



## MODELO DE DISPERSION DE CONTAMINANTES EN AGUAS RASAS

Victor A. Yzocupe\*

Laboratorio de Fluidodinámica Computacional, Departamento de Ingeniería Mecánica de Fluidos,  
Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos Ap. Postal 14-0149, Lima 14, Perú.

### Resumen

El estudio presenta un modelo de dispersión de contaminantes bidimensional construido sobre la base de un modelo hidrodinámico desarrollado en un trabajo anterior. El modelo acoplado se basa en la aproximación numérica de las ecuaciones bidimensionales que rigen la dinámica de las aguas rasas y la dispersión de sustancias. Tales ecuaciones son las de continuidad del cuerpo fluido, de movimiento en las direcciones  $X$  e  $Y$ , y de conservación de la concentración de una sustancia diluida. Las variables dependientes son las velocidades medias  $U$  y  $V$  en las direcciones  $X$  e  $Y$  respectivamente, el nivel del agua  $\eta$  con respecto al plano de referencia y la concentración  $C$  de la sustancia diluida. La aproximación numérica está basada en el esquema de diferencias finitas explícito de Fischer. El modelo cuenta con las condiciones iniciales y de frontera adecuadas. El modelo ha sido probado con diversos experimentos teóricos, luego de los cuales se aplicó a la Bahía Paracas en Pisco. Realizándose en primer lugar, la simulación del proceso de dispersión de una sustancia contaminante proveniente de un solo emisor puntual con caudal constante en un flujo forzado por campos de viento uniformes provenientes del sur y del oeste. Luego, se realizaron las simulaciones con campos de viento real, con variación espacial de la magnitud y dirección del viento, para el caso de un solo emisor y también para el caso de los siete principales emisores de la Bahía Paracas. Esta aplicación permitirá reproducir los patrones de transporte de contaminantes como respuesta a la geografía y al sistema de vientos de la región.

PACS:

**Palabras claves:** Modelamiento numérico, hidrodinámica, dispersión de contaminantes, flujo forzado por viento.

### Abstract

The study presents a two dimensional model of dispersion of pollutants built on the basis of a hydrodynamic model developed in a previous work. The coupled model is based on the numerical approach of the two dimensional shallow water flow equations and of the dispersion of substances. These equations are of the continuity of the fluid body, of movement in directions  $X$  and  $Y$ , and conservation of the concentration of a diluted substance. The dependent variables are the average speeds  $U$  and  $V$  in directions  $X$  and  $Y$  respectively, the level of water  $\eta$  respect to the mean sea level and the concentration  $C$  of the diluted substance. The numerical approach is based on the Fischer's explicit finite difference scheme. The model has suitable initial and boundary conditions. The model has been tested under several theoretical experiments, after these tests, it was applied to the Paracas Bay. First, we did the simulation of the wind driven flow connected with the process of dispersion of pollutants for one single submarine outfall with constant flow for uniform wind fields from the south and from the west. After this, it was simulated a real wind field with space variation of his magnitude and direction, for the case of one single outfall and also for the seven main submarine outfalls of the bay. This application allows us to reproduce the dispersion of pollutants patterns as answer of the geography and the wind system of the region.

**Keywords:** Numerical modelling, hydrodynamics, dispersion of pollutants, wind driven flow.

### 1. Introducción

La Bahía Paracas es un hermoso lugar situado en la costa sur del Perú. El área de estudio central está

ubicado entre los  $13^{\circ}40'$  y  $13^{\circ}52'$  de latitud sur, y entre los  $76^{\circ}12'$  y  $76^{\circ}20'$  de longitud oeste. Esta bahía es conocida por su gran riqueza hidrobiológica e interés turístico. Pero, desafortunadamente también

\* Corresponding author. e-mail: [vyzocupec@unmsm.edu.pe](mailto:vyzocupec@unmsm.edu.pe)

existe un fuerte desarrollo industrial pesquero que vierte sus aguas de desecho en el cuerpo central de la bahía

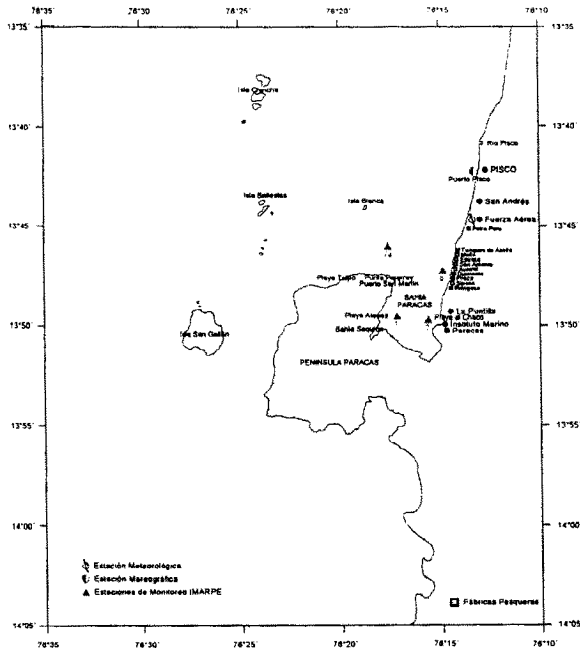


Fig. 1. Área de estudio y estaciones de monitoreo

La ocurrencia de mareas rojas y varazón de peces muertos podría deberse a la presencia de contaminantes orgánicos en la zona central de la bahía y a la poca dispersión y dilución de los contaminantes descargados por el sistema de desagüe doméstico y de los emisores industriales submarinos [1].

El área de estudio tiene una particular configuración geográfica, formada por la Península de Paracas y las islas de San Gallán, Chíncha y Ballestas. Dicha geografía podría ser la causa de la circulación lenta y del pobre intercambio entre las aguas de la bahía y las aguas oceánicas. Según el análisis de los registros de marea de la estación mareomotriz de Pisco (13°42'25" S, 76°12'54" W), la marea en este lugar se clasifica como mixta, con predominancia del tipo semi-diurno y con un rango de variación del nivel del mar entre 0.6 y 1.1 metros.

Los vientos se registran en una sola estación meteorológica, ubicada en la Base de la Fuerza Aérea de San Andrés (13°44'30" S, 76°13' W). El análisis de dichos registros muestra que el viento predominante en este punto, proviene del oeste y del sur-oeste con velocidades entre 3 y 4 m/s.

El Instituto del Mar del Perú (IMARPE) periódicamente monitorea los parámetros físicos, químicos y biológicos necesarios para la evaluación y caracterización del medio marino de la Bahía Paracas. Entre estos parámetros se tienen la temperatura del agua, salinidad, magnitud y dirección

de la velocidad, oxígeno disuelto, nitritos, nitratos, silicatos, fosfatos, plankton, sulfuros, aceites y grasas entre otros.

El problema es extremadamente complejo, ya que envuelve aspectos físicos, químicos y biológicos. Por lo que en esta segunda etapa, se aborda el modelamiento del transporte de sustancias contaminantes en forma acoplada al modelo hidrodinámico desarrollado en una primera etapa [8], y su respuesta a las ondas de marea y a la fuerza de arrastre del viento en la Bahía Paracas.

## 2. Modelo Numérico

Los modelos numéricos que describen la dinámica del océano, bahías y ríos están basadas en un sistema de ecuaciones hidrodinámicas, las cuales incorporan las leyes Newtonianas de conservación de masa y de momento. Estas ecuaciones normalmente están derivadas en un sistema de coordenadas rectangulares, cuyo origen está localizado en el nivel medio del mar [2]. En nuestro caso el eje X apunta hacia el este, el eje Y apunta hacia el norte y, el eje Z hacia el cenit. Las componentes de velocidad a lo largo de estos tres ejes son respectivamente  $u$ ,  $v$ , y  $w$ .

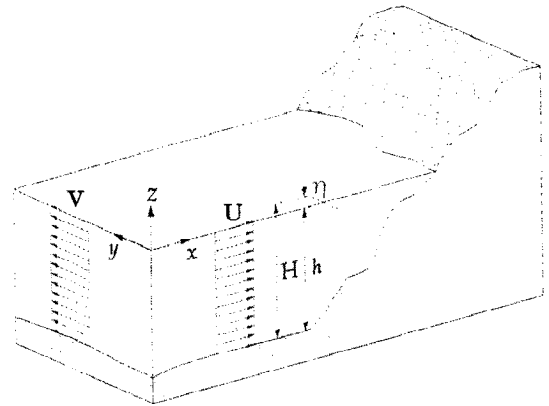


Fig. 2. Sistema de coordenadas

### 2.1. Ecuaciones Bidimensionales de Movimiento

La aproximación de aguas rasas asume que las velocidades horizontales son constantes en toda la columna líquida, tal como se muestra en la Fig. 2. Además, el movimiento se considera barotrópico; es decir, no se toma en cuenta la estratificación producida por la variación vertical de la densidad [2].

La ecuación que gobierna el movimiento de las aguas rasas a lo largo de la dirección E-O es: [2]

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x^s}{\rho_0 H} - \frac{\tau_x^b}{\rho_0 H} + N_h \Delta U$$

y a lo largo de la dirección N-S es:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y^s}{\rho_0 H} - \frac{\tau_y^b}{\rho_0 H} + N_h \Delta V$$

donde,

$\rho_0$  es la densidad del agua en estado hidrostático

$f$  es el parámetro de Coriolis,  $f = 2 \Omega \sin \phi$

$\Omega = 7.29 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,  $-\phi$  es la latitud sur

$p_a$  es la presión atmosférica

$\tau^s$  es el esfuerzo cortante en la superficie

$\tau^b$  es el esfuerzo cortante en el fondo

$N_h$  es la viscosidad turbulenta horizontal

$g$  es la aceleración gravitacional

$U$  y  $V$  son las velocidades promedio verticales del flujo en las coordenadas  $X$  e  $Y$ , definidas como:

$$U = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} u dz \quad y \quad V = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} v dz$$

$u$  y  $v$  son las velocidades puntuales del flujo en la dirección positiva de las coordenadas  $X$  e  $Y$ , respectivamente,

$H = h + \eta$  denota la profundidad total del agua

$h$  es la profundidad del nivel medio del mar

$\eta$  es la variación del nivel de agua

#### Esfuerzos de Superficie y de Fondo

Nótese que el intercambio de momento en la dirección vertical está descrito por medio de los esfuerzos de superficie y de fondo.  $\tau_x^s$  y  $\tau_y^s$  son los esfuerzos superficiales debidos a la fuerza de arrastre del viento en las coordenadas  $X$  e  $Y$  respectivamente. Sus ecuaciones experimentales son [3]:

$$\tau_x^s = C_d \rho_a W_{10}^2 \sin \phi \quad y \quad \tau_y^s = C_d \rho_a W_{10}^2 \cos \phi$$

donde  $C_d$  es el coeficiente de arrastre del viento,  $\rho_a$  es la densidad del aire ( $1.24 \text{ kg/m}^3$ ),  $W_{10}$  es la magnitud de la velocidad del viento medido a una altitud de 10 m sobre el nivel del mar (en m/s),  $\phi$  es el ángulo, positivo en el sentido horario, que se forma entre el norte y la dirección hacia donde se dirige el viento.

Los esfuerzos de fondo se reemplazan por la ecuación del esfuerzo cortante para flujo uniforme:

donde,  $k_b$  es un coeficiente adimensional de esfuerzo cortante local igual a  $f/8$ , donde  $f$  es el factor de fricción de Darcy-Weisbach para conductos de sección transversal no circular. Sin embargo, frecuentemente  $k_b$  se calcula con la ayuda de la conocida fórmula de Manning [4]:

$$k_b = g \varepsilon^2 / H^{1/3}$$

donde,  $\varepsilon$  es el coeficiente de rugosidad de Manning y  $g$  es la aceleración gravitacional. Para condiciones de flujo turbulento completamente rugoso,  $\varepsilon$  es constante para cada tipo de superficie.

Debido a que este coeficiente ha sido desarrollado bajo la suposición de flujo unidimensional e implícitamente toma en cuenta los efectos de la turbulencia y las desviaciones de una velocidad uniforme en toda la sección transversal [4], se elimina el término que considera independientemente los efectos de la turbulencia en la ecuación de movimiento.

Además, ya que la presión atmosférica se considera constante sobre todo el dominio, el término de variación de la presión atmosférica se elimina.

Finalmente, la ecuación de movimiento en la dirección  $X$  se reduce a:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x^s}{\rho_0 H} - \frac{g \varepsilon^2 U (U^2 + V^2)^{1/2}}{H^{4/3}}$$

y en la dirección  $Y$  será:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y^s}{\rho_0 H} - \frac{g \varepsilon^2 V (U^2 + V^2)^{1/2}}{H^{4/3}}$$

## 2.2. Ecuación Bidimensional de Continuidad

La ecuación de continuidad o de conservación de la masa para un flujo integrado verticalmente es: [2]

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (UH) + \frac{\partial}{\partial y} (VH) = 0$$

## 2.3. Ecuación Bidimensional de Dispersión de Sustancias

La ecuación bidimensional de conservación de la concentración de una sustancia diluida, en las coordenadas espaciales  $X$  e  $Y$  es:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + S - KC$$

$$\tau_x^b = \rho k_b U (U^2 + V^2)^{1/2} \quad y$$

$$\tau_y^b = \rho k_b V (U^2 + V^2)^{1/2}$$

donde,  $C$ , es un valor promediado en la vertical, y  $\epsilon_x, \epsilon_y$  son los coeficientes empíricos de mezcla en las direcciones  $X$  e  $Y$ .

$$S = \frac{q_c w}{\Delta y H} + \frac{Q_c W}{\Delta y \Delta x H}$$

$$\epsilon_x = 5.93 U_* h; \quad \epsilon_y = [0.4 \dots 0.8] V_* h$$

$C$ ; concentración de la sustancia diluida ( $\text{kg/m}^3$ ),

$$C = \int_0^h c dz$$

$\epsilon_x$ ; coeficiente empírico de dispersión longitudinal ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),

$\epsilon_y$ ; coeficiente empírico de dispersión transversal ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),

$K$ ; coeficiente de decaimiento ( $1/\text{s}$ ),

$q_c$ ; caudal unitario de la fuente de contaminación distribuida ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),

$w$ ; concentración de la fuente distribuida ( $\text{kg/m}^3$ ),

$Q_c$ ; caudal de la fuente de contaminación puntual ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),

$W$ ; concentración de la fuente puntual ( $\text{kg/m}^3$ ),

$\Delta x$ ; longitud del intervalo de espacio en  $X$  (m),

$\Delta y$ ; longitud del intervalo de espacio en  $Y$  (m),

### 2.4. Esquema de Diferencias Finitas

El esquema numérico utilizado es una variante del esquema explícito de Fischer [2]. En las ecuaciones de movimiento se utiliza una diferencia adelantada para la derivada temporal y una diferencia central para la derivada espacial,

$$\frac{\partial f}{\partial t} \Big|_{i,j}^n \approx \frac{f_{i,j}^{n+1} - f_{i,j}^n}{\Delta t}, \quad \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{i,j}^n \approx \frac{f_{i+1,j}^n - f_{i-1,j}^n}{2\Delta x}$$

En la ecuación de continuidad se utiliza una diferencia adelantada para el tiempo y espacio; pero, las velocidades se consideran en el tiempo  $n+1$ . Esto produce un esquema semi-implícito en el tiempo y estabiliza el cómputo.

$$\frac{\partial f}{\partial t} \Big|_{i,j}^n \approx \frac{f_{i,j}^{n+1} - f_{i,j}^n}{\Delta t}, \quad \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{i,j}^n \approx \frac{f_{i+1,j}^{n+1} - f_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x}$$

La Fig. 3 muestra el modo de operación de este esquema explícito. El índice  $i$  es para la coordenada  $X$ , el índice  $j$  es para la coordenada  $Y$ ,  $n$  denota el nivel de tiempo. Se tienen dos grillas bidimensionales en el espacio  $X$ - $Y$ , una en el tiempo  $n$  y otra en el tiempo  $n+1$ .

Para calcular los valores desconocidos de las variables dependientes en el nivel de tiempo  $n+1$ , el esquema utiliza los valores de las variables localizadas en los nodos que se forman en las

intersecciones de las coordenadas  $i-1, i$  e  $i+1$  en el eje  $X$  y  $j-1, j$  y  $j+1$  en el eje  $Y$  en el nivel de tiempo  $n$  [6].

El presente modelo utiliza una grilla regular donde las variables dependientes ( $U, V, \eta, C$ ) se calculan en todos los nodos de la grilla.

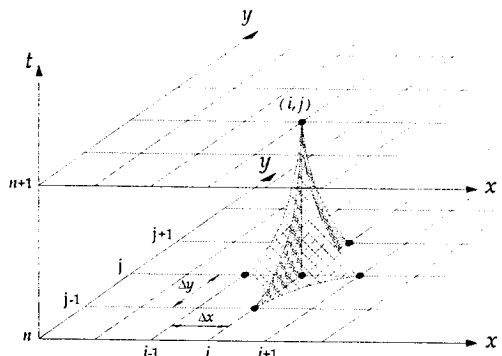


Fig. 3 Esquema de diferencias finitas explícita 2D

### 3. Pruebas Teóricas

El modelo numérico ha sido sometido a diversas pruebas teóricas para comparar sus resultados con soluciones conocidas. Estas pruebas se han realizado en una bahía artificial de 10 km de lado, con una profundidad del agua constante de 10 m. El incremento de espacio es de 200 m., por lo que la grilla consistió de 51 puntos en el eje  $X$  y 51 en el eje  $Y$ . Debido a que se utilizó el parámetro de Courant igual a 0.5, el paso de tiempo resultó ser 10.09 s,  $\Delta t = C_r \Delta x / \sqrt{gh_{\max}}$  [6]. El coeficiente de rugosidad de Manning,  $\epsilon$ , es constante en toda el área.

#### 3.1. Experimento para un Emisor Puntual ( $Q_c=0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , $W_c=100 \text{ kg/m}^3$ ), con Viento Oeste

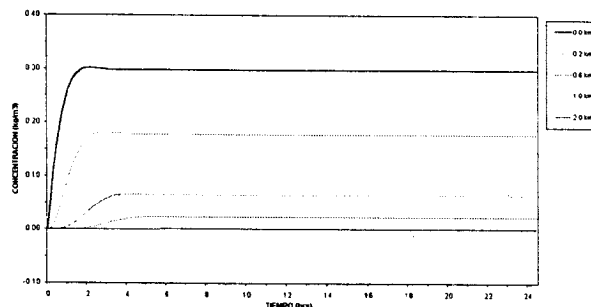


Fig. 4-a Concentración en 5 puntos de control para un emisor localizado en  $X_0=2.8 \text{ km}$ ,  $Y_0=5 \text{ km}$

Esta prueba consiste de un emisor puntual con descarga permanente  $Q$ , localizado en el punto  $X_0=2.8 \text{ km}$ ,  $Y_0=5 \text{ km}$ . Las condiciones iniciales son para un cuerpo fluido en reposo, al cual se impone un viento oeste uniforme de 20.4 m/s. El campo de velocidades alcanza el estado permanente con una

velocidad constante de 10 cm/s después de 0.98 hrs. de simulación. La Fig. 4-a muestra los resultados de la concentración calculada en 5 puntos de control. El estado permanente en todos estos puntos se alcanza después de 7.71 hrs. de simulación.

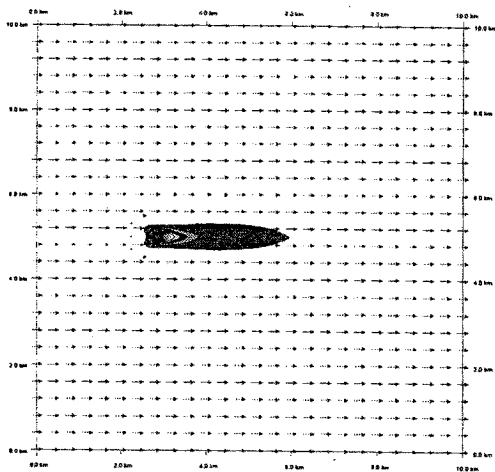


Fig. 4-b Campo de velocidad y pluma de dispersión

La Fig. 4-b muestra el campo de velocidad uniforme y la formación de la pluma de dispersión, el cual alcanza una concentración mayor a 0.0001 kg/m<sup>3</sup> hasta los 3 km. aguas abajo y a 300 m. aguas arriba del punto de emisión. Un parámetro de extrema importancia es el coeficiente de decaimiento (K) que define la forma de la pluma o la velocidad de dispersión. En este experimento se utilizó un K=0.00025.

**3.2. Experimento para un Emisor Puntual**  
*( $Q=0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Wc=100 \text{ kg/m}^3$ ), con Viento Nor-Oeste.*

Esta prueba consistió de un emisor puntual superficial de caudal constante localizado en el punto  $X_0=3 \text{ km}$ ,  $Y_0=7 \text{ km}$ . El inicio fue con el fluido en reposo al cual se le impuso un campo de velocidad uniforme con un valor de  $U$  y  $V$  igual a 7.1 cm/s. El campo de velocidad alcanzó el estado permanente con una velocidad total de 10 cm/s después de 4 horas de simulación.

La Fig. 5 muestra el campo de velocidad uniforme y la formación de la pluma de dispersión ancha debida al flujo bidimensional. El proceso de dispersión responde a las componentes de velocidad  $U$  y  $V$ , alcanzando una concentración mayor a 0.0001 kg/m<sup>3</sup> hasta los 2.8 km. aguas abajo y a 280 m. aguas arriba del punto de emisión. El coeficiente de decaimiento (K) se tomó igual a 0.00025.

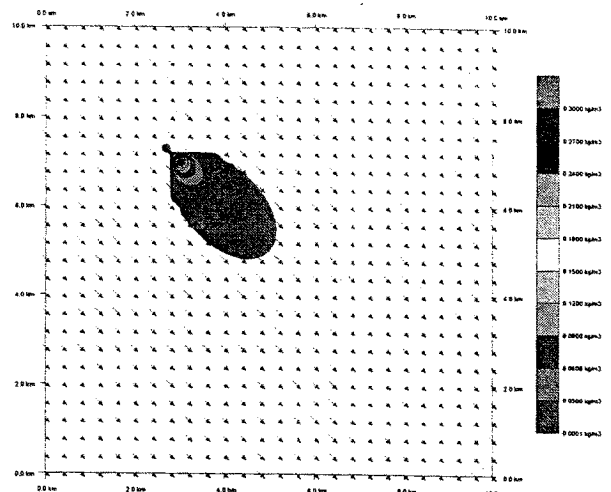


Fig. 5. Campo de velocidad y pluma de dispersión

**4. Aplicaciones**

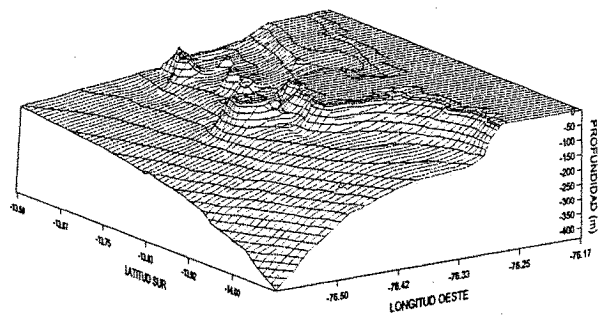


Fig. 6. Batimetría 3D del área de estudio

El modelo de dispersión ha sido aplicado a la Bahía Paracas. El área de estudio tiene cerca de 42 km<sup>2</sup> y en la zona de interés la profundidad del agua no es mayor de 10 m., como lo muestra la Fig. 6. La batimetría se obtuvo de cartas de navegación y fue procesada en una grilla regular [7].

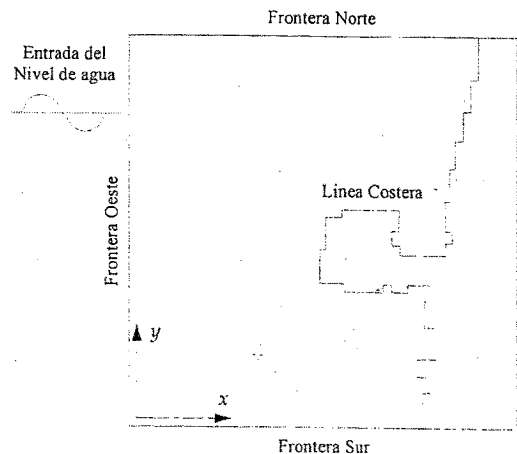


Fig. 7. Esquema de la Bahía Paracas

El dominio computacional consiste de 51 puntos en el eje  $X$  y 61 en el eje  $Y$ . El incremento de espacio es de 926 m. y la profundidad máxima es de 435 m. Debido a que utilizamos el parámetro de Courant igual a 0.5, el paso de tiempo resultó ser 7.09 s.

El coeficiente de rugosidad de Manning tiene una distribución espacial. En la línea de costa tiene un valor de 0.03, cerca de las islas tiene un valor alto de 0.05 para limitar la formación de turbulencia y en aguas profundas tiene un valor de 0.02. Las condiciones iniciales se tomaron para flujo en reposo [8].

#### 4.1. Experimento para un Emisor Puntual con Viento Sur ( $Wc=100 \text{ kg/m}^3$ , $K=0.00005$ )

Esta prueba consistió de un emisor puntual con un caudal constante de  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , localizado en el punto  $X_0=76^\circ 15' 30''$ ,  $Y_0=13^\circ 47'$ . El inicio fue con el fluido en reposo al cual se impuso un viento uniforme que proviene del sur con velocidad de 10 m/s.

La Fig. 8 muestra que la velocidad máxima de 32.42 cm/s se localiza en el canal formado entre la isla San Gallán y la Península de Paracas. Después de 24 horas de simulación, la pluma de dispersión se dirige principalmente hacia el norte. La concentración máxima de  $0.13 \text{ kg/m}^3$  se localiza en el punto de emisión y la concentración mínima de  $0.001 \text{ kg/m}^3$  se ubica en el borde externo de la pluma.

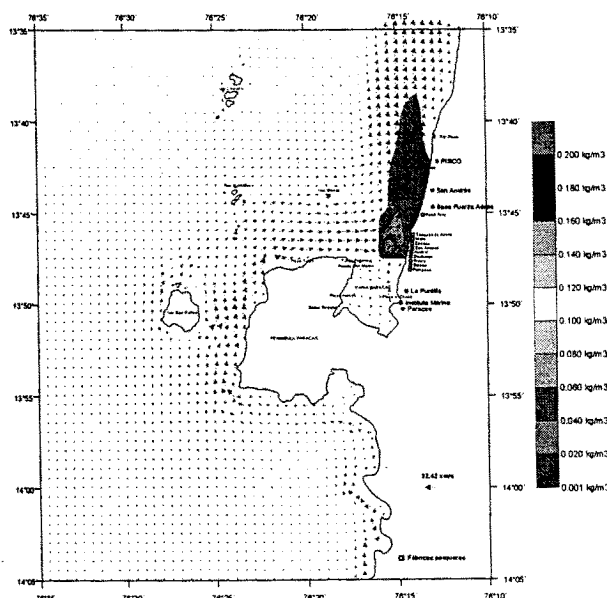


Fig. 8. Prueba de emisor puntual con viento sur

#### 4.2. Experimento para un Emisor Puntual con Viento Oeste ( $Wc=100 \text{ kg/m}^3$ , $K=0.00005$ )

Esta prueba consistió de un emisor puntual con descarga constante de  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , localizado en el punto  $X_0=76^\circ 15' 30''$ ,  $Y_0=13^\circ 47'$ . El inicio fue con el fluido

en reposo al cual se impuso un viento uniforme del oeste con una magnitud de 10 m/s.

La Fig. 9 muestra que la velocidad máxima de 33.91 cm/s se ubica en la frontera norte. La pluma de dispersión después de 24 horas de simulación, se dirige levemente hacia el nor-este. La concentración máxima de  $0.12 \text{ kg/m}^3$  se encuentra en el punto de emisión. Note la aparición de un flujo giratorio lento frente a las fábricas pesqueras y San Andrés como respuesta al patrón de viento impuesto.

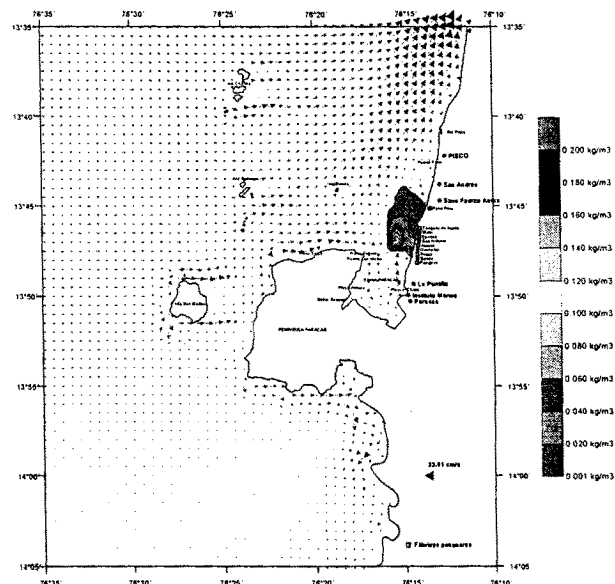


Fig. 9. Prueba de emisor puntual con viento oeste

#### 4.3. Campo de Vientos no Uniforme

En la región Pisco-Paracas el campo de vientos no tiene una distribución uniforme, la velocidad del viento cambia espacial y temporalmente. Esta se compone principalmente del viento que proviene del sur del continente con una dirección sur-este; pero, cuando atraviesa la Península de Paracas cambia de dirección por causas meteorológicas a una dirección sur-oeste, llegando incluso a tener dirección oeste en algunos puntos de la costa.

Para tomar en cuenta esta complicada distribución, procesamos la información de los registros históricos realizados el 21 de abril de 1976 por el Joint II 1976 Aircraft Winds for the 500 Foot Level, a cargo de D.W. Stuart y A.I. Watson, de la Universidad de Florida.

La figura 10 muestra el campo de viento no uniforme que se ingresa al modelo, con variación espacial tanto de la dirección como de la magnitud del viento. Nótese el cambio de magnitud conforme el viento bordea la Península de Paracas, llegando a tener alrededor de 2 m/s al interior de la bahía.

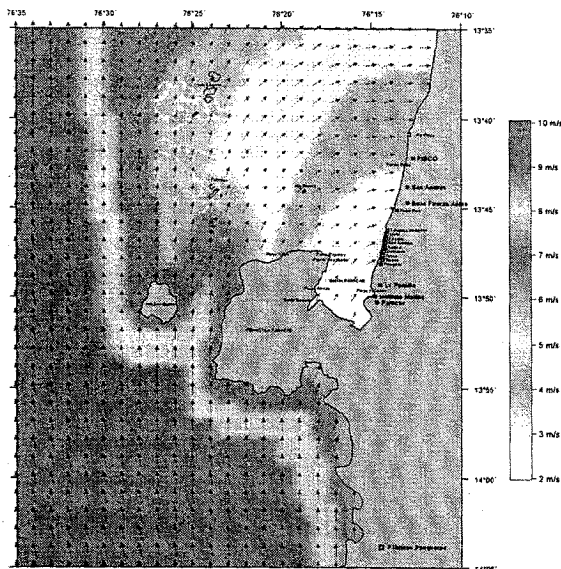


Fig. 10. Campo de viento real de la Bahía Paracas

**4.4. Experimento para un Emisor Puntual con Viento no Uniforme ( $W_c=100 \text{ kg/m}^3$ ,  $K=0.00005$ )**

Esta prueba se realizó con un emisor puntual con descarga permanente de  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , localizado en el punto  $X_o=76^\circ 15' 30''$ ,  $Y_o=13^\circ 47'$ . El inicio fue con fluido en reposo, al cual se impuso un campo de viento no uniforme, según la información indicada en la sección 4.3.

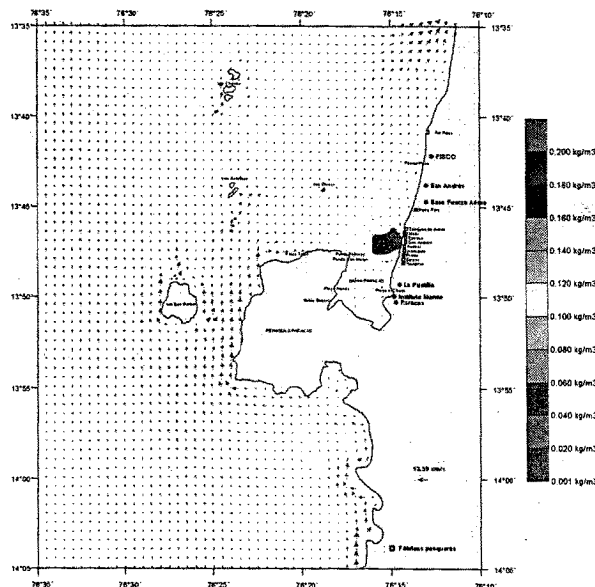


Fig. 11. Prueba de emisor puntual con viento no uniforme

La Fig. 11 muestra la pluma de dispersión del contaminante después de 24 horas de simulación. La concentración máxima es de  $0.21 \text{ kg/m}^3$  y se localiza en el punto de emisión. Obsérvese la formación de

anillos concéntricos en respuesta al patrón de circulación giratorio lento que se ha formado frente a las fábricas pesqueras de la Bahía Paracas.

El patrón de circulación responde claramente al campo de viento impuesto. La velocidad máxima es de  $13.59 \text{ cm/s}$  y se encuentra en el canal formado entre la isla San Gallán y la Península de Paracas.

**4.5. Experimento para siete Emisores Puntuales con Viento no Uniforme ( $W_c=100 \text{ kg/m}^3$ ,  $K=0.00005$ )**

El cuadro muestra los datos de ubicación geográfica de los puntos de emisión, así como el diámetro y caudal de bombeo de las tuberías submarinas que pertenecen a las siete fábricas principales de harina de pescado asentadas en la franja costera a la entrada del Distrito de Paracas. Cabe indicar que estos datos han sido registrados por el Ministerio de Pesquería en base a información proporcionada por las propias empresas pesqueras.

Empresa Pesquera	Ubicación del Emisor		Diám. Tubería (pulg)	Long. de Tubería (m)	Caudal Agua de Bombeo (m <sup>3</sup> /hr)
	Latitud	Longitud			
EPESCA	13° 46' 44"	76° 14' 42"	20	750	600
Austral S.A.	13° 46' 11"	76° 15' 23"	16	2,750	1,500
Prisco S.A.	13° 47' 17"	76° 15' 15"	18	1,535	240
Malla S.A.	13° 46' 33"	76° 15' 09"	16	1,597.69	200
San Antonio S.A.	13° 46' 49"	76° 14' 35"	18	500	220
Diamante S.A.	13° 47' 14"	76° 14' 35"	18	331.40	300
SIPESA	13° 46' 29"	76° 16' 12"	24	3,800	500

Esta prueba consistió en simular el proceso de dispersión para los siete emisores submarinos descritos en el cuadro anterior. El inicio de la simulación fue con el fluido en reposo, al cual se impuso un campo de viento no uniforme según los registros que muestra la Fig. 10.

La Fig. 12 muestra el patrón de dispersión de la concentración de una sustancia contaminante pasiva después de 24 horas. Se ha formado una pluma de dispersión amorfa, compuesta por dos focos, uno alrededor del emisor de la fábrica Austral, que tiene el mayor caudal y desemboca al medio del cuerpo hídrico de la bahía, y el otro foco alrededor del emisor de Epesca, que tiene el segundo mayor caudal. Nótese la deformación de la pluma por los aportes de los otros emisores, sobretudo con los emisores de pequeña longitud que desembocan cerca de la costa.

La velocidad máxima, de  $22.83 \text{ cm/s}$ , se presenta en el canal formado entre la isla San Gallán y la

Península de Paracas. La concentración máxima es de  $0.16 \text{ kg/m}^3$  y se encuentra en el foco costero.

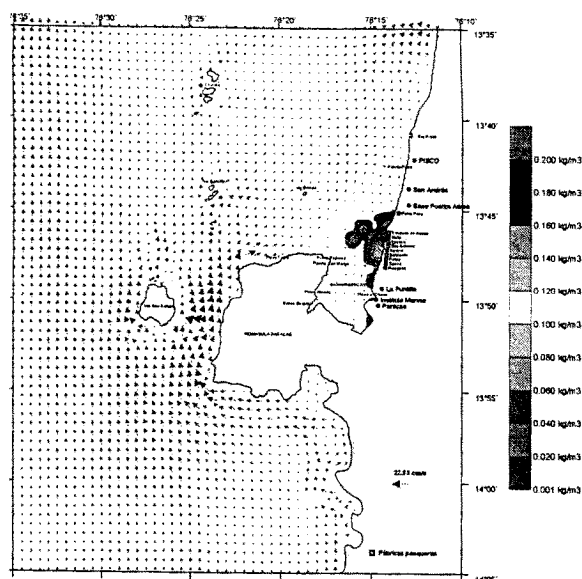


Fig. 12. Prueba con 7 emisores y viento no uniforme

## 5. Conclusiones

La aplicación del modelo a la Bahía Paracas muestra resultados muy interesantes. Esta bahía tiene restricciones de movimiento debido a la peculiar configuración de la bahía. Donde, la isla San Gallán forma un canal con la cabeza de la península, produciendo una zona de flujos rápidos con dirección principal hacia el norte-este.

Una distribución de viento uniforme proveniente del sur produce un patrón de flujo caracterizado por una corriente hacia el norte, la cual a su vez produce una larga pluma de dispersión dirigida hacia el norte. En cambio un viento uniforme que proviene del oeste produce una pluma de dispersión más corta dirigida hacia el norte.

La distribución de viento real en la región de la Bahía Paracas tiene una variación espacial y temporal, compuesta por un viento con dirección sureste que proviene del sur del continente, el cual cuando atraviesa la Península de Paracas cambia su dirección por causas meteorológicas a una dirección sur-oeste, llegando en algunos puntos de la costa a tener dirección oeste.

Estas condiciones producen un patrón de flujo caracterizado por una corriente principal de mayor velocidad que proviene del canal formado por la isla

San Gallán y la Península de Paracas, que rodea la península y se dirige hacia el nor-este. En consecuencia se forman flujos secundarios lentos dentro de la bahía, y particularmente un flujo giratorio antihorario frente a la zona de las fábricas pesqueras y otro flujo giratorio horario frente a San Andrés.

Esta respuesta del sistema es completamente desfavorable para el recambio de las aguas de la bahía y para al proceso de dispersión, porque se forma una pluma amorfa dirigida contra la costa y compuesta por dos focos alrededor de los emisores de mayor caudal, donde la concentración en dirección radial disminuye lentamente. En suma, los resultados muestran que la Bahía Paracas tiene poca capacidad de dispersión de sustancias contaminantes debido al patrón hidrodinámico que responde a su vez a su situación geográfica y al sistema de vientos de la región.

## 6. Referencias

- [1]. C. A. Carbonel, 2000. Dinámica de la Región Marina Pisco-Paracas. IMARPE, Lima, 150 pp.
- [2]. Z. Kowalik y T.S. Murty. 1993. Numerical Modeling of Ocean Dynamics. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 481 pp.
- [3]. J. R. Garrat, 1977. Review of drag coefficients over oceans and continents, Monthly Weather Review, v. 105, n° 7, p. 915-929.
- [4]. J. K. Lee y D. C. Froehlich, 1986. Review of literature on the finite-element solution of the equations of two-dimensional surface-water flow in the horizontal plane. U.S. Geological Survey, Circular 1009. 61 pp.
- [5]. C. R. Goodwin, 1987. Tidal-flow, circulation, and flushing changes caused by dredge and fill in Tampa Bay, Florida. U.S. Geological Survey Water-Supply, Paper 2282, 88 pp.
- [6]. M. B. Abbott y D. R. Basco, 1989. Computational fluid dynamics. An introduction for engineers. Longman Scientific & Technical, 425 pp.
- [7]. V. A. Yzocupe, 2001. 2-D Hydrodynamic Modeling in Paracas Bay, Peru. MSc. Thesis H.H. 402, IHE-Delft, 74 pp.
- [8]. V. A. Yzocupe, 2002. Modelo Numérico de Flujo Bidimensional de la Bahía Paracas. Revista de Investigación de Física. ISSN 1605-7744, Vol. 5 (2002), Lima, p. 1-9.