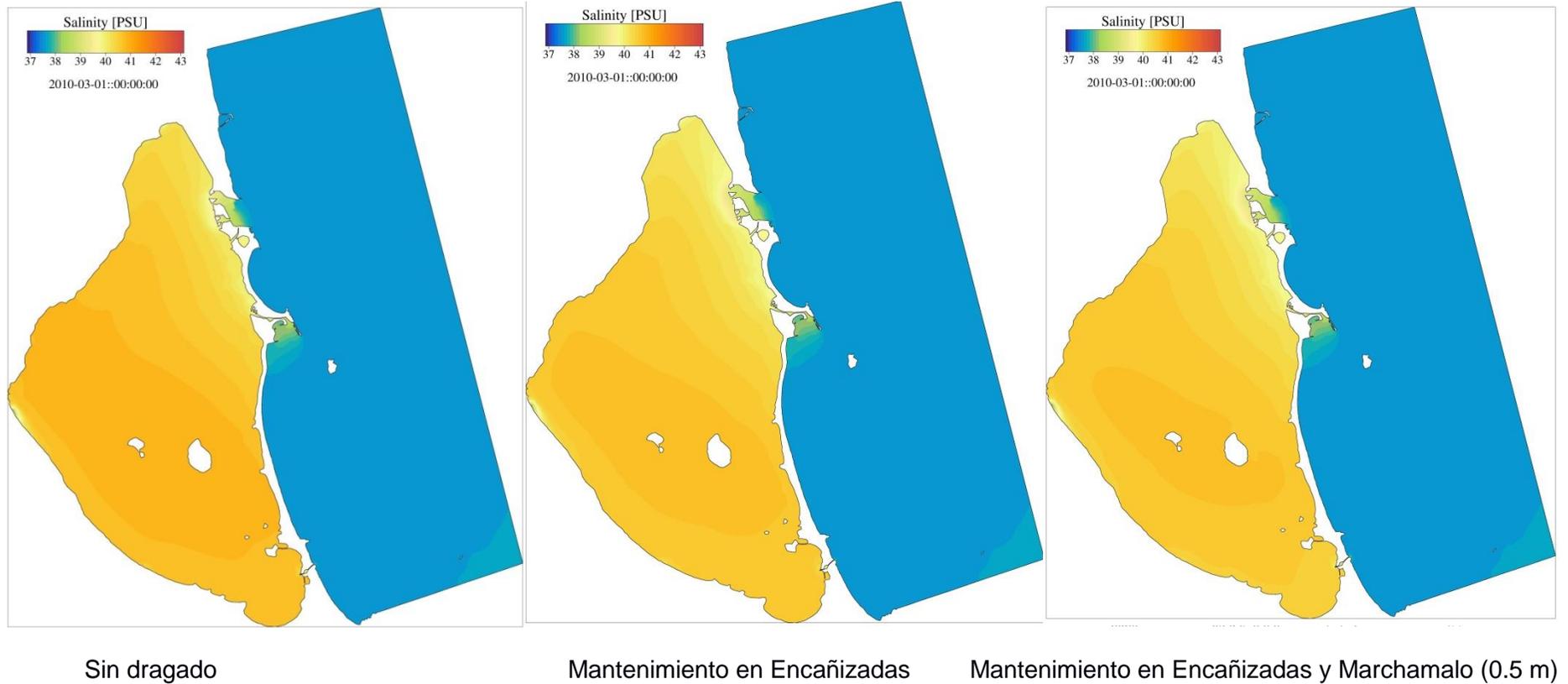
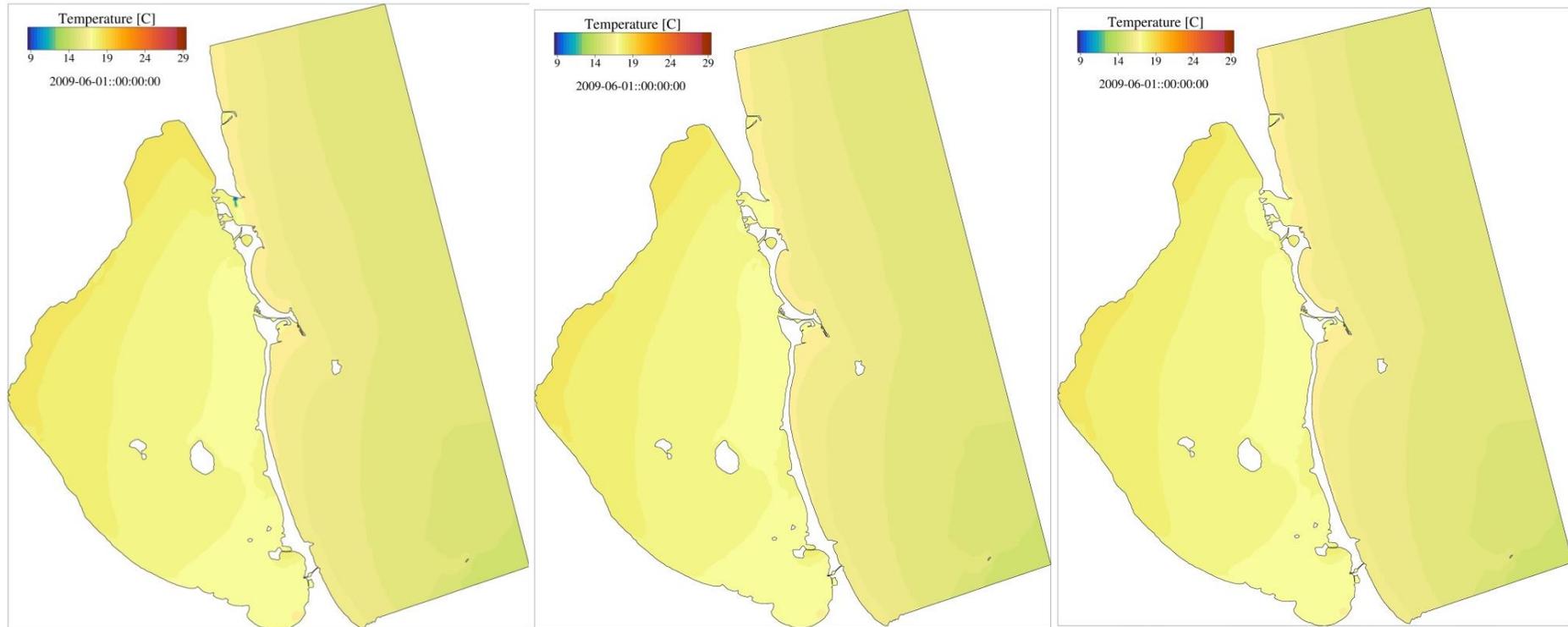


Fig. 36.cont.- Promedios de salinidad en Invierno para los distintos escenarios simulados

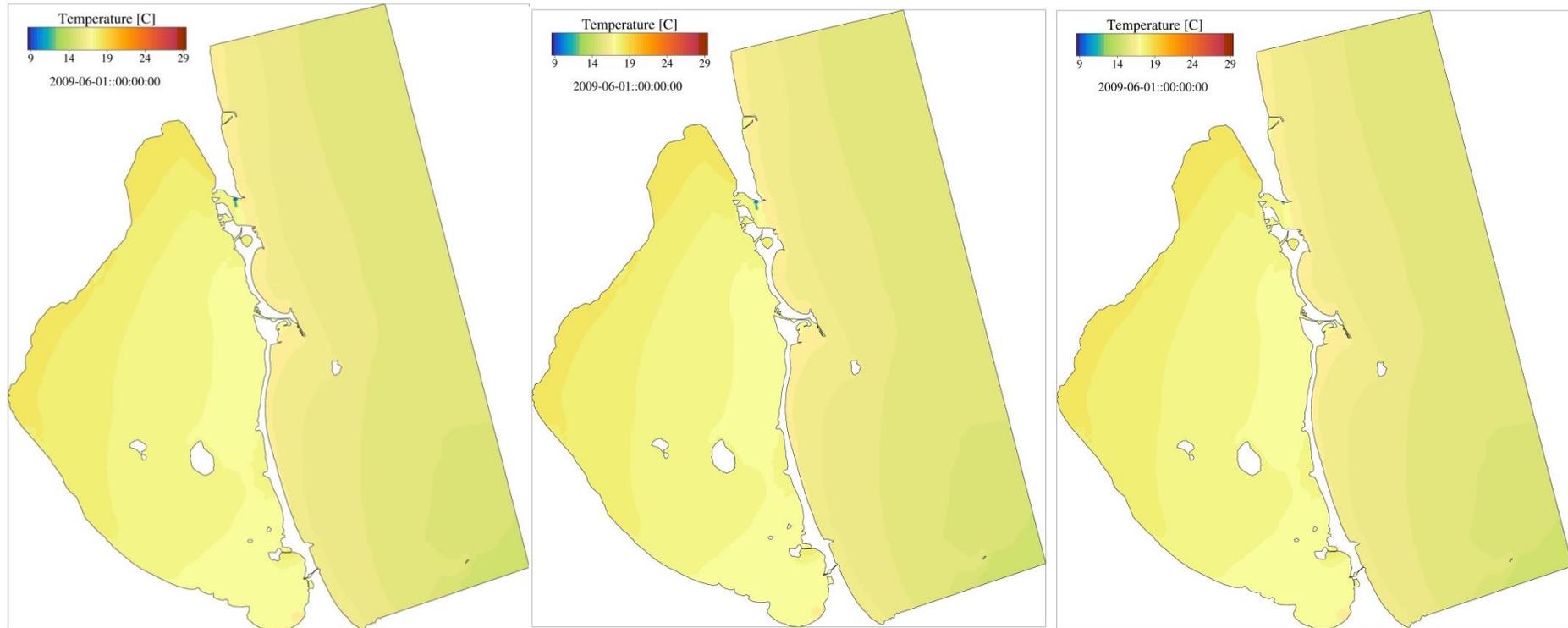


Sin dragado

Dragado hasta 1.0 m en Encañizadas

Dragado hasta 1.5 m en Encañizadas

Fig. 37.- Promedios de temperatura en Primavera para los distintos escenarios simulados.

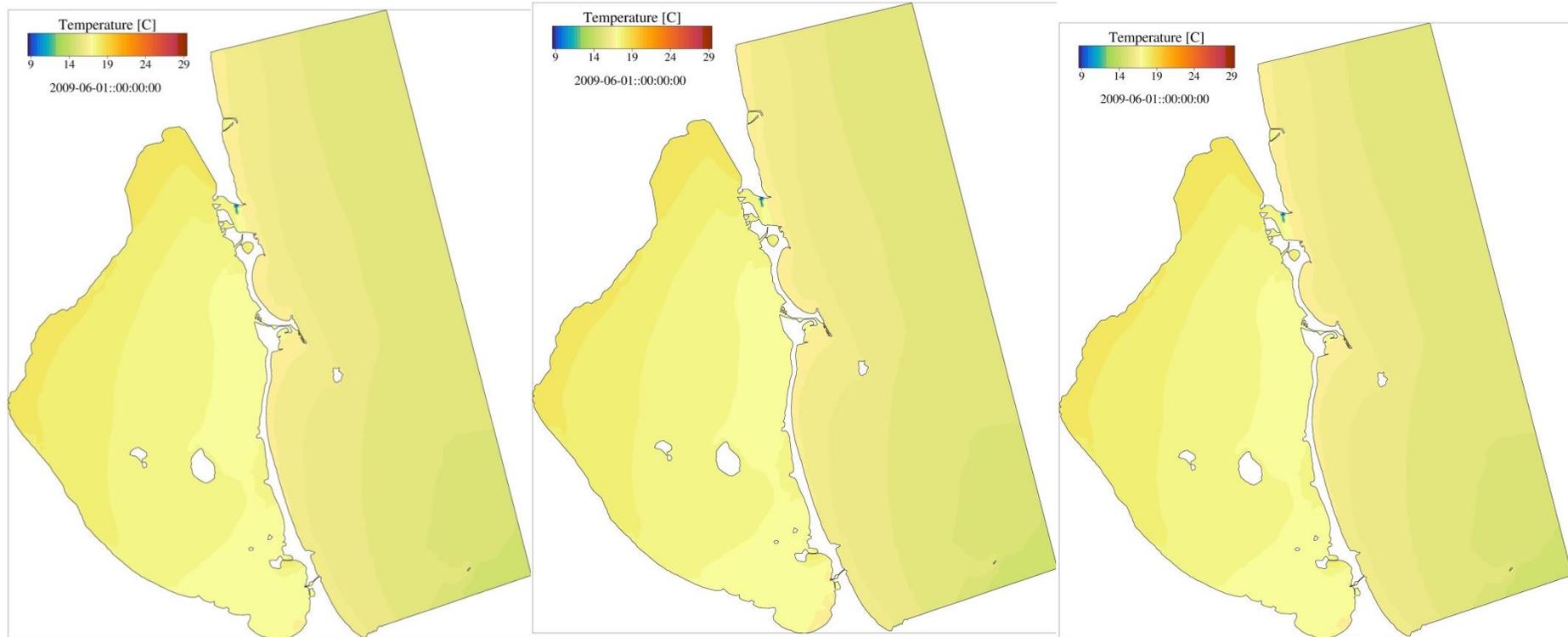


Sin dragado

Dragado parcial de 0.5 m en Marchamalo

Dragado hasta 0.5 m en Marchamalo

Fig. 37.cont.- Promedios de temperatura en Primavera para los distintos escenarios simulados.

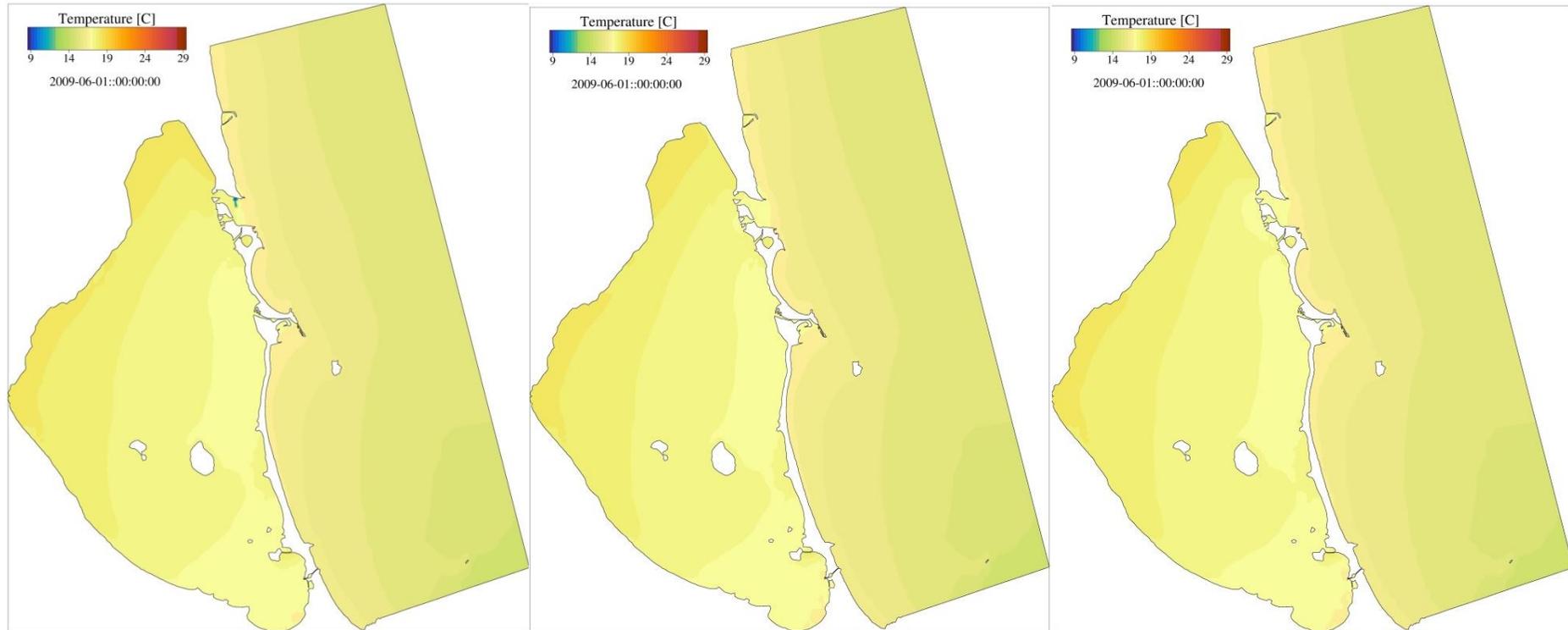


Sin dragado

Dragado hasta 1.0 m en Marchamalo

Dragado hasta 1.5 m en Marchamalo

Fig. 37.cont.- Promedios de temperatura en Primavera para los distintos escenarios simulados.



Sin dragado

Dragado hasta 1.0 m en ambos canales

Dragado hasta 1.5 m en ambos canales

Fig. 37.cont.- Promedios de temperatura en Primavera para los distintos escenarios simulados

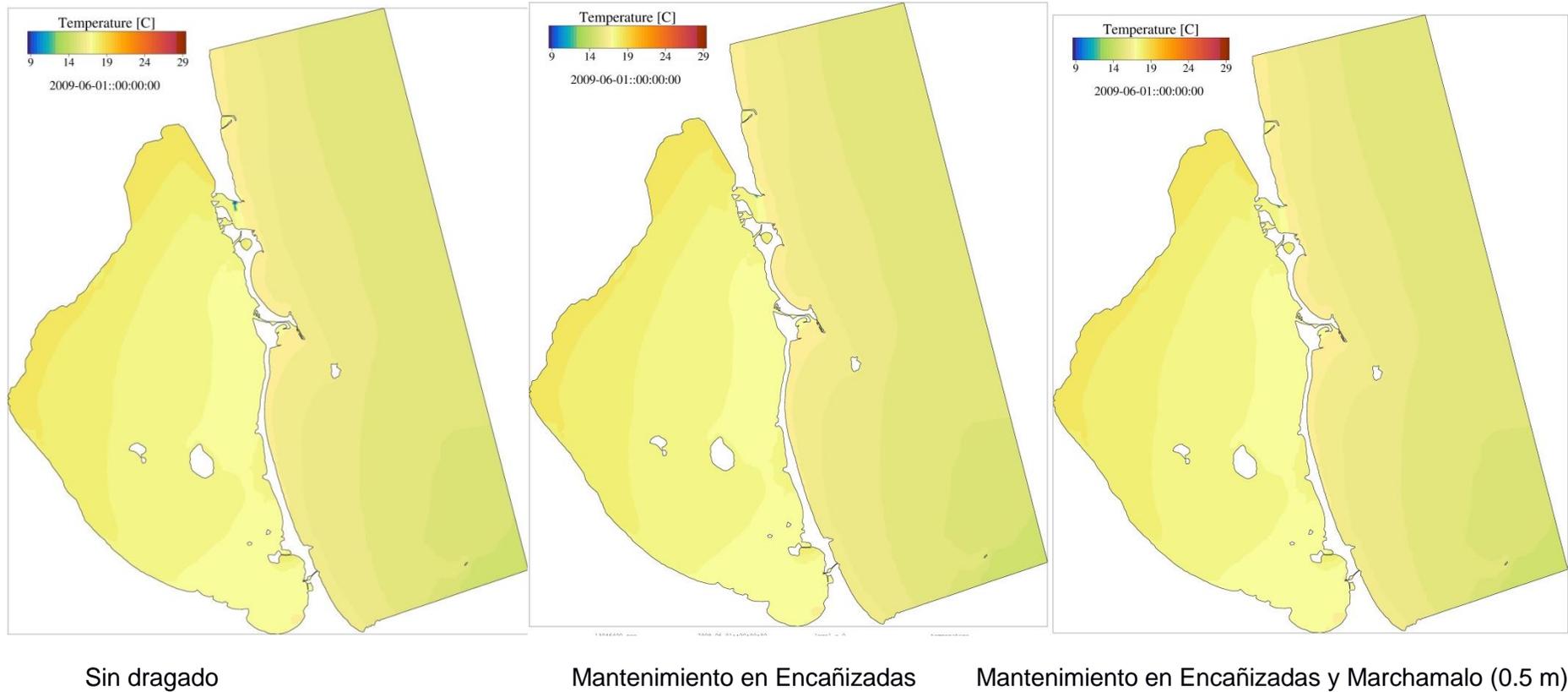


Fig. 37.cont.- Promedios de temperatura en Primavera para los distintos escenarios simulados

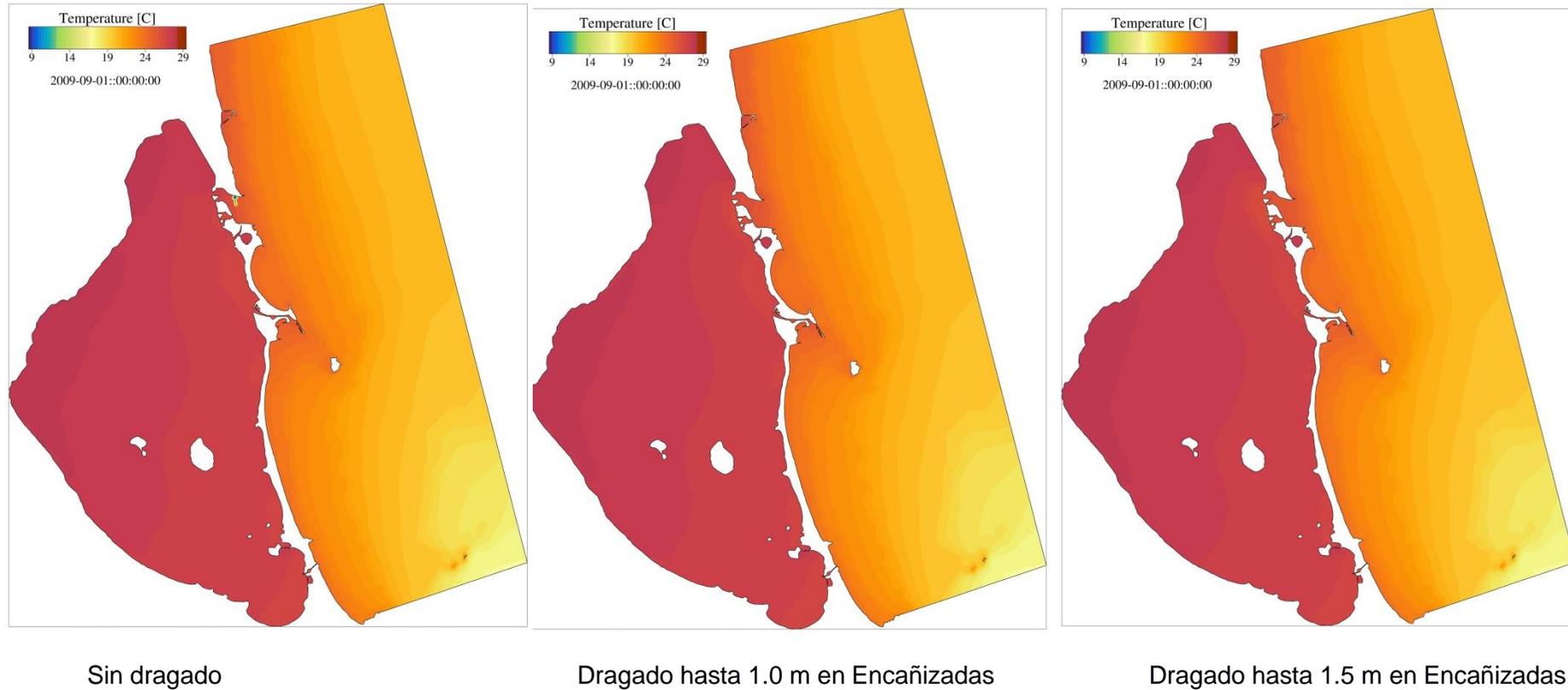
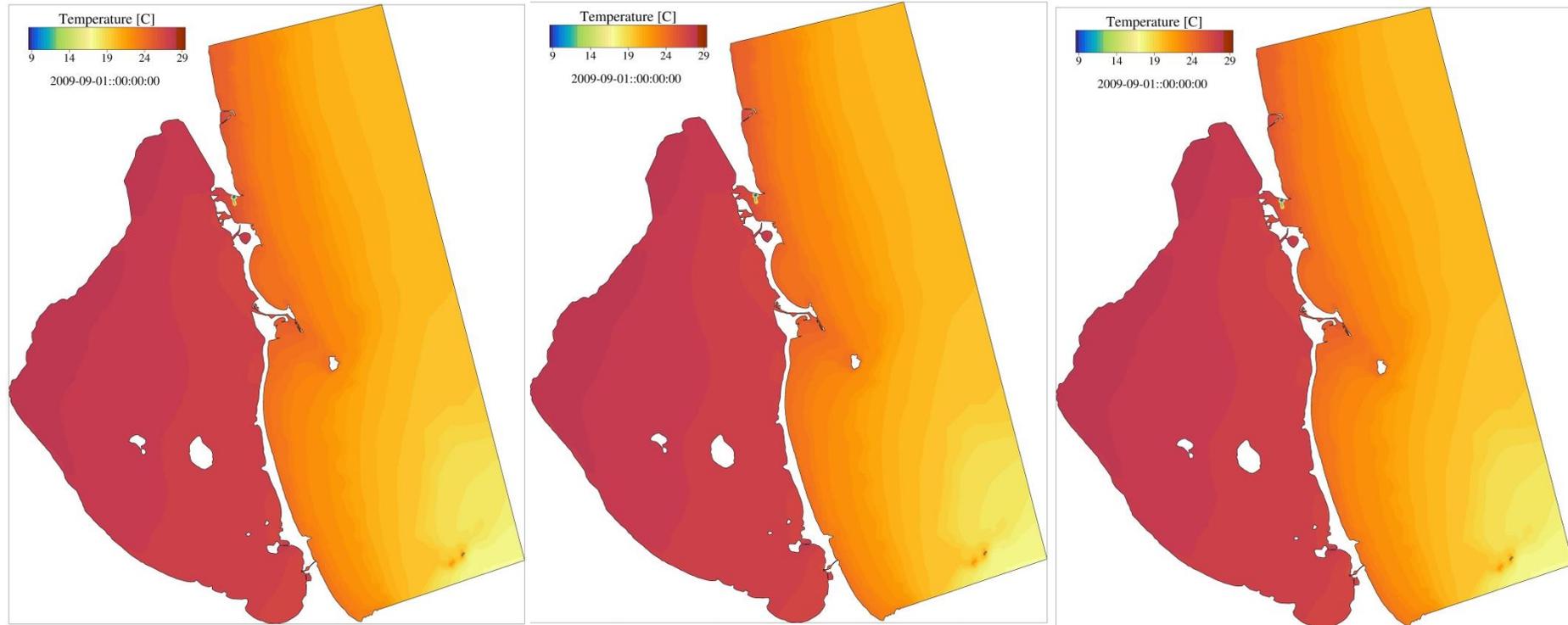


Fig. 38.- Promedios de temperatura en Verano para los distintos escenarios simulados.



Sin dragado

Dragado parcial de 0.5 m en Marchamalo

Dragado hasta 0.5 m en Marchamalo

Fig. 38.cont.- Promedios de temperatura en Verano para los distintos escenarios simulados

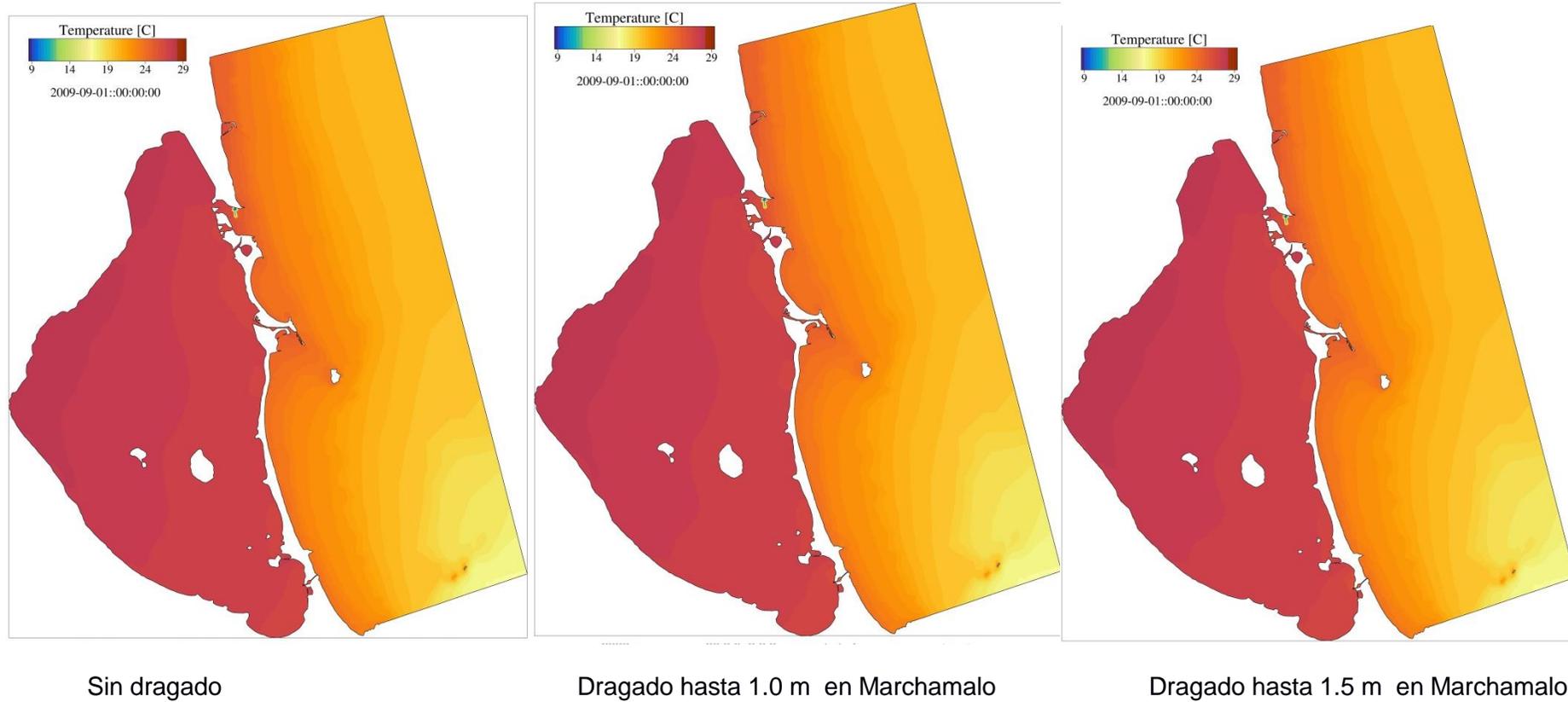
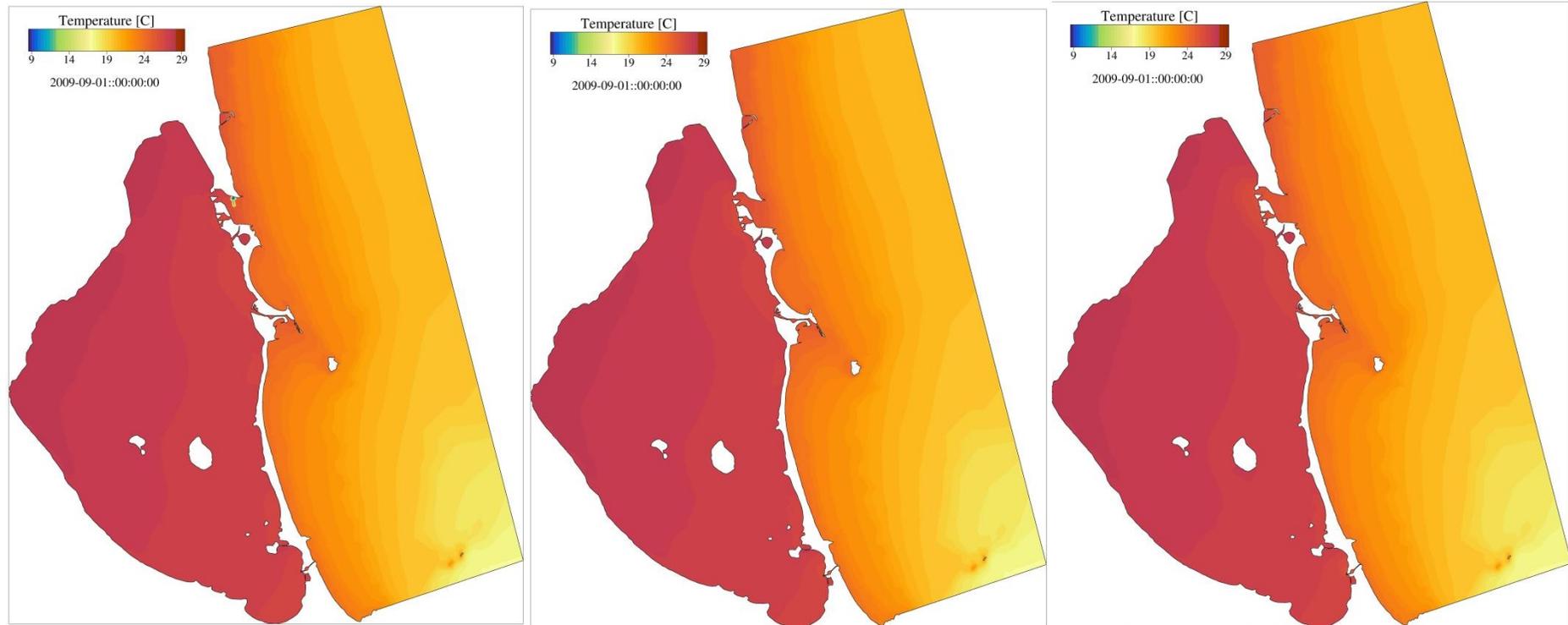


Fig. 38.cont.- Promedios de temperatura en Verano para los distintos escenarios simulados



Sin dragado

Dragado hasta 1.0 m en ambos canales

Dragado hasta 1.5 m en ambos canales

Fig. 38.cont.- Promedios de temperatura en Verano para los distintos escenarios simulados

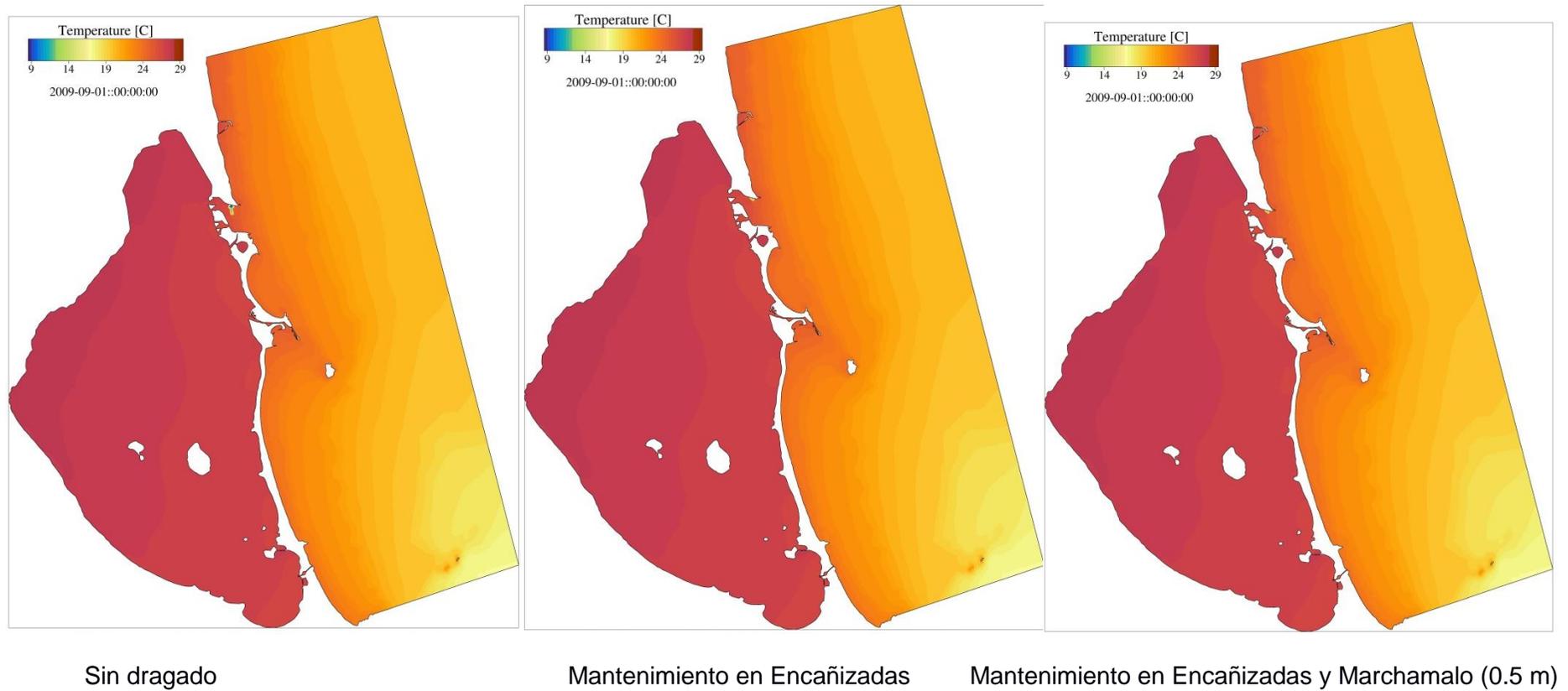


Fig. 38.cont.- Promedios de temperatura en Verano para los distintos escenarios simulados

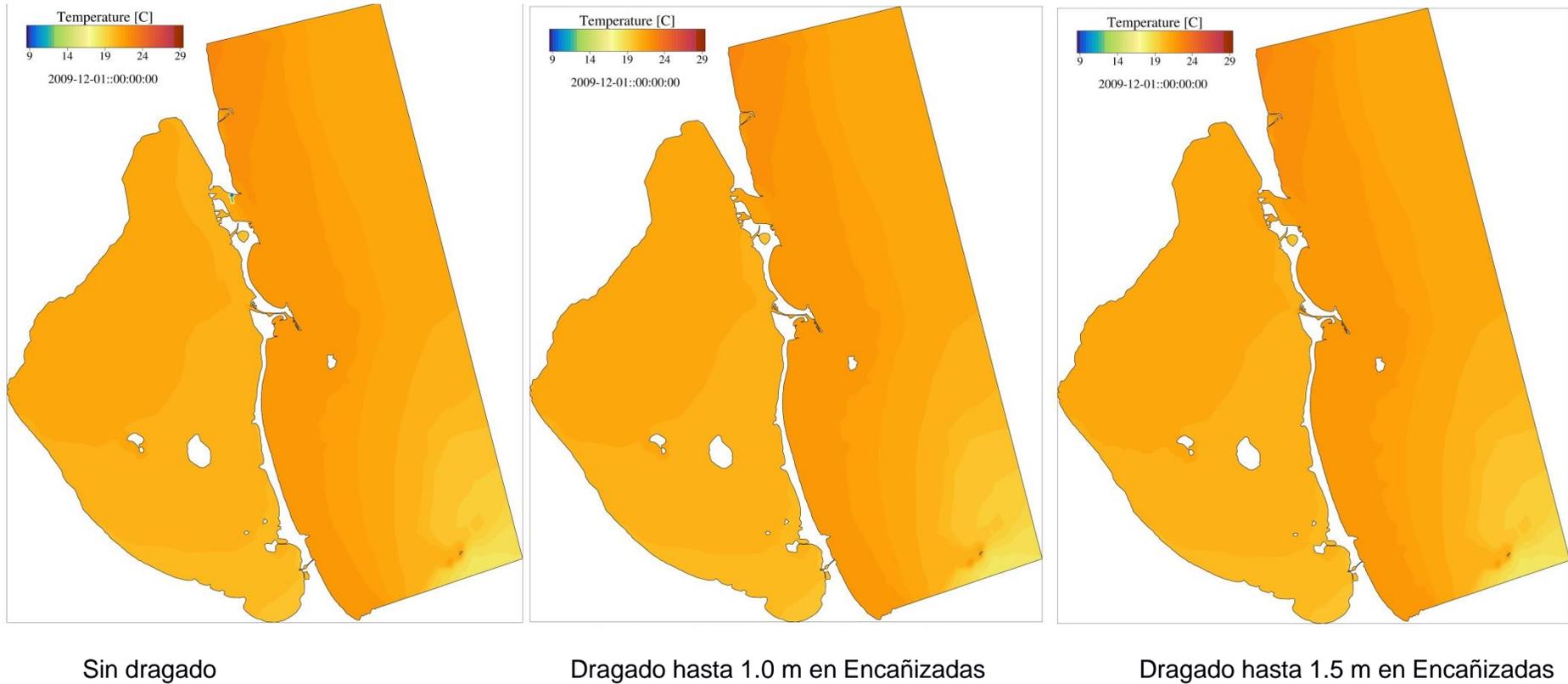


Fig. 39.- Promedios de temperatura en otoño para los distintos escenarios simulados.

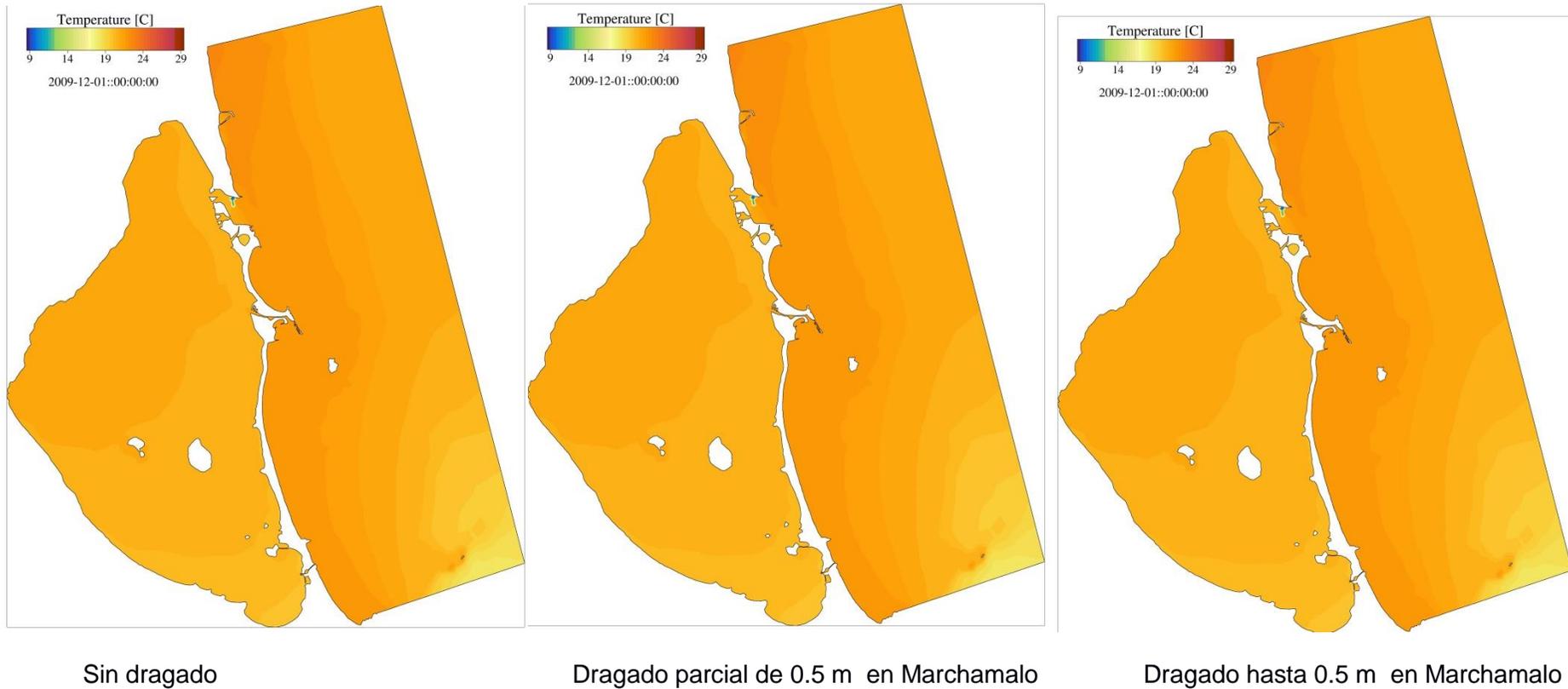


Fig. 39.cont- Promedios de temperatura en otoño para los distintos escenarios simulados.

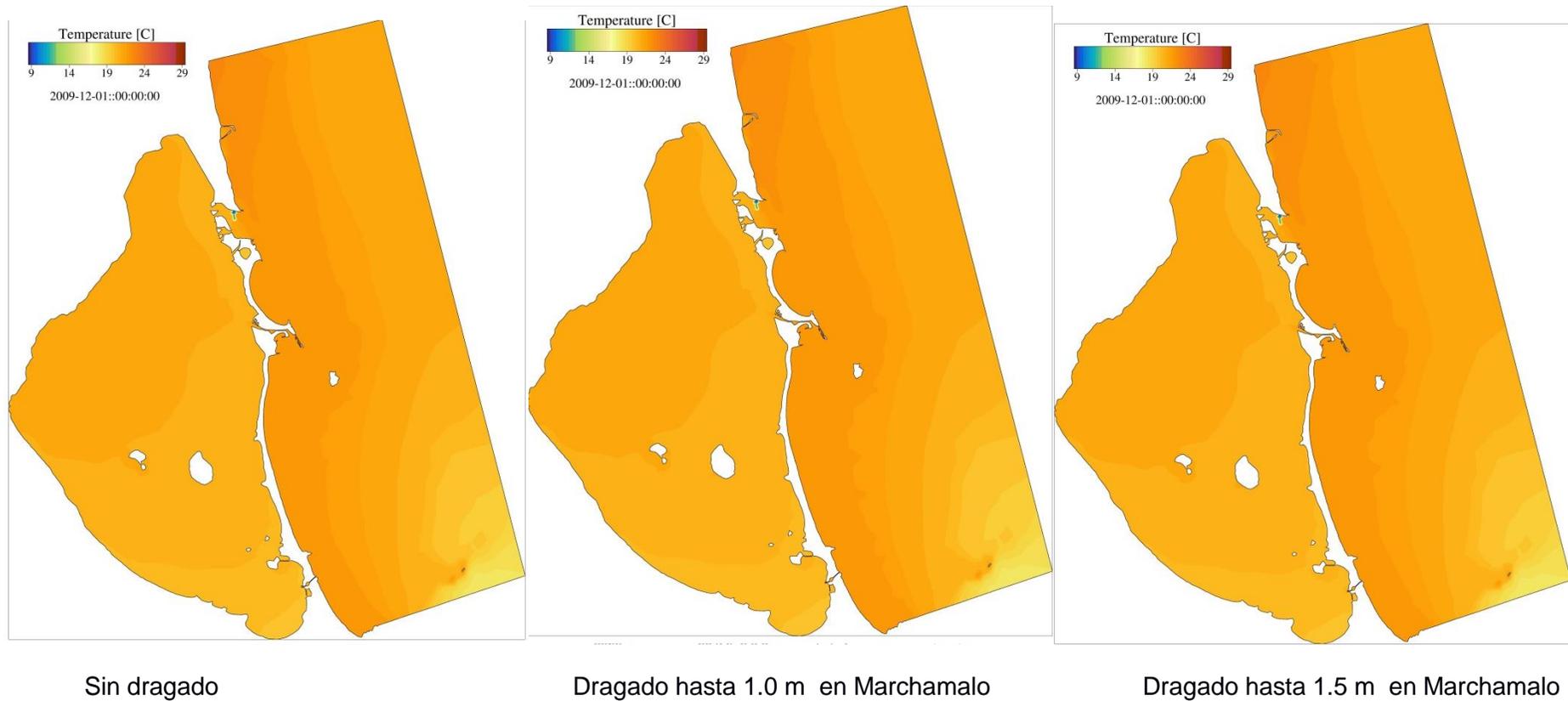


Fig. 39.cont- Promedios de temperatura en otoño para los distintos escenarios simulados.

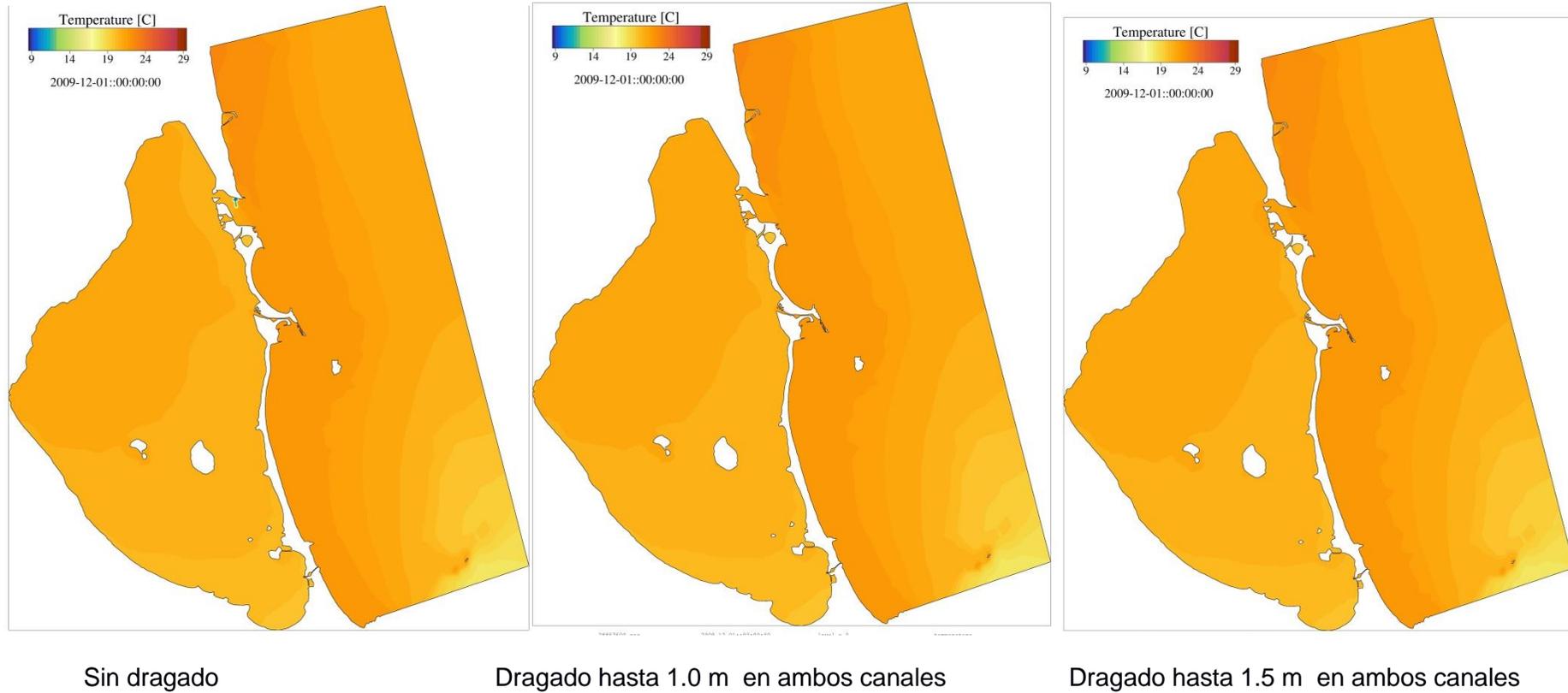


Fig. 39.cont- Promedios de temperatura en otoño para los distintos escenarios simulados.

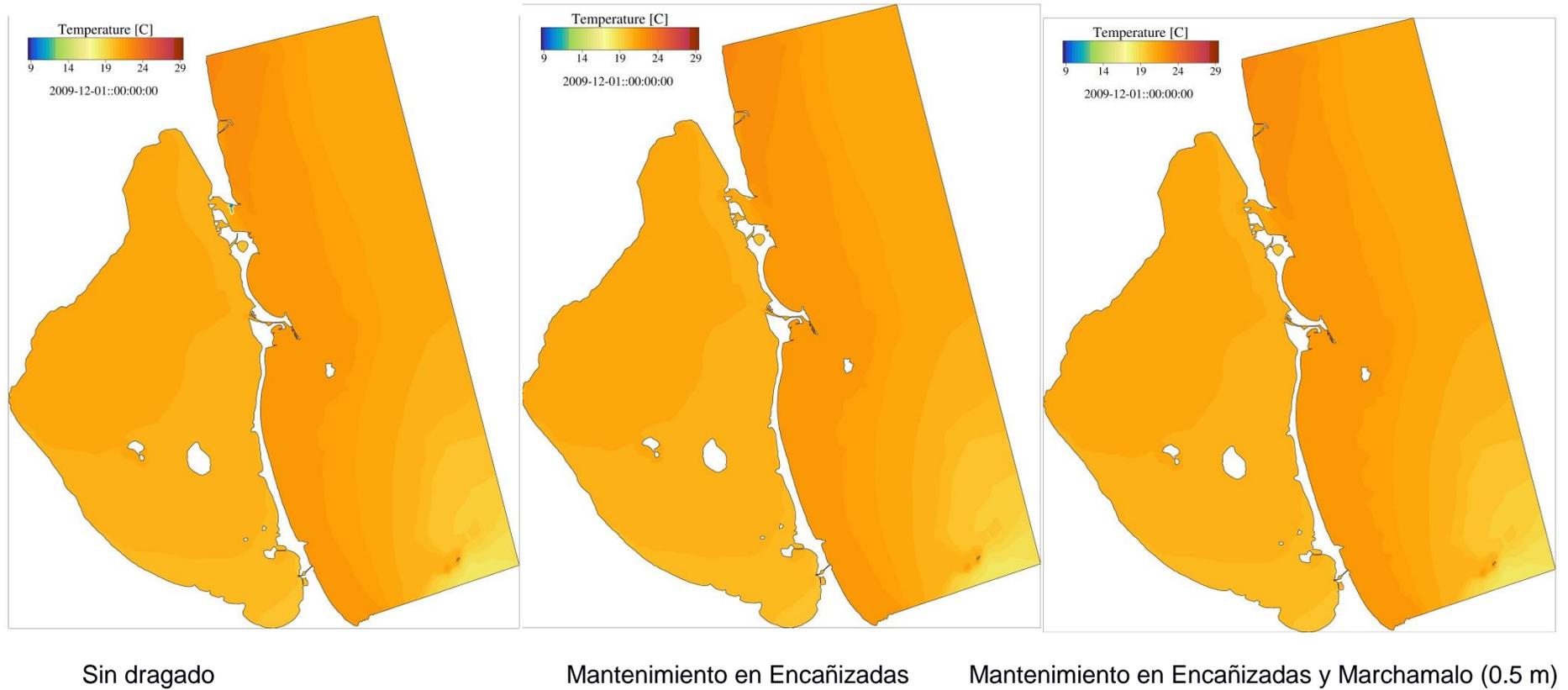


Fig. 39.cont- Promedios de temperatura en otoño para los distintos escenarios simulados.

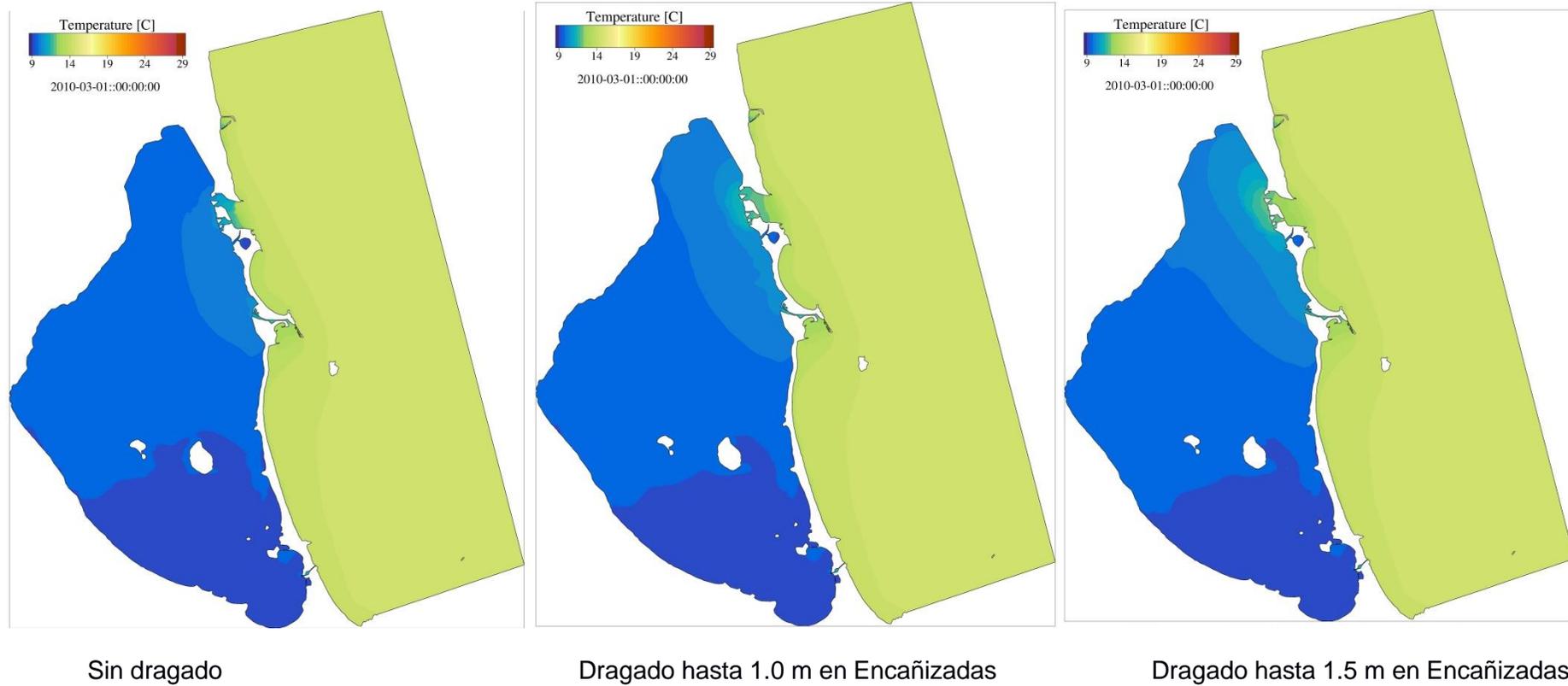


Fig. 40.- Promedios de temperatura en invierno para los distintos escenarios simulados.

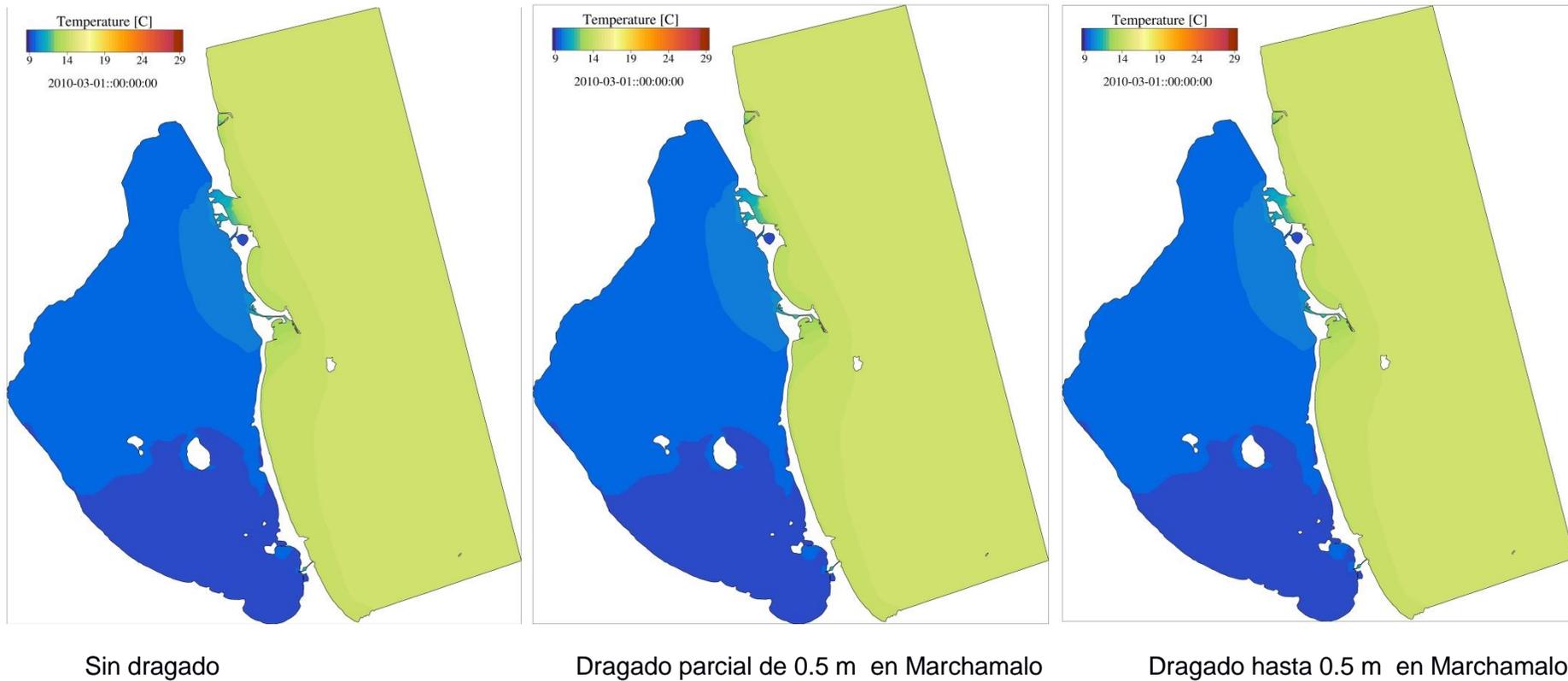


Fig. 40.cont.- Promedios de temperatura en invierno para los distintos escenarios simulados.

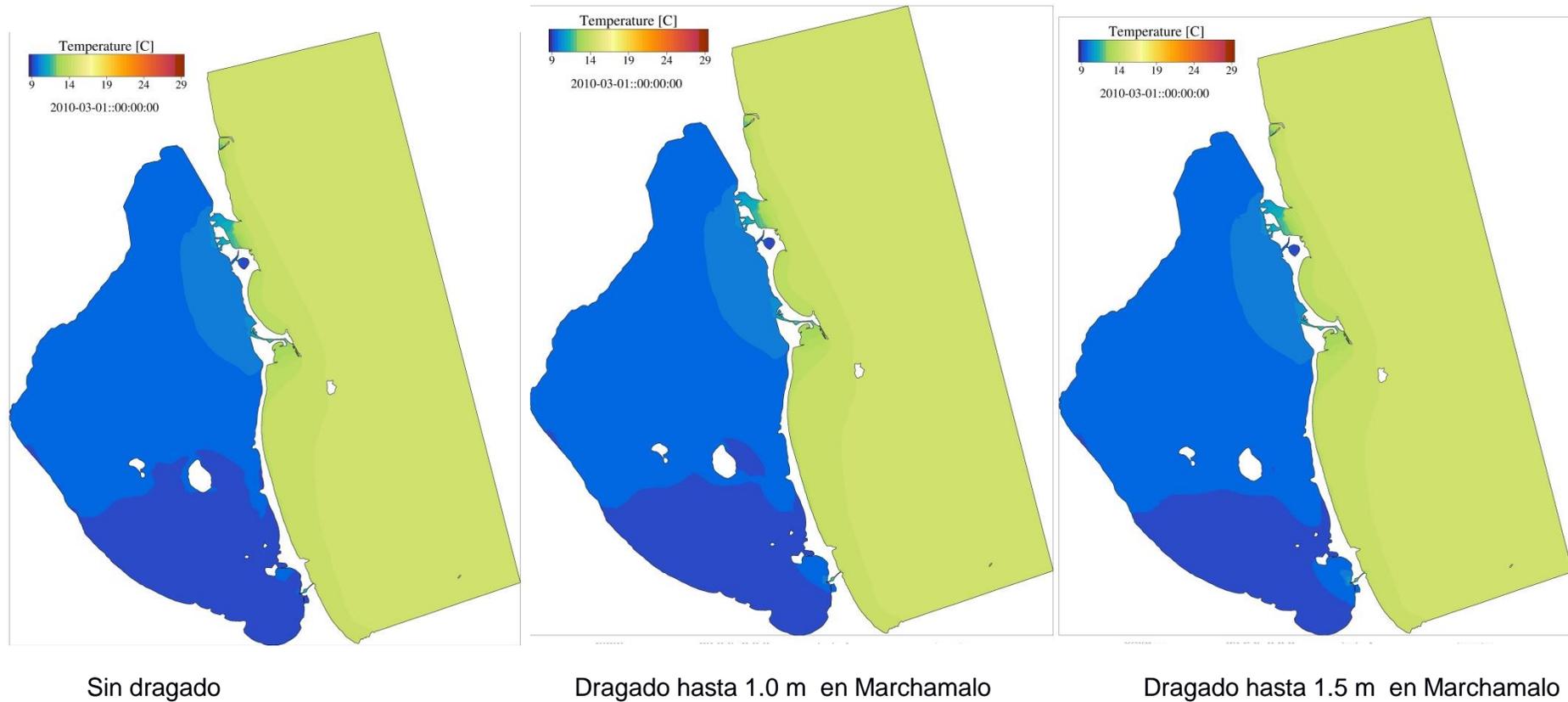


Fig. 40.cont.- Promedios de temperatura en invierno para los distintos escenarios simulados.

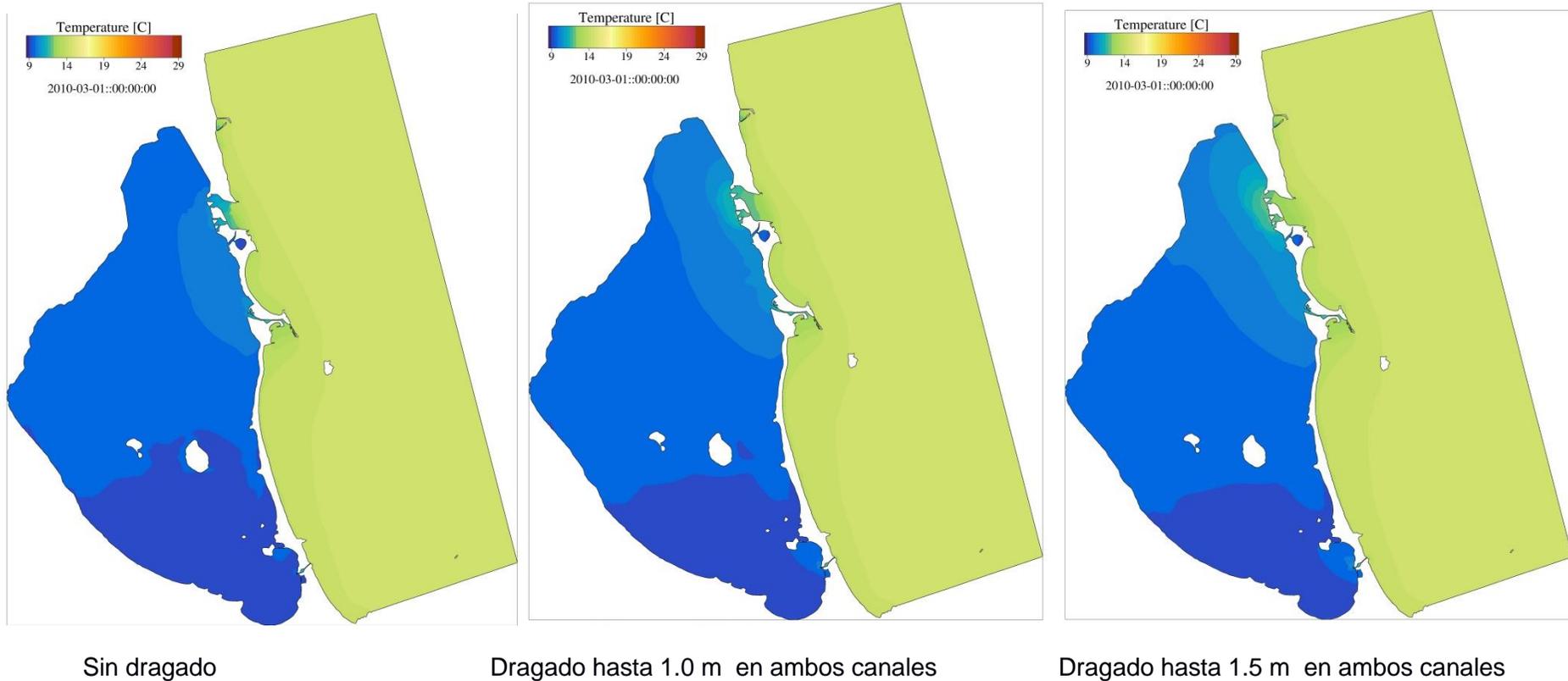


Fig. 40.cont.- Promedios de temperatura en invierno para los distintos escenarios simulados.

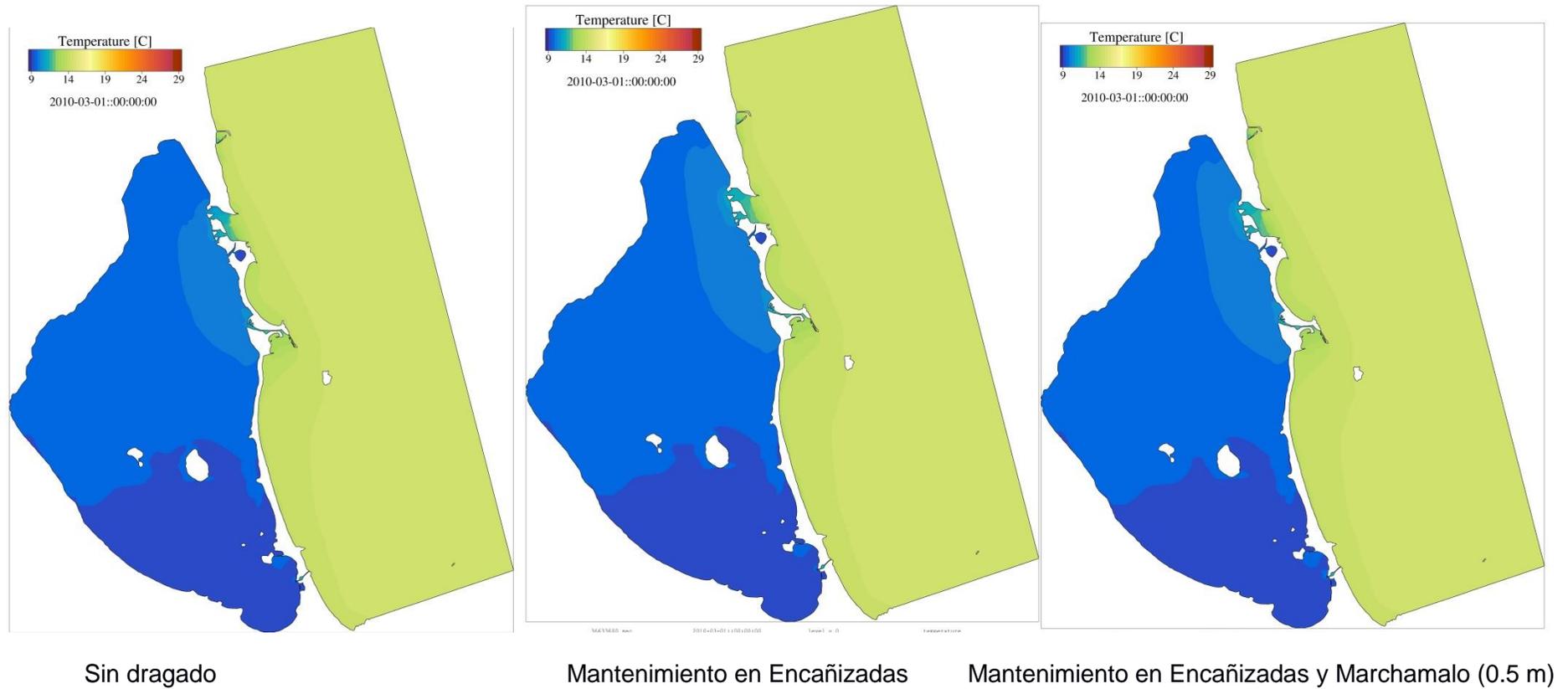


Fig. 40.cont.- Promedios de temperatura en invierno para los distintos escenarios simulados.

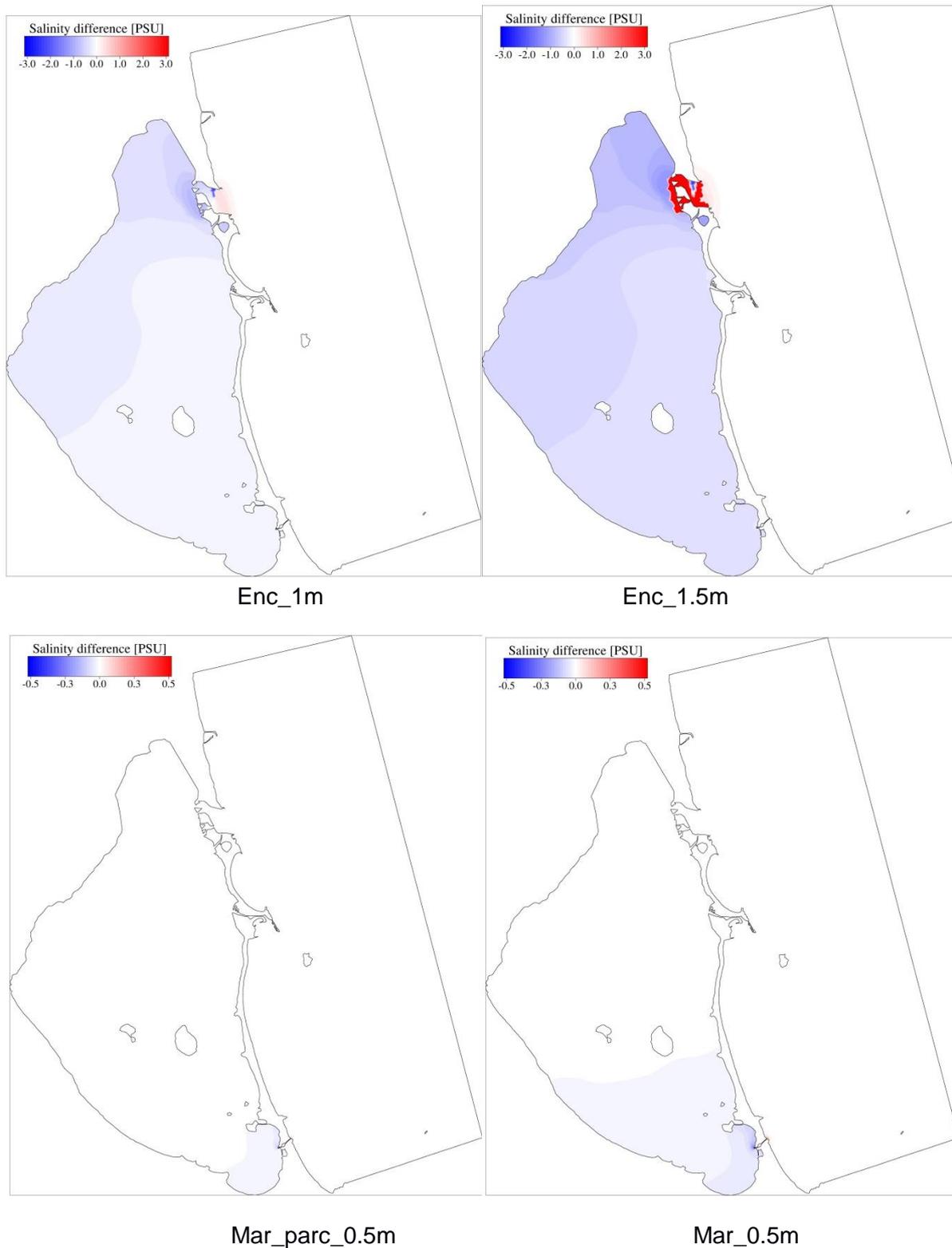


Fig. 41.- Diferencias de Salinidad con el caso sin dragado en Primavera para los distintos escenarios de dragado.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

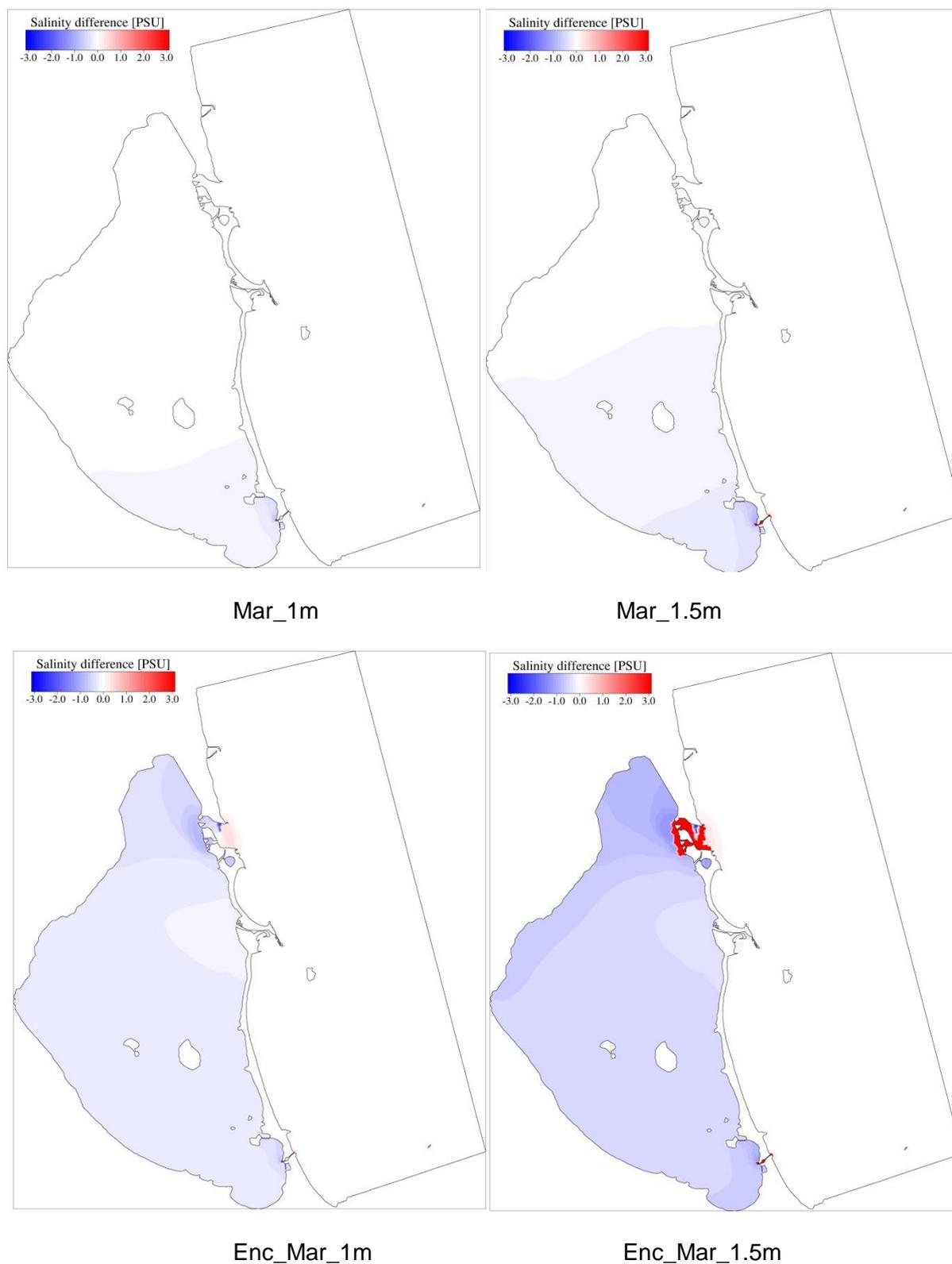


Fig. 41.cont.- Diferencias de Salinidad con el caso sin dragado en Primavera para los distintos escenarios de dragado.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

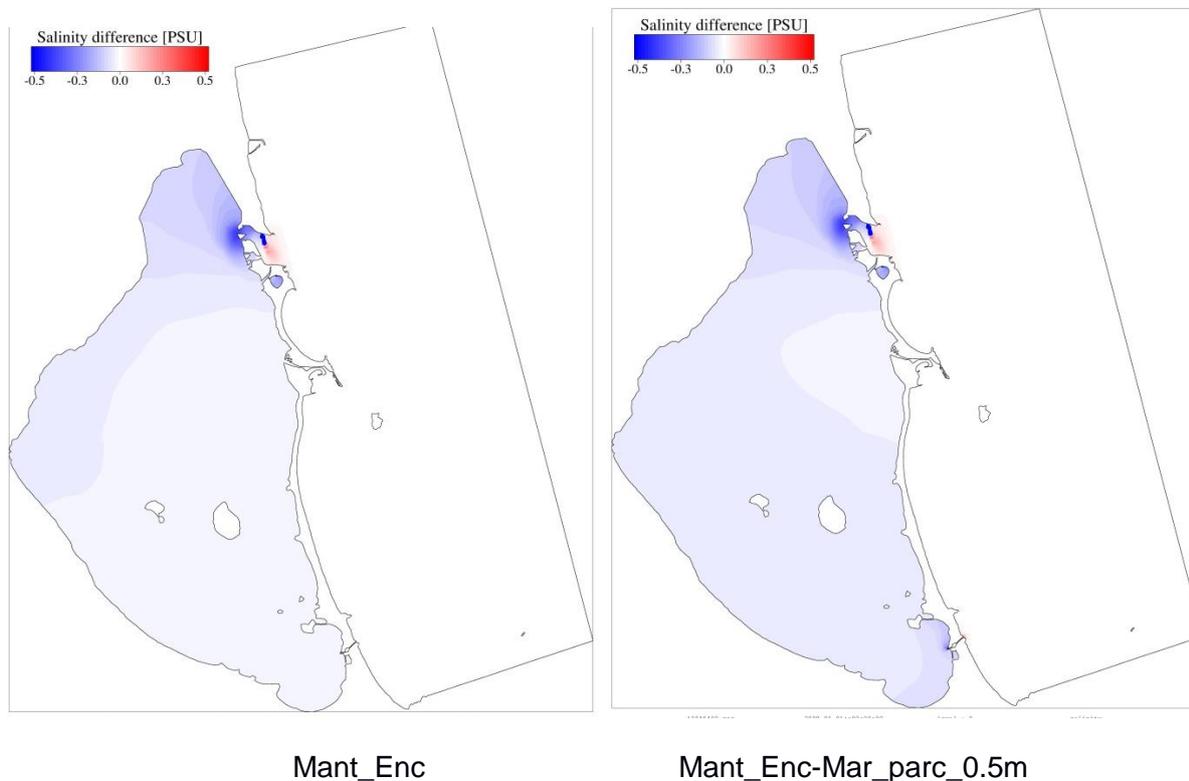


Fig. 41.cont.- Diferencias de Salinidad con el caso sin dragado en Primavera para los distintos escenarios de dragado.

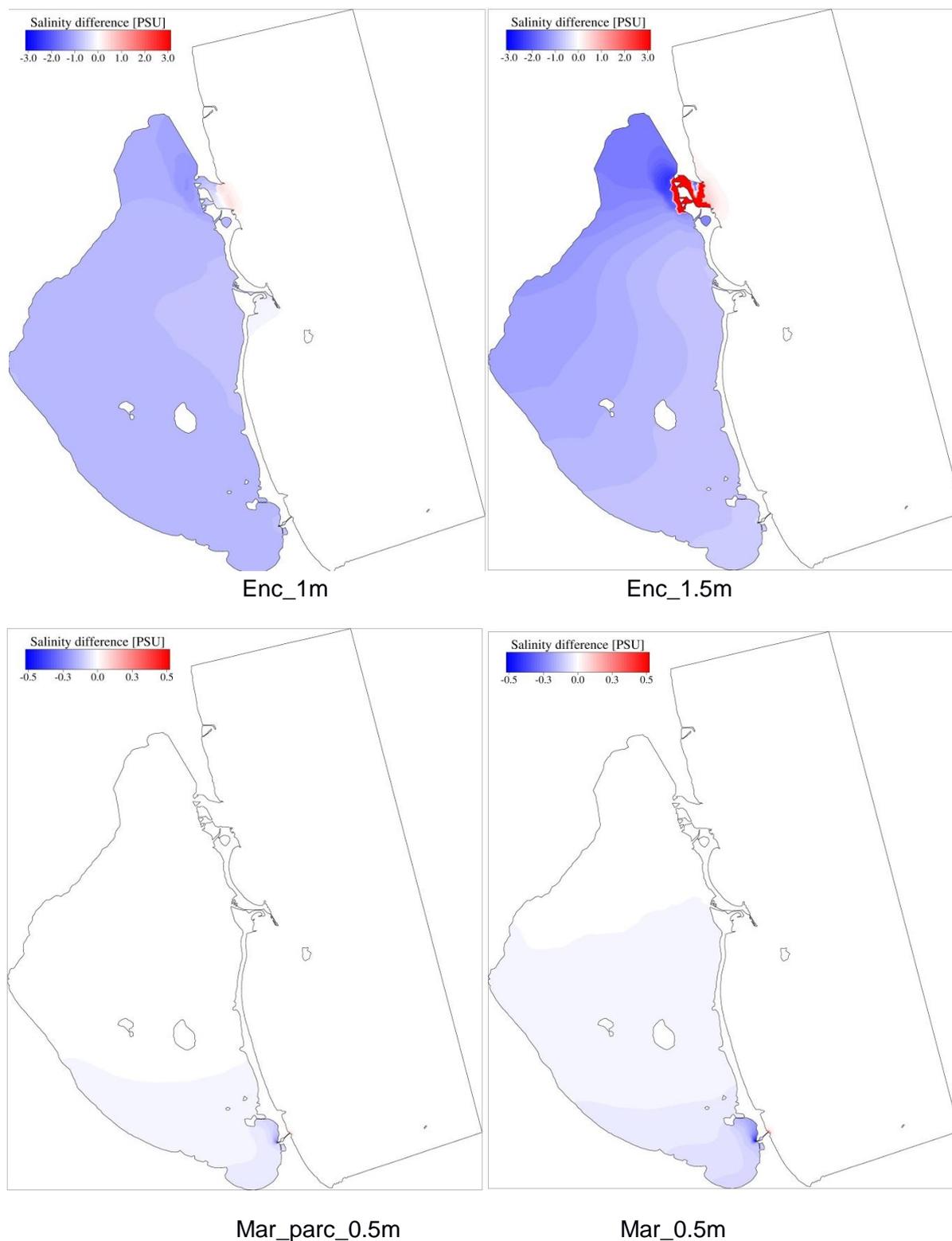


Fig. 42.- Diferencias de Salinidad con el caso sin dragado en Verano para los distintos escenarios de dragado.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

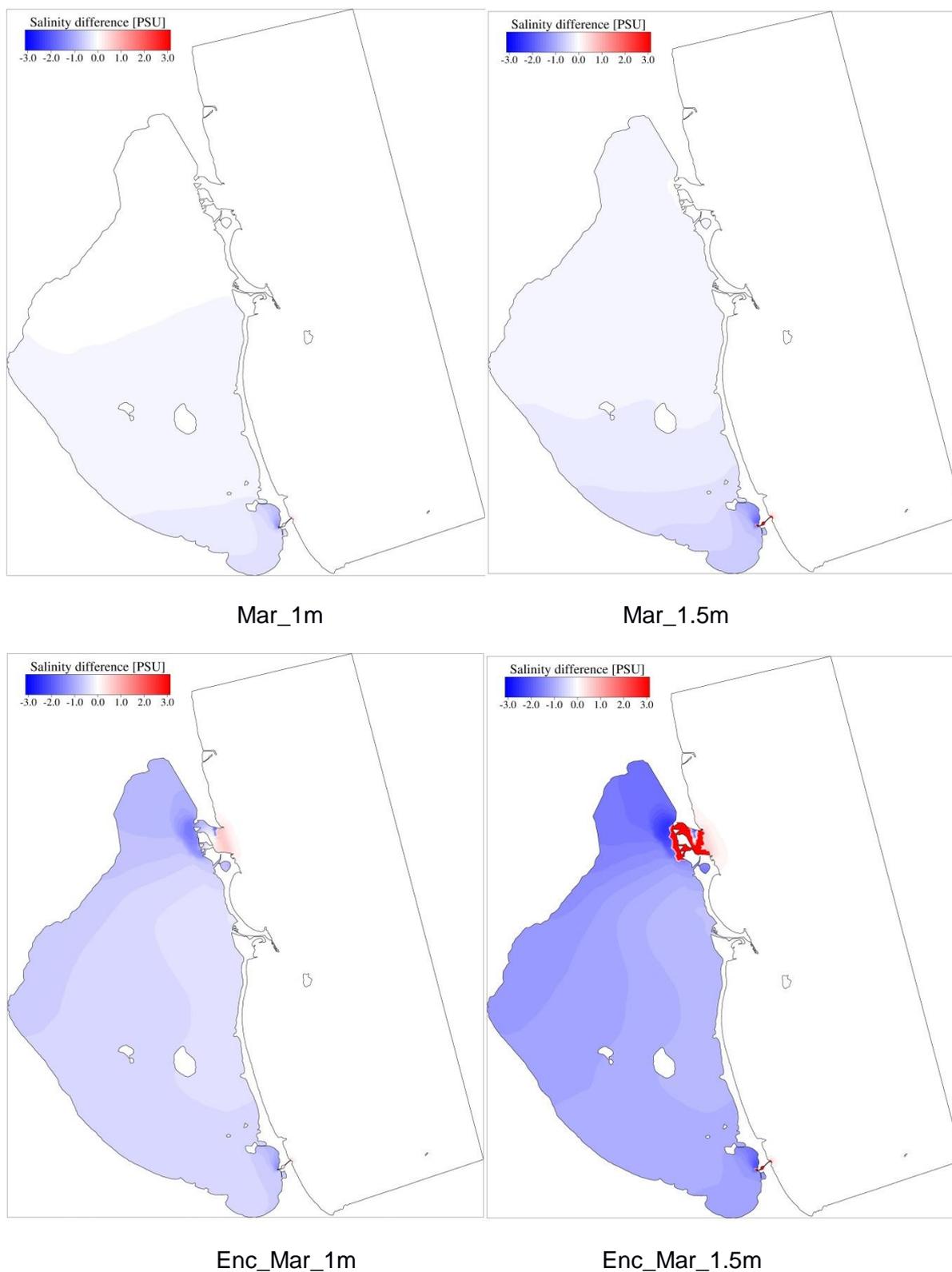


Fig. 42.cont.- Diferencias de Salinidad con el caso sin dragado en Verano para los distintos escenarios de dragado.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

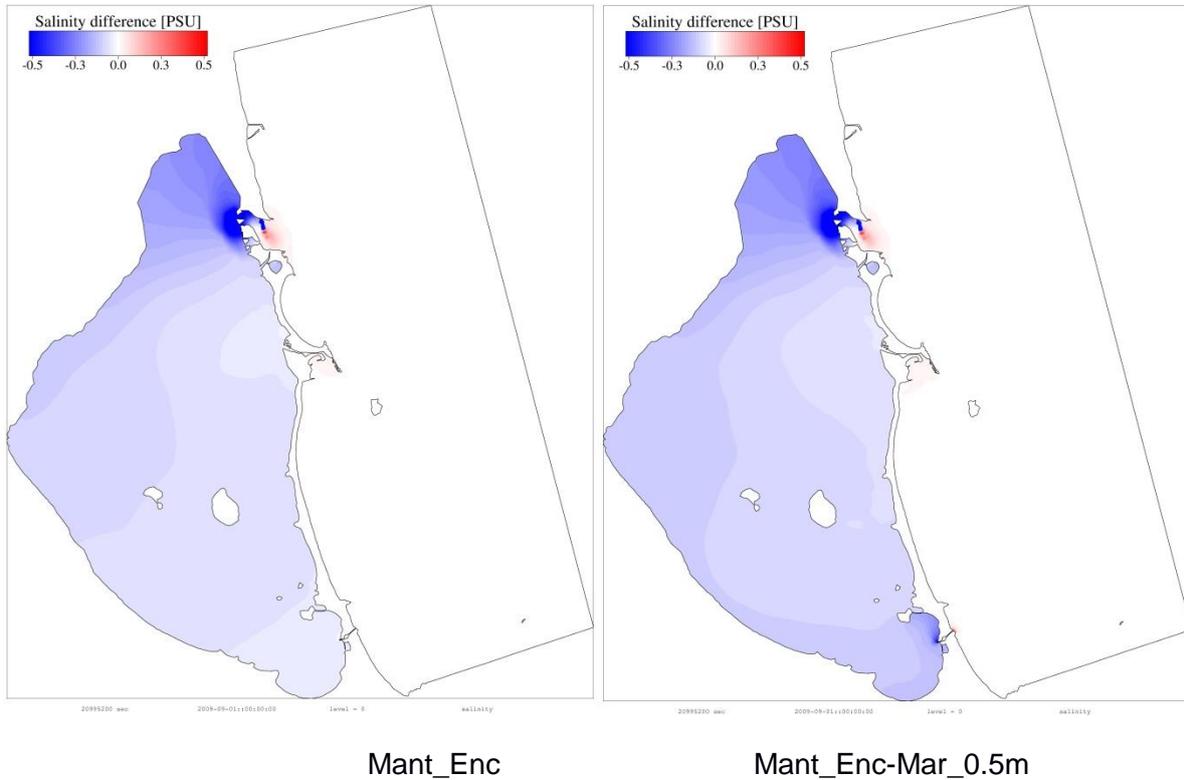


Fig. 42.cont.- Diferencias de Salinidad con el caso sin dragado en Verano para los distintos escenarios de dragado.

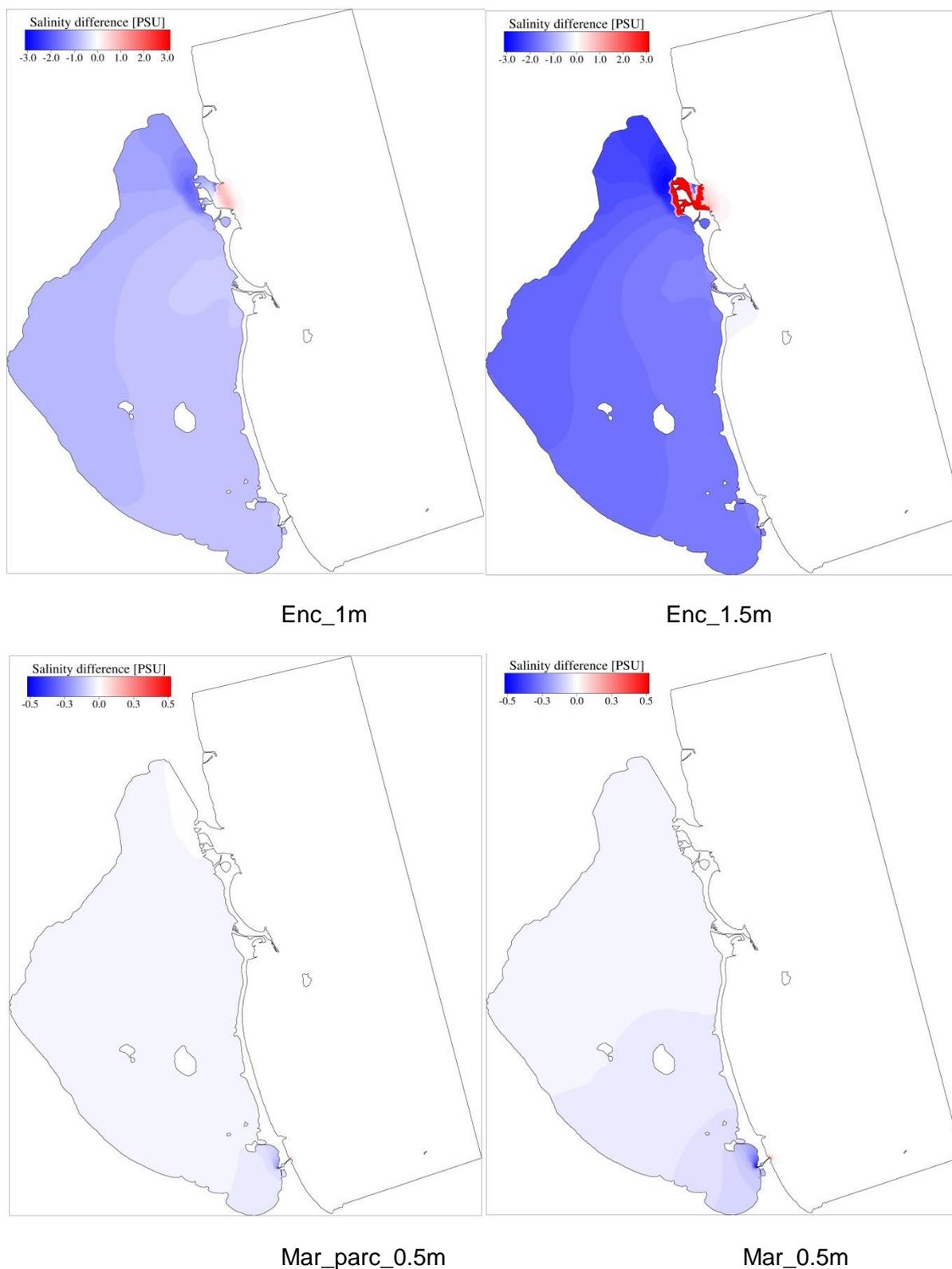


Fig. 43.- Diferencias de Salinidad con el caso sin dragado en Otoño para los distintos escenarios de dragado.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

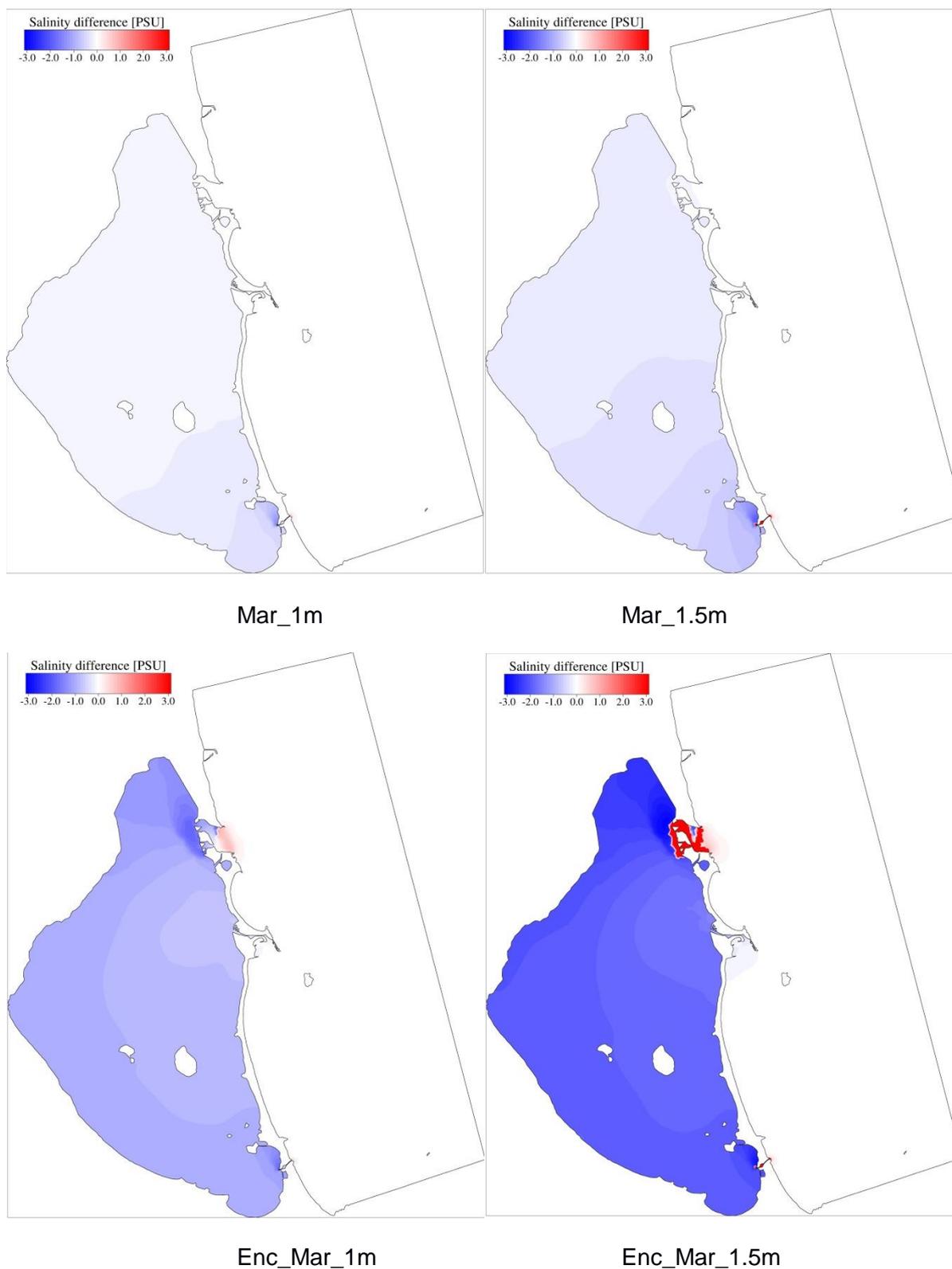


Fig. 43.cont.- Diferencias de Salinidad con el caso sin dragado en Otoño para los distintos escenarios de dragado.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

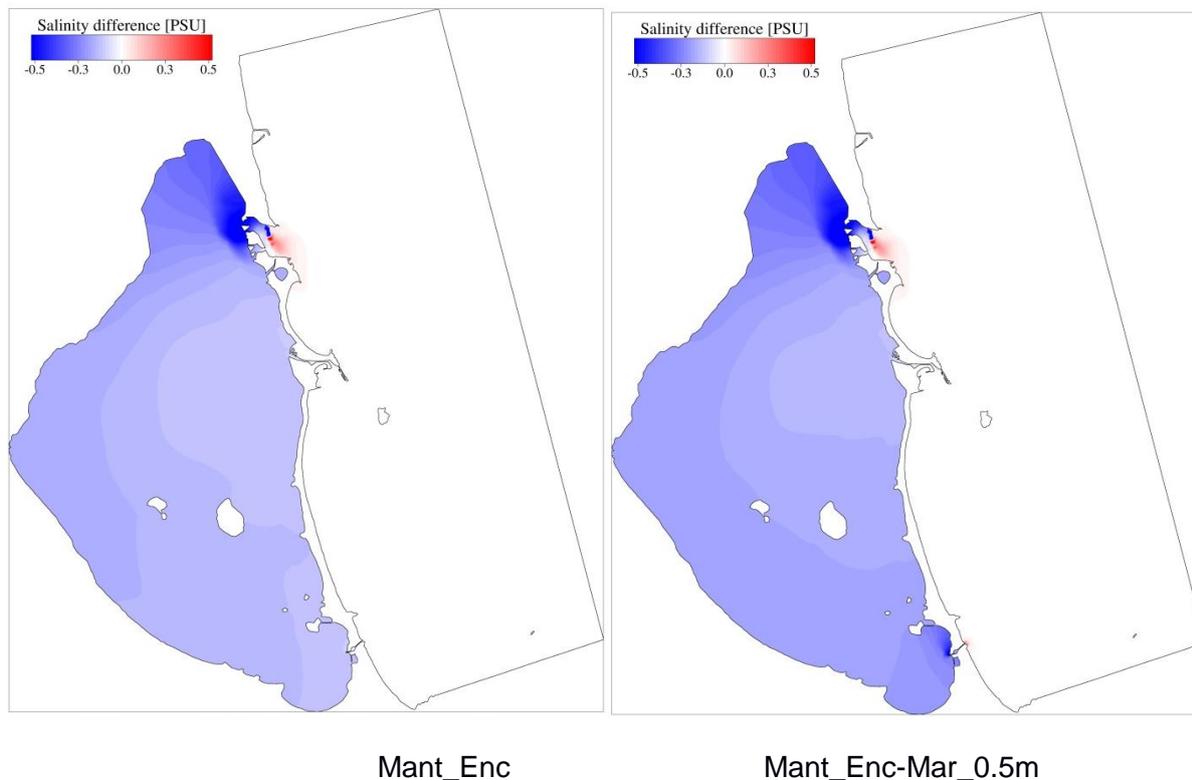


Fig. 43.cont.- Diferencias de Salinidad con el caso sin dragado en Otoño para los distintos escenarios de dragado.

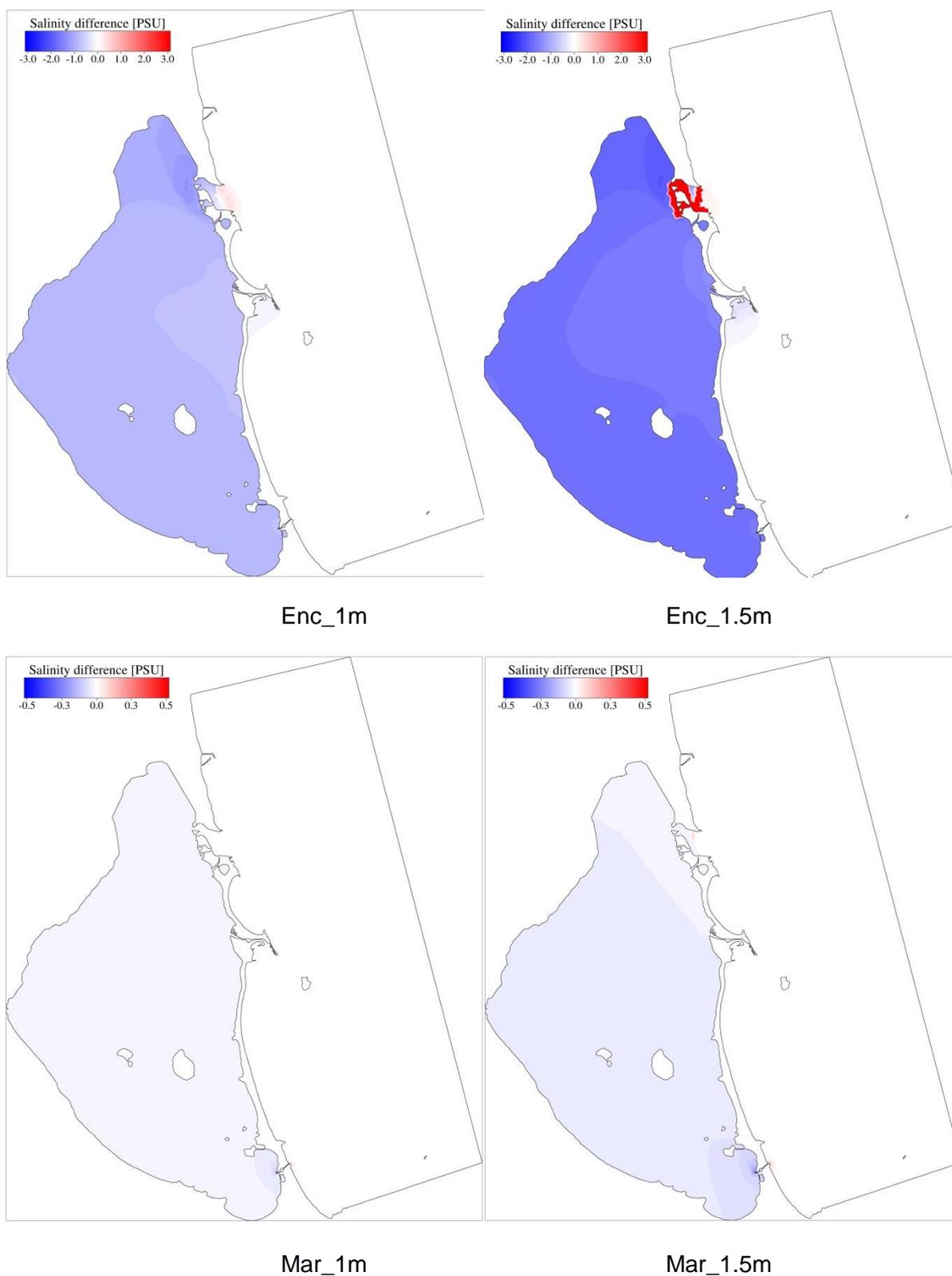


Fig. 44.- Diferencias de Salinidad con el caso sin dragado en Invierno para los distintos escenarios de dragado.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

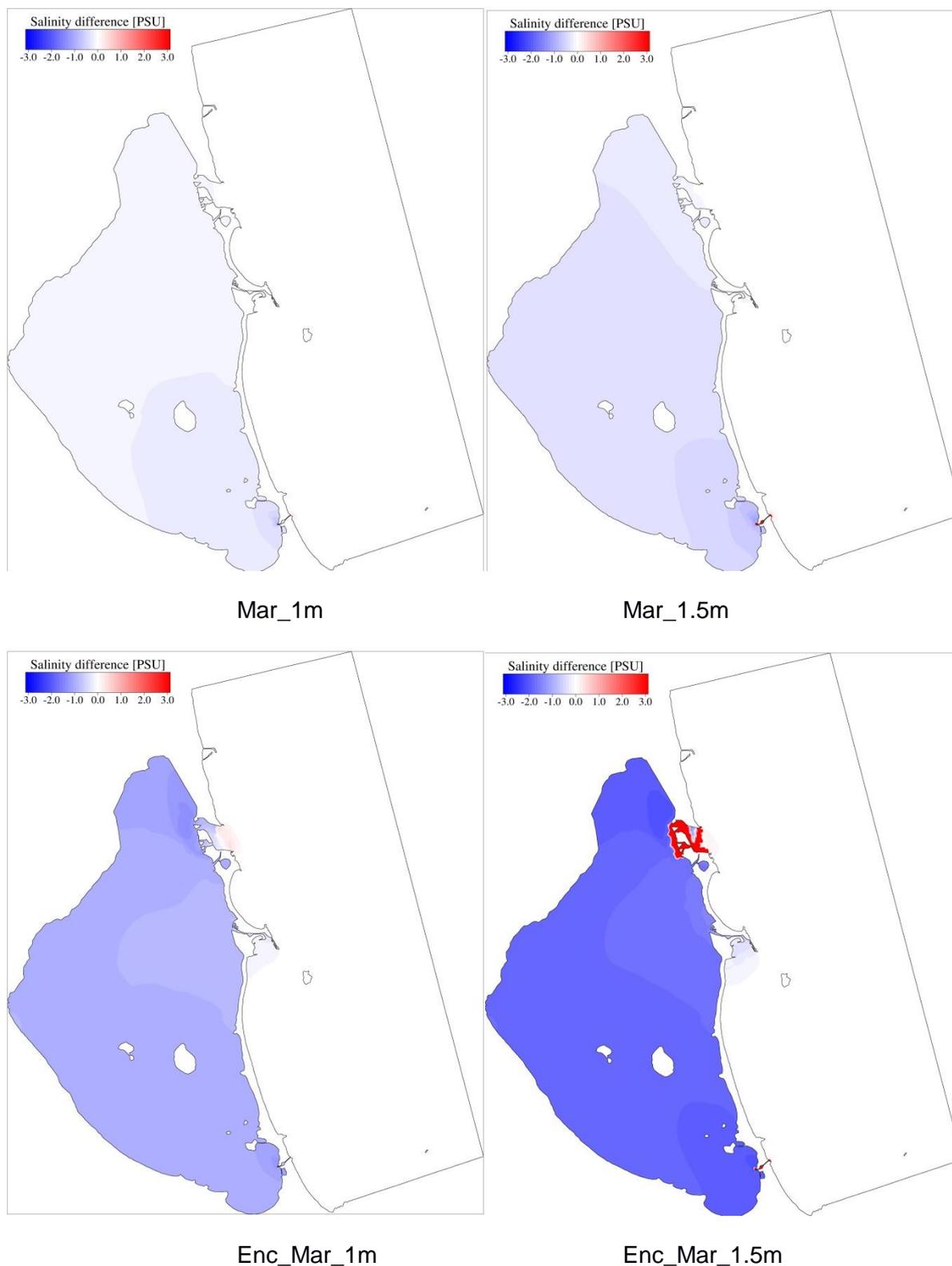


Fig. 44.cont- Diferencias de Salinidad con el caso sin dragado en Invierno para los distintos escenarios de dragado.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

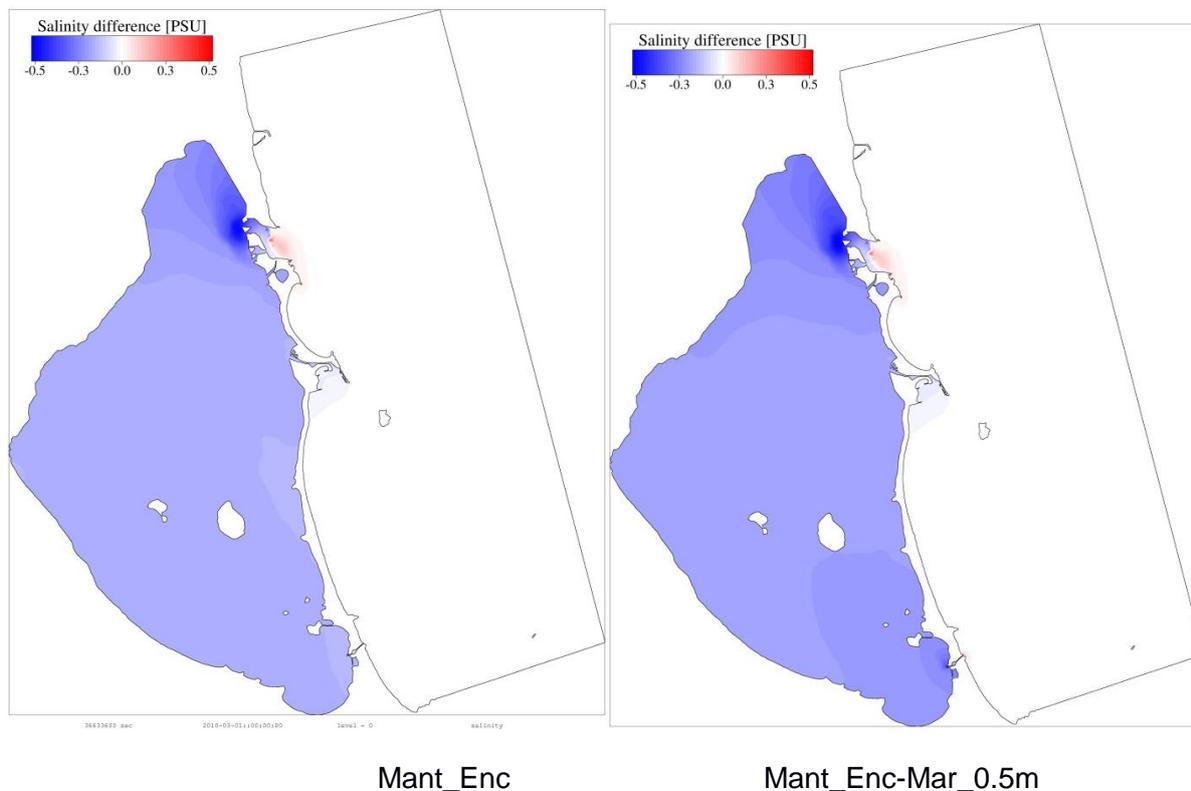


Fig. 44.cont- Diferencias de Salinidad con el caso sin dragado en Invierno para los distintos escenarios de dragado.

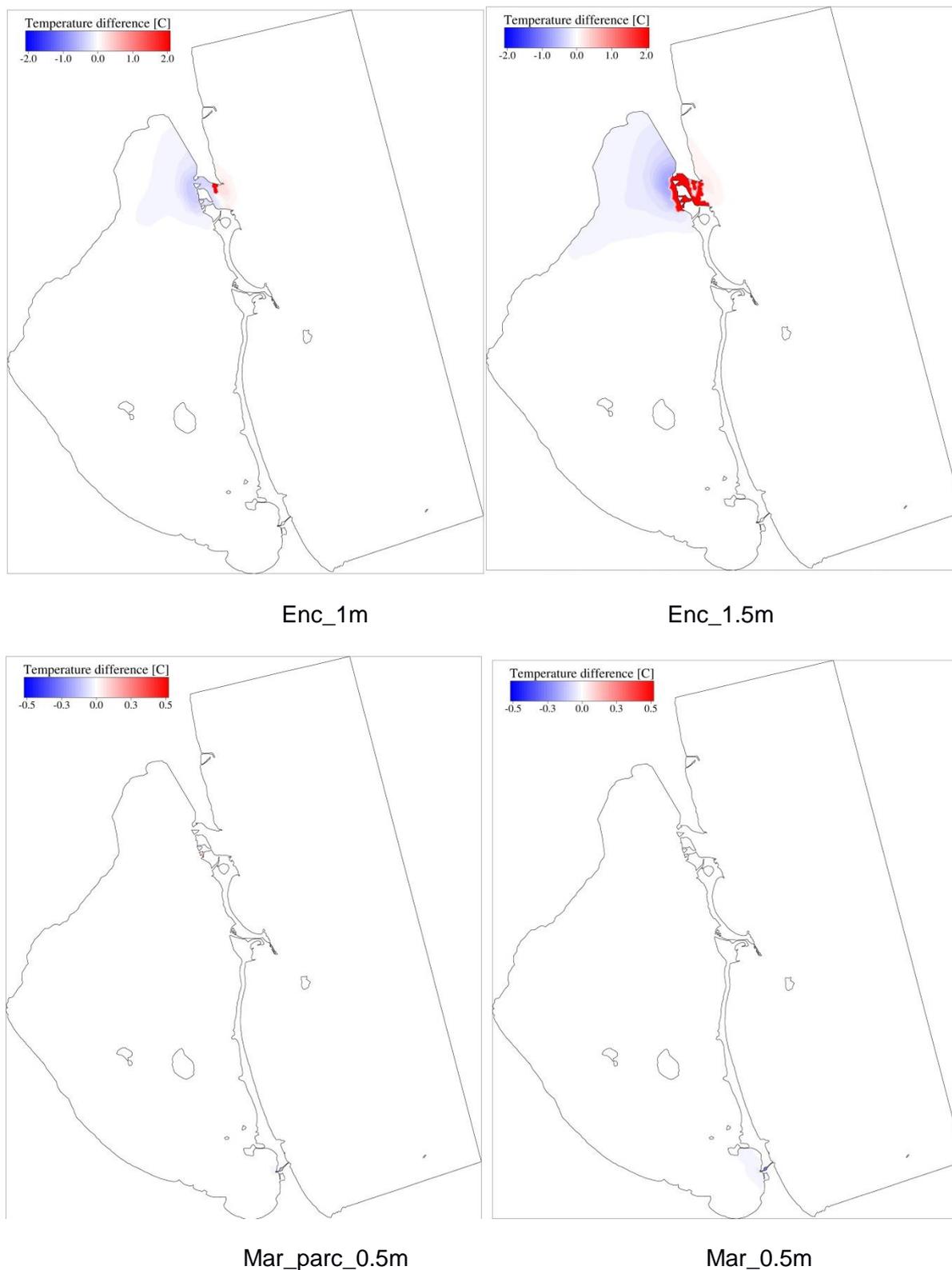


Fig. 45.- Diferencias de Temperatura con el caso sin dragado en Primavera para los distintos escenarios de dragado.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

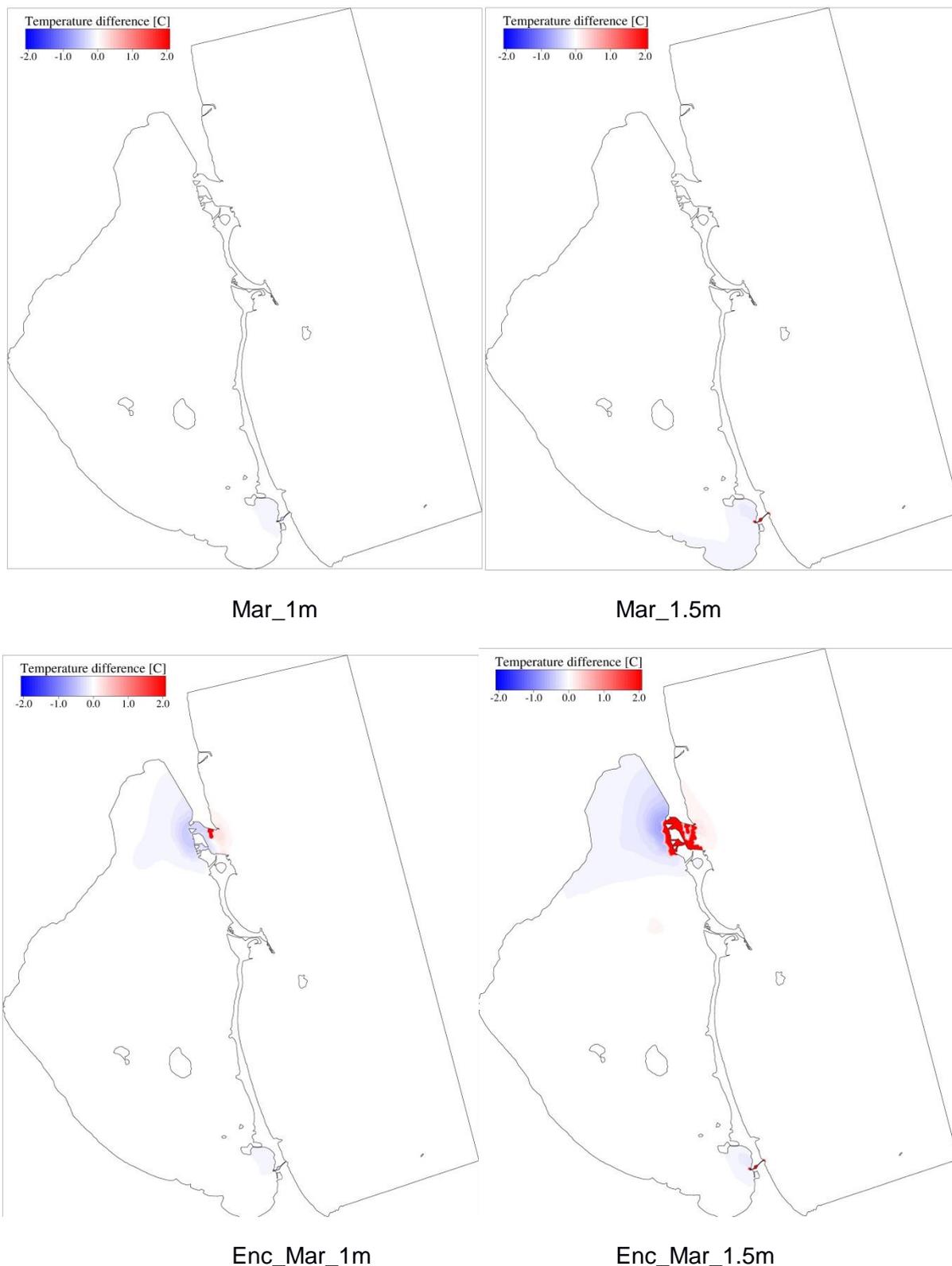


Fig. 45.cont.- Diferencias de Temperatura con el caso sin dragado en Primavera para los distintos escenarios de dragado.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

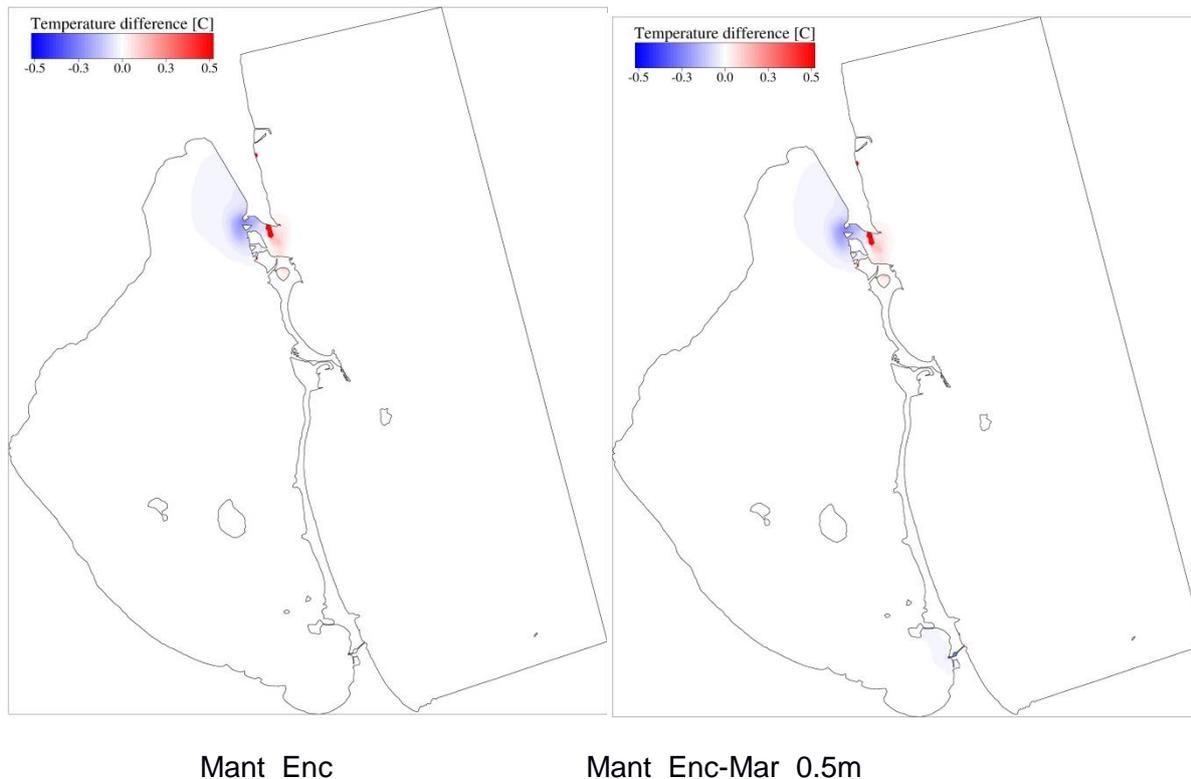


Fig. 45.cont.- Diferencias de Temperatura con el caso sin dragado en Primavera para los distintos escenarios de dragado.

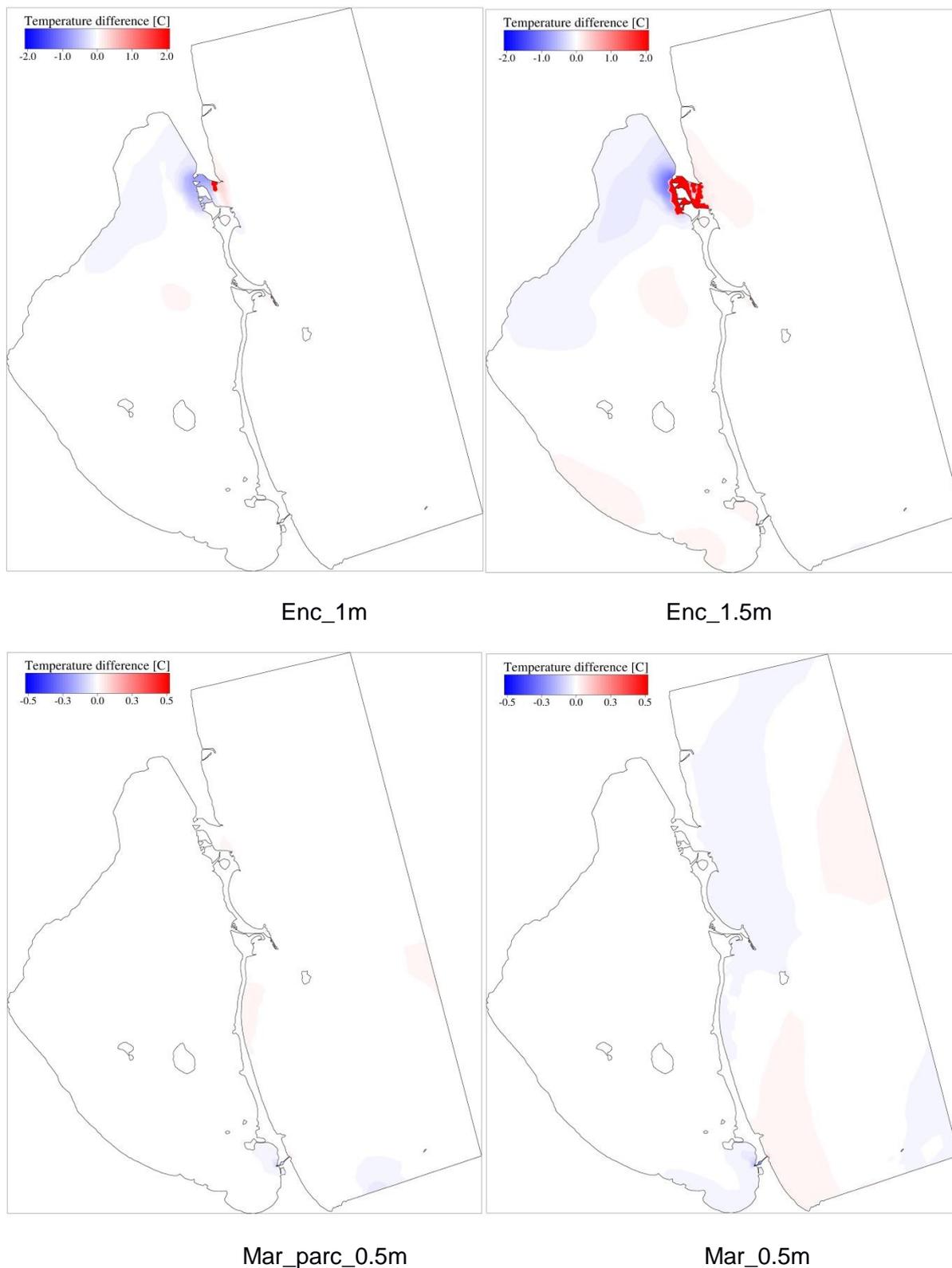


Fig. 46.- Diferencias de Temperatura con el caso sin dragado en Verano para los distintos escenarios de dragado.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

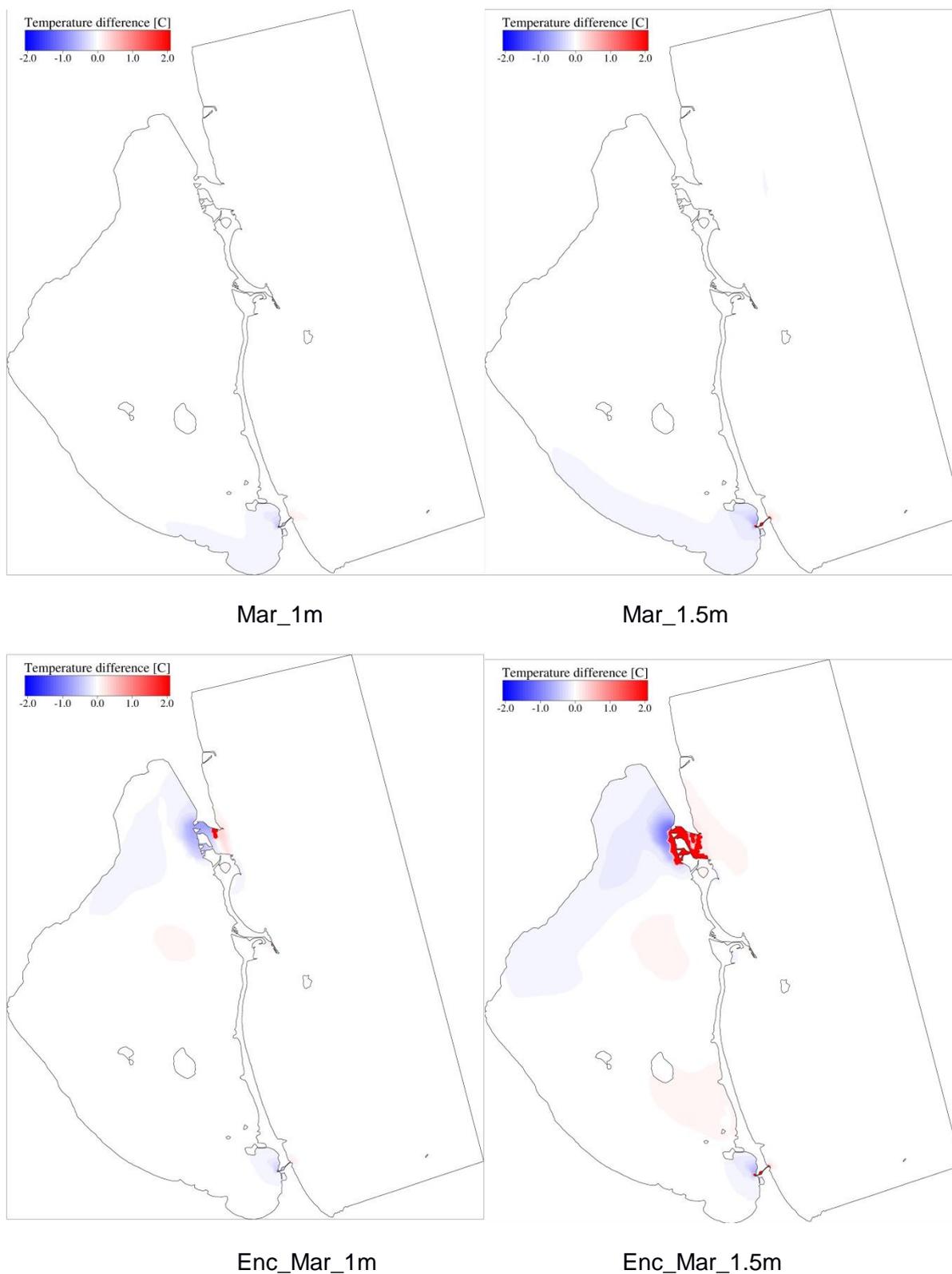


Fig. 46.cont.- Diferencias de Temperatura con el caso sin dragado en Verano para los distintos escenarios de dragado.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

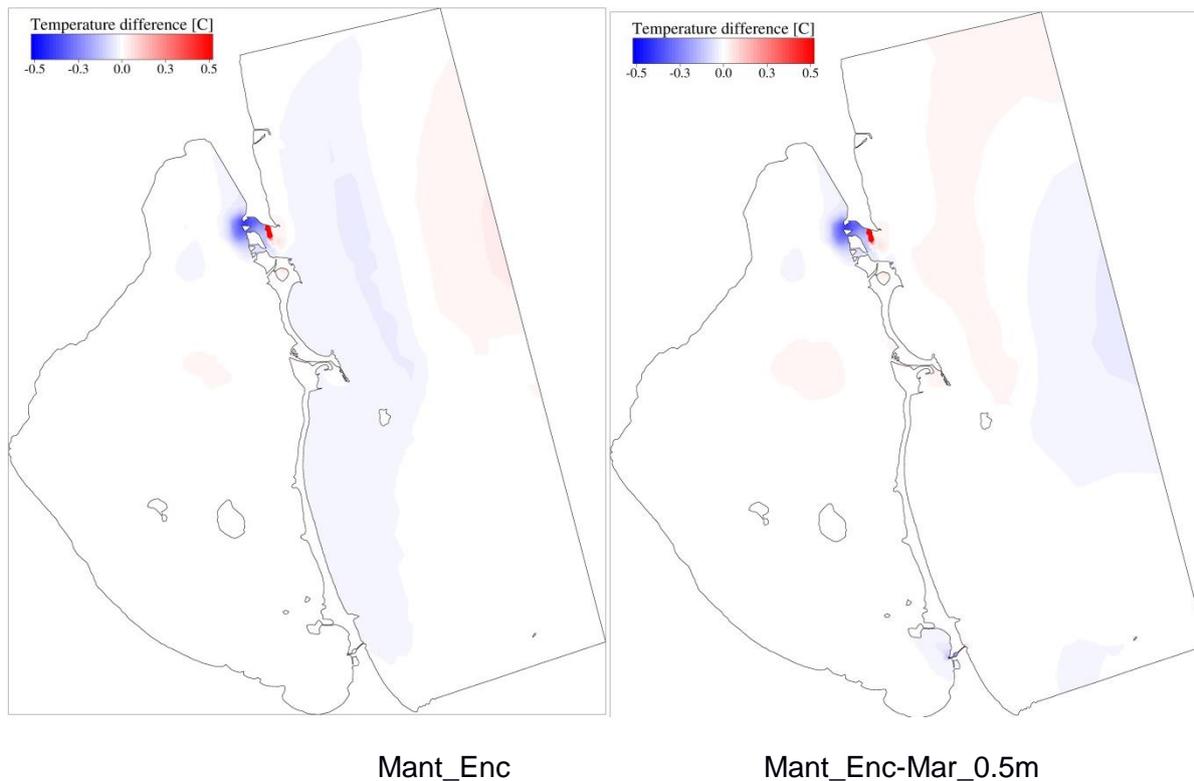


Fig. 46.cont.- Diferencias de Temperatura con el caso sin dragado en Verano para los distintos escenarios de dragado.

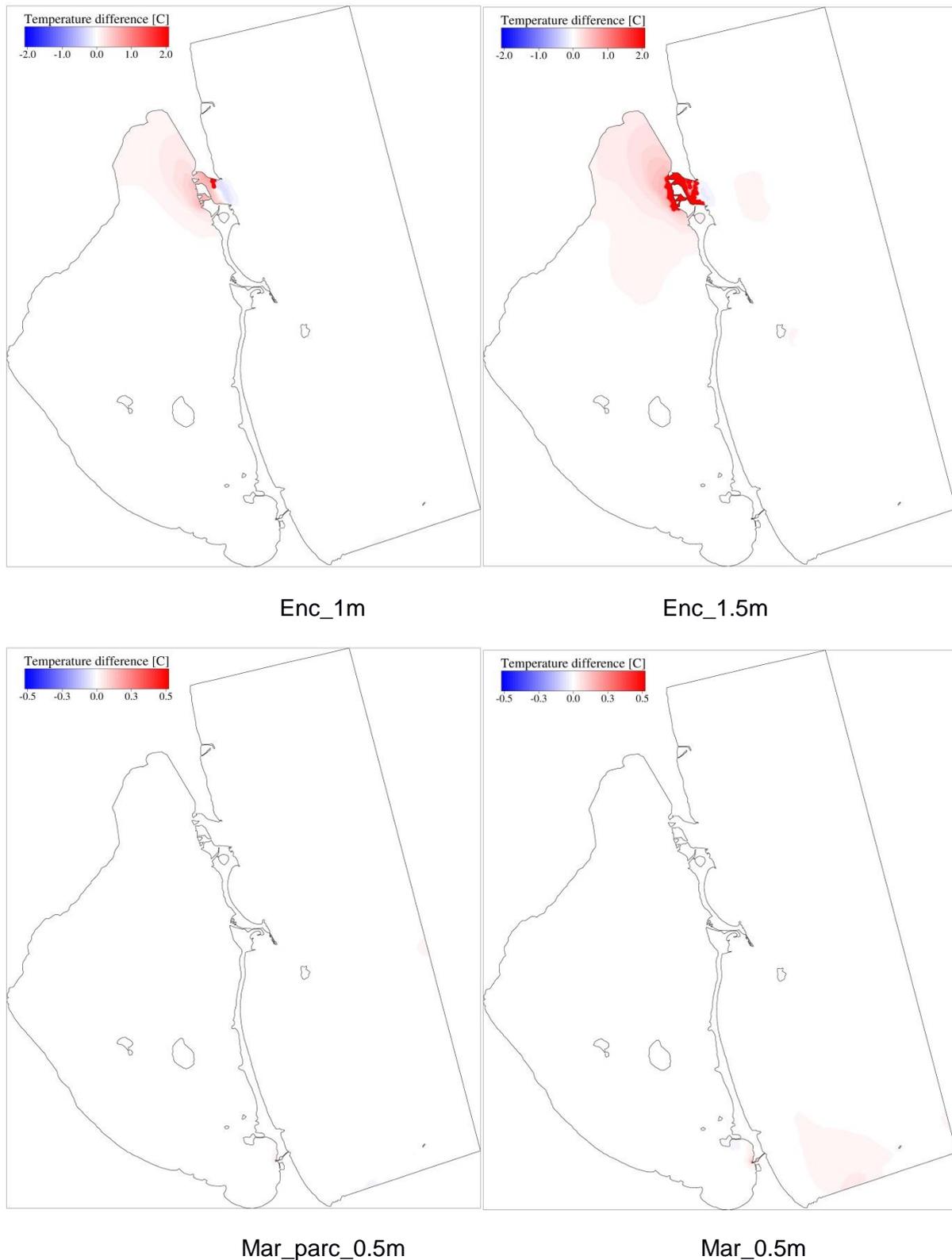


Fig. 47.- Diferencias de Temperatura con el caso sin dragado en Otoño para los distintos escenarios de dragado.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

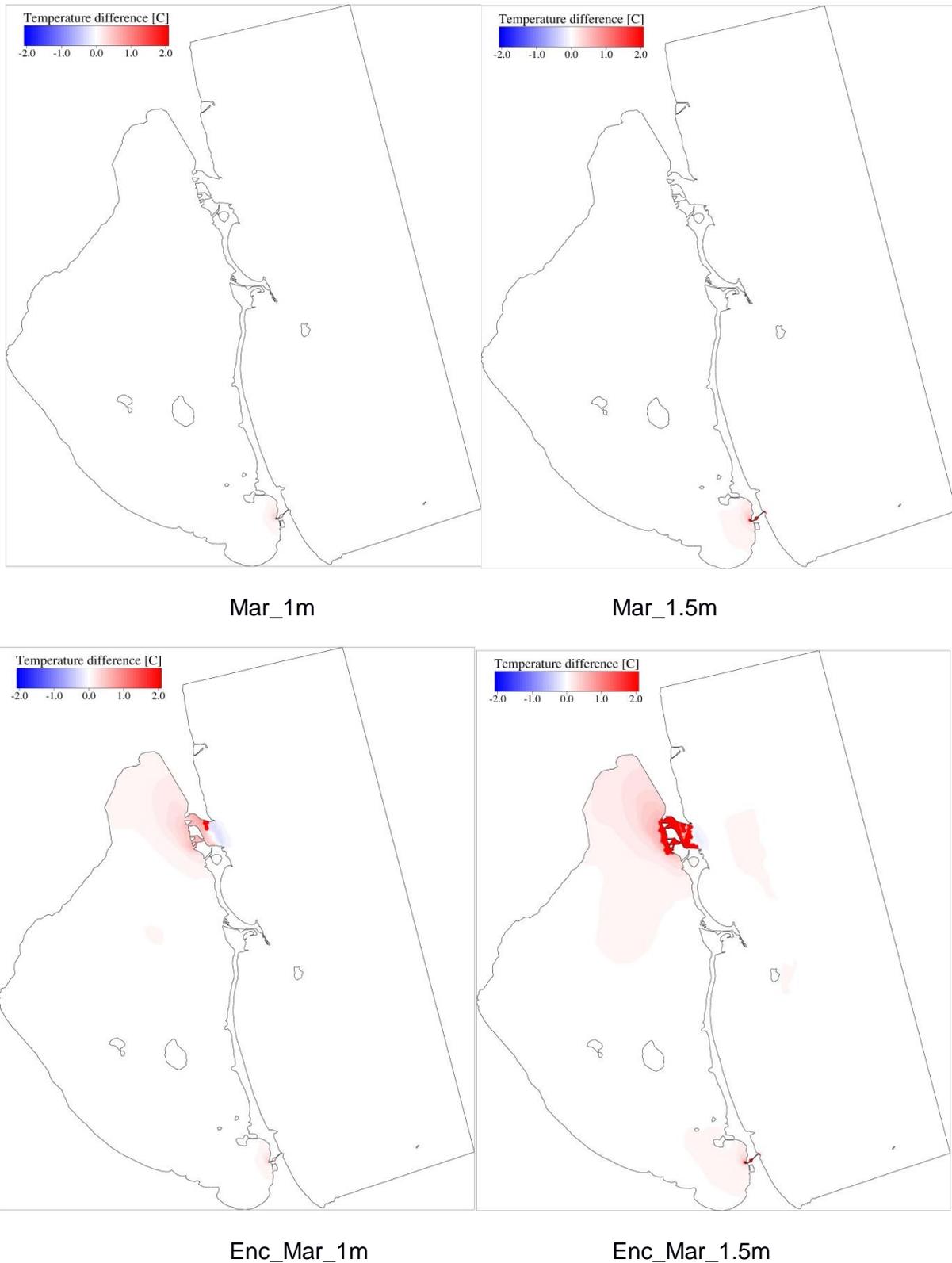


Fig. 47.cont.- Diferencias de Temperatura con el caso sin dragado en Otoño para los distintos escenarios de dragado.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

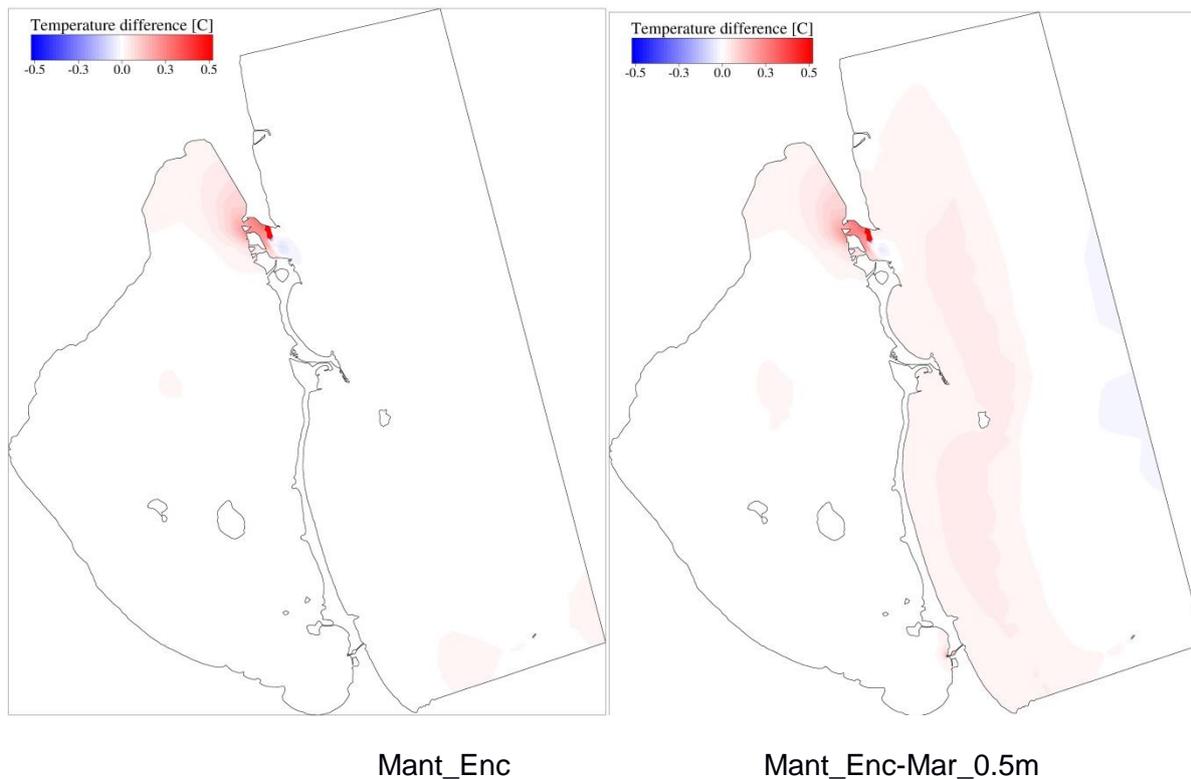


Fig. 47.cont.- Diferencias de Temperatura con el caso sin dragado en Otoño para los distintos escenarios de dragado.

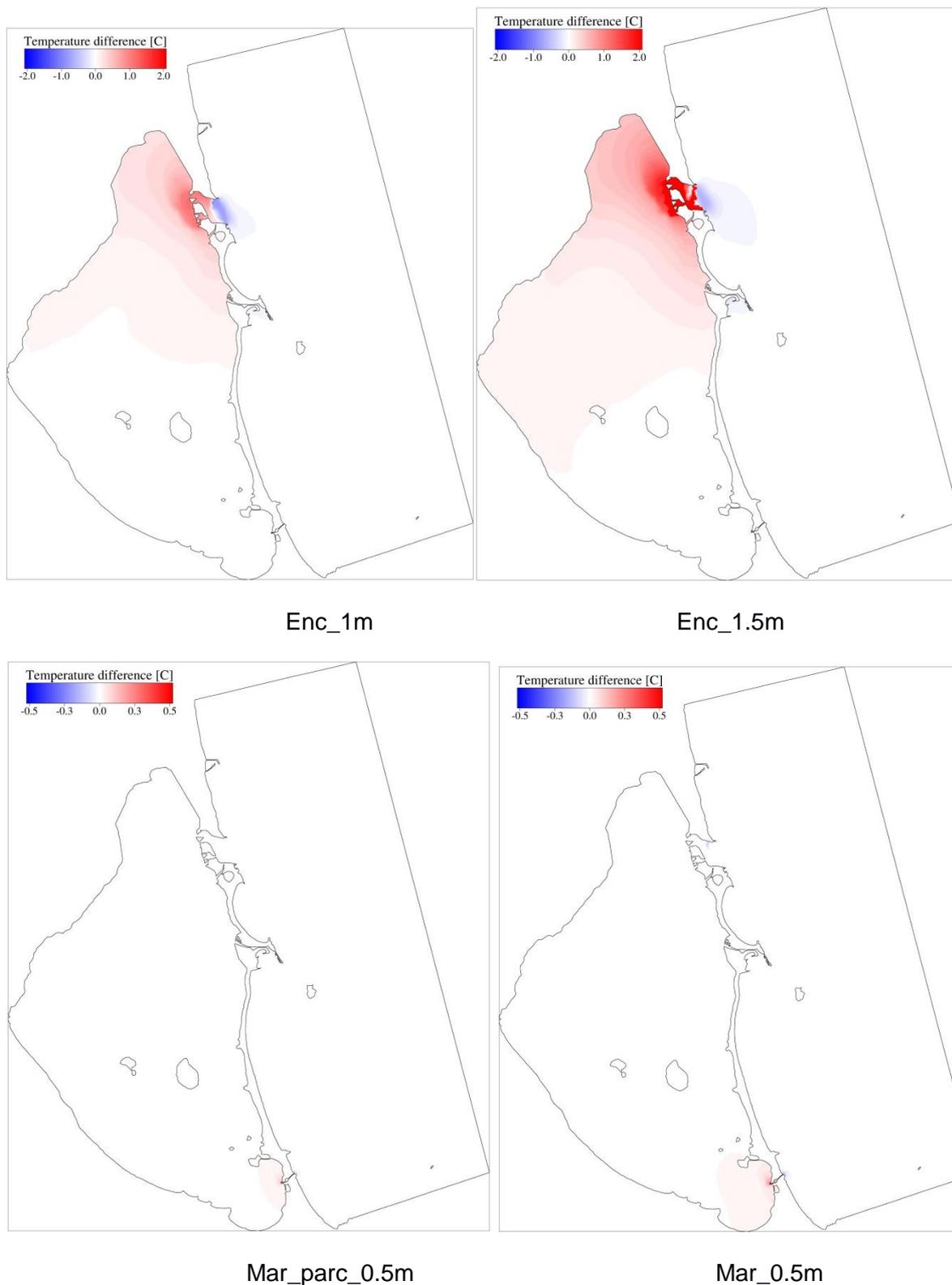


Fig. 48.- Diferencias de Temperatura con el caso sin dragado en Invierno para los distintos escenarios de dragado.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

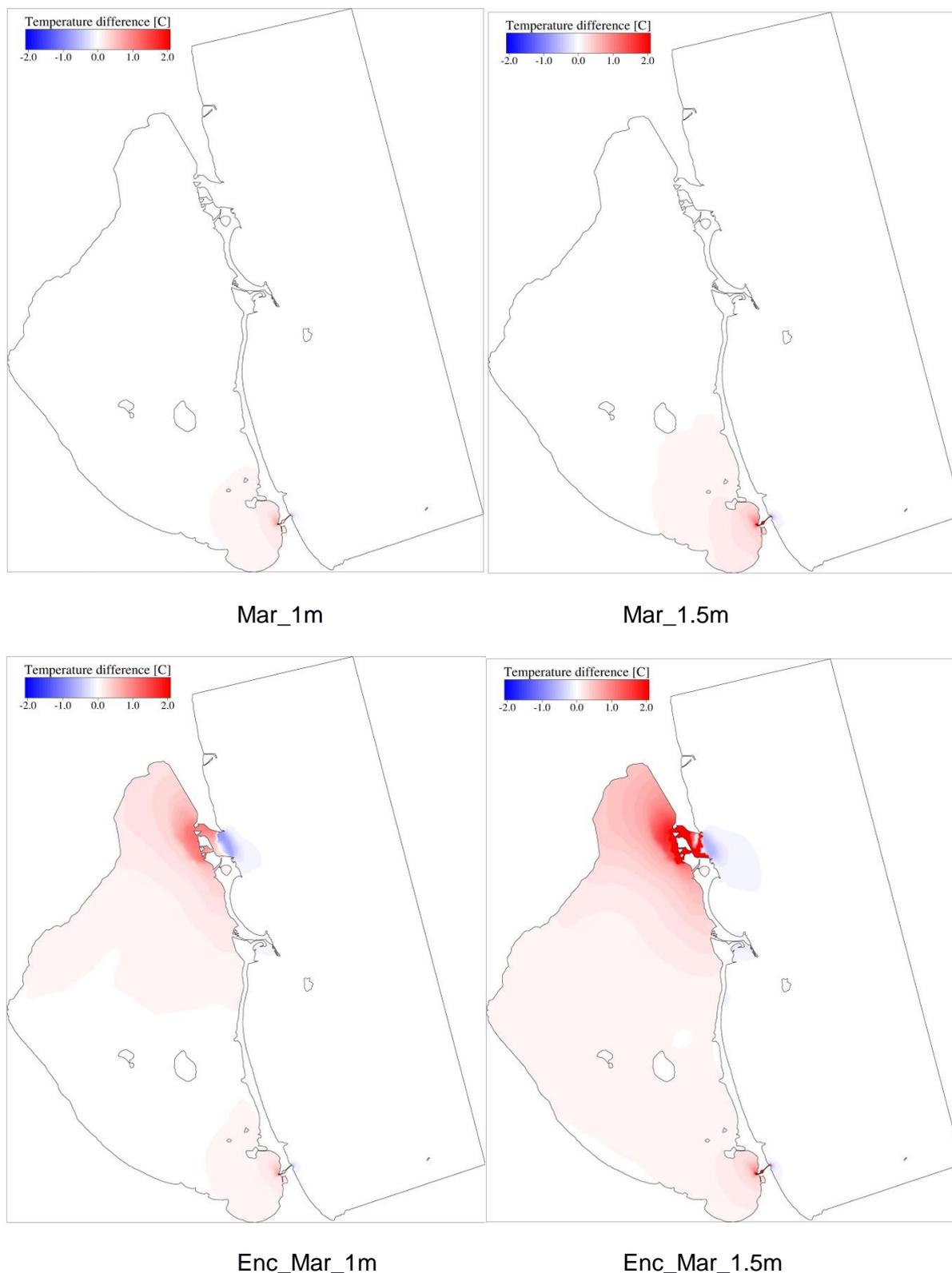


Fig. 48.cont.- Diferencias de Temperatura con el caso sin dragado en Invierno para los distintos escenarios de dragado.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

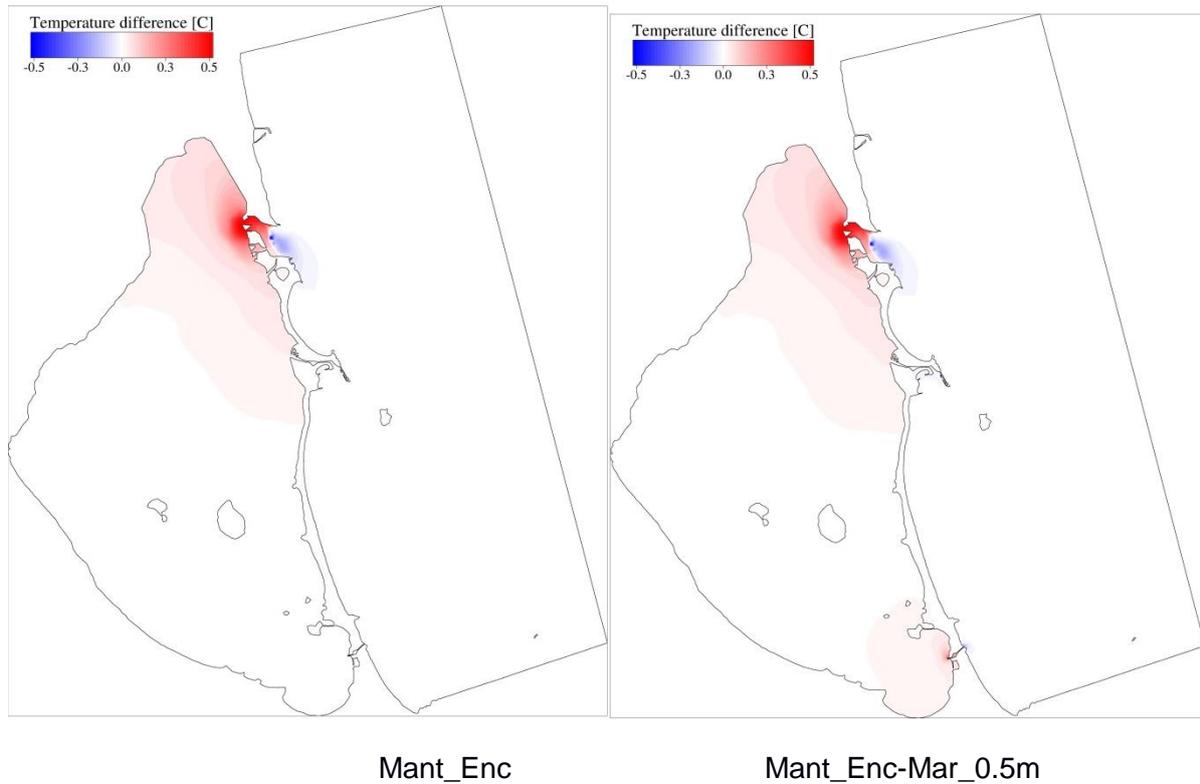


Fig. 48.cont.- Diferencias de Temperatura con el caso sin dragado en Invierno para los distintos escenarios de dragado.



En los mapas estacionales del campo de salinidad (Figuras 33 a 36) se observa, en términos generales, que el caso sin dragado representa adecuadamente el gradiente existente entre las cubetas Norte y Sur de la laguna identificado en la tesis de Ruzafa, (1989) y trabajos posteriores. Dada la mayor extensión del canal de Encañizadas, los cambios son mayores en los casos de dragado donde se modifica la profundidad de dicha zona. En este sentido, para los casos Enc\_1m, Enc\_1.5m, Enc\_Mar\_1m y Enc\_Mar\_1.5m se puede ver que la influencia de los cambios introducida por el dragado se extiende por toda la laguna. Sin embargo, dado el menor tamaño del canal de Marchamalo, se puede ver que el dragado en dicho canal, en general, provoca efectos localizados alrededor del canal, de menor magnitud en comparación con el dragado de Encañizadas. Por su parte, para los casos de actuación en ambos canales conjuntamente, Enc\_Mar\_1m y Enc\_Mar\_1.5m, las consecuencias resultan sumatorias y el efecto sobre la salinidad se extiende a prácticamente todo el área de la laguna.

En relación a la temperatura (Figuras 37 a 40), los cambios debidos al dragado de los canales son mucho menores que en el caso de la salinidad y parecen estar más localizados en la zona de los canales, sobre todo en el banco de arenas del canal de Encañizadas. Por ejemplo, en los mapas correspondientes a las medias para la estación de invierno, no se observan cambios apreciables de temperatura en la zona central de la laguna.

### **1.2.2.- Efecto sobre las corrientes**

Para el análisis del comportamiento global de las corrientes en la laguna se ha obtenido el promedio vertical del campo de corrientes en las fechas para las cuales el caudal de entrada y salida de agua por el Canal del Estacio es mayor durante el periodo de la simulación (Figura 49). A través de El Estacio se produce el mayor porcentaje de intercambio de masas de agua con el Mediterráneo y por tanto, tiene una gran influencia en la circulación global, además de la acción del viento (Pérez-Ruzafa et al., 2005), que se incluye en el modelo. Como se puede ver en la Figura 50, se observan similitudes con el esquema de circulación desarrollado por Pérez-Ruzafa et al. (2005).

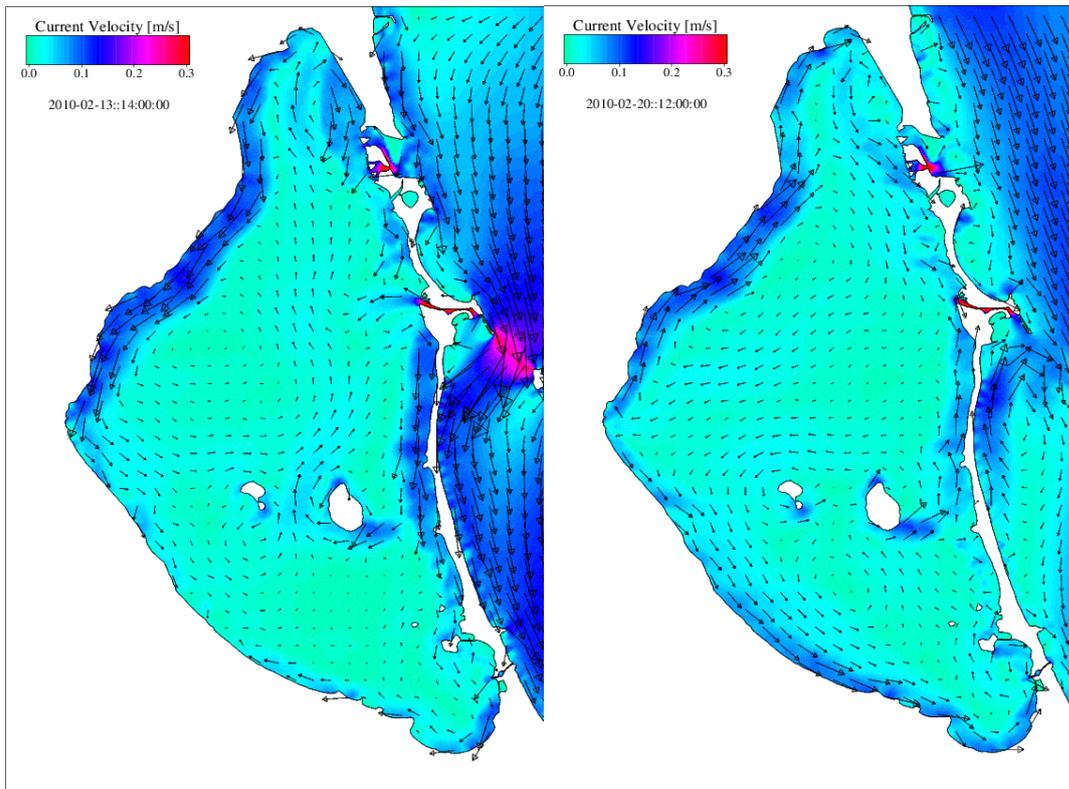


Fig 49.- Promedio vertical de velocidades en el modelo del Mar Menor para el máximo caudal de entrada (13-02-2010, izquierda) y de salida (20-02-2010, derecha) en El Estacio

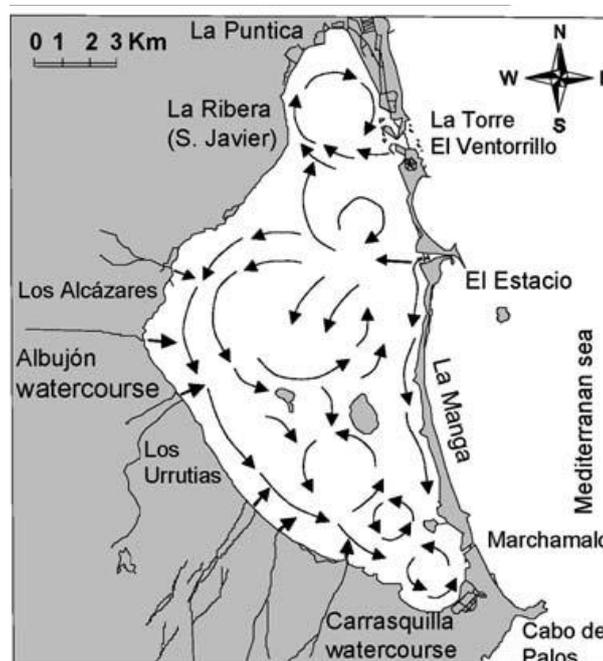


Fig. 50- Esquema general de circulación del Mar Menor (adaptado: Pérez-Ruzafa et al.2004)

Con el fin de analizar la estructura vertical de las corrientes en la laguna, los campos de velocidades en las capas superficial y de fondo del modelo se han extraído para las mismas fechas (Figuras 51 y 52).

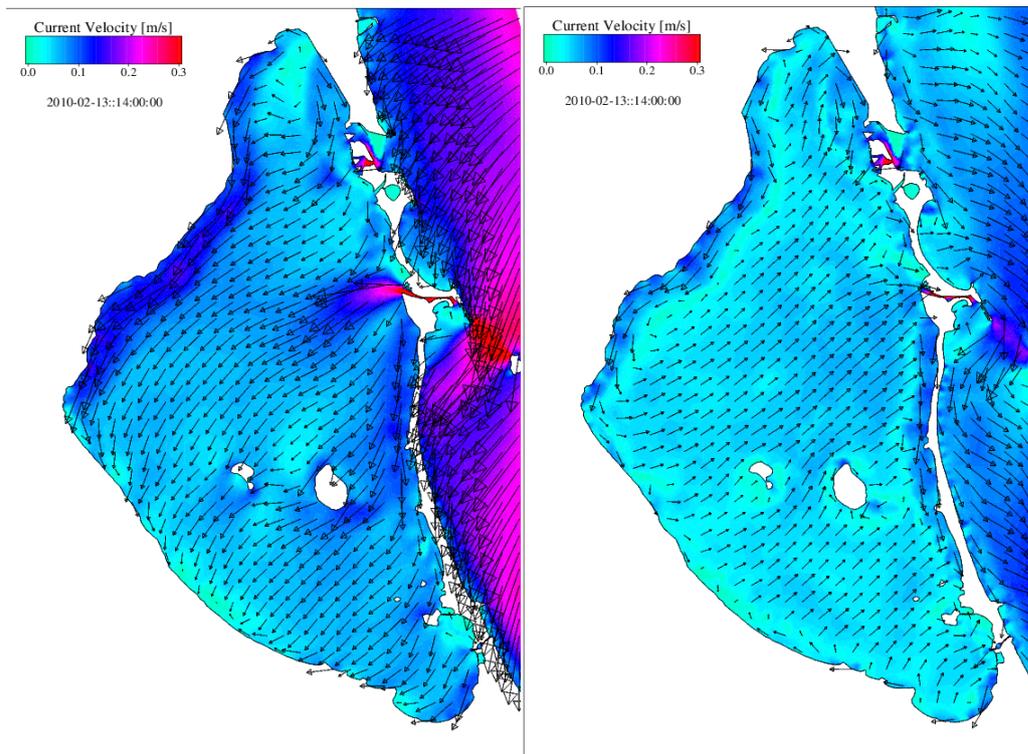


Fig. 51- Corrientes en la capa superficial (izquierda) y en fondo (derecha) a 13-02-2010.

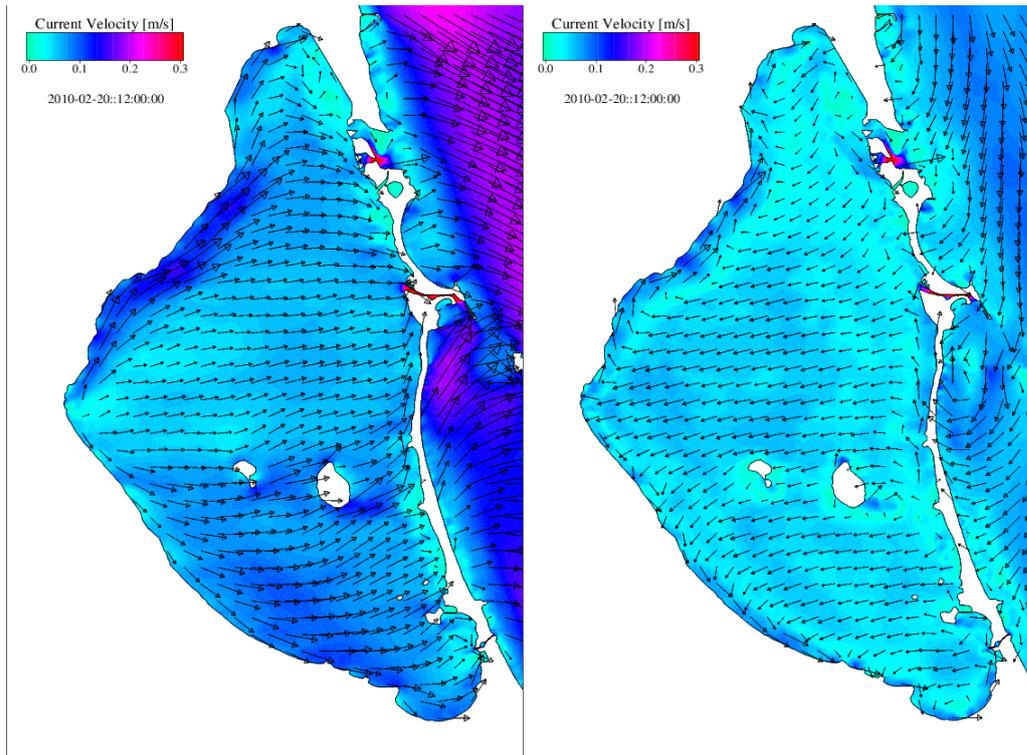


Fig.52- Corrientes en la capa superficial (izquierda) y en fondo (derecha) a 20-02-2010.

Las Figuras 53 a 56 representan las medias estacionales del módulo de la velocidad de corriente para el caso sin dragado. Se observa la pequeña magnitud de las corrientes medias dentro de la laguna, del orden de los cm/s.

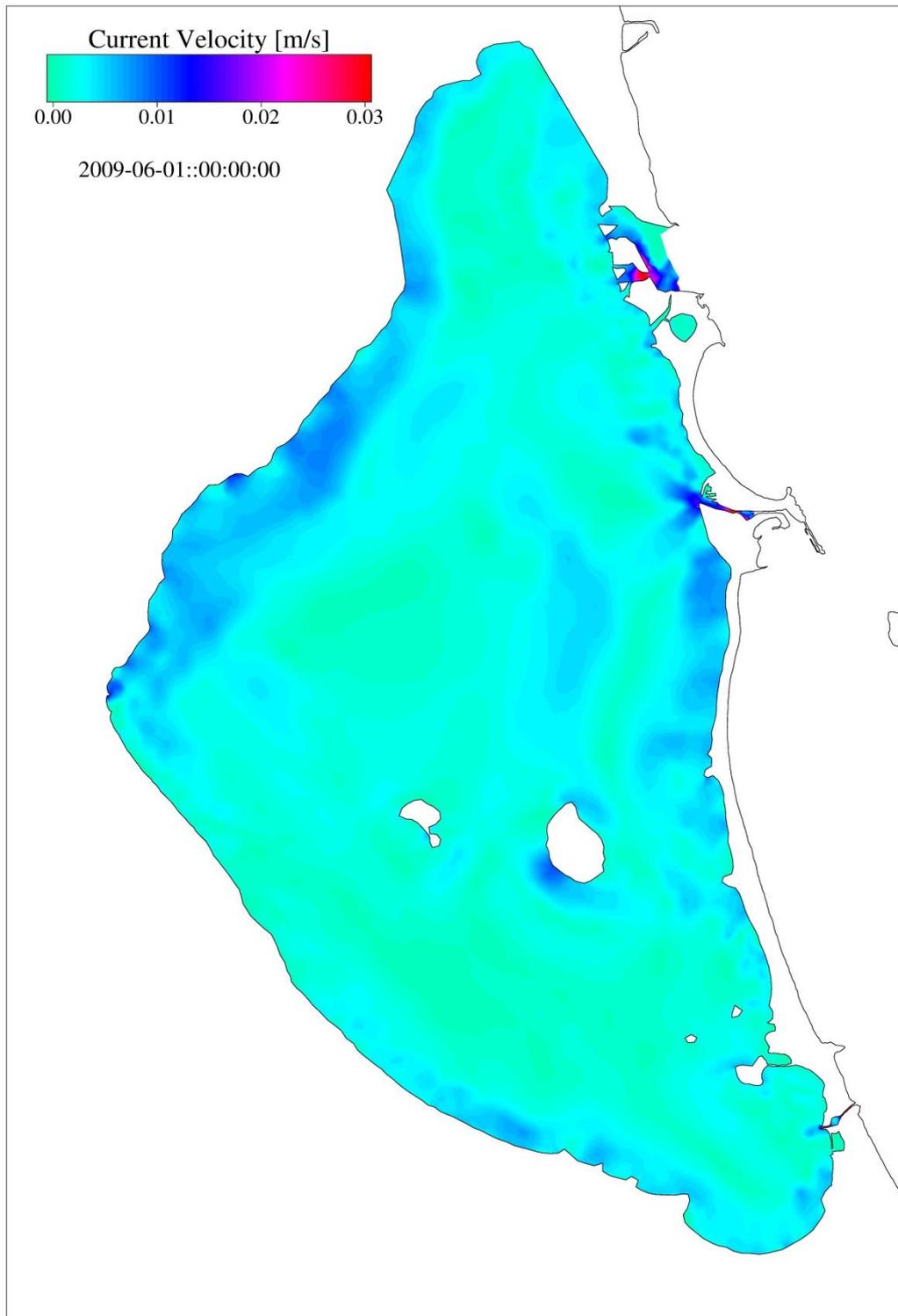


Fig.53- Promedio del módulo de las corrientes durante la primavera para el caso sin dragado.

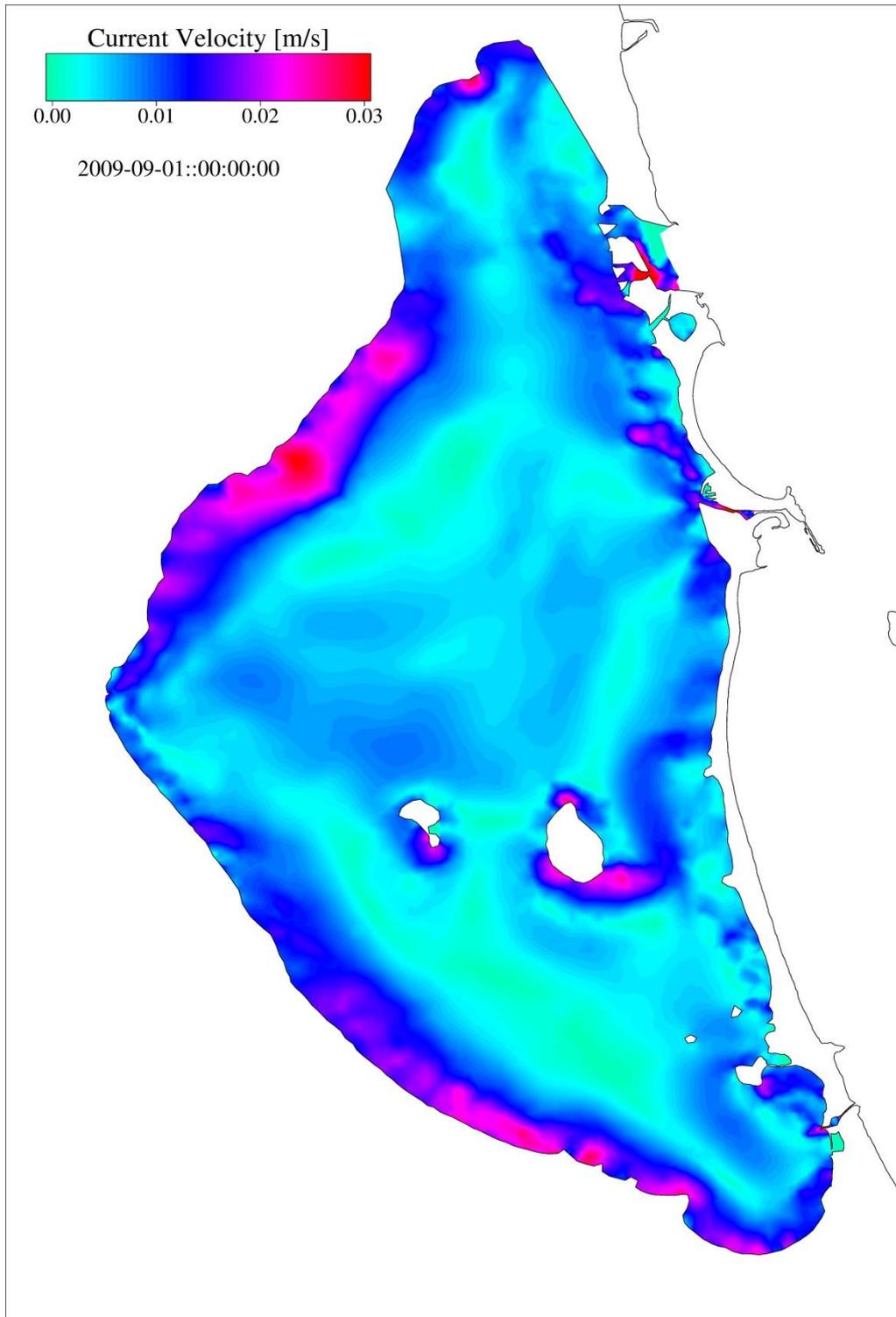


Fig.54- Promedio del módulo de las corrientes durante el verano para el caso sin dragado.

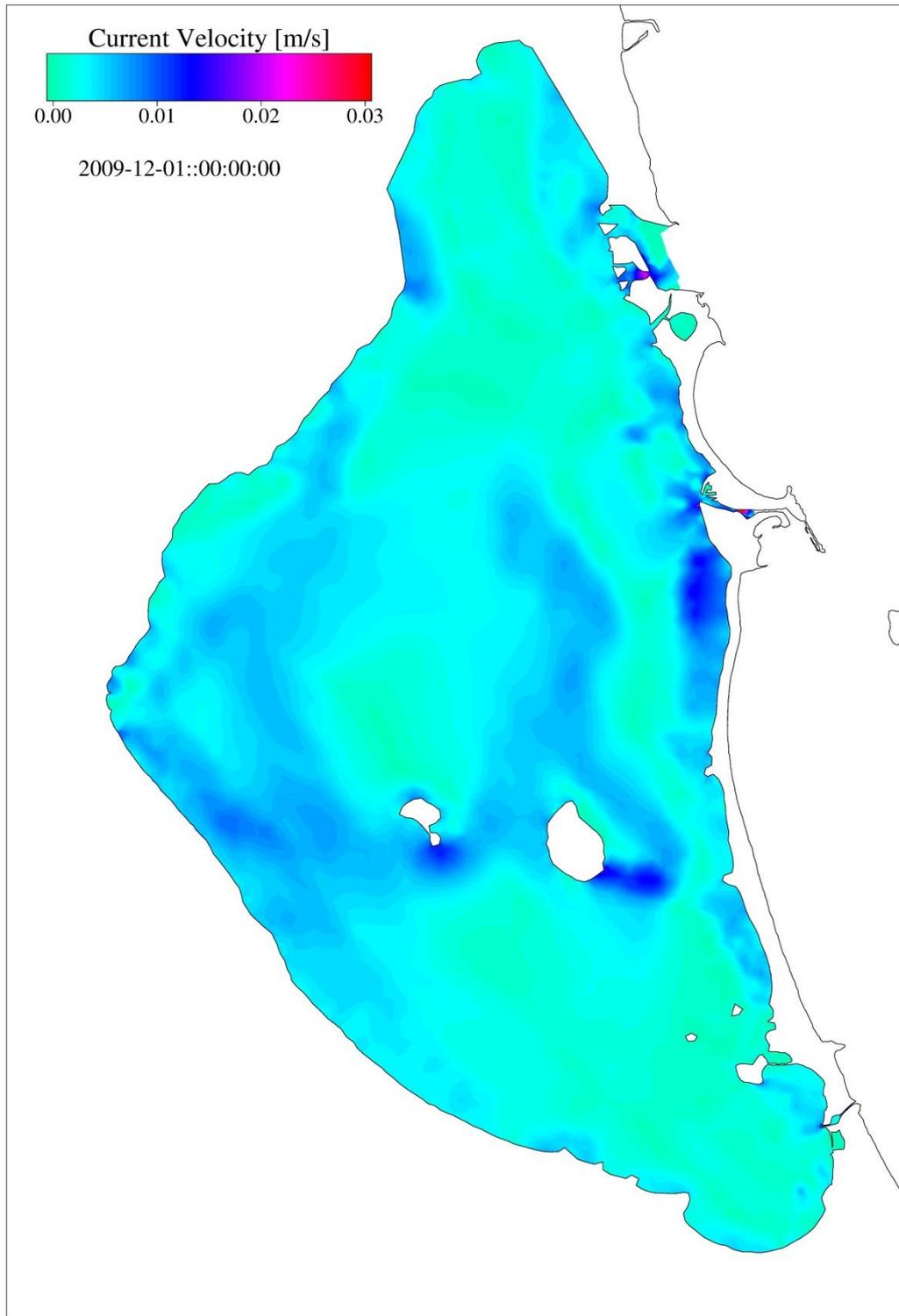


Fig.55- Promedio del módulo de las corrientes durante el otoño para el caso sin dragado.

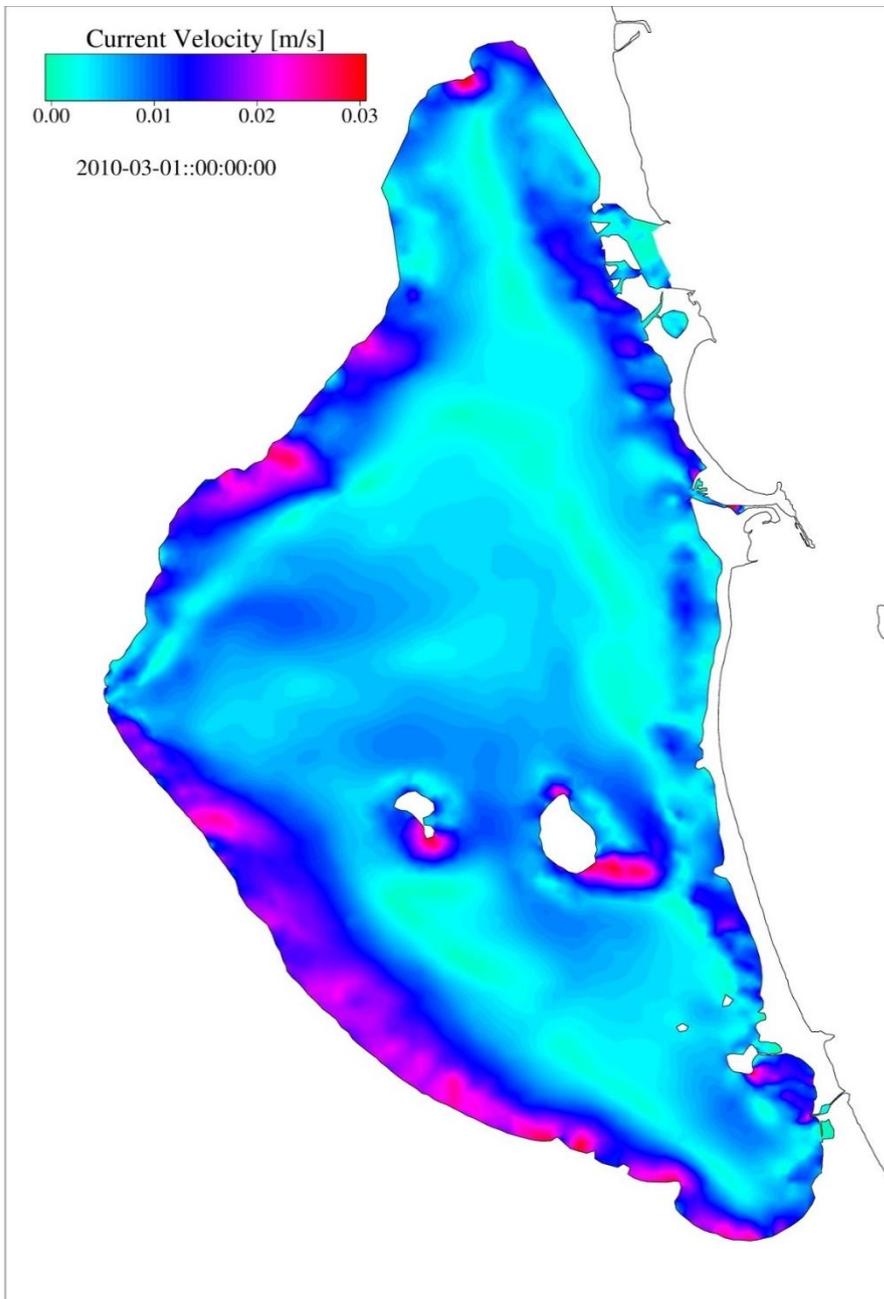


Fig.56- Promedio del módulo de las corrientes durante el invierno para el caso sin dragado.

Para evaluar el efecto de los distintos escenarios de dragado sobre el campo de corrientes en la laguna se han obtenido las diferencias entre las medias estacionales del módulo de velocidad de los casos con dragado respecto al caso sin dragado. Dichas diferencias se muestran en las Figuras 57 a 60.

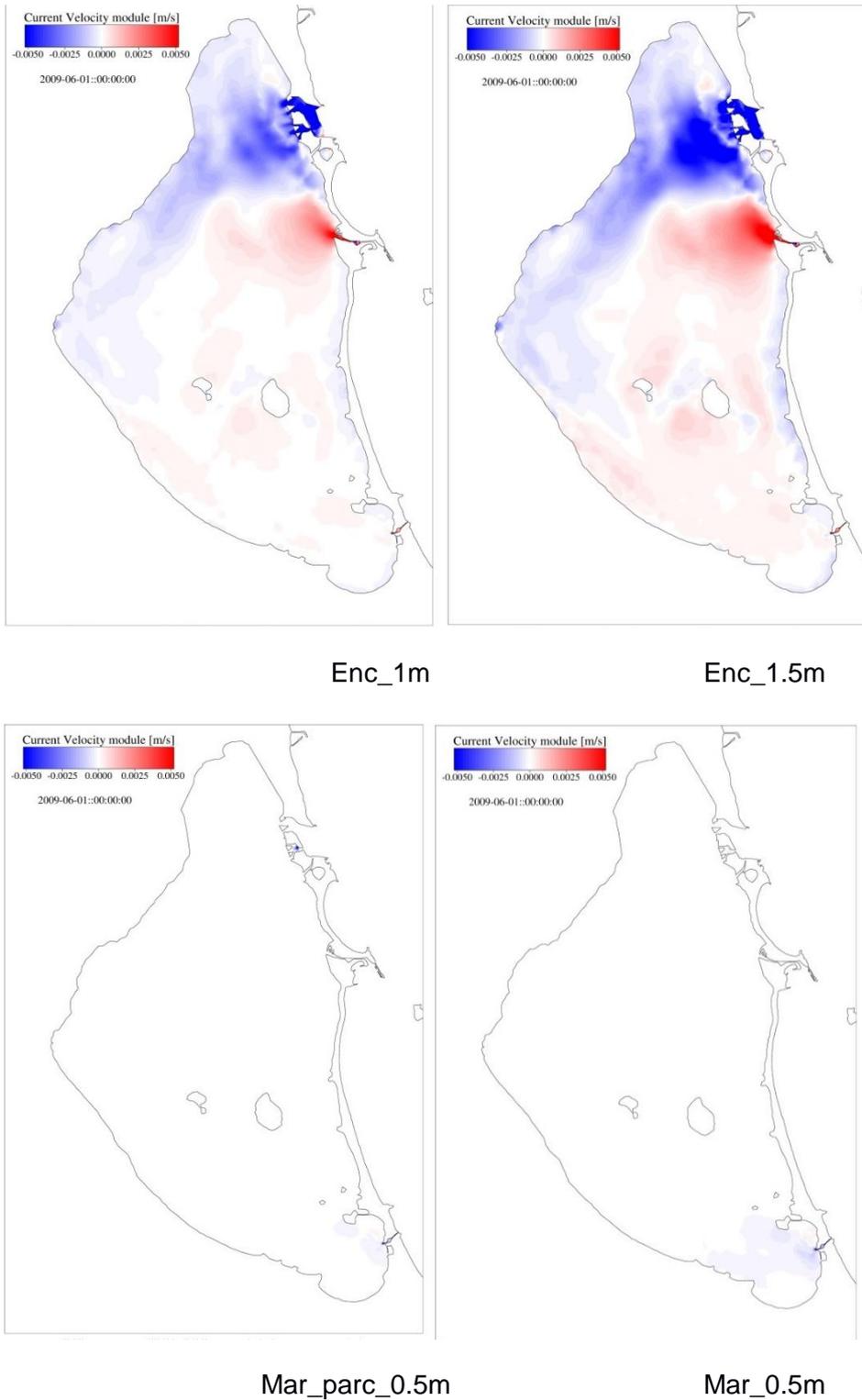


Fig. 57.- Diferencias de módulo de corrientes con el caso sin dragado en Primavera para los distintos escenarios

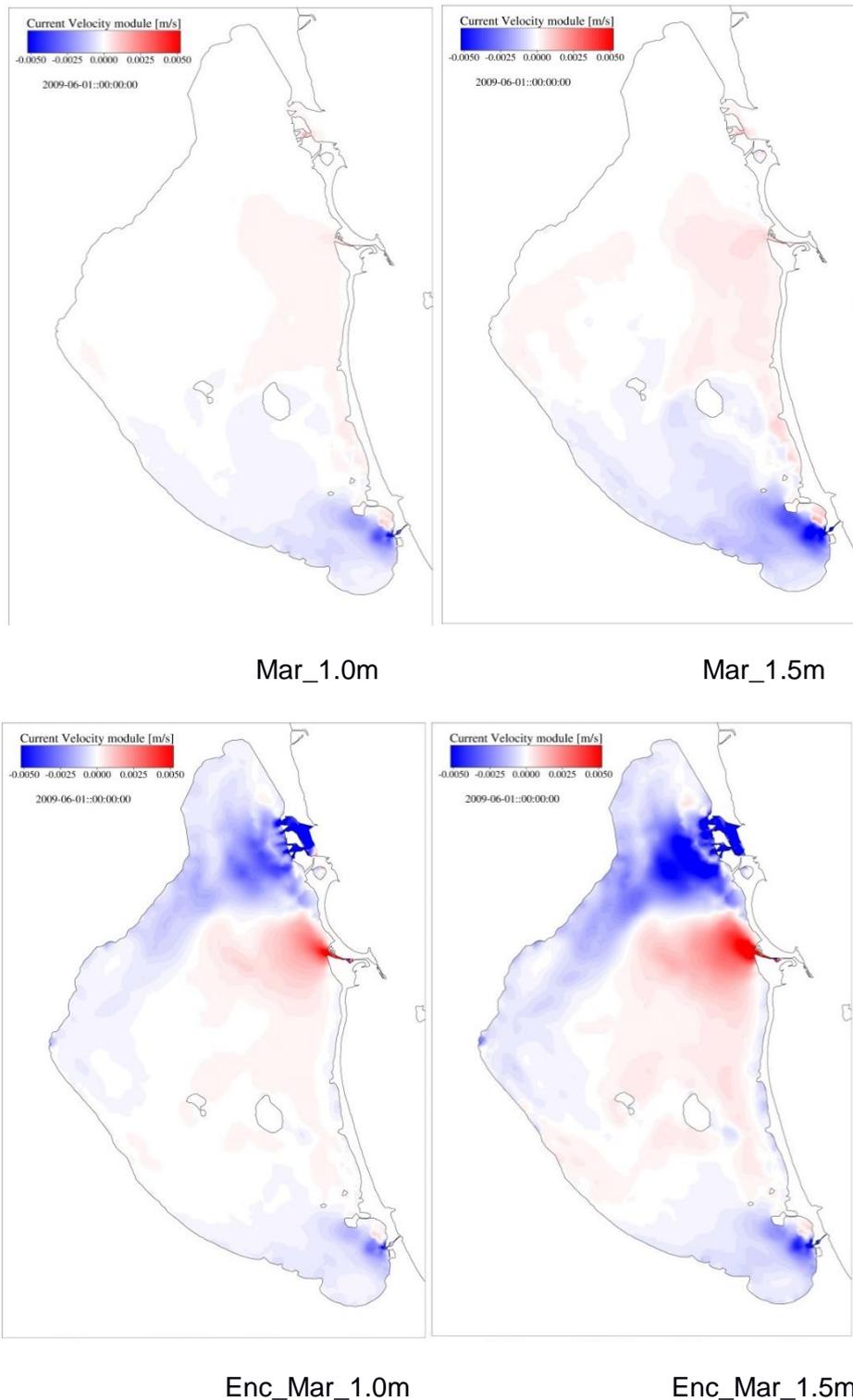
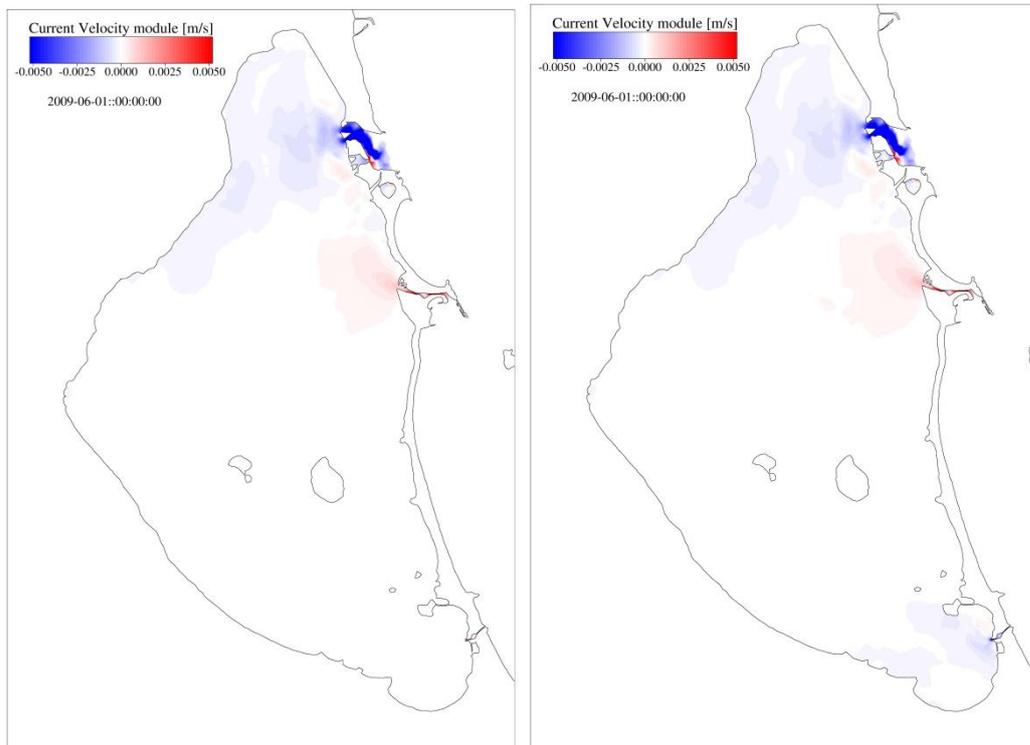


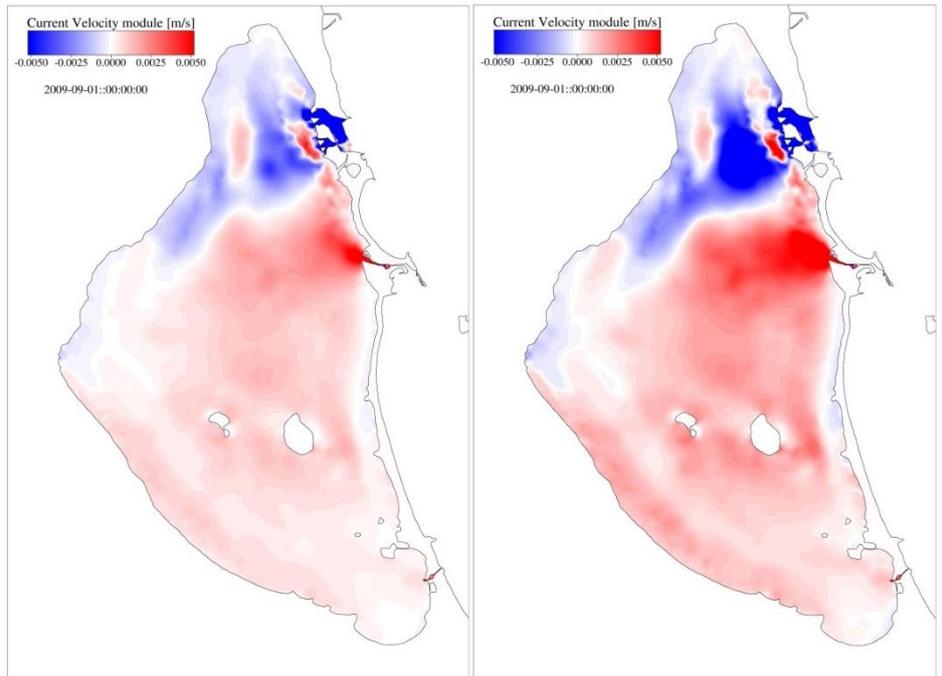
Fig. 57.cont.- Diferencias de módulo de corrientes con el caso sin dragado en Primavera para los distintos escenarios



Mant\_Enc

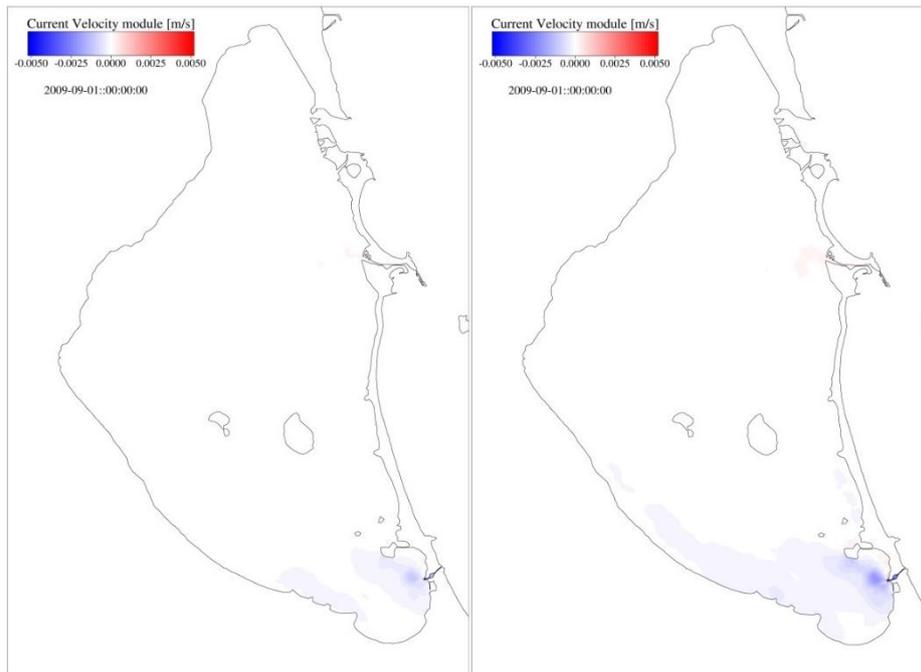
Mant\_Enc\_Mar\_0.5m

Fig. 57.cont.- Diferencias de módulo de corrientes con el caso sin dragado en Primavera para los distintos escenarios



Enc\_1m

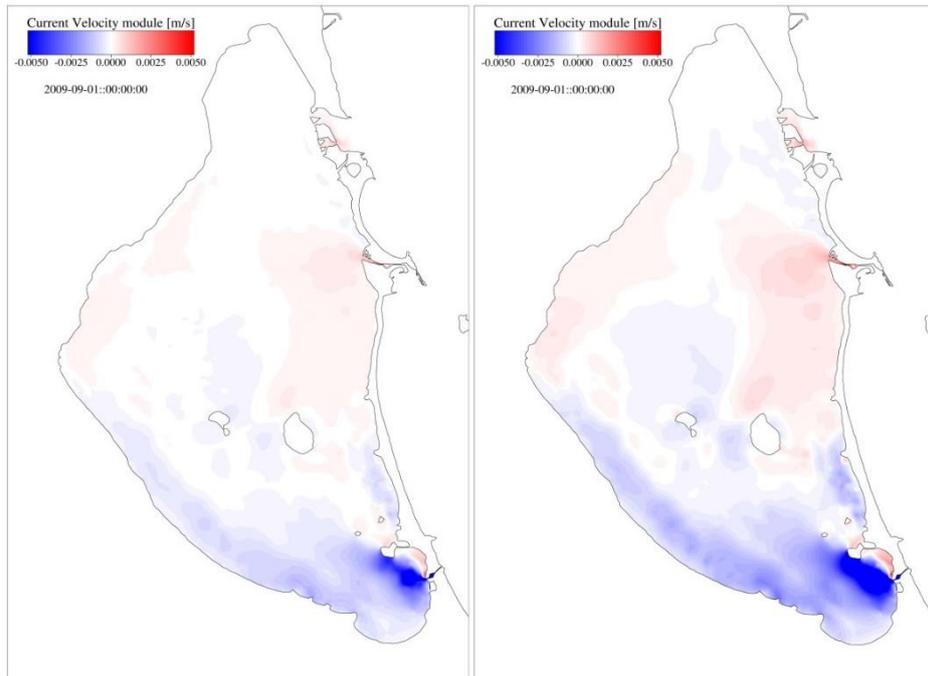
Enc\_1.5m



Mar\_parc\_0.5m

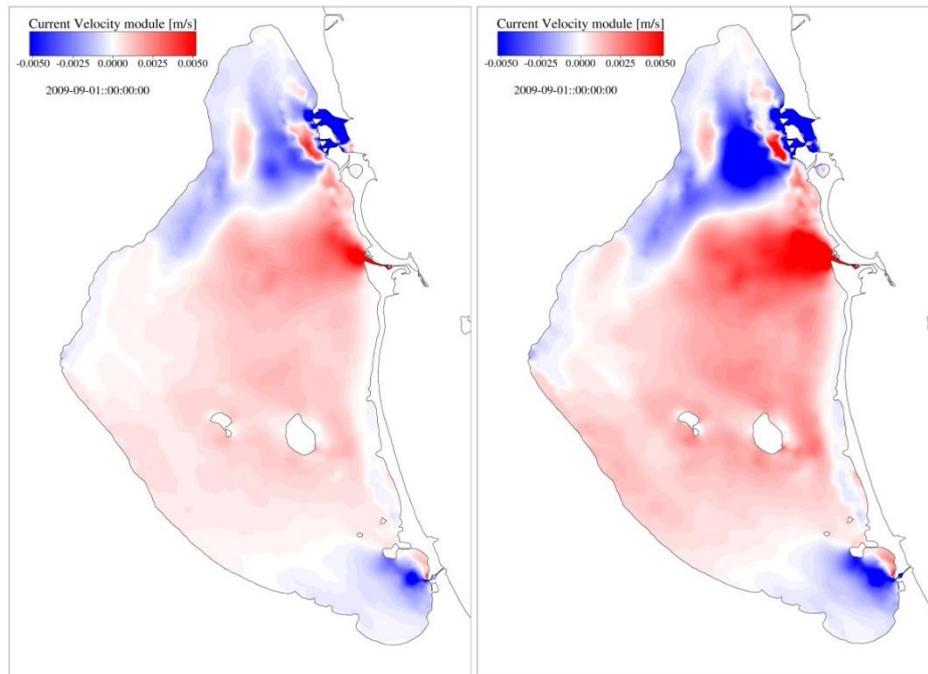
Mar\_0.5m

Fig. 58.- Diferencias de módulo de corrientes con el caso sin dragado en Verano para los distintos escenarios.



Mar\_1.0m

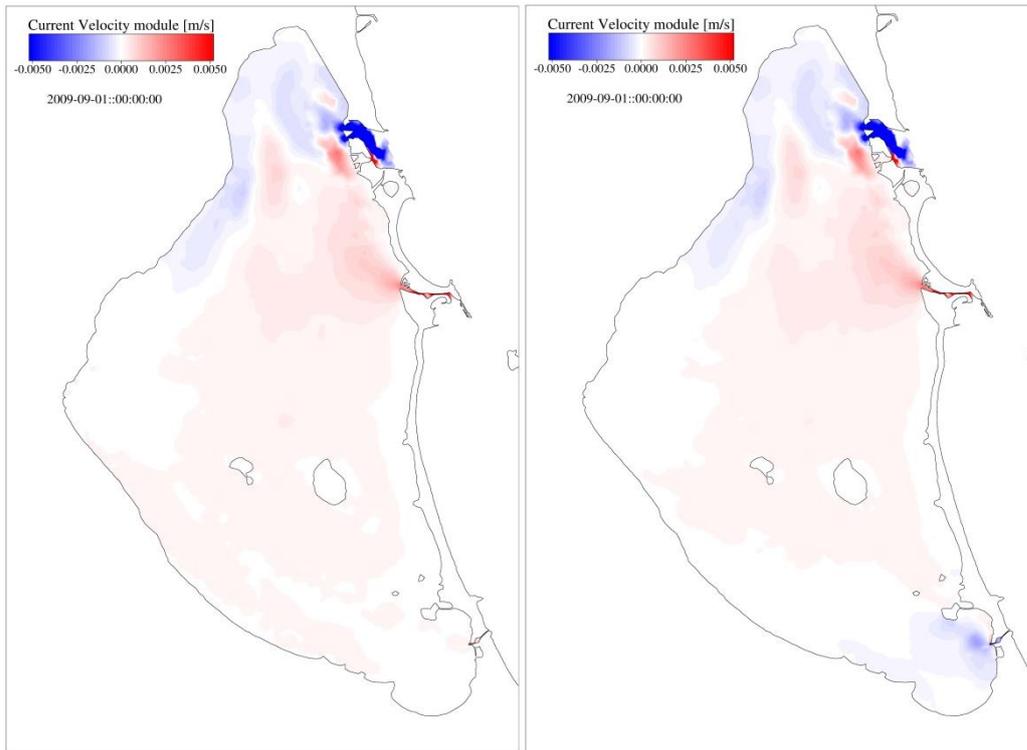
Mar\_1.5m



Enc\_Mar\_1.0m

Enc\_Mar\_1.5m

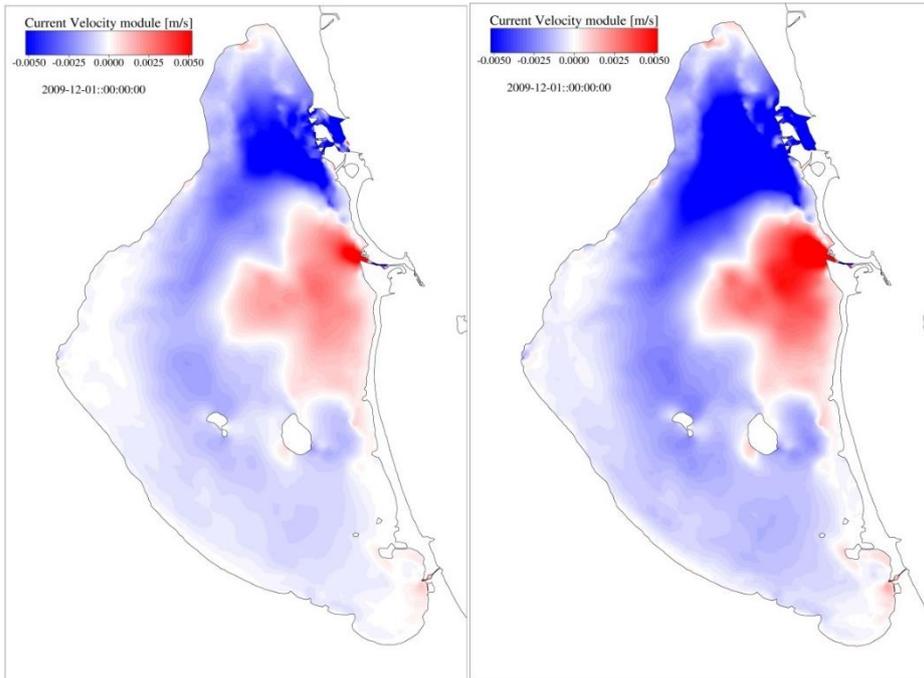
Fig. 58.cont.- Diferencias de módulo de corrientes con el caso sin dragado en Verano para los distintos escenarios.



Mant\_Enc

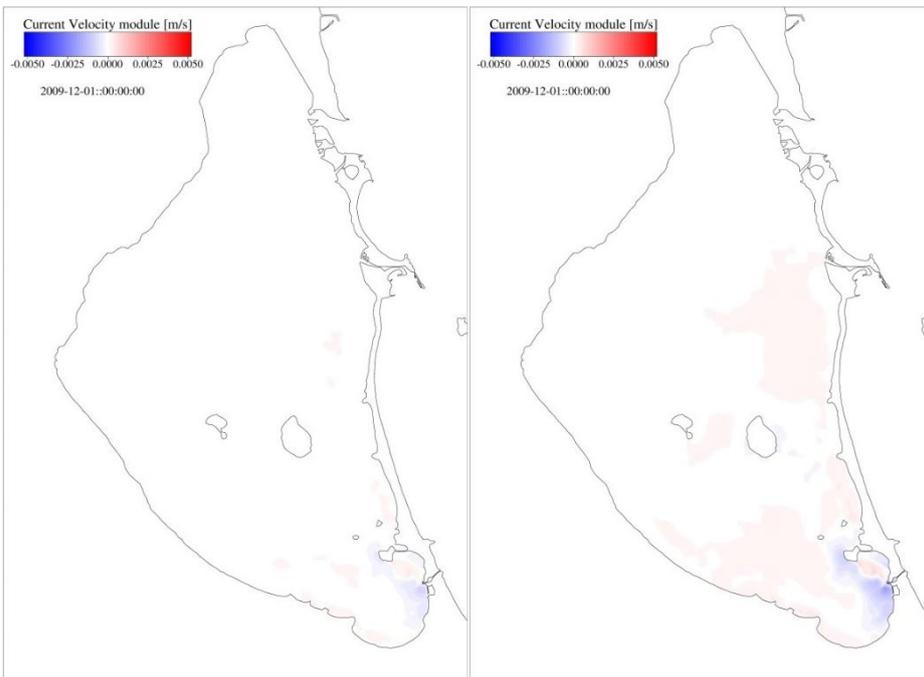
Mant\_Enc\_Mar\_0.5m

Fig. 58.cont.- Diferencias de módulo de corrientes con el caso sin dragado en Verano para los distintos escenarios.



Enc\_1m

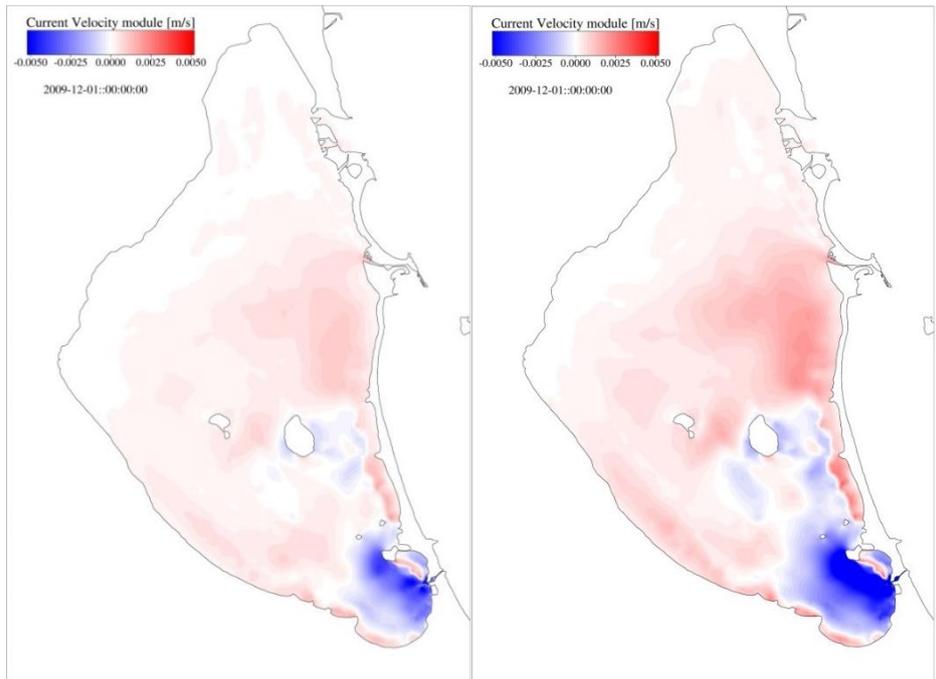
Enc\_1.5m



Mar\_parc\_0.5m

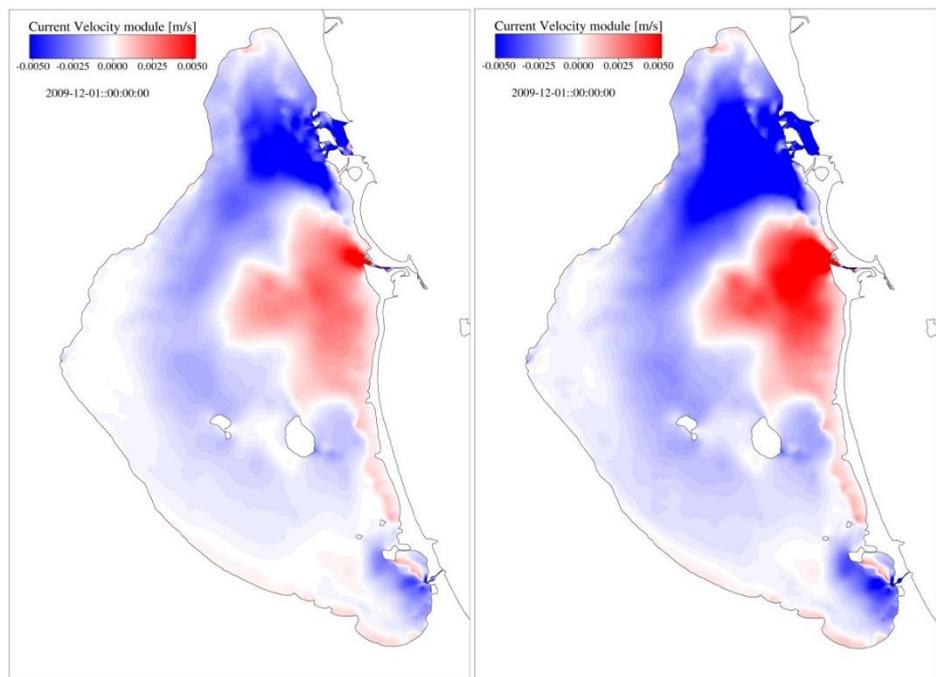
Mar\_0.5m

Fig. 59.- Diferencias de módulo de corrientes con el caso sin dragado en Otoño para los distintos escenarios.



Mar\_1.0m

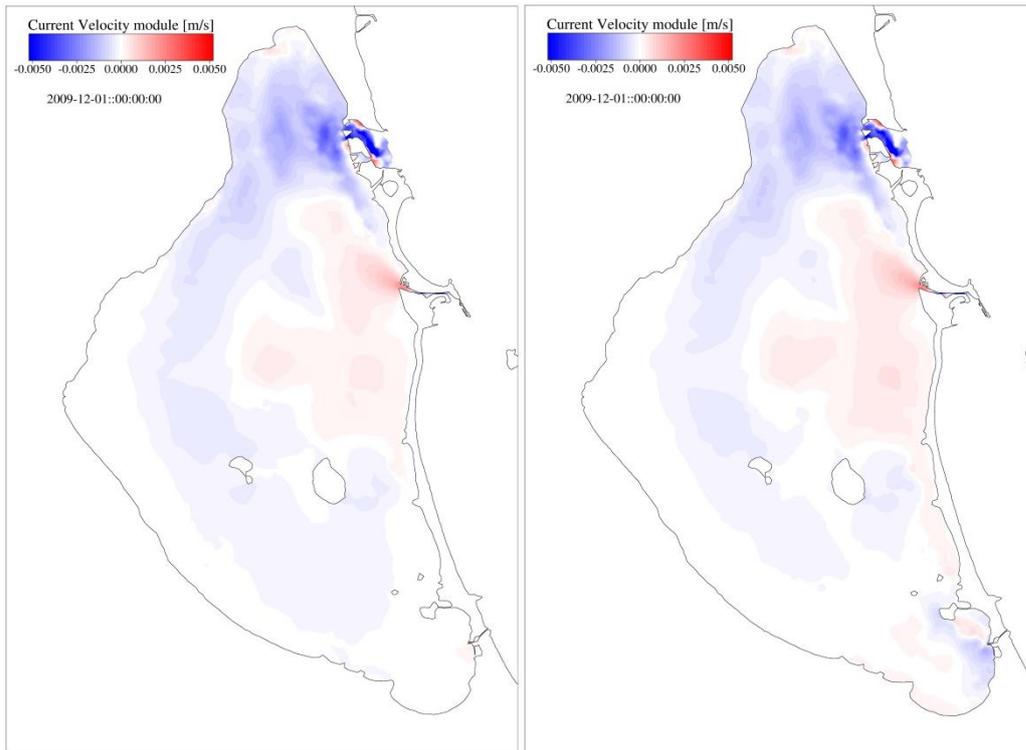
Mar\_1.5m



Enc\_Mar\_1.0m

Enc\_Mar\_1.5m

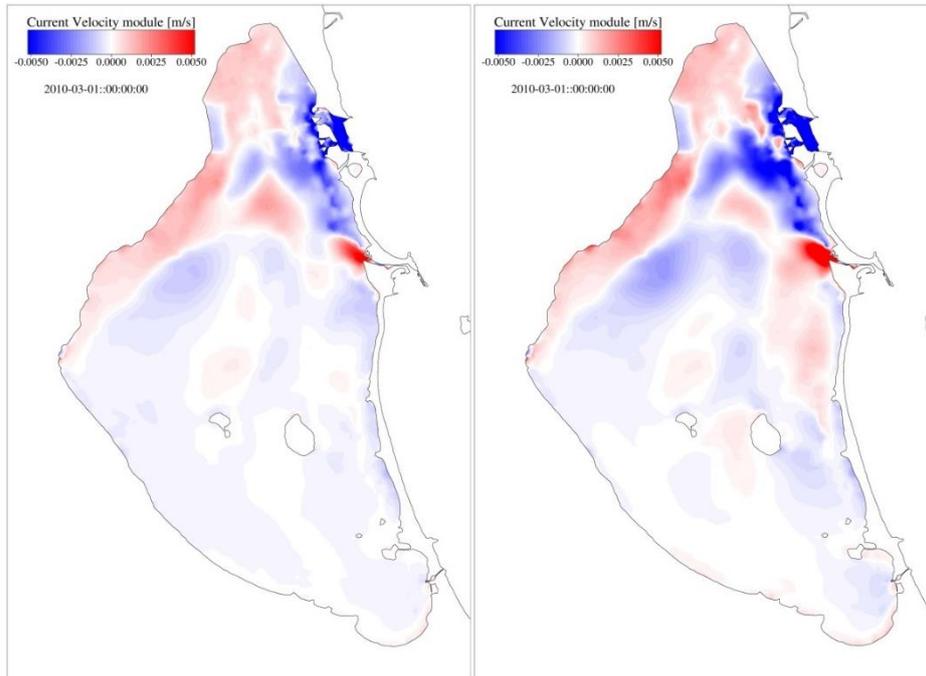
Fig. 59.cont.- Diferencias de módulo de corrientes con el caso sin dragado en Otoño para los distintos escenarios.



Mant\_Enc

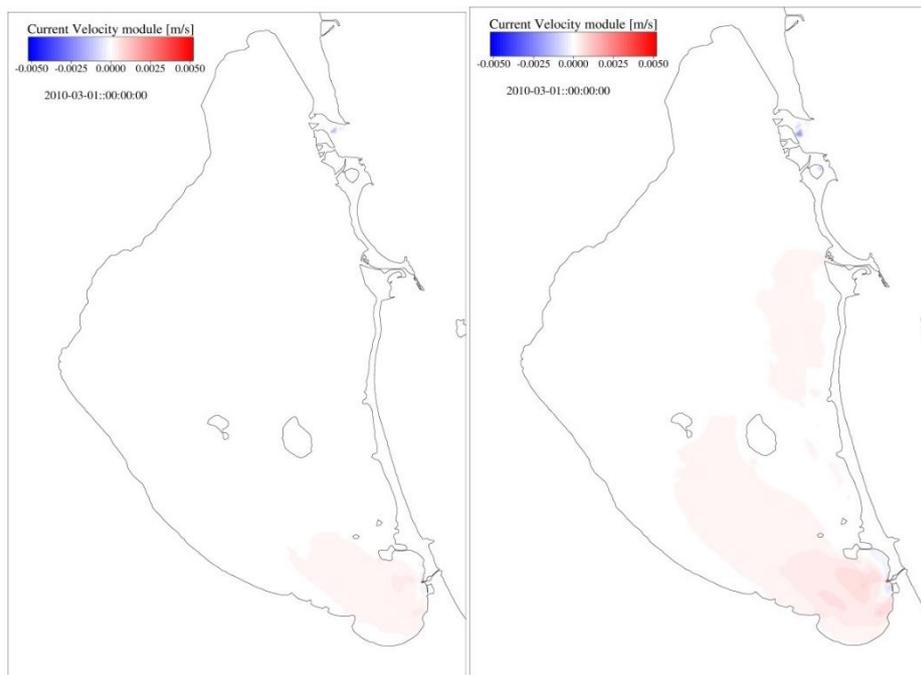
Mant\_Enc\_Mar\_0.5m

Fig. 59.cont.- Diferencias de módulo de corrientes con el caso sin dragado en Otoño para los distintos escenarios.



Enc\_1m

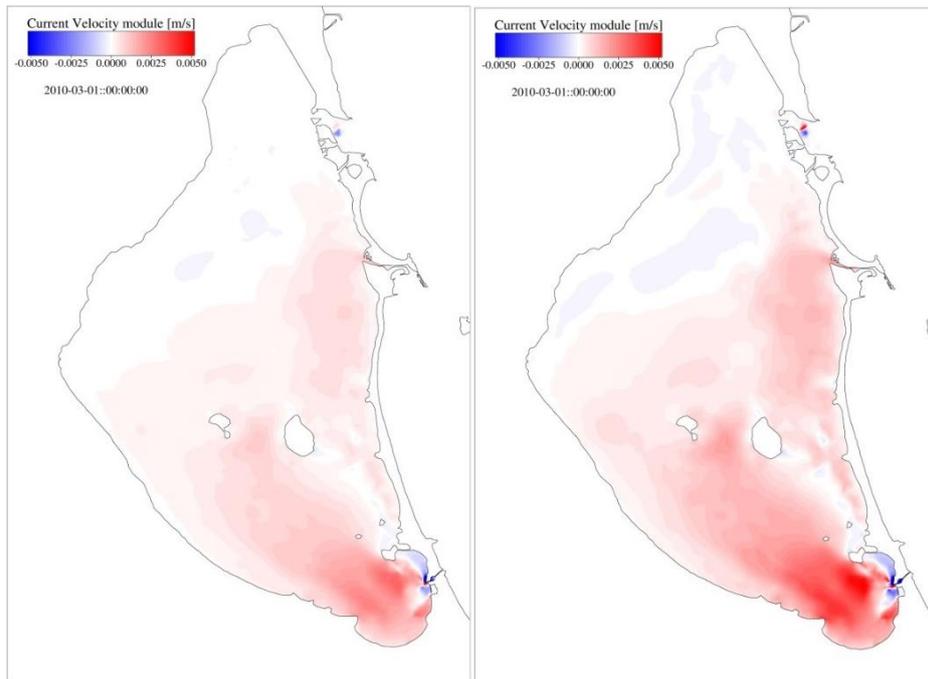
Enc\_1.5m



Mar\_parc\_0.5m

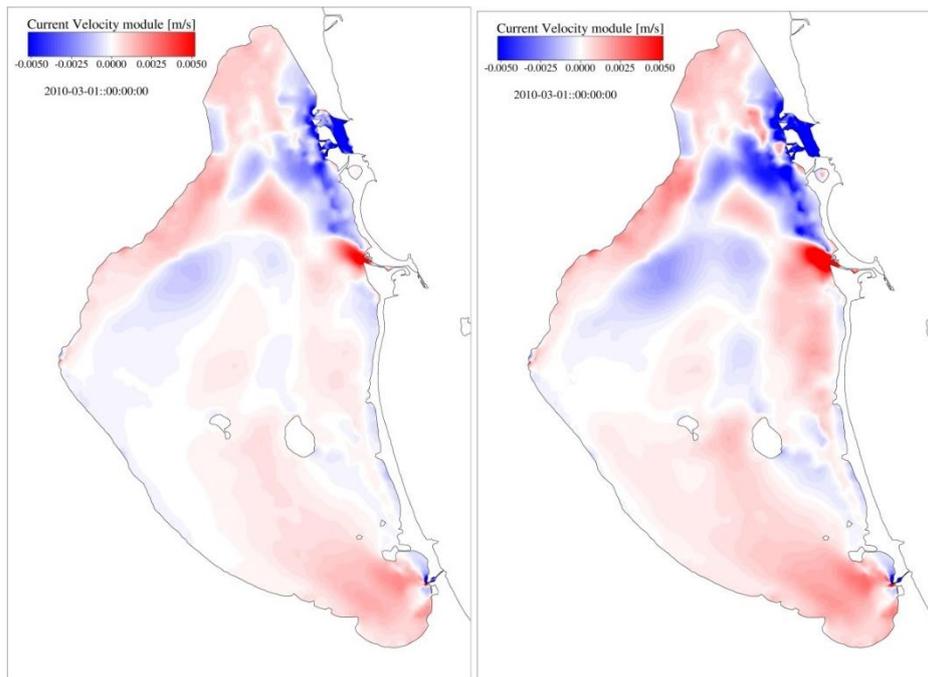
Mar\_0.5m

Fig. 60.- Diferencias de módulo de corrientes con el caso sin dragado en Invierno para los distintos escenarios.



Mar\_1.0m

Mar\_1.5m



Enc\_Mar\_1.0m

Enc\_Mar\_1.5m

Fig. 60.cont.- Diferencias de módulo de corrientes con el caso sin dragado en Invierno para los distintos escenarios.

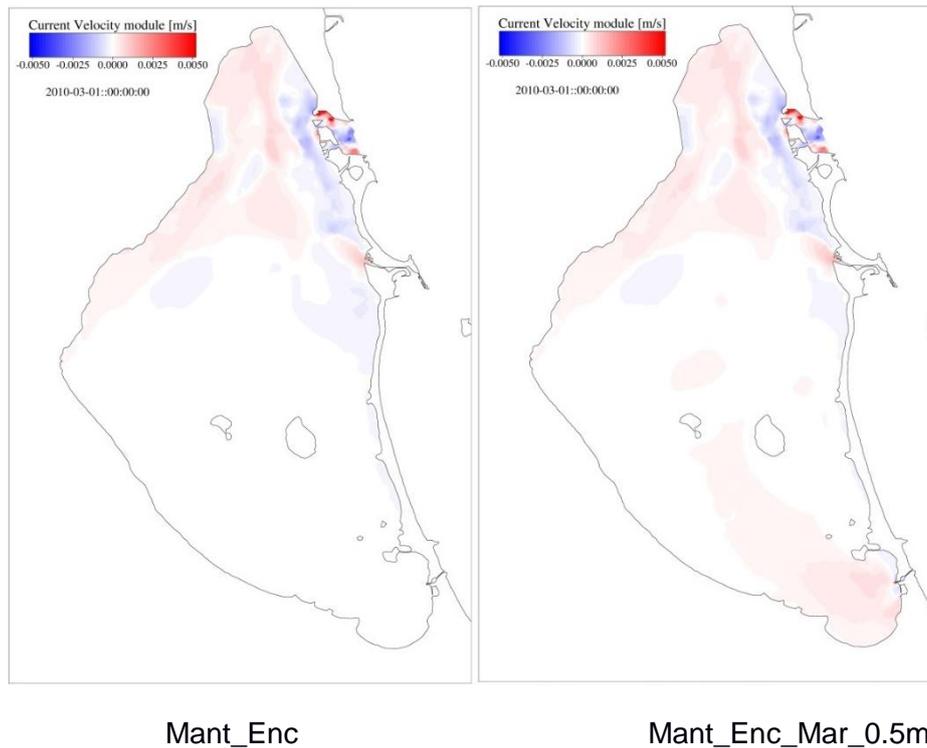


Fig. 60.cont.- Diferencias de módulo de corrientes con el caso sin dragado en Invierno para los distintos escenarios.

Las Figuras 61 a 64, muestran los promedios verticales de las máximas velocidades en los canales de Encañizadas y Marchamalo, con el propósito de comparar las situaciones sin dragado y los distintos escenarios de dragado propuestos.

Si se analizan los efectos sobre el canal de Encañizadas, se observa un incremento significativo de las velocidades máximas en los casos de dragado que afectan al canal (casos Enc\_1m y Enc\_1.5m). En los escenarios Mar-1m y Mar\_1.5m (dragado de Marchamalo) el efecto es pequeño en general y, aunque el modelo muestre velocidades muy altas en algunos puntos aislados, éstas pueden ser debidas a la aceleración del flujo en zonas muy someras. Finalmente, para los casos de dragado combinado en ambos canales (casos Enc\_Mar\_1m y Enc\_Mar\_1.5m) parece que existe una superposición de ambos efectos.

Similarmente, cuando se evalúan los efectos sobre las corrientes en el canal de Marchamalo, se puede encontrar que el dragado de Encañizadas en los casos Enc\_1m y Enc\_1.5m apenas afecta a las velocidades máximas en dicho canal. Por su parte, el dragado del canal de Marchamalo sí que provoca, lógicamente, un aumento de las velocidades máximas en el propio canal, que se observa claramente a ambos extremos para la situación de salida de flujo hacia el Mediterráneo. En dicha situación, para los casos Enc\_Mar\_1m y Enc\_Mar\_1.5m se puede ver también la interconexión entre los efectos de ambos canales.

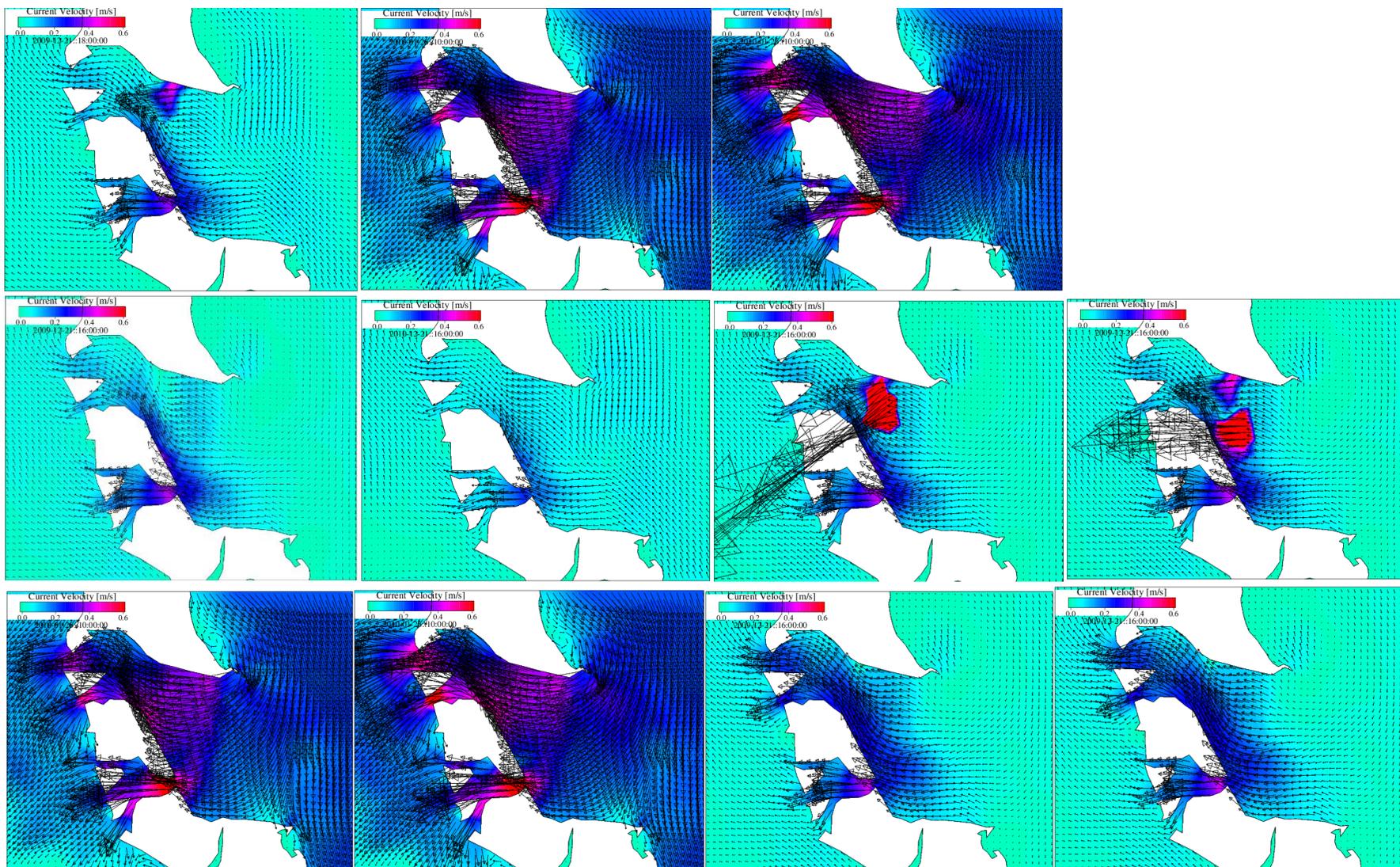


Fig. 61- Máximo caudal de entrada en Encañizadas (a) Sin\_dragado; b) Enc\_1m; c) Enc\_1.5m; d) Mar\_parc\_0.5m; e) Mar\_0.5m; f) Mar\_1m; g) Mar\_1.5m; h) Enc\_Mar\_1m; i) Enc\_Mar\_1.5m j) Mant\_Enc; k) Mant\_Enc-Mar\_0.5m )

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

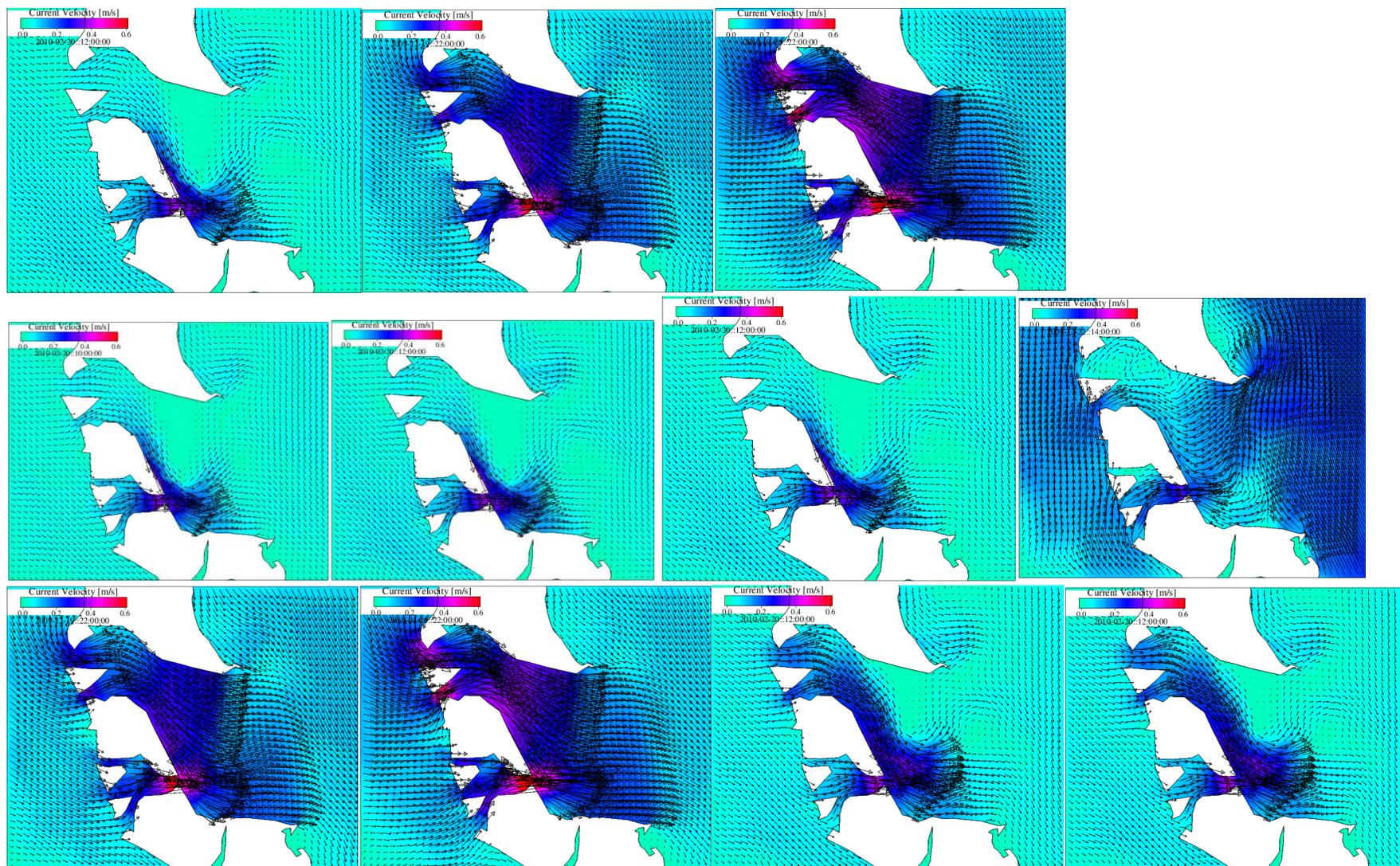


Fig. 62- Máximo caudal de salida en Encañizadas (a) Sin\_dragado; b) Enc\_1m; c) Enc\_1.5m; d) Mar\_parco\_0.5m; e) Mar\_0.5m; f) Mar\_1m; g) Mar\_1.5m; h) Enc\_Mar\_1m; i) Enc\_Mar\_1.5m j) Mant\_Enc; k) Mant\_Enc-Mar\_0.5m )

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

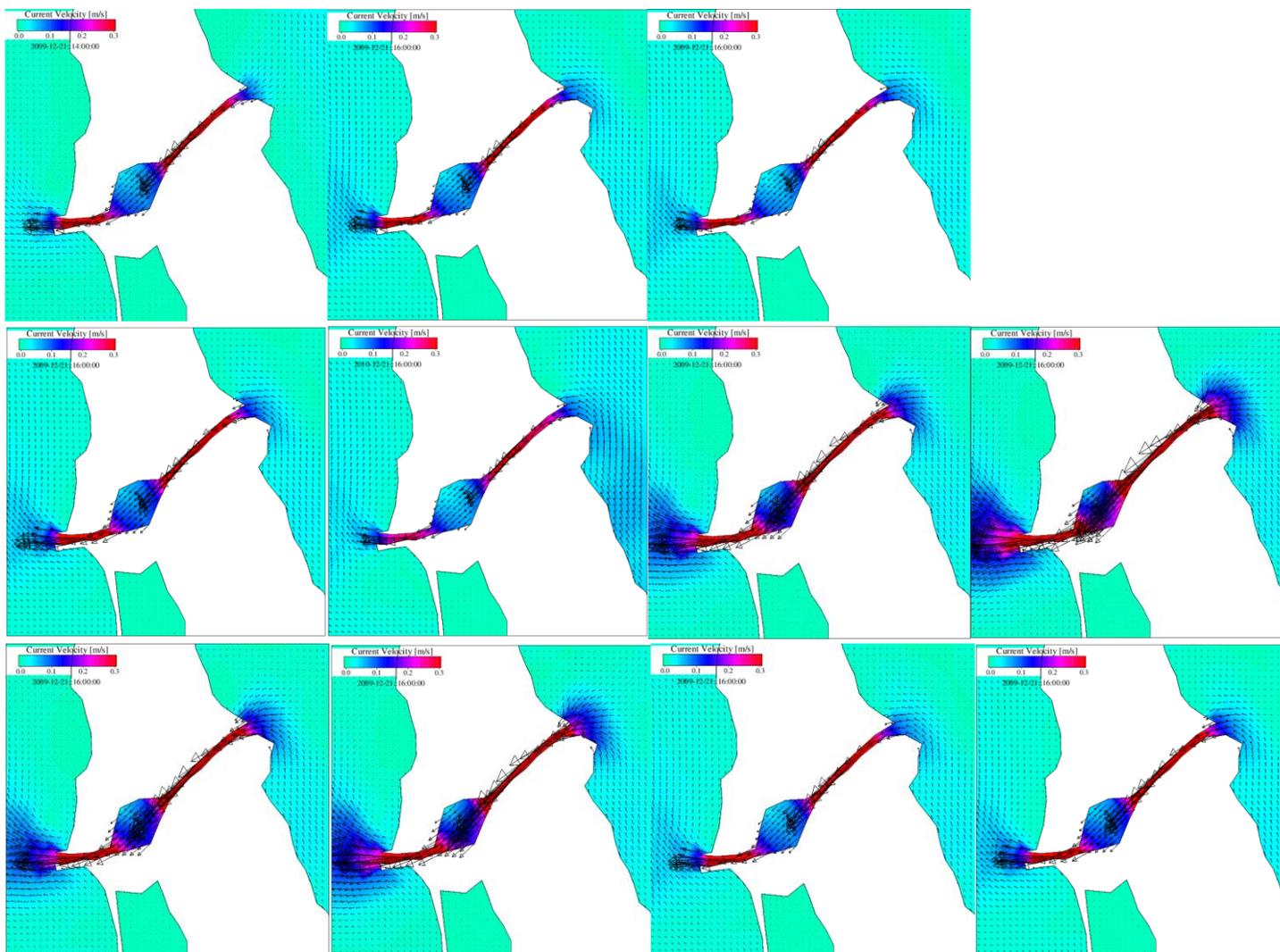


Fig.63 - Máximo caudal de entrada en Marchamalo (a) Sin\_dragado; b) Enc\_1m; c) Enc\_1.5m; d) Mar\_parc\_0.5m; e) Mar\_0.5m; f) Mar\_1m; g) Mar\_1.5m; h) Enc\_Mar\_1m; i) Enc\_Mar\_1.5m j) Mant\_Enc; k) Mant\_Enc-Mar\_0.5m )

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

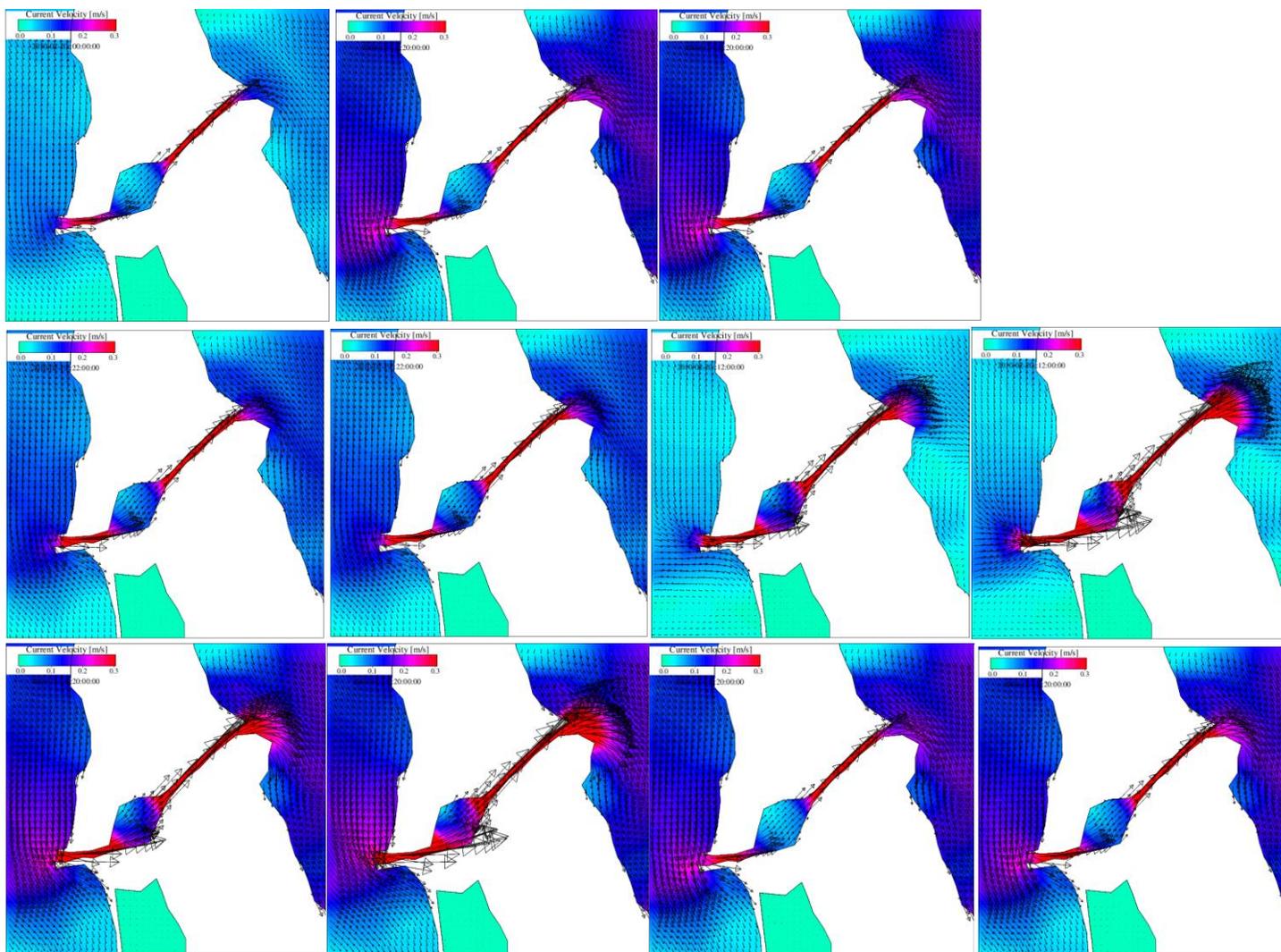


Fig. 64- Máximo caudal de salida en Marchamalo (a) Sin\_dragado; b) Enc\_1m; c) Enc\_1.5m; d) Mar\_parc\_0.5m; e) Mar\_0.5m; f) Mar\_1m; g) Mar\_1.5m; h) Enc\_Mar\_1m; i) Enc\_Mar\_1.5m j) Mant\_Enc; k) Mant\_Enc-Mar\_0.5m)

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros,  
Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)



### 1.2.3.- Tasas de Renovación

La tasa de renovación es calculada internamente por el software SHYFEM. Se ha considerado una concentración inicial del trazador igual a 1 en los elementos del interior de la laguna durante el periodo del 1/04/2009 al 02/05/2010, para considerar posibles valores superiores a un año, como los obtenidos en De Pascalis *et al.* (2012).

En la Tabla 6 se presentan los resultados de la tasa de renovación media para el área de la laguna en cada uno de los casos de dragado, computados por el programa desde el 1 de Abril de 2009. Se observa una disminución importante de las tasas de renovación, sobre todo para los casos de dragado en el canal de Encañizadas, lo que podría tener graves consecuencias ecológicas.

Tabla 6.-Promedio de las tasas de renovación en el Mar Menor para cada simulación

Caso	WRT (días)	WRT (meses)
Sin_dragado	327.26	10.8
Enc_1m	247.72	8.1
Enc_1.5m	187.60	6.2
Mar_1m	305.79	10.0
Mar_1.5m	286.35	9.4
Enc_Mar_1m	236.75	7.8
Enc_Mar_1.5m	174.37	5.7
Mant_Enc	306.99	10.1
Mar_parc_0.5m	322.70	10.6
Mar_0.5m	320.48	10.5
Mant_Enc-Mar_0.5m	303.22	10.0

La Tabla 7 muestra las tasas de renovación calculadas en estudios previos para distintos periodos, donde se puede observar que los resultados del presente modelo para el caso sin dragado se encuentran en el rango de valores obtenidos en dichos trabajos.

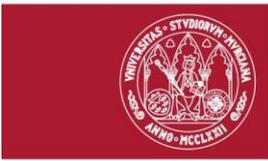


Tabla 7.- Tasas de renovación encontradas en la literatura existente (\*nota: calculado para un 80% de la renovación)

Fuente	Periodo	WRT (días)
López-Castejón (2017)	2011	240 (aprox)*
Umgiesser et al. (2014)	1997	384
Ruzafa (1989)	1970	469
Ruzafa (1989)	1981	294
Ruzafa (1989)	1982	200
Ruzafa (1989)	1983	270
Ruzafa (1989)	1984	207
Ruzafa (1989)	1985	218
Ruzafa (1989)	1986	386
Ruzafa (1989)	1987	672
Ruzafa (1989)	1988	289

Las tasas de renovación de agua en la laguna se muestran en la Figura 65. Similarmente, se puede ver que el gran impacto del dragado del canal de Encañizadas se extiende a toda la laguna mientras que en el caso de dragado del canal de Marchamalo los efectos aparecen más aislados en la zona Sur, aparentemente sin llegar a afectar a la zona Norte. Para el dragado de ambos canales se da una superposición de ambos efectos.

#### 1.2.4.- Flujos en los canales

Los flujos de agua a través de los canales se han calculado internamente en el modelo como los caudales que pasan a través de las secciones transversales de los canales más cercanas a la laguna..

La tabla 7 muestra los volúmenes y flujos en los canales de conexión del Mar Menor y el Mediterráneo para el periodo 01/04/2009-01/04/2010.

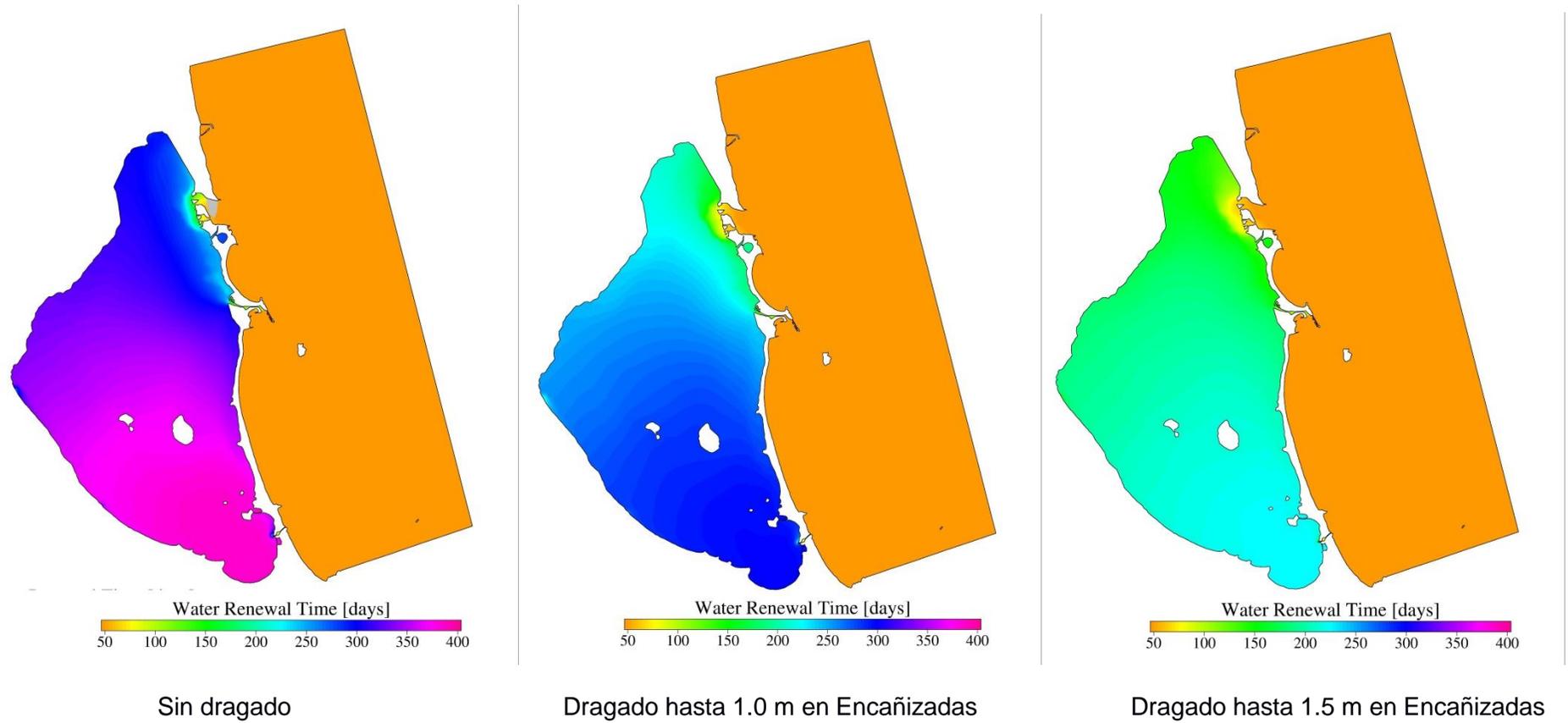
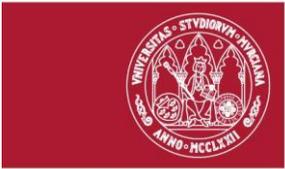


Fig. 65.- Tasas de renovación para los distintos escenarios simulados.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros, Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

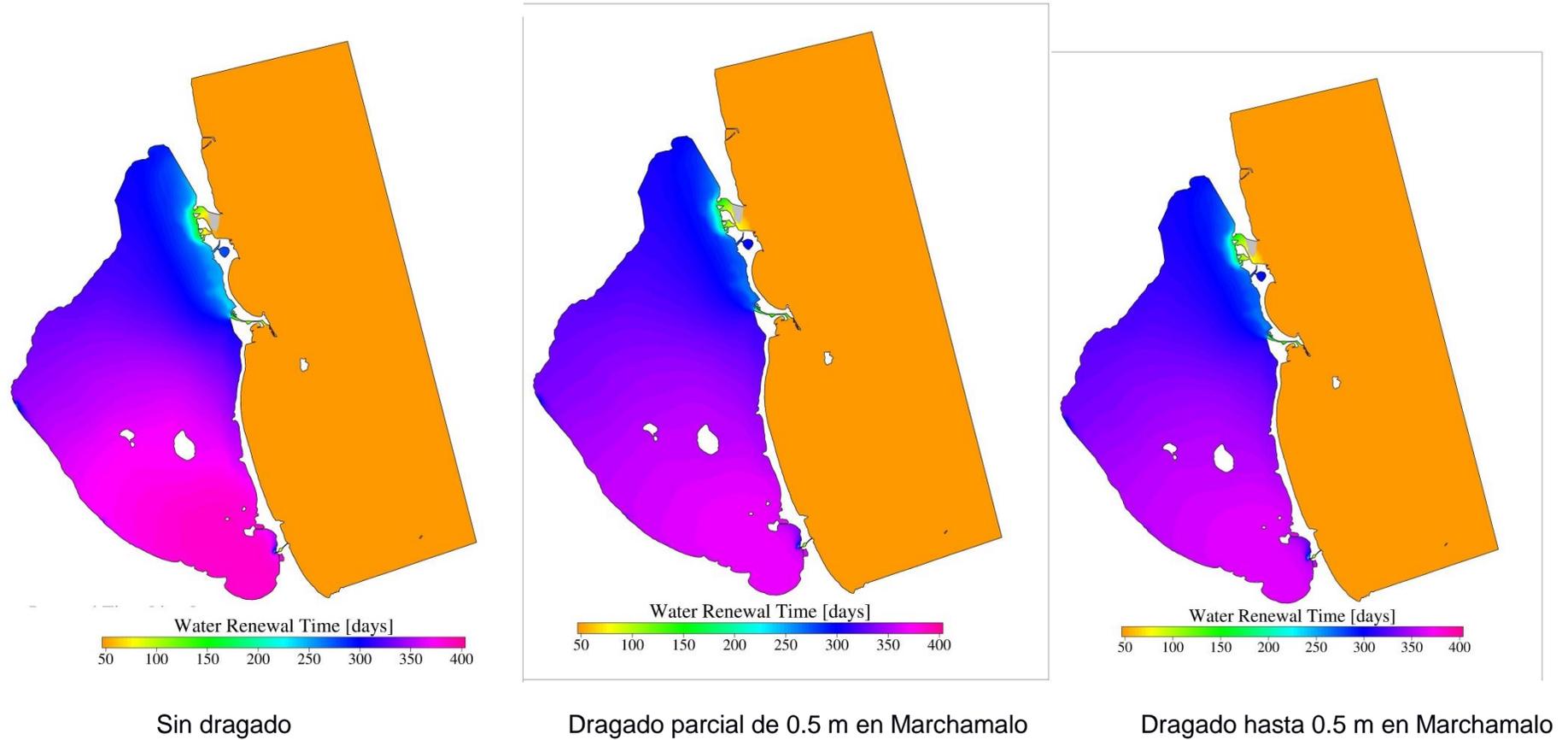


Fig. 65.cont.- Tasas de renovación para los distintos escenarios simulados.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros, Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

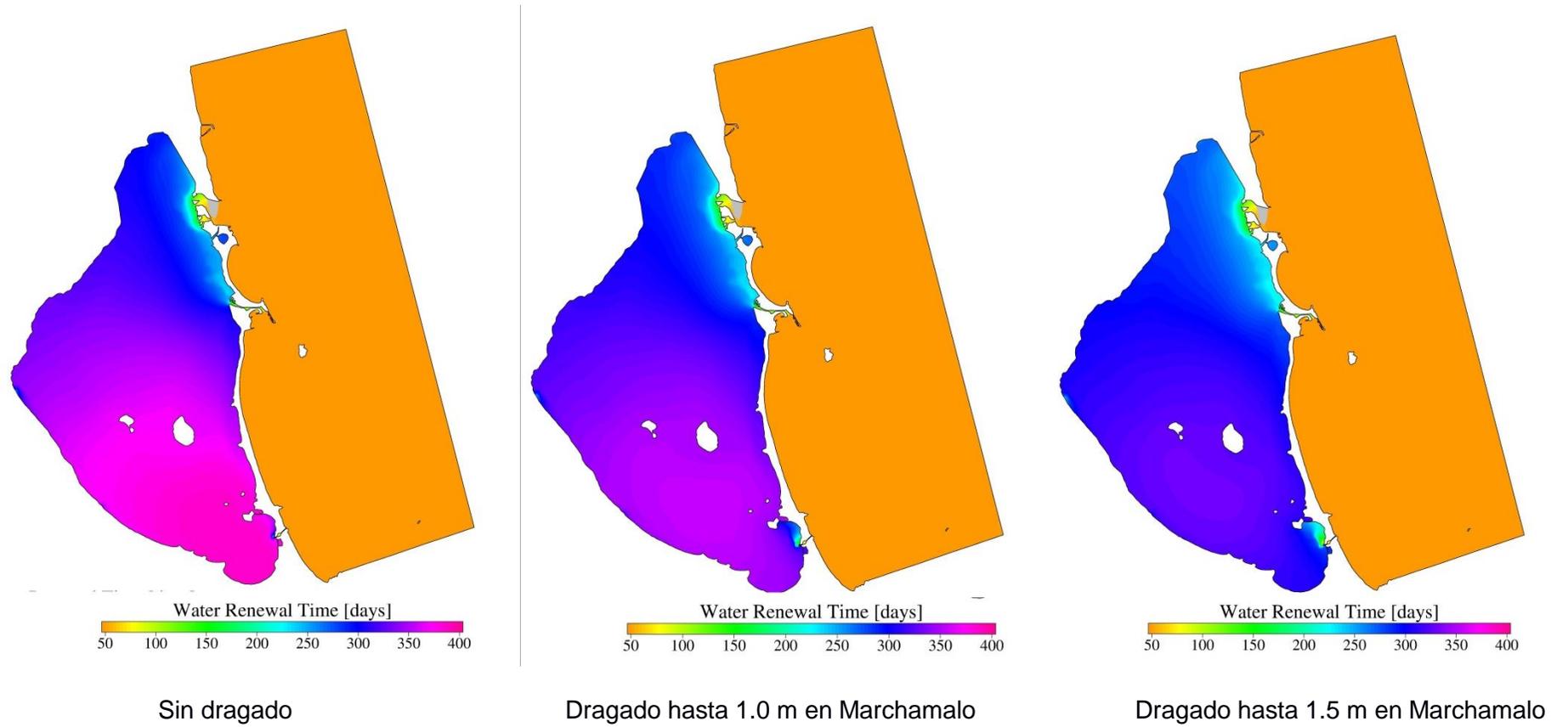
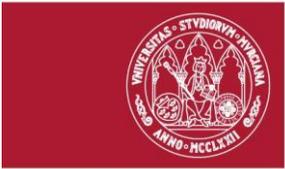


Fig. 65.cont.- Tasas de renovación para los distintos escenarios simulados.

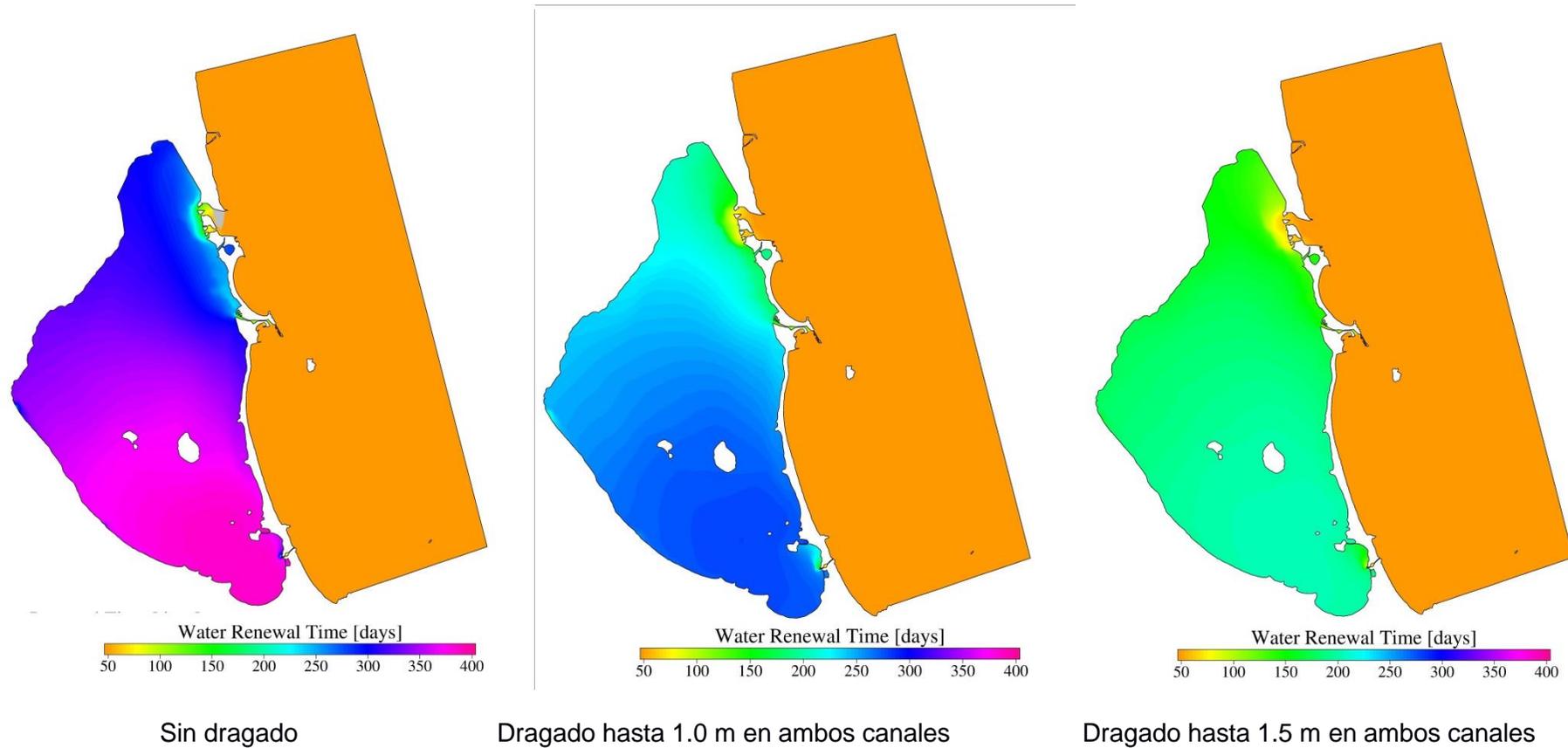


Fig. 65.cont.- Tasas de renovación para los distintos escenarios simulados.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros, Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)

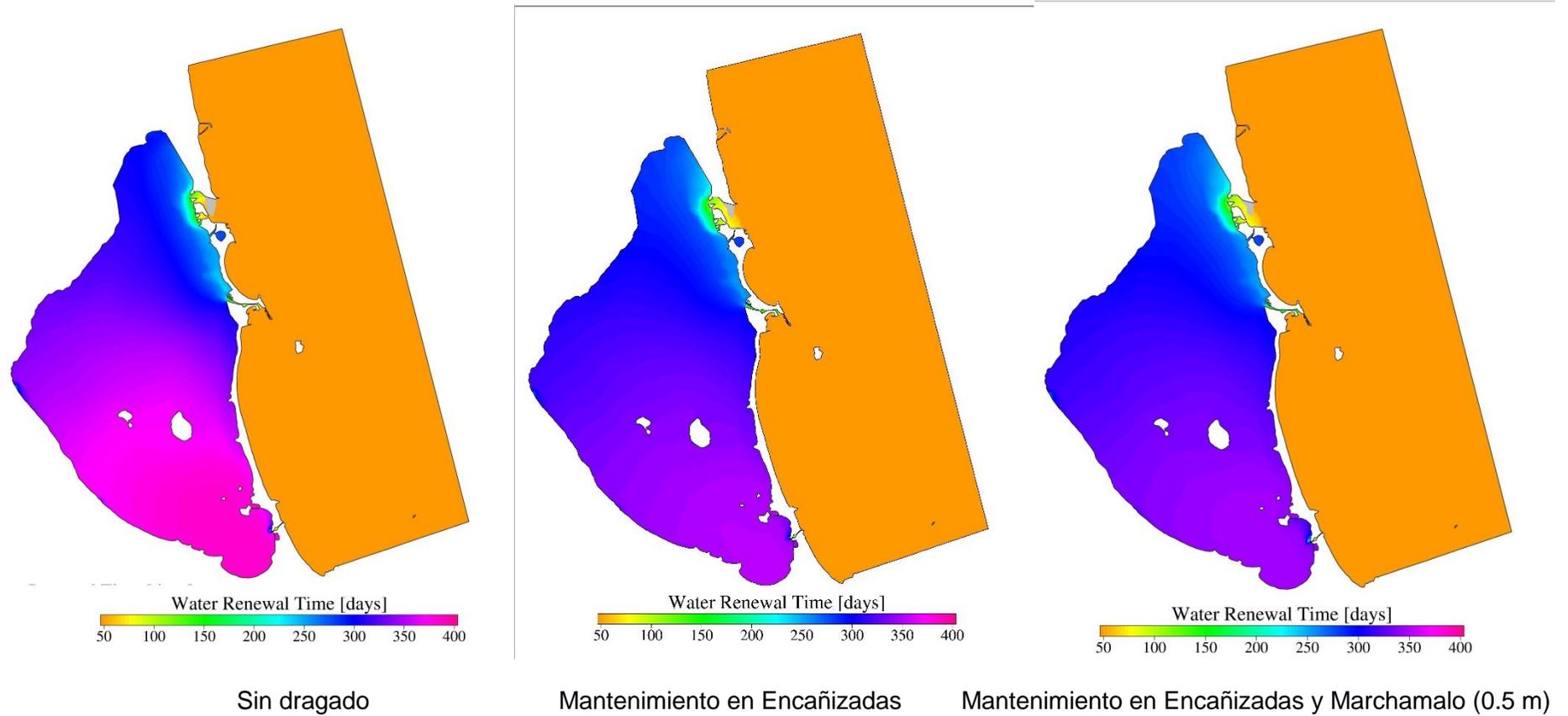


Fig. 65.cont.- Tasas de renovación para los distintos escenarios simulados.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros, Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)



Caso	Tipo	Volumen anual (hm <sup>3</sup> )			Flujo medio (m <sup>3</sup> /s)			Volumen anual total (hm <sup>3</sup> )	Flujo medio total (m <sup>3</sup> /s)
		Encañizadas	El Estacio	Marchamalo	Encañizadas	El Estacio	Marchamalo		
Sin_dragado	Entrada	158.49	944.66	16.70	5.03	29.95	0.53	1119.85	35.51
	Salida	115.62	939.77	12.95	3.67	29.80	0.41	1068.34	33.88
Enc_1m	Entrada	994.81	835.53	14.65	31.54	26.49	0.46	1844.99	58.49
	Salida	842.76	934.55	13.14	26.72	29.63	0.42	1790.45	56.77
Enc_1.5m	Entrada	2131.48	777.96	13.25	67.58	24.67	0.42	2922.69	92.67
	Salida	1968.11	884.45	12.77	62.40	28.04	0.40	2865.33	90.84
Mar_1m	Entrada	157.45	936.15	83.33	4.99	29.68	2.64	1176.93	37.31
	Salida	115.47	934.12	75.62	3.66	29.62	2.40	1125.21	35.68
Mar_1.5m	Entrada	156.77	930.45	156.54	4.97	29.50	4.96	1243.76	39.43
	Salida	114.92	925.09	151.99	3.64	29.33	4.82	1192.00	37.79
Enc_Mar_1m	Entrada	991.30	832.81	74.24	31.43	26.41	2.35	1898.35	60.19
	Salida	838.89	928.34	76.23	26.60	29.43	2.42	1843.46	58.45
Enc_Mar_1.5m	Entrada	2121.96	774.35	129.57	67.28	24.55	4.11	3025.88	95.94
	Salida	1947.51	874.04	148.38	61.75	27.71	4.70	2969.93	94.16
Mant_Enc	Entrada	289.84	920.02	16.28	9.19	29.17	0.52	1226.14	38.88
	Salida	218.43	942.67	13.04	6.93	29.89	0.41	1174.14	37.23
Mar_parc_0.5m	Entrada	158.39	943.72	22.27	5.02	29.92	0.71	1124.38	35.65
	Salida	115.59	939.47	17.99	3.66	29.79	0.57	1073.05	34.02
Mar_0.5m	Entrada	158.24	943.07	29.26	5.02	29.90	0.93	1130.57	35.85
	Salida	115.65	938.83	24.61	3.67	29.77	0.78	1079.09	34.22
Mant_Enc-Mar_0.5m	Entrada	289.58	918.75	28.51	9.18	29.13	0.90	1236.84	39.21
	Salida	218.42	941.52	24.75	6.93	29.85	0.78	1184.69	37.56

Tabla 7.- Volúmenes y caudales medios de entrada y salida en los canales y totales para cada escenario

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros, Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**



### 1.3.- CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en este estudio se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El efecto del dragado en los canales sobre los campos de salinidad y temperatura en la laguna, aumenta con la profundidad del dragado. Dichos efectos son distintos dependiendo de la gola en la que se actúe.
- Los impactos en los casos donde se dragan ambos canales son acumulativos con respecto a las situaciones individuales de dragado de un solo canal.
- En general, se produce una atenuación de las variaciones mensuales de salinidad y temperatura a lo largo del año debido al dragado con respecto a la situación inicial. Esto, como en el caso del dragado y ensanche del canal de El Estacio en los años 1970, puede conducir a la colonización y establecimiento de nuevas especies alóctonas procedentes del Mediterráneo.
- En los casos con mayor impacto, los cambios en la salinidad media de la laguna pueden alcanzar del orden de 2 psu, lo que ya puede tener efectos significativos también sobre algunas de las especies autóctonas especialmente cuando como consecuencia de las lluvias (como las ocurridas en el invierno de 2017) y el aporte de aguas subsuperficiales, estas situaciones puedan prolongarse en el tiempo..
- La intervención en el canal de Marchamalo resulta en un menor impacto en comparación con el dragado en Encañizadas, debido quizás a la mayor extensión de este último, entre otros factores.
- Generalmente, el dragado de los canales provoca una disminución de la salinidad media de la laguna a lo largo del año, registrando una reducción máxima durante el otoño para los casos de mayor profundidad de dragado.
- Respecto a la temperatura media de la laguna, existe una atenuación de las variaciones estacionales debido a los dragados. Es decir, aparece una disminución de temperatura durante la primavera y el verano mientras que la temperatura aumenta durante el otoño e invierno, con los máximos incrementos en torno al invierno.
- La magnitud de los efectos del dragado sobre la temperatura no parece ser tan relevantes como sobre la salinidad, alcanzando cambios máximos de 0.25 °C.
- La distribución espacial de los impactos del dragado sobre la salinidad a lo largo de la laguna depende de los distintos escenarios. En términos generales, se da un mayor alcance de los impactos para el dragado de Encañizadas y su combinación con Marchamalo mientras que los efectos son más localizados para el resto de casos.



- En cuanto a los cambios en la temperatura, los efectos están mayoritariamente localizados alrededor de la zona de actuación.
- En relación al campo de corrientes en el Mar Menor, de este estudio se desprende que aunque la magnitud de las velocidades sea pequeña (del orden de cm/s) el efecto del dragado en el campo de velocidades es apreciable y podría afectar a los procesos de sedimentación y transporte de arenas y fangos. En general se observa un debilitamiento de las corrientes. Dichos efectos son especialmente marcados en algunas zonas ribereñas lo que puede tener consecuencias, no solo con las comunidades asentadas en dichas zonas, sino también con la estabilidad y/o dinámica de las playas. Además, ello puede afectar a los movimientos de los peces en las zonas de pesca, con efectos negativos en las capturas en los artes fijos.
- Para la mayoría de los casos de dragado, a lo largo del año, los módulos de la velocidad de corriente disminuyen en la zona de actuación y zonas próximas.
- Se observa interacción del efecto del dragado en los dos canales sobre el campo de velocidades en la zona del canal del Estacio, donde, al contrario que en la mayor parte de la laguna, se da un incremento del módulo de las velocidades de corriente, en general.
- La distribución espacial de los cambios en las velocidades de corriente varía con la estación del año y cabe resaltar, como se ha comentado, que dichos cambios pueden afectar importantemente a la capacidad pesquera del Mar Menor.
- El dragado de los canales también tiene un impacto importante sobre los flujos máximos de entrada y salida de agua a través de ellos, con cambios en la magnitud de las velocidades de corriente y de los instantes del año en los cuales dichos valores ocurren, así como las direcciones de corriente en el caso de Encañizadas.
- El dragado de los canales lleva a la reducción de las tasas de renovación del agua dentro de la laguna y, en los casos de mayor impacto, dicha reducción puede llegar a la mitad de la que existe en la situación sin dragado, lo que supone consecuencias importantes para el régimen general de la laguna y la conectividad de las poblaciones de las distintas especies, lo que deberá cuantificarse mediante la aplicación de modelos lagrangianos.
- Los escenarios de mantenimiento muestran cambios menos acentuados en la tasa de renovación, reduciéndose en torno a un mes, lo que sería más recomendable, ya que entra dentro de los rangos habituales de variabilidad en las tasas de renovación de la laguna.



- La distribución espacial del impacto sobre la tasa de renovación dentro de la laguna se extiende a toda la zona en los casos de dragado de Encañizadas mientras que el efecto se concentra en la mitad Sur para los dragados en Marchamalo.
- La combinación del dragado en ambos canales lleva a la homogeneización de las tasas de renovación dentro de la laguna, alejándose de la situación sin dragado, donde se da una diferencia apreciable entre las zonas al Norte y al Sur. Este cambio podría afectar a la biodiversidad de las especies existentes.
- En cuanto al intercambio de los volúmenes del agua entre el Mar Menor y el Mediterráneo, los casos de mayor profundidad de dragado llevan a un cambio significativo de los volúmenes totales de entrada y salida a lo largo del año.
- La actual situación de las encañizadas del norte de la laguna y del resto de las golas de comunicación con el Mediterráneo no muestra síntomas de “desconexión” entre ambos mares, como se ha divulgado en algunos medios. Las condiciones de intercambio, corrientes, salinidad y temperatura se mantienen en los rangos normales desde el dragado y ensanche del canal de El Estacio.
- Por todo ello, se recomienda que cualquier intervención en las golas se reduzca a operaciones puntuales de mantenimiento, especialmente en las Encañizadas del Norte, y solo en el caso de que se observen problemas muy concretos de falta de corriente que afecten negativamente a los usos habituales en las distintas zonas. En el caso del canal de Marchamalo, las actuaciones tienen un efecto más local, pero deben reducirse al mínimo y en la zona de la gola que da al Mediterráneo. En todo caso, cualquier propuesta de actuación debería ser justificada, evaluada y puesta en contexto de los análisis y marco de referencia que se presentan en este informe.



## **Bibliografía**

Arévalo, L. (1988). El Mar Menor como sistema forzado por el Mediterráneo. Control hidráulico y agentes fuerza. Boletín del Instituto Español de Oceanografía, 5(1), 63-95.

Burchard, H., Bolding, K., & Villarreal, M. (1999). GOTM, a general ocean turbulence model: Theory, implementation and test cases, Rep. EUR18745.

De Pascalis, F., Pérez-Ruzafa, A., Gilabert, J., Marcos, C., & Umgiesser, G. (2012). Climate change response of the Mar Menor coastal lagoon (Spain) using a hydrodynamic finite element model. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 114, 118-129.

Ghezzi, M., De Pascalis, F., Umgiesser, G., Zemly, P., Sigovini, M., Marcos, C., & Pérez-Ruzafa, A. (2015). Connectivity in three European coastal lagoons. Estuaries and coasts, 38(5), 1764-1781.

Hesse, C., Stefanova, A., Krysanova, V., Bielecka, M., Domnin, D. A., Lloret, J., Loboda, N. and Sousa, L. LAGOONS 2013. Results of climate impact assessment – Application for four lagoon catchments. LAGOONS Report D5.1, 107 pp., (Disponible online en: [http://lagoons.biologiaatua.net/?page\\_id=702](http://lagoons.biologiaatua.net/?page_id=702) )

Martínez, J., Alonso, F., Carreño, F., Pardo, M. T., Miñano, J., Esteve, M. A., & Gómez, R. (2005). Report on watershed modelling in Mar Menor site.

Pérez-Ruzafa, A., Fernández, A. I., Marcos, C., Gilabert, J., Quispe, J. I., & García-Charton, J. A. (2005). Spatial and temporal variations of hydrological conditions, nutrients and chlorophyll a in a Mediterranean coastal lagoon (Mar Menor, Spain). Hydrobiologia, 550(1), 11-27.

Ruzafa, Á. P. (1989). Estudio ecológico y bionómico de los poblamientos bentónicos del Mar Menor (Murcia, SE de España). Tesis Doctoral, Universidad de Murcia.

Umgiesser, G., Canu, D. M., Cucco, A., & Solidoro, C. (2004). A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation. Journal of Marine Systems, 51(1), 123-145.

Umgiesser, G., Ferrarin, C., Cucco, A., De Pascalis, F., Bellafiore, D., Ghezzi, M., & Bajo, M. (2014). Comparative hydrodynamics of 10 Mediterranean lagoons by means of numerical modeling. Journal of Geophysical Research: Oceans, 119(4), 2212-2226.

Pérez-Ruzafa et al., (2010). Estudio de dispersión de los vertidos existentes en la laguna costera del Mar Menor y los análisis coste-eficacia de la no aplicación de las medidas correctoras oportunas para la mejora de la calidad de las aguas en esta laguna. Entidad: Consejería de Agricultura y Agua. Informe final 10/06/2010.

**Grupo de investigación Ecología y ordenación de Ecosistemas Marinos Costeros, Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología**

Campus Universitario de Espinardo. 30100 Murcia  
T. 868 88 49 98 – F. 868 88 39 63 – [www.um.es/ecologia](http://www.um.es/ecologia)