

**ANÁLISIS GENERAL DE  
LA CAPACIDAD DE  
TRANSPORTE  
CES ASOCIADOS AL  
ROL A-011-2023**

**Australis Mar S.A.**

---

**Región de Magallanes y  
la Antártica Chilena**

**- Agosto, 2024 -**



**ANÁLISIS GENERAL DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE  
CES ASOCIADOS AL ROL A-011-2023  
Australis Mar S.A.**

Solicitado Por:



**Casa Central**  
Decher Nro. 161,  
Puerto Varas, Chile

Preparado Por:



**Casa Matriz**  
Limache 3405, Of. 31-33,  
Edificio Reitz de las Empresas  
El Salto, Viña Del Mar - Chile  
Teléfono 56 32 2189200  
[info@ecotecnos.cl](mailto:info@ecotecnos.cl)

Rev.	Fecha	Propósito de la emisión	Por	Rev.	Apr.
B	13-08-2024	Revisión Interna	M. Quezada	F. Galaz	P. Monreal

B: Emitido para revisión interna.

A: Emitido para aprobación del cliente.

0: Aprobado.



## **Profesionales Responsables Ecotecnos S.A.**

### **Jefe de Proyecto**

**PhD. Ing. Sr. Matías Quezada**

Jefe del Departamento de Oceanografía  
Física y Modelamiento Matemático  
Doctor en Ciencias de la Ingeniería,  
Mención Fluidodinámica  
Ingeniero Civil Oceánico

### **Revisor**

**Ing. Pia Monreal Donoso**

Jefa de Modelación Ambiental - SGS - Ecotecnos  
Ingeniero Civil Oceánico  
Magister en Oceanografía Física (c)

### **Equipo Profesional**

**Felipe Galaz**

Jefe de Proyectos - SGS - Ecotecnos  
Ingeniero Civil Oceánico

**Keitell Marshall**

Especialista en Oceanografía Física y Meteorología  
Ingeniero Civil Oceánico (e)



**ECOTECNOS S.A.**

Limache 3405, Of. 31-33,  
Edificio Reitz de las Empresas,  
El Salto, Viña Del Mar – Chile.

El presente informe fue elaborado por ECOTECNOS S.A. a requerimiento de la empresa Australis Mar S.A., por lo que este documento solamente puede ser utilizado y divulgado con la autorización expresa de sus propietarios, quedando terminantemente prohibido el uso y divulgación, de todo o parte, del referido documento, en cualquiera de sus formas. La información de este documento se encuentra protegida, entre otras normas, por la Ley N° 17.336 sobre Propiedad Intelectual, publicada en el Diario Oficial N° 27.761, de 2 de octubre de 1970.

	<b>ANÁLISIS GENERAL DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE CES ASOCIADOS AL ROL A-011-2023</b>	Nº DOCUMENTO IT-TRANS-ROL11	EDICIÓN / REVISIÓN 1/1	5
		Fecha de emisión: 13-08-2024	Emitido por: Ecotecnos S.A.	

## CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>6</b>
1.1	ASPECTOS GENERALES	6
1.2	CENTROS DE ENGORDA QUE COMPONEN EL ROL	7
<b>2</b>	<b>MODELO DE TRANSPORTE IMPLEMENTADO</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>ESTIMACIÓN DEL TRANSPORTE POR CADA CES</b>	<b>9</b>
3.1	CES MELCHOR 1	9
3.1.1	Datos de entrada	9
3.1.2	Resultados obtenidos	9
3.2	CES MELCHOR 4	11
3.2.1	Datos de entrada	11
3.2.2	Resultados obtenidos	11
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>14</b>

### LISTADO DE TABLAS

Tabla 3.1: Parámetros de entrada y configuración del modelo numérico, para la estimación del transporte de Carbono en el lecho. CES Melchor 1 ..... 9

Tabla 3.2: Parámetros de entrada y configuración del modelo numérico, para la estimación del transporte de Carbono en el lecho. CES Melchor 4. .... 11

### LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1: Ubicación de los CES asociados al presente estudio. .... 7

Figura 3.1: Desplazamiento horizontal del carbono en el fondo, para el CES Melchor 1. .... 10

Figura 3.2: Ubicación espacial del máximo de carbono, para el CES Melchor 1. .... 10

Figura 3.3: Desplazamiento horizontal del carbono en el fondo, para el Melchor 4. .... 12

Figura 3.4: Comportamiento temporal del carbono máximo en el lecho, para el Melchor 4. . 12

	<b>ANÁLISIS GENERAL DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE CES ASOCIADOS AL ROL A-011-2023</b>	Nº DOCUMENTO IT-TRANS-ROL11	EDICIÓN / REVISIÓN 1/1	6
		Fecha de emisión: 13-08-2024	Emitido por: Ecotecnos S.A.	

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 ASPECTOS GENERALES

En la operación de los centros de cultivo es común que debido a las actividades de engorda, se produzcan procesos de depositación de material particulado hacia el lecho (alimento no consumido y fecas), los que derivan en el flujo de carbono que es usualmente analizado mediante modelación numérica siendo un estándar de la industria acuícola en Chile el software denominado NewDepomod.

A partir del modelo NewDepomod, se pueden obtener representaciones de la huella de depositación del material, sin embargo, una vez que estas se encuentran en el lecho se verán expuestas a los mecanismos de transporte los que han sido descrito extensamente en la literatura y que se conocen como: Advección, Difusión y Reacción.

La advección es un mecanismo de transporte que, mediante la acción del campo de velocidades, moviliza y traslada una determinada constituyente (fluida o sólida) que se encuentra en un medio fluido fluyendo.

Por su parte, la difusión es un proceso de transporte pasivo mediante el cual las moléculas o partículas se mueven desde una región de alta concentración a una región de baja concentración. Este movimiento es impulsado por el gradiente de concentración y no requiere energía externa.

En el contexto biológico, la difusión es fundamental para el intercambio de gases, nutrientes y desechos en las células. Por ejemplo, el oxígeno y el dióxido de carbono se difunden a través de las membranas celulares, permitiendo que las células respiren y expulsen productos de desecho.

La difusión puede ocurrir en gases, líquidos y sólidos, y es un proceso que tiende a llevar a un equilibrio en el que las concentraciones de las sustancias se igualan en todo el espacio disponible.

La reacción corresponde un proceso de transporte en el cual la concentración puede transformarse en un subproducto o decaer, lo cual corresponde a la disminución paulatina de la concentración debido a la degradación en el tiempo.

En síntesis, es importante mencionar que las huellas de carbono trazadas por el modelo NewDepomod u otro similar, representan la peor condición de la pluma de depositación, asumiendo una condición estática y acumulativa del carbono modelado. Sin embargo, dicha representación, en condiciones reales, en el tiempo, una vez que se encuentran en el lecho,

	<b>ANÁLISIS GENERAL DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE CES ASOCIADOS AL ROL A-011-2023</b>	Nº DOCUMENTO IT-TRANS-ROL11	EDICIÓN / REVISIÓN 1/1	7
		Fecha de emisión: 13-08-2024	Emitido por: Ecotecnos S.A.	

se desplazarán y no corresponderán a un proceso estático, sino que dinámico, de tal modo que el transporte actuará sobre ella.

## 1.2 CENTROS DE ENGORDA QUE COMPONEN EL ROL

A modo de conocer el transporte del carbono depositado y que ha sido determinado previamente con el modelo NewDepomod y que fuera reportado por terceros, se estudiará el transporte asociado al material depositado en el lecho.

En este reporte se abordan los resultados mostrados para el ROL 11 que contiene los siguientes CES: CES Caleta Fog y CES Obstrucción, y cuya ubicación se ilustra en la Figura 1.1.



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 1.1: Ubicación de los CES asociados al presente estudio.**

	<b>ANÁLISIS GENERAL DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE CES ASOCIADOS AL ROL A-011-2023</b>	Nº DOCUMENTO IT-TRANS-ROL11	EDICIÓN / REVISIÓN 1/1	8
		Fecha de emisión: 13-08-2024	Emitido por: Ecotecnos S.A.	

## 2 MODELO DE TRANSPORTE IMPLEMENTADO

Para estudiar el transporte de carbono depositado en el lecho, se ha implementado un modelo numérico en dos dimensiones y que mediante el método de las diferencias finitas permite conocer en un dominio rectangular, la solución de la ecuación de advección, difusión y reacción que se describe a continuación:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u}\bar{C}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}\bar{C}) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y}\right) + R(\bar{C})$$

Donde:

- $\bar{C}$  : Concentración del carbono en el lecho.
- $\bar{u}$  y  $\bar{v}$ : Velocidades residuales ortogonales de la corriente.
- $\varepsilon_x$  : Coeficiente de difusión turbulento en el eje x.
- $\varepsilon_y$ : Coeficiente de difusión turbulento en el eje y.
- $R(\bar{C})$ : Reacción de la concentración al interactuar con el medio fluido.

Sobre la ecuación anterior se incorporan los siguientes supuestos:

- La difusión se considerará isotrópica.
- La reacción se considerará de primer orden, pues equivale a un decaimiento convencional.
- Se asumirá la forma no conservativa de la advección, asumiendo que el modelo se forzará con velocidades de corriente constantes obtenidas desde mediciones de ADCP.

Basado en los supuestos anteriores, se obtiene la ecuación de gobierno del modelo de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x}(\bar{C}) + \bar{v} \frac{\partial}{\partial y}(\bar{C}) = \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial x^2}(\bar{C}) + \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial y^2}(\bar{C}) - \kappa \bar{C}$$

De acuerdo a la literatura especializada, Hargrave & Phillips (1989) recomiendan los coeficientes de decaimiento del carbono orgánico en una fase que tiende a ser lábil, se estiman entre 1/20 a 1/100 día<sup>-1</sup>, mientras que la difusión recomendado por Keeley et al. (2013) asciende a 0,1 m<sup>2</sup>/s.



### 3 ESTIMACIÓN DEL TRANSPORTE POR CADA CES

#### 3.1 CES CALETA FOG

##### 3.1.1 Datos de entrada

La simulación numérica se realizó considerando los valores indicados en la Tabla 3.1, a partir de los cuales se obtuvo una configuración estable del modelo y que fuera capaz de representar el comportamiento de campo descrito por las mediciones.

Es importante destacar que la Tabla 3.1 que las magnitudes de las componentes residuales de la corriente en x, resultan de una cuantía similar a los valores promedios de la superficie, a pesar de que valores en el lecho se esperan en teoría de menores magnitudes.

**Tabla 3.1: Parámetros de entrada y configuración del modelo numérico, para la estimación del transporte de Carbono en el lecho. CES Caleta Fog**

Parámetro	Nomenclatura	Magnitud	Unidad
Concentración Carbono	C	9,35	gC/m <sup>2</sup> /día
Discretización Espacial	dh	10	m
Discretización Temporal	dt	0.05	s
Difusión turbulenta	$\varepsilon$	0.10	m <sup>2</sup> /s
Coeficiente de decaimiento	$\kappa$	1/100	1/día
Velocidad residual en x	$\bar{u}$	-0.100	m/s
Velocidad residual en y	$\bar{v}$	-0.072	m/s
Tiempo de simulación	T	10	días

Fuente: Elaboración Propia

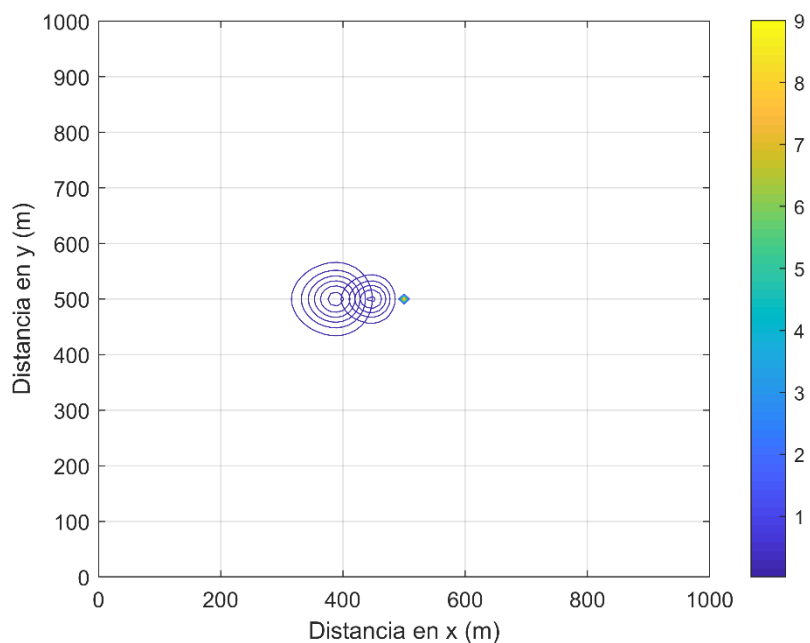
Con los parámetros definidos, se han obtenido los resultados descritos en la sección siguiente.

##### 3.1.2 Resultados obtenidos

En la Figura 3.1 se ilustran los resultados del modelo de transporte, considerando que el carbono se encuentra inicialmente en las coordenadas  $x = 500$ ,  $y = 500$  (coordenada numérica para la simulación), se puede advertir que se alcanzaría un desplazamiento neto de 100 metros luego de 10 días. **Esto sería un claro indicador de que, en la escala de tiempo simulada, el carbono no queda depositado en el lecho de una manera permanente, sino que el transporte que actúa (advección, difusión y reacción) lo distribuye a lo largo del lecho.**

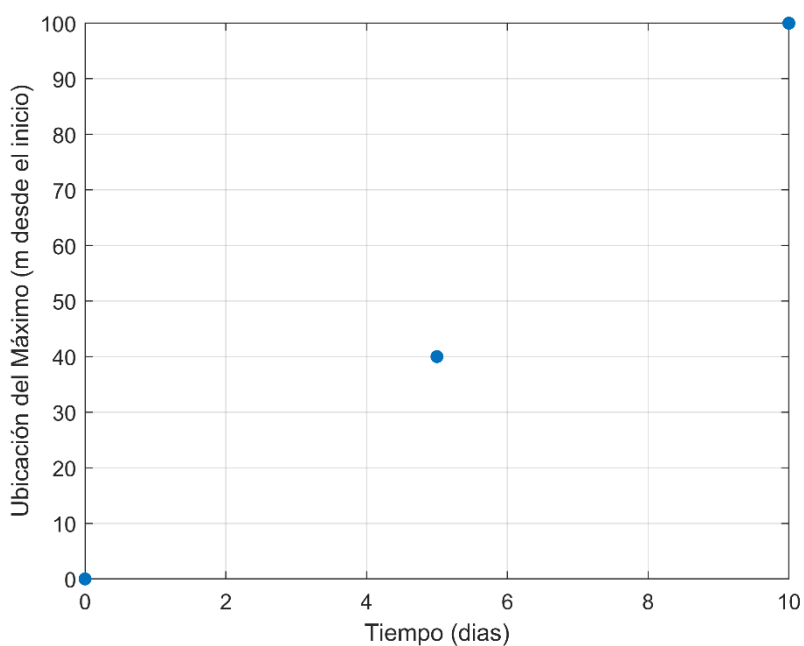
Por su parte la Figura 3.2 se ven cuantificadas las distancias para cada uno de los snapshot mostrados, los que se asociaron a 5 y 10 días respectivamente. **De ella se puede advertir que el carbono se desplazaría 40 metros en 5 días y 100 metros en 10 días.**

	<b>ANÁLISIS GENERAL DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE CES ASOCIADOS AL ROL A-011-2023</b>	Nº DOCUMENTO IT-TRANS-ROL11	EDICIÓN / REVISIÓN 1/1	10
		Fecha de emisión: 13-08-2024	Emitido por: Ecotecnos S.A.	



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.1: Desplazamiento horizontal del carbono en el fondo, para el CES Caleta Fog.**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.2: Ubicación espacial del máximo de carbono, para el CES Caleta Fog.**

## 3.2 CES OBSTRUCCIÓN

### 3.2.1 Datos de entrada

La simulación numérica se realizó considerando los valores indicados en la Tabla 3.2, a partir de los cuales se obtuvo una configuración estable del modelo y que fuera capaz de representar el comportamiento de campo descrito por las mediciones.

Es importante destacar que la Tabla 3.2 que las magnitudes de las componentes residuales de la corriente en y, resultan de una cuantía similar a los valores promedios de la superficie, a pesar de que valores en el lecho se esperan en teoría de menores magnitudes.

**Tabla 3.2: Parámetros de entrada y configuración del modelo numérico, para la estimación del transporte de Carbono en el lecho. CES Obstrucción.**

Parámetro	Nomenclatura	Magnitud	Unidad
Concentración Carbono	C	10,14	gC/m <sup>2</sup> /día
Discretización Espacial	dh	10	m
Discretización Temporal	dt	0.05	s
Difusión turbulenta	$\varepsilon$	0.10	m <sup>2</sup> /s
Coeficiente de decaimiento	$\kappa$	1/100	1/día
Velocidad residual en x	$\bar{u}$	0.054	m/s
Velocidad residual en y	$\bar{v}$	-0,140	m/s
Tiempo de simulación	T	10	días

Fuente: Elaboración Propia

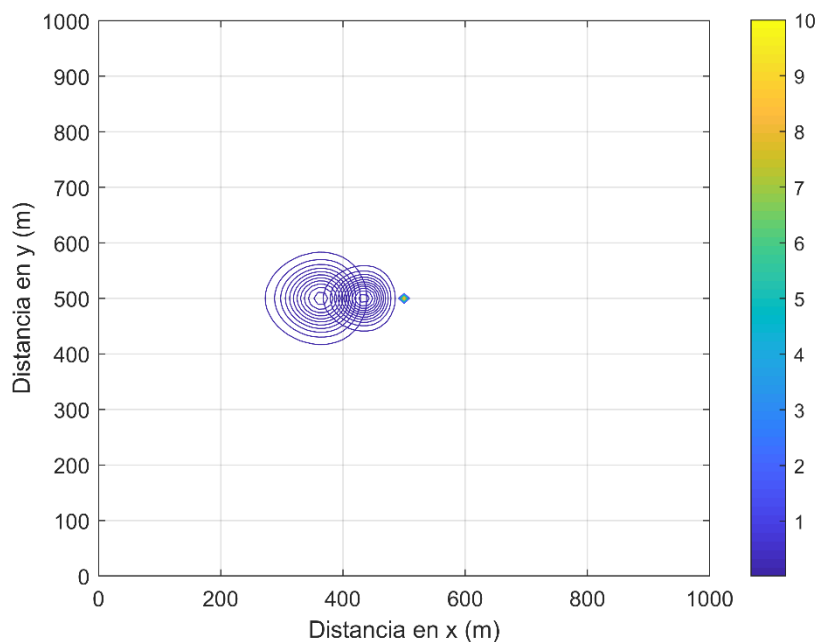
Con los parámetros definidos, se han obtenido los resultados descritos en la sección siguiente.

### 3.2.2 Resultados obtenidos

En la Figura 3.3 se ilustran los resultados del modelo de transporte, considerando que el carbono se encuentra inicialmente en las coordenadas  $x = 500$ ,  $y = 500$  (coordenada numérica para la simulación), se puede advertir que se alcanzaría un desplazamiento neto de 130 metros luego de 10 días. **Esto sería un claro indicador de que, en la escala de tiempo simulada, el carbono no queda depositado en el lecho de una manera permanente, sino que el transporte que actúa (advección, difusión y reacción) lo distribuye a lo largo del lecho.**

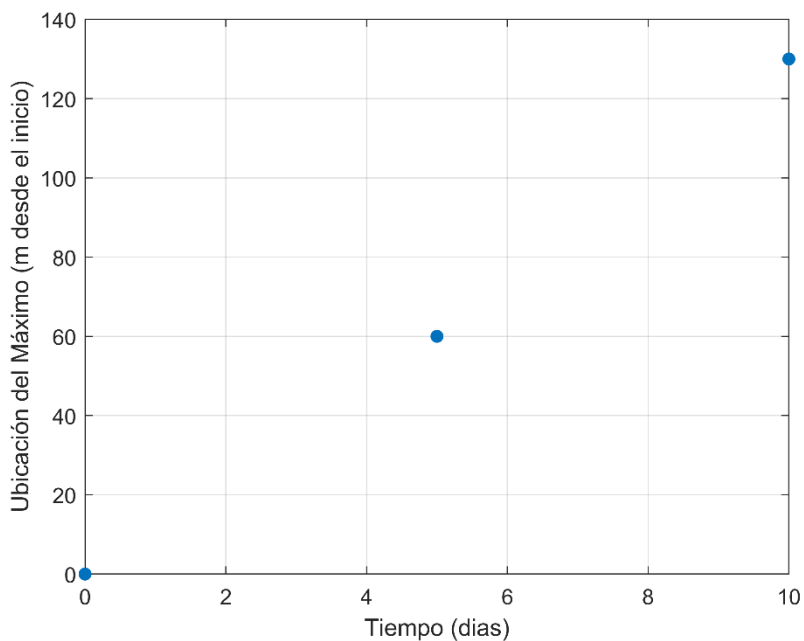
Por su parte la Figura 3.4 se ven cuantificadas las distancias para cada uno de los snapshot mostrados, los que se asociaron a 5 y 10 días respectivamente. **De ella se puede advertir que el carbono se desplazaría 60 metros en 5 días y 130 metros en 10 días.**

	<b>ANÁLISIS GENERAL DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE CES ASOCIADOS AL ROL A-011-2023</b>	Nº DOCUMENTO IT-TRANS-ROL11	EDICIÓN / REVISIÓN 1/1	12
		Fecha de emisión: 13-08-2024	Emitido por: Ecotecnos S.A.	



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.3: Desplazamiento horizontal del carbono en el fondo, para el CES Obstrucción.**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.4: Comportamiento temporal del carbono máximo en el lecho, para el CES Obstrucción.**

	<b>ANÁLISIS GENERAL DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE CES ASOCIADOS AL ROL A-011-2023</b>	Nº DOCUMENTO IT-TRANS-ROL11	EDICIÓN / REVISIÓN 1/1	13
		Fecha de emisión: 13-08-2024	Emitido por: Ecotecnos S.A.	

## 4 CONCLUSIONES

Al considerar la advección en cada uno de los CES que componen el Rol 11, se logró advertir que el depósito de carbono bajo la balsa jaula, se transportaría hasta 130 metros cuando se considera una ventana temporal de 10 días.

Sin perjuicio de lo anterior, mayores escalas de tiempo que se puedan simular, indicarán un desplazamiento del carbono depositado en el lecho.

A partir de los resultados obtenidos, se puede establecer que los depósitos de carbono bajo las balsas jaulas y que han sido previamente determinados a partir de modelación numérica en NewDepomod, se desplazarían horizontalmente debido principalmente debido a la advección.

Basado en lo anterior, resulta evidente que considerar que el depósito inicial de carbono se mantendría inmóvil en el tiempo, es un supuesto de poco asidero técnico, pues los mecanismos de transporte impulsados por la hidrodinámica lo movilizarían y redistribuirían en el lecho, disminuyendo consecuentemente su concentración.

**PhD. Ing. Matías Quezada Labra**  
Ecotecnos S.A.  
Viña del Mar, 13 de agosto de 2024

	<b>ANÁLISIS GENERAL DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE CES ASOCIADOS AL ROL A-011-2023</b>	Nº DOCUMENTO IT-TRANS-ROL11	EDICIÓN / REVISIÓN 1/1	14
		Fecha de emisión: 13-08-2024	Emitido por: Ecotecnos S.A.	

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Hargrave, B. T., & Phillips, G. A. (1989). Decay times of organic carbon in sedimented detritus in a macrotidal estuary. *Marine ecology progress series*. Oldendorf, 56(3), 271-279.
- Keeley, N. B., Crome, C. J., Goodwin, E. O., Gibbs, M. T., & Macleod, C. M. (2013). Predictive depositional modelling (DEPOMOD) of the interactive effect of current flow and resuspension on ecological impacts beneath salmon farms. *Aquaculture Environment Interactions*, 3(3), 275-291.