



ANEXO 6

REGLAS BÁSICAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS **HIDRODINÁMICOS** EN EL MODELO DEL COMPORTAMIENTO EN **CAMPO LEJANO**

V. 1.1

Este documento se ha obtenido como resultado del proyecto de I+D+i: **MEDVSA**.
"Desarrollo e implementación de una metodología para la reducción del impacto ambiental de los vertidos de salmuera procedentes de las plantas desaladoras"
045/RN08/03.3

MEDVSA es un proyecto de I+D+i (2008-2011) financiado por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.

Los trabajos han sido coordinados por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la UC y desarrollados en colaboración con el Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEDEX).

La Guía Metodológica desarrollada en el proyecto MEDVSA incluye la documentación:

- *GUÍA METODOLÓGICA*
- *Anexo 1. Fichas descriptivas de los modelos comerciales*
- *Anexo 2. Modelos de simulación BRiNE (MEDVSA).*
- *Anexo 3. Formulación basada en los resultados experimentales*
- *Anexo 4. Caracterización de clima marino*
- *Anexo 5. Reglas básicas para la implementación de modelos CFDs en la simulación de campo cercano*
- *Anexo 6. Reglas básicas para la implementación de modelos hidrodinámicos en la simulación de campo lejano*
- *Anexo 7. Medidas preventivas y Programa de Vigilancia Ambiental*

El presente documento constituye el **Anexo 6: Reglas básicas para la implementación de modelos hidrodinámicos en la simulación de campo lejano.**

Autor:

INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL

Personas de contacto:

Pilar Palomar (palomarp@unican.es)

Sonia Castanedo (castanedos@unican.es)

Iñigo J. Losada (losadai@unican.es)

ANEXO 6

1. INTRODUCCIÓN	1
2. COMPORTAMIENTO DEL VERTIDO DE SALMUERA EN LA REGIÓN DE CAMPO LEJANO ..	2
3. ESTADO DEL ARTE	3
4. PRINCIPALES HIPÓTESIS ADOPTADAS Y PARÁMETROS CRÍTICOS EN EL MODELADO DE LA PLUMA HIPERSALINA	6
4.1 APROXIMACIÓN DE BOUSSINESQ	6
4.2. HIPÓTESIS DE DISTRIBUCIÓN HIDROSTÁTICA DE PRESIONES	6
4.3. PARÁMETROS PARA EL MODELADO NUMÉRICO DE CORRIENTES HIPERSALINAS	7
4.3.1. Discretización espacial vertical	7
4.3.2. Representación de la mezcla turbulenta	8
5. MODELO HIDRODINÁMICO ROMS (REGIONAL OCEAN MODELLING SYSTEM)	10
6. ESQUEMA METODOLÓGICO Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	11
7. REFERENCIAS	13

1. INTRODUCCIÓN

El trabajo incluido en este Anexo ha sido realizado por el **Instituto de Hidráulica Ambiental**.

El modelado del comportamiento de la pluma hipersalina, característica del comportamiento del vertido de salmuera en la región de campo lejano, constituye uno de los grandes retos en el campo de simulación de vertido hiperdensos. Los modelos hidrodinámicos asumen la aproximación de Boussinesq (variaciones de densidad despreciables en todos los términos salvo en el de gravedad), y la hipótesis de distribución hidrostática de presiones (aceleraciones verticales despreciables frente a la aceleración de la gravedad). Estos modelos suelen utilizarse para representar fenómenos a escala oceánica, para los que estas hipótesis son aceptables.

Se ha considerado que este tipo de modelos pueden ser una buena alternativa para simular el comportamiento de corrientes de gravedad, que se desplazan sobre el fondo marino fuertemente afectadas por las condiciones en el medio receptor, llegando a alcanzar grandes distancias desde el punto de vertido, por su dilución muy pequeña. El estudio de corrientes hiperdensas mediante estos modelos se ha centrado tradicionalmente en fenómenos relacionados con la corriente termohalina a nivel oceanográfico, a una escala mucho mayor; existiendo pocas experiencias en el modelado de corrientes hipersalinas de menor escala y muy pequeño espesor, como es el caso de las plumas de salmuera.

La mayor parte de los software comerciales que simulan vertidos hiperdensos (CORMIX [1], VISUAL PLUMES [2] y VISJET [3]) se centran en el modelado del campo cercano, no existiendo herramientas sencillas disponibles para la simulación de la pluma hipersalina característica de campo lejano. Los modelos hidrodinámicos comerciales y científicos (ROMS [4], MIKE 3 [5], MOHID [6], DELFT 3D [7], entre otros) tampoco disponen de un esquema metodológico con recomendaciones para simulación de plumas salinas de salmuera, ni han presentado datos de validación de sus modelos para la simulación de este fenómeno. Esta carencia de herramientas sencillas y de metodología para la aplicación de los modelos numéricos a la simulación del campo lejano, ha provocado que se venga imponiendo como condicionante ambiental el cumplimiento de los límites críticos de salinidad en el propio campo cercano, ignorando la dilución adicional que experimenta el efluente salino en el campo lejano, hasta la zona marina a proteger.

Con base en lo anterior, el estudio e implementación de una metodología para la simulación, mediante modelos hidrodinámicos, de la pluma de salmuera en campo lejano es de gran interés y supondrá un importante paso en nuestra capacidad de predecir el comportamiento de este vertido y minimizar el impacto que pueda causar sobre ecosistemas marinos sensibles al exceso de salinidad. En este proyecto "MEDVSA", se han realizado los primeros avances en la implementación de estos modelos a la simulación de plumas hipersalinas, implementación que continuará en un futuro próximo, de acuerdo con lo expuesto en el apartado de Futuras líneas de investigación.

Los pasos realizados en el marco del proyecto MEDVSA son:

- **Estado del arte:** revisión detallada del estado del arte en relación con los estudios relacionados con el comportamiento de las corrientes de gravedad y su modelado (experimental o numérico), con especial atención a las particularidades del fenómeno y a las dificultades de simulación numérica.
- **Análisis de los requerimientos de los modelos hidrodinámicos** para simular las corrientes hipersalinas características del campo lejano de vertidos de salmuera, estableciendo los parámetros de modelado idóneos para conseguir una simulación rigurosa del fenómeno.
- **Análisis de las posibilidades del modelo hidrodinámico ROMS** (Regional Ocean Modelling System) [4], elegido para la implementación. Se trata de un modelo de código abierto, en continuo desarrollo por parte de la comunidad científica, que incluye un amplio abanico de opciones en cuanto a parámetros de modelado: resolución numérica de las ecuaciones de gobierno y discretización del espacio.
- **Establecimiento de la metodología** a continuar en el futuro para la implementación de estos modelos.

2. COMPORTAMIENTO DEL VERTIDO EN LA REGIÓN DE CAMPO LEJANO.

La **región de campo lejano** se sitúa alejada del punto de vertido, donde ya se ha producido el colapso de la turbulencia asociada al impulso inicial. En esta región, el efluente, que mantiene una mayor densidad que el fluido receptor, se hunde hacia el fondo y se desplaza sobre el mismo como una corriente de gravedad, siguiendo las líneas batimétricas e influenciada por las corrientes de fondo. El efluente salmuera forma en esa zona un flujo bicapa con el fluido receptor, situándose la salmuera en la capa inferior y el fluido receptor en la superior. La pycnoclina existente entre ambas capas dificulta la mezcla y dilución de la salmuera, que puede propagarse largas distancias con una escasa dilución, distancia que dependerá fundamentalmente de las condiciones en el medio receptor.

La pluma hipersalina se desplaza en la región de campo lejano esparciéndose lateralmente, aumentando su ancho mientras su espesor disminuye. La difusión molecular y turbulenta (debida a la rotura de las ondas Kelvin-Helmholtz, formadas en el límite de las capas de distinta densidad y velocidad) genera un lento pero continuo engrosamiento de la interfaz entre ambas capas, donde las salinidades son intermedias. Mientras el espesor de la capa interfaz aumenta, el espesor de la capa hiperdensa disminuye hasta desaparecer completamente. La capa interfaz continúa su dilución hasta confundirse con el medio receptor.

Los fenómenos en esta región se producen en escalas espaciales y temporales mucho más grandes que las propias del campo cercano, del orden de kilómetros y de horas, e incluso días, respectivamente.

La Figura A6-1 muestra el esquema de las regiones de campo cercano y lejano para el caso de un vertido mediante chorro inclinado y sumergido.

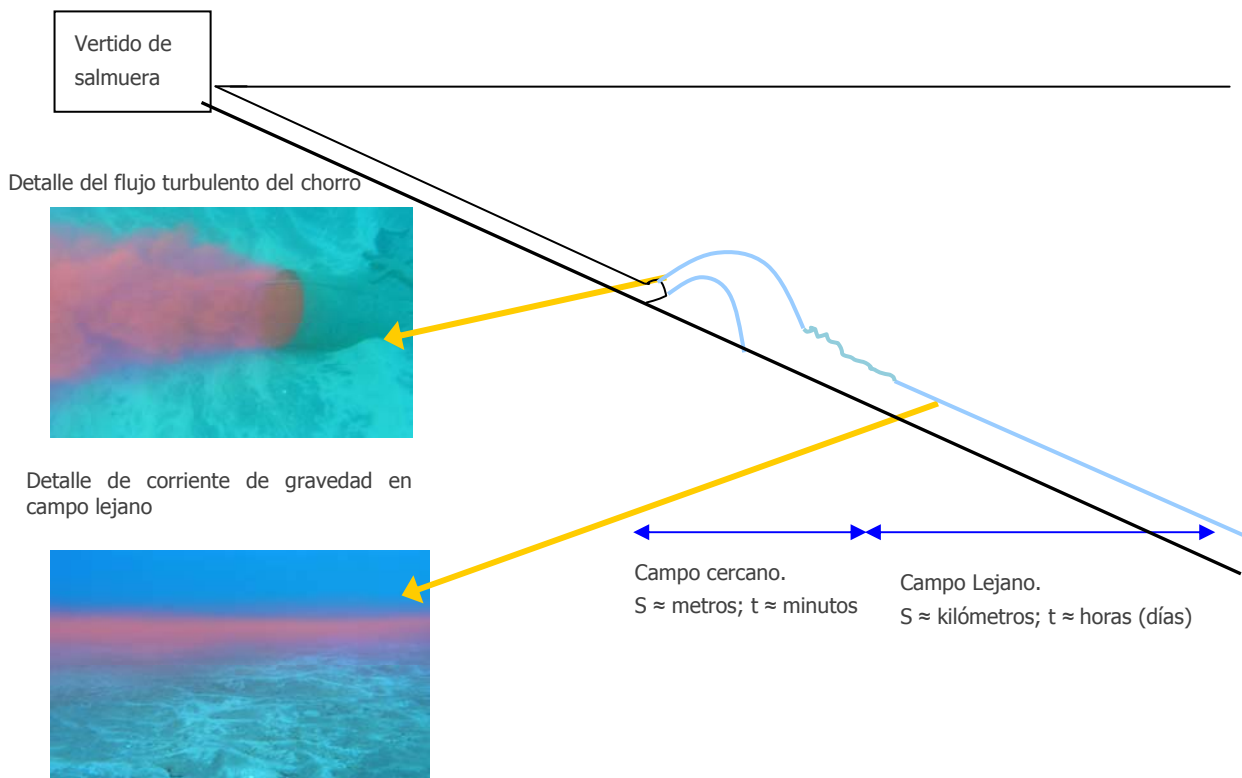


Figura A6-1. Esquema de comportamiento de un vertido de chorro denso sumergido e inclinado. Se observan las regiones de campo cercano y campo lejano.

3. ESTADO DEL ARTE

Las primeras investigaciones importantes relativas al estudio de corrientes de gravedad derivan de Ellison et al. (1959) [8], que plantean las ecuaciones integradas de una corriente bidimensional considerando los procesos de mezcla. Años más tarde, Haunstein et al. (1984) [9] estudian experimentalmente el comportamiento de una corriente de gravedad tridimensional, proponiendo un modelo simplificado de cálculo para simular la zona de hundimiento y la corriente de gravedad. Turner et al. (1986) [10] proponen una fórmula para la estimación de la incorporación de agua a la pluma ("entrainment"), en función del Número adimensional de Richardson y calibrada con datos experimentales.

Alavian, (1986) [11] formula un modelo de simulación de corriente de gravedad tridimensional basado en la integración de las ecuaciones, capaz de estimar la evolución del espesor y expansión lateral de la pluma en la zona de régimen normal (N° de Richardson constante), distinguiendo entre los comportamientos en régimen subcrítico y supercrítico. Alavian et al. (1992) [12] amplía su estudio a un medio estratificado. Raithby et al. (1988) [13] aplican y calibran un modelo hidrodinámico tridimensional que utiliza modelos de turbulencia más complejos.

Christodoulou et al. (1994) [14] simulan el comportamiento de corrientes tridimensionales en grandes tanques y obtienen fórmulas para el cálculo del "entrainment" (incorporación de agua a la pluma), velocidad, ancho y espesor de la corriente. García (1996) [15] plantea un modelo de ecuaciones integradas para simular una corriente de gravedad bidimensional, acompañado de una formulación para el cálculo del "entrainment". Tsihrintzis et al. (1996) [16] presentan fórmulas de cálculo de la expansión lateral de las corrientes de gravedad tridimensionales en función del tiempo (fenómeno no estacionario) previamente a que la pluma alcance el estado normal de N° de Richardson constante. Estudia analítica y experimentalmente corrientes laminares y turbulentas, pendiente suave y pronunciada y flujo subcrítico y supercrítico. Valida con resultados experimentales. En 1999, Bournet et al. [17] estudia estas corrientes aplicando un modelo de cierre de tipo .

Christodoulou (2001) [18] estudia experimentalmente corrientes de gravedad y elimina la variable tiempo de las fórmulas de Tsihrintzis et al (1996), obteniendo expresiones de expansión lateral de la pluma como una función de su avance longitudinal, para distintas pendientes en el fondo. Sung-UK Choi (2001) [19] estudia también experimentalmente corrientes en régimen turbulento y supercríticas, midiendo la evolución temporal de la velocidad y de la expansión lateral. Además, define las escalas de longitud para el cálculo de las principales variables en función de los flujos de caudal, momentum y flotabilidad. Ross et al, (2001) [20] presentan y calibran un modelo de ecuaciones integradas para un fondo con pendiente. Winton et al. (1998) [21] estudian el modelado de corrientes de gravedad mediante modelos de coordenada vertical cartesiana (Zz) investigando el grado de discretización vertical necesario para una representación fiel del fenómeno.

Özgökmen et al (2002) [22] realizan un análisis de sensibilidad considerando turbulencias de pequeña escala. Dallimore et al, (2003) [23] aplican un modelo de pluma "underflow" acoplado a un modelo hidrodinámico para simular la corriente de gravedad, comparando resultados numéricos con datos de campo.

Doneker et al (2004) [24] proponen un modelo de ecuaciones integradas para simulación de un vertido directo superficial y su evolución en campo lejano para corrientes de sedimentos, que es adaptable a plumas salinas. La formulación está integrada en el módulo D-CORMIX del software CORMIX. Bombardelli et al, (2004) [25] aplican modelos CFDs para simular corrientes de gravedad 2D y 3D, captando los fenómenos turbulentos de menor escala.

Kulis et al (2006) [26], [27] realizan un estudio interesante sobre la influencia de la resolución vertical (número de celdas y tamaño de las celdas) en los resultados del comportamiento de pluma salina obtenidos mediante un modelo hidrodinámico, estableciendo recomendaciones respecto a la discretización vertical del dominio. Fernández et al (2007) [28] comparan el valor del "entrainment" obtenido mediante distintas fórmulas analíticas propuestas en la literatura con los valores medidos *ad hoc* en una corriente de gravedad en un lago. Estudian el alcance del estado normal, los valores del coeficiente de rozamiento, así como los valores del flujo de flotabilidad. Oliver et al, (2008) [29] estudian la mezcla entre el efluente hipersalino y el fluido receptor a través de un modelo de cierre de los términos turbulentos .

Martin y García, (2008) [30] estudian experimentalmente la corriente de gravedad con técnicas ópticas no intrusivas PIV (Particle Image Velocimetry) y LIF (Laser Induced Fluorescence). Käempf, (2009) [31] aplica el modelo hidrodinámico COHERENS para simular el comportamiento de un vertido de salmuera, considerando diferentes escenarios climáticos.

Malcangio et al, (2010) [32] aplica el modelo hidrodinámico comercial MIKE 3 a la simulación de una pluma hipersalina, pero sin presentar datos de validación de resultados.

Del análisis bibliográfico realizado se concluye que: la mayor parte de los modelos numéricos utilizados para simular corrientes de gravedad se basan en formulaciones que integran las ecuaciones de gobierno en la sección transversal de la pluma. Los escasos estudios que se han localizado relativos a la aplicación de modelos hidrodinámicos para simular plumas hipersalinas no han sido validados ni han sometido sus resultados a un análisis de sensibilidad a los parámetros de modelado.

La Tabla A6-1 sintetiza las características y parámetros de modelado utilizados en los estudios publicados de simulación de corriente de gravedad mediante modelos hidrodinámicos.

(*1) La cantidad de movimiento se difunde 10 veces más rápido que la temperatura y salinidad.

	ECUACIONES	RESOLUCIÓN ECUACIONES	RESOLUCIÓN ESPACIAL	RESOLUCIÓN TEMPORAL	MODELOS DE CIERRE UTILIZADOS	FUENTE DE VERTIDO	FORZAMIENTO	CONDICIONES CONTORNO E INICIALES	OTROS
MIKE 3 [30]	RANS Modelo hidrostático	Diferencias finitas	Coordenadas cartesianas $\Delta x = \Delta y = 30\text{m}$ $\Delta z = 2\text{m}$ (constante)	Condición estabilidad de Courant	Términos turbulentos: Eddy viscosity $= 0.5\text{m}^2/\text{s}$ Términos dispersivos: Dispersión de temperatura y salinidad proporcional a Eddy viscosity. Escriba aquí la ecuación. $Vt = 10 = n^\circ$ Schmidt (*1)	Fuente puntual en el centro de una celda y 3 capas. (se distribuye uniforme en celda)	Viento homogéneo en toda la malla	Temperatura y salinidad homogénea en el medio receptor.	No presentan validación de resultados
COHERENS [29]	RANS Modelo hidrostático	Volúmenes finitos. Esquema TVD de baja difusión (para calcular la advección de anomalías en salinidad)	Coordenadas cartesianas $\Delta x = \Delta y = 50\text{m}$ 20 capas sigma (σ). Últimos 2m: 10 capas sigma de 20cm	Condición de Courant. $\Delta t = 0.75\text{sg}$ 3 días de simulación	Iguala los valores de los términos de difusividad y viscosidad, y distingue: - Horizontal: Eddy $= 0.5\text{m}^2/\text{s}$ (viscosity y diffusivity) - Vertical: Modelo de Pacanowsky y Philander (basado en Richardson)	Fuente lineal de $150 \times 50 \times 3\text{m}^3$ (84 difusores). Condición de flujo euleriano —	Marea	Temperatura y salinidad homogénea en el medio receptor. Se simulan corrientes en el fondo. Mareas en contornos abiertos	
Environmental Fluid Dynamics Computer code (EFCD) [33]) [25]	RANS Modelo hidrostático		Coordenadas cartesianas $\Delta x = \Delta y = 50\text{m}$ Sigma capas (σ). Se varía el número de capas sigma y su espesor vertical, y se analizan los resultados		Términos turbulentos: Modelo de Mellor-Yamada 2.5 [34] modificado por Galperin, 1998 [35]			Modela una corriente de gravedad sencilla en un fondo con pendiente. Estudia la influencia que la discretización vertical del dominio tiene en la hidrodinámica y en la mezcla del fluido.	No presentan validación con datos experimentales

Tabla A6-1. Opciones de modelado en estudios previos de simulación de corriente de gravedad mediante modelos hidrodinámicos.

4. PRINCIPALES HIPÓTESIS ADOPTADAS Y PARÁMETROS CRÍTICOS EN EL MODELADO DE LA PLUMA HIPERSALINA.

4.1 Aproximación de Boussinesq.

Para flujos que cumplan unas determinadas condiciones, Boussinesq (1903) sugirió que se pueden despreciar las variaciones de densidad en el fluido excepto en el término de gravedad donde aparece el producto $\rho_0 \beta \Delta T$.

Un primer caso en el que no se podría aplicar esta simplificación, sería un flujo estacionario con número de Mach grande. El número de Mach se define como u/c , donde u es una velocidad típica en el fluido y c es la velocidad del sonido en el medio. En números de Mach grandes los efectos de compresibilidad no son despreciables debido a que grandes cambios de presión causan grandes cambios en la densidad. Sin embargo, este efecto deja de ser importante para números de Mach menores de 0.3. Para agua $c=1470$ m/s y la velocidad u es mucho menor, por lo que en líquidos esta hipótesis es aceptable.

Cuando la escala vertical del flujo es tan grande que las variaciones de la presión hidrostática causan grandes variaciones en la densidad, se tiene una segunda situación en la cual la compresibilidad es importante. Por lo tanto, la aproximación de Boussinesq requiere que la escala vertical del flujo, L , cumpla:

Por lo tanto, la utilización de esta aproximación en el modelado de la corriente de gravedad, está justificada, dado que en los casos que se van a estudiar con el modelo 3D se cumple que $L \ll \lambda$ y $u \ll c$.

4.2 Hipótesis de distribución hidrostática de presiones.

La característica más relevante del flujo que se va a simular es el diferente orden de magnitud de sus dimensiones horizontales y verticales: su extensión horizontal suele ser de varios kilómetros mientras que su profundidad es del orden de decenas de metros. Esto se traduce en que los procesos de generación de cantidad de movimiento y de transporte se realicen a una escala diferente en las direcciones vertical y horizontal. Por lo tanto, la circulación en estos dominios es predominantemente horizontal lo que supone que las aceleraciones verticales son despreciables frente a la aceleración de la gravedad. Esto conduce a la hipótesis de distribución hidrostática de presiones, cuya validez ha sido probada incluso en el caso de flujos propagándose sobre fondos con apreciables irregularidades en vertical [36].

4.3 Parámetros para el modelado numérico de corrientes hipersalinas

Analizado el comportamiento del fenómeno y su modelado numérico, y revisada la bibliografía existente respecto a la simulación con modelos hidrodinámicos, se han seleccionado los siguientes parámetros de modelado como los críticos ó más influyentes en los resultados de la simulación de corrientes de gravedad de salmuera mediante modelos hidrodinámicos:

- Simulación de la fuente de vertido.
- Representación de la mezcla turbulenta.
- Discretización temporal: estabilidad del N^o de Courant.
- Discretización espacial vertical y horizontal del dominio de cálculo, y en la propia corriente de gravedad.

En principio, el análisis de sensibilidad del modelo se centrará en varias estos parámetros y comparar los resultados numéricos obtenidos con datos experimentales o con los resultados derivados de modelos analíticos y fórmulas semiempíricas.

A continuación se desarrollan con más detalle los aspectos anteriores, exponiendo los avances a los que la comunidad científica ha llegado en este campo.

4.3.1 *Discretización espacial vertical.*

Uno de las principales dificultades en el modelado de la pluma hipersalina y de la zona interfaz entre las capas es el hecho de que si el modelo es muy difusivo o bien si la discretización en la pluma no es suficiente, los resultados del modelado incluyen errores de difusión numérica muy significativos, lo que implica un falseado de los resultados.

De acuerdo con lo anterior, la discretización del dominio vertical en la corriente de gravedad es otra cuestión fundamental de gran influencia en la hidrodinámica de la pluma y en los procesos de mezcla entre ambas capas. Existen diferentes tipos de coordenadas verticales para esta discretización, entre las que destacan: coordenadas cartesianas "Zz" y coordenadas sigma ()

El fenómeno a representar es por tanto una corriente de gravedad con un espesor vertical muy pequeño, que se desplaza siguiendo la línea de máxima pendiente, muy afectada por las corrientes de fondo, en un dominio con una profundidad en general elevada (mucho mayor que el espesor de la pluma), generándose un flujo bicapa con una pycnoclina muy marcada inicialmente, lo que dificulta el mezclado.

La discretización vertical del espacio ha de ser tal que exista suficiente resolución en el fondo, de modo que la corriente de gravedad esté bien representada y también la zona de interfaz entre capas, que va aumentando su grosor por la mezcla entre capas. Si la resolución no es suficiente, los errores numéricos en la resolución de esta zona pueden llegar a ser del mismo orden de magnitud que la mezcla real entre capas [25], invalidando la fiabilidad de los resultados.

Entre los esquemas de discretización vertical, la **coordenada cartesiana (Zz)** ha sido hasta ahora la más utilizada. De estudios anteriores de modelado de la corriente termohalina [21, 23] se concluye:

- Se observan errores numéricos debidos al "entrainment" convectivo, que tienen como causa la mezcla artificial en el contorno inferior del efluente del escalón superior con el fluido del medio receptor del escalón inferior. Esta mezcla artificial introduce una dilución adicional que falsea los resultados del modelado numérico.
- Estos errores, que son de truncamiento, se reducen aumentando la resolución horizontal y vertical en la corriente de gravedad, representando así de con mayor rigor la capa límite viscosa y consiguiendo que los resultados tiendan a convergen independientemente de la resolución. En [21] se consigue esta convergencia para las condiciones:
 - o Varias capas Zz en la discretización vertical de la corriente de gravedad.
 - o Resolución horizontal que cumpla la relación: $\Delta x \leq \frac{H}{\tan \theta}$, siendo θ , la pendiente del fondo.

Respecto al modelado de corrientes de gravedad mediante **coordenada vertical de tipo sigma**, se han realizado estudios específicos [26] modificando la resolución vertical y comparando los valores hidrodinámicos de la pluma (a través del N° de Froude densimétrico) y la incorporación de agua a la pluma por mezcla (a través del término de "entrainment") que se obtienen del modelado numérico y mediante la aplicación de la fórmula expuesta en [37], considerando los resultados con y sin modelo de turbulencia incorporado, en este caso un modelo de Mellor-Yamada nivel 25 [34]). Del estudio se concluye:

- Si la resolución vertical no es suficiente, los errores numéricos se traducen en un falso "entrainment" del mismo orden de magnitud que el "entrainment" real.
- El número mínimo de celdas verticales para representar correctamente la corriente de gravedad es de aproximadamente 20 celdas. Con esta discretización, se obtiene un valor del número de Froude densimétrico no dependiente del número de celdas, y el "entrainmet" real es de un orden de magnitud superior al "entrainment" numérico.

- Debe cumplirse la relación $\frac{N^2 H^3}{\rho g \Delta \rho} > 1$ (siendo H el espesor de las capas que representan la corriente de gravedad y $\Delta \rho$ el calado total del fondo). Cuando esta condición no se cumple, se observa que el modelo no es capaz de representar correctamente los perfiles transversales de velocidad y salinidad (estudios realizados para una rango $\frac{N^2 H^3}{\rho g \Delta \rho} < 1$).

En [27] se lleva a cabo un estudio similar, midiendo los contornos de flotabilidad y la energía necesaria para conseguir la mezcla en la columna de agua. Las conclusiones obtenidas con respecto a la discretización de la coordenada vertical son similares a las anteriores.

Dado que estas reglas aplicadas a escala oceanográfica llevan a resoluciones prohibitivas desde el punto de vista computacional, los autores [25] proponen como alternativa la parametrización del fenómeno, modelado la corriente con un modelo 2D "underflow" (de corriente submarina) acoplado a un modelo oceanográfico 3D de coordenada Z.

4.3.2 Representación de la mezcla turbulenta.

En un modelo numérico, la simulación de la mezcla turbulenta depende de varios factores. Por un lado, depende de las ecuaciones de cierre turbulento que se utilice (eddy constante, una ecuación, dos ecuaciones, etc.) y, por otro, temas como el método de discretización de las ecuaciones (diferencias finitas, elementos finitos, volúmenes finitos), el esquema numérico para resolución de las mismas (explícito, implícito, centrado, upwind, etc) y la discretización adoptada para la malla de cálculo, añaden una difusión numérica que, en algunas ocasiones, puede ser mayor que la difusión real que se quiera reproducir.

El modelado de la pluma hipersalina requiere un modelo poco difusivo numéricamente, para garantizar que la difusión numérica en zonas de grandes gradientes de concentración sea de al menos un orden de magnitud menor que la difusión real del efluente.

En cuanto al modelo de cierre turbulento, su elección para simular el comportamiento y evolución de los términos turbulentos derivados de la descomposición de Reynolds de las variables instantáneas, es también muy importante en la determinación del comportamiento de la corriente de gravedad.

Los modelos de cierre existentes se pueden agrupar en dos categorías: aquellos que emplean el concepto de viscosidad de remolino (en adelante "eddy viscosity") y los que no lo utilizan.

El concepto de *eddy viscosity*, (Boussinesq, 1877) asume que, en analogía con las tensiones viscosas en flujo laminar, las tensiones turbulentas son proporcionales al gradiente de la velocidad media. El factor de proporcionalidad o eddy viscosity se convierte, por tanto, en la incógnita a resolver y ha dado lugar a numerosos tipos de modelos que van desde los más sencillos que proponen un eddy constante (modelos de cero ecuaciones) a los más complicados que utilizan uno o dos ecuaciones diferenciales de transporte, como por ejemplo el conocido modelo $k-\epsilon$.

► Modelos de cero ecuaciones:

Para corrientes de gravedad, relacionan el "entrainment" con el número adimensional de Richardson y otros parámetros.

Fernández et al. (2007) [28] hace una exhaustiva revisión de las fórmulas analíticas existentes en la literatura para el cálculo del "entrainment". Para estimar su fiabilidad, alcance y rigor de las distintas fórmulas propuestas en la simulación de la corriente de gravedad, compara los resultados obtenidos analíticamente aplicando estas fórmulas, con datos experimentales y datos de campo. Entre las principales conclusiones del artículo, se deriva que: para un flujo dominado por el "entrainment" turbulento, para números de Richardson pequeños, las fuerzas de fricción tienen escasa relevancia y pueden ser despreciadas frente a los esfuerzos turbulentos. Sin embargo, para valores de N° de Richardson muy grandes ($Ri > 10$) las fuerzas de fricción son significativas. En este último caso es necesario considerar fórmulas de "entrainment" que consideren el efecto del rozamiento con el fondo.

La Figura A6-2 muestra la gráfica de evolución del valor de "entrainment" con el N° de Richardson aplicando distintas fórmulas existentes en la literatura:

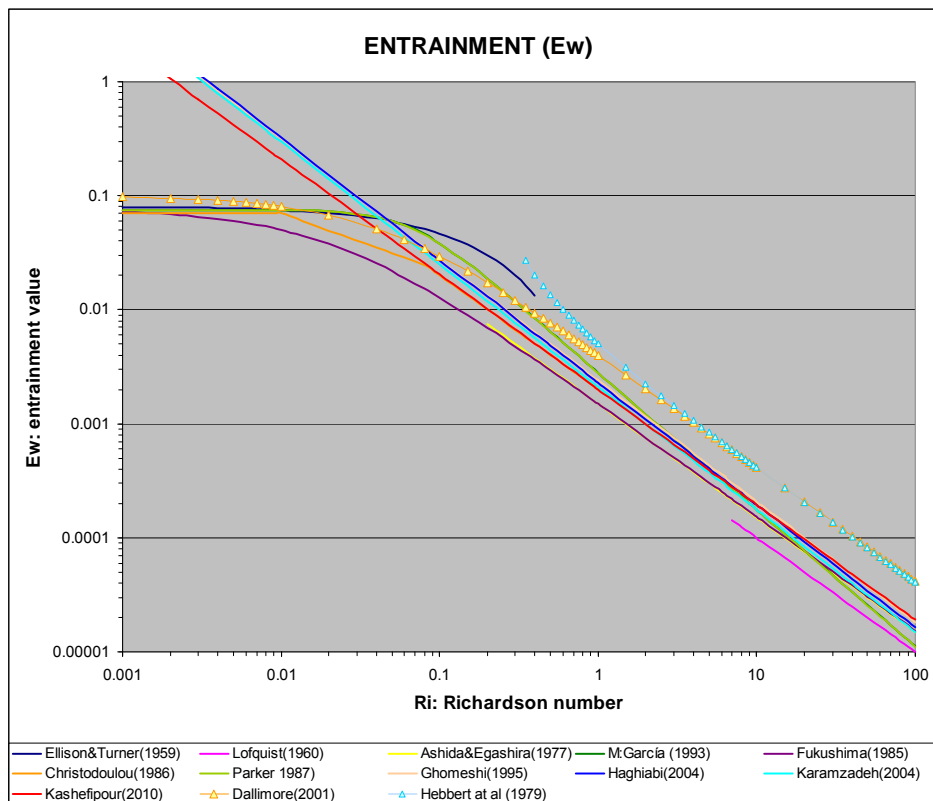


Figura A6-2. Gráfica de evolución del valor del entrainment en función del N° de Richardson, para distintas formulaciones analíticas propuestas en la literatura.

► **Modelos de una o dos ecuaciones**, utilizan una o dos ecuaciones diferenciales para simular la generación, el transporte y la disipación de los procesos turbulentos. Por ejemplo, en los modelos de las ecuaciones $k-\epsilon$, la primera ecuación simula la tasa de energía cinética o turbulenta por unidad de masa: K , mientras que la segunda ecuación simula la tasa de disipación de energía: ϵ . En otros modelos de este tipo se utiliza la variable longitud de mezcla, l .

Estudios previos [36] realizados para analizar la sensibilidad del modelo ROMS al uso de distintos tipos de modelos de cierre de dos ecuaciones para los términos turbulentos, aplicando diferentes modelos de turbulencia: Mellor-Yamada 2.5, $k-\epsilon$, y $k-\omega$ (modelo genérico programado en ROMS que engloba todos), han derivado en las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos con los modelos $k-\epsilon$, $k-\omega$, y $k-\omega$ son similares entre sí. El modelo (MY-2.5), sin embargo, lleva a resultados bastante distintos, que dependen de la wall-proximity function. La elección de este parámetro es determinante en la simulación del proceso de mezcla.
- El valor original del parámetro de flotabilidad σ_{t0} lleva a sobreestimaciones en la dilución, por lo que se recomiendan valores de $\sigma_{t0} = 0.45$.

Por último, existe el segundo grupo de modelos de turbulencia que, sin utilizar el concepto de *Eddy viscosity*, resuelve directamente las ecuaciones de transporte para las tensiones de Reynolds. Se trata de **modelos más complejos (LES, DNS)**, que requieren un tiempo computacional mucho mayor.

5. MODELO HIDRODINÁMICO ROMS (Regional Ocean Modelling System)

Para modelar el comportamiento en campo lejano del vertido de salmuera se ha optado por el modelo ROMS (Regional Ocean Modeling System) [4]. Se trata de un modelo numérico tridimensional de código abierto y carácter gratuito, en el que se resuelven las ecuaciones de Navier- Stokes, la ecuación de continuidad y la ecuación de transporte de sustancias. El algoritmo temporal que utiliza el ROMS se basa en el método split- explicit, en el cual el modo barotrópico y el baroclínico son calculados y acoplados de forma especial. Tanto el modo 2D como el 3D son calculados mediante un esquema predictor (leap- frog)- corrector de cuarto orden, de gran robustez y estabilidad. El modelo ROMS ofrece una gran cantidad de posibilidades respecto a la discretización del espacio, los modelos de turbulencia, la resolución de las ecuaciones diferenciales, entre otros.

Los algoritmos computacionales que comprende ROMS son los Kernel no lineales y también los linealmente tangentes y los Kernel contiguos y plataformas. ROMS incorpora algoritmos físicos y numéricos precisos y eficientes y varios modelos de acoplamiento para aplicaciones de distintos fenómenos. Incluye varios niveles de anidación y de mallas compuestas.

Para economizar el tiempo computacional, las ecuaciones hidrostáticas primitivas de momentum se resuelven utilizando un **esquema de resolución** de paso de tiempo ("time stepping") split-explicit que necesita un tratamiento especial y acoplamiento entre los modos barotrópicos (rápido) y baroclínico (lento). Se realizan un número finito de pasos de tiempo barotrópicos (2D), dentro de cada paso baroclínico (3D), con el fin de resolver las ecuaciones de superficie libre y las ecuaciones de momentum integradas en la vertical. Para evitar los errores de difusión asociados al solapamiento de frecuencias, resuelto en los pasos barotrópicos pero no resuelto en los pasos baroclínicos, los campos baroclínicos se promedian en el tiempo antes de que remplacen a los valores que se han obtenido en los más largos pasos baroclínicos. Se utiliza un filtro de tiempo de forma cosenoidal, centrado en el nuevo nivel de tiempo, para el promediado de los campos barotrópicos. Además, el paso de tiempo dividido ("separated time stepping") se fuerza para que mantenga de forma exacta tanto la conservación de volumen como la consistencia de las propiedades conservativas, que son necesarias para las ecuaciones de transporte. Actualmente, las ecuaciones 2D y 3D son discretizadas en el tiempo utilizando un algoritmo de paso de tiempo de tercer orden predictor ("Leap-Frog") y corrector (Adams-Molton), algoritmo muy robusto y estable. La incrementada estabilidad del esquema permite pasos de tiempo más largos, con un factor de aproximadamente cuatro, que compensa con creces el coste computacional del algoritmo predictor-corrector.

En la **coordenada vertical**, las ecuaciones originales se discretizan mediante una variables topográfica utilizando coordenadas extensibles (elásticas) adaptables al terreno ("terrain following"). Las coordenadas extensibles permiten aumentar la resolución en las áreas de interés, tales como la termoclina y las capas de contorno sobre el fondo. El programa por defecto utiliza diferencias finitas de segundo orden, centradas, en una malla vertical escalonada, aunque incorpora también sistemas de mayor orden mediante una reconstrucción curva parabólica, y conservativa de las derivadas verticales. Este tipo de modelos presenta una gran sensibilidad a la topografía, que se traduce en errores en el gradiente de presión. Estos errores aparecen debido a la descomposición del término de gradiente de presión en la componente sigma y a una corrección hidrostática. El algoritmo numérico en ROMS se diseña para reducir tales errores.

En las **componentes horizontales**, las ecuaciones primitivas se resuelven utilizando coordenadas ortogonales curvilíneas que se ajustan a los contornos, en una malla escalonada C Arakawa. Las fórmulas generales de la malla curvilínea incluye coordenadas cartesianas y esféricas. Los contornos costeros pueden también definirse como una malla finita discretizada, mediante la máscara tierra/mar. Como en la coordenada vertical, en la horizontal el modelo resuelve mediante diferencias finitas de segundo orden, centradas. Sin embargo, el código permite implementar mayores órdenes de forma sencilla.

6. ESQUEMA METODOLÓGICO Y LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.

La investigación para la implementación del modelo hidrodinámico ROMS en la simulación de la pluma hipersalina propia del campo lejano seguirá el esquema metodológico expuesto en la Figura A6-3.

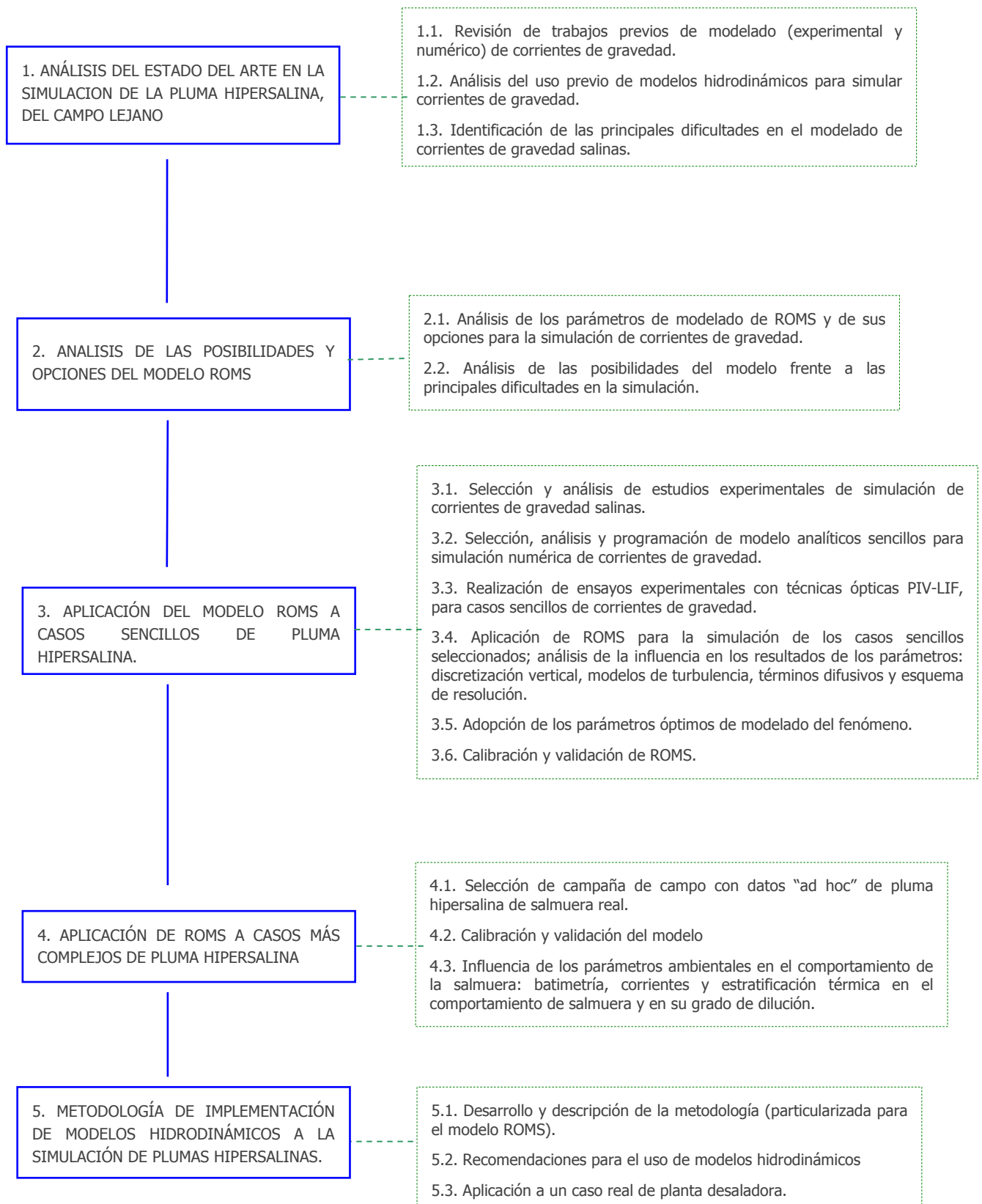


Figura A6-3. Esquema metodológico para la implementación de modelos hidrodinámicos a la simulación del campo lejano de vertidos de salmuera.

En el marco del proyecto MEDVSA se han completado los pasos 1 y 2, detectando que los parámetros críticos del modelado de la pluma hipersalina mediante modelos hidrodinámicos son: la resolución espacial horizontal y vertical, el modelo de turbulencia y la necesidad de una baja la difusividad en el modelo. Por otra parte, se ha verificado que ROMS es un modelo suficientemente robusto y que cuenta con todas las opciones de modelado necesarias para simular de modo riguroso el comportamiento de la pluma hipersalina de salmuera en el campo lejano. Así mismo, se han completado los pasos 3.1 y 3.2., realizando una búsqueda bibliográfica de formulaciones analíticas y ensayos experimentales para el modelado de este fenómenos, y programando los modelos básicos de campo lejano: brIHne-PLUME2D y brIHne-PLUME 3D (ver Anejo 2), que consideran las características del efluente de la pluma y del fluido receptor, la pendiente y la rugosidad del fondo.

La continuidad de la investigación en la implementación del modelo ROMS requiere necesariamente de la realización de ensayos experimentales diseñados al efecto, para poder calibrar y validar el modelo y elegir los parámetros de modelado más adecuados en la simulación de la pluma hipersalina. Considerando esta necesidad, se diseñarán ensayos en modelo físico mediante técnicas ópticas no intrusiva PIV (Particle Image Velocimetry) y LIF (Laser Induced Fluorescence), que permitan caracterizar en detalle el flujo, mediante la obtención de los campos instantáneos de velocidad y concentración en el flujo. La ejecución de estos ensayos, de alto grado de complejidad, excede el ámbito del proyecto MEDVSA. Sin embargo, la continuidad de la línea de investigación para la implementación de modelos hidrodinámicos queda garantizada gracias al proyecto de investigación básica, del Plan Nacional de I+D+i, 2011-2013: SALTYCOR: "Análisis (experimental y numérico) de los procesos físicos en campo cercano y lejano para la optimización de vertidos hiperdensos de salmuera". Este proyecto ha sido concedido al Instituto de Hidráulica Ambiental junto al Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA), de la Universidad de La Coruña. Entre las tareas del proyecto se incluyen: la ejecución de ensayos con técnicas PIV-LIF, el estudio detallado de los procesos físicos y de las ecuaciones que gobiernan el fenómeno; el estudio de la afección de la pendiente, de las corrientes y del oleaje en el comportamiento de la pluma hipersalina; la comprobación de las hipótesis simplificativas generalmente asumidas por los modelos básicos; la re-calibración de los modelos brIHne (MEDVSA) para un mejor ajuste con los datos experimentales, y, fundamentalmente, la continuación de la línea de investigación iniciada para la implementación del modelo avanzado ROMS.

7. REFERENCIAS.

- [1] R.L. Doneker; G.H. Jirka. "CORMIX-GI systems for mixing zone analysis of brine wastewater disposal". Desalination, Elsevier, 2001, vol. 139, pp. 263–274.
- [2] W.E. Frick. (2004). "Visual Plumes mixing zone modelling software". Environmental & Modelling Software, Elsevier, vol. 19, pp. 645-654.
- [3] VISJET 2.0 User Manual . The University of Hong Kong. Principal Investigators: Prof. JHW Lee and Prof. WP Wang. 2000.
- [4] A. F. Shchepetkin; J.C. McWilliams (2004). "The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model". Ocean Modelling, vol. 9, pp. 347-404.
- [5] MIKE3
- [6] MOHID: Water modeling system. Marine and Environmental Technology Center. MARETEC.
- [7] DELFT 3D
- [8] T.H. Ellison; J. S. Turner, J.S (1959). "Turbulent entrainment in stratified flows". Journal of Fluid Mechanics, vol. 6, part 3, pp. 429-448.
- [9] W. Hauenstein; T. H. Dracos (1984). "Investigation of plunging currents lacustres generated by inflows". Journal of Hydraulic Research, vol. 22, No 3.
- [10] J. S. Turner (1986). "Turbulent entrainment: the development of the entrainment assumption, and its application to geophysical flows". Journal of fluid Mechanics, vol. 173, pp.431-471
- [11] V. Alavian (1986). "Behaviour of density current on an incline", Journal of Hydraulic Engineering, vol. 112, No 1, pp. 27-42.
- [12] V. Alavian; G.H. Jirka; R. A. Denton; M. C. Jhonson; G.C. Stefan (1992). "Density currents Entering lakes and reservoirs". Journal of Hydraulic Engineering, vol. 118, No 11, pp. 1464-1489.
- [13] G. D. Raithby; R. V. Elliott; B. R. Hutchinson (1988). "Prediction of three-dimensional thermal Discharge flows". Journal of Hydraulic Division, ASCE 114(7), pp. 720–737
- [14] G.C. Christodoulou; E. Tzachou (1997). "Experiments on 3-D Turbulent density currents". 4th Annual Int. Symp. on Stratified Flows, Grenoble, France.
- [15] M. H. García (1996). "Environmental Hydrodynamics", Argentina: Publications Center, Universidad Nacional del Litoral.
- [16] V. A. Tsihrintzis; V. Alavian (1996). "Spreading of three-dimensional inclined gravity plumes". Journal of Hydraulic Research
Vol. 34, pp. 695-711.
- [17] P. E. Bournet; D. Dartus, B. Tassin; B. VinÇon-Leite (1999). "Numerical investigation of plunging density current". Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 125, No. 6, pp. 584-594.
- [18] G. C. Christodoulou (2001). "Lateral growth of 3-D density currents". Proceedings XXIX IAHR Congress, Beijing, China, Sept. 16-21, pp. 29-34.
- [19] SUNG-UK CHOI; M. H. Garcia (2001). "Spreading of gravity currents on an incline". Coastal Engineering Journal (CEJ), vol. 43, Issue: 4, pp. 221-237.

- [20] A. Ross, F. Linden, S.B. Dalziel (2001). "A study of three-dimensional gravity currents on a uniform slope". *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 453, pp. 239-261.
- [21] M. Winton; R. Hallberg; a. Gnanadesikan (1998). "simulation of density-driven frictional downslope flow in z-coordinate ocean models". *Journal of Physical Oceanography*, vol. 128, No11, pp. 2163-2174.
- [22] T.M. Özgökmen, E. P. Chassignet, (2002). "Dynamics of two-dimensional turbulent bottom gravity currents". *Journal of Physical Oceanography*, vol. 32/5, pp. 1460-1478.
- [23] C. J. Dallimore, B.R. Hodges, J. Imberger (2003). "Coupled an underflow model to a three dimensional Hydrodynamical models". *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 129, n°10, pp. 748-757.
- [24] R.L. Doneker, G. H. Jirka. (1998) "D-CORMIX: A Decision Support System for Hydrodynamic Mixing zone Analysis of Continuous Dredge Disposal Sediment Plumes", *Proc. Of the 25th Annual Conference on Water Resources Planning and Management*, ASCE.
- [25] F. A. Bombardelli, M. I. Cantero, G. C. Buscaglia, M. H. García. (2004). "Comparative study of convergence of CFD commercial codes when simulating dense underflows". *Mecánica computacional*, vol. 23, pp.1187 -1199.
- [26] P. Kulis, B. Hodges (2006). "Modeling gravity current in shallow bays using a sigma coordinate model". *The 7th International Conference on HYdroscience ann Enginnering*, Sep 10-13, 2006.
- [27] P. Kulis; B.R. Hodges. "Improved Techniques for gravity current modeling". *Proceeding of McMat 2005: 2005 Joint ASME/ASCE/SES Conference on Mechanics and Materials*. June 1-3, Baton Rouge, Louisiana, USA.
- [28] R. L. Fernandez, J. Imberger (2006). "Bed roughness induced entrainment in a high Richardson number underflow". *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 44 (6), pp. 725-738
- [29] C. J. Oliver, M. J. Davidson, MR. I. Nokes (2008). "K-ε Predictions of the initial mixing of desalination discharges". *Environmental Fluid Mechanics*, 8: pp.617-625
- [30] J. E. Martin, M. H. García (2008). "Combined PIV/LIF measurements of a steady density current front". *Experimental Fluids*, vol. 46, pp. 265-276.
- [31] J. Käempf (2009). "Impacts of blending on dilution of negatively buoyant brine discharge in a shallow tidal sea". *Marine Pollution Bulletin*, vol. 58, pp. 1032-1038.
- [32] D. Malcangio, A. F. Petrillo (2010). "Modeling of brine outfall at the planning stage of desalination plants". *DESALINATION*, vol 254, pp. 114-125.
- [33] J. KiHamrick (1992). "A Three-dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and computational aspects". *The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Sciences. Journal of Hydraulic Division, ASCE*, vol. 105, No 5, pp. 533-545.
- [34] G.L. Mellor; T. Yamada (1992). "Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems". *Reviews of Geophysics*, Vol. 20, No. 4, pp. 854-875.
- [35] B. Galperin; L. H. Kantha; S. Hassid; A. Rosati. (1988). "A Quasi-Equilibrium Turbulent Kinetic Energy Model for Geophysical Flows". *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 45, No. 1, pp. 55-62.
- [36] C.G. Koutitas; B. O'Connor. (2005). "Simulations of Chesapeake Bay estuary: Sensitivity to turbulence mixing parameterizations and comparison with observations". *Journal of Geophysical Research*, vol. 110.
- [37] C. J. Dallimore, J. Imberger; T. Ishikawa. (2001). "Entrainment and turbulence in Saline Underflow in Lake Ogawara". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 219, No 11, pp. 937-948.