

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
ESCUELA SUPERIOR DE CIENCIAS MARINAS

CIRCULACION SUPERFICIAL Y CINEMATICA DE LA REGION SUR
DE LA BAHIA TODOS SANTOS, B.C.

T E S I S
QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS
REQUISITOS PARA LA OBTENCION DEL
TITULO DE OCEANOLOGO PRESENTA

REGINALDO DURAZO ARVIZU
MAYO-1983

C O N T E N I D O

	Pág.
AGRADECIMIENTOS	ii
LISTA DE FIGURAS	iv
RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCION	3
2. ANTECEDENTES	6
3. AREA DE ESTUDIO	9
4. OBJETIVOS	10
5. MATERIALES Y METODO DE MUESTREO	10
6. METODOLOGIA DE PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE DATOS	
6.1 Procesamiento de Datos	13
6.2 Errores	
6.2.1. Error por localización	14
6.2.2. Error producido por el viento	14
6.3. Métodos de análisis de datos	
6.3.1. Divergencia horizontal a partir de la razón de cambio del área de la parcela	17
6.3.2. Vorticidad relativa a partir de la razón de cambio de la orientación de los ejes principales	17
6.3.3. Método de regresión lineal	19
7. RESULTADOS	
7.1. Trayectorias de la corriente	24
7.2. Deformaciones de la parcela de fluido	26
7.3. Series de tiempo de divergencia y vorticidad	27
8. DISCUSION Y ANALISIS DE RESULTADOS	
8.1. Patrón de corrientes de la región sur de la Bahía Todos Santos	29
8.2. Efecto de la topografía del fondo	33
8.3. Series de tiempo de divergencia y vorticidad	34
9. CONCLUSIONES	39
REFERENCIAS CITADAS	41

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1. Localización del área de estudio.	44
Fig. 2. Distribución y duración de las observaciones en la Bahía Todos Santos (tomado de Alvarez <u>et al.</u> , 1982).	45
Fig. 3. Equipo de medición. a) Radar instalado en el remolque. b) Características de los elementos de deriva utilizados en las observaciones.	46
Fig. 4. Experimento del 21 de Octubre de 1980. Duración: 11 horas, con 6 flotadores. a) Trayectorias de la corriente. b) Diagramas de velocidad y dirección (hacia donde va) del viento y la corriente superficial.	48
Fig. 5. Experimento del 21-22 de Octubre de 1980. Duración: 24 horas, con tres flotadores. a) y b) igual que Fig. 4.	49
Fig. 6. Experimento del 23-24 de Enero de 1981. Duración: 18 horas, con 4 flotadores. a) y b) igual que Fig. 4.	50
Fig. 6. Experimento del 24-26 de Enero de 1981. Duración: 38 horas, con 4 flotadores. a) y b) igual que Fig. 4.	51
Fig. 8. Experimento del 29 de Junio de 1980. Duración: 10 horas, con 5 flotadores. a) y b) igual que Fig. 4.	52
Fig. 9. Experimento del 16 de Julio de 1980. Duración: 12 horas, con 3 flotadores. a) y b) igual que Fig. 4.	53
Fig. 10. Experimento del 28-29 de Julio de 1980. Duración: 18 horas, con 6 flotadores. a) y b) igual que Fig. 4.	54
Fig. 11. Experimento del 25-27 de Mayo de 1981. Duración: 48 horas, con 3 flotadores. a) y b) igual que Fig. 4.	55

Fig. 12.	Experimento del 25-26 de Mayo de 1981. Duración: 26 horas, con 3 flotadores. a) y b) igual que Fig. 4.	56
Fig. 13.	Experimento del 5-6 de Marzo de 1980. Duración: 15 horas, con 3 flotadores. a) y b) igual que Fig. 4.	57
Fig. 14.	Experimento del 29 de Junio de 1980. a) Efectos de deformación en el grupo de flotadores. -- b) Series de tiempo de divergencia y vorticidad (líneas centrales: regresión lineal; líneas exteriores: intervalos de confianza al 80%; cruces: método de áreas).	58
Fig. 15.	Igual que Fig. 14 para el experimento del 16 de Julio de 1980 (primera serie)	59
Fig. 16.	Igual que Fig. 14 para el experimento del 16 de Julio de 1980 (segunda serie).	60
Fig. 17.	Igual que Fig. 14 para el experimento del 28-29 de Julio de 1980 (primer subgrupo).	61
Fig. 18.	Igual que Fig. 14 para el experimento del 28-29 de Julio de 1980 (segundo subgrupo)	62
Fig. 19.	Igual que Fig. 14 para el experimento del 21-22 de Octubre de 1980.	63
Fig. 20.	Igual que Fig. 14 para el experimento del 5-6 de Marzo de 1980.	64
Fig. 21.	Igual que Fig. 14 para el experimento del 26-27 de Mayo de 1981.	65
Fig. 22.	Diagramas de marea para los intervalos de medición de los experimentos incluidos. La escala vertical es en metros. Las barras verticales señalan el inicio y final del experimento en cada caso. Incisos a) a j) se refieren a las figuras 4 a 13 respectivamente.	66

RESUMEN

Se hace un bosquejo de la circulación superficial en la región sur de la Bahía Todos Santos, B.C. Se obtienen estimaciones de divergencia horizontal y vorticidad, usando el método de regresión descrito por Okubo y Ebbesmeyer (1976) a partir de posiciones simultáneas de flotadores dentro de un grupo, con respecto al centroide del mismo. Estos valores se comparan con los calculados por los métodos de Reed (1971) para divergencia horizontal, e Ichiye et al. (1978) para vorticidad.

Se concluye por una parte que el patrón de circulación propuesto por Argote et al. (1975), es válido para profundidades menores de 30 metros en la región sur. Esto se sugiere para las épocas en que los vientos de mar (W, NW) son de regular intensidad (alrededor de 5 m/s) y casi estacionarios. Se encontró también a corto plazo, una fuerte relación entre la dirección de los vientos locales y la dirección de la corriente superficial.

Por otro lado, se encontró que los valores calculados de divergencia horizontal y vorticidad para la región de estudio, fueron del orden de 10^{-4} s^{-1} . Las series de tiempo de divergencia y vorticidad mostraron gradientes laterales de velocidad a lo largo de la costa de la barra del Estero de Punta Banda, que producen efectos divergentes y de vórtice. El efecto de los gradientes estuvo presente esencialmente

alrededor de la isolínea de los 10 metros de profundidad.

Los métodos utilizados en el cálculo de propiedades aportaron resultados similares en los casos en que el área representada por el grupo de flotadores fue de al menos de 10^4 m^2 .

1. INTRODUCCION.

Desde el año de 1977 la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) está llevando a cabo estudios sobre la biología y ecología del mejillón (Mytilus edulis y M. californianus, en regiones de la Bahía Todos Santos y el Ejido Eréndira. El objetivo de estos estudios es el de conocer las posibilidades de cultivo. Las investigaciones se han realizado por el Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) a través del proyecto Bivalvos de Baja California, contándose con la colaboración desde 1979 del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE).

En apoyo al programa de cultivo experimental de mejillón, la sección de estudios físicos del CICESE diseñó experimentos de medición de corrientes superficiales con flotadores libres (experimentos Lagrangeanos). Los experimentos se realizaron con el propósito de establecer criterios de la calidad del agua y el transporte de estadíos larvarios y contaminantes en la capa superficial del mar.

Los datos que se obtuvieron en los experimentos realizados en el área de la región sur de la Bahía Todos Santos (Fig. 1), sirvieron de base para la elaboración del presente trabajo. En éste, se presenta un bosquejo de la circulación superficial en el área y se calculan los parámetros de divergencia horizontal y vorticidad, definidas

como combinaciones de los gradientes laterales de velocidad

El estudio de los gradientes laterales de velocidad es de suma importancia, ya que estos tienen interpretaciones cinemáticas elementales (Kirwan, 1975). En aguas someras cercanas a la costa, el comportamiento y magnitud de los gradientes de velocidad son un indicador del grado de deformación de una parcela y de los procesos de mezcla horizontal y vertical que ocurren en ella. Además, son de utilidad para estimar o prevenir efectos de contaminación por desechos que se mezclan con el agua de mar.

El movimiento de partículas en el océano es causado por un gran número de procesos dinámicos diferentes. Estos procesos ocurren en el océano en varias combinaciones y con diferentes importancias relativas, variando espacial y temporalmente. No existe un método generalizado para predecir con exactitud la dispersión de partículas en un campo de movimiento tan complejo como es el océano. Así, la dispersión de flotadores tiene una mejor descripción al tratar el movimiento relativo como dependiente de procesos determinísticos y no determinísticos. El método de análisis utilizado en el presente trabajo trata esta combinación.

Los experimentos basados en la descripción Lagrangeana tienen ventajas en relación a estudios de tipo Euleriano. El uso de flotadores permite calcular en una forma más sencilla las componentes turbulentas y de flujo medio dentro de un

parcela, además de que proporcionan los datos necesarios para estimar el grado de incertidumbre presente, cuando se cuenta con un número muy limitado de mediciones de corrientes (Sanderson, 1979). Otras ventajas de experimentos con flotadores son (Okubo, comunicación personal):

- i) Es posible monitorear cada flotador en forma aislada
- ii) Son relativamente baratos y re-utilizables
- iii) Es posible obtener estimaciones de vorticidad, divergencia, razones de deformación y disipatividades turbulentas en función del tiempo.

Como desventajas menciona las siguientes

- i) Resultados en dos dimensiones
- ii) Efecto de tamaño (filtrado).- No es posible detectar cambios de escala menor que el tamaño del flotador.
- iii) Dificultad experimental durante la noche.

Esta dificultad fue superada en los experimentos realizados para este trabajo.

2. ANTECEDENTES.

En la Bahía de Todos Santos (Fig. 1), algunos autores han tratado el aspecto de rapidez y direcciones de corrientes. Alvarez Sánchez (1971), efectuó mediciones de corrientes superficiales principalmente en la región norte de la Bahía, utilizando elementos de deriva y correntímetros. El autor obtiene intensidades promedio de la corriente del orden de 6 a 8 cm/s en la capa de los 2 metros superiores, con una dominancia de la componente E-W sobre la componente N-S. Asimismo, encuentra un efecto notable de la marea, que no cuantifica debido a la poca duración de sus experimentos, y propone que bajo un régimen de viento W o NW de intensidades de 4 a 6 m/s durante la mayor parte del año, se producen corrientes de deriva hacia el interior de la Bahía, paralelas a la costa en la región norte y directamente hacia la costa en la región de la boca del Estero.

[Argote et al. (1975) analizaron las distribuciones de temperatura, salinidad y densidad en la Bahía de Todos Santos durante un ciclo anual de observaciones mensuales (Octubre 1973 a Septiembre 1974), y dedujeron los patrones de circulación para cada observación a partir de la distribución de los anteriores parámetros, además de las condiciones de viento y topografía del área. El patrón observado fue la presencia de dos giros que tienden a seguir la topografía, uno en la parte norte desde Punta San Miguel hacia el interior, y

otro en la parte sur desde Punta Banda hasta la altura de la boca del Estero. Concluyen que estos giros están afectados fuertemente por la dirección de los vientos locales.

Se han realizado experimentos previos con flotadores en otras áreas para estudiar propiedades cinemáticas por Reed (1971), Chew y Berberian (1971), Molinari y Kirwan (1975), Chew (1974), Okubo et al. (1976), Ichiye et al. (1978) y Sanderson (1979, 1982.a) entre otros. A excepción de Okubo et al. (1976), la mayoría de estos estudios fueron realizados en regímenes de altas velocidades de la corriente (mayores de 0.6 m/s), a distancias mayores de 50 km de la costa, y con profundidades y escalas espaciales al menos 5 veces mayores que las del presente trabajo.

Okubo y Ebbesmeyer (1976) y Okubo, Ebbesmeyer y Helseth (1976), desarrollaron métodos estadísticos para obtener valores medios de los gradientes de velocidad Lagrangeanos, usando posiciones de un número de elementos de deriva. Okubo et al. (1976) aplicaron estos métodos a datos obtenidos en experimentos con 50 a 90 flotadores en la región de los Grandes Lagos. Las dimensiones típicas del experimento fueron de 100 a 600 metros, con velocidades promedio de la corriente de 1 a 6 cm/s.

Ichiye et al. (1978) analizaron los datos obtenidos en experimentos en el Golfo de México durante el mes de Julio de 1977, utilizando hasta 13 flotadores, y posicionándolos con

fotografías de la pantalla de radar. Los datos fueron analizados calculando las varianzas de las coordenadas del grupo de flotadores relativas al centroide del grupo, y por el método desarrollado por Okubo y Ebbsmeyer (1976). Las dimensiones típicas del grupo de flotadores fue de alrededor de 900 metros, en profundidades de 1000 metros.

Sanderson (1979) utilizó 9 radio boyas para estudiar dispersión oceánica y gradientes de velocidad en regiones entre 50 y 90 km fuera de la costa. Los resultados obtenidos le permitieron calcular deformaciones, difusividades, y singularidades de la corriente para tres intervalos de medición dentro de un período de 5 días.

Sanderson (1982.a) investigó la aplicación de la ecuación de difusión en su representación Lagrangeana, sobre la dispersión bidimensional de flotadores en aguas costeras y lagos. Utilizando series de tiempo de gradientes de velocidad de primer y segundo orden, el autor aproxima la solución de la ecuación.

Molinari y Kirwan (1975) efectuaron cuatro experimentos con flotadores libres en el Mar Caribe y calcularon las propiedades cinemáticas de esa región (vorticidad, divergencia horizontal, deformación normal y cortante). Los resultados que obtuvieron muestran que estas propiedades contribuyen en forma considerable a la separación entre los flotadores de un grupo, además de la difusión turbulenta.

3. AREA DE ESTUDIO.

La Bahía de Todos Santos se localiza en la costa noroeste de la península de Baja California, México, entre las latitudes $31^{\circ} 43' N$ a $31^{\circ} 55' N$ y longitudes $116^{\circ} 37' W$ a $116^{\circ} 45' W$ (Fig. 1) cubriendo un área aproximada de 180 km^2 . El área estudiada en el presente trabajo comprende únicamente la región sur, entre las latitudes $31^{\circ} 43' N$ a $31^{\circ} 47' N$ y longitudes $116^{\circ} 36' W$ a $116^{\circ} 45' W$, en profundidades menores de 50 metros.

Hasta la fecha, descripciones detalladas de las características geológicas, oceanológicas, meteorológicas, etc. de la Bahía, se han publicado en varios trabajos. Entre otros se pueden consultar los siguientes: Secretaría de Marina (1974), Alvarez Sánchez (1971), Pavia López (1979), Argote et al. (1975).

4. OBJETIVOS.

El propósito fundamental de este trabajo es:

i) Utilizando métodos de regresión lineal y de la razón de cambio del área y la orientación de un grupo de flotadores, calcular y establecer órdenes de magnitud de las propiedades cinemáticas divergencia y vorticidad, en la región sur de la Bahía Todos Santos, donde las aguas se ven afectadas por la cercanía de la costa, las pocas profundidades (menores de 50 metros), las aguas de regiones aledañas, y los efectos del viento.

Además se pretende

ii) Hacer comparaciones de las cantidades anteriores con los resultados que se han reportado para otras áreas de condiciones geográficas diferentes a las consideradas en el presente estudio.

iii) Establecer cualitativamente el patrón de circulación superficial para la zona de estudio, así como relacionar de la misma manera si las corrientes presentes están afectadas por factores externos (vientos, topografía del fondo, mareas).

5. MATERIALES Y METODO DE MUESTREO.

Alvarez et al. (1982), reportan en forma detallada la metodología de muestreo utilizada en las observaciones de corrientes superficiales de la región sur de la Bahía Todos Santos. A continuación se hace un esbozo de esta metodología.

Se realizaron mediciones de corrientes superficiales en la región sur de la Bahía de Todos Santos durante los meses de Marzo, Junio, Julio y Octubre de 1980, y Enero y Mayo de 1981 (Fig. 2). El equipo de medición consistió básicamente de flotadores libres y de un radar FURUNO 1064 instalado en un remolque (Fig. 3.a). Como flotadores libres se utilizaron cruces de deriva construidas con lámina negra calibre 16 (0.16 cm de grosor), unidas en su parte central por un mástil de acero inoxidable de 3 cm de diámetro por 3 metros de largo, que soporta en su parte superior un reflector fijo de radar (Fig. 3.b). Como elemento de flotabilidad positiva se utilizó una boya inflable de 40 cm de diámetro.

El radar empleado en las mediciones fue del tipo convencional de navegación con precisión de localización de ± 20 metros en distancia radial y tangencial. Aspectos más detallados sobre las características de equipos de radar son estudiados por Oudshoorn (1960).

Una vez que los elementos de deriva fueron puestos en el agua, su posicionamiento se hizo por medio de la distancia radial (R) y el ángulo entre el flotador y el norte astronómico (azimut), considerando como origen la posición del radar.

Desde el inicio hasta el final del experimento, se tomaron datos sobre la dirección y rapidez del viento a intervalos de 15 minutos. Estos datos fueron proporcionados

por la sección de meteorología del CICESE, complementados con datos de la estación de la Base Aérea Militar No. 3 de El Ciprés, B.C. En ambos casos, los datos tomados fueron con anemógrafos de registro continuo, con una precisión de ± 0.25 m/s en la rapidez y $\pm 10^\circ$ en dirección.

6. METODOLOGIA DE PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE DATOS.

6.1. PROCESAMIENTO DE DATOS.

Las series de tiempo de distancias radiales, azimut y velocidad del viento fueron incorporadas a la computadora PRIME del CICESE. Estos datos fueron procesados para obtener sus equivalentes en coordenadas cartesianas. En este nuevo marco de referencia se suavizaron por separado las series de tiempo de coordenadas (x,y) y las componentes de velocidad del viento, por medio de una 'spline' cúbica (subprograma ICSSCU) del paquete de subprogramas de la Librería Internacional de Matemáticas y Estadística (IMSL). Utilizando como parámetros de suavizado la desviación estándar de la posición con el radar (secc. 6.2.1), se eliminaron estructuras de las trayectorias y de las componentes de la velocidad con duración del orden de media hora. Los datos suavizados fueron utilizados subsecuentemente para calcular las componentes de la corriente promedio en 15 minutos, así como de los gradientes de velocidad de primer orden, de acuerdo al método descrito por Okubo y Ebbesmeyer (1976), con programas proporcionados por Brian G. Sanderson (Sanderson 1982.b).

6.2. ERRORES.

En general, se considera que los flotadores libres son trazadores Lagrangeanos perfectos. Sin embargo, en la

práctica esto no ocurre debido a las diferentes fuentes de error, y entre las cuales se encuentran:

6.2.1. Error por localización.-

El poder de resolución en el radar utilizado produce un error de posición de ± 20 metros en distancia radial y ± 20 metros en la tangencial. Estos errores de localización se propagan al calcular las coordenadas (x,y) y las velocidades instantáneas, y producen los siguientes errores en estas estimaciones según Beers (1962) y Hibler et al. (1974):

$$S_e = [S_r^2 + S_t^2]^{1/2} \quad (1)$$

donde S_e es el error de posición, y S_r y S_t son las desviaciones estándar de las mediciones radial y tangencial respectivamente. Con este error de posición se puede conocer el error en el cálculo de la velocidad de un flotador. Si se consideran cuatro flotadores y se supone que el campo de velocidades es uniforme dentro del grupo, el error en la velocidad producido por incerteza en la localización puede ser reducido a 1 cm/s.

6.2.2. Error producido por el viento.-

Kirwan et al. (1975) examinan el efecto del viento y de la corriente superficial sobre los flotadores libres y

encuentran una expresión para el cálculo de este efecto. Según esta expresión, y considerando las dimensiones de los elementos de deriva utilizados en el presente estudio (razón de área expuesta al viento:área sumergida de 1:11), con velocidades de la corriente de 10 cm/s y vientos de 5 m/s, el error producido en la corriente en dirección de éste es mayor del 30%.

Por otro lado, Murray (1975) realiza experimentos con flotadores libres y correntímetros con el fin de determinar el efecto producido por el viento sobre las trayectorias y velocidades de la corriente dentro de una franja de 800 metros adyacente a la costa. Encuentra, a partir de cálculos teóricos, una relación funcional entre las dimensiones de los elementos de deriva que utilizó y la velocidad del viento. Concluye además que el error máximo producido por el viento sobre la velocidad, en la dirección de éste es de 1 a 2 cm/s, cuando se trabaja con flotadores cuya razón de área expuesta al viento:área sumergida es de 1:8.

Durante los días 14 a 16 de Junio de 1981, se efectuaron mediciones de corrientes en la Playa Municipal del Puerto de Ensenada, con el fin de cuantificar experimentalmente el error en desplazamiento en la dirección del viento. Se utilizaron simultáneamente flotadores con área expuesta al viento (con reflector de radar, Fig. 3.b) y sin área expuesta al viento. Los resultados mostraron

concordancia con los calculados por Murray (1975). Alvarez et al. (1982) reportan para estas mediciones que un arrastre de 3 cm/s representa un límite superior del efecto del viento sobre los flotadores, en condiciones aproximadamente estacionarias de éste (4.6 a 6.0 m/s).

6.3. METODOS DE ANALISIS DE DATOS.

A partir de posiciones simultáneas de un grupo de flotadores libres con respecto a su centroide, en una parcela de fluido, es posible obtener estimaciones de los parámetros de divergencia horizontal y vorticidad relativa. Primero, la divergencia horizontal se puede calcular de acuerdo con Reed (1971), a partir de la razón de cambio del área encerrada por el grupo de flotadores. Además, si se considera que el grupo está representado por una elipse, la vorticidad relativa se puede determinar por medio de la razón de cambio de la orientación de sus ejes principales (Ichiye et al., 1978). Segundo, con las velocidades de los flotadores dentro de un grupo, en un intervalo de tiempo, se pueden obtener los gradientes de velocidad instantáneos por medio de métodos de regresión lineal (Okubo y Ebbesmeyer, 1976), y calcular los parámetros de divergencia horizontal y vorticidad según Saucier (1955). A continuación se desarrollan estos métodos.

6.3.1. Divergencia horizontal a partir de la razón de cambio del área de la parcela.-

El cálculo de la divergencia horizontal está definido como (Reed, 1971)

$$\text{div}_h V = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \quad (2)$$

donde A es el área encerrada por el grupo de flotadores. En este trabajo, aún cuando hubo experimentos con 4 o más flotadores, el área considerada está representada únicamente por 3 de ellos. La razón de esta consideración fue que un gran número de experimentos se hicieron en grupos de 3. En los experimentos en que hubo más de tres flotadores, el criterio para seleccionar 3 de ellos fue el de considerar aquellos que inicialmente tenían posiciones geométricas adecuadas para el cálculo de las propiedades (i.e. mayor área, forma más regular).

6.3.2. Vorticidad relativa por la razón de cambio de la orientación de los ejes principales.-

Consideremos un grupo de flotadores a la deriva representando la parcela de fluido que los contiene. A partir de las posiciones de los flotadores en coordenadas geográficas relativas al centroide del grupo, se pueden calcular las varianzas σ_x^2 y σ_y^2 y la covarianza σ_{xy} .

Situando el eje X positivo hacia el este y el eje Y positivo hacia el norte, y si (x_i, y_i) son las coordenadas con respecto al centroide del iésimo flotador dentro del grupo entonces

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (3.a)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (3.b)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (3.c)$$



donde n representa el número de flotadores.

Ichiye et al. (1978) mostraron que si consideramos el grupo de flotadores representado por una elipse, con ejes principales σ_X , σ_Y , donde

$$\sigma_X^2 = \sigma_x^2 \cos^2 \theta + \sigma_y^2 \sin^2 \theta - \sigma_{xy} \sin 2\theta$$

$$\sigma_Y^2 = \sigma_x^2 \sin^2 \theta + \sigma_y^2 \cos^2 \theta + \sigma_{xy} \cos 2\theta$$

y usando las ecuaciones (3.a) a (3.c), es posible calcular un ángulo θ mediante la fórmula

$$\tan 2\theta = \frac{2\sigma_{xy}}{(\sigma_y^2 - \sigma_x^2)} \quad (4)$$

donde θ representa la orientación de los ejes principales de la elipse. Reed (1971) muestra que el cambio de orientación del grupo de flotadores en el intervalo de tiempo entre dos posicionamientos, se puede utilizar directamente para calcular la velocidad angular y la vorticidad relativa.

Por simplicidad, los dos métodos anteriores serán denominados en adelante como Método de Areas.

6.3.3. Método de regresión lineal.-

Okubo y Ebbesmeyer (1976), y Okubo, Ebbesmeyer y Helseth (1976), desarrollaron métodos estadísticos para determinar los valores medios de los gradientes de velocidad Lagrangeanos, usando posiciones simultáneas de un número de elementos de deriva. En el presente trabajo, y debido al pequeño número de flotadores utilizado, se aplicó únicamente el método de Okubo y Ebbesmeyer (1976). Este método se resume de la siguiente manera:

El efectuar observaciones simultáneas de coordenadas (x, y) de 'n' flotadores a 'm' tiempos nos permite obtener estimaciones de las componentes de la velocidad (u, v) , y tener datos de la forma:

$$\begin{array}{ll} x_i(k), y_i(k) & i=1, 2, 3, \dots, n \\ u_i(k), v_i(k) & k=1, 2, 3, \dots, m \end{array}$$

Efectuando una expansión de Taylor de las componentes de velocidad (u, v) alrededor del centroide (\bar{x}, \bar{y}) del k ésimo instante de tiempo tenemos:

$$u_i(k) = \bar{u}(k) + \frac{\partial \bar{u}(k)}{\partial x} [x_i(k) - \bar{x}(k)] + \frac{\partial \bar{u}(k)}{\partial y} [y_i(k) - \bar{y}(k)] + u_i''(k)$$

$$v_i(k) = \bar{v}(k) + \frac{\partial \bar{v}(k)}{\partial x} [x_i(k) - \bar{x}(k)] + \frac{\partial \bar{v}(k)}{\partial y} [y_i(k) - \bar{y}(k)] + v_i''(k)$$
(5)

donde $\bar{x}(k)$ y $\bar{y}(k)$ son las coordenadas del centroide del grupo de flotadores al tiempo k , y están dadas por

$$\bar{x}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(k) \quad \bar{y}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i(k)$$

y donde $\frac{\partial \bar{u}(k)}{\partial x}$, $\frac{\partial \bar{u}(k)}{\partial y}$, $\frac{\partial \bar{v}(k)}{\partial x}$, $\frac{\partial \bar{v}(k)}{\partial y}$ son los gradientes lineales de velocidad en el centroide, y u'' y v'' son las velocidades turbulentas.

En la expansión por serie de Taylor se ha supuesto que los gradientes de velocidad son uniformes dentro del grupo de flotadores, y que los términos de segundo o más alto orden son considerados como turbulencia. Esta suposición permite ver el espectro de turbulencia oceánica como separable en dos partes (Okubo y Ebbesmeyer, 1976): una son los giros en gran escala que aparecen como los términos de primer orden en la ecuación (5), y otra los giros en pequeña escala responsables de la difusión turbulenta (términos de segundo o más alto orden),

i.e., $u^*(k)$ y $v^*(k)$.

La ecuación (5) se puede expresar en términos de matrices

$$\begin{aligned} U &= \tilde{R}\tilde{A} + \tilde{E} \\ V &= \tilde{R}\tilde{B} + \tilde{F} \end{aligned} \quad (6)$$

usando la notación matricial siguiente:

Matrices de posición

$$\tilde{X}(k) = \begin{bmatrix} x_1^*(k) \\ x_2^*(k) \\ \vdots \\ x_n^*(k) \end{bmatrix} \quad \tilde{Y}(k) = \begin{bmatrix} y_1^*(k) \\ y_2^*(k) \\ \vdots \\ y_n^*(k) \end{bmatrix}$$

$$\tilde{R}(k) = \begin{bmatrix} 1 & x_1^*(k) & y_1^*(k) \\ 1 & x_2^*(k) & y_2^*(k) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n^*(k) & y_n^*(k) \end{bmatrix}$$

donde (*) indica la desviación con respecto al promedio.

Matrices de velocidad

$$\tilde{U}(k) = \begin{vmatrix} u_1^*(k) \\ u_2^*(k) \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n^*(k) \end{vmatrix} \quad \tilde{V}(k) = \begin{vmatrix} v_1^*(k) \\ v_2^*(k) \\ \cdot \\ \cdot \\ v_n^*(k) \end{vmatrix}$$

Matrices de propiedades de la corriente

$$\tilde{A}(k) = \begin{vmatrix} \bar{u}(k) \\ \frac{\partial \bar{u}(k)}{\partial x} \\ \frac{\partial \bar{u}(k)}{\partial y} \end{vmatrix} \quad \tilde{B}(k) = \begin{vmatrix} \bar{v}(k) \\ \frac{\partial \bar{v}(k)}{\partial x} \\ \frac{\partial \bar{v}(k)}{\partial y} \end{vmatrix}$$

Matrices de turbulencia

$$\tilde{E}(k) = \begin{vmatrix} u_1''(k) \\ u_2''(k) \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n''(k) \end{vmatrix} \quad \tilde{F}(k) = \begin{vmatrix} v_1''(k) \\ v_2''(k) \\ \cdot \\ \cdot \\ v_n''(k) \end{vmatrix}$$

Aplicando los procedimientos de regresión lineal en la ec. (6) (Draper y Smith, 1966), obtenemos la siguiente expresión para la estimación de las matrices de propiedades de corrientes

$$\begin{aligned}\tilde{A} &= (\tilde{R}'\tilde{R})^{-1}\tilde{R}'\tilde{U} \\ \tilde{B} &= (\tilde{R}'\tilde{R})^{-1}\tilde{R}'\tilde{V}\end{aligned}\quad (7)$$

donde \tilde{R}' es la transpuesta de \tilde{R} y $(\tilde{R}'\tilde{R})^{-1}$ es la inversa de $(\tilde{R}'\tilde{R})$. Sustituyendo la ec. (7) en la ecuación (6), las matrices de turbulencia se pueden expresar como

$$\begin{aligned}\tilde{E} &= [1 - \tilde{R}(\tilde{R}'\tilde{R})^{-1}\tilde{R}']\tilde{U} \\ \tilde{F} &= [1 - \tilde{R}(\tilde{R}'\tilde{R})^{-1}\tilde{R}']\tilde{V}\end{aligned}\quad (8)$$

La vorticidad y divergencia horizontal estan definidas como (Saucier, 1955; Molinari y Kirwan, 1975):

Divergencia Horizontal

$$\gamma(k) = \frac{\partial \tilde{u}(k)}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{v}(k)}{\partial y} \quad (9)$$

Vorticidad Relativa

$$\xi(k) = \frac{\partial \tilde{v}(k)}{\partial x} - \frac{\partial \tilde{u}(k)}{\partial y} \quad (10)$$

7. RESULTADOS

7.1. TRAYECTORIAS DE LA CORRIENTE.-

En las figuras 4 a 13 se muestran las trayectorias de la corriente (Figs. 4.a a 13.a), las gráficas de velocidad del viento (hacia donde va), y las gráficas de velocidad de la corriente (hacia donde va) (Figs. 4.b a 13.b). Se incluyen aquí, únicamente las gráficas representativas para cada serie de experimentos según el calendario de mediciones de la figura 2. Las trayectorias incluidas no están corregidas por viento.

Las figuras 4.a a 7.a muestran las trayectorias de los meses de Octubre y Enero. Se observa que éstas presentan estructura muy irregular. Está de manifiesto también cierta tendencia de las trayectorias a orientarse paralelas a la costa de Punta Banda (Fig. 7.a) y a un desplazamiento neto hacia la costa (Figs. 4.a a 6.a). La rapidez promedio registrada en estos meses fueron de 5 a 8 cm/s, con máximo excepcional de 25 cm/s (Figs. 4.b a 7.b).

Las figuras 8.a a 12.a muestran las trayectorias de las observaciones de Mayo, Junio y Julio. La estructura es más o menos regular, con tendencias netas de circulación a lo largo de la costa de Punta Banda y/o la barra del estero (Figs. 8.a, 9.a, 12.a y 13.a), dentro de una franja no mayor de los 2 kilómetros. Una circulación diferente a la anterior fue observada en el experimento del 28-29 de Julio de 1980

(Fig. 10), donde la circulación es inicialmente paralela a Punta Banda, cambiando la dirección directamente hacia la costa de la barra del estero alrededor de las 10 horas del 29 de Julio. El experimento del 25-27 de Mayo de 1981 presenta trayectorias irregulares con corrientes de baja intensidad (alrededor de los 7 cm/s) durante las primeras 24 horas de medición. Sin embargo, en las siguientes 24 horas la circulación es similar a la que presentan las figuras 8, 9, 12 y 13.

La rapidez promedio de la corriente fue entre los 9 y 15 cm/s, con máximo de 25 cm/s en las mediciones de Junio y Julio, y de 30 cm/s en las del mes de Mayo. Los registros de viento muestran, con excepción del mes de Mayo, la presencia de vientos del mar (W, SW) a partir de las 9:30 de la mañana (Figs. 8.b a 12.b).

El experimento del mes de Marzo (Fig. 13), muestra una estructura regular en las trayectorias. El tipo de circulación superficial es de una corriente inicial al sureste con cambio al oeste-noroeste y noroeste alrededor de las 21 horas. La intensidad promedio de la corriente fue de 10 a 15 cm/s, con máximo de 40 cm/s. La dirección de los vientos predominantes fue inicialmente al sureste, con un cambio al nor-noroeste y noroeste también alrededor de las 21 horas (Fig. 13.b)

7.2. DEFORMACIONES DE LA PARCELA DE FLUIDO.

En un cuerpo de fluido, los gradientes laterales de velocidad y los efectos de turbulencia, producen deformaciones que gobiernan los procesos de dispersión y mezcla (Kirwan, 1975; Okubo y Ebbesmeyer, 1976).

En este trabajo, la deformación de la parcela en cada experimento ha sido representada por la posición sucesiva a cada hora de la tríada de flotadores. Las figuras 14.a a 21.a muestran las series de tríadas para los experimentos del 29 de Junio, 16 de Julio, 28-29 de Julio, 21-22 de Octubre, 5-6 de Marzo de 1980, y 26-27 de Mayo de 1981. En estas figuras, se aprecia que en los casos en que la dirección de la corriente es a lo largo de la barra del Estero, existen gradientes laterales de velocidad a lo largo de la misma. Estos gradientes producen un aumento del área de la tríada de flotadores (Figs. 15.a y 16.a). Cuando la corriente es directamente hacia la costa, el área de la tríada disminuye (Figs. 14.a, 17.a y 18.a).

Los gradientes de velocidad calculados en los experimentos correspondientes a las figuras 14.a a 18.a, son del orden de 10^{-4} s^{-1} . En las series del 16 de Julio (Figs. 15.b y 16.b), estos gradientes alcanzan valores de 10^{-3} s^{-1} alrededor de las 21 horas. Las deformaciones máximas producidas en la tríada de flotadores son de 5 a 6 veces su dimensión inicial, en un lapso de 6 a 8 horas (Figs.

16.a a 18.a).

7.3 SERIES DE TIEMPO DE DIVERGENCIA Y VORTICIDAD.

En las figuras 14.b a 21.b se muestran las series de tiempo de divergencia y vorticidad, obtenidas por regresión lineal (líneas continuas interiores) con intervalos de confianza de 80% (líneas continuas exteriores). Asimismo, se muestran los valores de divergencia calculados a partir de la razón de cambio del área del grupo de flotadores, y los valores de vorticidad calculados de la razón de cambio de la orientación de los ejes principales. Estos resultados del método de áreas se presentan por cruces.

La figura 14.b muestra los valores de las propiedades cinemáticas obtenidos por ambos métodos en el experimento del 29 de Junio de 1980. Estos valores no presentan similitud en sus resultados, aunque son del mismo orden de magnitud. La serie de vorticidad obtenida por regresión, presenta un máximo de $2.56 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ al final del experimento.

En forma similar al caso anterior, los valores calculados por regresión lineal en el experimento del 16 de Julio de 1980 (primera serie, Fig. 15.b), no concuerdan con los calculados por el método de áreas. Las series de divergencia y vorticidad, presentan cambios abruptos alrededor de las 13 horas y las 21 horas. Un cambio de valores positivos a negativos en divergencia, corresponde a un cambio

inverso en vorticidad. El rango para la serie de divergencia es de -4.5 a 4.5 [$\times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$] a las 13 horas, y de -1.7 a 3.5 [$\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$] a las 21 horas. Para la serie de vorticidad, los rangos oscilaron entre 3.5 y -3.0 [$\times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$] en el primer caso, y entre 1.0 y -2.0 [$\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$] en el segundo. El cambio notable de las 13 horas corresponde con el arribo del grupo de flotadores a la isóbata de los 10 metros (Fig. 15.a).

La figura 16 presenta los resultados de las propiedades cinemáticas del experimento del 16 de Julio de 1980 (segunda serie). El comportamiento de los valores es semejante a los de la primera serie del 16 de Julio (Fig. 15.b). Alrededor de las 23 horas existe un cambio notable en las series de divergencia y vorticidad obtenidas por regresión, de -3.4 a 4.0 [$\times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$] en la primera, y de 2.14 a -1.5 [$\times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$] en la segunda. Este cambio corresponde también con el arribo del grupo de flotadores a la isóbata de los 10 metros (Fig. 16.a). Ambos métodos de análisis utilizados aportan resultados similares, con una diferencia no mayor de 0.8×10^{-4} en el rango de la gráfica de de -2.0 a 2.0 [$\times 10^{-4}$].

Los resultados obtenidos en el experimento del 28-29 de Julio de 1980, se muestran en las figuras 17 y 18 (primer y segundo subgrupo respectivamente). Los valores calculados por ambos métodos muestran similitud en divergencia. En

vorticidad, estos son del mismo orden de magnitud, pero su comportamiento es muy diferente. Con áreas relativamente grandes, del orden de 10^4 m^2 (Figs. 17.a y 18.a), la diferencia en resultados no es mayor de 0.8×10^{-4} dentro del rango de la gráfica de -2.0 a $2.0 [\times 10^{-4}]$.

Las figuras 19 a 21 muestran resultados representativos de los experimentos no incluidos. En estos experimentos, el comportamiento de las series no se relaciona a ningún factor singular, y estas exhiben en algunos casos, frecuentes cambios de signo. En las mismas figuras, los dos métodos de análisis aplicados no mostraron una correspondencia de valores en las series de divergencia y vorticidad.

8. DISCUSION Y ANALISIS DE RESULTADOS.

8.1. PATRON DE CORRIENTES DE LA REGION SUR DE LA BAHIA TODOS SANTOS

Patrones de corrientes superficiales para la Bahía de Todos Santos han sido sugeridos por Alvarez Sánchez (1971), a partir de mediciones directas con flotadores, y por Argote et al. (1975), en base a distribuciones horizontales de temperatura y salinidad (ver Cap. 2).

En el presente trabajo, los resultados muestran dos patrones típicos de circulación superficial en la región sur de la Bahía. El primero corresponde a los meses de Octubre y

Enero. En estos meses se presentaron tendencias netas de circulación hacia la costa, con trayectorias de estructura irregular y corrientes de baja intensidad (de 5 a 8 cm/s en promedio). El otro patrón consiste básicamente de una corriente a lo largo de la costa, desde la zona de Punta Banda hasta la boca del Estero, con velocidades de 10 a 15 cm/s.

Los dos patrones de circulación tienen su explicación probable en las discusiones que hacen Pavia López (1979) y Alvarez et al. (1982). Pavia menciona que en los meses de verano, las brisas marinas son de mayor duración que las de los meses de invierno. Alvarez et al. (1982) concluyen que la alta persistencia de la corriente con alta intensidad, corresponde a la época en que los vientos del mar son de intensidad moderada (4 a 6 m/s) y alcanzan condiciones casi estacionarias. Estos resultados permiten sugerir que en las condiciones de viento citadas, el patrón de circulación superficial en la región sur consiste de una corriente con trayectoria regular a lo largo de la costa, desde la zona de Punta Banda hasta la boca del Estero. En ausencia de estas condiciones, el patrón de corrientes es irregular y difícil de establecer.

A corto plazo (en escala temporal de 1/2 día o menos), y en referencia a los registros de viento obtenidos en el presente trabajo (Figs. 4.b a 13.b), es posible sugerir también una influencia de la dirección del viento local de

regular intensidad (4 a 6 m/s) sobre la dirección de la corriente. Además, se puede sugerir una relación entre la ausencia de este sobre el comportamiento de la circulación.

La primera de estas condiciones fue observada en los experimentos de Octubre 21-22 (Fig. 5.b, de 9 horas en adelante), Julio 28-29 (Fig. 10.b, de 9 horas en adelante), y Marzo 5-6 (Fig. 13.b, durante todo el periodo de medición). En estas tres situaciones se puede apreciar cualitativamente, una fuerte relación de la dirección del viento con la dirección de la corriente superficial. En Octubre 21-22, el viento y la corriente presentan una dirección sureste y este-sureste respectivamente. Una situación más o menos similar ocurre en la serie del 28-29 de Julio. En el muestreo de Marzo el efecto del viento sobre la corriente se observa sobre todo en la segunda mitad del experimento. En esta fase la intensidad del viento fue tal que que las condiciones de la superficie del mar hicieron imposible la localización y recuperación de los flotadores.

El segundo caso fue observado en las mediciones del 21-22 de Octubre (Fig. 5, de las 0 a las 9 hrs.), 24-26 de Enero (Fig. 7, de las 21 hrs. en adelante), y Julio 28-29 (Fig. 10, de las 19 hrs. a las 8 hrs. del día siguiente). En los periodos de muestreo mencionados de las figuras 5, 7 y 10, las trayectorias mostraron una corriente superficial al noroeste y/o al nor-noroeste. Asimismo, los registros de

viento mostraron bajas intensidades (de 1 a 2 m/s). Esta situación parece sugerir que con vientos de baja intensidad existe una corriente proveniente de la región norte que domina sobre la corriente de la región sur. La falta de mediciones en la zona de la boca del Estero, en las anteriores condiciones, impiden considerar con certeza esta sugerencia. Estas corrientes fueron observadas en tres experimentos más, que debido a su corta duración no han sido incluidos. Por otro lado, el efecto de la marea sobre las trayectorias no estuvo de manifiesto en forma notable. Las corrientes al NW observadas en regímenes de vientos de poca intensidad (Figs. 5, 7 y 10) no están influenciadas aparentemente por los cambios del nivel de la marea (Fig. 22). Los cambios en estas corrientes al NW no corresponden en forma consistente con las horas en que se presentan máximos y mínimos de marea.

Al comparar los resultados de corrientes de la región sur con el patrón de circulación propuesto por Argote et al. (1975), es posible hacer extensivo para esa región y para profundidades menores de 30 metros, las tendencias de circulación propuestas por ellos. Lo anterior se sugiere como válido cuando los vientos de mar son de regular intensidad (4 a 6 m/s) y casi estacionarios. Como ya se ha señalado, en presencia de vientos leves el patrón de corrientes es irregular y difícil de establecer.

8.2. EFECTO DE LA TOPOGRAFIA DEL FONDO.

[El efecto de fricción del fondo es un factor que tiene gran influencia en las corrientes, sobre todo en aguas someras (profundidades menores de 50 metros) como es el caso que se discute en este trabajo. Argote et al. (1975), mencionan estudios de Reid, Wyllie y Smith, realizados en Bahía Sebastián Vizcaíno, B.C., en donde se aprecia que la topografía del fondo juega un papel muy importante en la dirección de las corrientes. En estos estudios se observó que las corrientes tienden a seguir la configuración de las isóbatas.]

En el presente trabajo, el efecto del contorno de la costa y de las isóbatas estuvo de manifiesto únicamente en los experimentos del 29 de Junio, 16 de Julio de 1980 y 26-26 de Mayo de 1981 (Figs. 8.a, 9.a y 12.a). Estos experimentos se caracterizan por trayectorias de estructura regular y corrientes bien definidas a lo largo de la costa. La influencia de la profundidad consistió esencialmente de un efecto de la isóbata de los 10 metros.] Esta isolínea de profundidad jugó un papel determinante en el cambio de orientación del grupo de flotadores en los experimentos de Julio 16 (Figs. 15 y 16). En estas mediciones, se observó también la presencia de gradientes laterales de velocidad frente a la barra del Estero. Estos gradientes produjeron deformaciones sustanciales sobre la parcela representada por

los elementos de deriva.

8.3. SERIES DE TIEMPO DE DIVERGENCIA Y VORTICIDAD.

El propósito fundamental del presente trabajo es el de obtener estimaciones de divergencia horizontal y vorticidad relativa, en una región donde la dinámica de las aguas se ven afectadas por la cercanía de la costa, las pocas profundidades (menores de 50 metros), las aguas de regiones aledañas, y los efectos del viento. Algunos autores han calculado valores de estas propiedades, a partir de posiciones simultáneas con respecto al centroide de un grupo de elementos de deriva, en condiciones parecidas a las de este estudio.

Okubo et al. (1976), hicieron estimaciones de las propiedades cinemáticas en la región de los Grandes Lagos, en zonas de poca profundidad y cercanas a la costa, pero con corrientes promedio de 1-6 cm/s. Los valores obtenidos por los autores fueron en general del orden de 10^{-5} s^{-1} , para la divergencia, vorticidad, y las deformaciones normales y cortantes.

Ichiye et al. (1978) calcularon valores de las propiedades anteriores con velocidades máximas de la corriente de 60 cm/s, en una región de grandes profundidades (1000 metros) y alejadas de la costa. Las estimaciones fueron del orden de 10^{-4} s^{-1} .

Los restantes trabajos sobre el cálculo de propiedades cinemáticas han sido realizados en regímenes de fuertes corrientes (velocidades mayores de 60 cm/s) y alejados de la costa. Entre estos se pueden destacar los trabajos de Molinari y Kirwan (1975) y Sanderson (1979, 1982.a). Los órdenes de magnitud reportados por estos autores fueron de 10^{-5} s^{-1} .

En el presente trabajo, se calcularon estimaciones de la divergencia horizontal y vorticidad del orden de 10^{-4} s^{-1} (Figs. 14.b a 21.b). Estos valores son similares a los calculados por Ichiye et al. (1978), y de un orden de magnitud mayor que los reportados por Okubo et al. (1976), Molinari y Kirwan (1975), y Sanderson (1979, 1982.a).

Valores de las propiedades de 10^{-3} s^{-1} se calcularon en el experimento del 16 de Julio de 1980 (Fig. 15 a las 21 horas). Este orden de magnitud se debió probablemente al efecto de las bajas profundidades que existen en la zona alledaña a la boca del Estero. Las bajas profundidades producen efectos friccionales notables en las corrientes superficiales, produciendo variabilidad espacial de la velocidad dentro del grupo, y por ende valores mayores de los gradientes.

La misma situación se puede aplicar a los valores de 10^{-4} s^{-1} en divergencia y vorticidad. En aguas someras (profundidades menores de 50 metros) y cercanas a la costa,

los efectos friccionales son probablemente los factores relevantes que causan la diferencia entre los órdenes de magnitud de las propiedades calculados en éste y otros trabajos.

Dentro de las series de tiempo de propiedades cinemáticas presentadas en las figuras 14.b-18.b, está el caso de aquellas que muestran cambios notables en los valores (Figs. 15.b y 16.b). Estos cambios ocurrieron cuando el grupo de flotadores arribó a la isóbata de los 10 metros, y consistieron de un aumento del área de la triada de flotadores (Fig. 16.a) (divergencia positiva), y un giro del grupo, contrario a las manecillas del reloj (vorticidad negativa).

Un efecto inverso sobre la divergencia fue observado en las mediciones del 29 de Junio y del 28-29 de Julio (Figs. 14,17 y 18). Al arribo del grupo de flotadores a la isóbata de los 10 metros, se produce una disminución del área de la triada (divergencia negativa). Esta disminución es corroborada numéricamente en las series del 28-29 de Julio (Figs. 17.b y 18.b). La figura 14 (al final de la serie) indica que este efecto puede ser válido también para la vorticidad. Las situaciones anteriores permiten sugerir por tanto, efectos divergentes positivos y de vórtice negativos, causados por la isolínea de los 10 metros, cuando una parcela de agua se transporta paralela a la costa de la barra del estero a esa profundidad. Cuando la parcela se transporta

directamente hacia la costa de la barra, se produce el efecto contrario en divergencia y vorticidad al arribar el grupo de flotadores a la isóbata de 10 metros.

Con respecto a los dos métodos de análisis utilizados, estos muestran similitud de resultados en tres de los experimentos (julio 16, Julio 28-29; Figs. 16.b a 18.b). En las series que no mostraron concordancia, el área de la triada fue menor o igual a 10^3 m². En cambio si hubo concordancia cuando las áreas fueron mayores de 10^4 m². Se observó que con áreas del orden de 10^4 m² (series con resultados similares de ambos métodos), la diferencia en valores no fue mayor de 0.8×10^{-4} en relación a la escala de la gráfica de -2.0 a 2.0 [$\times 10^{-4}$]. Por otro lado, el comportamiento de las series de propiedades cinemáticas en los experimentos cuyas áreas son pequeñas, es el de exhibir frecuentes cambios de signo en sus valores, sin ninguna tendencia apreciable.

Molinari y Kirwan (1975) se refieren a las situaciones anteriores con dos explicaciones. Una son los errores en las mediciones. Menciona que si la estadística de los errores de medición es la misma en todas las observaciones, entonces las áreas más pequeñas introducen un error mayor en las estimaciones de las propiedades cinemáticas. La otra explicación, menciona, es que las series exhiben frecuentes cambios de signo cuando los flotadores responden a un campo de flujo turbulento en pequeña escala.

Alvarez et al. (1982) reportan que para los muestreos de este trabajo el error relativo en el cálculo de la varianza es mayor del 40%, cuando los flotadores están separados a menos de 100 metros del centroide del grupo. Dado que las unidades de la varianza son unidades de superficie, es visto por tanto que áreas más pequeñas introducen mayor error en el cálculo de propiedades.

En lo que respecta a los efectos turbulentos en pequeña escala, no se hicieron estimaciones debido a las características del método (secc. 6.3.3).

9. CONCLUSIONES.

1) Los resultados analizados de este trabajo permiten proponer como válido en la región sur y para profundidades menores de 30 metros el patrón de circulación sugerido por Argote et al. (1975). En la región sur este patrón consiste de una celda de circulación superficial, con corrientes a partir de Punta Banda a lo largo de toda la costa y hasta la boca del estero. El patrón anterior se sugiere válido para las épocas en que los vientos del mar son moderados y casi estacionarios.

2) En escala temporal de 1/2 día o menos, existe una fuerte relación entre la dirección de los vientos locales y la dirección de la corriente superficial. Cuando los vientos son de poca intensidad (del orden de 1 m/s), existe en la región sur un transporte superficial neto hacia la zona de Punta Banda, con trayectorias muy irregulares.

3) El campo de corrientes superficial en la región sur de la Bahía Todos Santos no es uniforme. Existen gradientes laterales de velocidad del orden de 10^{-4} s^{-1} (y en algunos casos del orden de 10^{-3} s^{-1}) a lo largo de la costa de la barra del Estero. Se observó que estos gradientes producen cambios notables en los valores de divergencia y vorticidad cuando el grupo de flotadores arriba alrededor de la

profundidad de 10 metros. Cuando la corriente es paralela a la barra se producen en estas condiciones efectos de divergencia positiva y vorticidad negativa. Cuando la corriente es directamente hacia la costa de la barra del Estero, se genera divergencia negativa y vorticidad positiva. La influencia de frontera de la costa estuvo presente alrededor de la isóbata de los 10 metros. Esta profundidad juega un papel determinante en la deformación y el cambio de orientación de una parcela de agua que llega a ella.

4) Las propiedades cinemáticas en la región sur de la Bahía Todos Santos, son de magnitudes similares a las calculadas por Ichiye et al. (1978) con corrientes de 60 cm/s como máximo, y de un orden de magnitud mayor a los calculados por Molinari y Kirwan (1975) y Sanderson (1979, 1982.a), en regiones alejadas de la costa, con altas velocidades de la corriente. Son también de un orden de magnitud mayor que los calculados por Okubo et al. (1976) en los Grandes Lagos, con intensidades promedio de 1-6 cm/s en la corriente.

5) Los métodos de regresión lineal, y aquellos que consideran las razones de cambio del área y de la orientación de un grupo de flotadores, aportaron resultados similares en los casos en que el área representada por el grupo es de un orden de 10^4 m² o más.

REFERENCIAS CITADAS.

- Alvarez Sánchez, Luis G., 1971: \forall Medición de corrientes superficiales en la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis Profesional. Escuela Superior de Ciencias Marinas, U.A.B.C., 54 pp.
- Alvarez Sánchez, L.G., M. Uyeji M., R. Durazo A., 1982: Observaciones de corrientes costeras superficiales mediante trazadores lagrangeanos. I. Bahía de Todos Santos, B.C. (1980-81). Reporte Técnico OC-82-03. CICESE.
- Argote, M.L., A. Amador, C. Morales, 1975: Distribución de los parámetros salinidad y temperatura y tendencias de circulación en la Bahía de Todos Santos, B.C. Memorias de la Primera Reunion de CIBCASIO, pp. 3-30.
- Beers, Y., 1962: Introduction to the theory of error. Addison-Wesley Publishing, 66 pp.
- Chew, Frank, 1974: The Turning Process in Meandering Currents: A Case Study. Jour. Phys. Ocean., 4:27-57.
- Chew, F. y G.A. Berberian, 1971: A determination of horizontal divergence in the Gulf Stream off Cape Lookout. Jour. Phys. Ocean., 1:39-44.
- Draper, N.R. y H. Smith, 1966: Applied Regression Analysis. John Wiley, 407 pp.
- Hibler, W.H., W.F. Weeks, A. Kovacs y S.F. Ackley, 1974: Differential sea-ice drift. I. Spatial and temporal variations in sea-ice deformation. Jour. Glaciology, 13(69):437-455.
- Ichiye, T., C. Mungall, M. Inoue y D. Horne, 1978: Gulf of Mexico Dispersion Calculations. Technical Report, Reference 78-10-T. Texas AM Research Foundation.
- Kirwan, A.D. Jr., 1975: Oceanic Velocity Gradients. Jour. Phys. Ocean., 5:729-735.
- Kirwan A.D. Jr., G. McNally, M.S. Chang y R. Molinari, 1975: The effect of wind and surface currents on drifters. Jour. Phys. Ocean., 5:361-368.

- Molinari, R. y A.D. Kirwan Jr., 1975: Calculations of differential kinematics properties from lagrangian observations in the Western Caribbean Sea. Jour. Phys. Ocean., 5(3):483-491.
- Murray, S.P., 1975: Trajectories and speeds of wind-driven currents near the coast. Jour. Phys. Ocean., 5:347-360.
- Okubo, A. y C.C. Ebbesmeyer, 1976: Determination of vorticity, divergence, and deformation rates from analysis of drogue observations. Deep Sea Res., 23:349-352.
- Okubo, A., C.C. Ebbesmeyer y J.M. Helseth, 1976: Determination of lagrangian deformations from analysis of current followers. Jour. Phys. Ocean., 6(4):524-527.
- Okubo, A., C.C. Ebbesmeyer, J.M. Helseth y A.S. Robins, 1976: Reanalysis of the Great Lakes drogue studies data, final report. Technical Report, Reference 76-2. Marine Science Research Center, State Univ. of New York.
- Oudshoorn, H.M., 1960: The use of radar in hydrodynamic surveying. Proc. 7th. Conf. Coast. Eng., Vol. I.
- Pavía López, Edgar G., 1979: Brisas en la Bahía de Todos Santos, B.C. durante los meses de Marzo a Agosto 1978. Tesis Profesional. Escuela Superior de Ciencias Marinas, U.A.B.C., 55 pp.
- Reed, R.K., 1971: An observation of divergence in the Alaskan Stream. Jour. Phys. Ocean., 1:282-283.
- Sanderson, B.G., 1979: A study of Ocean circulation using radio drogues. Tesis de Maestría, Univ. of Auckland, 170 pp.
- Sanderson, B.G., 1982.a: A lagrangian description of dispersion in the Ocean. Tesis Doctoral, State Univ. of New York at Stony Brook, 98 pp.
- Sanderson, B.G., 1982.b: Computer programs for the analysis of two dimensional lagrangian data. En preparación.
- Saucier, W.J., 1955: Principles of Meteorological Analysis. The University of Chicago Press, 438 pp.

Secretaría de Marina, 1974: Estudio geográfico de la región de Ensenada, B.C. Secretaría de Marina, Dirección General de Oceanografía y Señalamiento Marítimo. México.

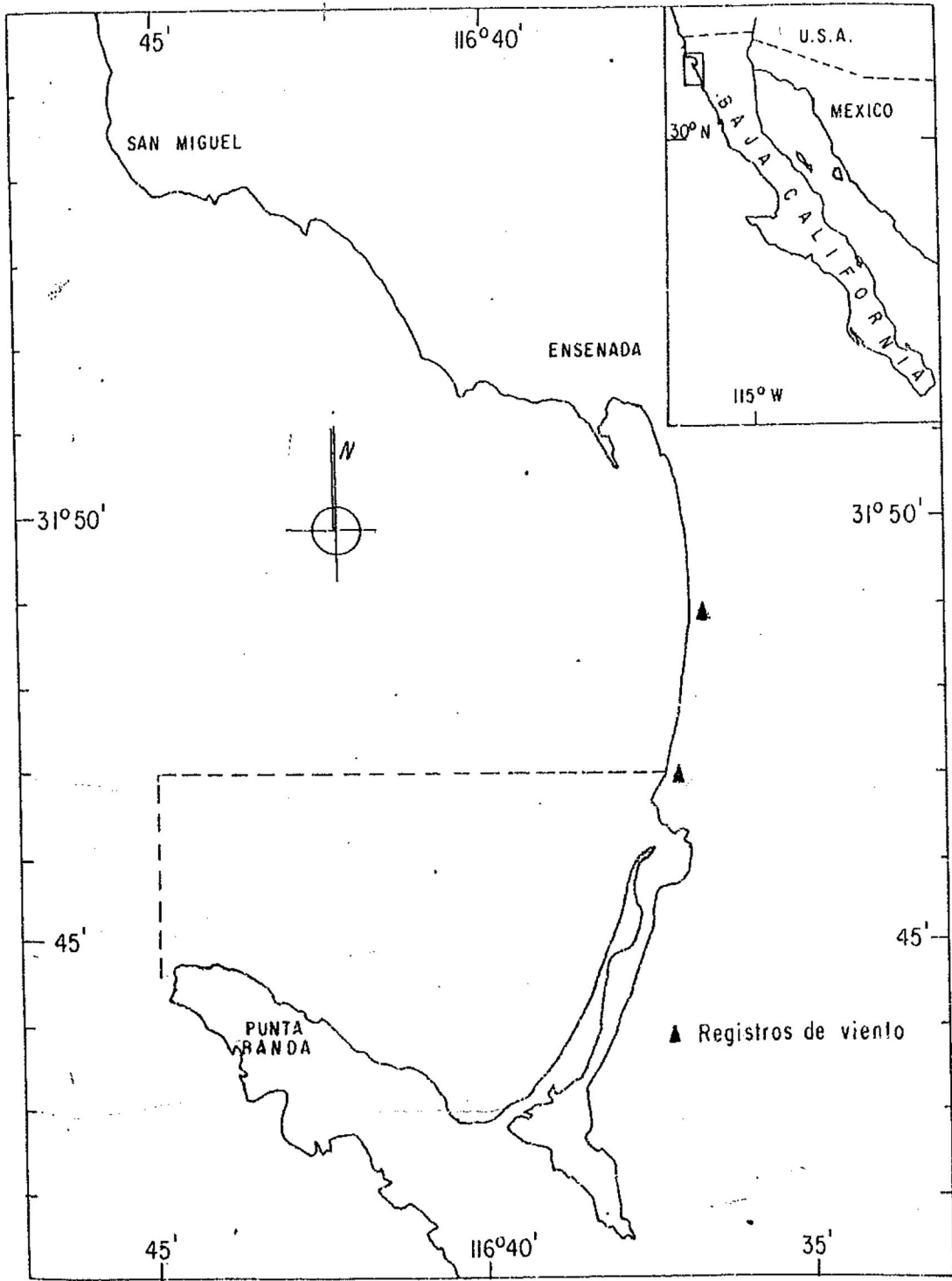


FIG.- 1.- Localización del área de estudio.

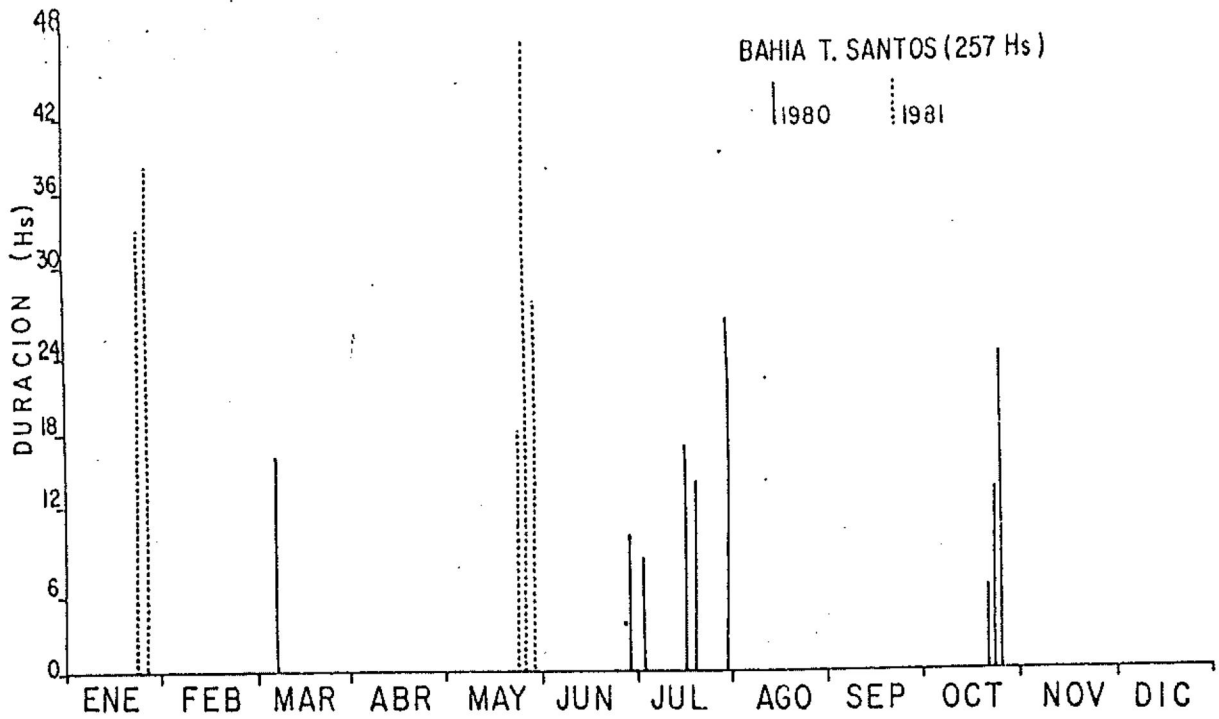


Fig. 2. Distribución y duración de las observaciones en la Bahía Todos Santos (tomado de Alvarez et al, 1982).

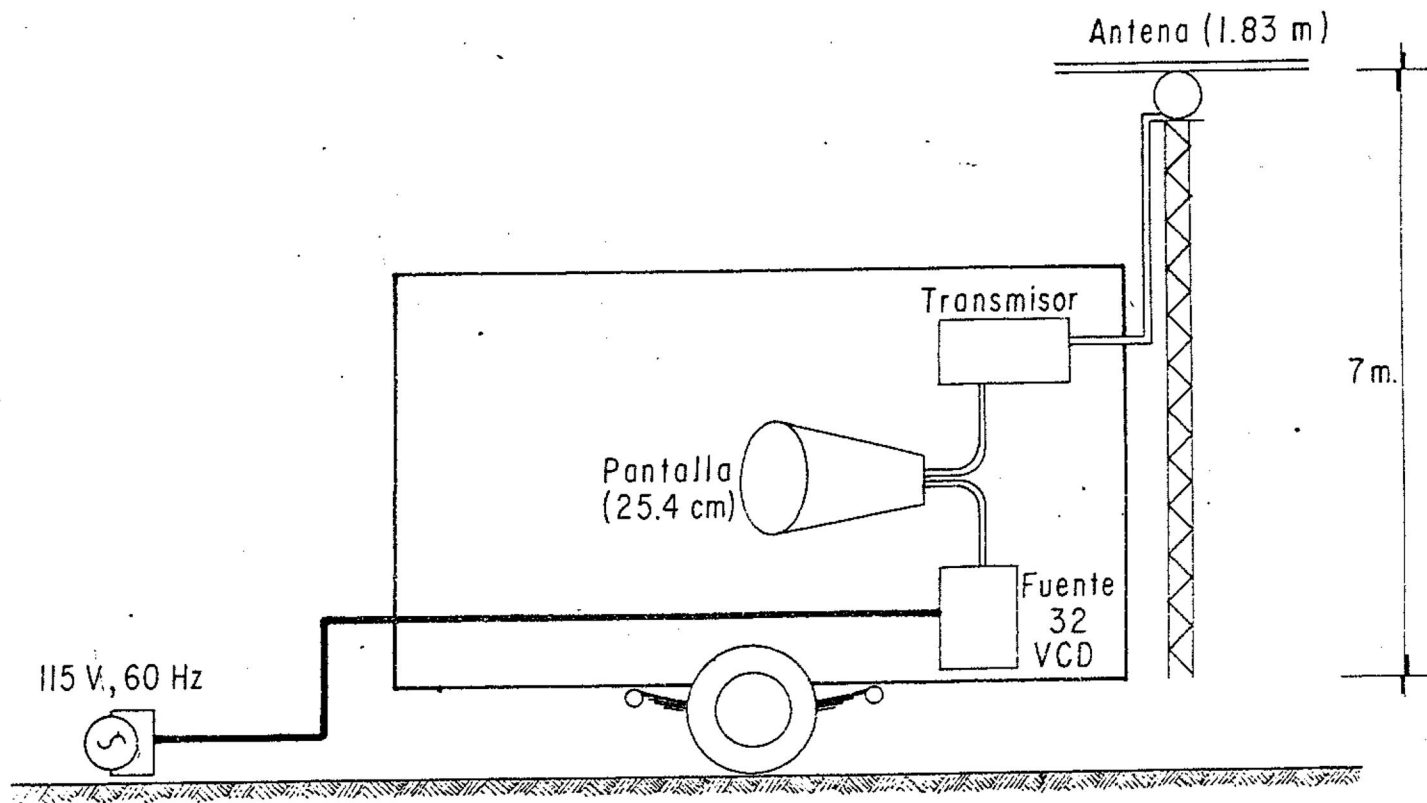


Fig. 3.a Equipo de medición. Radar instalado en el remolque (tomado de Alvarez et al, 1982).

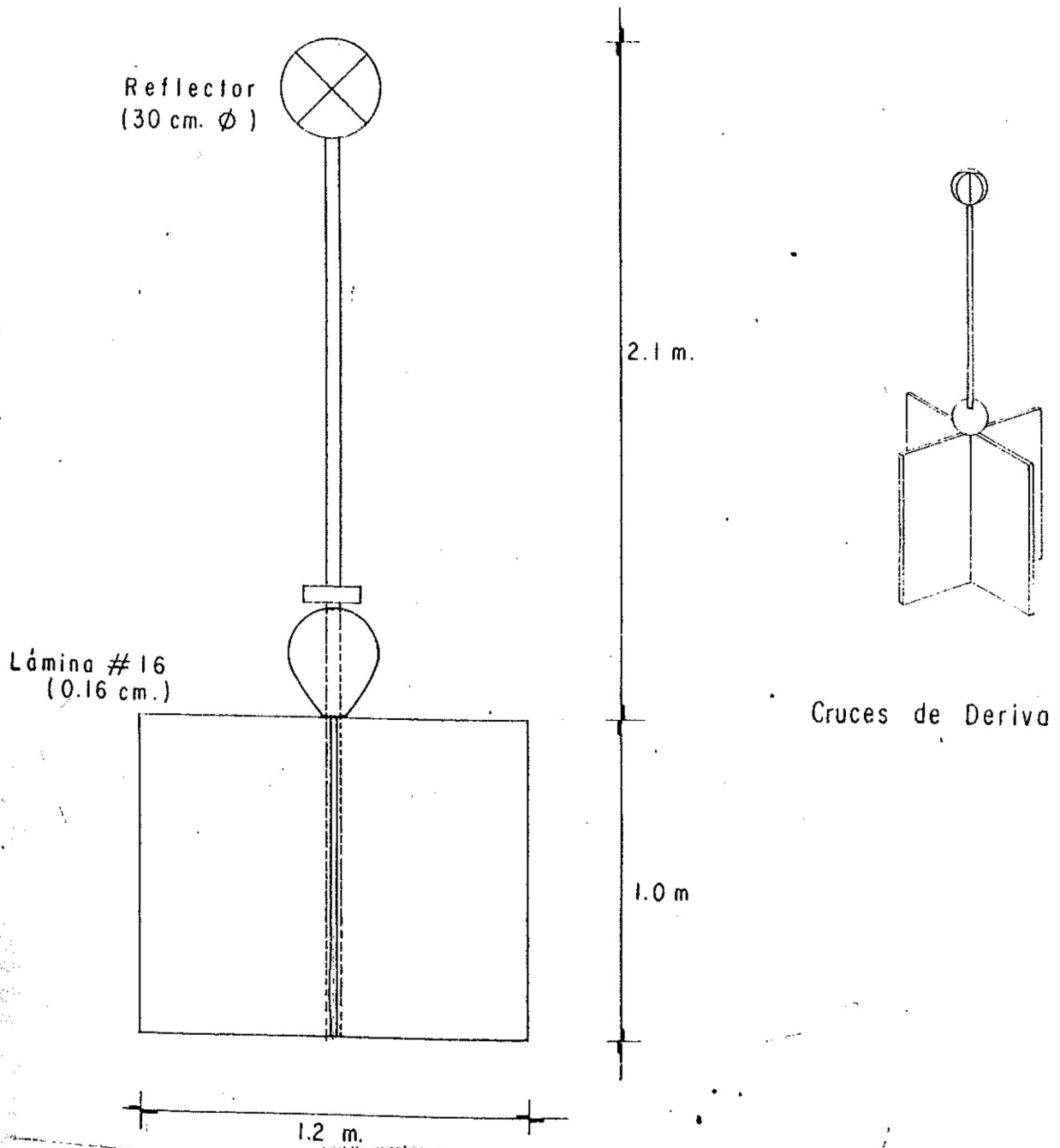


Fig. 3.b Características de los elementos de deriva utilizados en las observaciones (modificado de Alvarez et al, 1982).

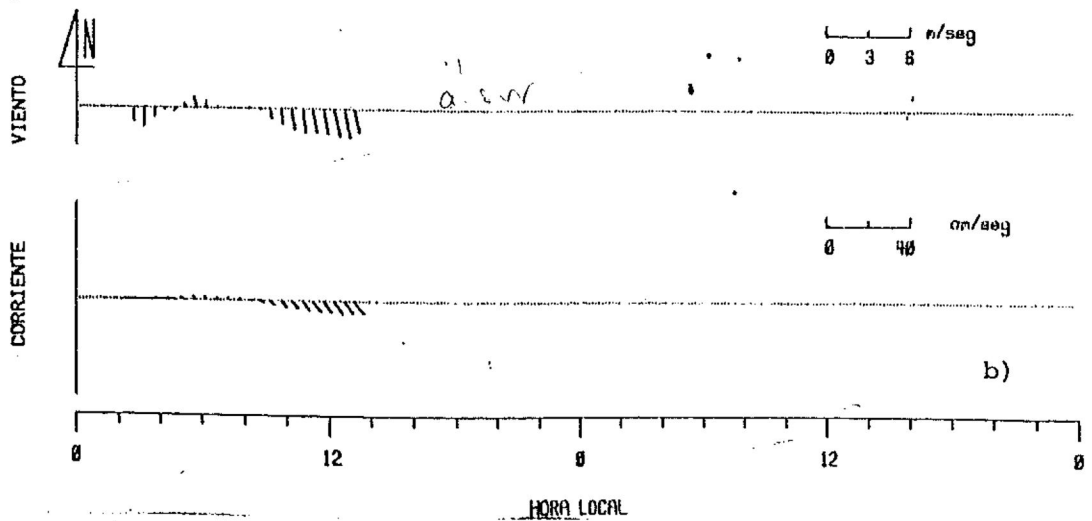
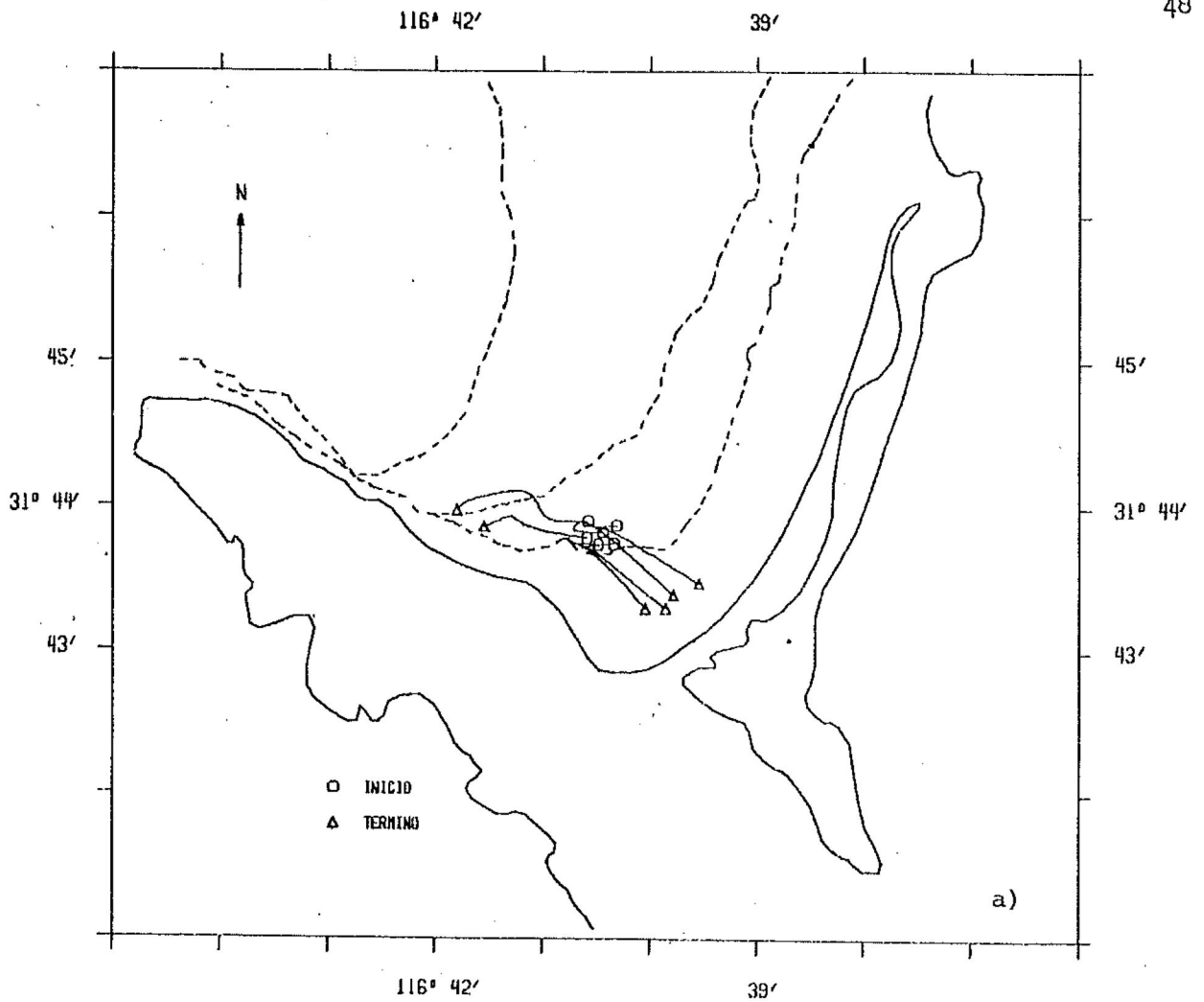


Fig. 4. Experimento del 21 de Octubre de 1980. Duración: 11 horas, con 6 flotadores. a) Trayectorias de la corriente. b) Diagramas de velocidad y dirección (hacia donde va) del viento y la corriente superficial.

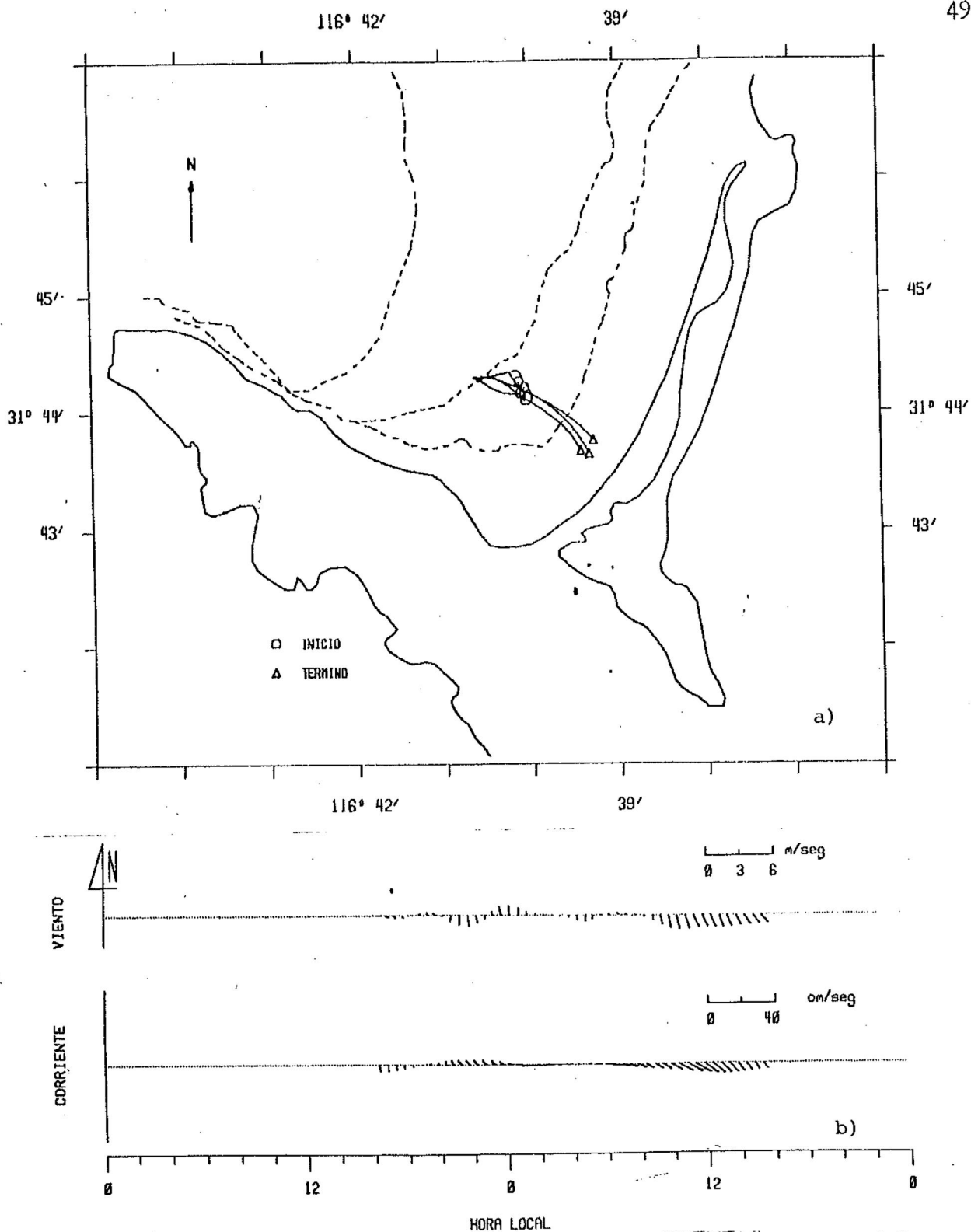


Fig. 5. Experimento del 21-22 de Octubre de 1980. Duración: 24 horas, con tres flotadores. a) Trayectorias de la corriente. b) Diagramas de velocidad (hacia donde va) del viento y la corriente superficial.

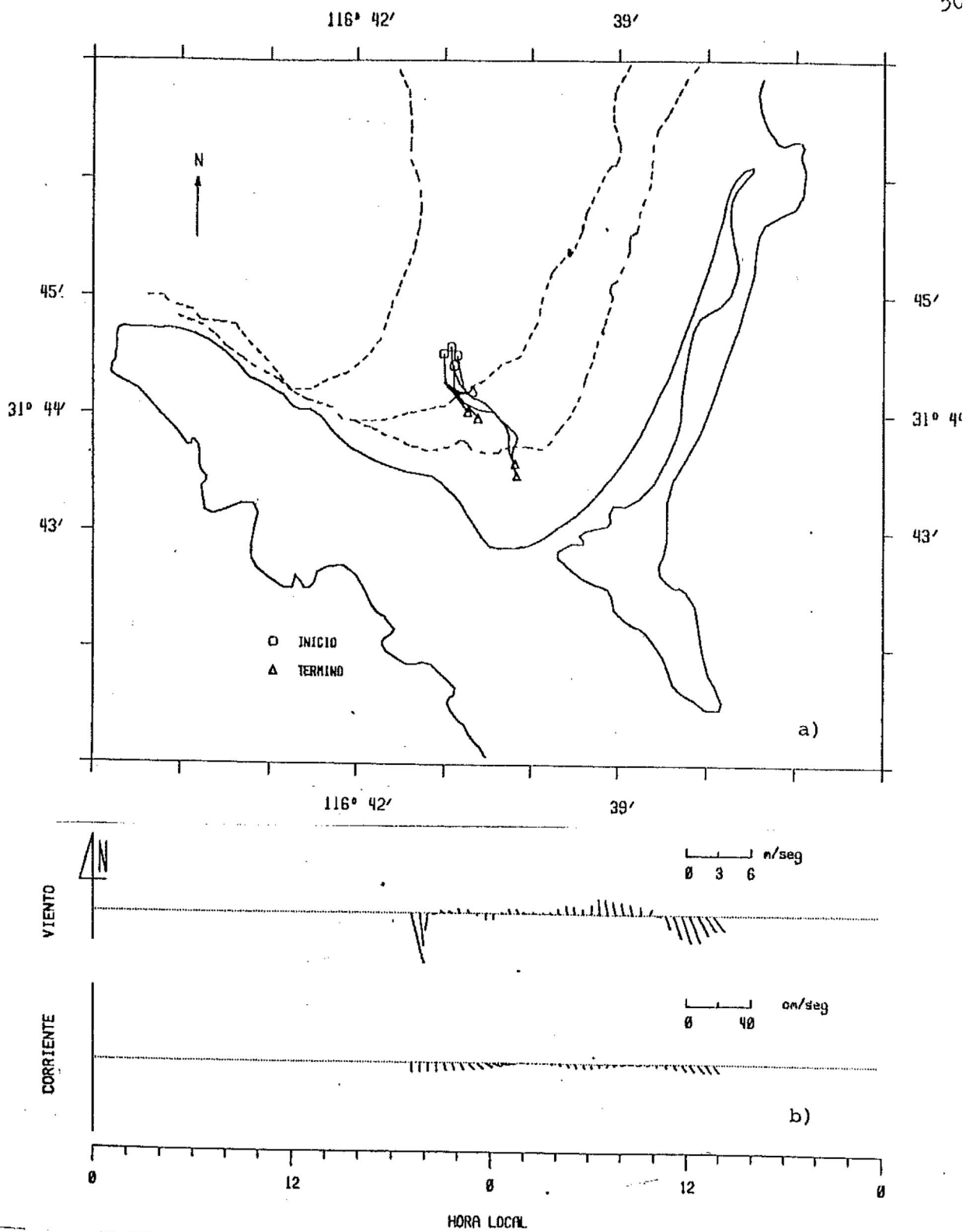


Fig. 6. Experimento del 23-24 de Enero de 1981. Duración: 18 horas, con 4 flotadores. a) Trayectorias de la corriente. b) Diagramas de velocidad (hacia donde va) del viento y la corriente superficial.

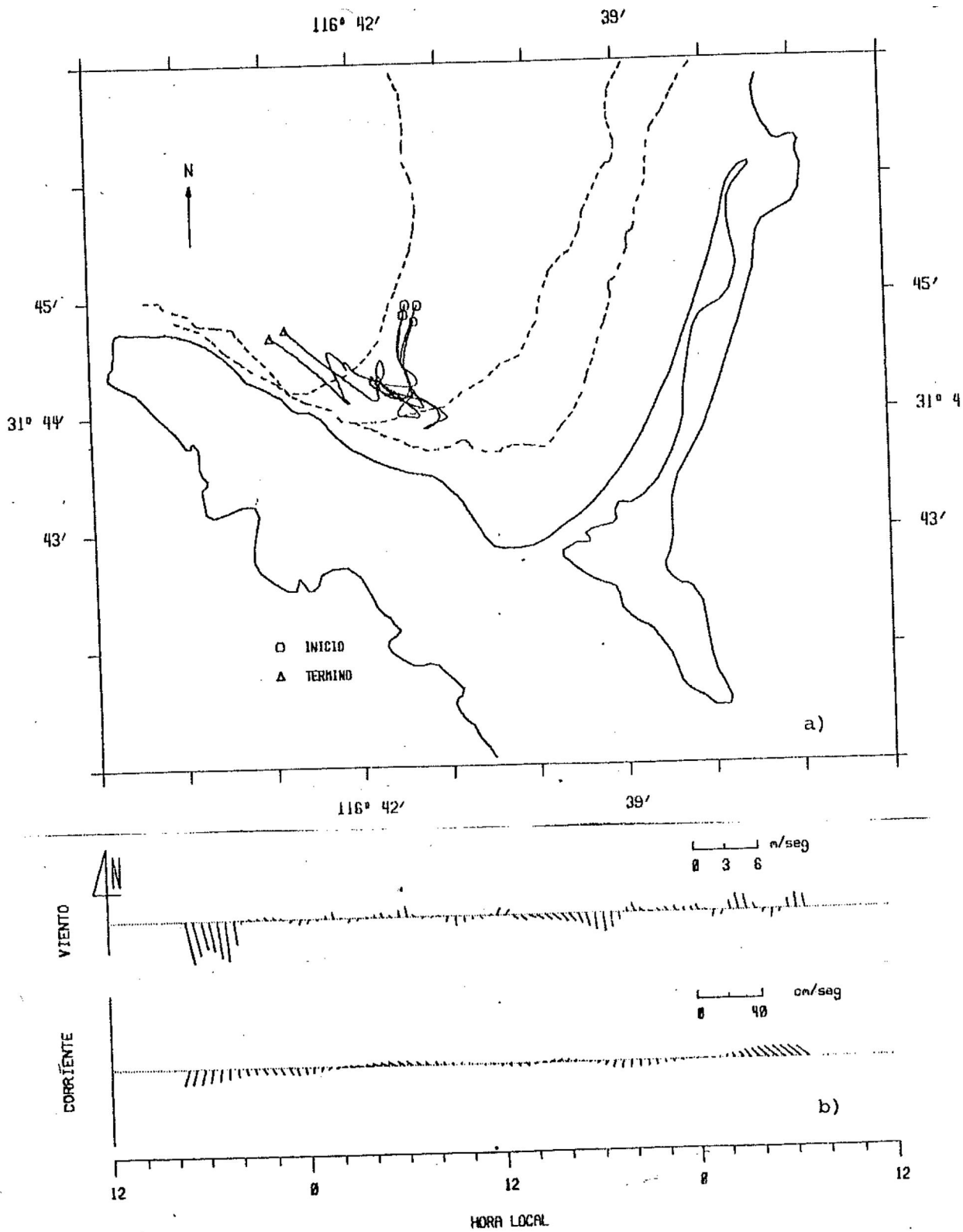


Fig. 7. Experimento del 24-26 de Enero de 1981. Duración: 38 horas, con 4 flotadores. a) Trayectorias de la corriente. b) Diagramas de velocidad (hacia donde va) del viento y la corriente superficial.

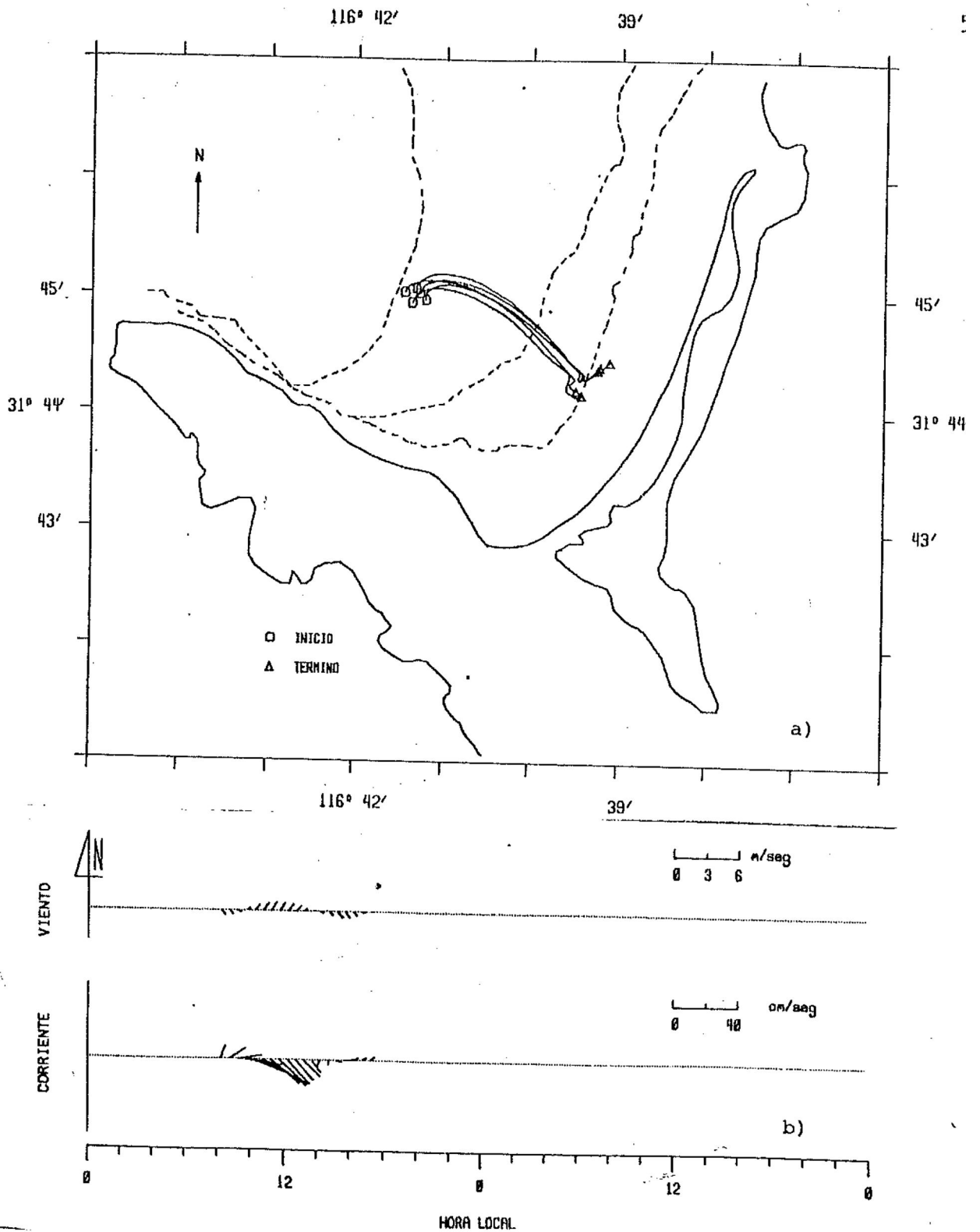


Fig. 8. Experimento el 29 de Junio de 1980. Duración: 10 horas, con 5 flotadores. a) Trayectorias de la corriente. b) Diagramas de velocidad (hacia donde va) del viento y la corriente superficial..

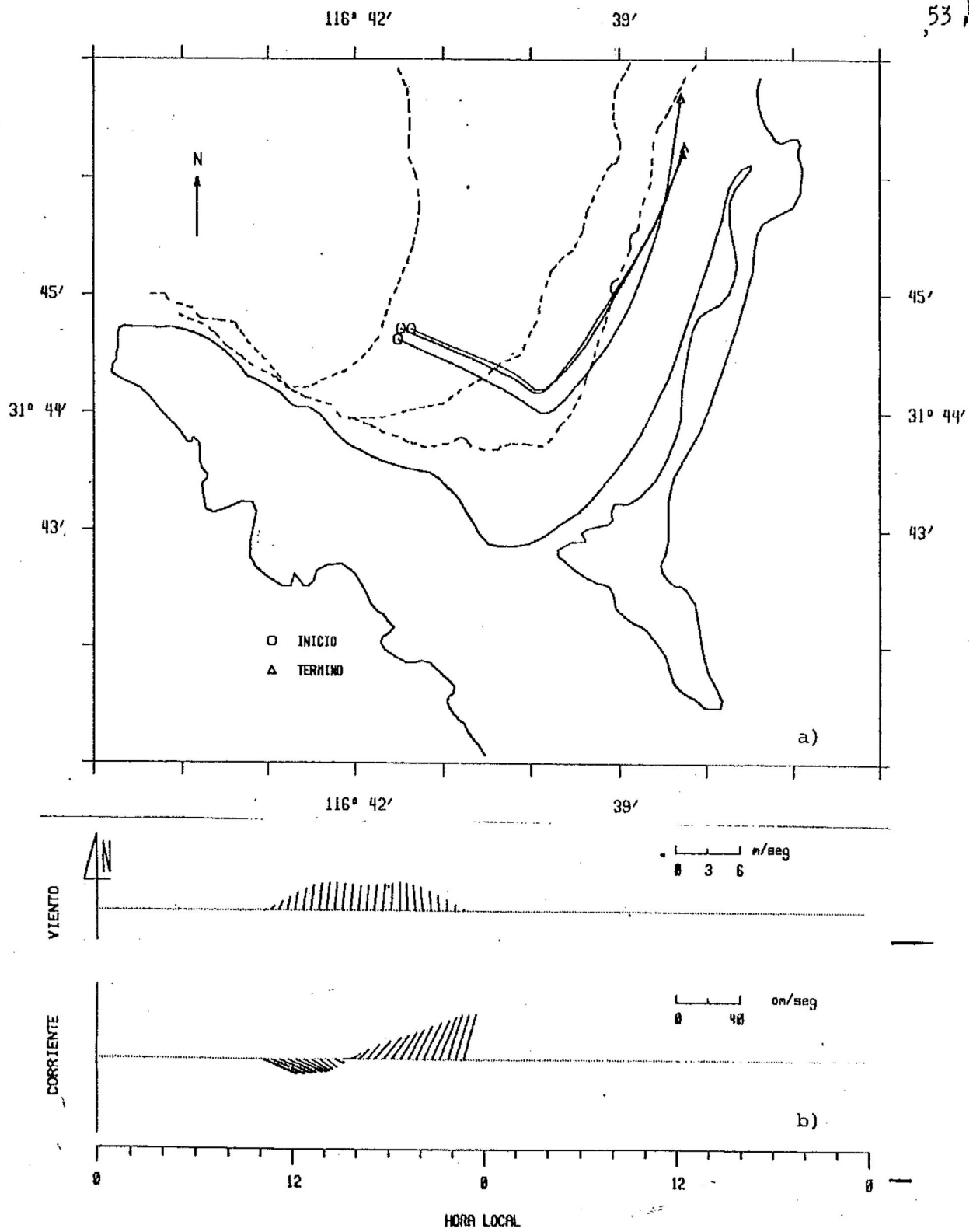


Fig. 9. Experimento del 16 de Julio de 1980. Duración: 12 horas, con 3 flotadores. a) Trayectorias de la corriente. b) Diagramas de velocidad (hacia donde va) del viento y la corriente superficial.

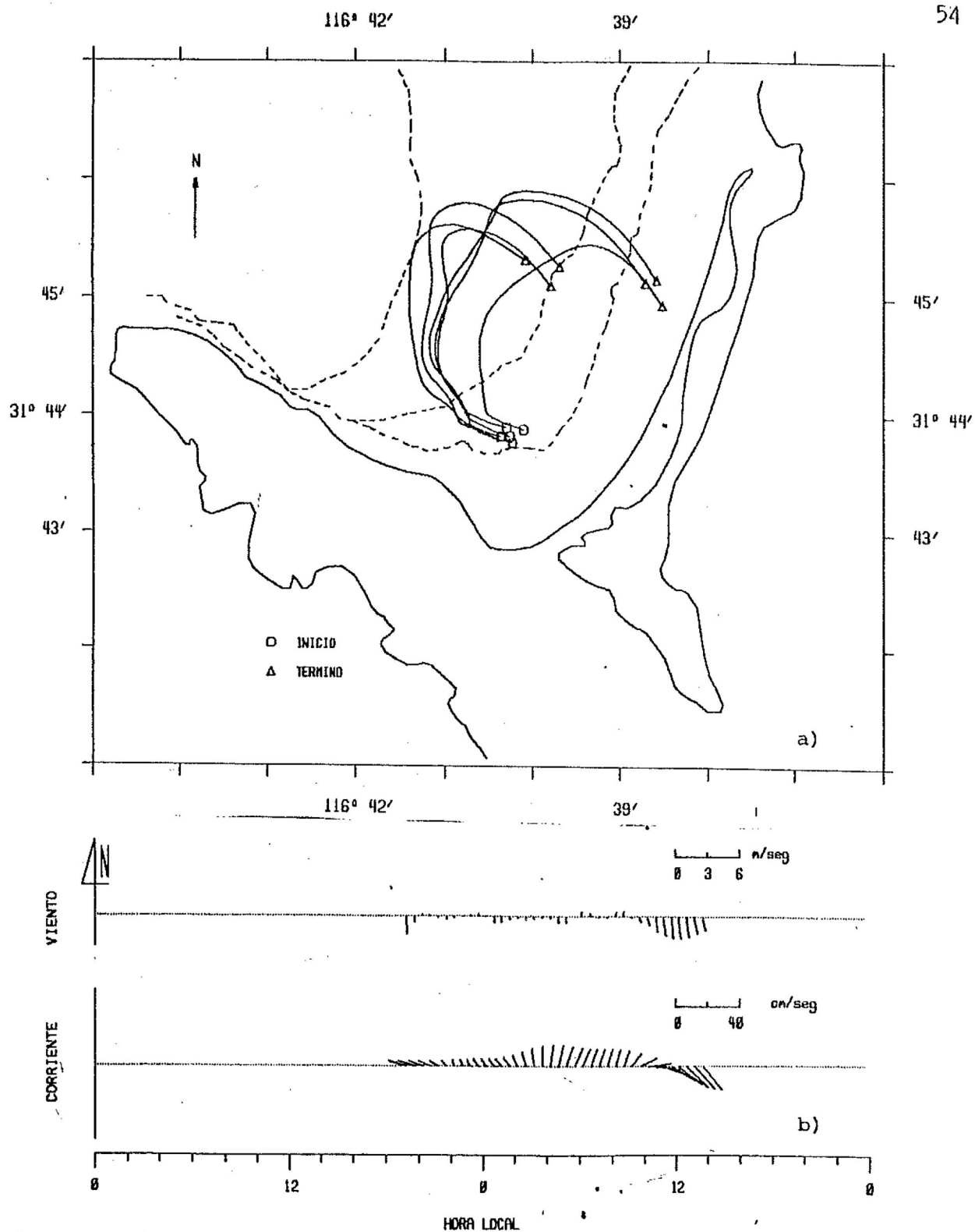


Fig. 10. Experimento del 28-29 de Julio de 1980. Duración: 18 horas, con 6 flotadores. a) Trayectorias de la corriente. b) Diagramas de velocidad (hacia donde va) del viento y la corriente superficial.

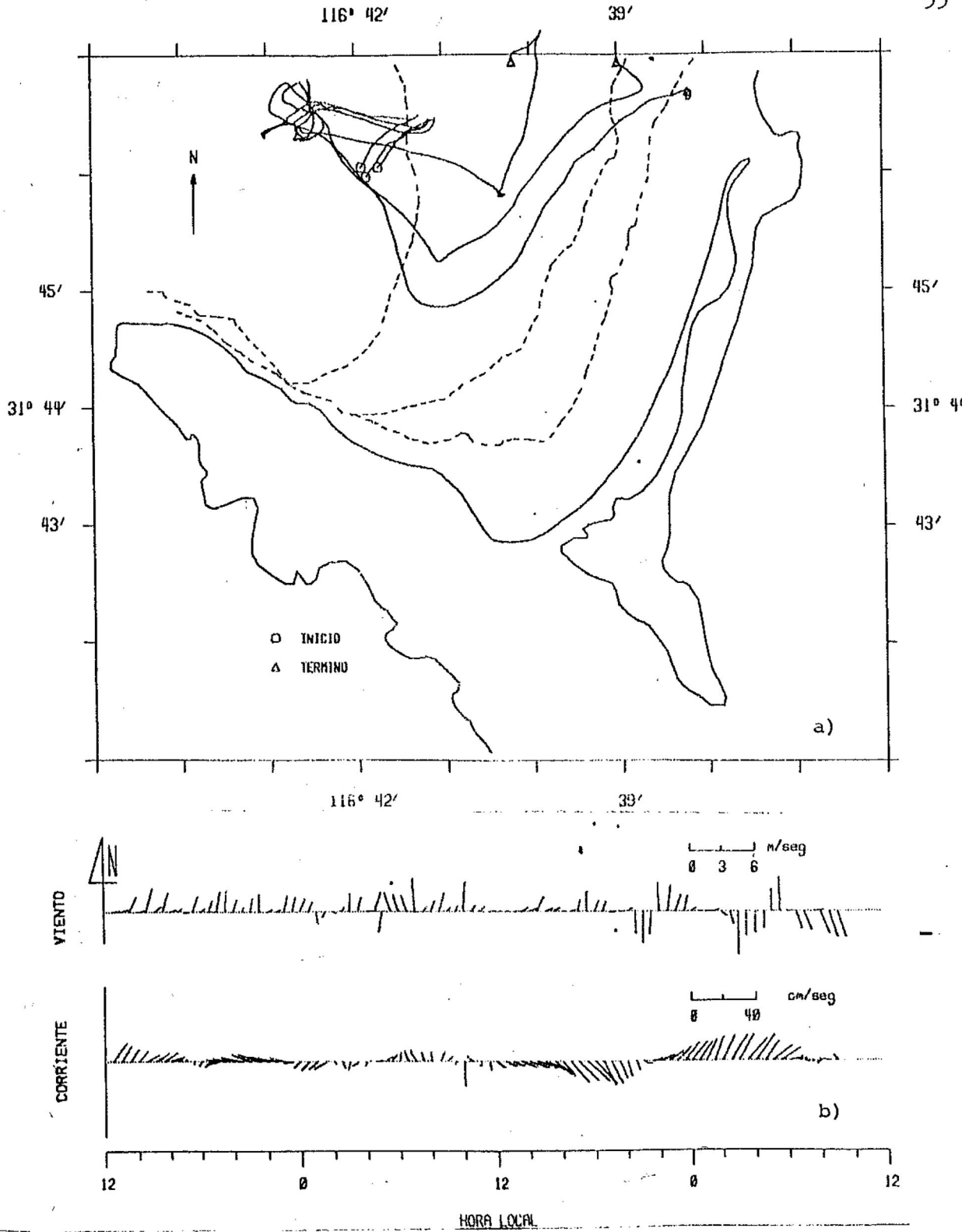


Fig. 11. Experimento del 25-27 de Mayo de 1981. Duración: 48 horas, con 3 flotadores. a) Trayectorias de la corriente. b) Diagramas de velocidad (hacia donde va) del viento y la corriente superficial.

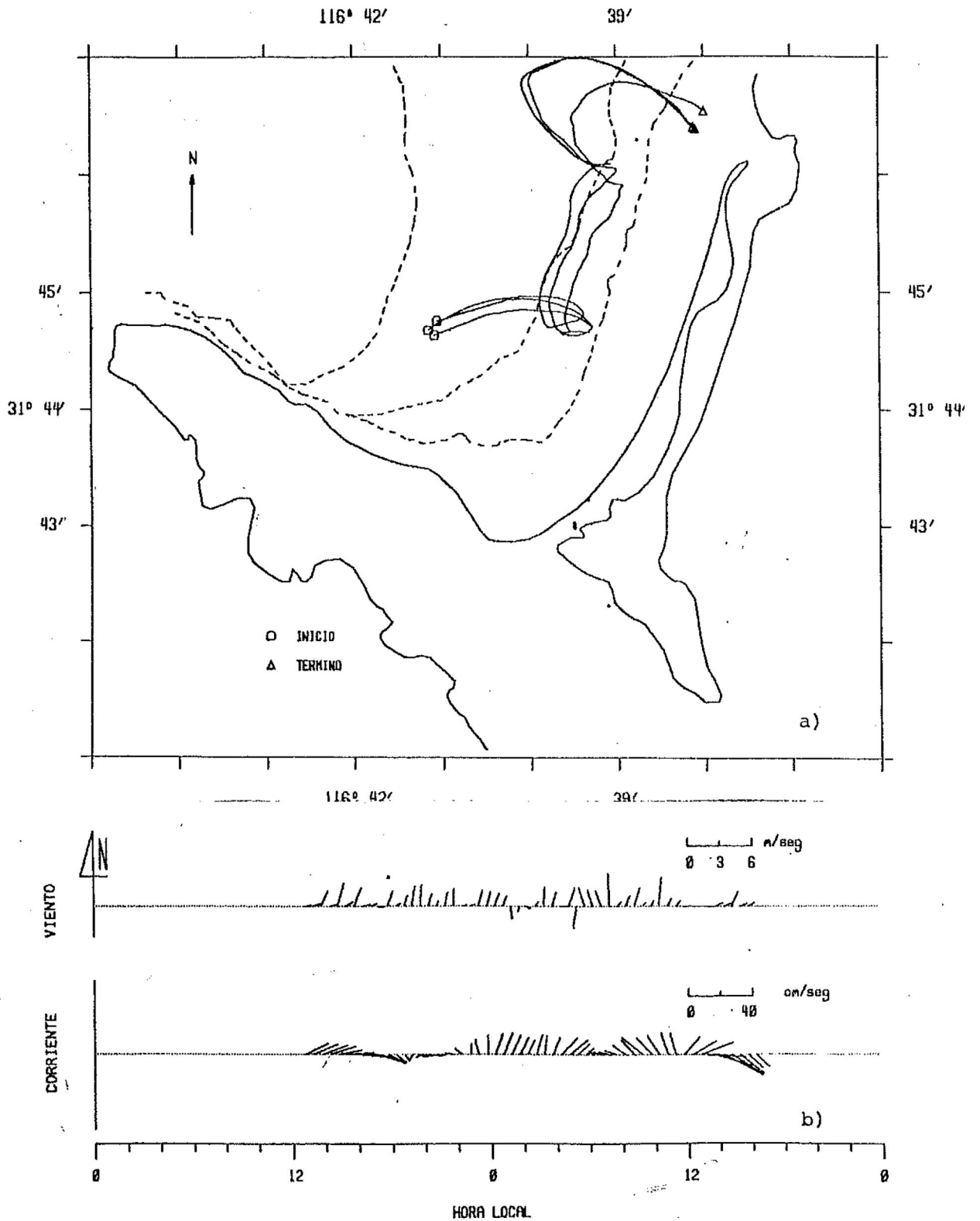


Fig. 12. Experimento del 25-26 de Mayo de 1981. Duración: 26 horas, con 3 flotadores. a) Trayectorias de la corriente. b) Diagramas de velocidad (hacia donde va) del viento y la corriente superficial.

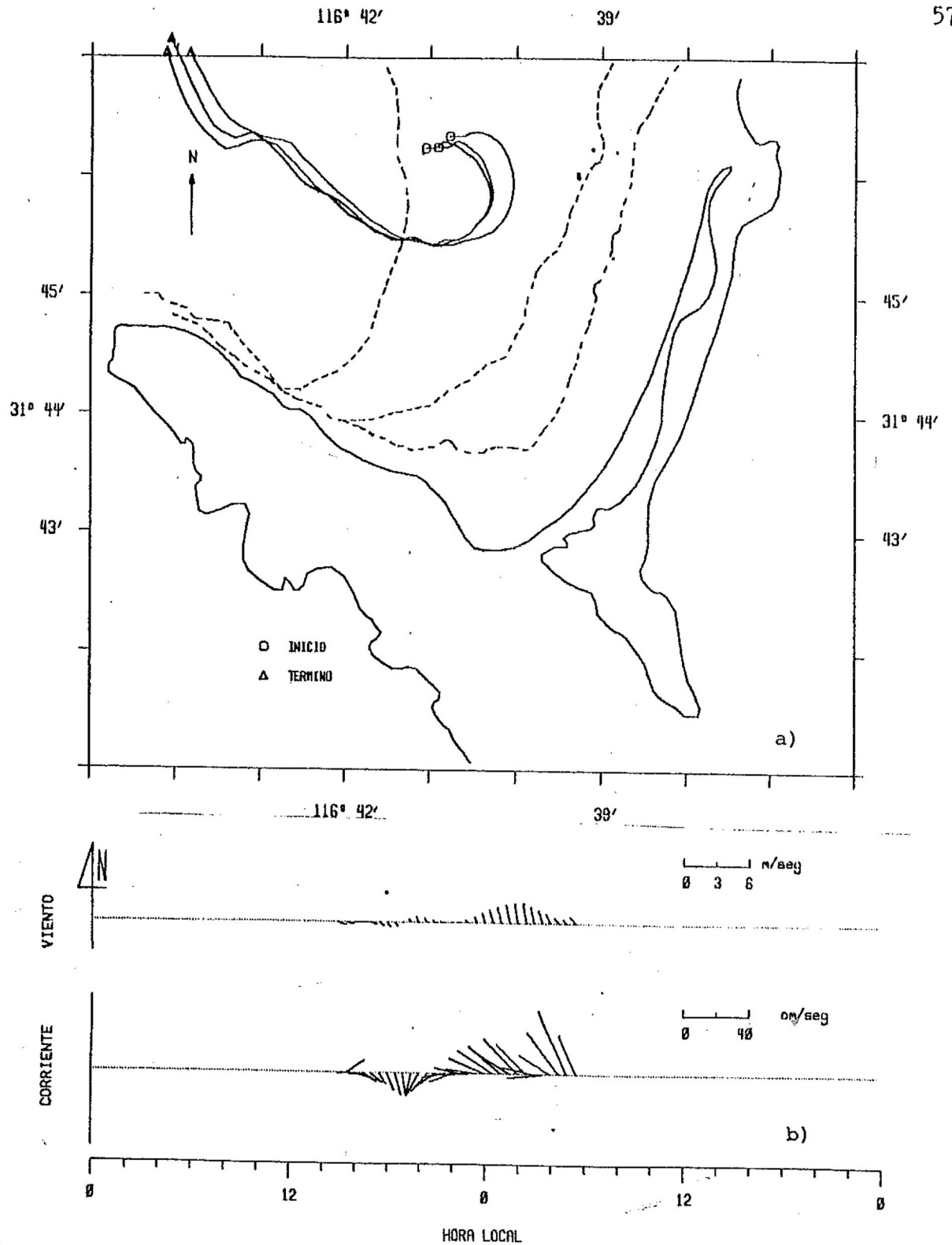


Fig. 13. Experimento del 5-6 de Marzo de 1980. Duración: 15 horas, con 3 flotadores. a) Trayectorias de la corriente. b) Diagramas de velocidad (hacia donde va) del viento y la corriente superficial.

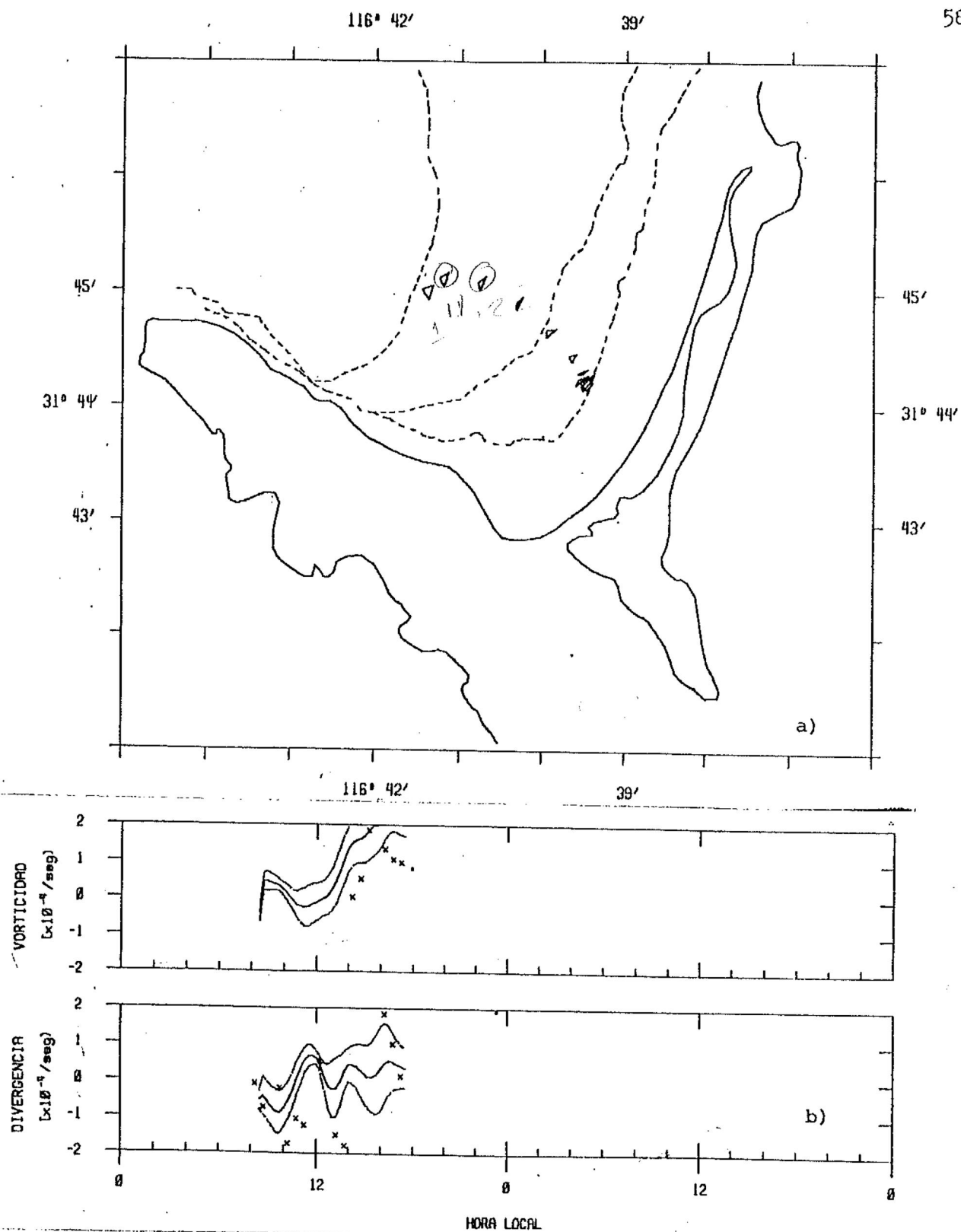


Fig. 14. Experimento del 29 de Junio de 1980. a) Efectos de deformación en el grupo de flotadores. b) Series de tiempo de divergencia y vorticidad (líneas centrales: regresión lineal; líneas exteriores: intervalos de confianza al 80%; cruces: método de áreas).

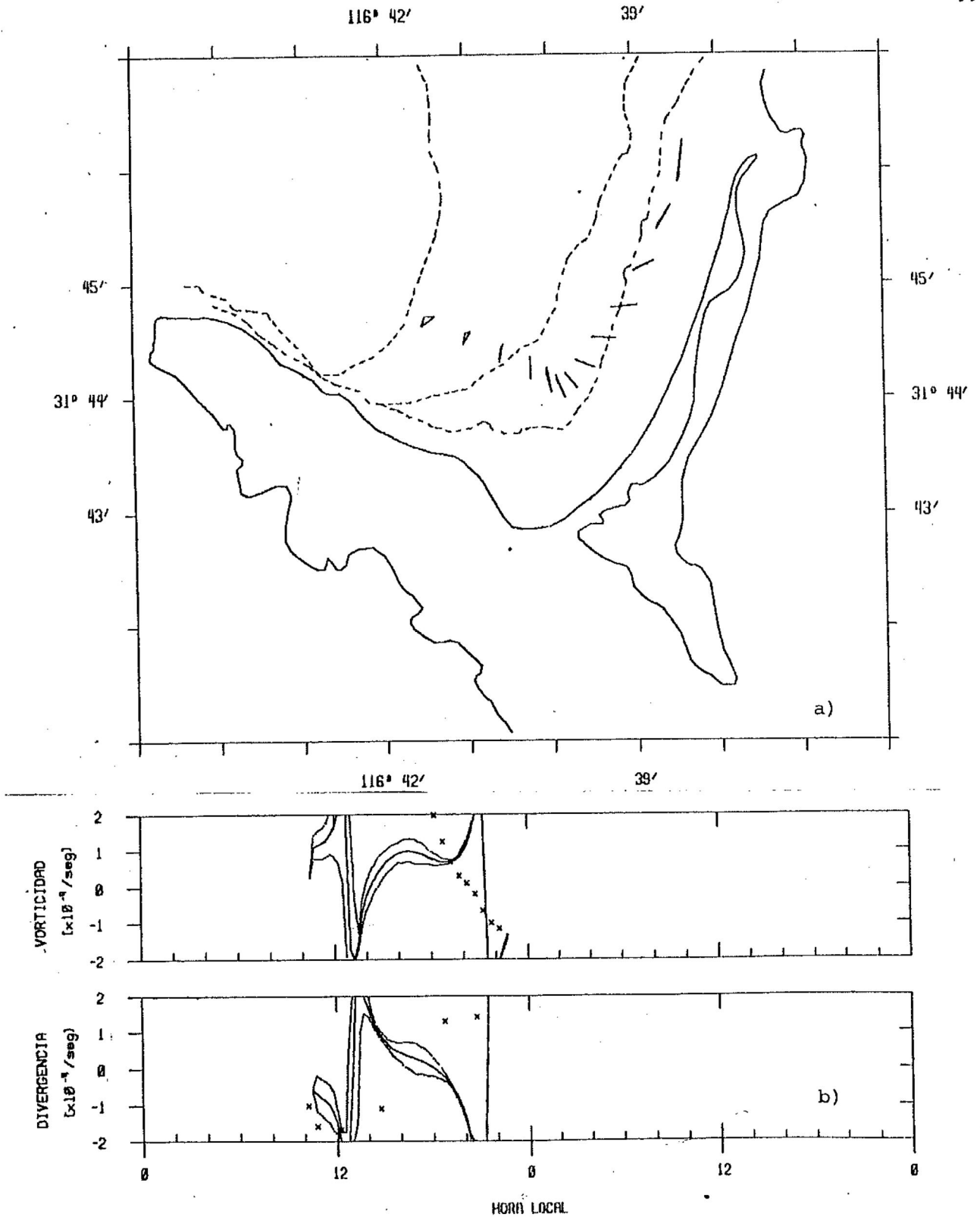


Fig. 15. Experimento del 16 de Julio de 1980 (primera serie).
 a) Efectos de deformación en el grupo de flotadores.
 b) Series de tiempo de divergencia y vorticidad (líneas centrales: regresión lineal; líneas exteriores: intervalos de confianza al 80%; cruces: método de áreas).

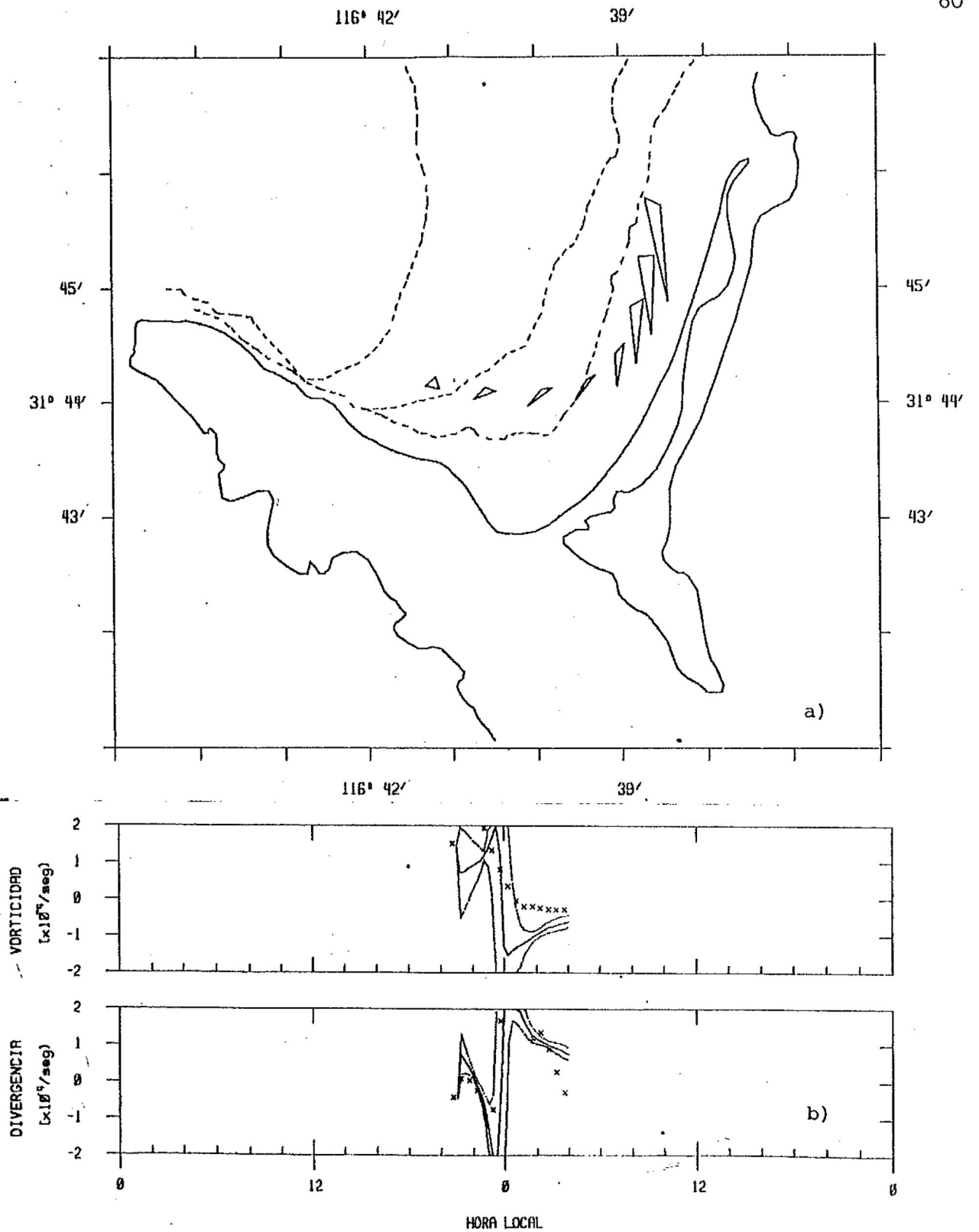


Fig. 16. Experimento del 16 de Julio de 1980 (segunda serie).
 a) Efectos de deformación en el grupo de flotadores.
 b) Series de tiempo de divergencia y vorticidad (líneas centrales: regresión lineal; líneas exteriores: intervalos de confianza al 80%; cruces: método de áreas).

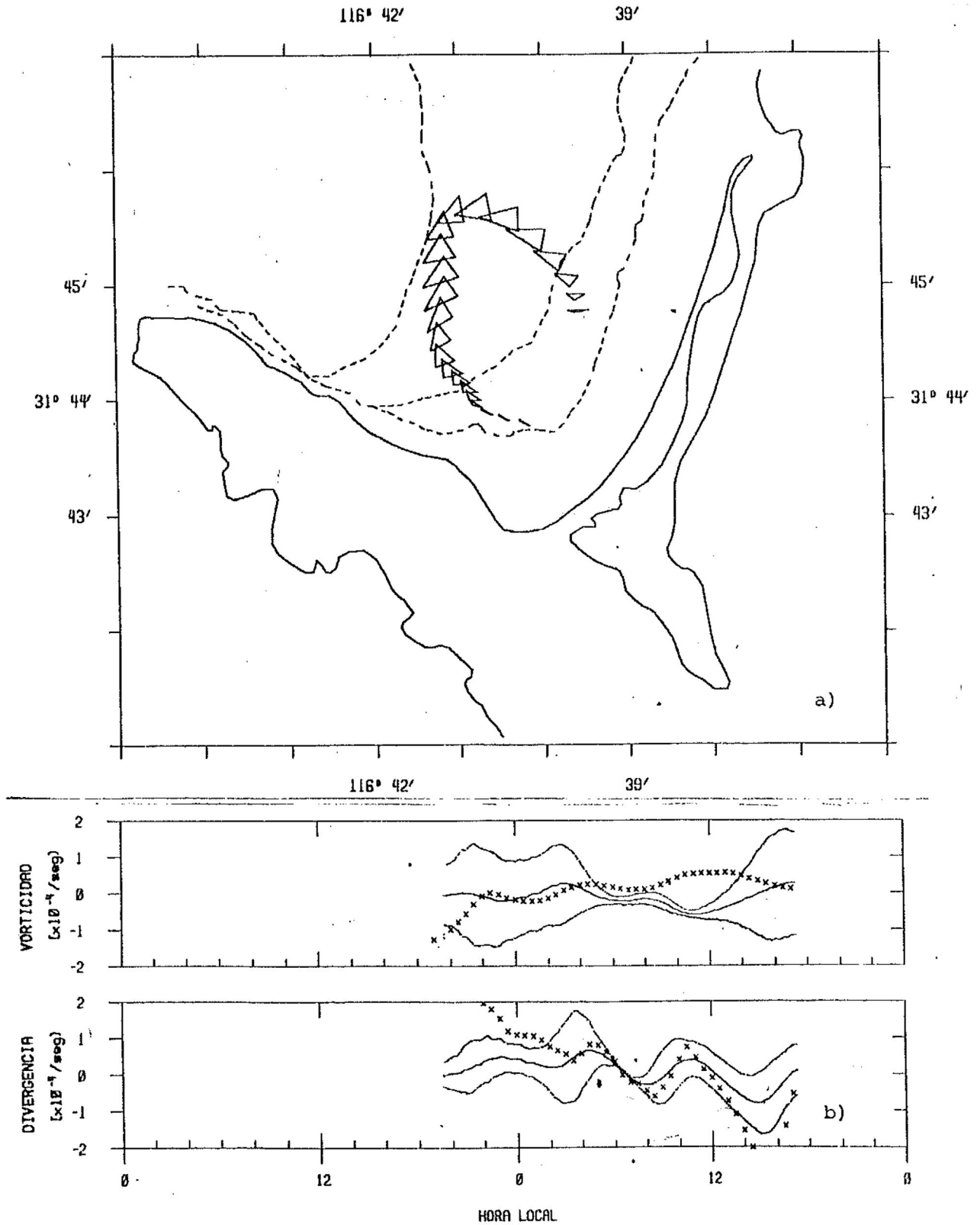


Fig. 17. Experimento del 28-29 de Julio de 1980 (primer subgrupo). a) Efectos de deformación en el grupo de flotadores. b) Series de tiempo de divergencia y vorticidad (líneas centrales: regresión lineal; líneas exteriores: intervalos de confianza al 80%; cruces: método de áreas).

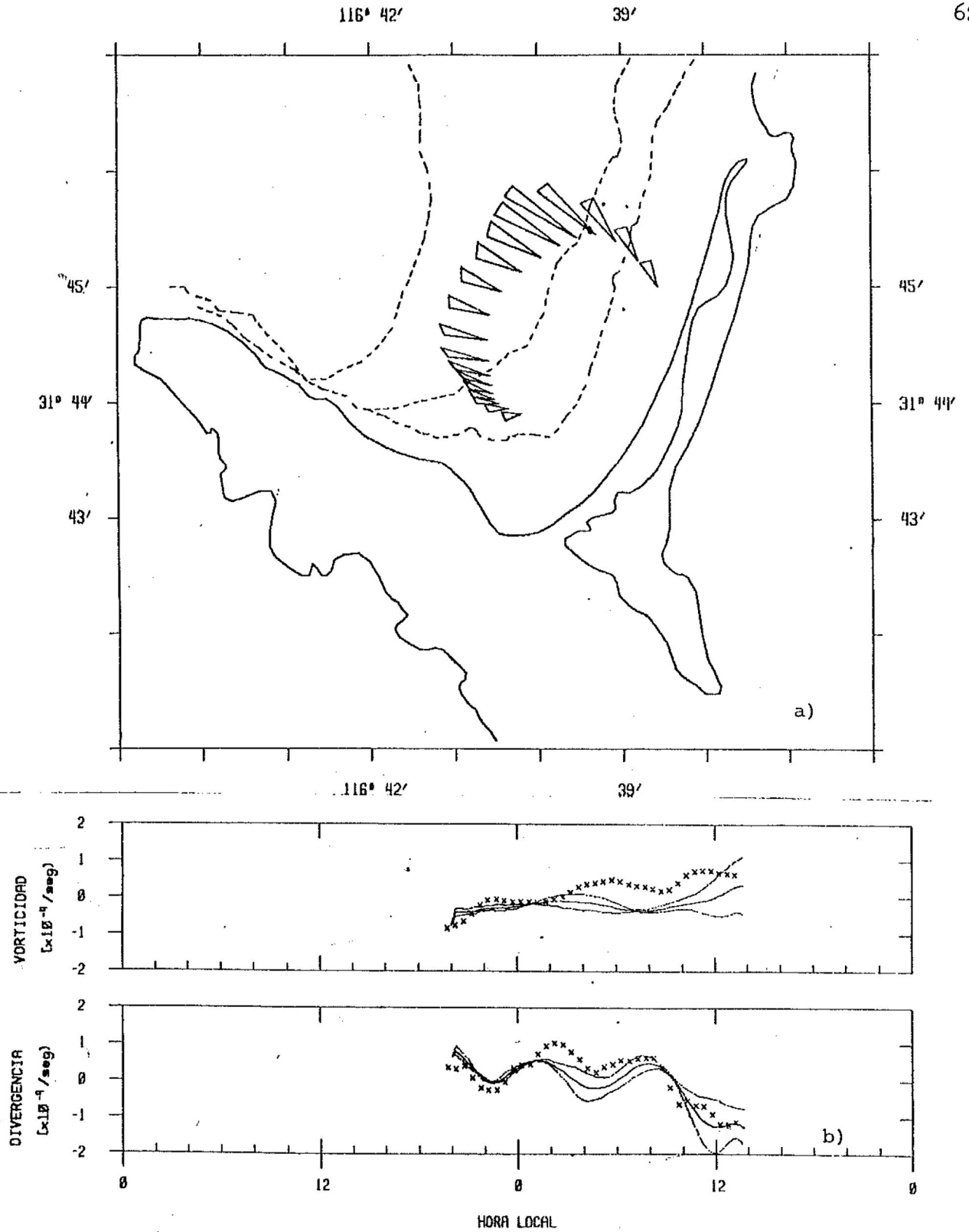


Fig. 18. Experimento del 28-29 de Julio de 1980 (segundo subgrupo). a) Efectos de deformación en el grupo de flotadores. b) Series de tiempo de divergencia y vorticidad (líneas centrales: regresión lineal; líneas exteriores: intervalos de confianza al 80%; cruces: método de áreas).

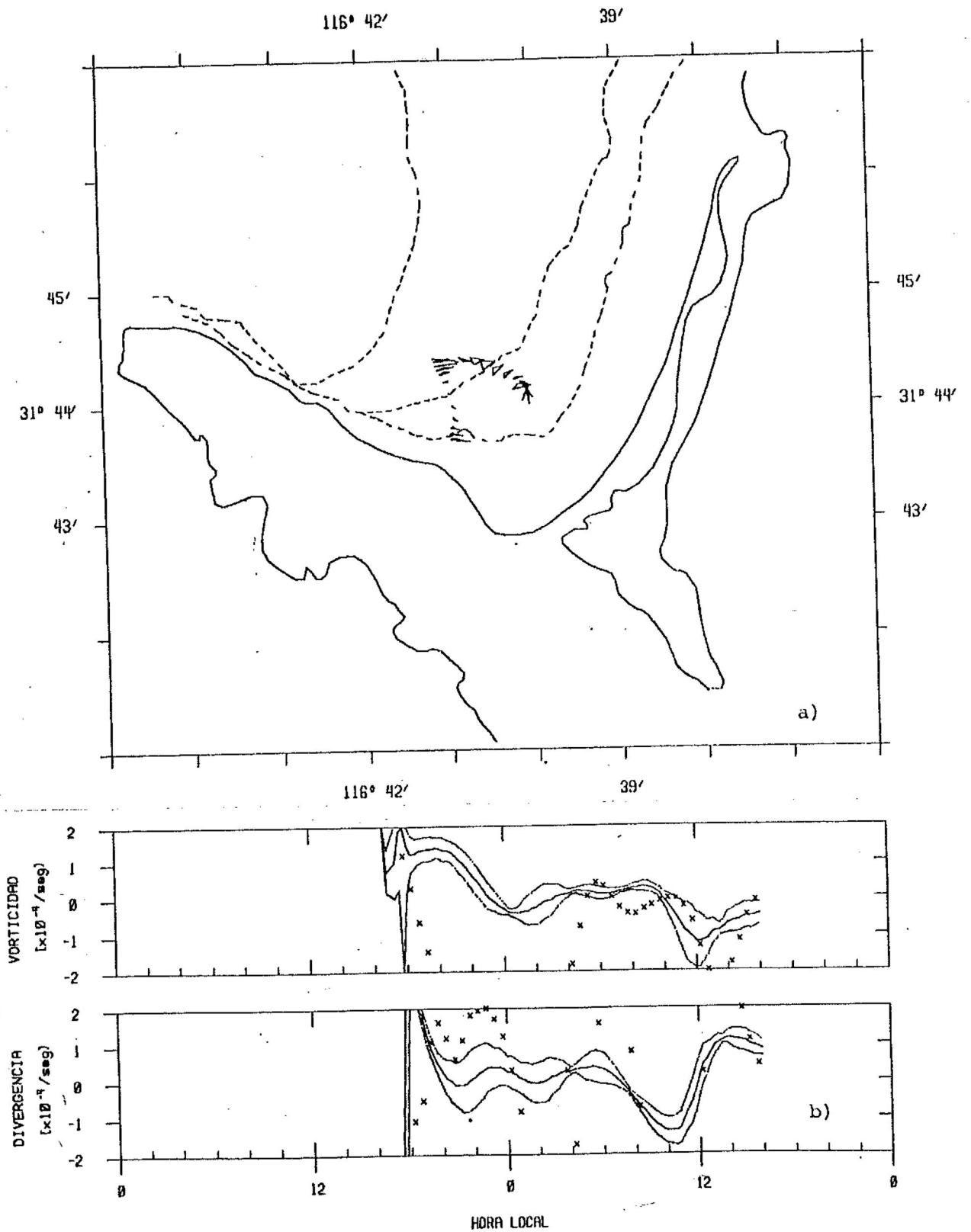


Fig. 19. Experimento del 21-22 de Octubre de 1980. a) Efectos de deformación en el grupo de flotadores. b) Series de tiempo de divergencia y vorticidad (líneas centrales: regresión lineal; líneas exteriores: intervalos de confianza al 80%; cruces: método de áreas).

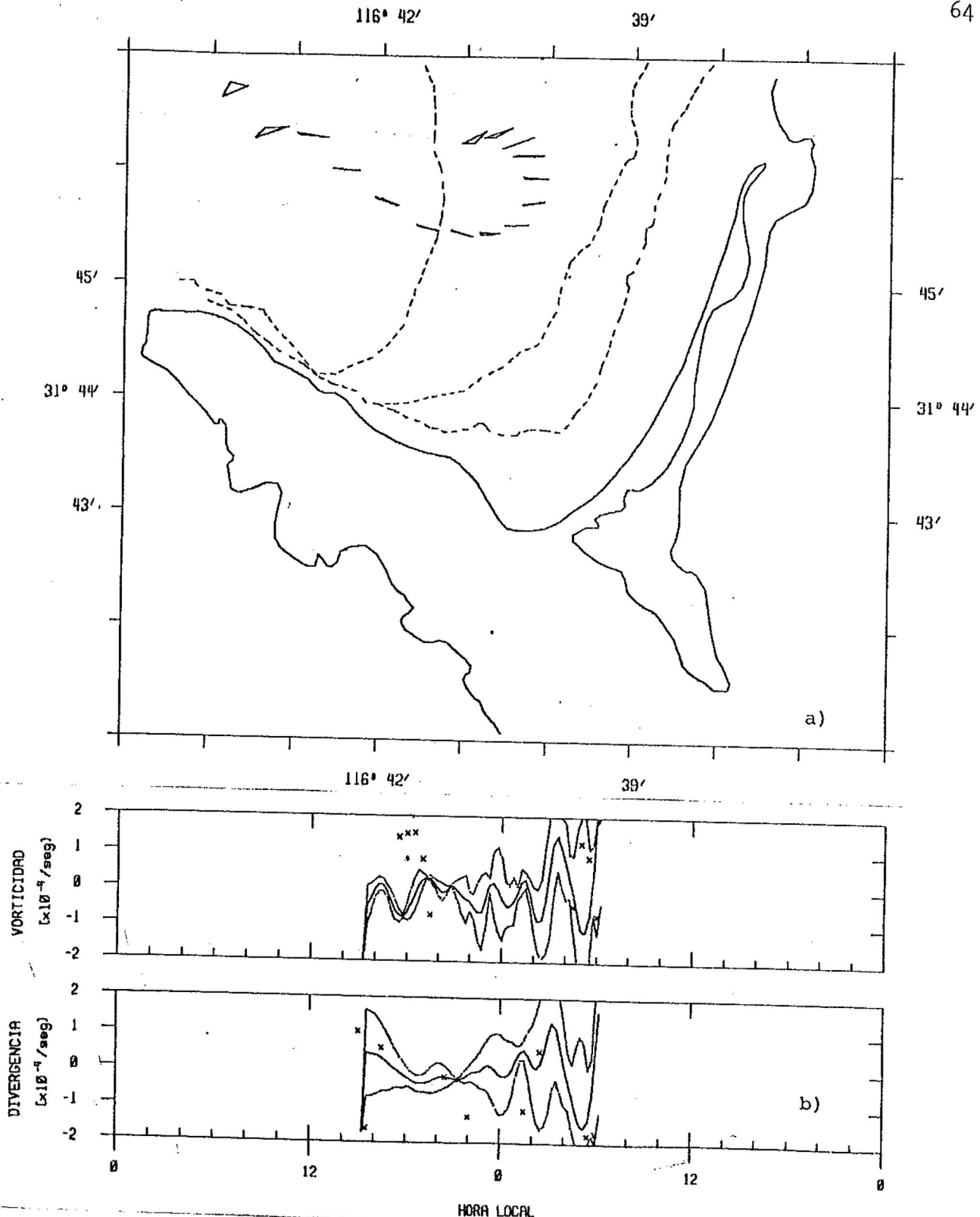


Fig. 20. Experimento del 5-6 de Marzo de 1980. a) Efectos de deformación en el grupo de flotadores. b) Series de tiempo de divergencia y vorticidad (líneas centrales: regresión lineal; líneas exteriores: intervalos de confianza al 80%; cruces: método de áreas).

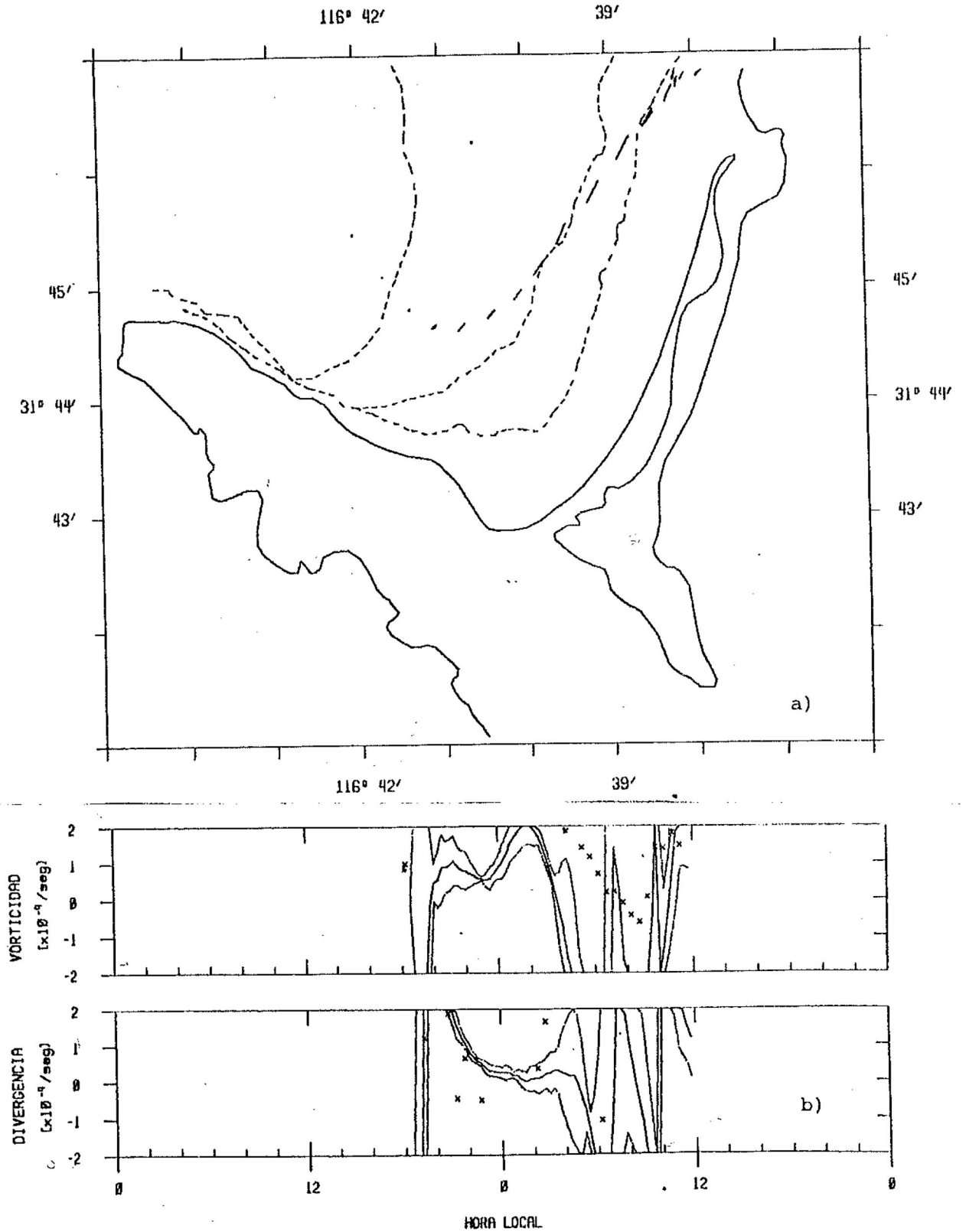


Fig. 21. Experimento del 26-27 de Mayo de 1980. a) Efectos de deformación en el grupo de flotadores. b) Series de tiempo de divergencia y vorticidad (líneas centrales: regresión lineal; líneas exteriores: intervalos de confianza al 80%; cruces: método de áreas).

Fig. 22. Diagramas de marea para los intervalos de medición de los experimentos incluidos. La escala vertical es en metros. Las barras verticales sobre la serie de altura de marea señalan el inicio y final del experimento en cada caso.

- a) 21 de Octubre 1980 (Fig. 4)
- b) 21-22 de Octubre 1980 (Fig. 5)
- c) 23-24 de Enero 1981 (Fig. 6)
- d) 24-26 de Enero 1981 (Fig. 7)
- e) 29 de Junio 1980 (Fig. 8)
- f) 16 de Julio 1980 (Fig. 9)
- g) 28-29 de Julio 1980 (Fig. 10)
- h) 25-27 de Mayo 1981 (Fig. 11)
- i) 25-26 de Mayo 1981 (Fig. 12)
- j) 5-6 de Marzo 1980 (Fig. 13)

