

## **Simulation and prediction of hydrodynamic performance at University of Zulia's wastewater stabilization ponds using a 3D-Computational Fluid Dynamic (CFD) model**

**Gerardo Aldana y Nibis Bracho**

*Centro de Investigación del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Apdo 15380.  
E-mail: gerardoaldana\_21@hotmail.com*

### **Abstract**

The University of Zulia wastewater treatment is comprised for three series of stabilization ponds, 3 facultative (A1, B1, C1) and 6 maturation (A2, A3, B2, B3, C2, C3) which have been operational since 1992 when it was founded. A series of simulation and prediction of hydrodynamic behavior in WSPs using a model HYDRO-3D calibrated is the aim of this study. Two task stages conformed by 15 hydraulic model simulations were made in order to evaluate the hydraulic performance based on outputs vector plots. The former was simulated with the original lagoon design built in 1992, that included solely an inlet and an outlet pipe for each lagoon. The second was simulated with a U shape pipe at the outlet and multiple inlets, it which was constructed in 1995 as part of system improvements. Results from HYDRO-3D program showed that original design had short-circuited and dead zone around of inlet area due to uneven shear stress. Second series of runs to facultative lagoons (A1, B1, C1), showed that a U shape pipe placed at outlet eliminated a conflictive zone and hence improved mixing within the basin. Wind effects produced more damaged on maturation pond when inlet is placed at the bottom level (current) in comparison with one on the top level (simulated). HYDRO-3D simulation suggested that to increase mixing on maturation ponds A2 and B2 a double directly pipe at the top level would increase hydraulic performance.

**Key words:** Calibrated model, CFD, hydraulic performance, waste stabilisation pond, vector plot, hydrodynamic.

## **Simulación y predicción de la hidrodinámica en las lagunas de estabilización de LUZ utilizando un modelo computacional en 3D**

### **Resumen**

Las lagunas de la Universidad del Zulia están conformadas por tres series, 3 facultativas (A1, B1, C1) y 6 de maduración, 2 en serie por cada laguna facultativa (A2, A3, B2, B3, C2, C3). El objetivo principal de este estudio fue simular el comportamiento hidrodinámico utilizando un modelo calibrado HYDRO-3D. Dos etapas específicas fueron estudiadas en las cuales 15 alternativas de simulación fueron analizadas. La primera con las condiciones originales de diseño (1992) y la segunda con las modificaciones implementadas en las entradas y salidas (1995) en las lagunas de LUZ. Los resultados para las condiciones originales arrojaron que el diseño original presentaba zonas críticas para las lagunas facultativas y de maduración, ocasionadas por el flujo advectivo producido por la descarga unitaria del afluente en la superficie. Los resultados simulados para las modificaciones demostraron que al aumentar el número de salidas de una a dos incrementa el porcentaje de mezcla y disminuye las zonas de cortos circuitos en las lagunas facultativas (A1, B1, C1); no ocurriendo así en las de maduración. El efecto del viento lateral y con dirección

predominante noreste 30° con respecto al afluente influye notablemente, siendo más desfavorable cuando el afluente fue colocado en el fondo (actual) en vez de la superficie (simulado) para las lagunas de maduración (A2 y B2). Las conclusiones indicaron que la eficiencia hidráulica se podría incrementar en las lagunas (A2 y B2), cuando se simula dos tuberías superficiales en el afluente en vez de una sumergida.

**Palabras clave:** Dinámica de flujo computacional DFC, hidrodinámica, lagunas de estabilización, modelo calibrado, hidráulica en lagunas, vectores de velocidad.

## Introducción

Las lagunas de estabilización son un sistema de tratamiento biológico convencional. En la actualidad su uso es cada vez más frecuente en tratamientos biológicos primarios, secundarios y terciario [1].

Las lagunas son diseñadas generalmente en forma rectangular y de acuerdo a investigaciones realizadas por [2], [3] y [4]; la relación largo/ancho ( $L/W > 8 - 10$ ) juega un papel importante; así como también, el bajo caudal ( $< 6 \text{ l/s}$ ) debido a que promueven el flujo pistón. En estudios realizados en la Universidad de Surrey, Inglaterra revelaron que el viento, la fricción en las paredes y fondo son otros parámetros importantes en la hidrodinámica de laguna [5].

La hidrodinámica en lagunas de estabilización es muy compleja, debido a que involucra varios factores, tales como: geometría, relación  $L/W$ ; temperatura, pH; constante de muerte endógena, número de dispersión (mezcla axial, transversal y/o vertical) y tiempo de retención hidráulico real. Hoy en día, este campo de estudio tiene todavía grandes vacíos y no existen respuestas a preguntas que se hacen los investigadores. Las ecuaciones de diseño tradicionales no incluyen parámetros que se ajusten a la realidad [3], y se requiere realizar estudios con trazadores, los cuales son costosos, engorrosos y de larga duración [6]. para determinar el tiempo hidráulico real y la eficiencia hidráulica de la laguna.

A principio de la década pasada en Australia [7] propusieron por primera vez una técnica para estudiar la hidrodinámica en lagunas, conocida como Dinámica de Flujo Computacional (DFC). Posteriormente casi una década después [8]; [5] en Inglaterra y [9] en Nueva Zelandia concluyeron que la DFC puede conducir a resultados muy precisos siempre y cuando se utilicen modelos calibrados y validados con data obtenida en lagunas a escala real.

En este trabajo de investigación se pretende simular la hidrodinámica en las lagunas de LUZ considerando tres casos de análisis: 1) Condiciones iniciales en la construcción (entradas y salidas) para el momento de arranque de la planta (1992). 2) Simulación de la hidrodinámica una vez que fueron intervenidas las entradas y salidas del sistema de lagunas en (1995) y 3) Predecir recomendaciones que puedan adaptarse a la construcción actual, para mejorar la hidrodinámica de las lagunas.

## Fundamentos teóricos del modelo de dinámica de flujo computacional

### Ecuaciones que gobiernan el movimiento en la DFC

El modelo de Dinámica de Fluido Computacional se basa en las ecuaciones de movimiento de fluido tales como: la de continuidad, momento en 3 direcciones y la de esfuerzo de Reynolds. A continuación se presentan las ecuaciones desarrolladas para el programa HYDRO-3D en coordenadas cartesianas:

Ecuación de Momentum en la dirección x

$$\iiint N_i \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \bar{U} \nabla \bar{u} - 2\bar{\omega} \bar{v} \sin \phi + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \epsilon_{xx} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \epsilon_{xy} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \epsilon_{xz} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) \right) dV = 0 \quad (1)$$

Ecuación de Momentum en la dirección y

$$\iiint N_i \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \bar{U} \nabla \bar{v} - 2\bar{\omega} \bar{u} \sin \phi + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \epsilon_{yx} \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \epsilon_{yy} \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \epsilon_{yz} \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) \right) dV = 0 \quad (2)$$

Ecuación de Momentum en la dirección z

$$\iiint N_i \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} \bar{U} \nabla \bar{w} + g + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \varepsilon_{zx} \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \varepsilon_{zy} \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \varepsilon_{zz} \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \right) dV = 0 \quad (3)$$

donde:

- $\bar{U}$  = componente de la velocidad promedio a un tiempo en la dirección x (m/s)
- $\nabla =$  vectores unitarios de divergencia ( $\bar{i}, \bar{j}, \bar{z}$ ) a lo largo de los ejes Cartesianos
- $\bar{v} =$  componente de la velocidad promedio a un tiempo en la dirección y (m/s)
- $\bar{w} =$  componente de la velocidad promedio a un tiempo en la dirección z (m/s)
- $x, y, z =$  coordenadas de un punto en el sistema Cartesiano (m)
- $t =$  tiempo (s)
- $\omega =$  velocidad angular de la tierra (radianes/s)
- $\phi =$  latitud (grados)
- $\nu =$  viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)
- $\varepsilon =$  viscosidad turbulenta o viscosidad de eddy (m<sup>2</sup>/s)
- $P =$  presión (N/m<sup>2</sup>)
- $\rho =$  densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>)
- $2\omega\nu \text{ sen } \phi =$  Fuerza de Coriolis

### Metodología

El sistema de lagunas de LUZ esta construido en una área de extensión de 6 has dentro del campo universitario y conforma una estación completa a escala real, la cual es alimentada con aguas residuales provenientes de la zona residencial al noroeste de la ciudad de Maracaibo. Un colector de 90" de diámetro atraviesa la ciudad universitaria del cual es desviado un caudal equivalente al 25% que es vertido en una fosa de bombeo. De la fosa se bombea 15 l/s correspondiendo un caudal de 5 l/s para cada serie como se muestra en la Figura 1a.

Las lagunas facultativas A1 y C1 fueron construidas originalmente con una tubería de entrada de 8" de diámetro central y una de igual especificación a la salida ver Figura 1a. La laguna B1 fue construida con una fosa de lodos sumergida por debajo del nivel de fondo de la laguna y sus dimensiones son 20m x 10m x 1.50m, en la cual

descarga una tubería de 8" de diámetro. Las modificaciones realizadas al sistema en 1995 consistieron en incrementar a 3 el número de descargas en el afluente de la laguna C1, colocando un dispositivo de entrada en forma de tenedor con igual longitud y diámetro para cada tubería. Para las salidas en cada laguna fueron colocadas dos tuberías de igual diámetro al original pero en forma de U Figura 1b, a excepción de la serie A.

Las dimensiones de cada laguna y sus características más relevantes se presentan en la Tabla 1.

### Generación de la malla de elementos finito

El primer paso importante dentro de la simulación es la generación de la malla de elementos finitos. El programa HYDRO-3D requiere de la utilización de dos mallas. La primera es la malla bidimensional (2D), para ello se utilizó el programa FEM (Finite Element Mesh). La segunda es la malla en tres dimensiones (3D), la cual involucra la batimetría de la laguna y se obtiene a través de un programa de conexión entre el FEM y HYDRO-3D desarrollado en la Universidad de Surrey, Inglaterra. En este estudio se generaron cuatro diferentes mallas en 2D una para cada laguna facultativa A1, B1, C1 y de maduración A2 y una de igual dimensiones para el resto de las lagunas. La razón fue porque las lagunas de maduración tienen igual dimensiones a excepción de la laguna A2 la cual tiene dos pantallas, ver Figura 1. A manera de ejemplo se presenta en la Figura 2 la malla generada en 2D para la laguna B1. En la Figura 2 se observa la malla de elementos finitos en el plano producida por el programa FEM para la laguna facultativa B1 con una cantidad de 868 nodos.

### Parte Experimental

El modelo HYDRO-3D simula la hidrodinámica en lagunas a través de gráficos que muestran vectores de velocidad [8]. Este modelo incluye datos reales de campo tales como: batimetría, velocidad y dirección del viento, temperatura, nubosidad y humedad relativa.

La batimetría de lodos en las lagunas no fue realizada antes del estudio debido a que se requiere utilizar el método de columna blanca, por lo tanto los valores de batimetría fueron asumidos.

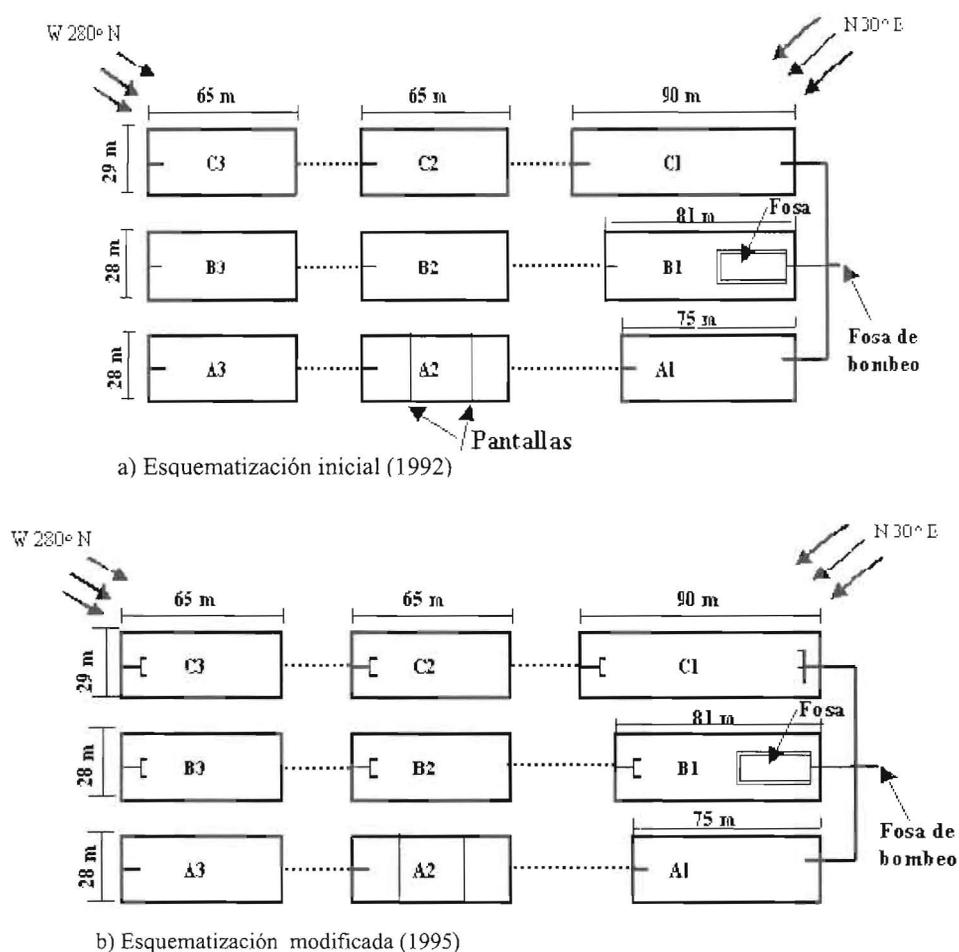


Figura 1. Esquematación del sistema de lagunas de LUZ. No a escala.

dos para una profundidad constante en cada laguna para efecto de la simulación.

Los valores de velocidad del viento fueron medidos en una estación meteorológica ubicada a 800 m de distancia desde el sistema de lagunas. Dicha estación pertenece a la Facultad de Arquitectura. La velocidad promedio fue de 3 m/s y la dirección predominante fue Norte 30° Este. La dirección del viento cambia durante las tardes a partir de la 1:00 pm soplando desde la dirección Oeste 270° Norte.

Los valores de temperatura del agua y del aire fueron medidos in situ, realizándose un perfil de temperatura cada 30 cm de profundidad. La temperatura promedio del agua fue de 28°C en las lagunas facultativas y 26°C en las de maduración. La temperatura promedio del aire fue de 32°C para el periodo Febrero Octubre de los años

1992 y 1995. Los valores de nubosidad y humedad relativa fueron calculados tomando como referencia los valores meteorológicos para la ciudad de Maracaibo.

Se corrieron 15 casos en total para simular el comportamiento hidrodinámico de las lagunas. Cinco casos con la condición original (1992) y cinco casos con la condición modificada (1995). Con el esquema propuesto es fácil identificar en que varía la condición original de la modificada. Adicionalmente se analizaron cinco casos para optimizar la posición de la tubería de entrada y salida. Los vectores de velocidad para la condición original en las lagunas B1 y C1 se muestran en la Figura 3.

Para el procesamiento computacional de los modelos se utilizó una Laptop Toshiba de 4 MB disco duro y 128 MB RAM. El tiempo empleado

Tabla 1  
Características generales del sistema de lagunas de LUZ.

Laguna	Ancho (W) m	Longitud (L) m	Profundidad (h) m	Tiempo nominal (días)	Tiempo real (días) (*)	Eficiencia hidráulica (%) (**)	No de dispersión (d)
A1	28	75	2,90	11	7	63	0,56
A2	28	65	1,50	6	- (*)	-	0,66
A3	28	65	1,50	6	-	-	-
B1	28	81	2,20	10,6	7,06	67	0,44
B2	28	65	1,50	6	-	-	-
B3	28	65	1,50	6	-	-	-
C1	29	90	1,90	11,03	6,51	59	0,21
C2	29	65	1,50	6	-	-	-
C3	29	65	1,50	6	-	-	-

Fuente: (5) (\*) No ha sido determinado experimentalmente (\*\*) Eficiencia Hidráulica= tiempo real/tiempo nominal x 100.

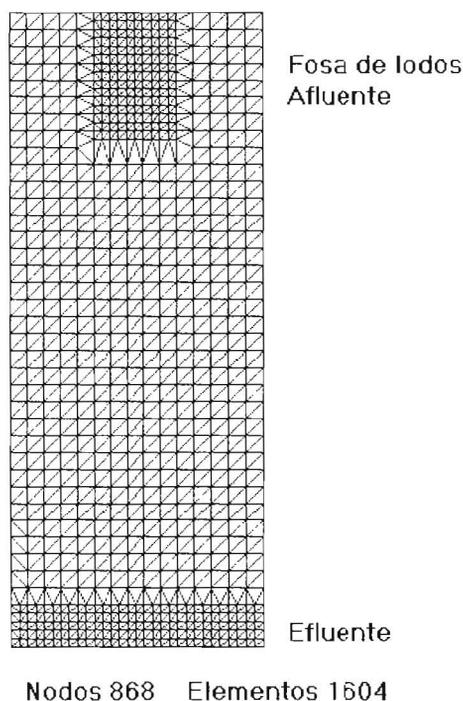


Figura 2. Malla de elementos finitos para el modelo de la laguna facultativa B1.

para los corridos vario entre 30 minutos y 2 horas dependiendo de cada caso. Cada uno de los modelos fue corrido hasta obtener residuales cero (calibración del modelo) variando el coeficiente de

viscosidad turbulenta o de eddy entre  $0.09 \text{ m}^2/\text{s}$  y  $0.9 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Los valores de entrada al programa HYDRO-3D para el modelo hidrodinámico fueron: caudal, viento en las dos direcciones (mañana y tarde), posición de la tubería de entrada y salida, diámetro de la tubería y temperatura del agua.

## Resultados y Discusión

### Configuración original

El modelo B1 fue corrido con un valor de  $0.9 \text{ m}^2/\text{s}$  (viscosidad turbulenta o de eddy) debido a que existe mayor turbulencia en el momento de la descarga a través de la tubería sumergida en la fosa de lodos, fenómeno también observado en estudios realizados en Inglaterra en un modelo físico de laguna de maduración a escala 1:18. En la capa superficial mostrada en la Figura 3a se puede observar que el movimiento del flujo está caracterizado por un flujo predominante del tipo disperso, número de dispersión igual a 0.56 [5].

El modelo C1 fue corrido con un valor de  $0.09 \text{ m}^2/\text{s}$  (viscosidad turbulenta o de eddy) debido a que el efecto de la turbulencia es menor causado por la geometría de la laguna relación  $L/A= 1:3.07$  [4]. El efecto del viento nordeste es una desventaja en la laguna C1, debido a que afecta el patrón de flujo en un 40%, visualizado en la Figura 3b en el centro y adyacente al talud

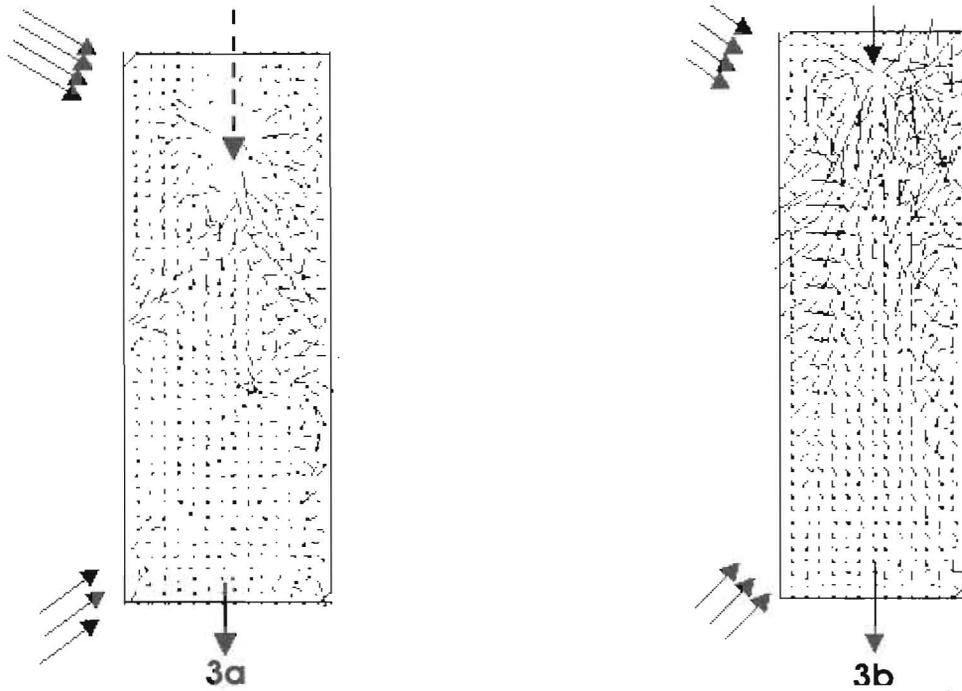


Figura 3. Salida del programa HYDRO-3D. 3a) Vectores de velocidad para la configuración inicial de la laguna B1. 3b) Vectores de velocidad para la configuración inicial de la laguna C1.

lateral derecho en la dirección del flujo; ocasionado por el efecto de la inercia del viento sobre la inercia del agua, siendo en este caso el viento superior porque la relación  $L/A$  es mayor. En la Figura 3b se puede observar que el movimiento del flujo está caracterizado por un flujo predominante disperso, número de dispersión igual a 0.21 [5].

El efecto del viento soplando desde el noroeste produce un patrón de mezcla en sentido dextrógiro seguido por el talud lateral derecho, ocasionando una zona de corto circuito en la esquina derecha cercana al afluente, debido al efecto de impacto de las dos masas de agua, provocado por el desequilibrio del esfuerzo cortante en el afluente y la mezcla en sentido dextrógiro.

El modelo A2 fue corrido con un valor de  $1.5 \text{ m}^2/\text{s}$  (viscosidad de turbulencia o eddy) debido a que el afluente es sumergido y además por el efecto que producen las pantallas en la laguna A2. Por lo tanto una gran turbulencia es generada a lo largo de la laguna lo cual produce un patrón de flujo errático sin ninguna definición, según lo observado en la Figura 4.

El flujo está caracterizado por un flujo disperso predominante, número de dispersión igual

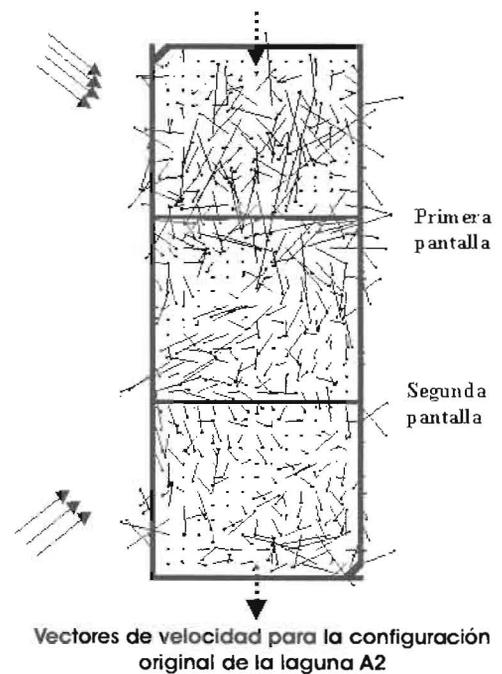


Figura 4. Salida del HYDRO-3D.