

Ficha 5.

MODELO JETLAG DEL SOFTWARE VISJET

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.**

La Guía Metodológica desarrollada en MEDVSA incluye los documentos:

- *GUÍA METODOLÓGICA*
- *Anexo 1. Fichas descriptivas de los modelos comerciales*
- *Anexo 2. Modelos de simulación brIHne.*
- *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 es parte del **Anexo 1: Fichas descriptivas de los modelos comerciales**

Autores:

INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL (IH CANTABRIA)

CENTRO DE ESTUDIOS DE PUERTOS Y COSTAS (CEDEX)

Programa JETLAG de VISJET.

Vertidos mediante chorros individuales y múltiples de efluentes de flotabilidad negativa (salmuera)

1. INTRODUCCIÓN. AUTORES. DESARROLLO.

El modelo JETLAG, LAGrangian JET model, se incluye entre las herramientas del paquete de programas VISJET (*"Innovative Modeling and Visualization Technology for Environmental Impact Assessment"*), cuyos principales investigadores son los profesores JHW Lee y WP Wang, de la Universidad de Hong Kong.

JetLag [1] simula el vertido mediante chorros sumergidos individuales o múltiples, de efluentes de flotabilidad positiva, **negativa** y neutra, teniendo en cuenta las condiciones en el medio receptor.

La Ficha incluye, enfocadas a efluentes de flotabilidad negativa: una descripción de la base teórica de JetLag, sus hipótesis simplificadoras, los componentes y opciones disponibles del modelo y posibilidades y limitaciones del modelo. Se realiza un análisis de sensibilidad a los datos de entrada, una revisión de los datos de calibración y validación presentados por los autores del modelo, así como una nueva validación con estudios experimentales recientes. Como conclusión a todo lo anterior, se proponen una serie de recomendaciones a los usuarios, respecto al modelado y uso y manejo del programa. Entre los anexos, se incluye un ejemplo de aplicación real a un vertido de salmuera y una tabla de valores realistas y recomendados para los datos de entrada al programa.

Una síntesis del presente análisis del modelo JetLag y de su validación con datos experimentales, puede encontrarse en Palomar et al. (2012), [2] y [3].

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO. BASE TEÓRICA

JetLag es un modelo lagrangiano tridimensional que no resuelve estrictamente las ecuaciones diferenciales de movimiento y transporte sino que realiza una simulación de los procesos físicos clave expresándolos mediante ecuaciones gobernantes. El modelo descompone el chorro tridimensional continuo en una sucesión de rebanadas o penachos dispuestos secuencialmente que, siguiendo la trayectoria del chorro inclinado, van incrementando su masa por incorporación de agua del medio receptor ("entrainment"), debido a la velocidad de salida del chorro y a la presencia de la corriente ambiental.

2.1. Variables axiales.

La Figura 1 muestra el chorro individual considerado por el modelo JetLag:

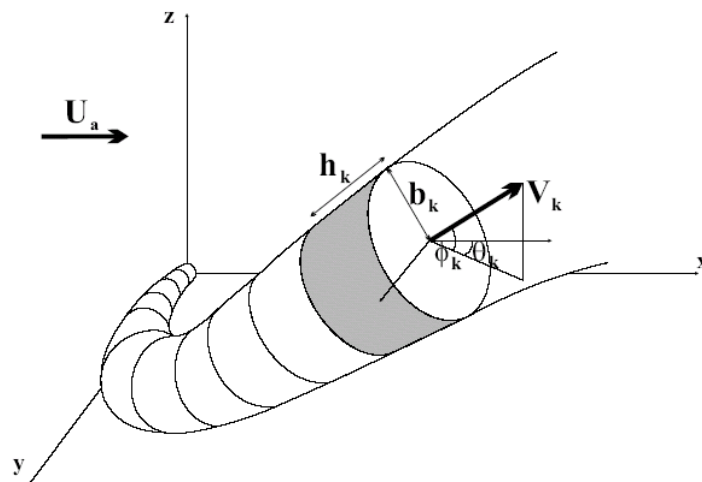


Figura 1.: Diagrama esquemático de la trayectoria de un chorro indicando los elementos "pluma" (penacho) del modelo Lagrangiano.

El sistema de referencia de JetLag es cartesiano, con origen de referencia (x,y,z) en la boquilla, con la limitación de no admitir una altura de la boquilla respecto al fondo menor de 5cm.

Glosario de términos del modelo JETLAG:

- D : diámetro de la boquilla.
- U_A : velocidad de la corriente en el medio receptor
- T_A : temperatura del fluido del medio receptor.
- C_A : concentración de contaminante del m. receptor (coincide con la concentración salina).
- S_A : salinidad del medio receptor.
- ρ_A : densidad del fluido del medio receptor.
- T_o : temperatura del efluente.
- C_o : concentración de contaminante del efluente (coincide con la concentración salina).
- ρ_o : densidad del efluente.
- S_o : salinidad del efluente
- (x, y, z) : coordenadas en el eje de cada rebanada, respecto al sistema cartesiano.
- V_K : intensidad, módulo del vector velocidad de salida del chorro
- (u, v, w) : componentes de la velocidad en los ejes del sistema cartesiano.
- Φ_K : ángulo de inclinación, en cada instante, entre el eje del chorro y el plano horizontal.
- θ_K : ángulo horizontal, en cada instante, entre el chorro y el eje x.
- b_K : radio del chorro en cada elemento o rebanada.
- h_K : longitud o espesor de cada elemento siendo h_k proporcional a V_k
- $M_K = \rho_K \pi b_k^2 h_k$: masa de cada elemento o rebanada del chorro.
- ρ_K : densidad del efluente en cada rebanada.
- S_K : concentración salina del efluente en cada rebanada.

- T_K : temperatura del efluente en cada rebanada.
- t : unidad de tiempo
- k : número de rebanada.

Cada uno de los elementos o rebanadas son independientes, no existe interacción entre ellos, y se caracterizan por su localización, velocidad media, concentración de contaminante, temperatura, salinidad, ancho y espesor. Las variables tienen una distribución uniforme en la sección transversal (valores promedios), variando su valor en cada paso de tiempo, con el desplazamiento del elemento.

2.2. Ecuaciones de gobierno del movimiento y transporte integradas a lo largo del eje del chorro.

Las ecuaciones lagrangianas integradas en la sección transversal, que se resuelven en cada paso de tiempo son:

► E. de Continuidad:

$$M_{k+1} = M_k + \Delta M_k; \quad M_{k+1} = \rho_{k+1} \pi b_{k+1}^2 h_{k+1}$$

► E. Conservación C. Movimiento:

$$u_{k+1} = \frac{M_k u_k + \Delta M_k U_a}{M_{k+1}}; \quad v_{k+1} = \frac{M_k v_k}{M_{k+1}}; \quad w_{k+1} = \frac{M_k w_k + M_{k+1} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_{k+1} g \Delta t}{M_{k+1}}$$

$$(HVEL)_{k+1} = (u_{k+1}^2 + v_{k+1}^2)^{1/2} : \text{intensidad de proyección de velocidad sobre plano x-y}$$

$$V_{k+1} = (u_{k+1}^2 + v_{k+1}^2 + w_{k+1}^2)^{1/2} : \text{intensidad del vector velocidad}$$

► E. Conservación del flujo de flotabilidad o Ecuación de Energía:

$$S_{k+1} = \frac{M_k S_k + \Delta M_k S_A}{M_{k+1}}; \quad T_{k+1} = \frac{M_k T_k + \Delta M_k T_A}{M_{k+1}}$$

$$\rho_{k+1} = \rho(S_{k+1}, T_{k+1}); \quad c_{k+1} = \frac{M_k c_k + \Delta M_k c_A}{M_{k+1}}$$

► E. de Trayectoria del chorro:

$$\sin \phi_{k+1} = \left(\frac{w}{V}\right)_{k+1}; \quad \cos \phi_{k+1} = \left(\frac{HVEL}{V}\right)_{k+1}; \quad \sin \theta_{k+1} = \left(\frac{v}{HVEL}\right)_{k+1}$$

$$x_{k+1} = x_k + u_{k+1} \Delta t$$

$$y_{k+1} = y_k + v_{k+1} \Delta t$$

$$z_{k+1} = z_k + w_{k+1} \Delta t$$

$$\Delta s_{k+1} = V_{k+1} \Delta t$$

Espesor/Radio:

$$h_{k+1} = \frac{V_{k+1}}{V_k} h_k; \quad b_{k+1} = \left(\frac{M_{k+1}}{\rho_{k+1} \pi h_{k+1}}\right)^{1/2}$$

Como resultados se obtienen, para cada paso de tiempo, los valores de: velocidad, densidad y concentración de contaminante promediados en la sección transversal.

2.3. Condición inicial.

Como componente inicial de velocidad se toma la velocidad de salida del chorro, considerando la desviación por la inclinación en la descarga y presencia de corrientes ambientales

$$(u, v, w)_0 = (V_0 \cos \phi_0 \cos \theta_0, V_0 \cos \phi_0 \sin \theta_0, V_0 \sin \phi_0)$$

Como valor inicial del semiancho y del espesor de la rebanada se toma el radio de la boquilla: $(b, h)_0 = (0.5D, 0.5D)$.

$$(S, T, \rho, c)_o = (S_o, T_o, \rho_o, c_o); \quad \text{Paso de tiempo inicial: } \Delta t_o = 0.1x \frac{h_o}{V_o}$$

2.4. Distribución de las variables en la sección transversal.

JetLag asume una distribución uniforme ("Top hat") de las variables escalares y vectoriales en la sección transversal del chorro.

2.5. Ecuaciones de cierre para los términos turbulentos.

El transporte turbulento es máximo responsable de la incorporación al chorro de agua del medio receptor ("entrainment") y, por tanto, del aumento de la masa y dimensiones del chorro como consecuencia de la dilución. Para calcular el incremento de masa, ΔM de cada rebanada en cada paso de tiempo, Δt , JetLag considera dos componentes:

- ΔM_s : contribución debida a la velocidad relativa entre el elemento pluma y la velocidad en el medio receptor en la dirección del eje del chorro.

- $\Delta M_f = (E_f)$: contribución debida al flujo transversal de la corriente ambiental. Este término a su vez puede dividirse en tres contribuciones diferentes: E_p , término referente a la proyección; - E_w , término de corrección debido al ancho de cada elemento y E_c , término de corrección debido a la curvatura de cada elemento.

$$\text{El arrastre total vendrá dado por } E_f = E_p + E_w + E_c$$

La importancia relativa de cada uno de estos términos varía a lo largo de la trayectoria del chorro, de modo que en cada caso se consideran unos y se desprecian otros.

Para obtener la incorporación de masa total al chorro en la región de campo cercano, se pueden utilizar dos expresiones diferentes:

- $\Delta M = \max(\Delta M_s, \Delta M_f)$, lleva a resultados más riguroso salvo el caso de corrientes débiles en el medio receptor.

- $\Delta M = \Delta M_s + \Delta M_f$, es la que se aplica en el caso de corriente débil en el medio receptor.

Para simular el comportamiento en la zona de transición entre el campo cercano y lejano ninguna de estas dos hipótesis es satisfactoria.

2.5. Formulación general: Transición entre el campo cercano y el campo lejano.

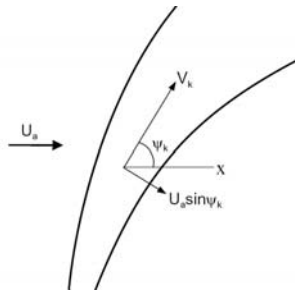


Figura 2: Chorro curvado por efecto de de la corriente en el medio receptor.

Sea un chorro vertido en un medio receptor con corriente débil, siendo Ψ_K el ángulo horizontal entre el eje del chorro y la ambiental, la proyección de ésta sobre aquel será: $U_a \sin \psi_k$.

Para la transición entre campo y cercano, JetLag usa la siguiente fórmula de incremento de la masa del elemento de chorro (incorporación de agua): $\Delta M = E_s \frac{(\pi - \varphi_k)}{\pi} + E_f \sin \varphi_k$

Siendo φ_K el "ángulo de separación", que delimita la importancia relativa entre los términos expuestos anteriormente ($\Delta M_s, \Delta M_f$). $\cos(\varphi_k) = \text{Min}(\frac{V_r(\text{max})}{U_a \sin \psi_k}, 1)$. Cuando el chorro circular alcanza un estado estacionario, JetLag considera un perfil de tipo gaussiano para la distribución de variables en la sección transversal.

3. HIPÓTESIS SIMPLIFICATIVAS.

- El **medio receptor se asume ilimitado**, ya que JetLag es un modelo de ecuaciones integradas en cada rebanada, de modo que requiere asumir un chorro rodeado completamente de fluido del medio receptor, con la misma presión alrededor del chorro y en el medio. No simula efecto COANDA ni fenómenos de re-intrusión.

- El arrastre del vórtice se calcula asumiendo una hipótesis heurística conocida **como incorporación en el área proyectada**: PAE ("Projected Area Entrainment"), en el caso de chorros con flotabilidad y trayectoria bidimensional. Se ignora la fricción por efecto de la presión.

En la figura 3 se observa un esquema explicativo de esta hipótesis: en rojo se representa la forma real de la sección transversal en chorro, mientras que el círculo al que se hace asemejar esta sección será aquel que tenga su misma área:

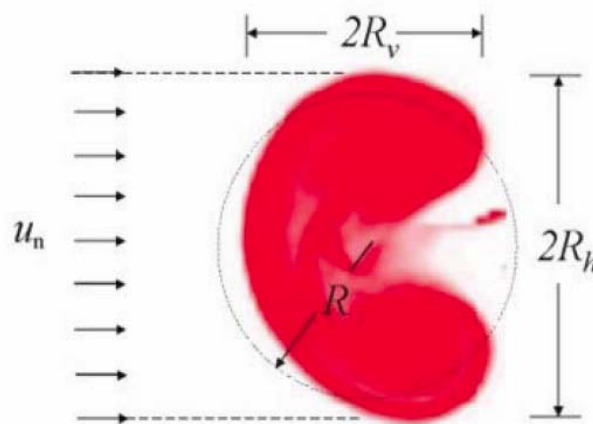


Figura 3: Hipótesis de incorporación en el área proyectada (PAE) e hipótesis de R es el radio del volumen cilíndrico, u_n es la componente de la velocidad relativa al "eddy" dominante.

- Calcula cada chorro independientemente, sin interacción entre ellos. JetLag no es capaz de simular el efecto del "merging" entre chorros.

4. COMPONENTES Y OPCIONES DEL MODELO. POSIBILIDADES Y LIMITACIONES

La tabla 1 indica los datos de entrada necesarios para el modelo JetLag, así como los resultados que permite obtener:

| DATOS DE ENTRADA DEL JETLAG de VISJET | | | |
|---|--|--|---|
| Parámetros de descarga (OUTFALL STRUCTURE) | Emisario sin/con roseta | Parámetros difusor (OUTFALL PARAMETERS) | Profundidad del difusor por debajo de la superficie (<i>Depth</i>) Longitud del tramo difusor (<i>Length</i>) Radio/Diámetro del tramo difusor (<i>Radius/Width</i>) Separación entre boquillas (para el caso de emisario sin roseta) (<i>Space Between Jets</i>) Distancia del difusor a la costa (<i>Distance</i>). Ángulo horizontal entre tramo difusor y corriente ambiental (<i>Current Angle</i>) |
| | | Parámetros chorro (JET PARAMETERS) | Diámetro boquilla (<i>Diameter</i>) Altura de la boquilla respecto al fondo (<i>Port Height</i>) Ángulo de inclinación del chorro en descarga (<i>Vertical angle</i>) Ángulo horizontal entre el chorro y la corriente ambiental (<i>Horizontal angle</i>) |
| | | Parámetros roseta (RISER PARAMETERS) | Distancia entre roseta y extremo tramo difusor (<i>Distance</i>) Altura de la roseta respecto al fondo (<i>Height</i>) Radio de la base roseta (<i>B. Radius</i>) Radio del tope roseta (<i>T. Radius</i>) |
| Efluente vertido (OUTFALL STRUCTURE) | Caudal (<i>Flow</i>) Temperatura (<i>Temperature</i>) Concentración salina (<i>Salinity</i>) Densidad (para este caso, Temperatura = 0) (<i>Density</i>) | | |
| Condiciones ambientales, en M. receptor (AMBIENT PARAMETER) | Condiciones geométricas | Profundidad media de la columna de agua en la zona de descarga (calado) (<i>Depth</i>) | |
| | Parámetros físicos | Temperatura (<i>Temperature</i>) Salinidad (<i>Salinity</i>) Densidad (para este caso, Temperatura = 0) (<i>Density</i>) | |
| | Condiciones hidrodinámicas | Ángulo horizontal entre la corriente y el eje x (<i>Current Angle</i>) | |
| Otras opciones | Paso de tiempo de cálculo | | |
| RESULTADOS DEL JETLAG de VISJET | | | |
| Datos de salida (DATA OUPUT) | - Informe con los datos del caso simulado, el valor de los flujos y de las escalas de longitud características de cada chorro (<i>Data Output Window - Key parameters and length scales</i>) - Resultados numéricos de la simulación para distintos puntos de la trayectoria junto con los datos señalados anteriormente (<i>Data Output Window - Suspend file</i>) - Resultados numéricos para rebanada del chorro (<i>Data Output Window - Disk</i>) - Información relacionada con las concentraciones en cada punto a lo largo de una sección transversal, y con las áreas proyectadas sobre una sección transversal. (<i>3D Position and Concentration Info, Data Output Window - Area</i>) - Valores de la posición (x, y, z) del eje, radio del chorro, dilución media, diferencia de densidad y velocidad. (Incluye el punto de máxima altura). - Para cada disco: coordenadas cartesianas (x, y, z), radio, espesor, ángulo de inclinación respecto al fondo, ángulo horizontal, velocidad, concentración (máxima y media) y dilución. - El programa permite personalizar el plano de corte del chorro de la visualización, mediante 3 variables: distancia, ángulo horizontal y ángulo vertical. Mejora la visualización de la mezcla de varios chorros y la dilución resultante en la interacción. | | |

Tabla 1: Datos de entrada de alimentación del modelo JetLag, y resultados.

En la figura 1 y en el apartado 2.1, desarrollados anteriormente, se muestran gráficamente los anteriores parámetros.

La tabla 2 indica el rango de valores admisibles por JetLag para las variables:

| | | | |
|---|---------------------------------|---|---|
| Salinidad (S) | 0-100ppm(psu) | Altura de la boquilla con respecto al fondo | radio emisario/2 ($R_{emisario}/2$) |
| Densidad (ρ) | 0.5 ~ 1.5 g/ml | Longitud emisario (L_d) | ≥ 0.1 m |
| Temperatura (T) | 0 ~ 100 °C | Radio inferior de la roseta: R_i | 0.05m ~ $0.5 \cdot D_{emisario}$ |
| Distancia entre boquillas (s) | ≥ 0.001 m | Radio superior de la roseta: R_s | 0.01m ~ R_i |
| Caudal total (Q) | $\geq 1.0E-8$ m ³ /s | Distancia (de la roseta desde extremo emisario): D_{roseta} | $0 < D_{roseta} < L_d - 2 \cdot R_i - 0.5 \cdot R_{emisario}$ |
| Diámetro del difusor | $\geq 1.0E-4$ m | Altura de la roseta | 0.1m ~ profundidad del emisario |
| Altura de la boquilla con respecto al fondo | $0.05 \sim h_{roseta}$ | | |

Tabla 2. Rango de valores de variables

La Figura 5 muestra las dos opciones de dispositivo de vertido que el modelo JetLag puede simular: emisario sin roseta y emisario con roseta.

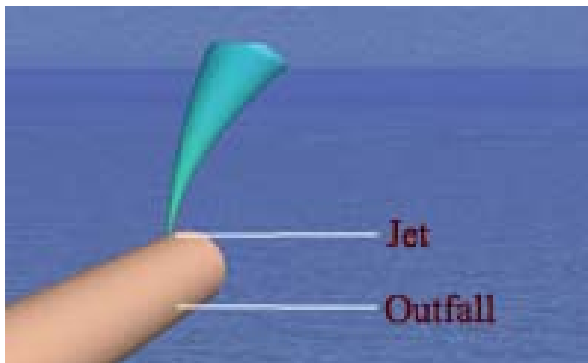


Figura 5.1.: Emisario directo, sin roseta.

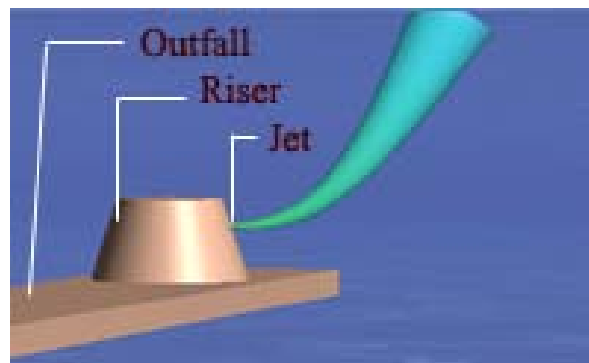


Figura 5.2.: Emisario con roseta.

- Emisario sin roseta: las boquillas se localizan directamente sobre un tramo difusor de múltiples boquillas. Este tipo de dispositivo es el más frecuente en vertidos reales mediante chorros múltiples, y también el más frecuente en los ensayos en laboratorio de simulación de vertidos.

- Emisario con roseta: sobre el emisario se construyen un número determinado de rosetas o elevadores, donde se sitúan las boquillas de vertido de cada chorro, definiendo una circunferencia en la propia roseta.

La tabla 3 indica las principales posibilidades y limitaciones del modelo JetLag; entendidas posibilidades como opciones o ventajas del programa, y limitaciones como restricciones, carencias o desventajas, en lo relativo a la simulación de vertidos de efluentes de flotabilidad negativa.

| POSIBILIDADES DEL MODELO JETLAG DE VISJET | |
|---|---|
| Modelado de la física del proceso | <p>Simula distintas configuraciones de vertido (chorro individual y chorros múltiples) con la opción de simular un dispositivo en roseta.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Distintas posibilidades respecto al diseño del emisario: diámetro, altura de la boquilla con respecto al fondo, inclinación de la descarga, etc. - Posibilidad de diseñar cada chorro con distintas características, dado que se trata cada chorro individualmente. |
| | <p>Incluye herramientas para la simulación de efluentes de flotabilidad positiva y negativa, y de contaminantes conservativos (salmuera) y no conservativos, etc.</p> |
| | <p>Tiene en cuenta las condiciones en el medio receptor (intensidad y dirección de la corriente, densidad o salinidad/temperatura) y su influencia en el comportamiento del vertido.</p> |
| | <p>Permite realizar una discretización vertical del medio receptor, con posibilidad de introducir distintas velocidades y densidades (siempre que sea para estratificación estable) en cada una de las capas en que se divide la columna de agua. Número ilimitado de niveles de discretización.</p> |
| | <p>Posibilidad de interpolar datos</p> |
| Manejo del programa | <p>No requiere de un usuario experto. Una vez introducidos por el usuario los datos de entrada, el programa realiza los cálculos para caracterizar el vertido, y presenta resultados.</p> |
| | <p>Tiempo de computación muy pequeño, cálculos prácticamente instantáneos</p> |
| | <p>Interfaz gráfica amigable.</p> |
| | <p>El programa interrumpe la ejecución, por invalidar las hipótesis del modelo, en los siguientes casos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - El eje del chorro impacta con los contornos (superficie, fondo) - El chorro queda atrapado en una picnoclina en la columna de agua. - La velocidad de salida del chorro es negativa. - El número de pasos en la simulación excede el límite especificado |
| | <p>El modelo presenta diferentes opciones que pueden establecerse en el menú opciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Seleccionar la velocidad de la animación (rápido, medio y lento). - Aplicar el modo continuo, para ejecutar la simulación hasta el máximo de pasos posibles. - Especificar el número máximo de pasos de la simulación. - Mostrar o parar la animación producida por el movimiento de la superficie del agua. - Cambiar las propiedades de visualización de la superficie del agua. |
| <p>El modelo permite trabajar con diferentes ventanas: 1) Trabajar con múltiples simulaciones siempre que estas tengan la misma configuración; 2) Realizar un estudio más concreto en la interfaz gráfica.</p> <p>La disposición de estas ventanas puede ser de dos formas: solapadas o no solapadas.</p> | |
| Resultados del programa | <p>Resultados detallados del comportamiento del chorro.</p> |
| | <p>Diferentes técnicas gráficas de ordenador para visualizar la trayectoria y las características de mezcla del chorro o conjunto de chorros tridimensionales. Gráficos de calidad</p> <p>http://www.aoe-water.hku.hk/visjet/whats-new2.htm.</p> |

TABLA 3. Posibilidades de JetLag en la simulación de vertidos de efluentes de flotabilidad negativa

| LIMITACIONES DE JETLAG DE VISJET | |
|---|--|
| Modelado del programa | <p>Asume medio receptor ilimitado. No simula la interacción del efluente vertido con los contornos (laterales, superficie o fondo), lo que en el caso de vertidos hiperdensos en chorro, se limita al ámbito de aplicación a la zona de campo cercano, previa al impacto del chorro con el fondo. No simula efecto COANDA ni fenómenos de recirculación.</p> <hr/> <p>Dispositivo de vertido limitado a la descarga mediante chorros (individuales o múltiples).</p> <hr/> <p>En los emisarios sin roseta, JetLag exige que los chorros sean idénticos. Si el emisario es con roseta, JetLag permite que los chorros de rosetas diferentes tengan características distintas.</p> <hr/> <p>El modelo no simula la interacción ("merging") entre chorros. Aunque en la interfaz gráfica parezca que JetLag lo considera, en realidad calcula cada chorro independientemente, como chorro individual. Es decir, JetLag no simula el vertido mediante tramo difusor de chorros múltiples en los casos en que éstos interaccionan entre sí.</p> <hr/> <p>El usuario no puede modificar el número máximo de iteraciones en la resolución de las ecuaciones en cada paso de tiempo ("max. number of iterations"), ni el valor del intervalo de tiempo en que se presenta la salida de resultados en el fichero SUSPEND ("printout interval").</p> <p>Sólo es posible modificar el número máximo de pasos de tiempo ("max. number of time steps") correspondientes al cálculo de cada elemento pluma o disco.</p> <hr/> <p>No admite series temporales de datos; sólo es posible simular escenarios estacionarios.</p> <hr/> <p>Al introducir los parámetros de las condiciones ambientales, sólo tiene en cuenta estratificación estable, es decir, $\rho_a(d_i) \leq \rho_a(d_j)$ si $d_i \leq d_j$ siendo d = profundidad bajo la superficie libre.</p> <hr/> <p>No considera el efecto del oleaje sobre la mezcla vertical y horizontal</p> <hr/> <p>Código cerrado: no permite al usuario modificar los parámetros de calibración para ajustarlos a su caso de interés o modificarlos en base a nuevos estudios experimentales.</p> |
| Manejo del programa | <p>Rango limitado de valores de las variables.</p> <p>Si los datos de entrada se encuentran fuera del rango, el modelo avisa pero toma por defecto los valores extremos de dicho rango: superior o inferior, y se ejecuta.</p> <hr/> <p>No es posible definir para cada chorro la velocidad de salida, en su caso, hace falta introducir el valor del caudal y del diámetro del orificio de salida.</p> |
| Resultados del programa | <p>No es posible obtener gráficos o distribuciones de concentraciones para el caso de interacción entre chorros que puedan imprimirse directamente desde el modelo.</p> <hr/> <p>No ofrece ninguna herramienta para comparar los resultados de otros modelos.</p> <hr/> <p>La mayoría de los estudios de validación para el programa se refieren a vertidos de efluentes de flotabilidad positiva, son muy escasos los casos de efluentes de flotabilidad negativa.</p> |

TABLA 4. Limitaciones del software JetLag en la simulación de vertidos de efluentes de flotabilidad negativa.

5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO FRENTE A VARIACIONES EN LOS PARÁMETROS DE ENTRADA.

Se ha realizado un análisis de sensibilidad del modelo JetLag para conocer la influencia de la variación de los datos de entrada en los resultados del subsistema. La horquilla de valores de los datos de entrada del análisis de sensibilidad corresponde al rango de valores realistas de un vertido de salmuera de osmosis inversa en el Mar Mediterráneo (ver Anexo 2).

Se considera un vertido mediante chorro individual sumergido. Se estudia la sensibilidad en los resultados (geometría y dilución) frente a variaciones de los siguientes parámetros: inclinación del chorro, densidad del efluente y del medio receptor, estratificación en la columna de agua, velocidad y dirección de la corriente, calado en el medio receptor y altura de la boquilla.

En el Anexo 3 de esta ficha, se muestran los resultados numéricos obtenidos del análisis de sensibilidad. La Tabla 5 resume las principales conclusiones del análisis de sensibilidad de Jetlag:

| VARIABLE | SENSIBILIDAD | COMENTARIOS RESPECTO A LOS RESULTADOS DE "JETLAG" |
|---|--------------|--|
| Ángulo inclinación chorro | Muy alta | Hasta un ángulo de 45°, a mayor ángulo, mayor es la cota máxima, alcance horizontal del chorro y dilución. A partir de 45°, el valor de estas variables decrece con el aumento del ángulo de inclinación, salvo el valor de dilución en el punto de impacto, que es máximo para una inclinación de 60°. |
| Densidad efluente/M.receptor | Muy Pequeña | A mayor diferencia de densidad entre el efluente y el medio receptor, ligeramente menor es la altura máxima y el alcance del chorro. |
| Estratificación y Temperatura | Variable | Si el medio es homogéneo (típica situación de invierno/otoño en el Mediterráneo) la influencia de la temperatura es pequeña. En caso de medio estratificado, si el chorro no alcanza la pycnoclina, la estratificación no afecta a su comportamiento. En caso de que el chorro alcance la pycnoclina, los resultados indican que un aumento de la densidad en el fondo, hace que la dilución disminuya. Sin embargo, el programa avisa de que el chorro ha quedado atrapado en la columna de agua, situación que este modelo no es capaz de simular. |
| Velocidad de la corriente | Muy alta | A mayor valor de la corriente en el medio receptor, mayor es la dilución del efluente. |
| Angulo horizontal entre la corriente y chorro | Muy pequeña | Se ha analizado la sensibilidad para los ángulos $\sigma = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ JetLag estima diluciones prácticamente iguales para los tres casos, lo cual contradice los resultados experimentales obtenidos por diversos autores (Roberts, 1997), donde las diluciones medidas son menores cuando $\sigma=180^\circ$ |
| Calado en el medio receptor | Nula | Si el chorro no interacciona con la superficie, la altura de la columna de agua por encima del efluente NO influye en el comportamiento del mismo. En el caso de que el eje del chorro alcance la superficie, el modelo deja de ejecutarse. Sin embargo, el modelo no se detiene cuando impacta la envolvente superior con la superficie, de modo que el usuario debe de estar atento de detectar el impacto del chorro para descartar resultados más allá. |
| Altura boquilla sobre el fondo | Muy pequeña | A mayor altura de la boquilla, ligeramente mayor es también la altura máxima alcanzada por el chorro, y la dilución. |
| Nº/ separación boquillas | Nula | El modelo calcula cada chorro independientemente, no siendo capaz de simular la interacción entre chorros. En este sentido, los resultados son independientes del número o separación entre boquillas. |

Tabla 5: Síntesis del análisis de sensibilidad de JetLag frente a variaciones de los parámetros de entrada dentro del rango de valores realistas de diseños de vertido en el Mar Mediterráneo.

6. CALIBRACIÓN Y VALIDACION DEL MODELO, PRESENTADA POR LOS AUTORES, PARA EFLUENTES DE FLOTABILIDAD NEGATIVA.

La mayor parte de los estudios de validación del modelo JetLag se refieren al vertido de efluentes de flotabilidad positiva. Para el caso de efluentes hiperdensos, la validación se limita a un único caso, expuesto en el documento [4] *JetLag2008- An update* de J.H.W. Lee, V. Cheung y C. LAi. *Croucher Laboratory of Environmental Hydraulics- University of HongKong (2008)*.

El estudio de validación referente a los vertidos de efluentes de flotabilidad negativa utiliza los resultados experimentales obtenidos por Chu et al (1975) [5]. El ensayo se centra en un chorro vertical, de flotabilidad negativa, descargando en un medio receptor en movimiento. Se comparan los resultados obtenidos experimentalmente ("Chu") con los resultados numéricos del JetLag en su versión inicial (1999) y en su versión más reciente (2008). Los siguientes gráficos muestran la **trayectoria adimensionalizada** con el diámetro de la boquilla, para distintos valores del número de Froude.

Las magnitudes expresadas en los gráficos corresponden a:

- l_m : escala de longitud de cantidad de movimiento-corriente en el medio receptor:

$$L_m = \frac{M_o^{1/2}}{U_a}$$

siendo M_o el flujo de cantidad de movimiento, definido por: $M_o = U_o Q_o$

- l_b : escala de longitud de flotabilidad-corriente en el medio receptor: $L_b = \frac{J_o}{U_a^3}$, siendo J_o

el flujo de flotabilidad, definido por $J_o = U_o g_o' Q_o$

- K : ratio entre la velocidad de salida del chorro y la velocidad de la corriente en el medio receptor.

- F : número de Froude densimétrico: $F = \frac{U_o}{\sqrt{g_o' D}}$

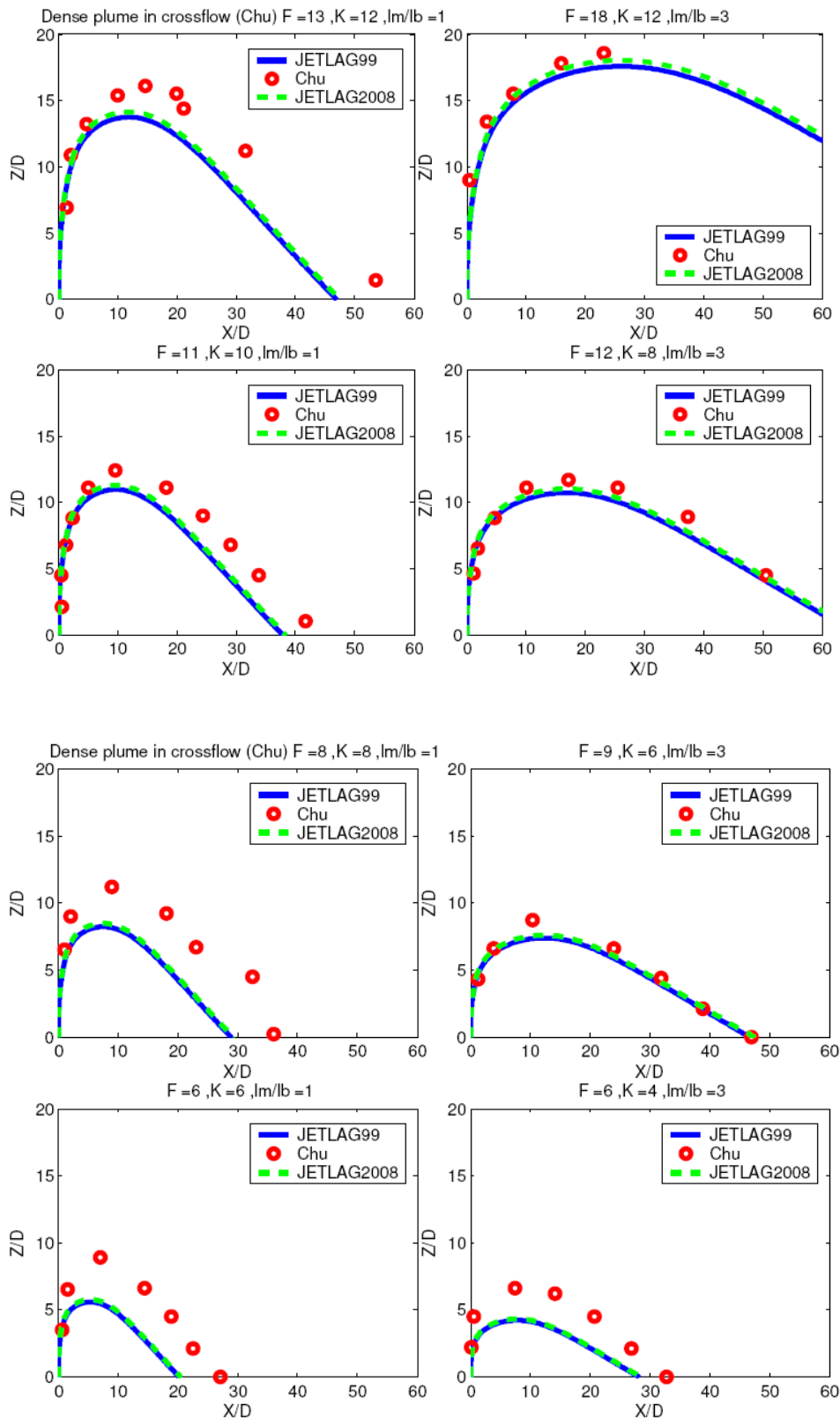


Figura 6. Resultados del estudio de validación del modelo JetLag para el caso de vertidos de efluentes de flotabilidad negativa. Caso: chorro vertical en un medio receptor con velocidad perpendicular al mismo.

7. VALIDACION DEL MODELO CON DATOS EXPERIMENTALES DE ENSAYOS EN MODELO FÍSICO.

El estudio de validación que se presenta a continuación, se ha publicado en [3].

Para validar el modelo JetLag se ha realizado una revisión bibliográfica exhaustiva en relación con datos experimentales de vertidos de chorros hiperdensos, como los de salmuera. Se han seleccionado aquellos artículos con un mayor número de ensayos y que utilizan técnicas experimentales más avanzadas. Definiendo valores realistas como datos de entrada, se han comparado, para un medio receptor en reposo y en movimiento, los resultados numéricos obtenidos con JetLag con las fórmulas de análisis dimensional calibradas por diversos autores a partir de datos obtenidos experimentalmente.

7.1. MEDIO RECEPTOR EN REPOSO

Los estudios experimentales seleccionados para la validación son los indicados en la tabla 6. Todos ellos corresponden a un medio receptor en reposo y homogéneo, sin interacción del flujo con los contornos.

| AUTOR | ANGULOS | NÚMEROS DE FROUDE | MEDIDAS Y TÉCNICA DE MEDICIÓN |
|---|---------------|-------------------|--|
| Roberts et al. (1997) [10] | 60° | 19 - 36 | Trayectoria y dilución Técnicas ópticas: LIF y medidas de conductividad |
| Cipollina et al. (2005) [11] | 30°, 45°, 60° | 16 - 216 | Trayectoria y dilución |
| Kikkert et al (2007) [12] | 30°, 45°, 60° | 14 - 99 | Trayectoria y dilución Técnicas ópticas: LIF y LA |
| Shao et al. (2010) [13] | 30°, 45° | 8 - 32 | Trayectoria, dilución y velocidades Técnicas ópticas: LIF y PIV |
| Papakonstantis et al. (2011), [14], [15] | 45°, 60° | 7.5 - 58.3 | Trayectoria y dilución |

Tabla 6: Estudios experimentales seleccionados para la validación del subsistema JetLag.

Para la validación se han considerado los datos de entrada mostrados en la Tabla 7, correspondientes a valores realistas para un vertido de salmuera al Mar Mediterráneo, para los cuales se ha ejecutado el modelo JetLag y comparado con las fórmulas de análisis dimensional calibradas por los autores expuestos en la Tabla 6.

| DATOS DE ENTRADA PARA LA VALIDACIÓN DE JETLAG (medio receptor en reposo y homogéneo) | | | | | | | | | | | |
|--|-------|----|-------------------|-------------------|------------------|-----|-------|-------|----------|-------|-------------------|
| C_A | C_o | T | ρ_0 | ρ_A | g'_0 | D | H_A | h_o | F_{rd} | U_0 | Q (caudal) |
| psu | psu | °C | kg/m ³ | Kg/m ³ | m/s ² | M | m | m | | m/s | m ³ /s |
| 37.5 | 68 | 21 | 1050.2 | 1026.4 | 0.2228 | 0.2 | 15 | 0 | 10 | 2.11 | 0.0663 |
| | | | | | | | | | 20 | 4.22 | 0.1326 |
| | | | | | | | | | 30 | 6.33 | 0.1989 |
| | | | | | | | | | 40 | 8.44 | 0.2652 |

Tabla 7. Datos de entrada para la validación de JetLag

7.1.1. Validación de trayectorias

Punto de máxima altura del chorro

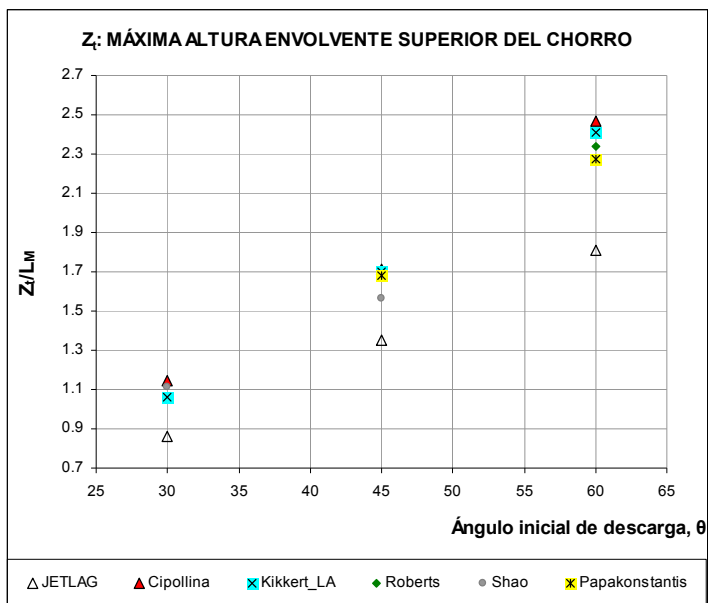


Figura 7. Validación de la máxima altura de la envolvente superior del chorro

Punto de impacto del chorro con el fondo

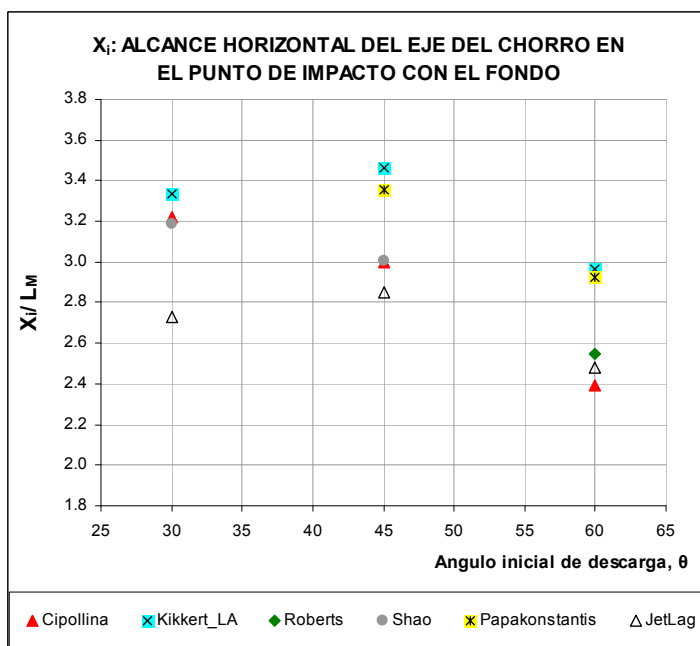


Figura 8. Validación del alcance horizontal del eje del chorro en el punto de impacto con el fondo

Trayectorias del chorro

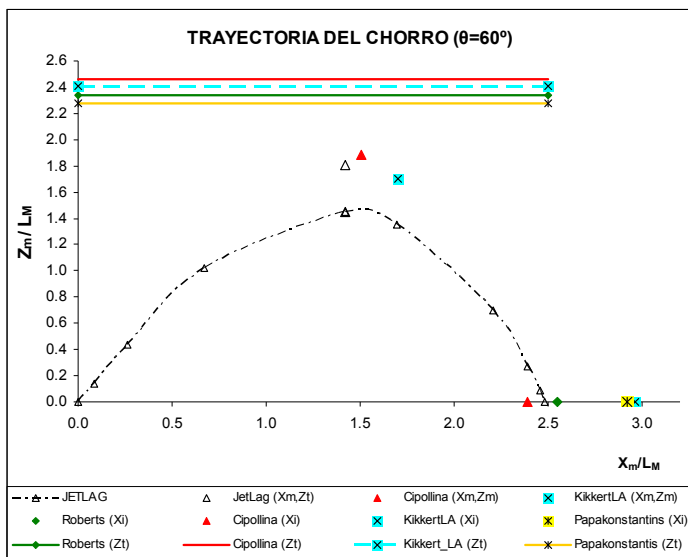


Figura 9.1. Validación de la trayectoria de un chorro inclinado 60°

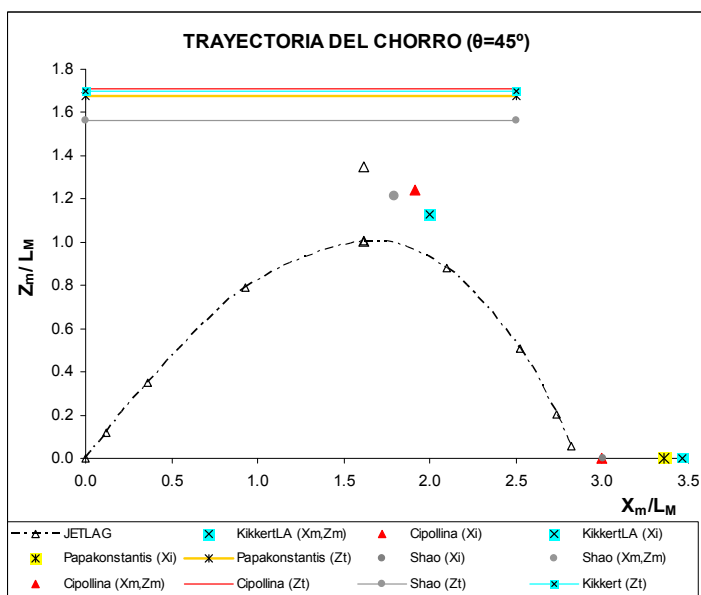


Figura 9.2. Validación de la trayectoria de un chorro inclinado 45°

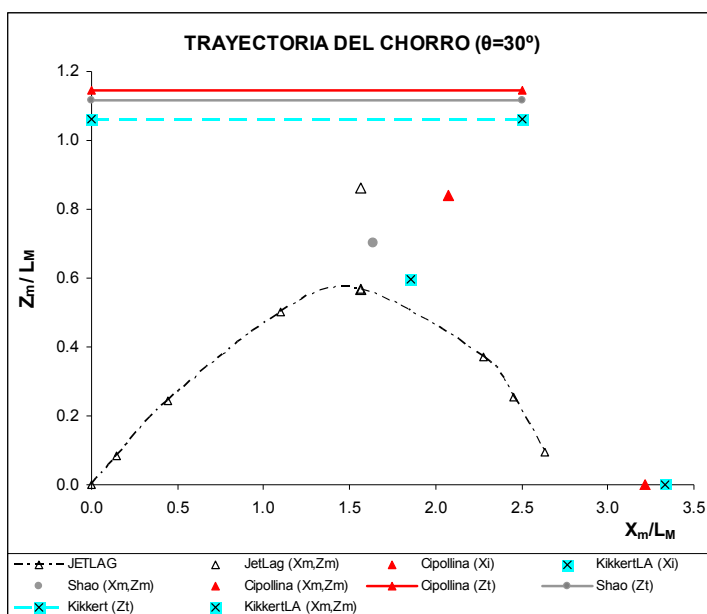


Figura 9.3. Validación de la trayectoria de un chorro inclinado 30°

7.1.2. Validación de diluciones

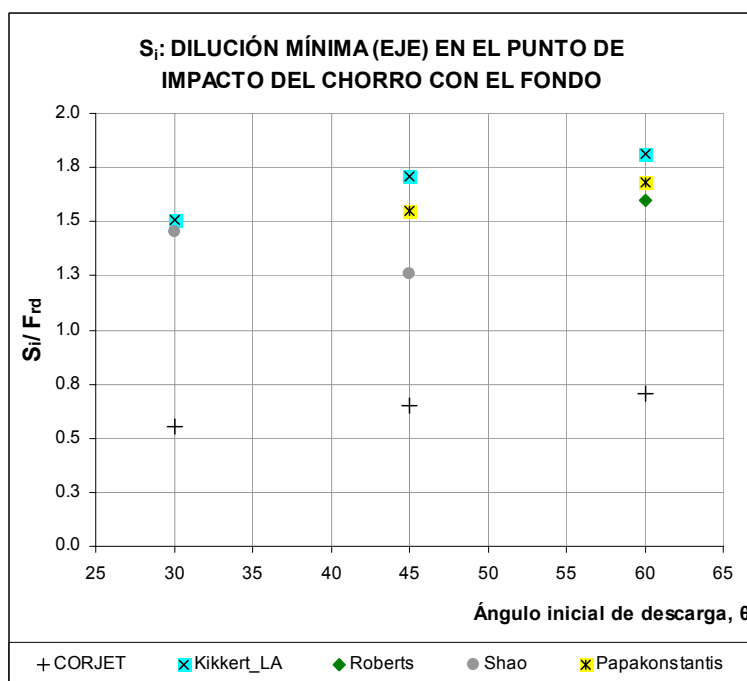


Figura 10. Validación de la dilución de un chorro en el punto de impacto con el fondo

La observación de los gráficos anteriores deriva en las siguientes conclusiones:

- Respecto a la altura máxima de la envolvente superior (obtenida sumando al punto de máxima altura del eje, el radio del chorro), se observa que JetLag la infravalora significativamente, especialmente para inclinaciones del chorro mayores.

- JetLag también infravalora de modo significativo el alcance horizontal del eje del chorro, pero en este caso el error es muy superior para inclinaciones del chorro pequeñas (de 30° y menores). En este caso, los resultados experimentales son más dispersos, sin embargo para todos los casos JetLag infravalora el alcance.

- En relación con la dilución en el punto de impacto del chorro con el fondo, se observa una muy acusada infravaloración por parte de JetLag, de entre un 50% y un 60% respecto a los resultados experimentales considerados.

Estimando la desviación de los resultados numéricos del modelo JetLag con respecto a los resultados experimentales considerados, se obtienen los valores presentados en la Tabla 8:

(↓: infraestimación-estimación del modelo; ↑: sobre-estimación del modelo)

| MEDIO RECEPTOR EN REPOSO | Variable | Chorro inclinado $\theta = 30^\circ$ | Chorro inclinado $\theta = 45^\circ$ | Chorro inclinado $\theta = 60^\circ$ |
|--------------------------|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | | JetLag | JetLag | JetLag |
| | Z_t | 0% | ~20%↓ | ~25%↓ |
| | S_i | ~60%↓ | ~50%↓ | ~55%↓ |
| | X_r | ~15%↓ | ~10%↓ | ~10%↓ |

Tabla 8. Desviaciones de los resultados numéricos de JetLag con respecto a datos experimentales, para un chorro denso sumergido vertido en un medio receptor en reposo.

Siendo:

Z_t : altura máxima de la envolvente superior del chorro.

S_i : dilución mínima (en el eje) en el punto de impacto del chorro con el fondo.

X_r : alcance (horizontal) del chorro (eje) en el punto de impacto con el fondo.

7.2. MEDIO RECEPTOR DINÁMICO.

De modo análogo al caso de un medio receptor en reposo, se ha validado el modelo JetLag también para un medio receptor en movimiento (presencia de corrientes). En primer lugar, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica en relación con ensayos experimentales y calibración de fórmulas semi-empíricas de vertidos de chorros densos en un medio receptor en presencia de corrientes, seleccionando aquellos de mayor rigor científico y con mayor número de ensayos. Se han definido datos de entrada correspondientes a condiciones realistas de vertido de salmuera desde una planta desalinizadora (de osmosis inversa) al Mar Mediterráneo. Para estos datos de entrada se ha ejecutado el modelo JetLag, comparando los resultados numéricos obtenidos con las fórmulas de análisis dimensional obtenidas a partir de los datos experimentales publicados.

Para una explicación más detallada y los gráficos de validación correspondientes a la validación de JetLag en un medio receptor dinámico se puede consultar en Palomar et al. (2012) [3]. Las principales conclusiones de la validación se sintetizan en la Tabla 9:

(↓: infraestimación-estimación del modelo; ↑: sobre-estimación del modelo)

| MEDIO RECEPTOR DINÁMICO Chorro inclinado 60° | Variable | Chorro de la misma dirección y sentido que la corriente $\theta = 60^\circ, \phi = 180^\circ$ | Chorro de sentido opuesto a la corriente $\theta = 60^\circ, \phi = 0^\circ$ | Chorro perpendicular a la corriente $\theta = 60^\circ, \phi = 90^\circ$ |
|---|----------|--|---|---|
| | | JetLag | JetLag | JetLag |
| | Z_t | ~30%↓ | ~5%↓ a ~20%↓ | ~40% ↓ |
| | S_i | ~30%↓ a ~15%↑ | ~5%↓ a ~90%↑ | ~20%↓ a ~45%↑ |

Tabla 9. Desviaciones de los resultados numéricos de JetLag con respecto a datos experimentales, para un chorro denso sumergido vertido en un medio receptor dinámico.

De la Tabla 9 se puede deducir que JetLag infraestima en aproximadamente un 30% -40% las dimensiones del chorro para chorros perpendiculares y de la misma dirección y sentido que la corriente. Para chorros de sentido opuesto, el ajuste es en principio mejor.

El modelo infravalora la dilución en el punto de impacto para chorros de la misma dirección que la corriente y para chorros perpendiculares a la corriente, para valores pequeños $U_r F_{rd}$ (siendo U_r la razón entre la velocidad en el medio receptor y la velocidad de salida del chorro y F_{rd} : el número de Froude densimétrico a la salida), mientras que sobrevalora la dilución para valores grandes de $U_r F_{rd}$. Para chorros de sentido opuesto a la corriente, JetLag sobreestima significativamente la dilución en el punto de impacto, más cuando mayor es el valor de $U_r F_{rd}$.

8. RECOMENDACIONES DE APLICACIÓN Y MANEJO DEL MODELO.

A continuación se indican algunas recomendaciones básicas en el uso del modelo JetLag para la simulación de vertidos sumergidos mediante chorro individual

RECOMENDACIONES RESPECTO AL MODELADO

Introducir al menos dos niveles verticales en la columna de agua en los parámetros de entrada, de modo que el modelo pueda interpretar el tipo de estratificación de salinidad/ temperatura (densidad).

Teniendo **en cuenta el análisis de sensibilidad del modelo**, el modelo JetLag es muy sensible a la intensidad de la corriente en el medio receptor mientras que la dirección de la corriente prácticamente no influye en el comportamiento y dilución del efluente. Por otra parte, el modelo no se encuentra validado para chorros hiperdensos inclinado descargado en un medio receptor en movimiento. Por lo anterior, se recomienda evitar el uso de JetLag para simular medio receptor dinámico

De la **validación** realizada con resultados experimentales adecuados en cantidad y calidad, es necesario considerar que JetLag infravalora la altura máxima alcanzada por el chorro. En este sentido, es posible que el chorro impacte con la superficie aunque JetLag considere que no lo hace. Este error es especialmente importante en el rango de ángulos de inclinación del chorro óptimos de diseño: 45°-60°.

Respecto al alcance del chorro, también queda infravalorado por JetLag, aunque a efecto de diseño del dispositivo de descarga es un parámetro de menos importancia.

Respecto a la dilución en el punto de impacto, JetLag infravalora también con un error importante el grado de dilución en el caso de un medio receptor en reposo. En este sentido, utilizar JetLag está del lado conservativo.

RECOMENDACIONES RESPECTO AL USO Y MANEJO DEL PROGRAMA

JetLag requiere cumplir las siguientes normas respecto los datos de entrada al modelo:

- **Altura boquilla** superior a 5cm. Si no se utiliza roseta, la altura de la boquilla debe de ser igual o mayor a la mitad del radio del emisario; si se usa roseta, ha de ser menor o igual a la altura de la roseta y proporcional al radio del emisario.

- Si el valor introducido no cumple con estas reglas, el programa lo modificará de forma automática.

Si se pretende diseñar un dispositivo de vertido con **boquilla apoyada sobre el fondo** (altura de la boquilla inferior a 5cm), el modelado con JetLag exige sumar un calado de 5cm al calado ficticio y considerar una altura de boquilla de 5cm, que es la mínima que admite el programa.

JetLag toma como origen de la ordenada "z", la boquilla. Para calcular la altura con respecto al fondo, se procede del siguiente modo:

- 1) Si la altura de la boquilla de diseño es superior a 5cm, a la "z" de la hoja de resultados habrá que sumarle la altura de la boquilla.
- 2) Si la altura de la boquilla es cero y se ha considerado 5cm sumando también al calado 5cm, los

resultados de "z" de JetLag son directamente la altura del chorro con respecto al fondo.

- 3) Si la altura de la boquilla es superior a cero pero inferior a 5cm, y se ha considerado igual a 5cm sumando también 5cm al calado total, para obtener la altura del eje del chorro con respecto al fondo, a los resultados "z" de JetLag se suma la altura real de la boquilla.

En los casos 2 y 3, el valor de punto de impacto del chorro con el fondo de JetLag no es el verdadero.

En el diseño de un vertido mediante tramo difusor, hay que tener en cuenta que **JetLag no simula la interacción entre chorros**, sino cada chorro individual independientemente. En este sentido, no influye el número de boquillas ni la separación entre las mismas. Por tanto, JetLag sólo puede simular chorros individuales o tramos difusores de chorros suficientemente separados que no interaccionan entre sí.

La **modificación de los datos de entrada** no se materializa al guardar sino al ejecutar el programa, de modo que para que los cambios sean efectivos, primero hay que ejecutar y luego guardarlo. De este modo se obtienen resultados con las modificaciones incorporadas.

Cuando se crea un proyecto a partir de otro anterior hay que prestar atención a guardarlo con otro nombre antes de introducir cualquier modificación en los parámetros de entrada, dado que no existe la opción de deshacer. Para evitar riesgos, se recomienda crear cada proyecto por separado.

Sólo es posible **trabajar con varias ventanas abiertas** (solapadas o sin solapar) en el caso de estudios con una única configuración (diseño) de emisario. Si se definen nuevas configuraciones, no es posible utilizar varias ventanas, ya que las modificaciones en una configuración afectarían a las demás.

RECOMENDACIONES RESPECTO A LA SALIDA DE RESULTADOS.

Los valores de dilución de JetLag ("average dilution") se refiere a valores medios, considerando una distribución homogénea de magnitudes en la sección transversal. Para obtener valores de dilución en el eje (y comparar, por ejemplo, con CORJET) se debe aplicar la fórmula: $S_{eje} = S_{media} / 1.7$

El modelo **asume la hipótesis de un medio receptor ilimitado**, de modo que la interacción con los contornos invalida la aplicación del modelo. Hay que tener en cuenta que si bien el modelo deja de ejecutarse cuando el eje del chorro impacta con la superficie, no detecta sin embargo el impacto de la envolvente superior con el chorro. En este sentido, el usuario debe de estar atento de calcular la posición de la envolvente superior, identificar si hay impacto y desechar los resultados en el caso de impacto.

Para calcular las **envolventes superior e inferior** del chorro a partir de las coordenadas (x, z) del eje y del valor del radio ("plume radius") que ofrece el programa ("B"), se aplican las fórmulas:

Plano X-Z:

- Envolvente superior: $Z_{sup} = Z_{eje} + P_Radius * \cos \Phi$ · $X_{sup} = X_{eje} - P_Radius * \sin \Phi$
- Envolvente inferior: $Z_{inf} = Z_{eje} - P_Radius * \cos \Phi$ · $X_{sup} = X_{eje} + P_Radius * \sin \Phi$

En el punto de máxima altura del chorro, la inclinación del chorro es horizontal, es decir: $\Phi = 0^\circ$

En el fichero de resultados "view suspend file", en el punto de máxima altura del chorro no se especifica la coordenada horizontal del chorro (x). Para conocer su valor, el usuario debe introducirse en la rebanada correspondiente.

El **valor de la dilución en el punto de impacto** del chorro con el fondo corresponderá al último valor del fichero "Suspend", según viene indicado en el propio fichero. Cabe destacar que si nos fijamos en su correspondiente coordenada "z" puede no corresponder exactamente a la de máximo alcance ("z" tendría que dar un valor de -1 para los casos en que la altura del difusor sea de 1 metro. según criterio de coordenadas tomadas en el modelo), aunque si es un valor muy aproximado.

9. ACCESO AL MODELO Y A LA INFORMACIÓN, PRECIO, INSTALACIÓN, MANEJO, TIEMPO DE COMPUTACIÓN, ENTRADA DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

- Acceso: la última versión de JETLAG (2008), perteneciente al software VISJET, el manual de usuario así como una versión demo del programa se puede descargar de forma gratuita en <http://www.aoe-water.hku.hk/visjet/>

- Idioma: La información disponible (manuales, artículos, etc.), así como la interfaz del modelo con el usuario está disponible únicamente en lengua inglesa.

- Precios: el precio del programa depende del tipo de licencia (Mayo 2010):

https://extranet.hku.hk/esdapp/servlet/hku_visjet_reg/forminput.

| TIPO LICENCIA | USO COMERCIAL (\$) | USO ACADÉMICO (\$) |
|-------------------------------|---|--|
| Licencia ordenador individual | 300 | 150 |
| Licencia para un departamento | 200 + 120/usuario (entre 1-9usuarios) 90/usuario (más de 10 usuarios) | 100 + 60/ usuario (entre 1-9usuarios) 45/ usuario (más de 10 usuarios) |
| Licencia ilimitada | 2.400 | 1.200 |

Existe la opción de descarga, de forma gratuita, la versión demo del programa, válida para un periodo de treinta días. La versión demo no incluye todas las habilidades y opciones del programa. Página de descarga: https://extranet.hku.hk/esdapp/servlet/hku_visjet_reg/forminput

- Instalación: inmediata, sin necesidad de personal experto.

- Requerimientos computacionales:

Pentium II 400MHz

128 MB RAM

100 MB hard-disk space

Windows 98 SE, ME, NT 4.0, 2000 and XP

Screen resolution 1024x768 supporting 16-bit true color

3D Graphics board with 4 MB memory

- Tiempo computacional: cálculos prácticamente instantáneos.

- Manejo del programa: sencillo e intuitivo. No necesita personal experto para su manejo.

- Entrada de datos y presentación de resultados: tratamiento de datos sencillo. Los datos de entrada se introducen directamente desde la propia interfaz, sin necesidad de archivos adicionales de entrada. El fichero de resultados (SUSPEND) tiene extensión .vj y tendrá una capacidad mínima de 100KB. Con 20 chorros ocupará como máximo 3MB. Además existe una presentación gráfica intuitiva de los resultados obtenidos con múltiples opciones.

10. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA.

- [1] Lee, J.H.W; Cheung, V. (1990) "Generalized Lagrangian model for buoyant jets in *current*". Journal of Environmental Engineering, ASCE, 116(6), pp. 1085-1105.
- [2] P. Palomar; J.L. Lara; I.J. Losada; M. Rodrigo; A. Alvarez (2012). "Near Field brine discharge modeling. Part 1: Analysis of commercial tools". Desalination, vol. 290, pp. 14-27.
- [3] P. Palomar; J.L. Lara; I.J. Losada (2012). "Near field brine discharge modelling Part 2: Validation of commercial tools". Desalination, vol. 290, pp. 28-42.
- [4] Lee, J.H.W.; Cheung, V; Lai, C (**December 2008**). "*JETLAG2008 - An Update. Technical Note*" Croucher Laboratory of Environmental Hydraulics, The University of Hong Kong. <http://www.aoe-water.hku.hk/visjet/doc/jetlag2008.pdf>
- [5] Chu, P.C.K., Lee, J.H.W. and Chu, V.H. (**1999**). "*Spreading of turbulent round jet in coflow*". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125(2), pp. 193-204.
- [6] Lam, K.M., Lee, W.Y., Chan, C.H.C. and Lee, J.H.W. (**2006**). "*Global behavior of a round buoyant jet in a counterflow*". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 132(6), pp.589-604.
- [7] Lee, J.W.W. and Chu, V.H. (**2003**). "*Turbulent Jets and Plumes - a Lagrangian Approach*". Kluwer Academia Publishers, Boston.
- [8] Lee, J.H.W., Cheung, V., Wang, W.P. and Cheung, S.K.B. (**2000**). "*Lagrangian modeling and visualization of rosette outfall plumes*". Proceedings of the Hydroinformatics 2000, University of Iowa.
- [9] Lai, A.C.H., Yu, D.Y., and Lee, J.H.W. (**2008**). "*Mixing of a rosette jet group in a crossflow*". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE (in preparation).
- [10] Roberts, P.J.W; Fellow; Ferrier, A; Daviero, G. (**1997**). "*Mixing in inclined dense jets*". Journal of Hydraulic Engineering, vol 123, No 8.
- [11] Cipollina, A; Brucato, A; Grisafi, F; Nicosia, S. (**2005**). "*Bench-Scale Investigation of Inlined Dense Jets*". Journal of Hydraulic Engineering, vol 131, n 11, pp. 1017-1022.
- [12] Kikkert, G.A; Davidson, M.J; Nokes, R.I (**2007**). "*Inclined Negatively Buoyant Discharges*". Journal of Hydraulic engineering, vol 133, pp.545 – 554
- [13] D. Shao, Lao Wing-Keung Lao. "Mixing and boundary interactions of 30° and 45° inclined dense jets". Environmental Fluid Mechanics, SpringerLink, 2010, vol. 10, no5, pp. 521-553.
- [14] I.G. Papakonstantis, G.C. Christodoulou, P.N. Papanicolau. "Inclined negatively buoyant jets 1: Geometrical characteristics. Journal of Hydraulics Research, Taylor and Francis Group, 2001, vol 49, No.1, pp. 13-22.
- [15] I.G. Papakonstantis, G.C. Christodoulou, P.N. Papanicolau. "Inclined negatively buoyant jets 2: Concentration measurements. Journal of Hydraulics Research, Taylor and Francis Group, 2011, vol 49, No.1, pp. 3-12.

ANEXOS

ANEXO 1.

EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL MODELO "JETLAG" A UN VERTIDO DE SALMUERA AL MAR MEDITERRANEO. PASOS E INTERFAZ DEL PROGRAMA.

CASO DE APLICACIÓN:

Se desea modelar el comportamiento de un vertido de salmuera procedente de una nueva planta desalinizadora proyectada en la costa Mediterránea. Se opta por una configuración de descarga mediante chorro individual sumergido y salmuera procedente de un proceso de osmosis inversa de tasa de conversión del 45%. Los valores de datos de entrada responden a un caso dentro del rango realista de valores de diseño y de valores de las condiciones en el medio receptor.

METODOLOGÍA PARA LA SIMULACION DEL VERTIDO MEDIANTE JETLAG

1. Recopilar los valores de los datos de entrada al modelo, que incluyen:

- Condiciones en el medio receptor, correspondientes a distintos escenarios, estacionales, en el Mar Mediterráneo, y teniendo en cuenta el clima local.

| CONDICIONES AMBIENTALES EN EL MEDIO RECEPTOR. (entre paréntesis el nombre con que se definen en JETLAG) | | | | | |
|--|-------------------|-----|---|-----------------|--------------------|
| Profundidad media columna de agua en el vertido, m. (Depth) | | 15 | Medio receptor (Ambient Parameter) | | Mar (ilimitado) |
| Velocidad de la corriente en el M.Receptor, m/s. (Current) | Superficie (0m) | 0.1 | Densidad del M. Receptor, g/ml (Density) | Superficie (0m) | 1.025 |
| | 7m | 0.1 | | 7m | 1.0255 |
| | En el fondo (15m) | 0 | | Fondo (15m) | 1.027 |

NOTA: En JETLAG puede introducirse directamente tanto la densidad (siempre que pongamos $T=0^{\circ}$), como los datos de temperatura y salinidad. En JETLAG el eje "x" coincide siempre con la dirección de la corriente en el medio receptor.

- Parámetros de descarga de la salmuera: ver "Recomendaciones de diseño del vertido de salmuera" y características del efluente (considerando agua de alimentación y tecnología de desalinización). En este caso:

| PARÁMETROS DE DISEÑO DEL VERTIDO DE SALMUERA (entre paréntesis el nombre con que se definen en JETLAG) | | | |
|---|--------------|---|-------------|
| Diámetro de boquilla, m. (Jet Parameters - Diameter) | 0.2 | Angulo horizontal entre el chorro y la corriente (Jet Parameters - Horizontal Angle) | 0° |
| Altura de la boquilla con respecto al fondo, m. (Jet Parameters - Port height) | 1 | Caudal del efluente, m^3/s . (Flow) | 0.1570 8 |
| Angulo inclinación del chorro en la descarga. (Jet Parameters - Vertical angle) | 60° | Densidad del efluente, g/ml (Outfall Parameters - Density) | 1.052 |

NOTA: EL diámetro se ha elegido para que, con el caudal vertido por boquilla, la velocidad de salida de cada chorro sea de 5m/s.

En el Anexo 2 de esta Ficha Descriptiva se ha incluido una tabla de valores realistas y recomendados para los datos de entrada de JETLAG (ver Sección 4: "opciones del modelo"), en el modelado de un vertido de salmuera en el Mar Mediterráneo

2. INTERFAZ DEL MODELO JETLAG

Se inicia el programa, doble click en el icono, y accedemos al modelo.

Se define un nuevo proyecto, utilizando cualquiera de las siguientes opciones:

file → *open*, que abre un proyecto ya existente.

file → "*proyecto*", abre un proyecto denominado "proyecto" usado recientemente.

file → *new*, abre un nuevo proyecto.

A partir de aquí, se describe el procedimiento a seguir una vez creado un nuevo proyecto, dado que las otras dos opciones son modificaciones del resultado final obtenido con un proyecto nuevo.

3. STEP 1: PLEASE INPUT AMBIENT PARAMETERS.

| Name | Meaning | Acceptable range |
|-------|--------------------------|------------------|
| Depth | Depth below surface (m). | |

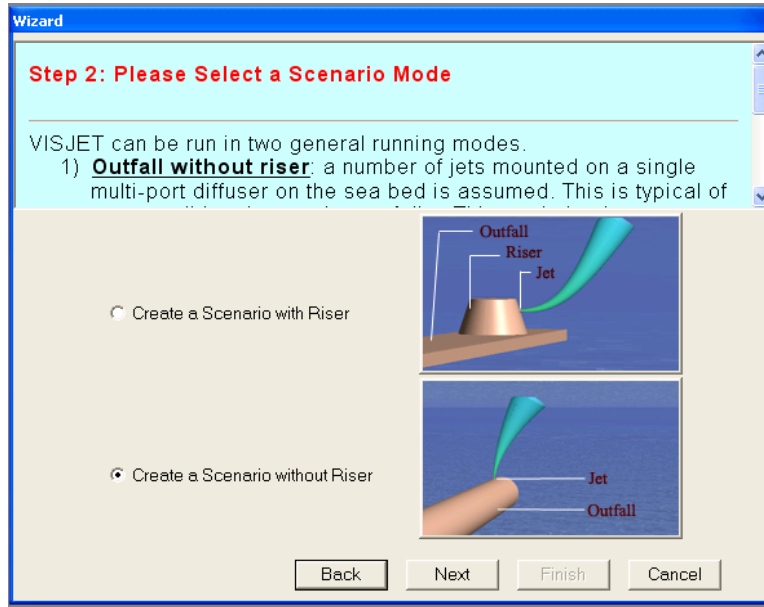
| Depth(m) | Density(g/ml) | Temperature(deg) | Current(m/s) |
|----------|---------------|------------------|--------------|
| 0 | 1.025 | 0 | 0.1 |
| 7 | 1.0255 | 0 | 0.1 |
| 15 | 1.027 | 0 | 0 |

- Se introducen las variables (condiciones) en el medio receptor.
- Se añade un nivel, *Add a Level*, para ir rellenando cada capa.
- Se introduce la profundidad (*Depth*) de este nivel. El origen vertical se considera en la superficie.
- Se indica la densidad de la columna (*Density*) dada en g/ml, para este caso se da un valor de temperatura de 0°. Si se prefiere, se introducen los datos de salinidad y temperatura (*Salinity / Temperature*).
- Se introduce el valor de la velocidad de la corriente en el medio receptor (*Current*).
- Se añaden los niveles en que se quiere discretizar la columna de agua y se completan los datos siguiendo el mismo procedimiento
- Se continúa pulsando *Next*.

NOTA: Dado que el origen vertical se considera en la superficie, la densidad tendrá que ir aumentando según aumenta la profundidad pues sólo admite estratificación estable.

4. STEP 2: PLEASE SELECT AN ESCENARIO MODE.

Permite crear dos tipos diferentes de dispositivo de vertido: con roseta o sin roseta:



- Se selecciona la opción elegida y se pulsa *Next*.

5. STEP 3: PLEASE INPUT OUTFALL AND JET PARAMETERS.

Incluye los datos de entrada relativos a los parámetros de descarga y diseño del dispositivo de vertido, las características del efluente y las condiciones ambientales, en el medio receptor.

- Se rellenan las casillas de JetLag con los datos de entrada correspondientes al vertido a simular (ver la sección 4 de la ficha: "Opciones del modelo" y el anexo 2 de valores realistas y recomendados).

- Una vez rellenos los datos, se pulsa *Finís* para finalizar.

NOTA1: En todo este proceso se tiene la opción de retroceder: *Back*, de una a otra ventana para modificar algún dato de pasos anteriores. En todo caso, una vez creado el escenario mediante el botón *Finish*, siempre es posible seguir modificando los valores de entrada en la interfaz del programa.

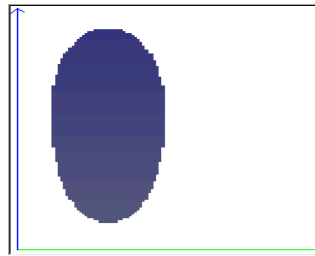
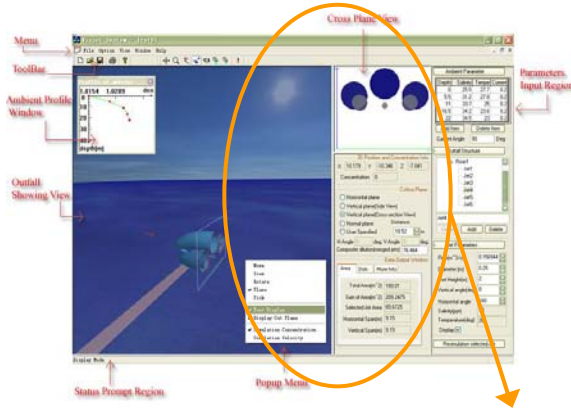
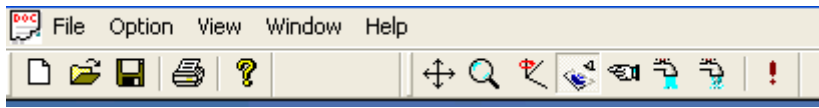
NOTA2: Para cada paso en la introducción de los datos, el programa ofrece una nota explicativa con las instrucciones generales a seguir.

INTERFAZ GRÁFICA.

La interfaz gráfica de JetLag es de uso sencillo. Incluye los siguientes paneles:

- Panel de la derecha: introducción o modificación de los datos de entrada.
- Panel de la izquierda: salida gráfica tridimensional y visualización del emisario. En la mitad superior: proyección sobre un plano cortante. Mitad inferior: visualización de resultados numéricos.

- Para manipular la imagen del gráfico y elegir el plano cortante, se utiliza la barra de herramientas.



3D Position and Concentration Info
 X | 8.931 | Y | 1.78 | Z | 7.25
 Concentration: | 0

Cutting Plane
 Horizontal plane
 Vertical plane(Side View)
 Vertical plane(Cross-section View)
 Normal plane Distance: | 6.25 | m
 User Specified
 H.Angle | -90 | deg. V.Angle | 90 | deg.

Data Output Window
 Area | Disk | More Info |
 Total Area(m²) | 7.8625
 Sum of Area(m²) | 7.8625
 Selected Jet Area | 7.8625
 Horizontal Span(m) | 2.05
 Vertical Span(m) | 4.7

Ambient Parameter

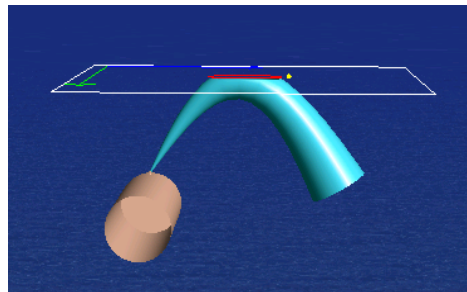
| Depth | Density | Tempe | Current |
|-------|---------|-------|---------|
| 0 | 1.025 | 0 | 0.1 |
| 7 | 1.0255 | 0 | 0.1 |
| 15 | 1.027 | 0 | 0 |

Add Item Delete Item
 Current Angle | 90 | Deg

Outfall Structure
 Outfall_1
 Jet1

Outfall_1
 Create Add Delete

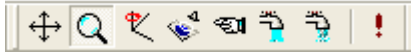
Outfall Parameters
 Depth(m) | 15
 Temperature(d) | 0
 Salinity(ppt) | 0
 Density(gm/mL) | 1.052
 Length(m) | 10
 Radius(m) | 2
 Space Between Jets(m) | 1
 Distance | 0 Display
 Resimulate selected Jet



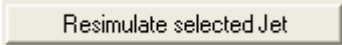
EJECUCIÓN Y COPIA DEL PROYECTO.

- Una vez introducidos todos los datos de entrada, se procede a la ejecución del modelo, mediante el botón correspondiente de la barra de herramientas:





Tener en cuenta que este botón ejecuta las condiciones tal y como las encuentra en dicho momento. Si se hubiera producido cualquier modificación después de ejecutar el modelo estas no quedan grabadas pero una vez que damos al botón ejecutar tales modificaciones se harían efectivas.

Podremos tener la opción de grabar los cambios realizados a cada uno de los chorros que conforman el sistema presionando la opción .

- Se guarda el caso de estudio mediante *save*, en el menú de *File*. El programa lo guarda como un archivo de extensión *vj*.

VENTANA DE RESULTADOS: DATA OUTPUT WINDOW.

Incluye las opciones para generar los distintos tipos de resultados (ver sección 4 de la ficha: "Opciones del modelo").

1. Pestaña "More info".

1.1. *View suspend file*: es el fichero de resultados, que puede ser guardado como un fichero *.txt*. A continuación se muestra parte de este fichero, con los resultados de trayectoria del eje del chorro(x que coincide con la dirección de la corriente, y formando un ángulo horizontal de 90°, z formando un ángulo vertical de 90° -desde el fondo hacia la superficie-), radio del chorro, dilución media, exceso de densidad y velocidad media.

1.2. *Key parameters and length scales*: valores incluidos también en el anterior fichero.

Depth: Profundidad (m).

Diameter: Diámetro chorro (m).

U_j : Velocidad inicial chorro (m/s).

U_a : Velocidad de la corriente ambiental (m/s).

dp/ρ_a : Diferencia de densidad inicial (adimensional).

ρ_j : Densidad inicial efluente (g/ml).

ρ_a : Densidad ambiental al nivel de la fuente (g/ml).

Ver. Ang.: Ángulo vertical de descarga (grados).

Hor. Ang.: Ángulo horizontal de descarga (grados).

F_d : Número de Froude densimétrico del chorro.

Q_j : Caudal (m³/s).

M_j : Flujo de cantidad de movimiento (m⁴/s²).

B_j : Flujo de flotabilidad (m⁴/s³).

I_Q : Escala de longitud flujo de caudal-cantidad de movimiento (m).

I_m : Escala de longitud de cantidad de movimiento-corriente en el medio receptor (m).

I_b : Escala de longitud flotabilidad-corriente en el medio receptor (m).

I_M : Escala de longitud cantidad de movimiento-flotabilidad (m).

S_m : Dilución característica para el dominio de cantidad de movimiento, campo lejano.

S_b : Dilución característica para el dominio de flotabilidad, campo lejano.

| X (m) | Y (m) | Z (m) | PLUME RADIUS (m) | AVERAGE DILUTION | DENSITY DIFF. (σ) | VI |
|---|----------|----------|------------------------|---------------------|----------------------------------|----|
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.100 | 1.00 | -25.1875 | |
| 0.314 | 0.000 | 0.541 | 0.200 | 2.00 | -12.8015 | |
| 0.980 | 0.000 | 1.642 | 0.405 | 4.02 | -6.5809 | |
| 2.563 | 0.000 | 3.853 | 0.828 | 7.68 | -3.7721 | |
| MAXIMUM RISE REACHED | | | | | | |
| 6.828 | 0.000 | 5.569 | 1.632 | 13.68 | -2.3315 | |
| 10.760 | 0.000 | 1.453 | 2.232 | 27.42 | -0.5828 | |
| 12.236 | 0.000 | -1.038 | 2.678 | 34.74 | -0.0475 | |
| NUMBER OF STEPS = 533 | | | | | | |
| MAXIMUM RISE (CENTER) = 5.7801 M ABOVE DISCHARGE PORT | | | | | | |
| AVG DILUTION = 12.0962 B = 1.53 M | | | | | | |
| COMPUTATIONS CEASE: PLUME SINKS TO SEA BED | | | | | | |
| AVG DILUTION AT SEA BED (ASSUME 1.00 M BELOW OUTFALL) = | | | | | | |

SubData

Jet name: Outfall_1_Riser1.Jet1

Qj (m³/s) 0.0138 Mj (m⁴/s²) 0.0242

Depth (m) 39 Sj (m⁴/s³) 0.00325

Diameter (m) 0.1 Iq (m) 0.0866

Uj (m/s) 1.7571 Iq (m) 3.1143

Ua (m/s) 0.05 Iq (m) 25.9935

dp/pa 0.02401 Iq (m) 1.078

po (g/cc) 1 Sm 35.1414

pa (g/cc) 1.0246 Sb 999

V. angle 90 Iq/Im 0.0285

H. angle 0 Iq/Im 0.0822

Fd 11.45 Iq/lb 0.1198

Uj/Ua 35.14 Iq/lb 0.0415

Close

View suspend file

Key parameters and length scales

2. Pestaña "Disk": en la que podemos encontrar la siguiente información:

Para ver los resultados es necesario mover la barra de desplazamiento vertical.

- Disk no: Número de disco, en los que realiza los cálculos el modelo, para un chorro determinado.
- Centre position: Coordenadas (x,y,z) del centro del disco seleccionado en el que la trayectoria del chorro es calculada.
- Radius: Radio del disco seleccionado.
- Thickness: Espesor del disco seleccionado.
- Angle: Ángulo vertical, ángulo entre el eje del chorro y el plano horizontal. Ángulo horizontal es el ángulo entre el eje x y la proyección del eje del chorro sobre el plano horizontal.
- Velocity: Velocidad del chorro del disco seleccionado.
- Concentration: Concentración máxima y media del disco seleccionado.

Area **Disk** More Info

Disk No. 0

Center Position

X 0 Y 0 Z 0

Radius (Visual) 0.0354 Thickness 0.05

H.Angle 0 V.Angle 90

Velocity 1.757 Max Conc. 1

Dilution 1 A. Conc. 1

3. Pestaña "Area".

En la parte superior obtenemos la siguiente información:

- Position: Coordenadas (x,y,z) del punto seleccionado con el cursor mediante el uso del ratón.
- Concentration: Concentración media del punto indicado anteriormente.

En la parte inferior los valores que se indican son los siguientes:

- Total area: Área total proyectada de los chorros sobre el plano cortante; las áreas solapadas no son contadas por duplicado (m²).
- Sumo of areas: Suma de todas las áreas proyectadas de cada uno de los chorros individuales (m²).
- Selected jet area: Área proyectada del chorro seleccionado (m²).
- Horizontal span: Extensión horizontal de la región proyectada para el chorro seleccionado (m).
- Vertical span: Extensión vertical de la región proyectada para el chorro seleccionado (m).

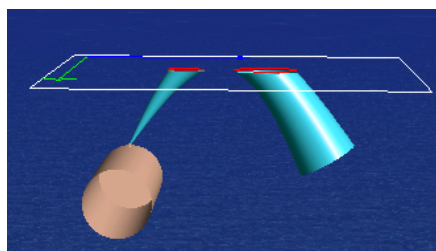
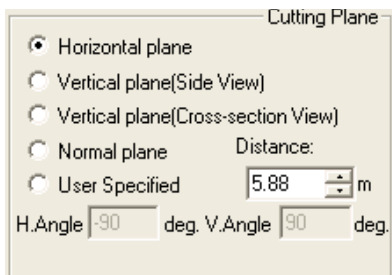
OPCIONES DEL ENTORNO GRÁFICO.

La gráfica tridimensional que se obtiene con JetLag, puede modificarse mediante distintas opciones de la barra de herramientas:

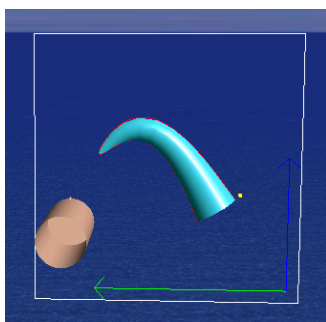


Primer icono: desplazamientos por el gráfico; segundo icono: zoom; tercer icono: giros. Los dos siguientes iconos se utilizan para realizar un corte al chorro o conjunto de chorros. El primero permite desplazar el plano de corte y el segundo, seleccionar el punto exacto dónde colocar dicho plano.

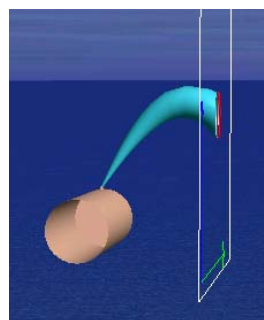
Las siguientes figuras muestran los distintos tipos de cortes que realiza el modelo JETLAG:



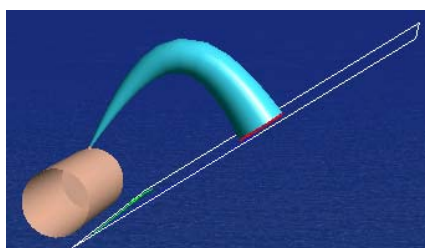
1. Corte con plano horizontal (*horizontal plane*).



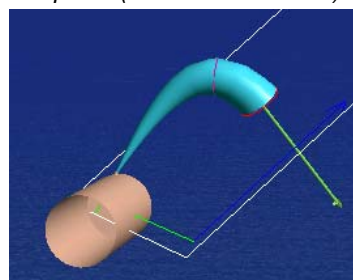
2. Corte con plano vertical. Vista lateral (*Vertical plane (Side View)*).



3. Corte con plano vertical. Vista de la sección transversal (*Vertical plane (Cross-section View)*).

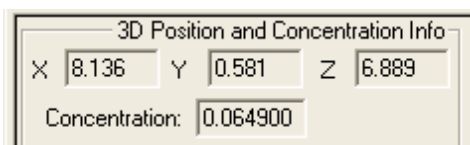


4. Corte con plano perpendicular al chorro (*Normal plane*).



5. Corte con un ángulo determinado (*User Specified (H. Angle, V. Angle)*).

Cada uno de estos cortes, permite obtener información de la concentración en un punto de interés (x, y, z), situando el cursor sobre cualquier punto que contenga al plano resultante del corte.



ANEXO 2.

RANGO DE VALORES REALISTAS Y RECOMENDADOS PARA LOS PARAMETROS DE ENTRADA EN EL MODELADO DE VERTIDO DE SALMUERA CON JETLAG

RANGO DE VALORES REALISTAS Y VALORES RECOMENDADOS PARA LOS DATOS DE ENTRADA EN JETLAG EN SIMULACIÓN DE VERTIDOS DE SALMUERA AL MAR MEDITERRÁNEO.

| "AMBIENT PARAMETER" (CONDICIONES EN EL MEDIO RECEPTOR). JETLAG | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Calado del nivel (Depth) | Salinidad y Temperatura del nivel (Salinity / Temperature) | Densidad del nivel para T=0° (Density) | Velocidad de la corriente en nivel (Current) | Dirección de la corriente respecto tramo difusor (Current Angle) |
| El que corresponda (*1) | 37 – 38 psu 15°C - 27°C (*2) | 1.028 – 1.024 g/ml (*2) | 0.01 - 1m/s (*3) | El que corresponda (*4) |
| "OUTFALL STRUCTURE" (PARÁMETROS DE LA DESCARGA). JETLAG | | | | |
| PRÁMETROS DEL EMISARIO SUBMARINO "OUTFALL PARAMETERS" | | | | |
| Profundidad tramo difusor (Depth) | Concentración salina y Temperatura efluente (Salinity / Temperature) | Densidad del efluente para T=0° (Density) | Longitud tramo difusor (Length) | |
| La que corresponda (=calado nivel inferior) | C0 ≈ 68psu 15°C - 27°C (*5) | 1.052 – 1.047 g/ml (*5) | La que corresponda | |
| Sin roseta | | Con roseta | | Distancia a costa (Distance) |
| Radio del tramo difusor (Radius) | Separación entre boquillas (Space between jets) | Ancho del tramo difusor (Width) | | |
| 2m (=2*port height) (*6) | La que corresponda (*7) | Lo que corresponda | | |
| PARÁMETRO DEL TRAMO DIFUSOR "RISER PARAMETERS" | | | | |
| Distancia entre roseta y extremos tramo difusor (Distance) | Altura roseta (Height) | Radio del tope roseta (T. Radius) | Radio base roseta (B. Radius) | |
| La que corresponda. | ≥ 1 (≥ Port Height) | 0.01 < T Radius < B. Radius (*8) | 0.05 < B. Radius < Outfall Radius (*9) | |
| PARÁMETROS DE LOS CHORROS "JET PARAMETERS" | | | | |
| Caudal (Flow) | Diámetro boquilla (Diameter) | Altura de la boquilla con respecto fondo (Port Height) | Ángulo de inclinación del chorro a salida (Vertical Angle) | Ángulo horizontal de salida (Horizontal Angle) |
| $Q_{salmue} = \frac{Q_{produccion}}{1 - R}$ (*10) | >0.15m (*10) | 1 – 1.5m (*11) | 45° - 60° (*12) | 0° |

NOTAS:

(*1) El calado en la zona de descarga será el que corresponda. Siempre que sea posible, se recomienda localizar el vertido a una profundidad suficiente para evitar el impacto del chorro con la superficie del mar, dado que este hecho reduce la dilución y es difícil de simular con los modelos comerciales disponibles.

(*2) A las profundidades características de vertido de salmuera en el Mar Mediterráneo, la salinidad oscila entre valores de 37psu y 38psu, y la temperatura en la columna de agua oscila, según el mes, entre 15 y 27°C aproximadamente. De acuerdo con esto, la **densidad del medio receptor** oscilará entre 1028 y 1024Kg/m³. Para una salinidad media en la zona de vertido de 37.5psu y una temperatura media de 21°C, la densidad aproximada del medio receptor sería 1026Kg/m³.

El siguiente cuadro muestra los valores de densidad aproximados para el rango de valores de temperatura y salinidad realistas en el Mar Mediterráneo para las profundidades de vertido.

| AGUA DEL MAR MEDITERRÁNEO | | |
|---------------------------|------------------|-------------------------------|
| Salinidad (psu) | Temperatura (°C) | Densidad (Kg/m ³) |
| 37 – 37.5 - 38 | 15 | 1027.4 - 1027.8 - 1028.1 |
| 37 – 37.5 - 38 | 18 | 1026.6 - 1027 - 1027.3 |
| 37 – 37.5 - 38 | 21 | 1025.7 - 1026 - 1026.5 |
| 37 – 37.5 - 38 | 24 | 1024.8 - 1025.2 - 1025.6 |
| 37 – 37.5 - 38 | 27 | 1023.8 - 1024.2 - 1024.6 |

(*3) Las corrientes en el Mar Mediterráneo no suelen superar valores de 1m/s, siendo generalmente mucho menores e incluso prácticamente nulas durante algunos meses del año (calma chicha). La simulación debe incluir los distintos escenarios mensuales o estivales y considerar el valor y dirección de la corriente en el medio receptor en las profundidades en las que se desplaza la salmuera.

(*4) En general interesa que el ángulo entre los chorros y la corriente del medio receptor sea de 0 a 90° y que los chorros sean perpendiculares al tramo difusor.

(*5) Considerando el rango de densidades realistas en el Mar Mediterráneo en las profundidades de vertido y tasas de conversión de la planta del 45%, y suponiendo (como prácticamente ocurre en la realidad) que la temperatura de la salmuera es prácticamente la misma que la del agua de alimentación, el siguiente cuadro indica el rango de densidades aproximadas. **Para una salinidad media del agua de alimentación de 37.5psu y una temperatura media de 21°C, y R=45%, la densidad aproximada de la salmuera sería de 1049Kg/m³.**

| AGUA DE ALIMENTACIÓN (OBRA DE TOMA) | | | OSMOSIS INVERSA. Tasa de conversión del 45% | SALMUERA | | |
|-------------------------------------|------------------|-------------------------------|--|-------------------------------|------------------|-------------------------------|
| Salinidad (psu) | Temperatura (°C) | Densidad (Kg/m ³) | | Concentración Salinidad (psu) | Temperatura (°C) | Densidad (Kg/m ³) |
| 37 | 15 | 1027.4 | | 67.3 | 15 | 1050.6 |
| 37.5 | | 1027.8 | | 68 | | 1051.2 |
| 38 | | 1028.1 | | 69.1 | | 1052 |
| 37 | 18 | 1026.6 | | 67.3 | 18 | 1049.7 |

| | | | | | | |
|------|----|--------|--|------|----|--------|
| 37.5 | | 1027 | | 68 | | 1050.2 |
| 38 | | 1027.3 | | 69.1 | | 1051.1 |
| 37 | | 1025.7 | | 67.3 | | 1048.8 |
| 37.5 | 21 | 1026 | | 68 | 21 | 1049.3 |
| 38 | | 1026.5 | | 69.1 | | 1050.2 |
| 37 | | 1024.8 | | 67.3 | | 1047.8 |
| 37.5 | 24 | 1025.2 | | 68 | 24 | 1048.3 |
| 38 | | 1025.6 | | 69.1 | | 1049.2 |
| 37 | | 1023.8 | | 67.3 | | 1046.8 |
| 37.5 | 27 | 1024.2 | | 68 | 27 | 1047.3 |
| 38 | | 1024.6 | | 69.1 | | 1048.2 |

(*6) Es una restricción propia del programa.

(*7) Se recomienda que la separación entre boquillas sea suficiente para evitar el impacto entre chorros contiguos antes de que impacten con el fondo (dado que esta interacción reduce el grado de dilución del efluente y es más difícil de modelar)

(*8) En el caso de diseño con roseta, el mínimo valor que admite el programa para la parte de arriba es de 0.01 metros. Además, la forma de la roseta siempre tiene que ser de forma que su parte superior sea mas estrecha que la inferior.

(*9) El valor mínimo que admite el programa para la parte inferior de la roseta es de 0.05 y tener en cuenta que el límite superior que se establece depende del radio que tengamos de emisario, nunca puede ser superior a este pues es donde la roseta se fija.

(*10) La combinación diámetro-caudal por boquilla se diseña de modo que la velocidad de salida del chorro se encuentre entre 3.5 – 5m/s, y el número de Froude densimétrico entre 20 y 25.

(*11) Se recomienda una altura de la boquilla respecto al fondo de 1m, para evitar la realimentación del chorro con salmuera. En el caso de vertidos con limitación de calado, se recomienda diseñar al menos con una altura de 0,5 m

(*12) Acorde a la opinión de la comunidad científica (9)

ANEXO 3.

RESULTADOS NUMÉRICOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO JETLAG DE VISJET PARA VERTIDO MEDIANTE CHORRO.

En este anexo se presentan los resultados del análisis de sensibilidad del modelo "JetLag" a los valores de los datos de entrada al modelo. Las conclusiones a este análisis se exponen en la sección 5 de esta ficha descriptiva.

Glosario de términos para los datos de entrada (características del efluente, parámetros de descarga y condiciones en el medio receptor):

- ρ_A : densidad en el medio receptor.
- H_A : profundidad media de la columna de agua en la zona de vertido.
- U_A : velocidad de la corriente en el medio receptor.
- T_A : temperatura del medio receptor.
- S_A : salinidad del medio receptor
- Φ : ángulo de inclinación del chorro en la descarga.
- θ : ángulo horizontal entre el chorro y la corriente en el medio receptor (ambiental)
- β : ángulo horizontal de los chorros con respecto al tramo difusor
- ρ_o : densidad del efluente a la salida.
- h_o : altura del difusor respecto al fondo.
- Q : caudal de efluente vertido.
- U_o : velocidad de salida del chorro.
- D : diámetro de la boquilla.
- L : longitud del tramo difusor.
- s : separación entre boquillas.
- N : número de boquillas.
- S_a : salinidad medio receptor.

- T_o : temperatura del efluente.

- S_o : concentración salina del efluente

Caso del análisis de sensibilidad:

Para el análisis de sensibilidad se considera la salmuera derivada de un proceso de desalinización mediante osmosis inversa con tasa de conversión del 45%. El efluente se vierte al Mar Mediterráneo mediante un vertido sumergido en chorro individual y mediante chorros múltiples.

JetLag utiliza un sistema de referencia cartesiano, con origen en la boquilla de salida del chorro. La corriente en el medio receptor tiene la dirección y sentido del eje "x", de modo que si el chorro se vierte en la misma dirección que la corriente ($\theta = 0^\circ$) seguirá la dirección y sentido del eje "x", mientras que si se vierte perpendicularmente a la corriente ($\theta = 90^\circ$) seguirá inicialmente la dirección del eje "y", pero luego será desviado por la corriente en dirección "x". Para un chorro vertido en la misma dirección pero sentido opuesto a la corriente ambiental ($\theta = 180^\circ$), se desplazará inicialmente en sentido opuesto a la corriente ("x" negativo), hasta ser desviada en la dirección de la misma ("x" positivo).

Los resultados de Zmax que aparecen en las tablas de las páginas siguientes están considerados desde el fondo (sumando a los resultados de JetLag, la altura del difusor con respecto al fondo). Los valores de dilución, que son los de la hoja de resultados del JetLag, corresponden a valores medios en un perfil uniforme. Respecto al punto de máximo alcance horizontal (impacto del chorro con el fondo, se ha considerado aquel en que $z = -h_o$, sin embargo, la coordenada "x" correspondiente no viene dada directamente por el fichero de resultados "Suspend", por lo que se ha tomado el último valor generado por el modelo, cercano a este punto de alcance máximo.

El rango de valores de las variables corresponde a parámetros de diseño característicos de vertido de salmuera y de escenarios ambientales en el Mar Mediterráneo.

A) INFLUENCIA DEL **ÁNGULO DE INCLINACIÓN DEL CHORRO** EN EL VERTIDO (Φ).

Parámetros fijos: $S_A = 37.5 \text{ psu}$; $T_A = 15^\circ \text{ C}$; $U_A = 0$; $H_A = 20 \text{ m}$; $h_o = 1 \text{ m}$; $\theta = 0^\circ$ (co-flowing), $S_o = 68 \text{ psu}$; $T_o = 15^\circ \text{ C}$; $Q = 0.15708 \text{ m}^3/\text{s}$ ($U_o = 5 \text{ m/s}$); $D = 0.2 \text{ m}$; $N=1$

A.1) Variamos Φ , desde **0 a 90°** (con incrementos de 15°).

| VARIABLE MODIFICADA | Nº de Froude densimétrico | RESULTADOS CON JETLAG | | | |
|---------------------|---------------------------|---|--------------------|--|--------------------|
| | | Punto de máxima altura del eje del chorro | | Punto de impacto del eje del chorro con el fondo | |
| | | Z_{\max} (m) | S_{media} | X_i (m) | S_{media} |
| Φ (°) | | | | | |
| 0° | 23.13 | 1 | 1 | 6.94 | 12.91 |
| 15° | 23.13 | 1.91 | 9.61 | 10.95 | 21.66 |
| 30° | 23.13 | 3.59 | 12.41 | 13.17 | 29.48 |
| 45° | 23.13 | 5.59 | 12.95 | 13.38 | 34.34 |
| 60° | 23.13 | 7.57 | 11.57 | 11.49 | 35.73 |
| 75° | 23.13 | 9.16 | 9.39 | 7.09 | 33.82 |
| 90° | 23.13 | 9.76 | 9.03 | 0 | 32.53 |

NOTA: Estas combinaciones temperatura-salinidad corresponden a densidades de $\rho_A = 1027.5 \text{ Kg/m}^3$ y $\rho_o = 1052 \text{ Kg/m}^3$, en el medio receptor y en el efluente respectivamente.

Para un ángulo de 0° no especifica que se alcance ninguna altura máxima. Tomamos la del punto de partida, $Z_{\max} = 1 \text{ m}$ desde el fondo, pues a partir de aquí la trayectoria que da va tomando valores de Z menores.

Para un ángulo de 90°, obtenemos para toda la trayectoria que la coordenada x vale cero, el chorro siempre es vertical hasta el punto indicado de máxima altura de 9.76m. En este punto, vuelve a descender, también con $x=0$, hasta el punto de impacto con el fondo. Hay que señalar que el modelo, para este ángulo, confunde el punto dónde el chorro comienza a descender, de máxima altura, con el choque contra la superficie que en nuestro caso no puede darse puesto que tenemos un calado mucho mayor, de 20m.

B) INFLUENCIA DE LA **DENSIDAD** DEL EFLUENTE VERTIDO (ρ_o) Y DE LA DENSIDAD DEL MEDIO RECEPTOR (ρ_A).

Parámetros fijos: $H_A = 20\text{ m}$; $h_o = 1\text{ m}$; $\Phi = 60^\circ$; $\theta = 0^\circ$ (co-flowing), $Q = 0.15708\text{ m}^3/\text{s}$ ($U_o = 5\text{ m/s}$); $D = 0.2\text{ m}$; $N=1$

B.1) Para $\rho_A = 1026\text{ Kg/m}^3$, variamos la densidad del efluente: ρ_o desde **1043 Kg/m³ a 1053 Kg/m³** (con incrementos de 2Kg/m³).

| VARIABLE MODIFICADA | Nº de Froude densimétrico | RESULTADOS CON JETLAG | | | |
|-------------------------------|---------------------------|---|--------------------|--|--------------------|
| | | Punto de máxima altura del eje del chorro | | Punto de impacto del eje del chorro con el fondo | |
| ρ_o (Kg/m ³) | | Z _{max} (m) | S _{media} | X _i (m) | S _{media} |
| 1043 | 27.74 | 8.76 | 13.57 | 13.49 | 41.46 |
| 1045 | 26.24 | 8.32 | 12.85 | 12.75 | 39.37 |
| 1047 | 24.96 | 7.95 | 12.24 | 12.13 | 37.59 |
| 1049 | 23.85 | 7.62 | 11.71 | 11.60 | 36.06 |
| 1051 | 22.87 | 7.34 | 11.25 | 11.12 | 34.71 |
| 1053 | 22.01 | 7.08 | 10.84 | 10.71 | 33.52 |

B.2.) Para $\rho_A = 1027.5 \text{ Kg/m}^3$, variamos la densidad del efluente: ρ_o , desde 1043 Kg/m^3 a 1053 Kg/m^3 (con incrementos de 2 Kg/m^3).

| VARIABLE MODIFICADA | Nº de Froude densimétrico | RESULTADOS CON JETLAG | | | |
|-------------------------------|---------------------------|---|--------------------|--|--------------------|
| | | Punto de máxima altura del eje del chorro | | Punto de impacto del eje del chorro con el fondo | |
| | | Z _{max} (m) | S _{media} | X _i (m) | S _{media} |
| ρ_o (Kg/m ³) | | | | | |
| 1043 | 29.08 | 9.16 | 14.20 | 14.15 | 43.32 |
| 1045 | 27.36 | 8.65 | 13.39 | 13.30 | 40.93 |
| 1047 | 25.92 | 8.23 | 12.70 | 12.61 | 38.93 |
| 1049 | 24.69 | 7.87 | 12.11 | 12.01 | 37.21 |
| 1051 | 23.61 | 7.55 | 11.60 | 11.49 | 35.73 |
| 1053 | 22.67 | 7.27 | 11.15 | 11.02 | 34.42 |

B.3.) Para $\rho_A = 1028 \text{ Kg/m}^3$, variamos la densidad del efluente: ρ_o , desde 1043 Kg/m^3 a 1053 Kg/m^3 (con incrementos de 2 Kg/m^3).

| VARIABLE MODIFICADA | Nº de Froude densimétrico | RESULTADOS CON JETLAG | | | |
|-------------------------------|---------------------------|---|--------------------|--|--------------------|
| | | Punto de máxima altura del eje del chorro | | Punto de impacto del eje del chorro con el fondo | |
| | | Z _{max} (m) | S _{media} | X _i (m) | S _{media} |
| ρ_o (Kg/m ³) | | | | | |
| 1043 | 29.57 | 9.30 | 14.43 | 14.38 | 44.00 |
| 1045 | 27.77 | 8.77 | 13.58 | 13.50 | 41.50 |
| 1047 | 26.27 | 8.33 | 12.86 | 12.76 | 39.41 |
| 1049 | 24.99 | 7.95 | 12.25 | 12.14 | 37.63 |
| 1051 | 23.88 | 7.63 | 11.72 | 11.61 | 36.09 |
| 1053 | 22.90 | 7.34 | 11.26 | 11.13 | 34.74 |

C) INFLUENCIA DE LA **ESTRATIFICACIÓN** EN LA COLUMNA DE AGUA.

Parámetros fijos: $S_A = 37.5 \text{ psu}$; $U_A = 0$; $H_A = 20 \text{ m}$; $h_o = 1 \text{ m}$; $\Phi = 60^\circ$; $\theta = 0^\circ$ (co-flowing), $S_o = 68 \text{ psu}$; $Q = 0.15708 \text{ m}^3/\text{s}$ ($U_o = 5 \text{ m/s}$); $D = 0.2 \text{ m}$;

C.1.) Representando una situación otoñal/invernal en el Mar Mediterráneo, sin presencia de Termoclina y una temperatura uniforme en la columna de agua del medio receptor, con valores de 15°, 18° y 21°C, por tanto densidades del medio receptor y del efluente acordes.

| VARIABLE MODIFICADA | Nº de Froude densimétrico | RESULTADOS CON JETLAG | | | |
|---------------------|---------------------------|---|--------------------|--|--------------------|
| | | Punto de máxima altura del eje del chorro | | Punto de impacto del eje del chorro con el fondo | |
| T (°C) | | Z _{max} (m) | S _{media} | X _i (m) | S _{media} |
| 15 | 23.67 | 7.56 | 11.57 | 11.49 | 35.73 |
| 18 | 23.76 | 7.58 | 11.605 | 11.52 | 35.83 |
| 21 | 23.70 | 7.60 | 11.63 | 11.54 | 35.91 |

C.2.) Representando una situación primaveral/estival en el Mar Mediterráneo, existiría una termoclina a profundidades entre 15 y 20m. Se considera que la picnoclina se sitúa a una profundidad de 15m desde superficie, con salto térmico entre la superficie y el fondo. Consideramos que el agua de alimentación se capta a profundidades inferiores (y no contaminada por salmuera), de una zona no afectada por la picnoclina con $T_A = 24^\circ\text{C}$ y, por tanto, $\rho_A = 1048.3 \text{ Kg/m}^3$;

| VARIABLE MODIFICADA | | Nº de Froude densimétrico | RESULTADOS CON JETLAG | | | |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---|--------------------|--|--------------------|
| Superficie | Fondo | | Punto de máxima altura del eje del chorro | | Punto de impacto del eje del chorro con el fondo | |
| | | | Z _{max} (m) | S _{media} | X _i (m) | S _{media} |
| T = 27 °C S = 37.5 psu | T = 15 °C S = 37.5 psu | 23.13 | 7.43 | 11.18 | 11.18 | 33.34 |
| T = 27 °C S = 37.5 psu | T = 15 °C S = 38 psu | 23.13 | 7.43 | 11.147 | 11.12 | 32.70 |

NOTA: Para este último caso se produce "neutral buoyancy level reached" "trapping level reached"

D) INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE EN EL MEDIO RECEPTOR (U_A) Y DEL **ÁNGULO HORIZONTAL** ENTRE EL CHORRO Y LA CORRIENTE (θ).

Parámetros fijos: $\rho_A = 1027.5 \text{ Kg/m}^3$; $H_A = 20 \text{ m}$; $h_o = 1 \text{ m}$; $\Phi = 60^\circ$; $\theta = 0^\circ$ (co-flowing), $\rho_o = 1052 \text{ Kg/m}^3$; $Q = 0.15708 \text{ m}^3/\text{s}$ ($U_o = 5 \text{ m/s}$); $D = 0.2 \text{ m}$; $N=1$

D.1.) Variamos U_A desde 0 hasta 0.9 m/s (incrementos de 0.15 m/s), para $\theta = 0^\circ$ (corriente de la misma dirección y sentido que el chorro).

| VARIABLE MODIFICADA | Nº de Froude densimétrico | RESULTADOS CON JETLAG | | | |
|---------------------|---------------------------|---|--------------------|--|--------------------|
| | | Punto de máxima altura del eje del chorro | | Punto de impacto del eje del chorro con el fondo | |
| U_A (m/s) | | Z_{\max} (m) | S_{media} | X_i (m) | S_{media} |
| 0 | 23.13 | 7.41 | 11.37 | 11.25 | 35.05 |
| 0.15 | 23.13 | 6.50 | 18.89 | 18.52 | 86.85 |
| 0.30 | 23.13 | 5.41 | 28.54 | 31.03 | 185.8 |
| 0.45 | 23.13 | 4.68 | 35.57 | 43.77 | 231.70 |
| 0.60 | 23.13 | 4.20 | 40.71 | 56.30 | 257.72 |
| 0.75 | 23.13 | 3.86 | 44.72 | 68.71 | 276.33 |
| 0.90 | 23.13 | 3.60 | 47.98 | 80.90 | 291.33 |

D.2.) Variamos U_A desde 0 hasta 0.9 m/s (incrementos de 0.15m), para $\theta = 90^\circ$ (corriente perpendicular al chorro).

| VARIABLE MODIFICADA | Nº de Froude densimétrico | RESULTADOS CON JETLAG | | | |
|---------------------|---------------------------|---|-------------|--|-------------|
| | | Punto de máxima altura del eje del chorro | | Punto de impacto del eje del chorro con el fondo | |
| U_A (m/s) | | Z_{max} (m) | S_{media} | Y/X_i (m) | S_{media} |
| 0 | 23.13 | 7.41 | 11.37 | 11.26/0 | 35.05 |
| 0.15 | 23.13 | 6.44 | 29.25 | 7.48/11.03 | 96.88 |
| 0.30 | 23.13 | 5.09 | 45.92 | 5.16/27.18 | 222.68 |
| 0.45 | 23.13 | 4.29 | 53.48 | 4.23/41.22 | 265.20 |
| 0.60 | 23.13 | 3.81 | 58.90 | 3.70/54.26 | 290.09 |
| 0.75 | 23.13 | 3.48 | 63.33 | 3.35/67.33 | 309.65 |
| 0.90 | 23.13 | 3.24 | 67.16 | 3.10/80.57 | 326.87 |

D.3.) Variamos U_A desde 0 hasta 0.9m/s (incrementos de 0.15m), con $\theta = 180^\circ$ (corriente de la misma dirección y sentido opuesto al chorro).

| VARIABLE MODIFICADA | Nº de Froude densimétrico | RESULTADOS CON JETLAG | | | |
|---------------------|---------------------------|---|-------------|--|-------------|
| | | Punto de máxima altura del eje del chorro | | Punto de impacto del eje del chorro con el fondo | |
| U_A (m/s) | | Z_{max} (m) | S_{media} | X_i (m) | S_{media} |
| 0 | 23.13 | 7.41 | 11.37 | -11.25 | 35.05 |
| 0.15 | 23.13 | 7.34 | 10.78 | -0.69 | 81.72 |
| 0.30 | 23.13 | 5.53 | 40.94 | 20.25 | 201.13 |
| 0.45 | 23.13 | 4.56 | 45.07 | 34.05 | 233.35 |
| 0.60 | 23.13 | 4.01 | 47.65 | 46.42 | 248.44 |

| | | | | | |
|------|-------|------|-------|-------|--------|
| 0.75 | 23.13 | 3.66 | 49.98 | 58.50 | 261.12 |
| 0.90 | 23.13 | 3.42 | 52.17 | 70.82 | 273.29 |

E) INFLUENCIA DEL **CALADO** DEL MEDIO RECEPTOR (H_A).

Parámetros fijos: $\rho_A = 1027.5 \text{Kg/m}^3$; $U_A = 0$; $h_o = 1\text{m}$; $\Phi = 60^\circ$; $\theta = 0^\circ$ (co-flowing), $\rho_o = 1052 \text{Kg/m}^3$; $Q = 0.15708 \text{m}^3/\text{s}$ ($U_o = 5 \text{m/s}$); $D = 0.2 \text{m}$; $N=1$

E.1) Variamos el calado en el medio receptor: H_A **entre 35m y 5m** (incrementos de 5m).

| VARIABLE MODIFICADA | Nº de Froude densimétrico | RESULTADOS CON JETLAG | | | |
|---------------------|---------------------------|---|--------------------|--|--------------------|
| | | Punto de máxima altura del eje del chorro | | Punto de impacto del eje del chorro con el fondo | |
| | | Z_{\max} (m) | S_{media} | X_i (m) | S_{media} |
| H_A (m) | | | | | |
| 35 | 23.13 | 7.41 | 11.37 | 11.25 | 35.05 |
| 30 | 23.13 | 7.41 | 11.37 | 11.25 | 35.05 |
| 25 | 23.13 | 7.41 | 11.37 | 11.25 | 35.05 |
| 20 | 23.13 | 7.41 | 11.37 | 11.25 | 35.05 |
| 15 | 23.13 | 7.41 | 11.37 | 11.25 | 35.05 |
| 10 | 23.13 | 7.41 | 11.37 | 11.25 | 35.05 |
| 5 | 23.13 | 4.28 | 6.8 | Impacta con la superficie. | |

E.2) Variamos el calado en el medio receptor: H_A entre 10m y 1m. Estudio detallado de impacto del chorro con la superficie.

| VARIABLE MODIFICADA | Máxima altura (center) | | Choque capa superficial (center) | | Punto de impacto del eje con el fondo | |
|---------------------|------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|---------------------------------------|-------------|
| | Z_{max} (m) | S_{media} | Z_{max} (m) | S_{media} | X_i (m) | S_{media} |
| H_A (m) | | | | | | |
| 10 | 7.4126 | 11.37 | | | 11.25 | 35.05 |
| 8 | 7.41 | 11.37 | 6.74 | 10.02 | 11.25 | 35.05 |
| 7.5 | 7.41 | 11.37 | 6.34 | 9.61 | 11.25 | 35.05 |
| 7.4 | 7.4 | 11.11 | 6.26 | 9.52 | | |
| 7 | 7 | 10.30 | 5.93 | 9.14 | | |
| 5 | 5 | 7.89 | 4.28 | 6.8 | | |
| 3.5 | 3.5 | 5.51 | 3.02 | 4.69 | | |
| 2 | 2 | 2.85 | 1.76 | 2.41 | | |
| 1 | VALORES NO VÁLIDOS | | | | | |

NOTA: En este caso también tenemos un número de Froude densimétrico de 23.13.

F) INFLUENCIA DE LA ALTURA DE LA BOQUILLA CON RESPECTO AL FONDO (h_o).

Parámetros fijos: $\rho_A = 1027.5 \text{Kg/m}^3$; $H_A = 20$; $U_A = 0$; $\Phi = 60^\circ$; $\theta = 0^\circ$ (co-flowing), $\rho_o = 1052 \text{Kg/m}^3$; $Q = 0.15708 \text{m}^3/\text{s}$ ($U_o = 5 \text{m/s}$); $D = 0.2 \text{m}$; $N=1$

F.1.) Variamos la altura de la boquilla con respecto al fondo: h_o entre 0.05 y 1.5m (incrementos de 0.5m).

| VARIABLE MODIFICADA | Nº de Froude densimétrico | RESULTADOS CON JETLAG | | | |
|---------------------|---------------------------|---|--------------------|--|--------------------|
| | | Punto de máxima altura del eje del chorro | | Punto de impacto del eje del chorro con el fondo | |
| | | Z _{max} (m) | S _{media} | X _i (m) | S _{media} |
| h_o (m) | | | | | |
| 0.05 | 23.13 | 6.46 | 11.37 | 10.97 | 31.85 |
| 0.5 | 23.13 | 6.91 | 11.37 | 11.11 | 33.35 |
| 1 | 23.13 | 7.41 | 11.37 | 11.25 | 35.05 |
| 1.5 | 23.13 | 7.91 | 11.37 | 11.39 | 36.79 |

NOTA: El origen de la coordenada vertical se refiere en todos los casos al fondo, no al difusor. Así para calcular la cota máxima alcanzada no hay más que sumar la propia altura de la boquilla respecto a la que da el propio modelo JETLAG.

Se ha tomado un valor de 0.05 en vez de 0 ya que es el mínimo que admite el modelo.