



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ciencias Marinas

"DIFUSION Y CINEMATICA
FRENTE A LA RADA DEL PUERTO DE
ENSENADA, B.C., MEXICO UTILIZANDO
CUERPOS DE DERIVA".



T E S I S

que para obtener el Título de

O C E A N O L O G O

presenta

Rafael Ramírez Mendoza

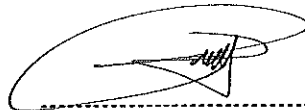
RESUMEN

En los días 10, 11 y 12 de agosto; 29 y 30 de septiembre; 1 y 20 de octubre de 1993, se liberaron cuatro flotadores 300 m al sur del Puerto de Ensenada, B. C. Se observó su desplazamiento y se midió su posición cada 15 minutos durante periodos desde 1 a 3 horas para calcular la difusividad turbulenta horizontal siguiendo el método de Yanagi et al.(1982), en donde se excluye el efecto de corte de la corriente y la advección incluidos en el proceso de dispersión. Los términos excluidos por el método de Yanagi (cortes de velocidad) son aprovechados para obtener información sobre la cinemática de la región: divergencia y vorticidad relativa de la corriente. Las trayectorias descritas por los cuerpos de deriva muestran un comportamiento general paralelo al espigón en dirección este con una ligera componente hacia el sur. El grupo de flotadores presenta una tendencia a agruparse, probando la existencia de una zona de convergencia en el área de estudio. De los diez experimentos realizados sólo un coeficiente de difusión es positivo ($1.9 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$). Por lo que se concluye que para las escalas y el número de flotadores utilizados el método de Yanagi no logra eliminar otros procesos presentes en la zona de estudio y por lo tanto no se logran obtener valores confiables del coeficiente de difusividad. La cinemática de la región presenta valores de divergencia y vorticidad del orden de 10^{-3} y 10^{-4} s^{-1} representativos de zonas costeras. Los resultados obtenidos para la divergencia negativa están de acuerdo con la tendencia de agrupamiento de los cuerpos de deriva.

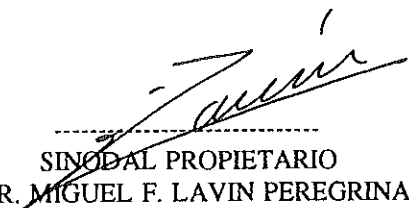
**"DIFUSION Y CINEMATICA
FRENTE A LA RADA DEL PUERTO DE ENSENADA, B. C.,
MEXICO UTILIZANDO CUERPOS DE DERIVA".**

TESIS
QUE PRESENTA:
RAFAEL RAMIREZ MENDOZA


APROBADA POR:



PRESIDENTE DEL JURADO
M.C. RAFAEL HERNANDEZ WALLS



SINODAL PROPIETARIO
DR. MIGUEL F. LAVIN PEREGRINA



SINODAL PROPIETARIO
DR. REGINALDO DURAZO ARVIZU

DEDICATORIA

A mis padres,

por todo su amor, su apoyo y por darme las bases
para llegar hasta donde estoy.

A Gerardo y Marisela,

por su ayuda incondicional durante toda la carrera.

A mis hermanos: Marcos, Luis Antonio y Francisco Gabriel.

Y a todos mis primos, para que este sea un ejemplo a superar.

A ti Yunuén

por darle un nuevo sentido a la vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis: M.C. Rafael Hernández Walls, por su paciencia y dedicación para ayudarme a llevar a cabo este trabajo.

Al M.C. Oscar Delgado González, por brindarme su apoyo incondicional.

A mis sinodales:

Dr. Miguel F. Lavín Peregrina y Dr. Reginaldo Durazo Arvizu; por sus valiosos comentarios y sugerencias.

A todos los profesores de la Facultad de Ciencias Marinas, por dedicar parte de su vida a la enseñanza.

A mis compañeros de siempre: Arturo y César; Arturo Hurtado y Javier Zavala.

A Mis tíos Victor Manuel Mendoza Montiel y César Mendoza Montiel.

A Lalo, Victor, Manuel, Joel y a todos los compañeros de "El Gran Chaparral".

A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron para lograr esta meta.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN.....	ii
HOJA DE APROBACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECINIENTOS.....	v
LISTA DE TABLAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 TEORÍA DE DISPERSIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	6
2. MATERIAL Y MÉTODO.....	7
2.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	7
2.1.1 MORFOLOGÍA.....	7
2.1.2 CLIMATOLOGÍA.....	9
2.1.4 CORRIENTES.....	9
2.1.3 ANTECEDENTES DE DISPERSIÓN.....	10
2.2 MUESTREO.....	12
2.3 VELOCIDADES TURBULENTAS.....	16
2.4 COEFICIENTES DE DIFUSIÓN.....	18
2.5 CINEMÁTICA.....	19

2.6 FUENTES DE ERROR.....	19
2.7 INTERVALOS DE CONFIANZA.....	20
3. RESULTADOS.....	22
3.1 TRAYECTORIAS.....	22
3.2 VELOCIDADES.....	34
3.3 VARIANZAS Y COEFICIENTES.....	36
3.4 INTERVALOS DE CONFIANZA.....	38
4. DISCUSIONES.....	44
5. CONCLUSIONES.....	52
6. RECOMENDACIONES.....	53
7. ÁPENDICE.....	54
8.REFERENCIAS.....	58

LISTA DE TABLAS

Tabla No.	Pág.
I. Velocidades de la corriente y coeficientes de difusión	35
II. Divergencia y vorticidad para los días de muestreo.....	37

LISTA DE FIGURAS

Figura No.	Pág.
1. Esquematización de los principales procesos involucrados en la propagación de un contaminante.....	5
2. Localización de la Bahía y del puerto de Ensenada.....	8
3. Área de estudio y posición de los teodolitos.....	13
4. Cruces de deriva utilizadas en los experimentos.....	14
5. Localización de los flotadores libres y su referencia al sistema de coordenadas.....	15
6. a) Trayectorias. b) Varianza vs. Tiempo.....	23
7. Ídem 6.....	24
8. Ídem 6.....	25
9. Ídem 6.....	26
10. Ídem 6.....	27
11. Ídem 6.....	28
12. Ídem 6.....	29
13. Ídem 6.....	30

14. Ídem 6.....	31
15. Ídem 6.....	32
16. Intervalos de confianza para la velocidad.....	39
17. Gradientes de la componente u de la velocidad.....	40
18. Gradientes de la componente v de la velocidad.....	41
19. Intervalos de confianza para la varianza.....	43
20. Comparación de varianzas para septiembre 29-2.....	46
21. Comparación de varianzas para octubre 20.....	46
22. Resultados de datos generados arbitrariamente. a) Trayectorias de flotadores mostrando una expansión aproximadamente simétrica. b) Varianzas.....	47

1. INTRODUCCIÓN

1.1 TEORÍA DE DISPERSIÓN

En la zona costera los procesos físicos son complejos, al estar sujetos a los efectos de la capa frontera, turbulencia y circulación debida a batimetría local y a la configuración de la costa. En estas zonas generalmente se descargan aguas residuales tanto domésticas como industriales, esperando que se diluyan, transporten y dispersen hacia regiones alejadas de la costa. Por lo tanto es importante el entendimiento de los procesos de mezcla y mecanismos de transporte (Lam, et al., 1984).

El transporte de una sustancia y su concentración en el océano depende de un gran número de factores, entre ellos están: biológicos (acumulación y transporte de sustancias por organismos vivientes); químicos (decaimiento químico de sustancias); físicos (transición entre estados, adsorción, etc.) y finalmente, mecánicos (transporte por movimientos de agua). Estos últimos pueden presentarse debido a la velocidad de la corriente o **advección** y a la presencia de fluctuaciones caóticas aleatorias en el campo de velocidad, es decir, **difusión** (Ozmidov, 1990).

La teoría de difusión (Apéndice) lleva a la ecuación de Fick (en la horizontal):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} + V \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (1)$$

donde **c** es la concentración de la sustancia que se difunde; **t** es el tiempo; **x,y** son los ejes

horizontales en el sistema de coordenadas cartesiano; U y V son las velocidades en las direcciones x, y respectivamente; K_x y K_y representan los coeficientes de difusión turbulenta. Para muchos problemas de la zona costera, las variaciones verticales de la concentración de contaminantes no son tan importantes como las horizontales y los cambios en la vertical pueden no tomarse en cuenta (Lam, et. al., 1984).

A partir de (1) es posible conocer el comportamiento de una sustancia al estar sujeta al proceso de difusión turbulenta. Sin embargo, el determinar un coeficiente de difusión turbulenta que describa lo que sucede en la realidad ha sido un problema desde los primeros estudios sobre el tema. Si K se toma como constante con respecto a la posición (x, y) y las velocidades U y V son iguales a cero, la ecuación se simplifica a:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (2)$$

esta última expresión corresponde a una difusión molecular o Fickiana, es decir que, al no existir efectos advectivos, los desplazamientos de las partículas son completamente aleatorios. Crank (1975), menciona que Einstein establece la relación:

$$2K = \frac{d\sigma^2}{dt} \quad (3)$$

donde la varianza σ^2 representa una medida de la propagación de las partículas de la sustancia que se difunde con respecto a un nivel promedio.

La solución de (2) se puede encontrar matemáticamente, sin embargo, en la práctica el valor de K no es constante, haciendo necesaria una relación efectiva para

calcular este coeficiente.

Se han desarrollado varias técnicas para calcular empíricamente el valor de K o de encontrar una forma alternativa de describir el proceso de difusión turbulenta. Uno de los intentos de una forma alternativa es el método aplicado por Richardson y Stommel (1948), en el que se toma en cuenta en cada intervalo de tiempo, la distancia que separa a un par de partículas (partículas vecinas) específicamente señaladas o marcadas de alguna manera. La expresión equivalente al coeficiente de difusión turbulenta es una "difusividad para vecinas" $F(l)$:

$$F(l) = \epsilon l^{\frac{4}{3}} \quad (4)$$

donde ϵ es una constante y l es la separación entre las partículas; a esta expresión se le llama frecuentemente "ley de los cuatro tercios" (Stommel, 1949). Sin embargo, se han encontrado discrepancias de esta ley con los hechos observados. Stommel (1949) menciona que puede ser aplicada al océano en ciertos casos especiales y según Tolmazin (1972) no se puede usar en la zona litoral.

Por otra parte, Okubo y Ozmidov (1970) identifican una dependencia del coeficiente de difusión con respecto a la escala en la que se desarrolla el proceso.

Sverdrup sugiere que para el océano la difusividad sea usada como una función lineal del radio promedio de una mancha que se difunde, pero tampoco describe correctamente la realidad (Stommel, 1949).

Okubo (1971) encuentra una relación empírica en la que usa experimentos con

tinta como trazador y supone una distribución radialmente simétrica de la elipse formada por la mancha en el océano. Los resultados de Okubo (1971) se reportan en un grupo de "diagramas de difusión", en los cuales no se descarta la posibilidad de que la "ley de los cuatro tercios" sea aplicable para ciertas escalas de tiempo y longitud de la difusión. Sin embargo, al comparar Okubo (1971) en su trabajo, resultados de datos anteriores, indica que pueden existir cambios en la varianza, se puede incrementar con el tiempo en potencias de dos y tres según las condiciones oceanográficas,

Las condiciones oceanográficas prevalecientes en el momento en que se llevan a cabo los experimentos tienen influencia sobre los resultados, según se ha encontrado: Okubo (1971), señala que para un buen análisis de la difusión oceánica, se debe contar con datos de estabilidad del agua, estado del mar, velocidad del viento, etc. Bowden (1965) describe la importancia del corte de velocidad producido por el fondo sobre la difusión horizontal.

Sin embargo, esas características del mar se reflejan en el campo de velocidad del flujo en el que se desarrolla el proceso de difusión turbulenta (Fig. 1). Para Okubo (1971), hay un dato especialmente importante, el corte de la corriente en la escala de la difusión. En el trabajo de Okubo y Ebbesmeyer (1976), efectuado con cuerpos de deriva, se toman en cuenta los gradientes de velocidad en la horizontal, se separan las componentes media y turbulenta del flujo, y se calcula un coeficiente de difusión turbulenta, a partir de las varianzas de los ejes mayor y menor de la elipse formada por los flotadores y a las varianzas de las velocidades turbulentas.

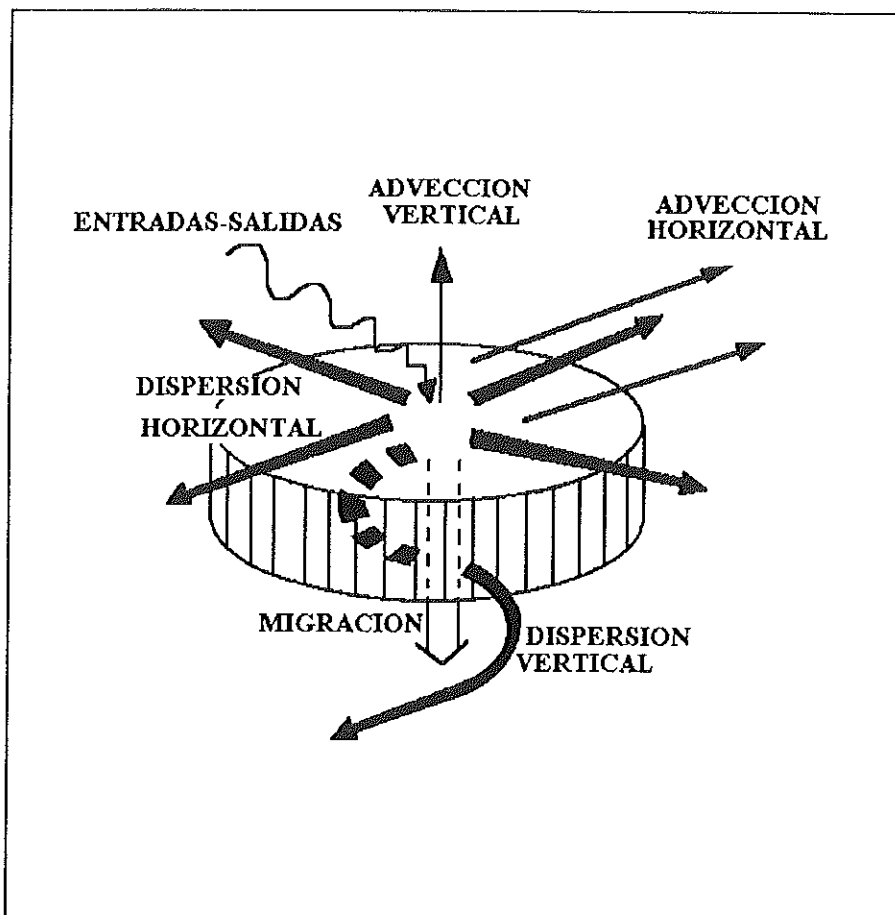


Fig. 1. Esquematización de los principales procesos involucrados en la propagación de un contaminante

Yanagi et al.,(1982) tratan de mejorar el método de Okubo y Ebbesmeyer (1976) eliminando los efectos de corte de la corriente separando los desplazamientos debidos a las velocidades turbulentas y posteriormente calculando las varianzas de los cuerpos de deriva debidas únicamente a velocidades turbulentas.

El presente estudio analiza datos de cuerpos de deriva liberados en 1993, aproximadamente a 300m al sur del puerto de Ensenada y forma parte de un proyecto conjunto entre el Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) y la Facultad de Ciencias Marinas, para conocer los procesos de dispersión de la zona, en virtud de las características de contaminación del puerto y la cercanía de una planta tratadora de aguas negras. El método que se seguirá en este trabajo sigue los pasos de Okubo y Ebbesmeyer (1976) para el cálculo de las velocidades turbulentas, posteriormente se determinan las varianzas según Yanagi et al. (1982) y se considera una difusión Fickiana para obtener los coeficientes de difusión turbulenta horizontal (todo el procedimiento será explicado detalladamente en secciones posteriores).

1.2 OBJETIVOS

A) Obtener los valores de difusividad turbulenta horizontal corregidos por el efecto de corte de la corriente en base a las relaciones dadas por Yanagi et al. (1982), para la región ubicada 1 km al sur de la rada del puerto de Ensenada, B. C. utilizando cuerpos de deriva.

B) Calcular y analizar la cinemática de la región utilizando resultados del método de Yanagi et al.(1982).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1.1 MORFOLOGÍA

Los experimentos para este trabajo se llevaron a cabo en la región 1 km al sur del puerto de Ensenada, dentro de la Bahía de Todos Santos, B. C., México (fig. 2).

El puerto de Ensenada se ubica en la parte noreste de la bahía. Es un puerto de altura considerado como único en su género en México, ya que cuenta con los tres rubros: Pesquero, Turístico y Mercante, ocupando el primero, segundo y tercer lugar respectivamente a nivel nacional. Está protegido por un rompeolas y un espigón de 1640 m y 855 m respectivamente (González, 1992).

La ciudad de Ensenada cuenta con una planta de tratamiento de aguas negras, ubicada cerca del arroyo El Gallo y manejada por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (C.E.S.P.E.-Fig. 2), con capacidad para el tratamiento de agua de 80 000 habitantes. Una vez tratada, el agua residual es desalojada hacia la bahía, muy cerca de la zona de estudio de este trabajo, a razón de 300 lt/s (litros por segundo) en invierno y 400 lt/s en verano.

La bahía tiene dos entradas, cuya división la constituyen dos islas al oeste. La entrada noroeste tiene 12 km de ancho, con profundidades menores a 50 m y algunos bajos de hasta 6 m. La entrada suroeste, de 6 km de ancho, presenta pendientes pronunciadas en las proximidades de las islas, encontrándose un cañon submarino entre

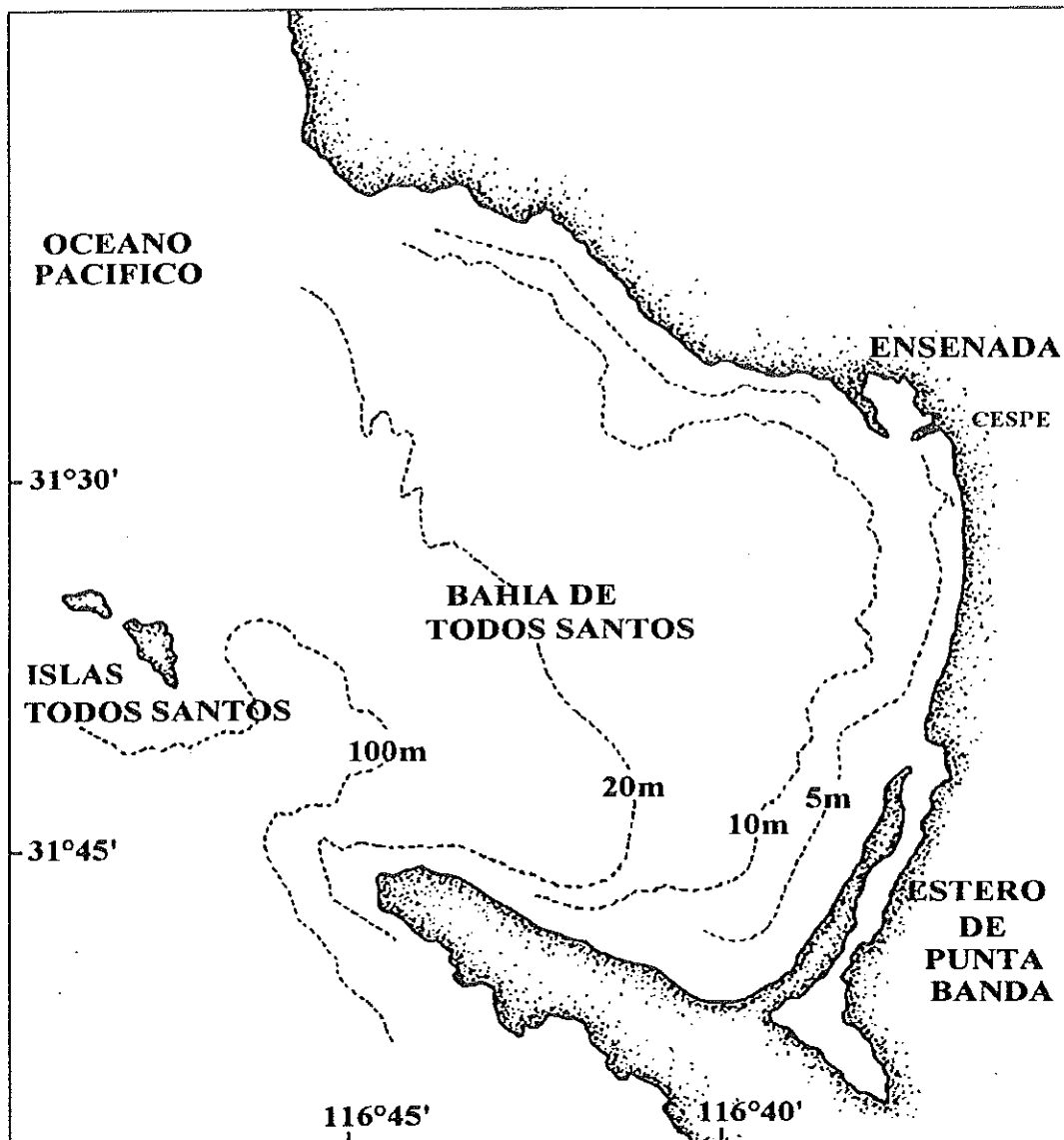


Fig. 2. Localización de la Bahía y del Puerto de Ensenada

éstas y Punta Banda de casi 400 m de profundidad.

2.1.2 CLIMATOLOGÍA

De septiembre a febrero, se registran direcciones de viento del este, noreste y sureste con intensidades de 8 a 10 ms^{-1} . Los vientos del este y noreste son más frecuentes, de escasa humedad e intensidades que pueden alcanzar 20 ms^{-1} , perdurando durante el día y la noche por 2 ó 3 días (González, 1992).

La variación anual de la temperatura superficial para la Bahía según Walton en 1955 (citado por Alvarez, 1971), es de 5.5°C con máximo de 20°C en agosto y mínimo de 14°C en marzo. En las partes interiores de la bahía, la temperatura promedio es de 16°C, pero puede alcanzar un máximo de 18.3°C. Mediciones recientes a 10 m de profundidad reportadas por Carrillo (1993), desde septiembre de 1991 a febrero de 1992, indican que las temperaturas máxima y mínima registradas cerca del área de estudio fueron las del mes de septiembre, de 18.72°C y 13.95°C respectivamente.

2.1.3 CORRIENTES

Durazo (1983) emplea grupos de cuerpos de deriva para conocer la cinemática de la región sur de la Bahía Todos Santos, B. C. Calcula valores de divergencia horizontal y vorticidad del orden de 10^{-4} s^{-1} y en los que las series de tiempo tuvieron gradientes laterales de velocidad a lo largo de la costa de la barra del Estero de Punta Banda produciendo efectos divergentes y de vórtice. Concluye también que existe una fuerte relación entre los vientos locales y la dirección de la corriente superficial. Sin embargo, el método utilizado no le permite hacer estimaciones de efectos turbulentos a pequeña

escala.

Hernández (1986) usa flotadores a diferentes profundidades (0, 4, 9 y 14 m) en la región sur del puerto de Ensenada, abarcando un área de aproximadamente 4 km² y resume sus resultados en un "...movimiento superficial neto hacia la costa, con una pequeña componente hacia el sur". Sólo en uno de los días estudiados el patrón cambió, teniendo viento del SSW provocando movimiento hacia el norte y trayectorias poco uniformes de los cuerpos de deriva. Encuentra también que existen otro tipo de fuerzas generadoras de corriente diferentes al viento, menciona que para uno de sus días analizados ésto fué evidente, al presentarse condición de calma en el viento y una magnitud de la velocidad de la corriente en el mar de 8 cms⁻¹.

Alvarez et al.(1988) utilizan cuerpos de deriva en la zona costera dentro de la Bahía de Todos Santos, encuentran patrones con corrientes intensas de casi 15 cms⁻¹ en marzo y agosto, dos veces mayor que para septiembre y enero. Encuentran que el agua entra a la bahía por las costas N y S siguiendo paralela a la línea de costa hasta llegar a una zona de convergencia frente al estero de Punta Banda, aunque el flujo promedio tiene una variabilidad muy marcada. También encuentra que sólo en regiones alejadas de la costa existe relación entre los cambios de velocidad de viento y corrientes.

2.1.4 ANTECEDENTES DE DISPERSIÓN

Al parecer el único estudio sobre dispersión en la Bahía fué realizado por los mismos autores (Alvarez et al., 1988); calculan un coeficiente de difusividad aparente y utilizan la pendiente de la recta de Varianza Total vs. Tiempo ajustada por mínimos

cuadrados, obteniendo valores del orden de $10^{-1} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ para K_r (aparente). Sus experimentos se llevaron a cabo en junio, julio y octubre de 1980 en la región Sur de la Bahía, encontrando bajos valores de difusividad coincidiendo con altos valores de persistencia y rapidez del viento con magnitud de más de 2 ms^{-1} . Pero los efectos de corte que pueden ser producidos por corrientes debidas a marea, a la influencia del viento o al efecto de la costa siguen presentes en esos cálculos provocando razones de cambio de la varianza aparente altamente variables (Yanagi et al., 1982). Por lo tanto, surge la necesidad de la determinación de los coeficientes de difusión corregidos por efectos de corte para una mejor comprensión y tratamiento de estos procesos.

2.2 MUESTREO

Durante los días 10, 11 y 12 de agosto; 29 y 30 de septiembre; 1 y 20 de octubre de 1993 se llevaron a cabo experimentos liberando 4 flotadores en cada uno de esos días, en la zona ubicada frente a la entrada al puerto de la Ciudad de Ensenada, B. C. En la liberación se trató de que los cuatro flotadores estuvieran en las esquinas de un cuadrado de aproximadamente 200 m de lado. Dos teodolitos se ubicaron en las balizas del rompeolas y el espigón, utilizadas como línea de base (fig. 3); las características de los flotadores se esquematizan en la Fig 4, se localizaron los flotadores midiendo ángulos azimutales a intervalos de 15 minutos aproximadamente (fig. 5). En algunos días las trayectorias de los flotadores se aproximaron a la costa después de cierto tiempo, obligando a su recuperación; en ocasiones se tenía la oportunidad de liberarlos nuevamente en la zona inicial. Estos casos se tomaron en cuenta como experimentos separados.

Con los ángulos medidos se obtuvieron las coordenadas cartesianas (x,y) con respecto al origen, ubicado en la baliza del rompeolas con ejes positivos hacia el este y norte, y negativos hacia el oeste y sur respectivamente (Fig. 5). Para eliminar las diferencias de tiempo en las localizaciones entre uno y otro flotador, se realizaron interpolaciones lineales encontrando la posición instantánea de los cuatro a un mismo tiempo t .

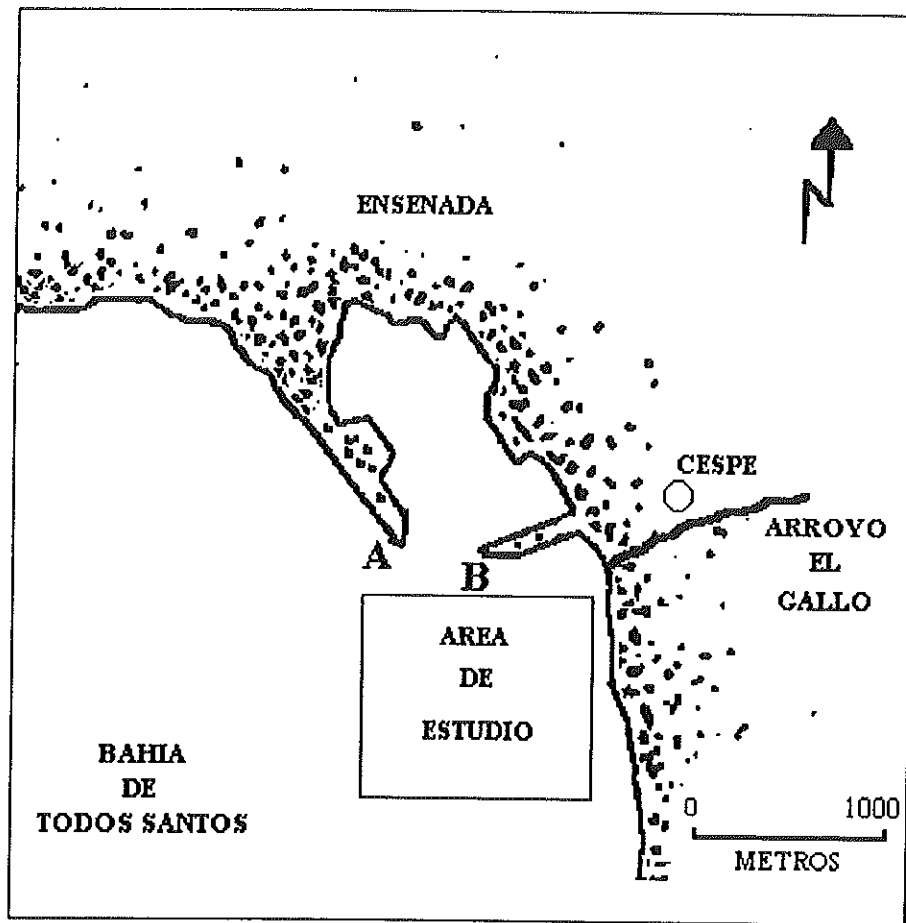


Fig. 3. Area de estudio y posición de los teodolitos.

A) Rompeolas. B) Espigón.

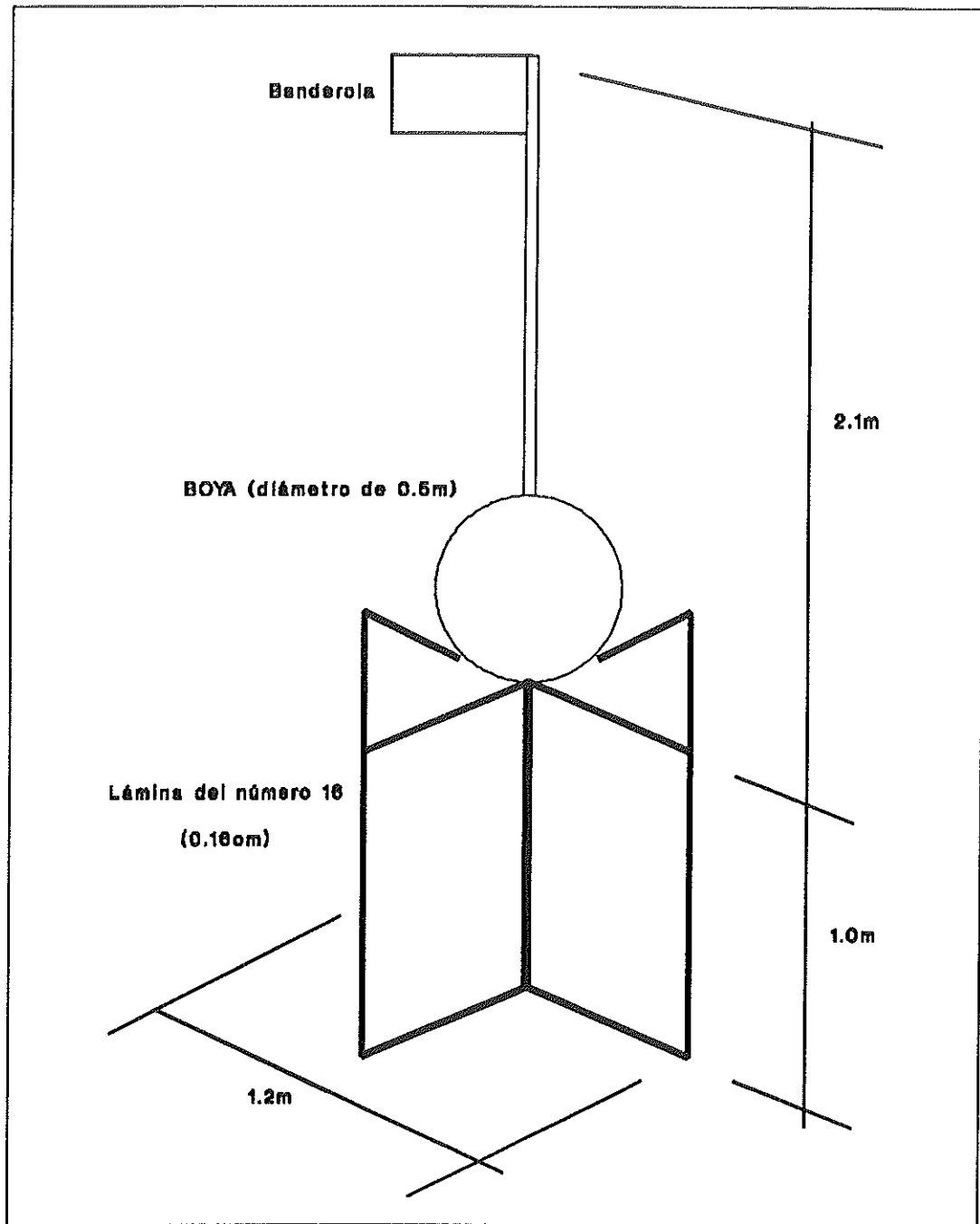


Fig. 4. Cruces de deriva utilizadas en los experimentos.

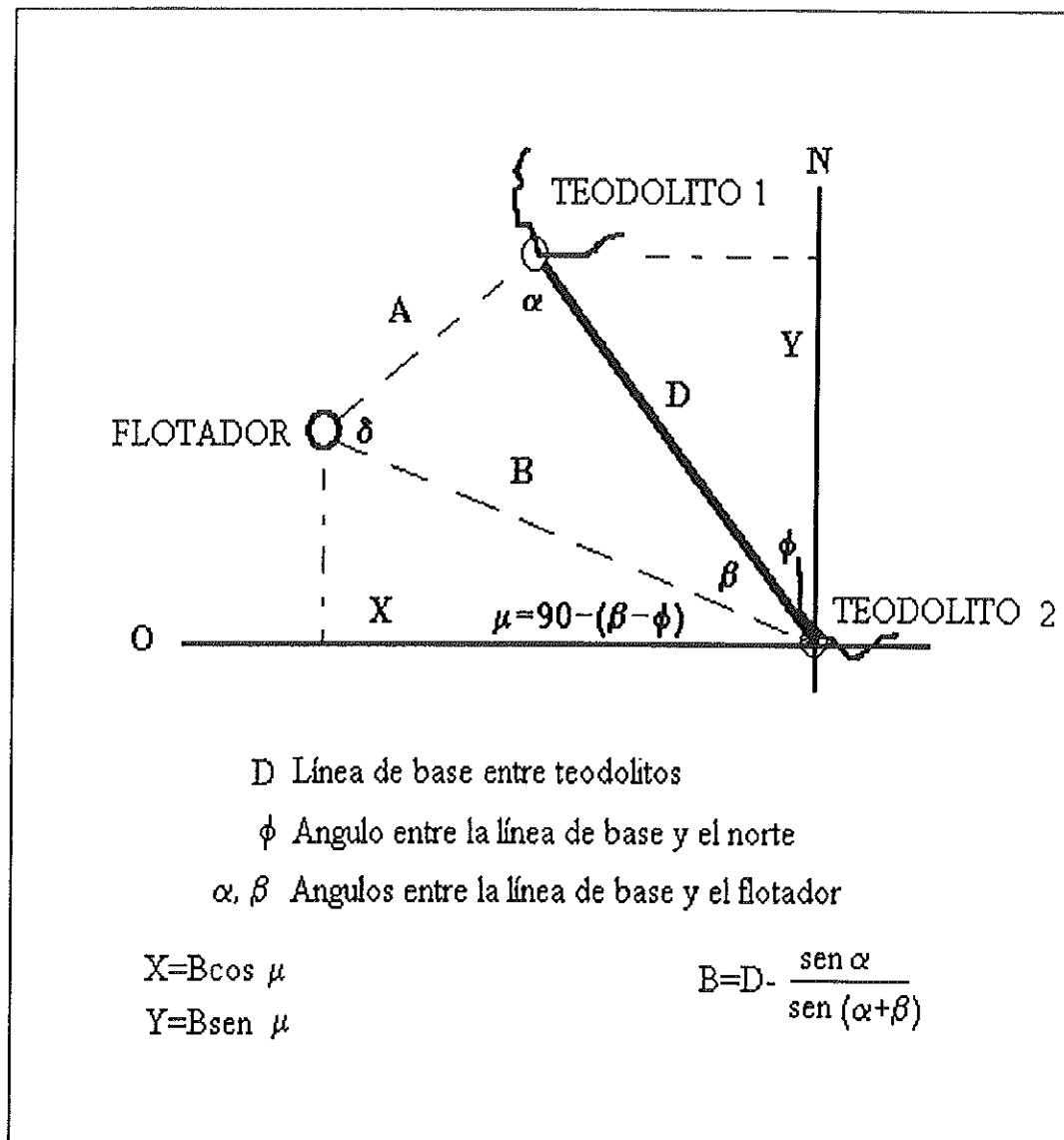


Fig. 5. Localización de los flotadores libres y su referencia al sistema de coordenadas.

2.3 VELOCIDADES TURBULENTAS

Sea la posición del flotador j al tiempo i definida por (x_{ij}, y_{ij}) . A partir de estas coordenadas, es posible calcular tanto la velocidad de cada boya como la posición del centroide del grupo. El centroide de un grupo de N flotadores al tiempo i esta dado por

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_j x_{ij}}{N}, \quad \bar{y}_i = \frac{\sum_j y_{ij}}{N}. \quad (5)$$

A partir de estas posiciones se sigue el método de Okubo y Ebbesmeyer (1976), quienes separan la velocidad media y los gradientes de velocidad a partir de un pequeño grupo de flotadores. Esto se realiza al expresar las componentes de las velocidades con una expansión de Taylor alrededor del centroide:

$$u_{ij} = \bar{u}_i + (x_{ij} - \bar{x}_i) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x} + (y_{ij} - \bar{y}_i) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial y} + u''_{ij} \quad (6a)$$

$$v_{ij} = \bar{v}_i + (x_{ij} - \bar{x}_i) \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x} + (y_{ij} - \bar{y}_i) \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial y} + v''_{ij} \quad (6b)$$

donde u_i y v_i son las velocidades del centroide al tiempo i , u''_{ij} y v''_{ij} son las velocidades turbulentas al tiempo i del flotador j . En la serie de Taylor se supone que los gradientes de velocidad son uniformes dentro del grupo de flotadores, esto es, que los gradientes no cambian dentro del área delimitada por el grupo, los términos de segundo y más alto orden se consideran turbulentos.

El sistema de ecuaciones se puede expresar en forma más sencilla usando notación matricial como:

$$U = RA + E, \quad y \quad V = RB + F \quad (7)$$

donde \mathbf{R} contiene las coordenadas (x,y) pero ahora referidas al centroide del grupo, \mathbf{U} y \mathbf{V} son las matrices de velocidad, en \mathbf{A} y \mathbf{B} se ubican los gradientes y el promedio de velocidad y en \mathbf{E} y \mathbf{F} las velocidades turbulentas:

$$R_i = \begin{pmatrix} 1 & x_{i1} & y_{i1} \\ 1 & x_{i2} & y_{i2} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{in} & y_{in} \end{pmatrix} \quad U_i = \begin{pmatrix} u_{i1} \\ u_{i2} \\ \cdot \\ \cdot \\ u_{in} \end{pmatrix} \quad V_i = \begin{pmatrix} v_{i1} \\ v_{i2} \\ \cdot \\ \cdot \\ v_{in} \end{pmatrix}$$

$$A_i = \begin{pmatrix} \overline{u_i} \\ \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x} \\ \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial y} \end{pmatrix} \quad B_i = \begin{pmatrix} \overline{v_i} \\ \frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x} \\ \frac{\partial \overline{v_i}}{\partial y} \end{pmatrix} \quad E_i = \begin{pmatrix} u''_{i1} \\ u''_{i2} \\ \cdot \\ \cdot \\ u''_{in} \end{pmatrix} \quad F_i = \begin{pmatrix} v''_{i1} \\ v''_{i2} \\ \cdot \\ \cdot \\ v''_{in} \end{pmatrix}$$

Para resolver dicho sistema de ecuaciones, Okubo y Ebbesmeyer (1976) usan un procedimiento de regresión lineal, si el número de cuerpos de deriva es mayor o igual a tres, entonces, las matrices \mathbf{A} y \mathbf{B} se pueden calcular mediante las siguientes relaciones:

$$A = (R' R)^{-1} R' U \quad (8a)$$

$$B = (R' R)^{-1} R' V \quad (8b)$$

donde \mathbf{R}' es la transpuesta de \mathbf{R} y $(\mathbf{R}' \mathbf{R})^{-1}$ es la inversa de $(\mathbf{R}' \mathbf{R})$. Sustituyendo en (14):

$$E = [1 - R (R'R)^{-1} R'] U \quad (9a)$$

$$F = [1 - R (R'R)^{-1} R'] V \quad (9b)$$

De esta forma se obtienen las velocidades turbulentas a partir de las posiciones de un pequeño grupo de flotadores.

2.4 COEFICIENTES DE DIFUSIÓN

Yanagi et al. (1982) utilizan las velocidades turbulentas **E** y **F** para calcular los desplazamientos debidos sólo a los movimientos turbulentos:

$$\overline{x_i} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [x_{0j} + \int_0^t u_j''(\eta) d\eta] \quad (10a)$$

$$\overline{y_i} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [y_{0j} + \int_0^t v_j''(\eta) d\eta] \quad (10b)$$

donde en (x,y) el subíndice i es igual a cero denotando la posición inicial del flotador j ; N es el número de flotadores; η es la variable muda que indica el tiempo y t es el tiempo final.

De esta forma, las varianzas de los flotadores se pueden expresar como (Yanagi et al., 1982):

$$\sigma_{x_i}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N [x_{0j} + \int_0^t u_j''(\eta) d\eta - \overline{x_i}]^2 \quad (11a)$$

$$\sigma_{y_i}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \left[y_{0j} + \int_0^t v_i''(\eta) d\eta - \bar{y}_i \right]^2 \quad (11b)$$

Una vez obtenidas las varianzas de las componentes (x,y) para cada intervalo de tiempo, se grafican en un diagrama de σ^2 vs tiempo. Se supone un proceso de difusión Fickiano para calcular la difusividad turbulenta horizontal a partir de (3) como:

$$K_x = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_x^2}{dt} \quad y \quad K_y = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_y^2}{dt} \quad (12)$$

donde, para obtener K_x y K_y se aplica una regresión lineal a cada diagrama de σ^2 vs t, por el método de mínimos cuadrados, cuya pendiente indica el cambio de la varianza en el tiempo.

2.5 CINEMÁTICA

Se utilizan los gradientes de velocidad obtenidos por el método anterior para calcular los valores de divergencia horizontal y vorticidad relativa respectivamente como:

$$\gamma(t) = \frac{\partial \bar{u}(t)}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}(t)}{\partial y} \quad (13)$$

$$\eta(t) = \frac{\partial \bar{v}(t)}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}(t)}{\partial y} \quad (14)$$

2.6 FUENTES DE ERROR

Los teodolitos utilizados tienen precisión de ± 0.3 m, por lo que el error relativo es pequeño.

2.7 INTERVALOS DE CONFIANZA

Se calcularon los intervalos de confianza para las matrices **A** y **B** determinando primero sus desviaciones estándar, las cuales corresponden a la raíz cuadrada de los términos en la diagonal de las matrices:

$$(R R')^{-1} \sigma_u^{2'} \quad y \quad (R R')^{-1} \sigma_v^{2'} \quad (15)$$

donde estas varianzas están definidas como:

$$\sigma_{u_i}^{2'} = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (u_{ij}'')^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16a)$$

$$\sigma_{v_i}^{2'} = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (v_{ij}'')^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16b)$$

quedando las matrices de desviación estándar (S.D.) de la siguiente forma:

$$S. D. (A) = \begin{pmatrix} S.D. (\bar{u}) \\ S.D. \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) \\ S.D. \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \end{pmatrix} \quad S. D. (B) = \begin{pmatrix} S.D. (\bar{v}) \\ S.D. \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \\ S.D. \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \end{pmatrix}$$

Si las velocidades turbulentas tienen la misma distribución normal, al 100(1-a)%

límite de confianza, se pueden expresar:

$$A \pm t(n-2, 1-\frac{1}{2}\alpha) S.D. (A) \quad (17a)$$

$$B \pm t(n-2, 1-\frac{1}{2}\alpha) S.D. (B) \quad (17b)$$

donde la distribución t de student $t(n-2, 1-0.5\alpha)$ tiene $n-2$ grados de libertad.

Para este trabajo se determinaron los intervalos de confianza antes descritos para el día 11 de agosto como ejemplo de los posibles resultados en los otros experimentos. Se grafican las velocidades y los gradientes que corresponden a las matrices **A** y **B**; tanto el valor determinado por el método de este estudio, como el del intervalo de confianza para cada intervalo de tiempo del experimento.

Se calcularon también para el mismo día 11 de agosto, los intervalos de confianza para las varianzas obtenidas a partir de (11), siguiendo el método de Kreyszig (1978) como una idea de la desviación de éstas de la realidad.

3. RESULTADOS

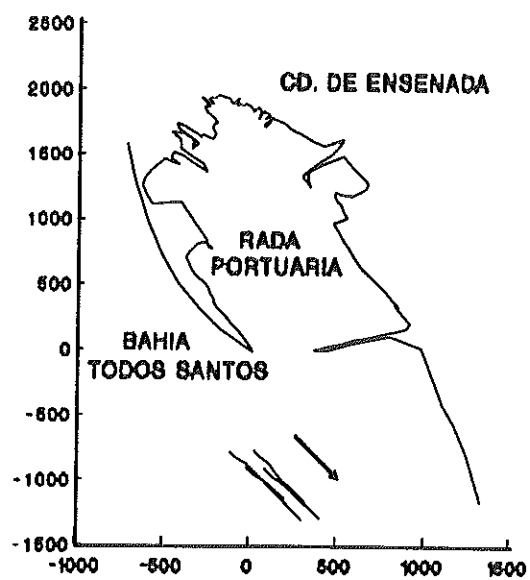
3.1 TRAYECTORIAS

Las figuras 6 a 15 (incisos a) muestran las trayectorias recorridas por los cuerpos de deriva durante los días de medición. Las trayectorias describieron una dirección predominante hacia el este, paralelas al espigón, con una ligera tendencia a seguir a lo largo de la costa, es decir, hacia el este-sureste. Sólo en dos experimentos la dirección cambia considerablemente: en el caso del 10 de agosto (fig. 6) la dirección es sureste y el 30 de septiembre (fig. 12), el movimiento es significativo hacia el noreste, en dirección al ángulo comprendido entre el espigón y la línea de costa.

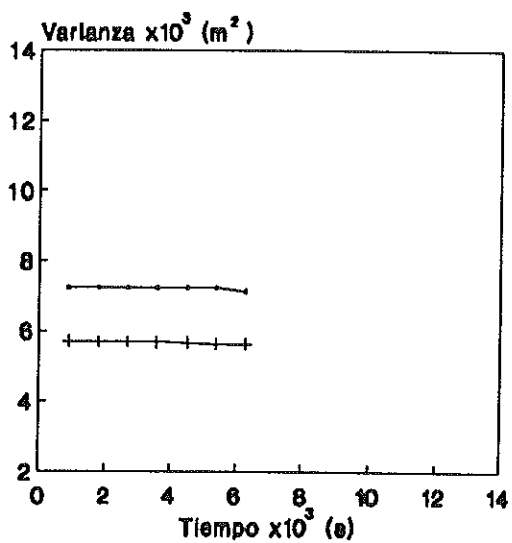
En cada caso los cuatro flotadores describen una trayectoria semejante, con pocos cambios, tanto en dirección como en magnitud, manteniendo el cuadrado formado en la liberación. En algunos casos, inclusive existe cierta tendencia a agruparse y formar un cuadrado más pequeño. Sólo en la trayectoria del día 29-2 (fig 11a), la separación de los flotadores es evidente en el eje y, pero se juntan con respecto al eje x. Por la cercanía con la costa en el área de estudio, se podría suponer la existencia de un gradiente en el campo de velocidades. Sin embargo, las trayectorias descritas por los cuerpos de deriva, no revelan cortes de velocidad dentro del área en la cual se mueven, es decir, que probablemente los cuatro estén sujetos a las mismas condiciones en el campo de velocidad.

En el estudio realizado por Durazo(1983) en la región al sur de la Bahía, se reportan comportamientos semejantes para algunas de sus trayectorias, aunque su área de

Agosto 10



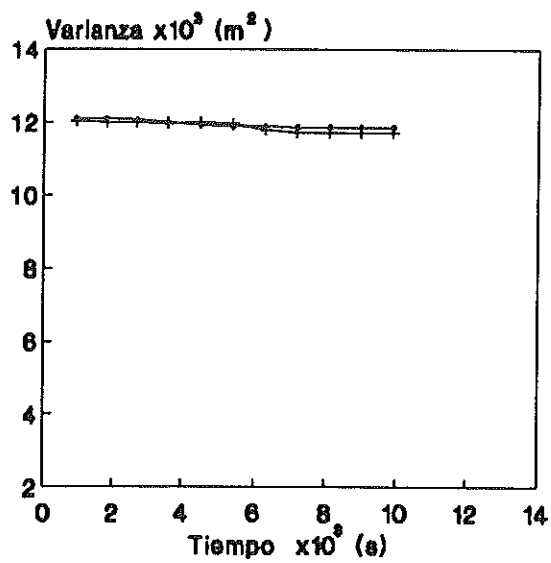
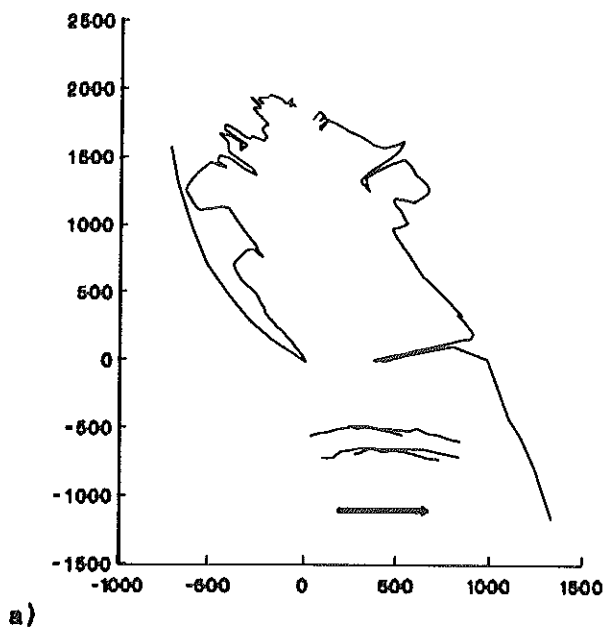
a) La flecha indica la dirección del movimiento.
Distancias en metros.



b) —•— Varianza x —+— Varianza y

Fig. 6. a) Trayectorias. b) Varianza vs. tiempo.

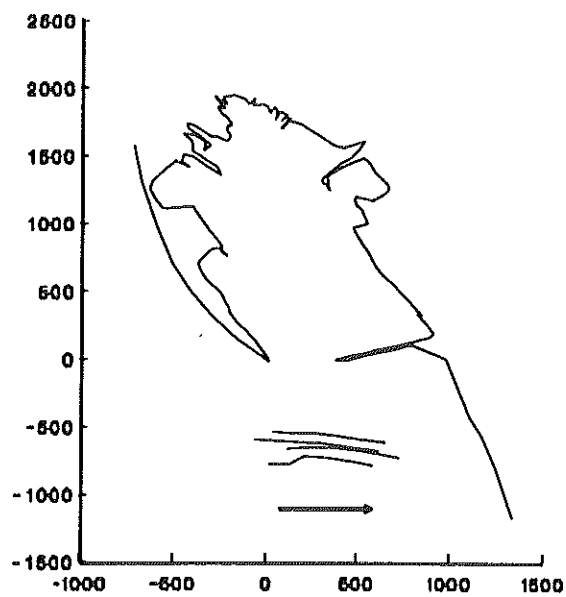
Agosto 11



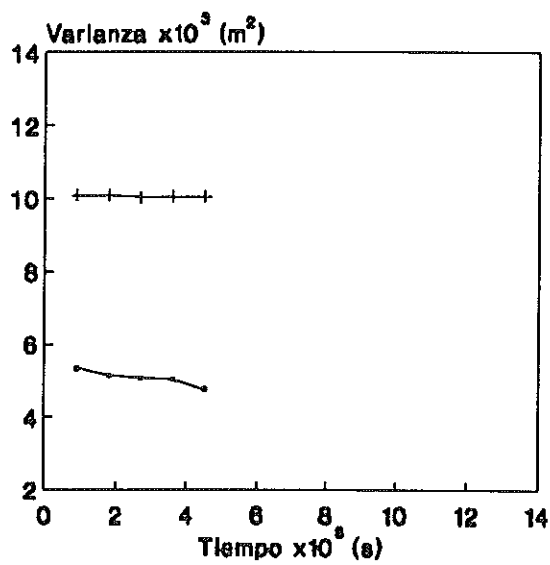
b) —○— Varianza x —+— Varianza y

Fig. 7. Idem 6.

Agosto 12-1



a)

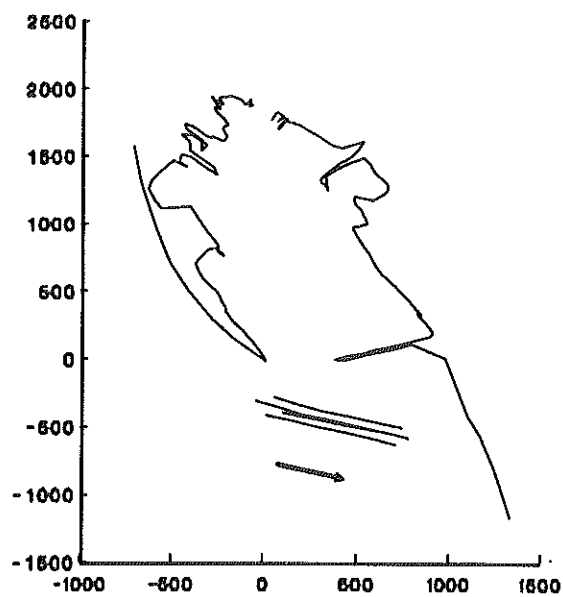


b)

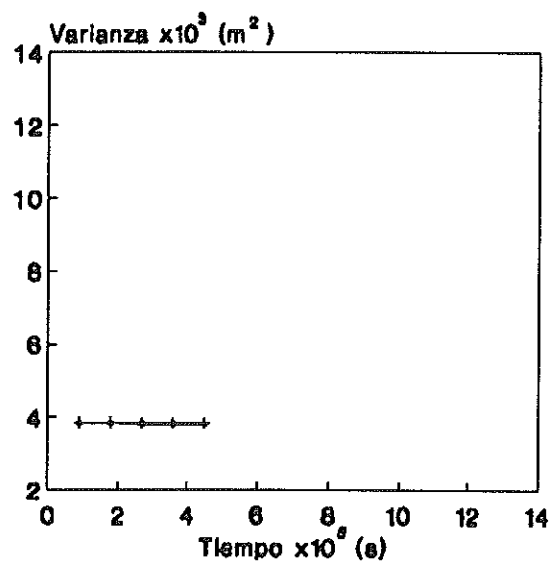
—○— Varianza x —+— Varianza y

Fig. 8. Idem 6.

Agosto 12-2



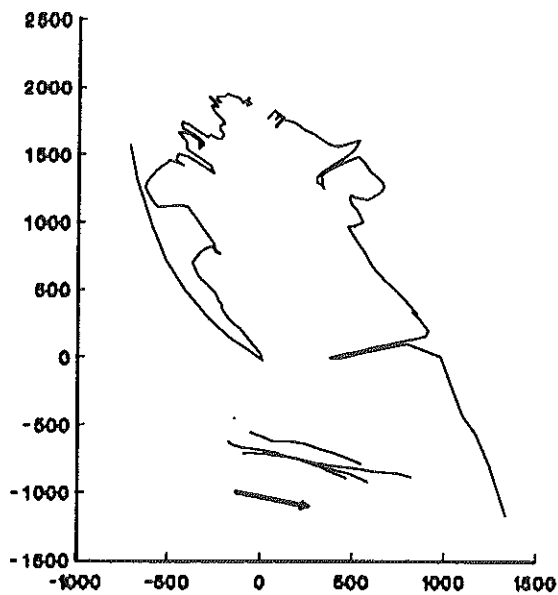
a)



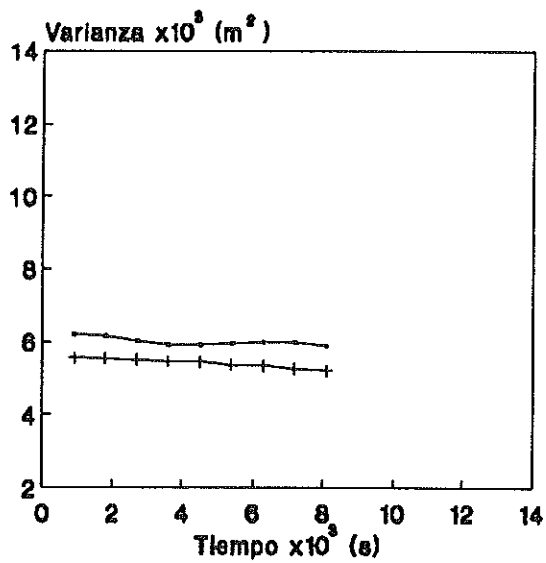
b) —+— Varianza x —+— Varianza y

Fig. 9. Idem 6.

Septiembre 29-1



a)

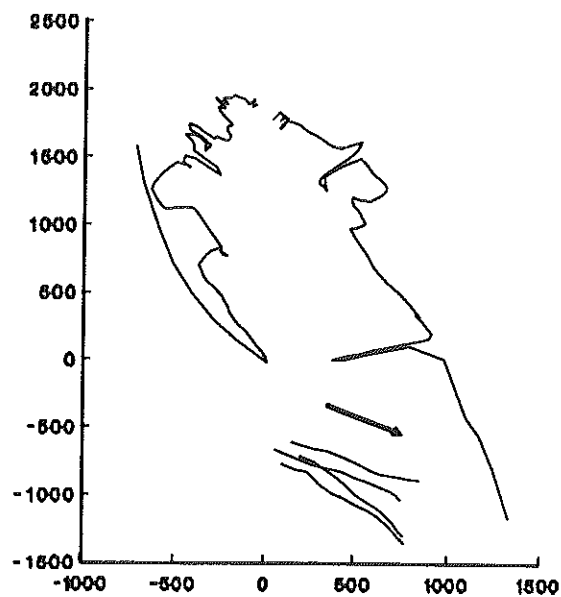


b)

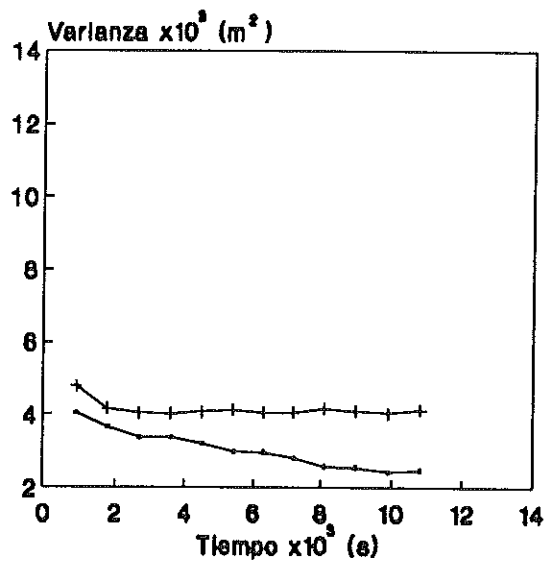
—○— Varianza x —+— Varianza y

Fig. 10. Idem 6.

Septiembre 29-2



a)

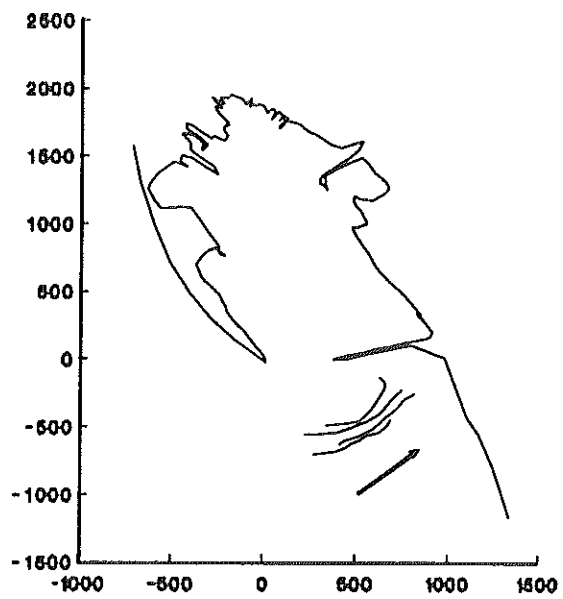


b)

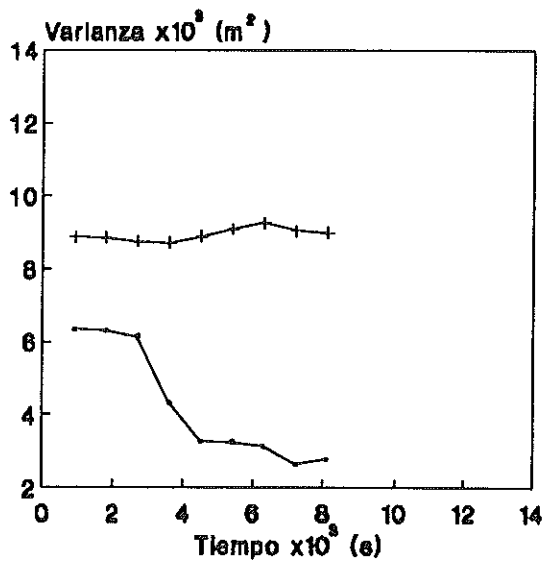
—•— Varianza x -+ - Varianza y

Fig. 11. Idem 6.

Septiembre 30



a)

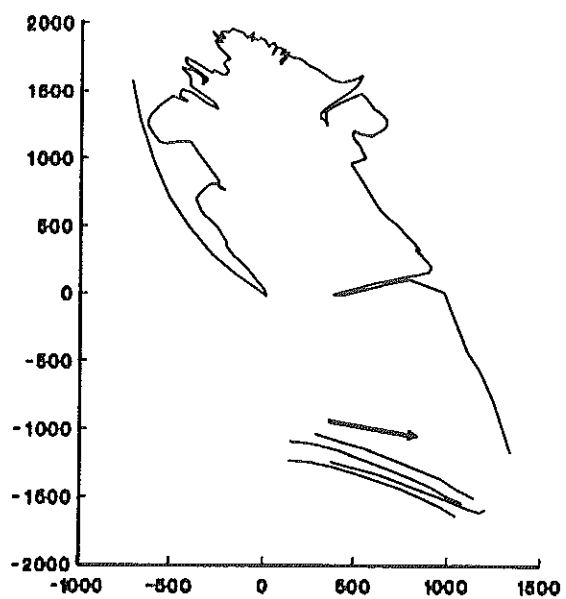


b)

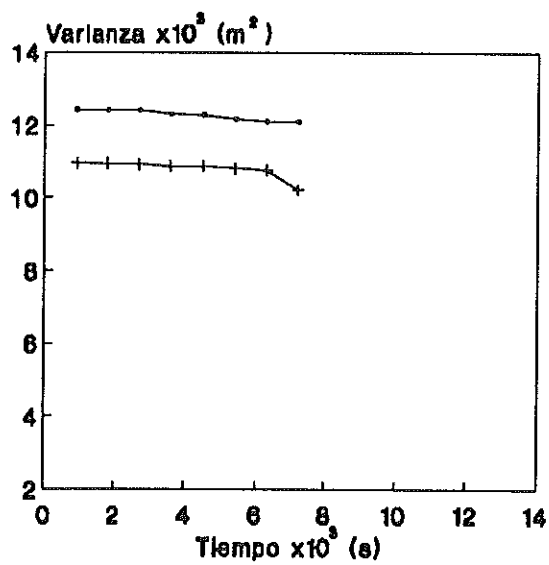
—•— Varianza x -+ - Varianza y

Fig. 12. Idem 6.

Octubre 01-1



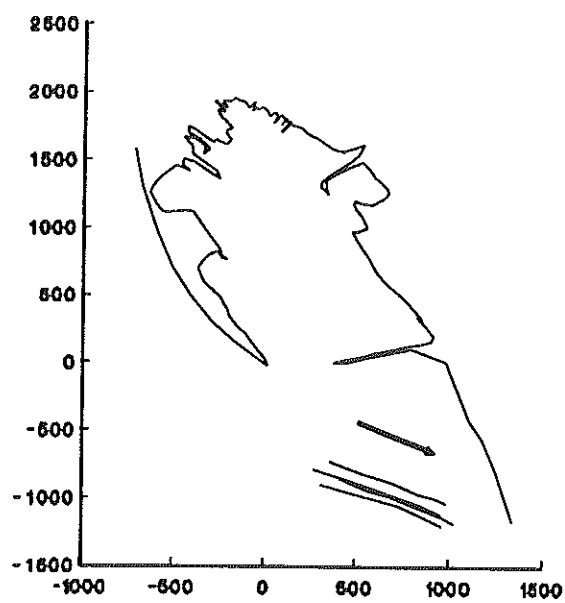
a)



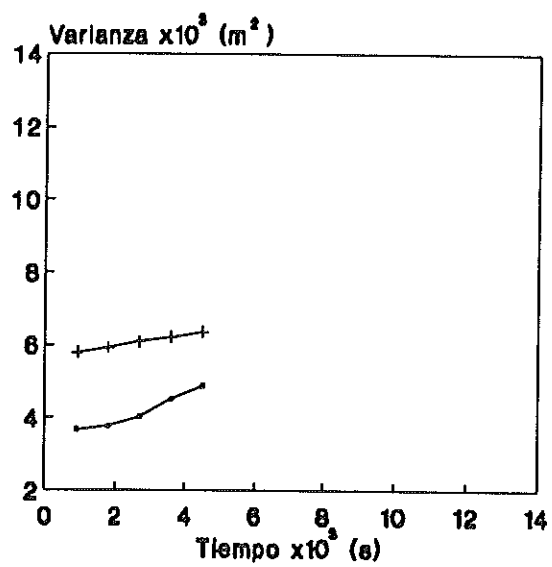
b) —○— Varianza x —+— Varianza y

Fig. 13. Idem 6.

Octubre 01-2



a)

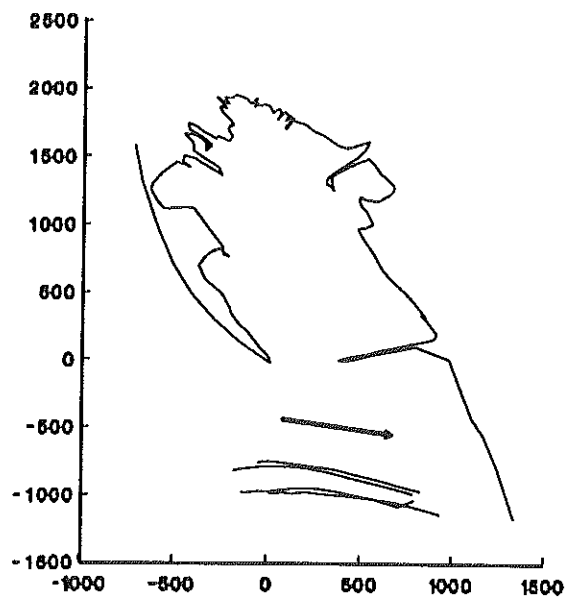


b)

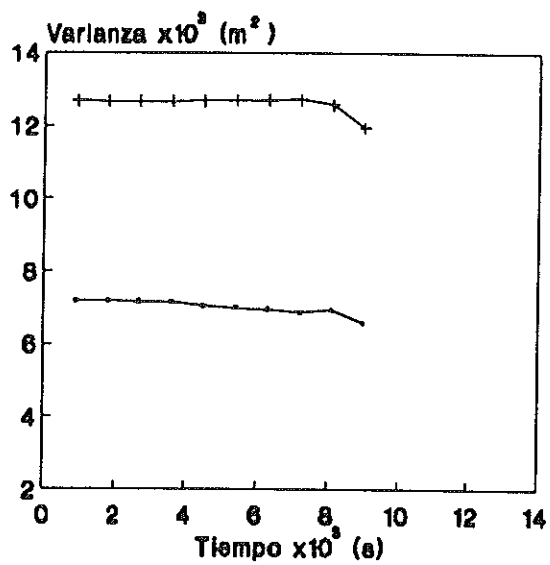
—+— Varianza x —•— varianza y

Fig. 14. Idem 6.

Octubre 20



a)



b)

—◆— Varianza x —+— varianza y

Fig. 15. Idem 6.

estudio se encuentra más alejada de la costa que la del trabajo aquí presentado. El autor también encuentra una disminución en el área delimitada por los cuerpos de deriva cuando la corriente es hacia la costa. Hernández (1986) encontró que para la parte sur del puerto de Ensenada el comportamiento general es hacia la costa, con una pequeña componente hacia el sur, lo que está de acuerdo con las observaciones de este estudio. El trabajo de Hernández (1986) es el más cercano a nuestra área de estudio.

Los pocos cambios en las trayectorias encontradas en nuestro estudio posiblemente se deban principalmente a la corta duración de los periodos de medición. Alvarez (1971) encuentra cambios notorios en la dirección de la corriente después de periodos de 6, 8 y 12 horas; el autor trabaja cerca del área de estudio y podría suponerse un comportamiento similar para las trayectorias aquí reportadas, sin embargo, los cuerpos de deriva terminarían en la playa junto al espigón si se dejaran mas tiempo en el agua. Si se toma en cuenta la circulación descrita para la Bahía (Alvarez et al., 1988), se observa que en la zona de estudio de este trabajo la corriente predominante es la que trae agua al interior de la bahía desde la parte noroeste de la misma, siguiendo paralela a la línea de costa hasta llegar al Estero de Punta Banda, por lo tanto los resultados aquí obtenidos son sólo una muestra de lo que sucede en una zona muy cercana a la costa.

En general el comportamiento de los cuerpos de deriva tiende a alinearse con la línea de costa, que en nuestro caso sería el espigón, sin embargo, está de acuerdo con los trabajos anteriormente realizados en la Bahía (Durazo,1983; Hernández, 1986; Álvarez et al., 1988; Durazo y Alvarez, 1988; Argote et al., 1991; entre otros).

3.2 VELOCIDADES

La duración de cada experimento y las velocidades obtenidas se presentan en la tabla I. Los períodos de medición se efectuaron desde 1.25 hr hasta 3 hr. Periodos más prolongados no fueron posibles debido a la dirección de la corriente o a dificultades de localización.

Los máximos y mínimos encontrados para la componente u fueron de 0.049 ms^{-1} y 0.153 ms^{-1} , para v se encontraron respectivamente 0.003 ms^{-1} y 0.074 ms^{-1} .

Las velocidades encontradas en la componente u , son en muchos de los casos, varias veces mayor que para v . Sin embargo, ambas concuerdan con los datos de los estudios anteriormente mencionados (Durazo,1983; Hernández,1986; Alvarez et al.,1988; Durazo y Alvarez, 1988), pero se debe tomar en cuenta que en el presente trabajo no se hicieron análisis para determinar la influencia de la marea en la rapidez de la corriente. Esta parte podría ser importante si se toma como referencia a Alvarez (1971), quien encuentra un cambio semidiurno notable con corriente residual cercana a 2 cms^{-1} . La influencia de factores que afectan en la rapidez de la corriente pueden ser muy importantes, la marea es uno de ellos. El arrastre del viento sobre la parte expuesta de un flotador equipado con reflector de radar de 30 cm de diámetro puede ser del orden de 2 cms^{-1} , según reportan Durazo y Alvarez (1988), en ese caso la relación del área expuesta al viento y el área sumergida es de 1:11. En el caso de este trabajo el reflector de radar no fué utilizado, y la relación es entonces de 1:21, lo que hace suponer un valor menor de 2 cms^{-1} . Los valores mínimos y máximos de divergencia y vorticidad son presentados

Tabla II. Divergencia y vorticidad para los días de muestreo.

Día	Divergencia ($10^{-4} s^{-1}$)		Vorticidad ($10^{-4} s^{-1}$)	
	Mínimo	Promedio	Mínimo	Promedio
Agosto 10	-0.92605	-0.17783	-0.53266	0.13983
Agosto 11	-2.41126	-0.13346	-1.56980	-0.11081
Agosto 12-1	-1.83564	-0.31080	-2.00088	-0.80051
Agosto 12-2	-2.76815	-0.72501	0.04972	0.64461
Septiembre 29-1	-41.7176	-4.19847	-1.27271	1.73613
Septiembre 29-2	-5.11406	1.09102	-0.61417	-1.54121
Septiembre 30	-3.06899	0.59772	-1.95530	0.97777
Octubre 01-1	-7.40251	-0.06775	-6.75129	0.28400
Octubre 01-2	-7.35858	3.93105	-8.81394	-0.18106
Octubre 20	-9.83012	-1.51633	-11.1937	-1.26487

en la Tabla II. Los valores mínimos de la divergencia son del orden de 10^{-4} s^{-1} predominantemente y todos negativos; los máximos tienen mayor variación en el orden de magnitud encontrándose desde 10^{-3} hasta 10^{-5} s^{-1} y son positivos. Para la vorticidad los valores mínimos están en el rango de 10^{-3} a 10^{-5} s^{-1} y los máximos encontrados del orden de 10^{-4} s^{-1} .

3.3 VARIANZAS Y COEFICIENTES

Las varianzas calculadas por el método de Yanagi et al. (1982), en las figuras 6 a 15 (incisos b), tienen un comportamiento similar, presentan poca variación en su valor, tanto en la componente x como en la y. Solo las figuras 12 y 14 tienen diferencias con respecto a las demás. En la primera, la varianza en x decae notablemente mientras que en y se mantiene constante. En el caso de la figura 14, existe un aumento en las dos componentes de la varianza.

Los coeficientes de difusividad obtenidos a partir de la regresión lineal en las gráficas de varianza contra tiempo para cada día de medición se ubican en la Tabla I, y se encuentran en el orden de 10^{-2} y $10^{-3} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. En sólo un caso fue de $-0.299 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Con excepción de tres casos, K_x del día 20 de septiembre (fig. 12) y las dos componentes de la segunda medición del 1o. de octubre (fig. 15) son positivas, el resto son negativos.

Para el caso de la segunda medición del 1o. de octubre, en que las componentes de la difusión son positivas, se calcula un coeficiente de difusividad absoluto mediante la siguiente relación:

**Tabla I. Velocidades de la corriente y coeficientes de difusión.
El símbolo ' indica la segunda medición del día.**

	AG 10	AG 11	AG 12	AG 12'	SE 29	SE 29'	SE 30	OC 01	OC 20
DURACION (hrs.)	1.75	2.75	1.25	1.25	2.25	3	2.25	2	2.5
U x10 ⁻² (ms ⁻¹)	5.09	5.76	14.18	15.39	8.55	6.11	4.98	12.38	10.34
V x10 ⁻² (ms ⁻¹)	-6.16	-0.35	-1.76	-4.9	-2.82	-4.25	4.01	-5.9	-1.66
Kx x10 ⁻² (m2s ⁻¹)	-6	-15	-69	-4	-16	-76	-299	-30	-30
Ky x10 ⁻² (m2s ⁻¹)	-6	-20	-5	-1	-24	-13	22	-41	-23

$$K = \sqrt{K_x^2 + K_y^2} \quad (18)$$

El coeficiente de difusión turbulenta horizontal calculado de esta forma es de **1.9** m^2s^{-1} .

3.4 INTERVALOS DE CONFIANZA

Los intervalos de confianza obtenidos a partir de (17) para los gradientes y las componentes de la velocidad del centroide del grupo de flotadores se presentan en las figuras 16 a 18 para el día 11 de agosto, que es representativo de todas las mediciones. Los intervalos de confianza para las varianzas obtenidas de (11) se grafican en la figura 19 para el mismo 11 de agosto. Los intervalos de las figuras 16 a 18 presentan cambios en la magnitud de los límites inferior y superior describiendo momentos en los cuales el intervalo se va alejando del valor encontrado en este estudio hasta llegar a un máximo, donde el intervalo se acerca al valor encontrado. Aunque esto se presenta en las tres figuras mencionadas, su relación con el tiempo no es muy evidente. Puede decirse que en las primeras mediciones los límites se encuentran alejados del valor encontrado, en la segunda o tercera medición el intervalo es muy pequeño pero vuelve a aumentar en las siguientes. En las últimas mediciones los límites disminuyen y permanecen cerca del valor encontrado. Lo que se logra apreciar de las gráficas es un buen grado de confiabilidad en ciertas ocasiones, pero disminuye en otras. A grandes rasgos las tres figuras mencionadas terminan con intervalos pequeños, lo que sugiere la posibilidad de valores representativos para estas observaciones.

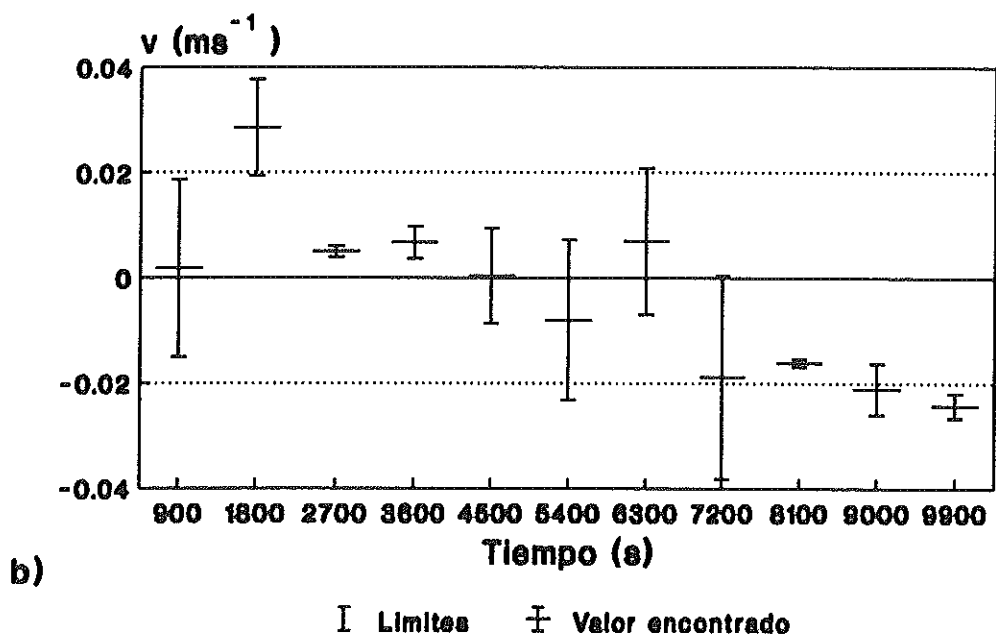
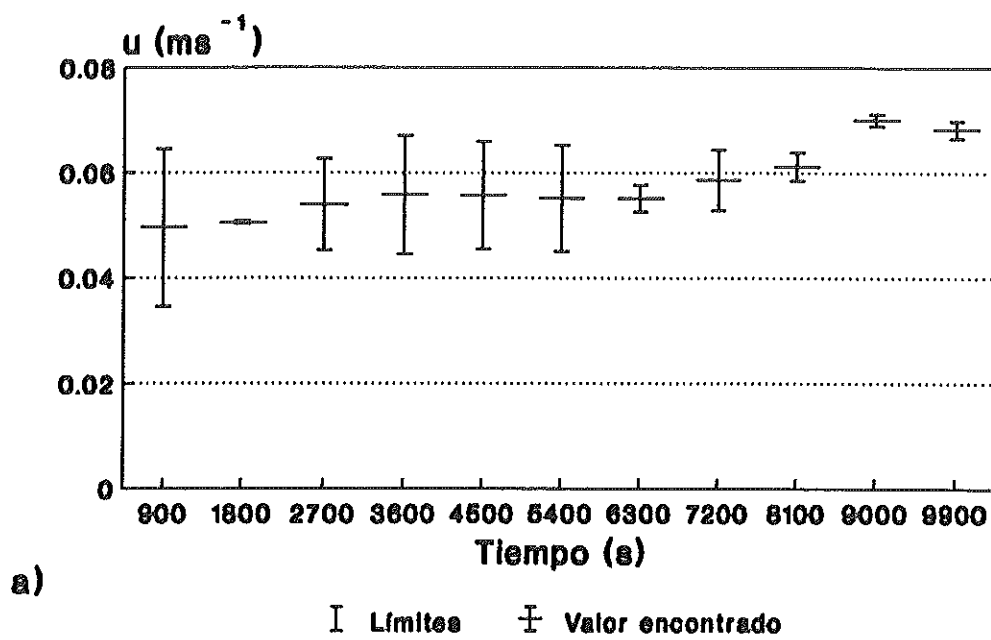


Fig. 16. Intervalos de confianza para la velocidad.

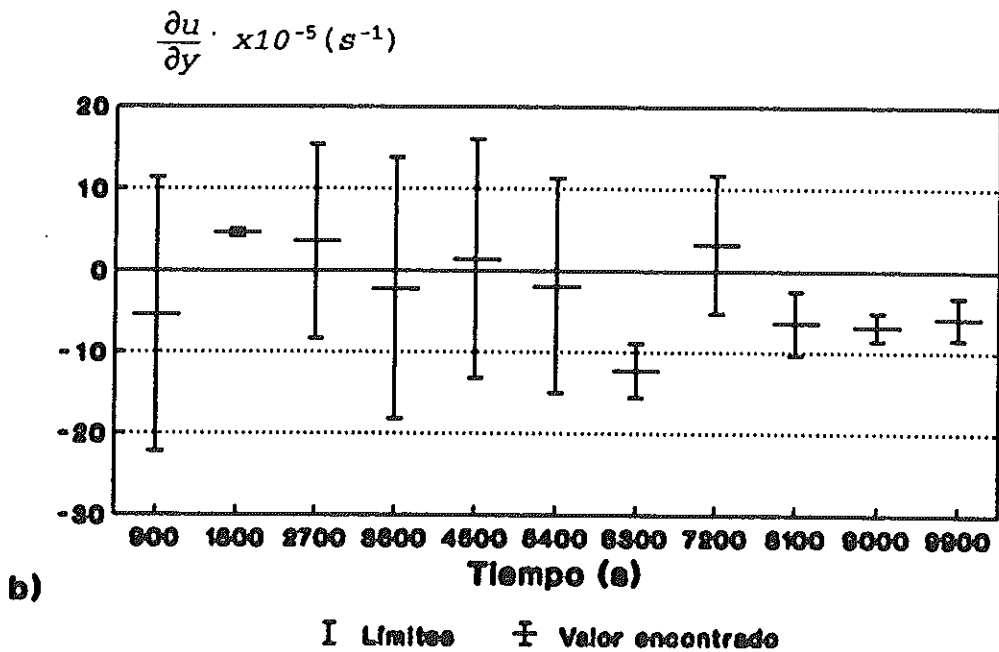
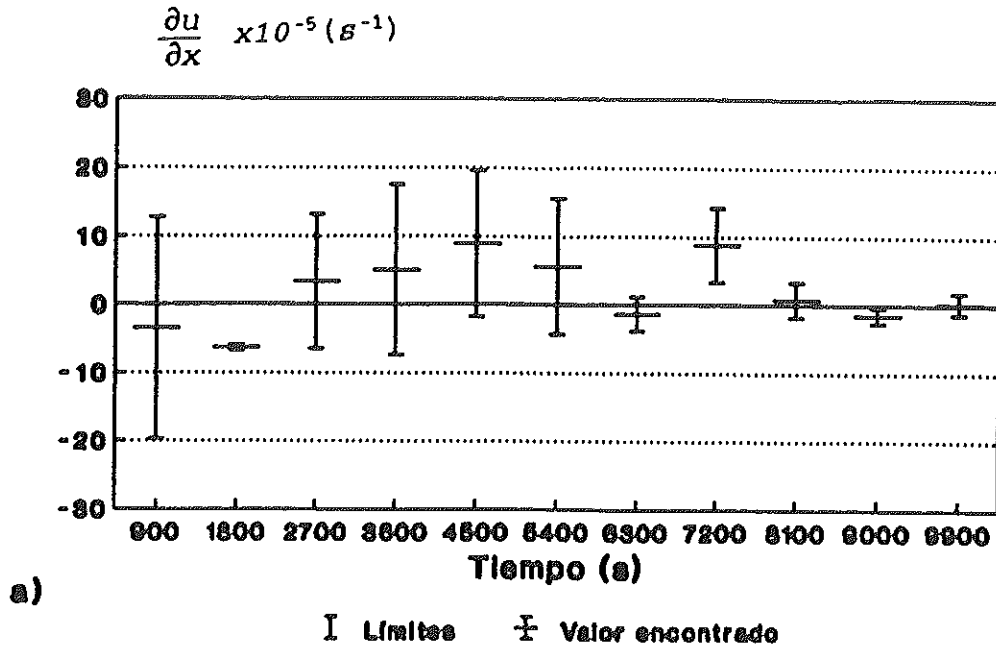
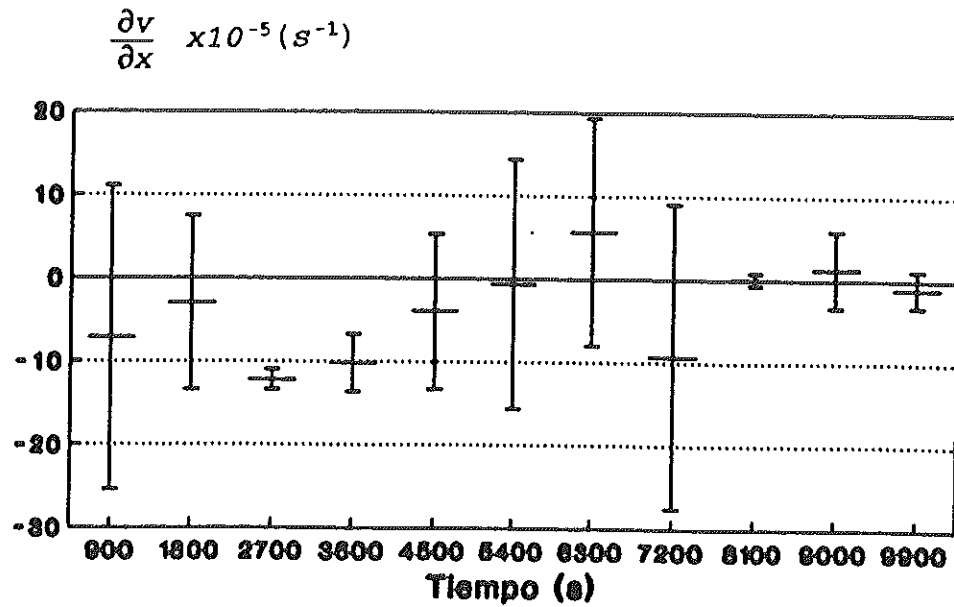
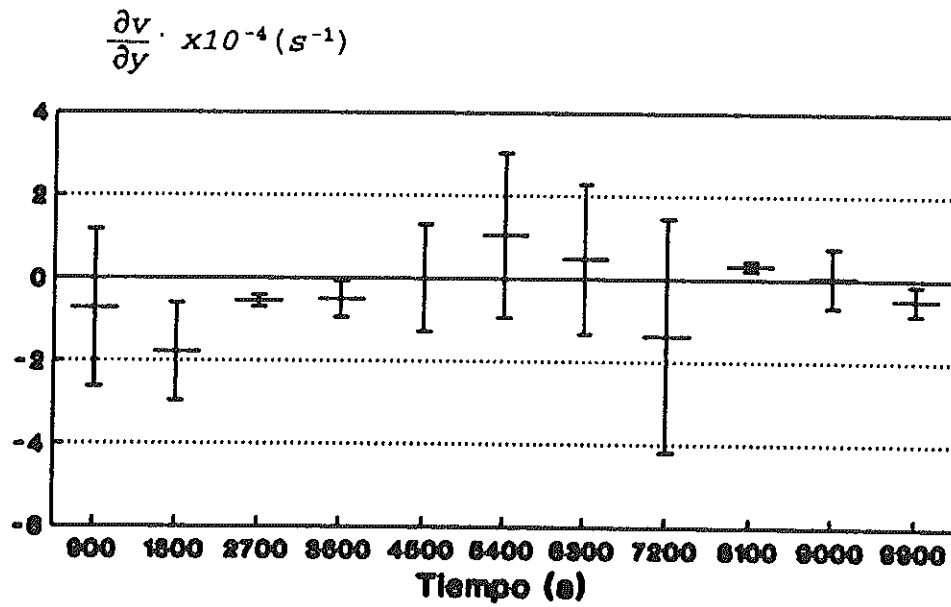


Fig. 17. Gradientes de la componente u de la velocidad.



a)

I Límites ± Valor encontrado



b)

I Límites ± Valor encontrado

Fig. 18. Gradientes de la componente v de la velocidad.

Los límites inferiores de los intervalos para la varianza (fig. 19) se acercan al valor encontrado, manteniendose constantes, lo que no sucede con los límites superiores de casi 10 veces mayor que los inferiores y su tendencia es a disminuir, pero en un período de tiempo muy prolongado. Por lo tanto, considerando que el valor real de la varianza puede estar dentro de éstos límites, observamos mayores posibilidades de que la varianza sea un valor más grande al encontrado en este estudio, aunque su tendencia es a disminuir. Por otro lado, la posibilidad de que la varianza sea menor es muy poca y se mantiene constante en el tiempo. En todos los casos, el rango de los intervalos de confianza muestra una gran incertidumbre con respecto al valor promedio, esto es debido al reducido número de flotadores empleado en los experimentos. Por lo tanto los resultados de este estudio se deben tomar con cierta reserva. En estudios donde se utilizan cuerpos de deriva, se pueden obtener mejores resultados para los intervalos de confianza usando un mayor número de éstos.

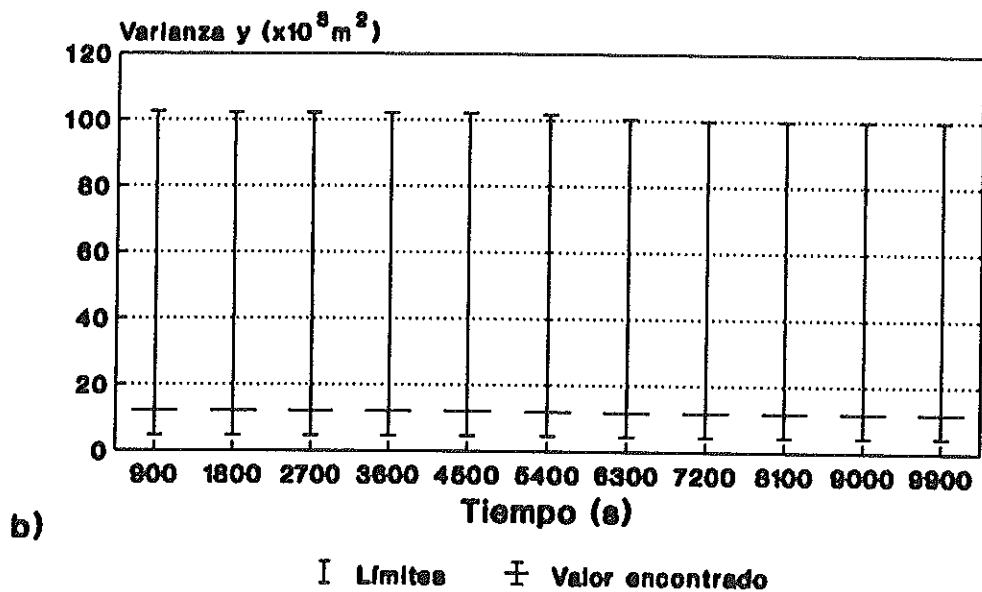
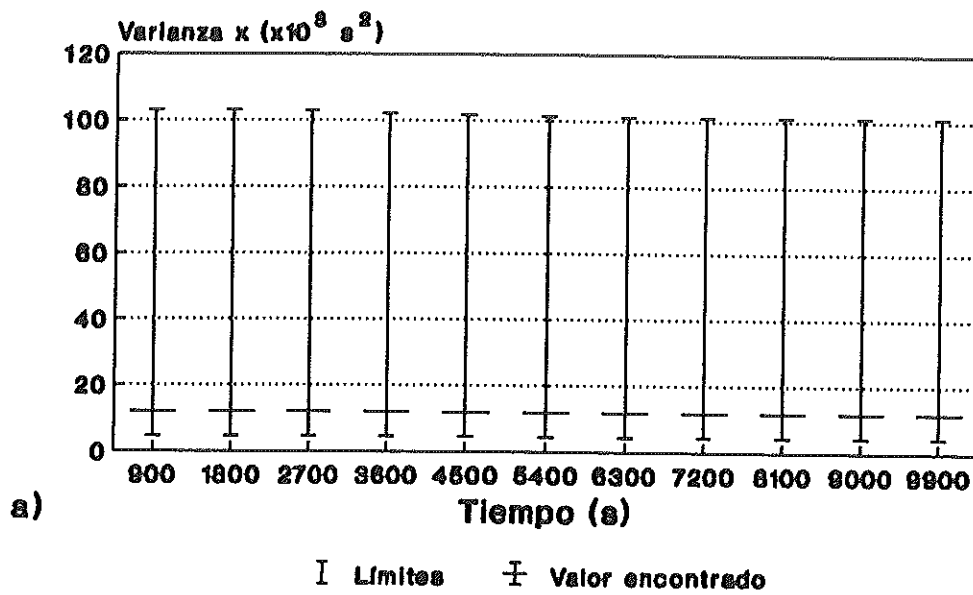


Fig. 19. Intervalos de confianza para la varianza.

4. DISCUSIONES

Las varianzas calculadas en base a (11) son aproximadamente similares a las que reporta Okubo (1971) para la costa de California, que son del orden de 10^3 a 10^5 m^2 con tiempos de alrededor de 10^4 s en un diagrama de difusión de varianza contra tiempo. En el presente estudio las varianzas están dentro del primer orden mencionado pero el tiempo correspondiente es, en la mayor parte de los casos un orden de magnitud menor, sólo el día con tres horas de medición esta dentro del orden de tiempo de Okubo (1971).

Alvarez et al. (1988) reportan en la zona varianzas del orden de 10^4 m^2 . Este orden de magnitud se encontró en cuatro casos en este trabajo, las restantes son del orden de 10^3 m^2 . Sin embargo, los períodos de medición en el estudio de Alvarez et al. (1988), se acercan a las 24 hrs. En las primeras cinco mediciones de nuestro estudio el comportamiento de las varianzas es aproximadamente constante, cambiando considerablemente después de este período. El mismo orden de magnitud se encuentra para las varianzas de los días 29 de junio y 21 de octubre, para éste último la varianza aumenta en cinco horas de duración.

Los valores de los coeficientes horizontales de difusión aquí calculados resaltan por su signo negativo en el 85 por ciento de los casos, aunque el valor siempre es mucho mayor que -1 m^2s^{-1} , lo que habla de la poca variabilidad de la varianza de los flotadores calculada según el método de Yanagi et al. (1982) aquí seguido. Alvarez et al. (1988) encuentran un coeficiente absoluto negativo para el día 29 de junio de 1980 (-0.4 m^2s^{-1}) con un período de medición de 5 horas. Los autores sólo basaron sus estimaciones en la

varianza de los cuerpos de deriva relativas al centroide del grupo en base a la relación (3), encontrando un coeficiente de dispersión (aparente), por lo que no es conveniente hacer una comparación con los resultados aquí obtenidos.

El coeficiente de dispersión (aparente) puede tanto sobreestimar como subestimar el valor real de la difusividad como puede apreciarse de las figuras 20 y 21 que corresponden a dos días de este estudio, en las que se ha graficado la varianza obtenida por las siguientes expresiones:

$$\sigma_{x_j}^2 = \frac{1}{N} \sum_{I=1}^N (x_{Ij} - \bar{x}_j)^2 \quad (19a)$$

$$\sigma_{y_j}^2 = \frac{1}{N} \sum_{I=1}^N (y_{Ij} - \bar{y}_j)^2 \quad (19b)$$

y que se considerará aparente, y la varianza sin efectos advectivos y de corte obtenida por (11), se llamará real. En el primer caso, la componente x de la varianza aparente sobreestima el valor comparado con la calculada por el método de Yanagi et al. (1982), la componente y aparente presenta pocos cambios, pareciéndose más a las encontradas en este trabajo. En la figura 21 las diferencias son notables, la tendencia general es a disminuir; sin embargo, las varianzas de este estudio presentan una pendiente suave en contraste con los rápidos cambios de las aparentes. Lo anterior habla del papel que en determinado momento puede jugar la advección en la expansión del grupo de flotadores.

Como un ejemplo de lo anterior, podemos observar en la figura 22 las trayectorias de cuatro flotadores generadas sintéticamente para describir un comportamiento en

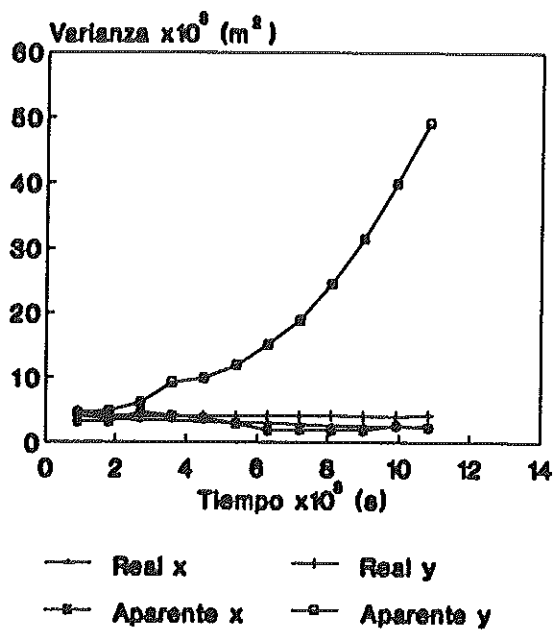


Fig. 20. Comparación de varianzas para septiembre 29-2.

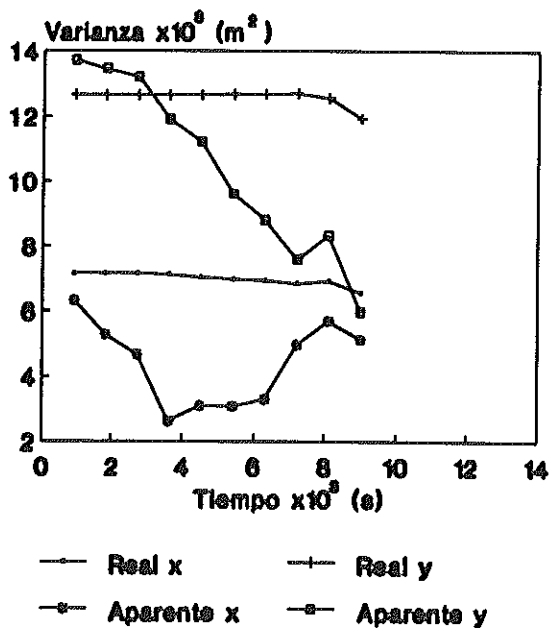


Fig. 21. Comparación de varianzas para octubre 20.

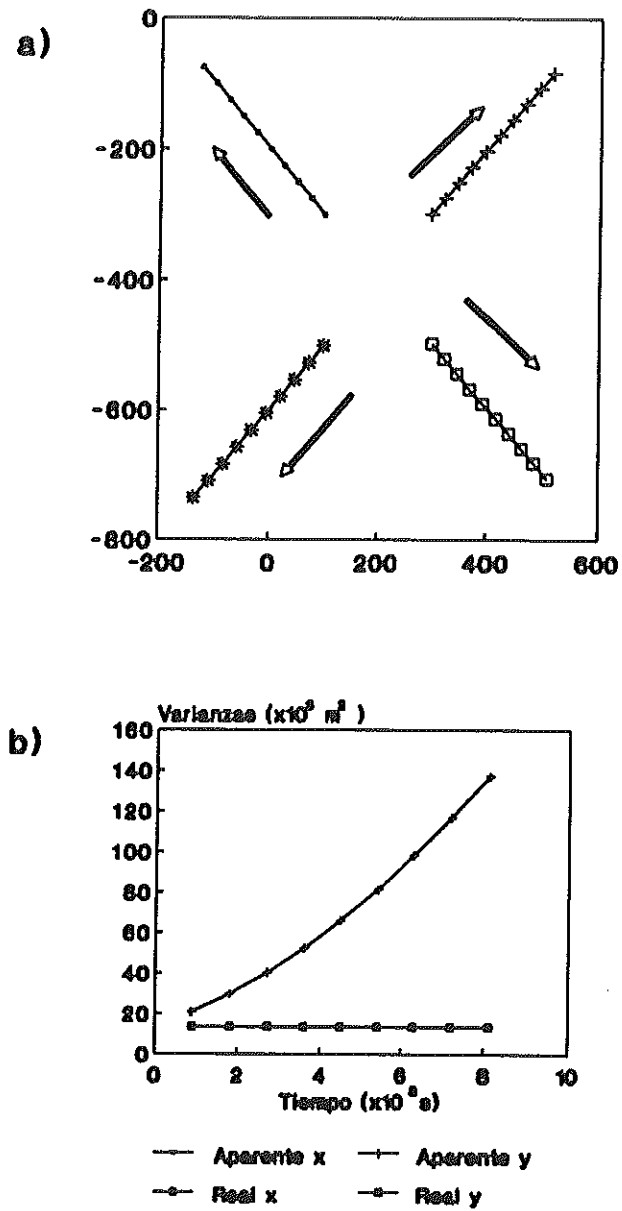


Fig. 22. Resultados de datos generados arbitrariamente.
a) Trayectoria de flotadores mostrando una expansión
aproximadamente simetrica. b) Varianzas.

expansión casi simétrico y con ausencia de movimientos turbulentos. Naturalmente existe divergencia, pero las varianzas obtenidas por el método de Yanagi et al. (1982) dan un coeficiente de difusión turbulenta igual a cero, es decir, que la expansión se debe totalmente a efectos de corte o advectivos. Sin embargo, al obtener el coeficiente utilizando el método descrito en Alvarez et al. (1988) observamos que el valor es diferente de cero, indicando ésto que existe difusividad turbulenta donde no debería de existir, es decir, que el caso es el de un movimiento casi uniforme u ordenado, donde no existen grandes cambios o fluctuaciones considerables. Lo que indica la necesidad de corrección del coeficiente de difusión turbulenta al calcularlo en la práctica.

Podríamos suponer que en el estudio de Álvarez et al. (1988), se encontrarían valores muy cercanos a los nuestros si se calcularan coeficientes para las primeras cinco horas de los días 28 y 29 de julio de 1980, en los que la pendiente tendría valores muy cercanos a cero y negativos o positivos. Por lo tanto estarían de acuerdo con los aquí presentados. Existen varias razones en las cuales basarse para el hecho de que los resultados sean negativos y también para el hecho de haber encontrado un intervalo de confianza grande para los cálculos de la varianza (fig. 19).

De los desplazamientos de los flotadores, la tendencia a agruparse es evidente en la mayoría de los casos. Existe por lo tanto, una zona de convergencia en el área de estudio. Estas zonas son descritas teóricamente por Okubo (1969) como puntos de "singularidad" (puntos estacionarios de flujo) que pueden encontrarse frecuentemente en áreas cerca de la costa.

Csanady (1963) encontró experimentalmente estos efectos a profundidades entre 7 y 21 m. Los cuerpos de deriva en el presente trabajo se desplazan desde profundidades máximas de aproximadamente 20 m y se mueven perpendiculares a las isóbatas en la zona. La posibilidad de encontrar valores negativos de los coeficientes de difusión se menciona en algunos estudios (Murthy,1965; List et al.,1990). Alvarez et al. (1990) reportan coeficientes de difusividad negativos para algunas de sus observaciones en una zona 100 km al norte (costa de la ciudad de Tijuana) de la Bahía de Todos Santos y mencionan que las corrientes con componente hacia la costa pueden causar efectos convergentes en el campo de flujo.

El origen de estas zonas de convergencia es atribuido a diferentes factores. Cuando la corriente superficial a una gran distancia de la costa tiene alguna componente hacia ésta, antes de alcanzar la frontera el flujo debe detenerse y hundirse o cambiar de dirección. Según Csanady (1963) el resultado al hundirse es un "slick" (liso) paralelo a la costa y puede permanecer mientras la corriente se mantenga estable. Los objetos viajan en el "slick" a considerable velocidad y se difunden longitudinalmente. Otra posible causa de convergencias paralelas al viento y con espaciamiento característico de 2 a 3 m, llamados "windrows" (líneas de viento) aparecen con vientos moderadamente fuertes (Csanady, 1963).

Para List et al. (1990), K puede ser negativo al suponer que un pequeño grupo de flotadores es representativo de una mancha y que se comporta como tal, siendo que la relación entre el coeficiente de difusión turbulenta y la varianza es estrictamente válida

para un número grande de flotadores. Además, en base a la rotación del grupo de flotadores, las varianzas en las componentes x y y aumentan y disminuyen provocando valores correspondientes de K alternadamente positivos y negativos.

En el estudio de List et al. (1990) los autores utilizaron seis flotadores con períodos de medición de más de 30 horas, las convergencias y divergencias fueron atribuidas al flujo hacia y desde la costa producido por la marea, en la ausencia de mezcla turbulenta.

En el caso del presente estudio, no se puede atribuir el efecto de convergencia a uno de estos factores debido a lo limitado de las observaciones. Los registros de viento durante los experimentos son predominantes del noroeste, con cambios durante la mañana provenientes del oeste. Las magnitudes son de entre 3 a 7 ms^{-1} . La relación del viento y las trayectorias no está bien definida; en algunos casos sólo predomina la ligera desviación de las trayectorias hacia el este, cuando el viento es del noroeste.

Por otro lado las series de tiempo de los cuerpos de deriva son muy cortas para ser comparadas con registros de marea. Sin embargo, cualitativamente la convergencia es el efecto que predomina en el área de estudio, pero no se elimina la posibilidad de la existencia de difusión en menor magnitud. Al respecto, Okubo (1970) menciona la posibilidad de encontrar campos de velocidad con y sin movimientos aleatorios. En el segundo caso, tanto Murty (1975) experimentalmente como Okubo (1970) teóricamente reconocen los efectos anti-difusivos de las zonas de convergencia. Sólo en el caso de la segunda medición correspondiente al 1o. de octubre demuestra predominio de la

advección sobre la convergencia en el campo de flujo, a pesar de que la trayectoria no cambia significativamente con respecto a las demás.

En cuanto a los resultados de divergencia y vorticidad se pueden encontrar cambios de signo en todas las series, dominando ligeramente el signo negativo en el caso de la divergencia, reflejando la tendencia del grupo de flotadores a la convergencia descrita anteriormente. Para la vorticidad las diferencias entre los valores positivos y negativos son pequeñas mostrando una estabilidad de esta propiedad en el campo de flujo. Los ordenes de magnitud aquí obtenidos (10^{-4}s^{-1}) están de acuerdo en su mayoría con los encontrados por Durazo (1983) para la región sur de la Bahía de Todos Santos.

Los resultados obtenidos para la difusividad deben ser considerados con cierta reserva ya que el método empleado eliminó algunos efectos advectivos en el área de estudio, pero siguen ejerciendo su influencia otros que dan como resultado coeficientes de difusividad negativos. Probablemente lo anterior se debe en gran medida al método de muestreo utilizado, por lo cual sería conveniente mejorar este estudio con observaciones de grupos más grandes de cuerpos de deriva y períodos de muestreo más prolongados o utilizar tinta (Rodamina) como trazador. Sin embargo, es posible obtener valores de divergencia horizontal y vorticidad relativa con el mismo método de Yanagi et al.(1982).

5. CONCLUSIONES

Para las escalas de tiempo y el número de flotadores utilizado, se lograron eliminar algunos efectos advectivos en el área de estudio usando el método de Yanagi et al,(1982).

Se cree que la presencia de otros efectos de corte, de orden mayor al considerado en el método utilizado, causan una zona de convergencia en el área de estudio, ejerciendo un efecto antidifusivo y provocando con esto resultados negativos en el coeficiente de difusividad.

De 10 experimentos realizados sólo en uno fué posible calcular una difusividad turbulenta ($K=1.9 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$).

Los valores de divergencia y vorticidad se encuentran en el intervalo de 10^{-4} y 10^{-3} s^{-1} representativo de zonas costeras.

Los efectos convergentes de la zona se manifiestan en los resultados de divergencia al predominar los valores negativos.

El reducido número de flotadores usado en este estudio da como resultado una gran incertidumbre que se refleja en los intervalos de confianza para la velocidad; para los gradientes de ésta y para las varianzas. Por lo tanto, se debe tomar en cuenta este aspecto al referirse a los resultados reportados en este trabajo.

6. RECOMENDACIONES

Los resultados aquí presentados podrían completarse y mejorarse si en futuros experimentos se tomaran en cuenta los siguientes aspectos.

A) Duración de las mediciones. Si las observaciones pueden llevarse a cabo con series de tiempo más largas se conocería con mayor grado de certeza el valor del coeficiente de difusión turbulenta horizontal para la zona y podría buscarse una relación de éste con marea, viento, etc.

B) Usar un mayor número de flotadores al utilizado aquí para minimizar los errores del ajuste por cuadrados mínimos.

C) Es necesario buscar una mejor técnica de seguimiento de los cuerpos de deriva (fotografía aérea, radar, etc.) o utilizar otro tipo de trazador, como por ejemplo la tinta.

7. APÉNDICE

La Ecuación de Advección-Difusión (Bowden, 1983). Suponemos que c es la concentración del material de interés por unidad de volumen y la velocidad en un punto x, y, z , tiene las componentes u, v, w . Observando la figura 1, el flujo de material por unidad de tiempo a través de una unidad de área perpendicular al eje x , el resultado del transporte y de la difusión molecular esta dado por:

$$F_x = uc - k \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

donde k es el coeficiente de difusión molecular.

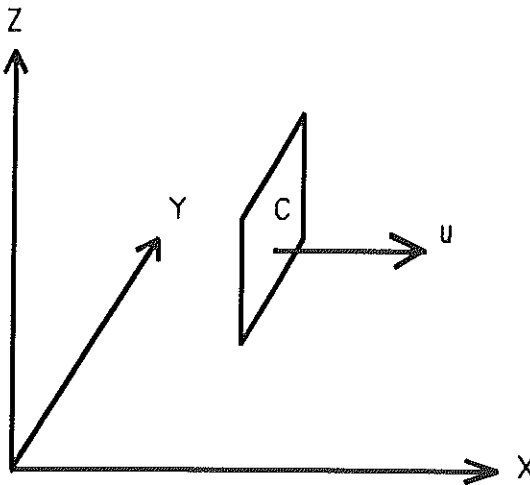


Fig. 1. Flujo de material en una cara perpendicular al eje x .

En el flujo turbulento la concentración c y las componentes de velocidad u , v , w están sujetas a fluctuaciones aleatorias. Haciendo \bar{c} el valor medio de la concentración, promediado sobre un cierto volumen y un cierto intervalo de tiempo y c' será la desviación del valor instantáneo de la concentración con respecto a la media. De la misma manera \bar{u} denota el valor medio de u y u' la desviación con respecto a la media; con iguales definiciones para v , w y v' , w' . Así en cualquier instante

$$c = \bar{c} + c', \quad u = \bar{u} + u', \quad \text{etc.} \quad (2)$$

Entonces el valor promedio de un producto tal como uc está dado por:

$$\begin{aligned} \overline{uc} &= \overline{(\bar{u} + u')(\bar{c} + c')} \\ &= \overline{\bar{u}\bar{c} + \bar{u}c' + u'\bar{c} + u'c'} \\ &= \bar{u}\bar{c} + \overline{u'c'} \end{aligned}$$

y $\bar{u}' = \bar{c}' = 0$ por definición. Sin embargo, $\overline{u'c'}$ no es cero, un valor finito de $\overline{u'c'}$ implica una correlación entre las fluctuaciones de u y c , por ejemplo, la concentración media se incrementa en la dirección x positiva, una partícula de agua con un valor más alto que el promedio de u tiene comúnmente un valor más bajo que el promedio de c . En otras palabras, una u' positiva está asociado con un valor negativo de c' y $\overline{u'c'}$ será negativo. Un argumento de este tipo lleva a la introducción de un coeficiente de difusión turbulenta K , tal que

$$\overline{u'c'} = -K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}$$

De tal forma que K_x es análogo al coeficiente de difusión molecular k pero es

usualmente ciertos ordenes de magnitud más grande. Los coeficientes turbulentos K_y y K_z pueden definirse similarmente en las direcciones y, z .

Si ahora consideramos la concentración c dentro de un pequeño cubo de lados iguales δx , δy y δz , y los flujos de material a través de las caras del cubo, la siguiente ecuación puede ser derivada para la conservación de material dentro del cubo:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = k \nabla^2 c \quad (3)$$

escribiendo $c = \bar{c} + c'$, $u = \bar{u} + u'$, etc. en esta ecuación y tomando los valores medios, se encuentra que

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'c'}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{v'c'}) + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'c'}) = k \nabla^2 \bar{c}$$

Introduciendo los coeficientes de difusión turbulenta se llega a

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z}) + k \nabla^2 \bar{c}$$

Al derivar estas ecuaciones se ha supuesto que ningún material se produce o se destruye dentro del elemento de volumen. Para una propiedad no conservativa, tal como el contenido de oxígeno, una sal como los nitratos, bacterias o un constituyente radiactivo, este no es el caso y un término de fuentes o pérdidas, $Q(x, y, z, t)$, debe ser sumado al lado derecho de cualquiera de las dos últimas ecuaciones. En muchos casos el término de difusión molecular puede ser despreciado.

La ecuación de advección-difusión en la forma de la última ecuación arriba escrita

con un término de fuentes o pérdidas sumado cuando es necesario, es la base de todos los métodos del cálculo de dispersión en el mar usando la aproximación Euleriana. En muchos casos algunos de los términos advectivos de la difusión son despreciables y el problema puede ser reducido a dos o hasta a una dimensión. La principal dificultad es en asignar valores apropiados a los coeficientes turbulentos K_x , K_y y K_z .

8. REFERENCIAS

- Alvarez, L.G.** (1971). Medición de corrientes superficiales en la Bahía de Todos Santos, B. C. Tesis de Licenciatura. UABC-FCM. 54 pp.
- Alvarez, L.G., Hernández, R. y Durazo, R.** (1988). Patrones de deriva de trazadores lagrangeanos en la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*. UABC. 14(4): 135-162.
- Alvarez, L.G., Godínez, V.M. y Lavín, M.F.** (1990). Dispersión en la franja costera de Tijuana, Baja California. *Ciencias Marinas*, 16(4): 87-109.
- Argote, M.L., Gavidia, F.J. y Amador, A.** (1991) Wind induced circulation in Todos Santos bay, B. C., Mexico. *Atmósfera*. 4: 101-115.
- Bowden, K.F.** (1965) Horizontal mixing in the sea due to a shearing current. *Journal of Fluid Mechanics*. 21(2): 83-95.
- Bowden, K.F.** (1983) *Physical oceanography of coastal waters*. John Wiley & Sons. E.U. 302 pp.
- Carrillo, L.** (1993) Cambios de temperatura en la Bahía de Todos Santos durante Otoño-Invierno 91-92". Tesis Licenciatura. UABC-FCM. 45 pp.
- Crank, J.** (1975) *The mathematics of diffusion*. 2a. Ed. Clarendon Press. Oxford. 414 pp.

- Csanady, G.T.** (1963) Turbulent diffusion in Lake Huron. *Journal of Fluid Mechanics*. 17: 360-384.
- Durazo, R.** (1983) Circulación superficial y cinemática de la región sur de la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de Licenciatura. UABC-ESCM. 69 pp.
- Durazo, R. y Alvarez, L.G.** (1988) Cinemática de la región sur de la Bahía de Todos Santos, B.C. *Ciencias Marinas*. 14(1).
- González, A.V.** (1992) Reevaluación de los estudios utilizados para el diseño del puerto de Ensenada, B.C. Tesis de Licenciatura. UABC-FCM. 126 pp.
- Hernández, R.** (1986) Circulación inducida por el viento en la zona costera. Tesis de Licenciatura. UABC-FCM. 69 pp.
- Kreyszig, E.** (1978) Introducción a la estadística matemática. 1a. Edición. Ed Limusa. México. 505 pp.
- Lam, D.C., Murthy, C.R. y Simpson, R.B.** (1984) Coastal and estuarine studies- Effluent transport and diffusion models for the coastal zone. Springer-Verlag Press. U.S.A. 168 pp.
- List, J., Fellow, G. y Winant, C.** (1990) Diffusion and dispersion in coastal waters. *Journal of Hydraulic Engineering*. 166(10): 1158-1179.
- Murthy, C.R.** (1975) Dispersion of Floatables in Lake Currents. *Journal of Physical Oceanography*. 5: 193-195.

- Okubo, A.** (1970) Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences. *Deep Sea Research*. 17: 445-454.
- Okubo, A.** (1971) Oceanic diffusion diagrams. *Deep Sea Research*. 18: 789-802.
- Okubo, A. y Ebbesmeyer, C.C.** (1976) Determination of vorticity, divergence and deformation rates from analysis of drogue observation. *Deep Sea Research*. 23: 345-352.
- Okubo, A. y Ozmidov, R.V.** (1970) Empirical dependence of the coefficient of horizontal turbulent diffusion in the ocean on the scale of the phenomenon in question. *Izv. Atmospheric and Ocean Physics*. 6(5): 534-536.
- Ozmidov, R.** (1990) Diffusion of contaminants in the ocean. First Ed. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. 283 pp.
- Richardson, L.F. y Stommel, H.** (1948) Note on eddy diffusion in the sea. *Journal of Meteorology*. 3: 238-240.
- Stommel, H.** (1949) Horizontal diffusion due to oceanic turbulence. *Journal of Marine Research*. 8(3): 199-225.
- Tolmazin, D.** (1972) Features of horizontal turbulence in the littoral zone of ocean. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 8(3): 339-343.
- Yanagi, T., Murashita, K. y Higuchi, H.** (1982) Horizontal turbulent diffusion in the sea. *Deep Sea Research*. 29(2A): 217-226.

