

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Estudio numérico y experimental de descargas sumergidas en medios homogéneos en reposo.
<i>Autor / Adscripción</i>	Hermilo Ramírez León Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Elidio Herrera Álvarez Miguel A. Vergara S. Instituto Politécnico Nacional
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 16(1): 35-45
<i>Fecha de publicación</i>	2001
<i>Resumen</i>	Se presenta un estudio numérico y experimental sobre el comportamiento de plumas verticales emitidas por fuentes puntuales. El modelo numérico utilizado, llamado QUETZAL/3D, resuelve las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos mediante diversos esquemas de diferencias finitas e incluye componentes que permiten el análisis de los procesos de mezclado; el estudio numérico se realizó en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), mientras que el estudio experimental fue llevado a cabo en las instalaciones de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Ambos estudios se complementaron con la finalidad de representar, de forma objetiva y en campo cercano, el comportamiento de los campos dinámico y de concentraciones de las descargas verticales en medios marinos en reposo.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/726

Estudio numérico y experimental de descargas sumergidas en medios homogéneos en reposo

Hermilo Ramírez León

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Elidio Herrera Álvarez
Miguel A. Vergara S.

Instituto Politécnico Nacional

Se presenta un estudio numérico y experimental sobre el comportamiento de plumas verticales emitidas por fuentes puntuales. El modelo numérico utilizado, llamado QUETZAL/3D, resuelve las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos mediante diversos esquemas de diferencias finitas e incluye componentes que permiten el análisis de los procesos de mezclado; el estudio numérico se realizó en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), mientras que el estudio experimental fue llevado a cabo en las instalaciones de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Ambos estudios se complementaron con la finalidad de representar, de forma objetiva y en campo cercano, el comportamiento de los campos dinámico y de concentraciones de las descargas verticales en medios marinos en reposo. Los resultados obtenidos son satisfactorios, ya que presentan aspectos relevantes del fenómeno en estudio, además de que coinciden con otros existentes en la literatura.

Palabras clave: descargas sumergidas, chorros verticales, análisis experimental, modelación numérica, procesos de mezclado, evolución de concentraciones.

Introducción

En los últimos años, el mar ha sido tomado como un depósito natural de residuos o desechos, producto de algunas de las actividades del hombre en las zonas costeras; debido a esto, ciertas áreas han sido contaminadas en demasía y sus ecosistemas han sido afectados a tal grado que la existencia de la vida marina está en riesgo (Fisher *et al.*, 1979). Por ello, se han creado normas cada vez más estrictas para que las aguas que se depositen en él sean tratadas y no sobrepasen los estándares de calidad, con el fin de realizar estudios de dispersión de la concentración residual, procurando que el impacto sea mínimo.

Actualmente, dentro de las disposiciones de calidad del agua, se está considerando con mayor frecuencia el uso de emisores submarinos para que las aguas sean vertidas en el fondo del mar y se aproveche con mayor eficiencia la capacidad de dilución na-

tural de los océanos. A pesar de la potencialidad que estos dispositivos ofrecen, existen algunos puntos que aún no han sido estudiados con suficiente profundidad y sólo se limitan a parametrizar los procesos, como algunos de los modelos que suelen encontrarse en los programas de cómputo comerciales (Jirka *et al.*, 1996; US-ACE, 1984).

Este trabajo pretende contribuir al conocimiento del comportamiento de descargas de aguas residuales en un medio marino, enmarcando aspectos fundamentales como la hidrodinámica y la dilución de las descargas. Estos procesos se analizan en un campo cercano y en un ambiente en reposo, para lo cual se hace una revisión exhaustiva, tanto numérica como experimental, de los procesos antes mencionados. En la parte numérica se utiliza el modelo tridimensional QUETZAL/3D, desarrollado en el IMTA. Este modelo resuelve las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos: la ecuación de conservación de masa, la ecuación

de cantidad de movimiento y la ecuación de energía, así como la ecuación de conservación de especies. Estas ecuaciones son resueltas en forma estadística para flujos incompresibles y se les acopla un modelo de turbulencia basado en el concepto de longitud de mezcla. La solución numérica se obtiene mediante la aplicación de esquemas en diferencias finitas, tomando como base la celda MAC (*Staggered Cell*) para la discretización espacial de las mismas. El algoritmo general considera una solución parabólica en el tiempo y una solución elíptica en el espacio.

Con respecto al estudio experimental, éste se realizó con la finalidad de obtener parámetros, apropiados a nuestros intereses, de los procesos de evolución de los campos dinámico, térmico y de concentraciones de las descargas verticales en medios homogéneos en reposo. Los resultados obtenidos con la modelación numérica son satisfactorios, ya que reprodujeron aspectos relevantes del fenómeno en estudio, según la confrontación con los resultados experimentales y con otros resultados existentes en la literatura.

Modelo físico-matemático

Las leyes de la dinámica de fluidos están bien establecidas y pueden ser formuladas de varias formas. Las leyes físicas fundamentales que, a excepción de los fenómenos relativistas y nucleares, se aplican al estudio de la dinámica de los fluidos, independientemente de su naturaleza, son la Ley de la Conservación de la Masa, la Segunda Ley de Newton y la Primera Ley de la Termodinámica. De esta forma pueden derivarse las ecuaciones fundamentales, las cuales, después de aplicarles las hipótesis simplificadoras de Boussinesq para flujos incompresibles, y la descomposición estadística sugerida por Reynolds, en donde las variables instantáneas son descompuestas en una parte media y una fluctuante, tal que $F = \bar{F} + f$; con este procedimiento, las ecuaciones instantáneas son escritas en un sistema de ecuaciones estadísticas acopladas como se indica a continuación.

La ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

La ecuación para la velocidad:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_N} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\Delta \rho}{\rho_N} g_i + \nu_N \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial(\overline{u_i u_j})}{\partial x_j} \quad (2)$$

La ecuación para la temperatura:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + U_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \alpha_N \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_j^2} - \frac{\partial(\overline{u_j \theta})}{\partial x_j} \quad (3)$$

La ecuación para las especies:

$$\frac{\partial \bar{C}_\alpha}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{C}_\alpha}{\partial x_j} = D_N \frac{\partial^2 \bar{C}_\alpha}{\partial x_j^2} - \frac{\partial(\overline{u_j C_\alpha})}{\partial x_j} \quad (4)$$

donde:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_N} = \frac{\rho_N - \rho_E}{\rho_N} = \frac{T_N - T_E}{T_N} \quad (5)$$

Es decir, que la densidad es dependiente de las variaciones de temperatura en el medio; la ecuación 5, multiplicada por la aceleración de la gravedad, da origen al término de flotación (ecuación 2).

Las correlaciones dobles $\overline{u_i u_j}$, $\overline{u_i \theta}$ y $\overline{u_i C_\alpha}$ son conocidas como *esfuerzos de Reynolds*, *flujo de calor* y *flujo de masa*, respectivamente, e involucran el problema de cerradura en las ecuaciones 2, 3 y 4, para lo cual es necesario considerar aproximaciones suplementarias, comúnmente llamadas *modelos de cerradura*, que conduzcan a un sistema de ecuaciones que pueda ser resuelto mediante algún procedimiento numérico. En este trabajo se incluye un modelo de *longitud de mezcla* para evaluar las correlaciones dobles mediante coeficientes de viscosidad equivalente. De esta forma, los *esfuerzos de Reynolds* son modelados con la siguiente expresión:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{u_i u_j} + \frac{\overline{u_i u_j}}{3} \delta_{ij} \right) = \left(\nu_{T1} \delta_{i1} \delta_{1m} + \nu_{T2} \delta_{i2} \delta_{2m} + \nu_{T3} \delta_{i3} \delta_{3m} \right) \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_l \partial x_m} \quad (6)$$

Esta ecuación toma en cuenta la anisotropía del flujo, al considerar tres coeficientes ν_T según el sistema de ejes (x, y, z).

En forma análoga, el flujo de calor es modelado con la siguiente ecuación:

$$-\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_j \theta}) = \left(K_{T1} \delta_{i1} \delta_{1m} + K_{T2} \delta_{i2} \delta_{2m} + K_{T3} \delta_{i3} \delta_{3m} \right) \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_l \partial x_m} \quad (7)$$

donde los coeficientes K_{Ti} representan la difusividad de calor y son optimizados mediante el número de Prandtl turbulento, de tal forma que $K_{Ti} = \nu_{Ti}/P_{RT}$. En forma similar, el flujo de masa es modelado con la siguiente relación:

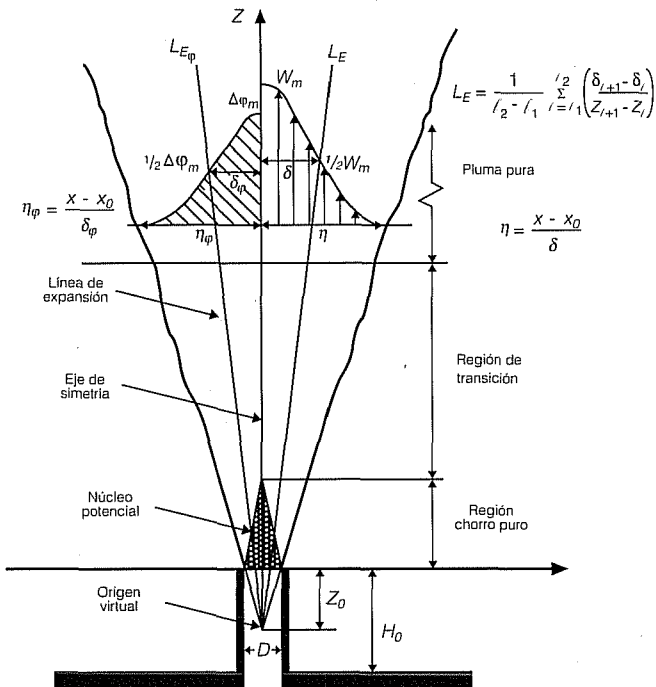
$$-\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{U_j C_\alpha}) = \left(K_{C1} \delta_{l1} \delta_{1m} + K_{C2} \delta_{l2} \delta_{2m} + K_{C3} \delta_{l3} \delta_{3m} \right) \frac{\partial^2 \overline{C_\alpha}}{\partial x_l \partial x_m} \quad (8)$$

El coeficiente K_{Ci} representa la difusividad de masa y es evaluado considerando el número de Schmidt turbulento ($K_{Ci} = \nu_{Ti}/Sch_T$).

Los coeficientes turbulentos ν_{Ti} , P_{RT} y Sch_T requieren de un trabajo de calibración y validación que dependen fuertemente de las condiciones del flujo que se esté resolviendo.

En la ilustración 1 se presenta la descripción hipotética, así como los principales parámetros de los chorros descargados en medios homogéneos y en reposo. Si se seleccionan, a una determinada altura z , la velocidad máxima vertical $W_m(z)$ o la desviación máxima de los escalares $\Delta\phi_m(z)$ (donde $\Delta\phi$ representa la temperatura $\Delta T_m(z)$ o la concentración de especies $C_m(z)$), y la

Ilustración 1. Esquema de definición de un chorro turbulento simétrico con flotación positiva (Ramírez, 1991).

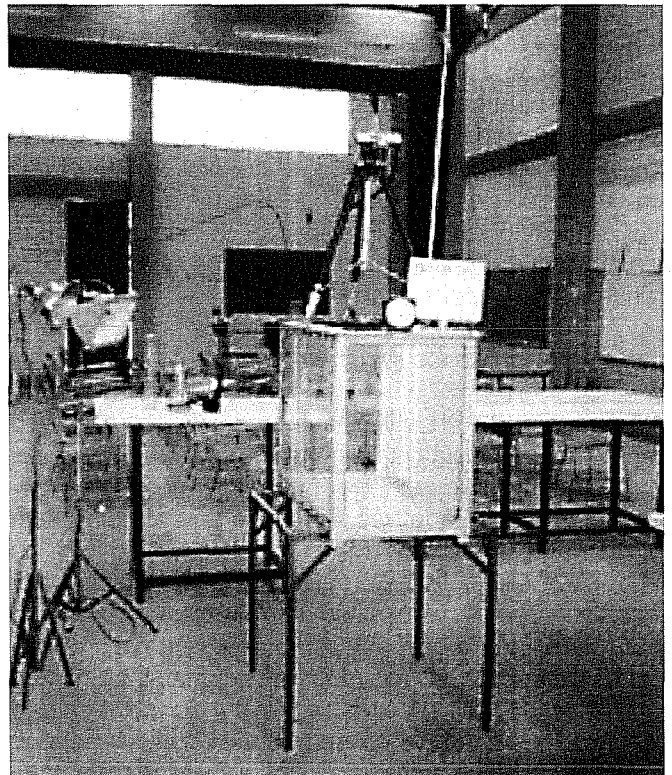


distancia $\delta(z)$ entre el eje de simetría donde se encuentra la velocidad máxima y el punto donde la velocidad vale la mitad de la velocidad máxima, denominada semilongitud del eje, se obtiene la pendiente de la línea de expansión L_E , esquematizada en la ilustración 1, la cual indica la evolución del chorro. De forma análoga se obtiene la pendiente L_{E_ϕ} para los escalares.

Estudio experimental

El estudio experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del IPN. La instalación empleada en el modelo consistió en un tanque rectangular construido mediante armazón de acero y paredes transparentes de acrílico, con una altura de 0.68 m y una base de 0.44 por 0.68 m (ilustración 2). En el fondo de dicho tanque se hizo un orificio con las dimensiones apropiadas para la descarga. Para obtener una mejor visualización del fenómeno en estudio durante la grabación, se cubrieron con papel *contact blanco* el interior de la pared posterior y el fondo respecto a la zona de enfoque de la cámara de video y la parte interna del fondo. La ilustración 2 muestra la instalación empleada.

Ilustración 2. Vista parcial de la instalación empleada.



El estudio se realizó en las condiciones siguientes: velocidad de emisión de 20.8 cm/s; el diámetro de descarga de 0.6 cm; la profundidad de vertido de 50.0 cm, la densidad del efluente descargado y medio receptor de 950.0 y 1,000.0 kg/m³, respectivamente; el número de Reynolds de 1,095.0, y el Froude densimétrico de 13.98.

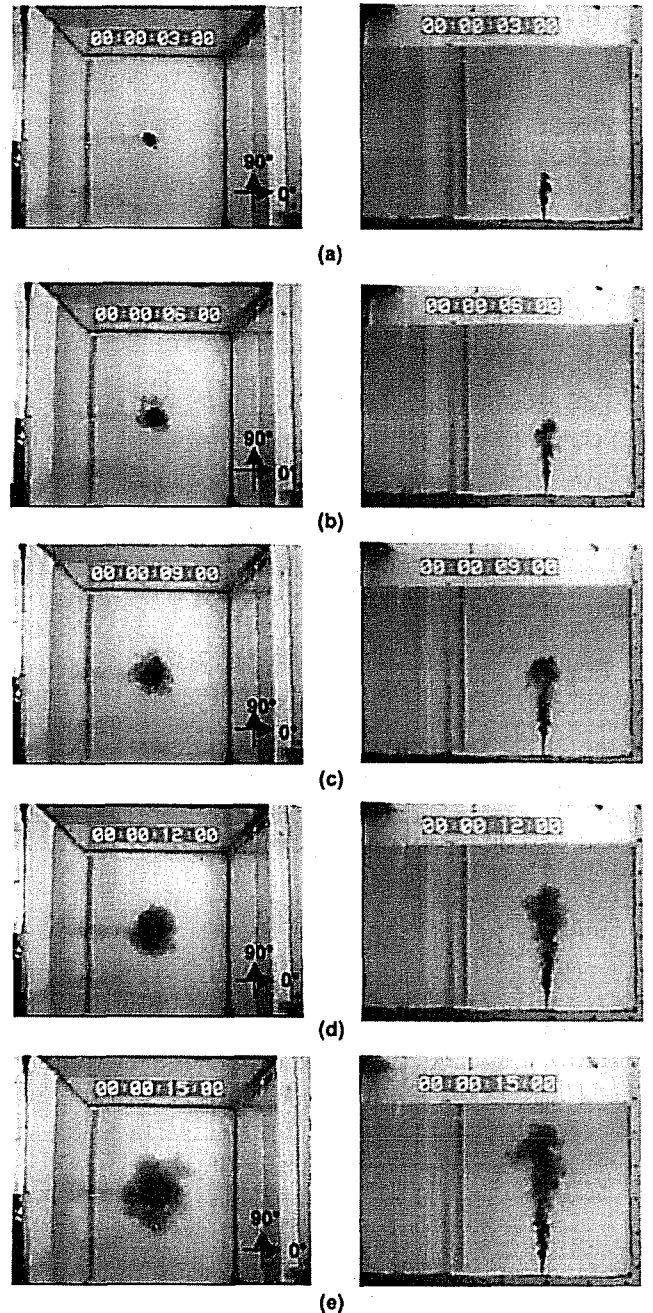
Procesamiento de la información

Se registraron los experimentos realizados en el laboratorio con una videocámara marca Handy Cam de formato V-8. El comportamiento del fenómeno en estudio se grabó desde dos diferentes posiciones, una de las cuales se realizó lateralmente, con la finalidad de observar la evolución ascendente del chorro, y otra en planta, para observar planos. Para la digitalización de la grabación en el video analógico se escogió el momento de inicio de la inyección del trazador en la cinta del video, grabando el código de tiempo a la misma; es decir, el tiempo a cada cuadro de registro, siendo posible obtener treinta cuadros por segundo, lográndose con esto localizar con exactitud cada momento del evento, para lo cual se utilizó un equipo Sony Evo-720. Posteriormente se transfirió la imagen de video a un equipo de edición no lineal (Macintosh), habilitado con la paquetería *Media 100*, donde se escogieron los tramos y cuadros deseados para ser convertidos a *Applemovie*. A continuación se transformaron a *Cine-pack* para PC, lo cual permite que puedan ser reproducidos con movimiento en cualquier computadora personal habilitada con *Quick Time Movie*. Esta conversión se efectuó teniendo siempre a la vista el código de tiempo para identificar el cuadro de interés. La visualización de los archivos generados que contienen las simulaciones ya digitalizadas se realizó en una computadora Pentium, con la ayuda de un paquete de visualización *Adobe Premier 4.2*.

Interpretación de los resultados

La duración del chorro, desde su salida por el orificio de descarga hasta que alcanza la superficie libre del agua, fue, en promedio, de 15.33 segundos; se congelaron imágenes cada tres segundos de evolución, tanto en planta como en perfil. Una vez seleccionadas las imágenes, su análisis se realizó con el software *Photoshop* versión 4.0, y consistió en convertir la imagen en color a escala de grises, y sobre ésta se trazó una malla refinada, con la finalidad de obtener información más exacta, y a espacios pequeños, de la intensidad del color en cada punto de interés. Cabe mencionar que el análisis de estas imágenes se realizó tal cual se

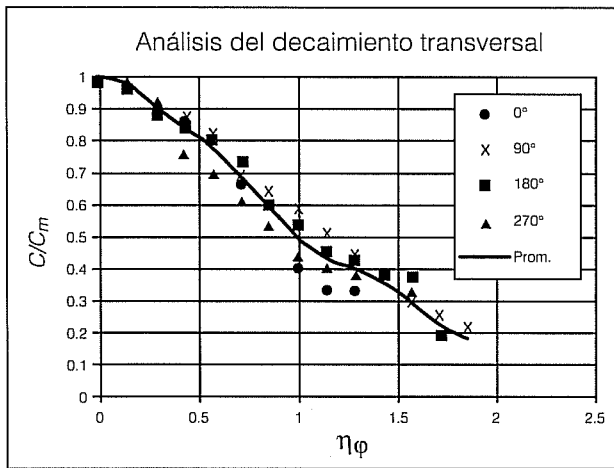
Ilustración 3. Evolución del chorro en planta y perfil a cada tres segundos.



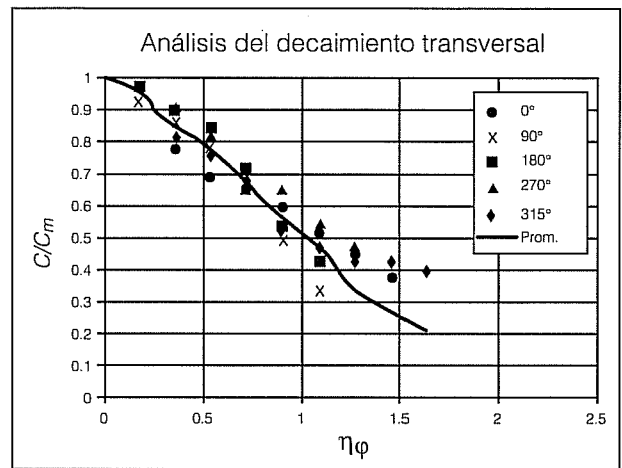
obtuvieron después del procesamiento; es decir, sin ningún retoque o modificación.

En las vistas en planta de la ilustración 3 se observa que la mancha no es homogénea; esto es, la propagación de la tinta a partir del eje de simetría del chorro no es igual en todas direcciones. Por tanto, se recurrió a examinar el decaimiento transversal de la

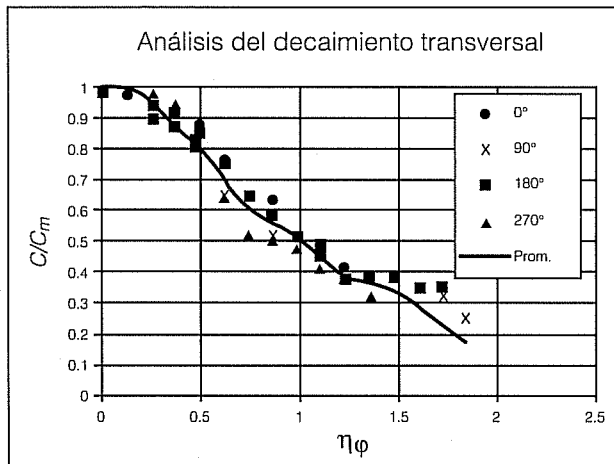
Ilustración 4. Decaimiento transversal de la concentración a cada tres segundos de evolución, según los planos definidos en la ilustración 3.



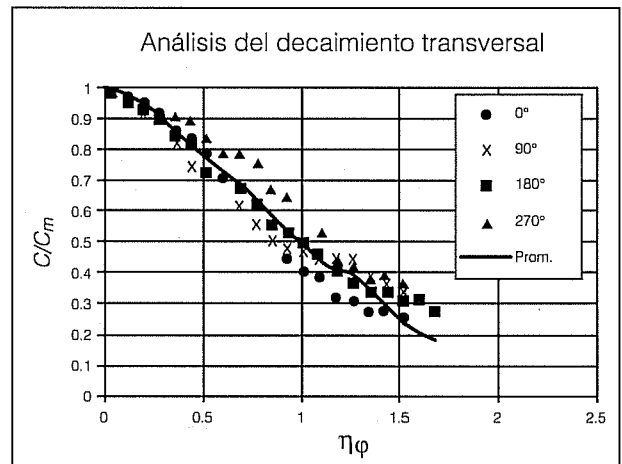
(a)



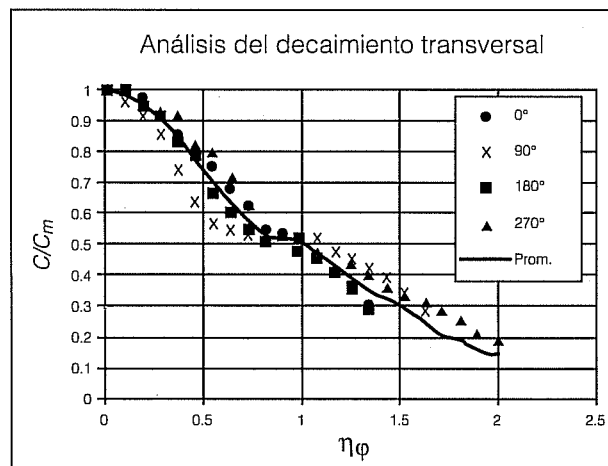
(b)



(c)



(d)



(e)

dilución (C/C_m) en diferentes planos y direcciones. Con estos valores se obtuvo la curva de decaimiento medio para cada uno de los diferentes planos analizados, como se aprecia en la ilustración 4, donde C es la concentración puntual y C_m la concentración máxima en el plano de interés (en el centro de la mancha); η_φ es la variable de afinidad definida como:

$$\eta_\varphi = \frac{x_i + x_\varphi}{\delta_\varphi} \quad (9)$$

Es decir, igual al cociente de la distancia a la que se desea conocer C , respecto al centro de la mancha entre la distancia a la que se encuentra el valor $1/2C_m$ en el mismo plano.

Para conocer la variación de la concentración máxima en cada plano (C_m) sobre el eje z respecto a la concentración en la descarga (C_ε), se seleccionaron 46 imágenes en elevación, separadas cada $1/3$ de segundo, obteniéndose la distancia recorrida por la pluma entre imágenes y , por tanto, la velocidad (ilustración 5).

Ilustración 5. Variación de la C_m/C_ε respecto de Z/D .

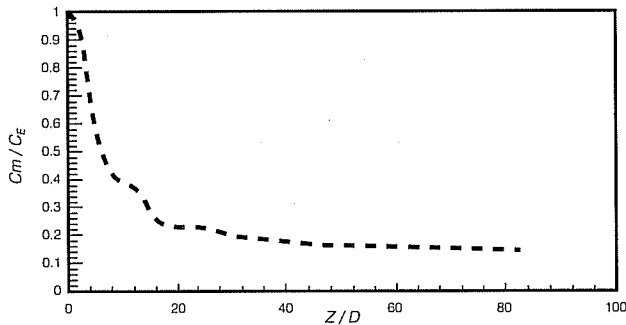


Ilustración 6. Pendiente de la línea de expansión.

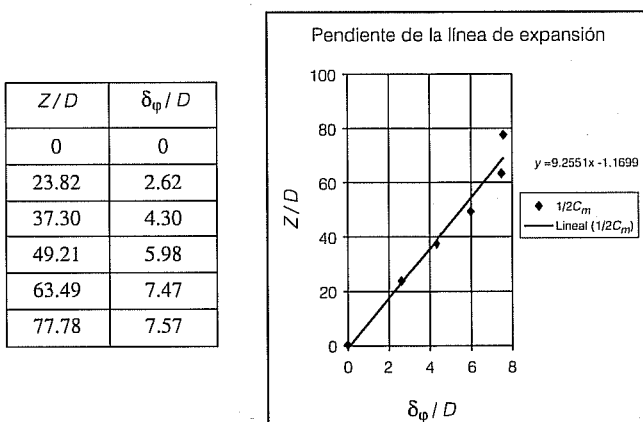
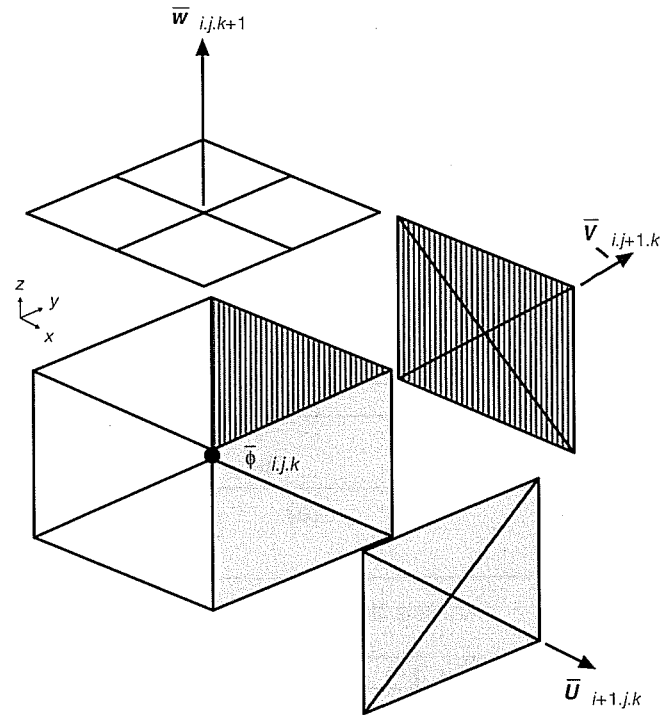


Ilustración 7. Célula de discretización MAC.



Por lo que respecta a la línea de expansión L_{E_φ} , se seleccionaron imágenes de video para diferentes planos y ensayos, obteniéndose la distancia δ_φ correspondiente al valor de $C_m/2.0$ y el promedio respectivo. Este procedimiento se aplicó a cada uno de los planos seleccionados, mismos que se representan en la ilustración 6.

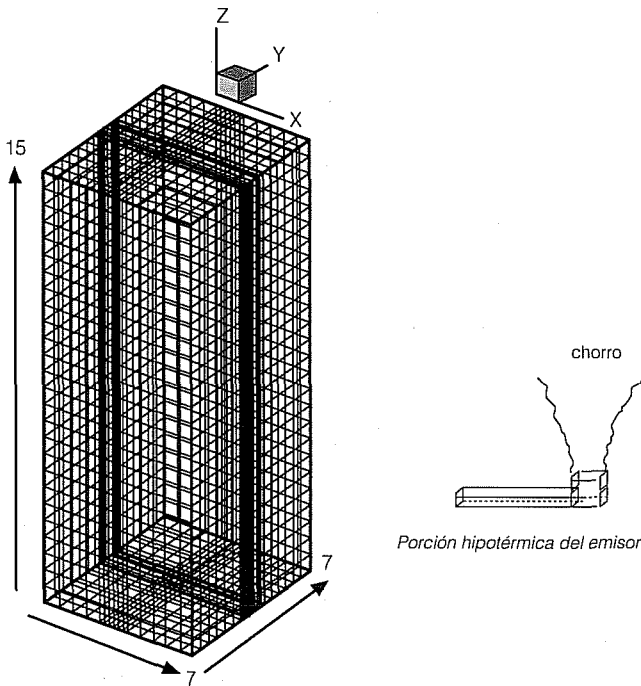
Método numérico de solución

El sistema estadístico de ecuaciones introducido anteriormente fue resuelto por vía numérica; para la discretización espacial se utilizó la celda MAC, como se indica en la ilustración 7 (Fletcher, 1988), la cual utiliza el método de diferencias finitas y una formulación explícita en el tiempo (ecuación 10). Para resolver la ecuación de continuidad se utiliza el método de compresibilidad artificial, el cual relaja presiones y velocidades en cada Δt , hasta obtener que la $\text{div } \vec{V}^{n+1} \rightarrow 0$ (Ramírez, 1991).

$$\left[\varphi_{i,j,k} \right]^{n+1} = \left[\varphi_{i,j,k} \right]^n + \Delta t \left[\text{convección} + \text{difusión} + \dots \right]^n \quad (10)$$

Las dimensiones del dominio de estudio y la malla de cálculo se denotan en la ilustración 8. Como puede

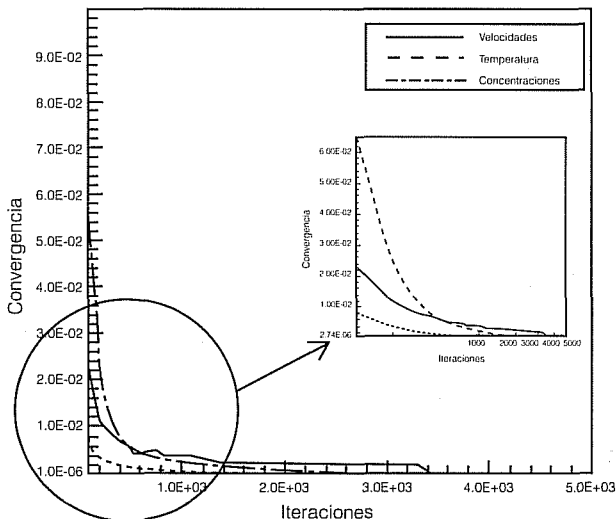
Ilustración 8. Malla de cálculo.



verse, la malla es cerrada al centro de cada una de las caras, debido a que la emisión del fluido se considera justamente al centro del dominio y es donde se presentan los gradientes más fuertes de las variables físicas.

Los resultados que se analizan corresponden a simulaciones numéricas realizadas en condiciones correspondientes al estudio experimental; es decir, tomando en cuenta la igualdad del número de Froude

Ilustración 9. Curvas de convergencia de las ecuaciones.



densimétrico y las relaciones Z/D y $\Delta\rho/\rho_e$. Los coeficientes de viscosidad cinemática turbulenta, los números de Schmidt y el de Prandtl, fueron calibrados con estas condiciones en un estudio preliminar de ajuste del modelo. Se consideró que para $t = 0$, el campo de velocidades y de concentraciones fue 0 en todo el dominio de estudio. La presión interna y externa de la pluma fue la hidrostática; además, se optó por una temperatura de 20°C en todo el dominio.

Originado por las condiciones experimentales y para satisfacer la relación Z/D , el número de nodos en la malla de cálculo resultó de 1,449,175 (es decir 91 x 91 x 175 puntos según los ejes (x, y, z)), por lo que fue necesario recurrir a la *Cray Origin 2000* de la UNAM para realizar las simulaciones. Los esquemas propuestos condujeron a una solución consistente. La ilustración 9 muestra la convergencia de las cantidades medias de la presente aplicación del modelo numérico.

Ilustración 10. Corte transversal y en el plano x-z de las líneas de contorno de la velocidad W (m/s).

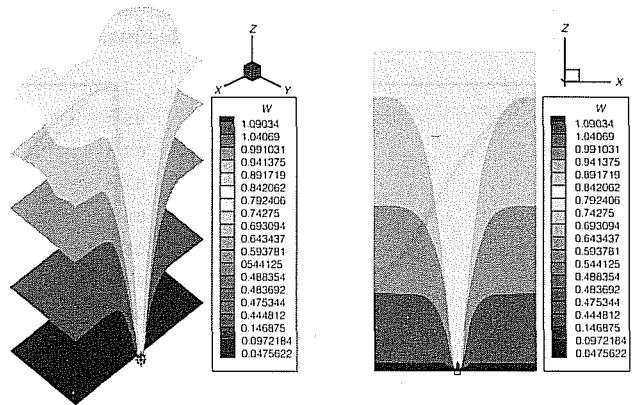
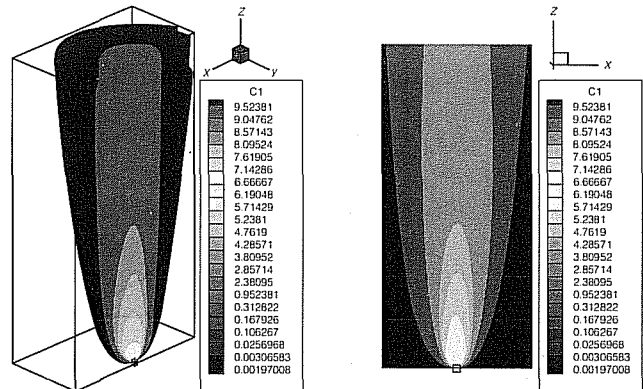


Ilustración 11. Corte transversal y en el plano x-z de las líneas de contorno de la concentración (mg/m^3).



La ilustración 10 nos muestra los contornos de la velocidad W en el plano x - z y un corte en perspectiva en donde se aprecian perfectamente las envolventes de la misma a diferentes niveles, además de la simetría del chorro hacia ambas paredes.

El comportamiento de la concentración durante la evolución del chorro es el aspecto de mayor trascendencia dentro de la validación del modelo. Por tal motivo, la ilustración 11 presenta esta dispersión en el dominio de estudio, donde se observan los contornos y envolventes, resultados que se discuten con mayor profundidad en las secciones siguientes.

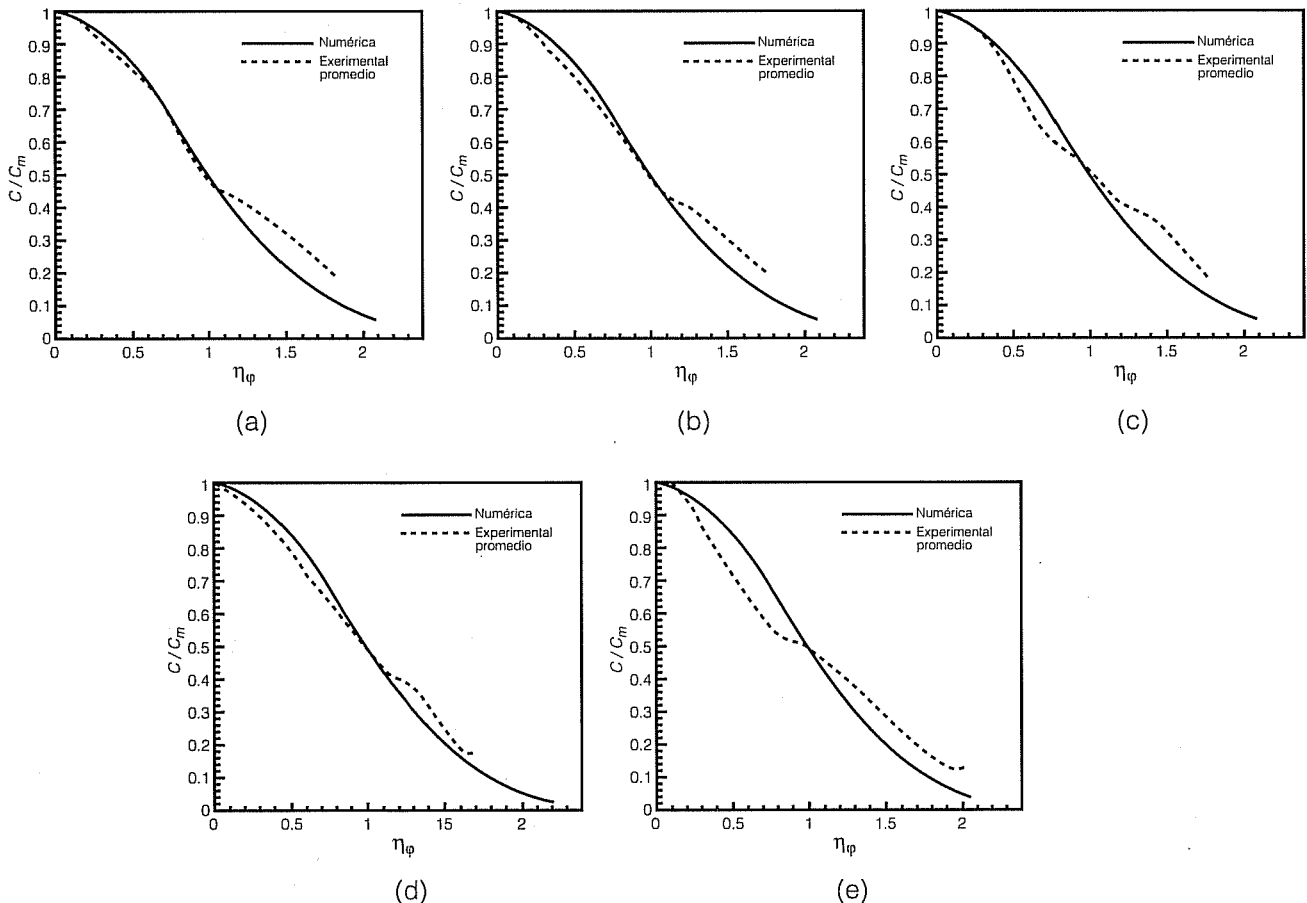
Confrontación de los resultados experimentales y numéricos

Una vez parametrizados los resultados experimentales, se procedió a la calibración de los coeficientes numéricos y de equivalencia, a fin de reproducir la distribución del campo de velocidades y de concentraciones mediante la confrontación de las líneas de expansión

L_E y L_{E_0} obtenidas experimentalmente. Los valores considerados como óptimos fueron los siguientes: $v_{T1} = v_{T2} = 0.02$ y $v_{T3} = 0.0015$ m²/s, $S_{cT} = 2.0$ y $P_{T} = 2.0$.

La ilustración 12 muestra la comparación del decaimiento transversal numérico y experimental promedio en la evolución del contaminante según los tiempos indicados en la ilustración 3, donde se aprecia que para $\eta_\phi \leq 1.0$ las evoluciones son similares, aunque conforme se aleja la zona de análisis, los resultados son menos coincidentes debido a que el fenómeno se rige por otros procesos, como se verá más adelante. Para cuando $\eta_\phi > 1.0$, región que se localiza en la zona más alejada del eje de simetría del chorro, las curvas presentan discrepancia mayor de aproximadamente 8% para los resultados experimentales. Esta variación se atribuye fundamentalmente a dos conceptos: el primero de ellos se debe a que la capa límite o los procesos de mezclado que definen los contornos irregulares del chorro (ilustración 3) no son reproducidos por las aproximaciones que se consideran en el modelo; el segundo se debe a que también ocurren procesos de dilu-

Ilustración 12. Comparación numérico-experimental del decaimiento transversal de la concentración. El intervalo entre cada gráfica es de 3.0 s, según los planos definidos en la ilustración 3.



ción entre la sustancia emitida y el medio ambiente; este proceso no se considera en la ecuación 4. Actualmente se complementa este trabajo con estudios en esta dirección, que tratan con mayor profundidad estos procesos (Martínez, 2001).

Un aspecto importante de análisis es el comportamiento del chorro sobre el eje de simetría; es decir, la concentración C_m en cada plano. La ilustración 13 muestra la confrontación de resultados numérico-experimentales donde se pueden apreciar tres diferentes zonas: con valores de $Z/D < 10$, zona que es completamente dominada por la cantidad de movimiento inicial, ambas presentan un comportamiento muy similar; posteriormente existe una zona de transición $10 \leq Z/D \leq 14$ en donde empiezan a marcarse otros efectos, como la dilución de la pluma (a pesar de que el modelo no incluye la dilución local, las simulaciones se aproximan a las mediciones experimentales); finalmente, para relaciones Z/D mayores a catorce pareciera que no existe relación alguna, ya que ambas curvas tienden a valores diferentes. Esta diferencia se atribuye esencialmente a que en esta zona el proceso es dominado por la dilución del trazador dentro del agua y a que este proceso de destrucción o reacción no se ha incluido en la ecuación del contaminante, como se mencionó anteriormente. Sin embargo, cuando el decaimiento longitudinal obtenido con el modelo numérico se compara con otras fuentes bibliográficas que consideran sustancias conservativas, los resultados convergen a valores similares (Sini, 1986).

La línea de expansión L_{E_p} es de gran utilidad dentro de la validación del modelo; en este caso, la pendiente obtenida con las simulaciones fue de 0.1127 y la obtenida en la parte experimental fue de 0.1088; en la literatura especializada se obtiene un valor aproximado $L_{E_p} = 0.100$, como puede leerse en Chen y Rodi (1980).

Ilustración 13. Comparación numérico-experimental del decaimiento transversal de la velocidad sobre el eje de simetría.

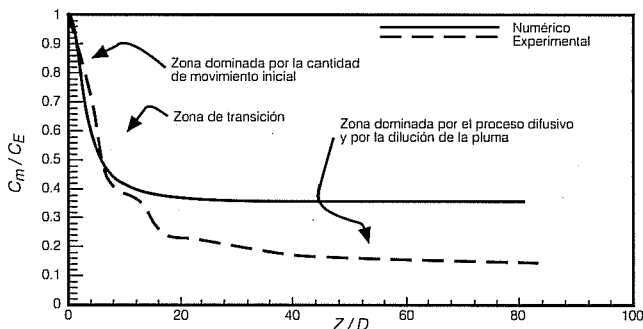
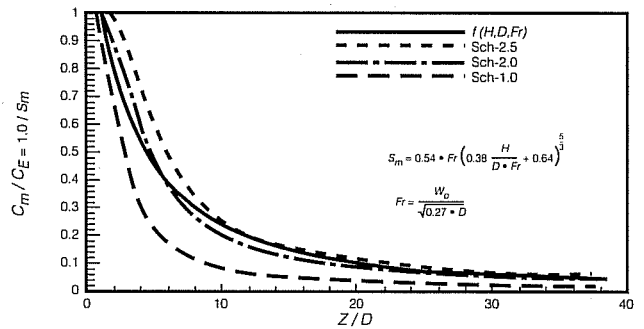


Ilustración 14. Calibración del número de Schmidt en función del decaimiento de la concentración.



De igual forma, el decaimiento de las concentraciones fue estimado con ayuda de la fórmula propuesta por Cederwall (Quentin y De Rouville, 1986):

$$S_m = 0.54 \cdot Fr \left(0.38 \frac{H}{D \cdot Fr} + 0.64 \right)^{5/3} \quad (11)$$

Este criterio se graficó y se utilizó para calibrar el número de Schmidt, considerándose como óptimo valor el de $S_{c_T} = 2.0$, siendo que el mejor ajuste se presenta con la ecuación, como lo muestra la ilustración 14.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente estudio son satisfactorios e interesantes, ya que permitieron validar el modelo físico-matemático y el algoritmo de solución numérica en tres dimensiones, en un flujo que se descarga en un medio ambiente en reposo. La mayoría de los modelos existentes en la literatura son aproximaciones bidimensionales, ya sea en el plano horizontal ($x-y$) o bien en el plano vertical ($x-z$). Un esfuerzo computacional de relevancia fue realizado para la evaluación y optimización de los coeficientes equivalentes de turbulencia, así como para los números de Schmidt y de Prandtl; estos coeficientes permiten caracterizar los procesos de mezclado dentro de las ecuaciones.

Dentro de la comparación de resultados numérico-experimentales, es visible la tendencia que presentan las ilustraciones 12 y 13 debida a la presencia de estructuras turbulentas originadas por el desarrollo de la capa límite tridimensional observada en el estudio experimental (ilustración 3). Por otro lado, la dilución es un mecanismo de importancia y es necesario incluirla en la ecuación de concentraciones. Esta evidencia queda de manifiesto al observar la ilustración 4. Ambos

mecanismos son estudiados actualmente en forma numérica y experimental, a fin de poder contar con un modelo en tres dimensiones apropiado para estos flujos (Martínez, 2001). De igual forma, se realizan arreglos sobre el modelo para aplicaciones de descargas en medios marinos estratificados por salinidad y temperatura, que inducen variaciones de densidad y, consecuentemente, provocan que el término de flotación sea un mecanismo importante en las ecuaciones (Rodi, 1982; Ramírez y Herrera, 2001).

Agradecimientos

Al C. Alejandro Cisneros, de la Coordinación de Tecnología de Comunicación, Participación e Información del IMTA, por las facilidades otorgadas en el análisis y procesamiento de las imágenes.

Recibido: 13/12/1999
Aprobado: 07/03/2000

Referencias

- Chen, C.J. y W. Rodi, *Vertical turbulent buoyant jet*, HMT, Pergamon Press, 1980.
- Fisher, H.B., J. Imberg, E.J. List y N.H. Brooks, *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press, Inc., Nueva York, 1979.
- Fletcher, C.A.J., "Computational techniques for fluid dynamic", vols. 1 y 2, *Fundamental and General Techniques*, Editorial Springer-Verlag, 1988.
- Herrera, A.E., *Estudio numérico y experimental de descargas verticales de emisores sumergidos en cuerpos de agua en reposo*, tesis desarrollada para obtener el grado de maestro en ciencias con especialidad en hidráulica, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional, México, 1999.
- Martínez, O.F., *Análisis de las estructuras turbulentas con modelos de orden superior en chorros turbulentos*, tesis en desarrollo para obtener el grado de maestro en ciencias con especialidad en hidráulica, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional, México, 2001.
- Jirka, H.G., L.R. Doneker y W.S. Hinton, *User's manual for CORMIX: a hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters*, Office of Science and Technology U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 1996.
- Quetin, B. y M. de Rouville, "Submarine sewer outfalls a design manual", *The International Journal for Marine Environmentalists, Scientists, Engineers, Administrators, Politicians and Lawyers*, vol. 17, núm. 4, 1986, pp. 131-183.
- Ramírez León, H., *Modelisation au second ordre d'écoulements turbulents fortement chauffés*, tesis de doctorado del Laboratoire de Mécanique de Fluides de la Ecole Centrale de Nantes, Nantes, 1991.
- Ramírez León, H. y E. Herrera Álvarez, *Estudio numérico de descargas submarinas en medios estratificados, con un modelo en 3D*, artículo en elaboración para la revista *Ingeniería Hidráulica en México*, México, 2001.
- Sini, J.F., *Modelisation d'écoulements turbulents libres bidimensionnels avec effets de flotabilité - Cas du panache en milieu stratifié*, PHD, Institut de Mecanique Statistique de la Turbulence, Université d'Aix-Marseille II, Marsella, 1986.
- Rodi, W., *Turbulent buoyant jet and plumes*, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, Alemania, 1982.
- U.S. Army Corps of Engineers, *Shore protection manual*, Coastal Engineering Research Center, 1984.

Abstract

Ramírez León, H., E. Herrera Álvarez & M.A. Vergara Sánchez, "Numerical and experimental study of submerged discharges in stagnant and homogeneous water bodies", *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*, vol. XVI, num. 1, pages 35-45, January-March, 2001.

The main objective of this paper is to improve, numerically and experimentally, the understanding of wastewater discharges behavior in a stagnant water body. The numerical model used, called QUETZAL/3D, solves the fundamental equations of fluid mechanics using several schemes of finite differences and takes into account mixing processes. Numerical study was developed at IMTA. Experimental study was carried out at ESIA. Both studies are complementary and analyse in near field the behavior of dynamical, thermal and species concentration for vertical discharges in an homogeneous jet. Results are encouraging since several relevant aspects of the phenomenon are shown, and they are in good agreement when compared to our experimental analysis and with other results found in published reports.

Key words: submerged discharges, vertical jets, experimental analysis, numerical modeling, mixing process, concentration evolution.

Dirección institucional de los autores:

Hermilo Ramírez León
Correo electrónico: hrleon@tlaloc.imta.mx

Coordinación de Tecnología Hidráulica
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532
Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos
México

Elidio Herrera Álvarez
Miguel Ángel Vergara Sánchez
Correo electrónico: maverg_jpn@hotmail.com

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
Instituto Politécnico Nacional
México, D.F.