

La estructura interior de las corrientes en el área de Punta Médanos, Argentina

S. A Schmidt y A. Camerlengo

Pueblos Náuticos, S. A.; Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.

Recibido: 4 de julio, 1990; aceptado: 25 de enero, 1991.

RESUMEN

A partir de una serie de mediciones de la distribución vertical de corrientes en el área de Punta Médanos, Argentina, se calcularon las características de la fricción interna. El lugar muestra una batimetría inusual, debido a la presencia de bancos alineados de gran tamaño y otras formas menores superpuestas.

Las velocidades máximas en el área resultaron del orden de los 50 cm/s y en general siguen la alineación de la costa.

Los valores medios de la viscosidad turbulenta $\bar{\nu}_T$ resultan del orden de 350 cm²/s. La rugosidad equivalente r es elevada, alcanzando un valor máximo de 63 cm, magnitud del mismo orden de la deducida por Scott y Csanady (1976). Los valores obtenidos para el coeficiente que linealiza las tensiones de fondo A y el coeficiente de Darcy f son de 0.1 cm/s y 0.03, respectivamente.

Los resultados indican que los bancos actúan sobre la dirección de las corrientes, pero no en la rugosidad del fondo.

PALABRAS CLAVE: Corrientes de marea, bajos alineados, fricción.

ABSTRACT

Following a series of measurements of the vertical distribution of marine currents in the area of Punta Médanos, Argentina, the characteristics of the internal friction have been calculated. The place presents an unusual bathymetry due to the existence of linear sand-banks and other superimposed minor formations.

The maximum velocities in the area are of the order of 50 cm/s and they follow in general the coast line.

Turbulent viscosity mean values $\bar{\nu}_T$ are of the order of 350 cm²/s. The equivalent roughness r is high, reaching a maximum value of 63 cm, same order of magnitude as that deduced by Scott and Csanady (1976). The values obtained for the coefficient that linearizes the bottom shear stresses A and the Darcy coefficient f are 0.1 cm/s and 0.03, respectively.

The results obtained indicate that the banks act upon the currents direction but not on the roughness of the bottom.

KEY WORDS: Tidal currents, linear sand-banks, sand-ridges, friction.

INTRODUCCION

Durante el período comprendido entre los años 1975 y 1982, el Complejo Portuario de Ultramar en Aguas Profundas (COPUAP), organismo dependiente de la Secretaría de Intereses Marítimos de Argentina, llevó a cabo un estudio de factibilidad para la implantación de un puerto de aguas profundas en la zona de Punta Médanos. En el marco de los trabajos de campo, el Servicio de Hidrografía Naval instaló una serie de correntógrafos que en suma llegaron a 100 estaciones para todo el período.

El alto número de estaciones instaladas respondió al reconocimiento de que el área en estudio presenta una gran complejidad batimétrica puesta de manifiesto por una población de bancos alineados ("sand ridges"), que se extiende al sur del Faro Punta Médanos por 120 km.

El régimen hidráulico del área ha sido estudiado por Lanfredi y Schmidt (1978) y Schmidt (1988). Se determinó, con base en el análisis de 90 estaciones de corrientes, que la solución del sistema de circulación requiere más un entendimiento de la estructura vertical de las corrientes que de la correspondiente horizontal. Prueba de ello es la excelente correlación encontrada entre estaciones separadas por kilómetros y la pobre correlación entre otras separadas por 2 ó 3 m, sobre la misma línea de fondeo.

Es escasa la literatura sobre la distribución vertical de las corrientes en zonas de bancos alineados. Lavelle (1982) presentó un resumen estadístico sobre las características de las elipses de corrientes a partir de mediciones no simultáneas, de las cuales dedujo, además, valores del coeficiente de fricción.

En la zona de Punta Médanos, durante el mes de agosto de 1977, se realizaron mediciones de corrientes de duración algo mayor que un período semidiurno de marea y a diferentes profundidades. Además de estas mediciones, se determinaron las alturas horarias de marea en los muelles de Pinamar y Mar de Ajó.

DESARROLLO

Descripción del lugar

La costa atlántica de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, presenta en la zona de Punta Médanos un trazado rectilíneo de norte a sur hasta el Faro Punta Médanos, donde se quiebra con sentido sureste. Al norte de Punta Médanos, la plataforma tiene pendiente suave y contornos rectos y paralelos. La figura 1 muestra el área y la posición de las estaciones de corrientes.

La plataforma interior al sur de Punta Médanos está poblada de bancos alineados, cuya longitud varía de 10 a 35 km. La separación de los mismos oscila entre 3 y 13 km, mientras que sus alturas son de varios metros. Estas formas sedimentarias se encuentran hasta los 20 metros de profundidad y sobre ellas es frecuente observar poblaciones de formas menores, como dunas subacuáticas, cuyas alturas son del orden de 1 m y óndulas de centímetros de amplitud y longitud de onda del orden de 2 m (Parker *et al.*, 1978). Algunas características geométricas de los bancos se presentan en las figuras 2 y 3.

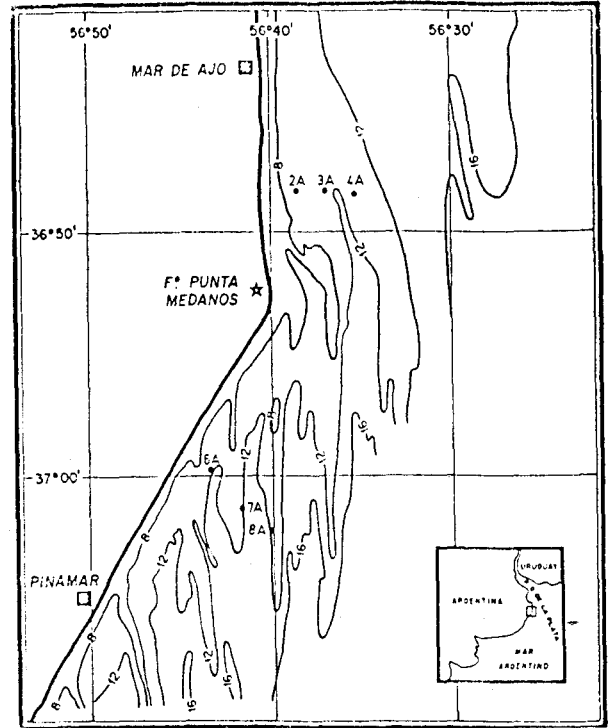


Fig. 1. Baímetría y ubicación de las estaciones de corrientes. Profundidades en metros.

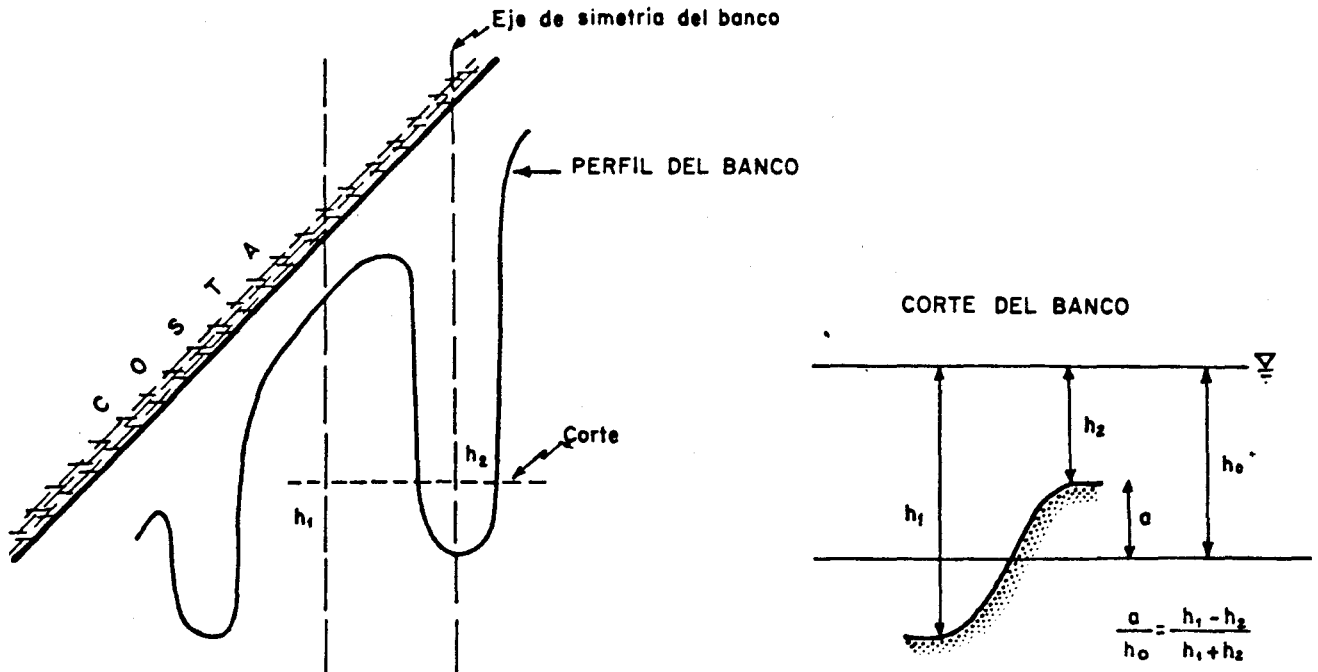
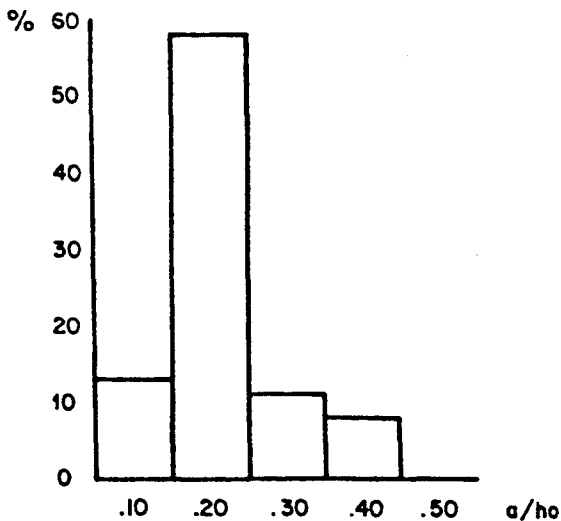


Fig. 2. Características geométricas de los bancos alineados en el área de Punta Médanos. Definición de parámetros. Planta y corte de un banco.

Tabla 1

Características de las estaciones de corrientes

Est.	Fecha	Latitud S	Longitud W	Prof. (m)
2A	16/8/77	36°48'19"	56°38'32"	9.0
3A	17/8/77	36°48'19"	56°36'55"	11.0
4A	17/8/77	36°48'28"	56°35'18"	10.0
6A	20/8/77	36°59'43"	56°43'18"	11.5
7A	20/8/77	37°01'21"	56°41'38"	11.0
8A	19/8/77	37°02'18"	56°40'09"	10.0

Fig. 3. Distribución de a/h_0 para el área de Punta Médanos.Obtención de la información

Mediciones históricas de mareas en la zona (Junod, 1978) indican que la componente dominante es semidiurna y que el nivel del mar es sensible a vientos del sur. Los más fuertes están asociados a frentes fríos cuyo pasaje es predicho con 24 horas de anticipación. Es por ello que las operaciones se realizaron con buen tiempo y los registros a bordo indican que los vientos no superaron la velocidad media horaria mayor de 5 m/s.

Las mediciones se realizaron con un correntómetro KSK, provisto de hélice y de un compás magnético. El error indicado por el fabricante para el módulo de la velocidad es de 1 cm/s, y para la dirección, 2°. La lectura se hizo con un receptor a bordo de la embarcación.

El método de medición consistió en el posicionamiento del instrumento en la profundidad de medición. Allí se esperó hasta la estabilización de los sensores y a continuación se procedió a tomar la lectura. Luego se colocó el correntómetro a la siguiente profundidad, aproximadamente 1 m más abajo, y se repitió el procedimiento hasta llegar al fondo. Todas las mediciones se realizaron desde media profundidad, para evitar la influencia del casco metálico del buque sobre el sensor de dirección. El intervalo entre mediciones a una misma profundidad fue del orden de 30 minutos y el período de observación se extendió más allá de las 12 horas. En general, las observaciones se realizaron en 5 puntos sobre la vertical, a excepción de la Estación 2A, en que sólo fueron 3 las observaciones. La posición de las estaciones y sus características generales se indican en la Tabla 1.

Análisis de la información sobre mareas

A partir de los valores horarios de marea se pueden determinar la amplitud y la fase de la componente dominante (M_2) por medio del Método de Cuadrados Mínimos, suponiendo que la serie se comporta según la expresión que sigue:

$$\eta(t) = \bar{\eta} + \eta_m \cos(\omega t - \alpha_m) \quad (1)$$

donde $\bar{\eta}$ representa el nivel medio del mar, η_m el desplazamiento máximo de la onda respecto del valor medio, $\omega = 2\pi/T$ la frecuencia angular, $T (= 12.4 \text{ h})$ el período de la componente M_2 , t el tiempo y α_m la fase. El error cuadrático medio se define como:

$$\bar{\xi}_m^2 = N^{-1} \sum_{i=1}^N [\eta(t_i) - \bar{\eta} - \eta_m \cos(\omega t_i - \alpha_m)]^2 \quad (2)$$

donde N es el número de datos a analizar. Los valores desconocidos $\bar{\eta}$, η_m y α_m se obtienen minimizando el error cuadrático medio de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \bar{\xi}_m^2}{\partial \bar{\eta}} = 0; \quad \frac{\partial \bar{\xi}_m^2}{\partial \eta_m} = 0; \quad \frac{\partial \bar{\xi}_m^2}{\partial \alpha_m} = 0 \quad (3)$$

que representa un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas. El ajuste a la serie original es:

$$\xi_{m m} = \left(\bar{\xi}_m^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

La aplicación del método a las series de alturas horarias de marea suministró información cuyo resumen se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2

Características de la marea para el período de medición

Lugar	Fecha	η_m (cm)	ξ_{mm} (cm)	α_m (°)	Estación Asociada
Mar de Ajó	16/8/77	48	2.1	278	2A
Mar de Ajó	17/8/77	33	1.5	248	3A
Mar de Ajó	17/8/77	49	7.4	133	4A
Pinamar	20/8/77	36	0.2	59	6A
Pinamar	20/8/77	37	1.2	132	7A
Pinamar	19/8/77	42	4.4	232	8A

Las corrientes

El análisis preliminar de los datos de corrientes mostró claramente que la componente semidiurna es dominante del mismo modo que lo es en la marea. A modo de ilustración, la Tabla 3 muestra las series de velocidad y dirección versus tiempo, a distintas profundidades, para la Estación 4A, las alturas de marea y el viento correspondiente.

Las corrientes en el área son de carácter rotatorio, definiendo una elipse a lo largo de un ciclo de marea. Las elipses son varias para cada estación, pues se han realizado observaciones a distintas profundidades. La determinación de las características de cada elipse, así como su orientación y valor de sus semiejes, son el objeto del análisis que se describe a continuación.

Tabla 3

Valores de velocidad y dirección de la corriente medida en la Estación 4A, altura de marea y velocidad y dirección del viento durante la medición. La velocidad de la corriente V está en cm/s, la dirección D en grados desde el norte y en sentido horario; la altura de la marea en cm y la velocidad del viento VV en m/s, y la dirección DD por sector.

Hora	Corriente										Marea η	Viento	
	$z/h = 0.4$		$z/h = 0.3$		$z/h = 0.2$		$z/h = 0.1$		$z/h = 0.05$			VV	DD
	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D			
17.0	21	70	11	325	25	315	18	60	12	105	67	5	S
17.5	22	25	26	335	24	0	20	60	19	105	76		
18.0	23	340	40	340	23	40	22	95	26	330	85		
18.5	25	340	38	345	26	40	22	340	26	0	95		
19.0	27	340	37	345	30	40	22	340	26	10	106	5	S
19.5	33	0	36	5	33	0	25	0	27	12	118		
20.0	38	25	36	30	36	320	28	25	28	15	130		
20.5	37	12	35	35	32	320	31	10	30	15	135		
21.0	37	0	34	35	27	320	35	350	32	15	140	4.5	S
21.5	30	12	31	30	28	320	31	5	28	0	132		
22.0	22	25	32	30	30	320	27	20	24	340	125		
22.5	21	25	25	15	23	330	21	20	19	335	115		
23.0	20	290	14	0	16	340	16	300	14	330	105	3	S
23.5	15	290	13	270	14	185	13	160	12	330	105		
24.0	10	290	12	270	13	185	10	160	9	100	105		
0.5	12	180	14	175	15	185	11	165	9	100	102		
1.0	15	180	16	175	18	170	12	170	10	170	100		calma
1.5	26	177	24	175	25	167	19	170	15	170	85		
2.0	36	175	32	175	32	165	26	170	20	165	70		
2.5	38	175	35	175	35	167	28	180	21	170	60		
3.0	41	175	39	175	38	170	31	185	22	185	50	2	SW
3.5	38	175	39	175	37	175	29	185	22	170	37		
4.0	36	175	39	175	37	180	28	185	22	160	25		
4.5	34	175	36	180	34	185	25	185	21	180	17		
5.0	33	175	32	185	32	190	22	185	20	195	10	5	SW

Nota: a) La hora indicada corresponde a la hora central del intervalo entre dos mediciones en el mismo lugar.

b) Durante las 12 horas anteriores a la primera medición (17 hs) el viento fue del W a 2 m/s de velocidad promedio, luego del S, alcanzando los 5 m/s.

Llamando $u(t)$ y $v(t)$ a las componentes este-oeste y norte-sur respectivamente, de las corrientes medidas y $u'(t)$ y $v'(t)$, a las correspondientes sobre otro sistema coordinado girado un ángulo θ a partir del norte y en dirección horaria, como indica la figura 4, se puede escribir:

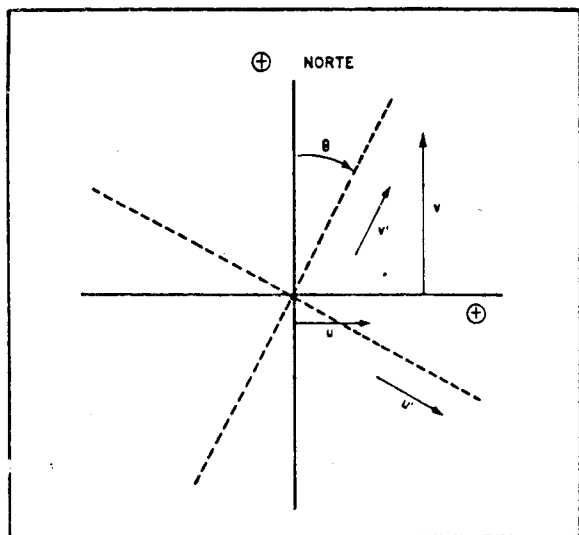


Fig. 4. Convención de coordenadas y nomenclatura.

$$u(t) = \bar{u} + A_u \sin(\omega t) + B_u \cos(\omega t) \quad (5)$$

$$v(t) = \bar{v} + A_v \sin(\omega t) + B_v \cos(\omega t) \quad (6)$$

donde \bar{u} y \bar{v} son las velocidades medias y A_u, B_u, A_v y B_v son los coeficientes armónicos a determinar. Considerando la componente $u(t)$ solamente, ya que el procedimiento es el mismo para las dos, el error cuadrático medio se define:

$$\bar{\xi}_u^2 = N^{-1} \sum_{i=1}^N [u(t_i) - \bar{u} - A_u \sin(\omega t_i) - B_u \cos(\omega t_i)]^2 \quad (7)$$

que es mínimo si

$$\frac{\partial \bar{\xi}_u^2}{\partial \bar{u}} = 0; \quad \frac{\partial \bar{\xi}_u^2}{\partial A_u} = 0; \quad \frac{\partial \bar{\xi}_u^2}{\partial B_u} = 0 \quad (8)$$

Estas expresiones definen un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas \bar{u}, A_u y B_u . El error debido al ajuste es:

$$\xi_{uu} = (\bar{\xi}_u^2)^{1/2} \quad (9)$$

A partir de la información anterior, las componentes sobre el nuevo sistema resultan:

$$u'(t) = u(t) \cos(\theta) - v(t) \sin(\theta) \quad (10)$$

$$v'(t) = u(t) \sin(\theta) + v(t) \cos(\theta) \quad (11)$$

y operando

$$u'(t) = A'_u \sin(\omega t) + B'_u \cos(\omega t) \quad (12)$$

$$v'(t) = A'_v \sin(\omega t) + B'_v \cos(\omega t) \quad (13)$$

que representan una nueva serie donde los coeficientes armónicos son:

$$A'_u = A_u \cos(\theta) - A_v \sin(\theta) \quad (14)$$

$$B'_u = B_u \cos(\theta) - B_v \sin(\theta) \quad (15)$$

$$A'_v = A_u \sin(\theta) + A_v \cos(\theta) \quad (16)$$

$$B'_v = B_u \sin(\theta) + B_v \cos(\theta) \quad (17)$$

Para determinar el valor del ángulo θ que forma el norte con el eje mayor de la elipse, se utiliza el hecho de que el producto de una componente multiplicada por sí misma, desplazada $\pi/2$ y promediada en un ciclo de marea es igual a cero:

$$\overline{u'(t, \theta) u'(t, \theta + \pi/2)} = 0 \quad (18)$$

donde la barra indica el promedio temporal. Operando y resolviendo para θ , se obtiene la siguiente expresión:

$$\theta = 0.5 \tan^{-1} \left[2(A_u A_v + B_u B_v) / (A_v^2 + B_v^2 - A_u^2 - B_u^2) \right] \quad (19)$$

Reemplazando θ en las expresiones para las componentes $u'(t)$ y $v'(t)$ y operando,

$$u'(t) = C_u \cos(\omega t - \alpha_u) \quad (20)$$

$$v'(t) = C_v \sin(\omega t - \alpha_v) \quad (21)$$

donde C_u y C_v son los semiejes de la elipse, y α_u y α_v las fases correspondientes que resultan,

$$C_u = (A_u^2 + B_u^2)^{1/2} \quad (22)$$

$$C_v = (A_v^2 + B_v^2)^{1/2} \quad (23)$$

$$\alpha_u = \tan^{-1}(B'_u / A'_u) \quad (24)$$

$$\alpha_v = \tan^{-1}(B'_v / A'_v) \quad (25)$$

El ángulo θ maximiza o minimiza las ecuaciones (22) y (23) definiendo de este modo la elipse.

Los resultados del análisis de las 29 series de tiempo se presentan en la Tabla 4. Como ilustración, la Estación 4A al nivel $z/h = 0.4$, esto es, a 4 m del fondo del mar, tiene las características que siguen: la dirección del eje mayor de

Tabla 4

Resultado del análisis de las corrientes para cada estación y profundidad relativa z/h . Fondo del mar: $z = 0$.

Est.	z/h	θ (°)	C_v	C_u (cm/s)	ξ_{vv}	α_v	$\bar{\theta}$	S_θ (°)	$\bar{\alpha}_v$	S_α
2A	0.33	5	50	3	4.8	264	9	4	260	5
	0.22	12	52	6	6.1	260				
	0.11	10	45	9	5.6	255				
3A	0.46	348	15	1	0.7	214	354	5	215	6
	0.36	351	18	5	2.3	221				
	0.27	358	16	3	0.3	215				
	0.18	1	17	1	0.3	205				
	0.09	353	16	1	3.3	219				
4A	0.40	0	38	3	3.5	101	359	7	100	4
	0.30	6	39	4	4.0	98				
	0.20	348	35	4	1.3	97				
	0.10	4	30	3	1.8	101				
	0.05	358	27	2	1.9	106				
6A	0.48	2	17	3	0.4	43	16	18	28	13
	0.39	9	16	2	0.5	26				
	0.30	5	18	3	0.5	34				
	0.22	4	18	1	1.4	27				
	0.13	40	14	3	2.7	5				
	0.04	37	10	4	3.1	34				
7A	0.46	354	19	5	2.2	67	3	13	61	16
	0.36	11	19	1	3.7	76				
	0.27	14	13	4	2.6	65				
	0.18	10	13	4	3.0	62				
	0.09	344	15	3	0.5	33				
8A	0.40	14	28	7	3.1	219	30	18	218	14
	0.30	21	22	5	4.2	231				
	0.20	23	24	1	4.1	223				
	0.10	60	26	11	5.8	224				
	0.05	33	16	5	2.9	194				

Nota: Los valores medios $\bar{\theta}$ y S_θ y los correspondientes desvíos $\bar{\alpha}_v$ y S_α resultan del promedio sobre la vertical de θ y α_v para cada estación.

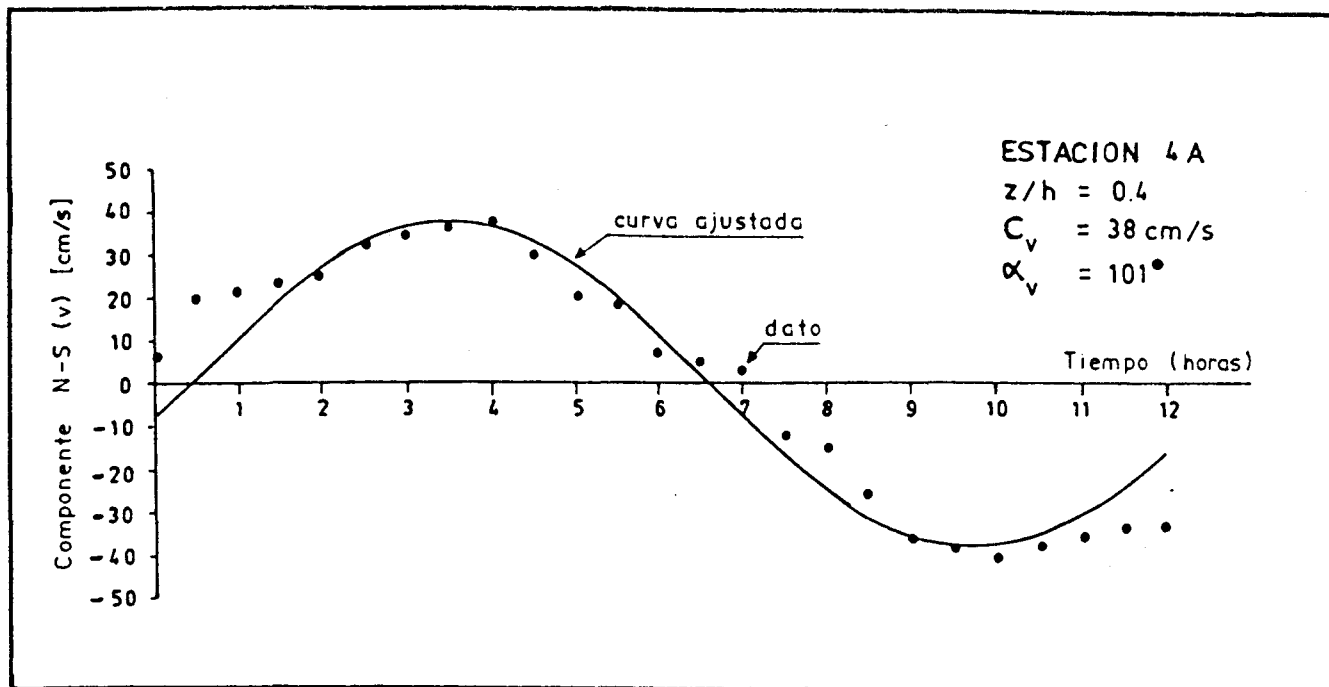


Fig. 5. Ajuste de los datos de la componente norte-sur (para el nivel $z/h = 0.40$) correspondiente a la Estación 4A, a una función armónica de período $T = 12.4$ horas.

la elipse coincide con el norte ($\theta = 0$), y el valor de los semiejes mayor y menor es 38 cm/s y 3 cm/s respectivamente. El error debido al ajuste de los datos a una función armónica de período semidiurno es de 3.5 cm/s y la fase 101° . Además, se han promediado los valores de θ y α_v correspondientes a distintos niveles. Los promedios de θ y α_v , con sus desvíos, son: $\bar{\theta} = 359^\circ$, $S_\theta = 7^\circ$ y $\bar{\alpha}_v = 100^\circ$, $S_\alpha = 4^\circ$. La figura 5 presenta la componente norte-sur calculada y los valores medidos.

La fricción interna

El análisis de cada estación de corrientes ha suministrado valores de la velocidad correspondiente al eje mayor de las elipses C_v , la orientación del mismo θ y la fase α_v , versus la profundidad de medida z/h . Se trata ahora de ajustar una función al perfil de velocidades para estimar las propiedades de la fricción en el lugar, sin el ánimo de describir el campo de velocidades para todo el ciclo de marea. Es decir, que de ese ciclo se toma el momento de máxima velocidad promedio para toda la columna de agua, equivalente a considerar una fase promedio.

Para ello se ha elegido un perfil logarítmico de velocidad cuyos fundamentos son los siguientes (Schlichting, 1979): las tensiones pueden ser expresadas realísticamente por una representación cuadrática,

$$\tau(z) / \rho = \chi^2 z^2 (\partial u_\ell / \partial z)^2 \quad (26)$$

donde τ es la tensión, ρ la densidad del agua, χ la constante de Von Karman, u_ℓ la velocidad en la dirección principal de la elipse y z la distancia desde el fondo.

Considerando que las tensiones son independientes de la profundidad (o sea que el producto $z (\partial u_\ell / \partial z)$ es constante) e integrando, se obtiene el siguiente perfil de velocidad:

$$u_\ell(z) = u_* \chi^{-1} \text{Ln} [z/z_0] \quad (27)$$

donde $u_* = (\tau_b / \rho)^{1/2}$ es la velocidad de fricción, τ_b la tensión y z_0 el lugar donde la velocidad es considerada nula, $u_\ell(z_0) = 0$. En general, z_0 se vincula al tamaño de los sedimentos y se relaciona con la rugosidad equivalente de Nikuradse, r , de la siguiente manera:

$$r = 30 z_0 \quad (28)$$

donde r depende de las características de las formas del fondo como su amplitud y longitud de onda.

La velocidad promediada sobre la profundidad h resulta

$$\bar{u}_\ell = u_* \chi^{-1} [\text{Ln} (h/z_0) - 1] \quad (29)$$

y la velocidad máxima $u_{\ell \max}$ ($z = h$) es:

$$u_{\ell \max} = u_* \chi^{-1} \text{Ln} [h/z_0] \quad (30)$$

La representación de las tensiones admite su linealización a partir de la viscosidad turbulenta, ν_T

$$\tau/\rho = \nu_T \partial u_\rho / \partial z \quad (31)$$

que combinada con las ecuaciones anteriores conduce a una estimación de la distribución vertical de la viscosidad,

$$\nu_T = \chi u_* z \quad (32)$$

cuyo promedio en la profundidad h resulta

$$\bar{\nu}_T = \chi u_* h/2 \quad (33)$$

Los valores de u_* y z_o en la Ecuación (27) pueden calcularse por cuadrados mínimos a partir de las velocidades máximas $C_v(z)$, indicados en la Tabla 4. Definiendo el error cuadrático medio como

$$\bar{\xi}_\rho^2 = N^{-1} \sum_{i=1}^N [C_v(z_i) - u_* \chi^{-1} \text{Ln}[z_i/z_o]]^2 \quad (34)$$

que será mínimo si

$$\partial \bar{\xi}_\rho^2 / \partial u_* = 0 \quad ; \quad \partial \bar{\xi}_\rho^2 / \partial z_o = 0 \quad (35)$$

El error del ajuste a la serie original es:

$$\xi_{\rho\ell} = \left(\bar{\xi}_\rho^2 \right)^{1/2} \quad (36)$$

Los valores de u_* y z_o obtenidos, así como el error $\xi_{\rho\ell}$ se incluyen en la Tabla 5. A continuación se calcularon los valores de $\bar{\nu}_T$, r , \bar{u}_ρ y $u_{\rho \max}$ presentados en la misma tabla.

Extensión de los resultados

Es conveniente, en el tratamiento de la circulación costera, el uso de las ecuaciones de movimiento integradas verticalmente. Las mismas contienen términos de fricción que en su expresión lineal y alineal requieren ciertos coeficientes cuya magnitud es desconocida en general.

Las tensiones pueden representarse como sigue:

$$\tau_b/\rho = A \bar{u}_\rho \quad (\text{lineal}) \quad (37)$$

$$\tau_b/\rho = f \bar{u}_\rho | \bar{u}_\rho | / 8 \quad (\text{alineal}) \quad (38)$$

donde A es el factor que linealiza la fricción y f el coeficiente de Darcy.

A partir de las ecuaciones (29) y (37) se obtiene una expresión para A ,

$$A = u_* \chi / [\text{Ln}(h/z_o) - 1] \quad (39)$$

y de las ecuaciones (18) y (26) una expresión para f ,

$$f = 8 \chi^2 / [\text{Ln}(h/z_o) - 1]^2 \quad (40)$$

cuyos valores numéricos se muestran en la Tabla 5. La figura 8 ilustra el resultado del ajuste de un perfil logarítmico a los datos de corrientes observados en la Estación 4A.

Tabla 5

Características de la fricción

Est.	ξ_{11} (cm/s)	u_*	z_o (cm)	$\bar{\nu}_T$ (cm ² /s)	r (cm)	\bar{u}_ρ	$u_{\rho \max}$ (cm/s)	A	f
2A	1.9	2.3	0.04	414	1.2	52	58	0.100	0.015
4A	0.8	2.2	0.38	440	11.4	38	43	0.127	0.027
6A	1.5	1.2	1.18	276	35.4	18	21	0.084	0.039
7A	2.1	1.3	2.10	286	63.0	17	20	0.098	0.045
8A	2.7	1.6	0.42	320	12.6	27	31	0.097	0.030

Nota: se ha excluido la estación 3A debido a la escasa variación de la velocidad con la vertical por lo menos hasta la profundidad máxima medida.

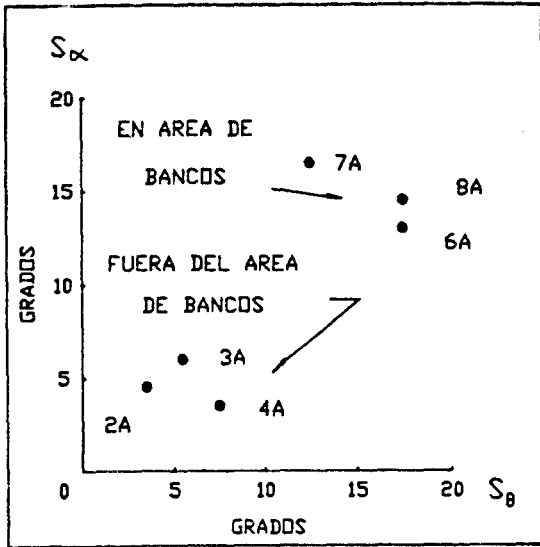


Fig. 6. Desvíos standard de la fase (α_v) de corrientes S_α , versus el correspondiente del ángulo (θ) de la dirección del eje mayor de la elipse de corrientes S_θ , para las estaciones en el área de Punta Médanos.

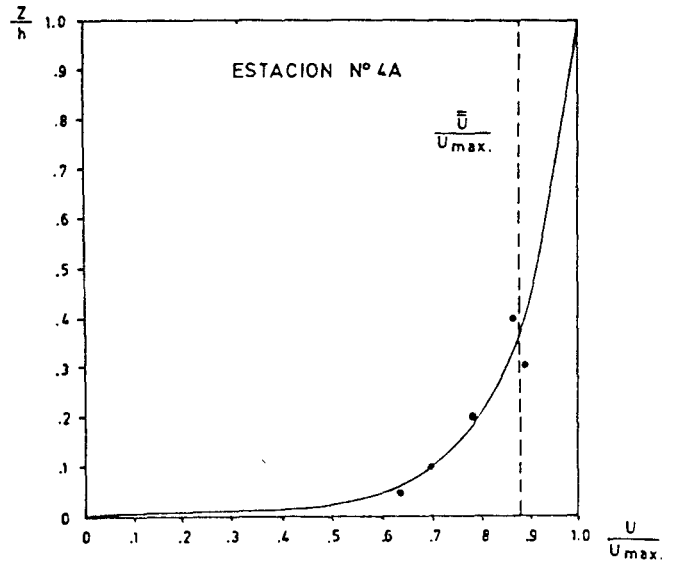


Fig. 8. Resultado del ajuste de las velocidades [$C_v(z)$] a un perfil logarítmico, para la Estación 4A.

DISCUSION

Los resultados obtenidos deben inscribirse dentro de un experimento con un número limitado de datos, tanto en la cantidad de estaciones como en el número de observaciones sobre la vertical. A pesar de ello, el grupo de mediciones es el único del lugar en su tipo. Las mediciones simultáneas a distintas profundidades en zona de bancos son casi nulas en la literatura.

El análisis indica que en las estaciones al norte de Punta Médanos (2A, 3A y 4A), zona en la cual los bancos son casi imperceptibles, la dirección de máxima corriente θ sigue ligeramente la orientación de la costa y su desvío del promedio a distintas profundidades y para una misma estación, no supera los 7°. Las fases α_v varían con la profundidad y su desvío no supera los 6°.

Sin embargo, las estaciones al sur de Punta Médanos (6A, 7A y 8A), donde la población de bancos es generalizada, las corrientes tienen un comportamiento más errático, especialmente cerca del fondo. Esto se pone de manifiesto en las direcciones del eje mayor de la elipse, cuyo desvío alcanza 18°, del mismo modo que sus fases, con un máximo desvío de 16°. La figura 6 muestra la relación entre los desvíos correspondientes a las fases y a la dirección del eje mayor de la elipse de corrientes para todas las estaciones.

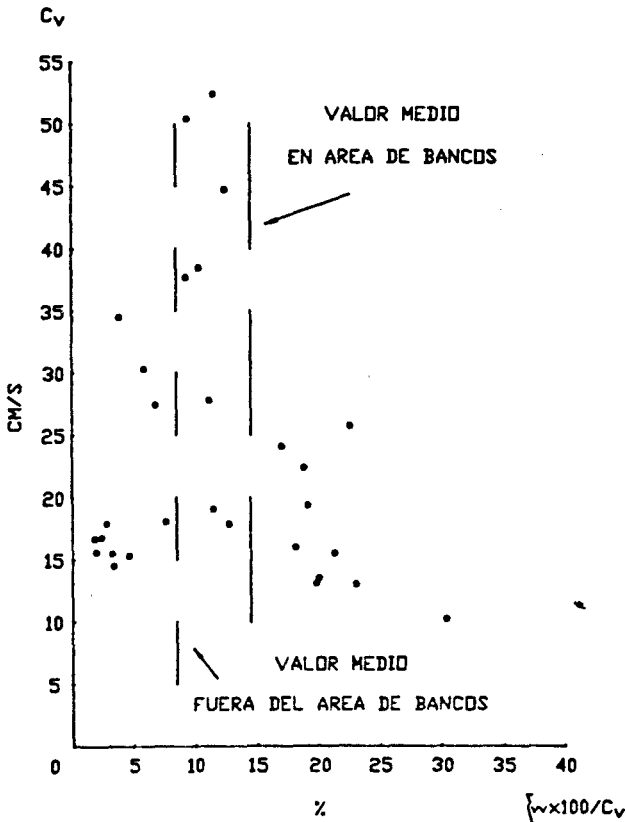


Fig. 7. Error normalizado ξ_v/C_v (%) versus la amplitud del eje mayor de la elipse de corrientes C_v .

El ajuste de una función armónica de período igual a 12.4 horas muestra errores de menor magnitud en aquellas estaciones al norte de Punta Médanos que en las situadas al sur de ese lugar, como lo indica la figura 7.

La elección de un perfil logarítmico para el ajuste del perfil de velocidades medido $C_v(z)$ se fundamenta en la necesidad de estimar las propiedades de la fricción en el lugar sin la pretensión de describir el campo de velocidades para todo tiempo del ciclo de marea. Se ha supuesto que las máximas velocidades ocurren, aproximadamente, al mismo tiempo, y que la dirección del eje mayor de la elipse no varía sustancialmente con la profundidad. En estos dos últimos casos se ha considerado que los ángulos θ y α_v oscilan alrededor de sus valores medios $\bar{\theta}$ y $\bar{\alpha}_v$, para cada estación.

El resultado del ajuste a un perfil logarítmico muestra cierta constancia en los valores de u_* pero una variación de z_0 de hasta dos órdenes de magnitud. Los valores más grandes de este último parámetro se encuentran en zona de bancos y los más pequeños fuera de ella, lo que hace suponer tamaños de sedimentos más grandes al sur de Punta Médanos que al norte de ese lugar. Esto coincide con lo expresado por Parker (1978), que ha encontrado sedimentos finos (0.20 mm de diámetro) sobre las crestas y gravas (2 mm o más) sobre los canales entre bancos al sur de Punta Médanos y fundamentalmente arenas al norte.

Los valores de la rugosidad r superan apenas los 60 cm de valor máximo entre todas las estaciones con un valor promedio del orden de 25 cm.

La velocidad en la dirección del eje mayor de la elipse representada por la Ecuación (21) suministra información sobre la excursión de la partícula durante un ciclo de marea por simple integración en el tiempo. En consecuencia, la excursión Y , resulta:

$$Y = C_v / \omega = C_v T / 2\pi \quad (41)$$

Tomando los valores máximos y mínimos de C_v deducidos del análisis e incluidos en la Tabla 4, la excursión de la partícula oscila entre un valor máximo $Y_{\max} = 3.7$ km y uno mínimo $Y_{\min} = 0.7$ km. La longitud de onda promedio de los bancos alineados es algo mayor que Y_{\max} lo que hace suponer que las partículas en su recorrido no alcanzan una distancia igual a la correspondiente entre cresta y cresta de los bancos y por esa razón los mismos no se traducen en la rugosidad estimada.

Los valores encontrados del coeficiente de Darcy varían entre 0.015 y 0.045. A modo de comparación, Reid y Bodine (1968) determinaron que ese coeficiente es del orden de 0.02.

CONCLUSIONES

La zona de Punta Médanos presenta, al sur, una batimetría inusual para la plataforma interior debido a la presencia de bancos alineados de gran tamaño y otras formas menores superpuestas.

A partir de una serie de mediciones de corrientes a diferentes profundidades se determinaron las características de las elipses de corriente. El comportamiento de las mismas indica que los bancos ejercen influencia fundamentalmente sobre la dirección del eje mayor de la elipse y la fase. Esto es puesto de manifiesto por la mayor dispersión encontrada en esas variables al sur de Punta Médanos (presencia de bancos) que al norte de ese promontorio (ausencia de bancos). Del mismo modo, el error producto del ajuste de los datos a una función armónica de período semidiurno es mayor en zona de bancos.

La determinación de los parámetros vinculados a la fricción se hizo a través del ajuste de las velocidades correspondientes al eje mayor de la elipse, deducidas del análisis a un perfil logarítmico.

Los resultados presentados sugieren valores medios de la viscosidad turbulenta ν_T , del orden de 350 cm²/s; del coeficiente que linealiza las tensiones A , del orden de 0.1 cm/s, y del coeficiente de Darcy f , del orden de 0.03.

La rugosidad equivalente r es elevada y varía desde 1 cm hasta 63 cm, alcanzando un valor medio de 25 cm aproximadamente. Esta magnitud es del mismo orden de la deducida por Scott y Csanady (1976) a partir de mediciones de corrientes en zona de bancos alineados similares a aquéllos de Punta Médanos.

Estas cifras están más cerca de las amplitudes de las formas sedimentarias menores que pueblan los bancos (de 1 m o menos) que de la amplitud de estos mismos (varios metros), lo que lleva a suponer que las corrientes no son influenciadas por los bancos desde el punto de vista de la rugosidad.

APENDICE

Lista de símbolos

- A : factor que linealiza la tensión integrada verticalmente.
- $A_u, A_v, B_u, B_v, A'_u, A'_v, B'_u, B'_v$: coeficientes armónicos.
- C_u, C_v : semiejes de la elipse de corrientes.
- f : coeficiente de fricción de Darcy.
- h : profundidad del lugar.
- N : número de datos a analizar.
- r : rugosidad equivalente de Nikuradse.
- t : tiempo.
- T : período de la componente M_2 .

u, v : componentes este-oeste y norte-sur de la velocidad medida.

u', v' : componentes de la velocidad de la elipse de corrientes.

\bar{u}, \bar{v} : velocidades medias.

u_Q : velocidad correspondiente al perfil logarítmico.

$u_{Q_{max}}$: valor máximo de u_Q

\bar{u}_Q : velocidad promediada sobre la profundidad.

$u_* = (\tau_b/\rho)^{1/2}$: velocidad de fricción.

Y : excursión de la partícula durante un ciclo de marea.

z : distancia desde el fondo.

z_0 : distancia desde el fondo hasta donde la velocidad es nula

α_m : fase mareas.

α_u, α_v : fase de las corrientes.

$\bar{\alpha}_v$: valor medio de α_v y S_{α} su desvío.

$\bar{\eta}$: nivel medio del mar.

η_m : desplazamiento máximo de la onda respecto del valor medio.

θ : ángulo entre el eje mayor de la elipse con el norte, medido en sentido horario.

$\bar{\theta}$: valor medio de θ y S_{θ} su desvío.

ν_T : viscosidad turbulenta.

$\bar{\nu}_T$: viscosidad promediada sobre la profundidad h .

ρ : densidad del agua.

$\tau(z)$: tensión de corte.

τ_b : tensiones integradas sobre la profundidad.

$\bar{\xi}_i^{-2}$: error cuadrático medio.

$$\xi_{ii} = \left[\bar{\xi}_i^{-2} \right]^{1/2}$$

χ : constante de Von Karman.

$\omega = 2\pi/T$: frecuencia angular.

LAVELLE, W. J. y D. J. SWIFT, 1982. Near-Shore Currents Measured in Ridge-and-Swale Topography Off Long Island, New York. *J. Geophys. Res.*, 87, 4190-4194.

PARKER, G., G. PERILLO y R. VIOLANTE, 1978. Características Geológicas de los Bancos (sand ridges) frente a Punta Médanos, Buenos Aires, Argentina. *Acta Oceanographica Argentina*, 2, 1, 11-50.

REID, R. O. y B. R. BODINE, 1968. Numerical Model for Storm Surges, Galveston Bay. *J. Waterways and Harbors Div., ASCE*, 94, WW1, 33-57.

SCHMIDT, S. A., 1988. Bancos Alineados en el Area de Punta Médanos: Condiciones Hidrodinámicas y el Transporte Resultante de Sedimentos. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la República Argentina.

SCOTT, J., y G. CSANADY, 1976. Nearshore Currents Off Long Island. *J. Geophys. Res.*, 81, 5401-5409.

SCHLICHTING, H., 1979. Boundary Layer Theory. Mc Graw-Hill, Inc., 578-591.

S. A. Schmidt
Pueblos Náuticos, S A.,
Av. Pte. Roque Sáenz Peña 832, Piso 8,
1388 Buenos Aires, Argentina.

A. Camerlengo
Fac. de Ingeniería, Univ. Nal. de La Plata
Calle 47 No. 200 (1900).
La Plata, Buenos Aires, Argentina.

BIBLIOGRAFIA

JUNOD, J., 1978. Estudio de Mareas en la zona de Cabo San Antonio, Provincia de Buenos Aires. Servicio de Hidrografía Naval, Armada Argentina. Informe Técnico, 22, 11-14.

LANFREDI, N. W. y S. A. SCHMIDT, 1978. Estudio de Corrientes de Marea en el Area de Cabo San Antonio. Servicio de Hidrografía Naval, Armada Argentina. Informe Técnico, 28, 37-46.