

Estudio de las Corrientes a lo Largo de la Costa en Pinamar, Argentina

FERNANDO J. CAVIGLIA

Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires y Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP. Casilla de Correo 45 (1900) La Plata, Argentina

(Recebido em 03/12/93. Aceito para publicação em 18/05/94.)

Abstract – In order to study the longshore currents on the Pinamar coast, Argentina, a year of daily observations of wave and environmental parameters were used. A linear regression analysis was performed to evaluate the influence of those parameters on the current velocity. Furthermore, it was verified whether other predictive equations were applicable to this area. It was also investigated if the inclusion of wind velocity could improve the predictive equations. The linear regression analysis has made it possible to determine that the most important variables in the computations of the longshore currents are the angle of incidence of waves, the longshore component of the wind and the breaker height of waves. The results suggest that modified versions of the existing equations can be used to predict the longshore current velocity on the Pinamar coast.

Resumo – Com o objetivo de estudar as correntes longitudinais na orla de Pinamar, Argentina, foi utilizado um ano de observações diárias de alguns parâmetros das ondas e ambientais. Foi efetuada uma análise da regressão linear dos dados para se avaliar a influência desses parâmetros sobre a velocidade da corrente. Foi ainda verificado se outras equações de predição eram aplicáveis a essa área. Também foi pesquisado se a inclusão do vento melhorava as equações de predição. A análise da regressão linear possibilitou apurar que as variáveis mais importantes no cálculo das correntes longitudinais são o ângulo de incidência das ondas, a componente paralela à orla do vento e a altura da onda no ponto de rebentação. Dos resultados obtidos decorre que é possível prever a velocidade da corrente longitudinal na orla de Pinamar utilizando-se de versões modificadas de expressões já existentes.

INTRODUCCION

Durante más de 60 años se han realizado investigaciones sobre las corrientes a lo largo de la costa con el objetivo principal de comprender el mecanismo del transporte de los sedimentos, los procesos de migración de la costa y el transporte y la dispersión de los contaminantes.

Cuando las olas se aproximan a la costa formando un cierto ángulo con ella, generan una corriente a lo largo de la misma. Esta corriente, que se asemeja a un río, está confinada en una zona con un ancho del orden de dos veces el ancho de la zona de la rompiente, y es la responsable del transporte litoral de los sedimentos puestos en suspensión por la turbulencia que las mismas olas generan en la rompiente.

En la actualidad, el desarrollo de modelos matemáticos, que puedan ser utilizados con fines prácticos, está limitado por la complejidad de las fuerzas que actúan en esta zona. En consecuencia, algunos investigadores han centrado sus estudios en el análisis estadístico para tratar de obtener la relación entre los parámetros de la ola y la corriente a lo largo de la costa (Sonu *et al.*, 1966; Harrison, 1968; Fox & Davis, 1972; Numedal & Finley, 1978; Lanfredi & Framiñan, 1986; entre otros).

En este sentido, el propósito del presente trabajo es evaluar en las playas de Pinamar, Argentina, la influencia de los parámetros de la ola sobre la velocidad de la corriente, y verificar la eficiencia de las fórmulas existentes para establecer si alguna de ellas se podría aplicar a esta región.

OBSERVACION Y RECOPIACION DE DATOS

La información utilizada en este trabajo se obtuvo por

medio del Programa de Observaciones Costeras durante el año de 1979. El programa de observaciones era similar al programa *Littoral Environmental Observations* (LEO) del *Coastal Engineering Research Center, U.S. Army, Corps of Engineers, USA* (Schneider, 1981). Durante la ejecución del programa se registraba información acerca del período de las olas cronometrando el tiempo empleado por once crestas en pasar por un punto fijo. La altura de la ola rompiente se estimaba utilizando una regla graduada, haciendo coincidir la cresta de la ola, el horizonte y la escala. Se observaban 10 alturas consecutivas, sobre la rompiente exterior, y se realizaba el promedio. El dato obtenido se expresaba en metros, al decímetro de precisión. La dirección de ataque del frente de ola se obtenía midiendo el ángulo comprendido entre la costa y la línea imaginaria perpendicular a ésta con un transportador impreso en el reverso de las planillas de registro. La corriente a lo largo de la costa se obtenía midiendo la distancia recorrida por un flotador de madera colocado dentro de la zona de la rompiente, en un punto intermedio entre la costa y la rompiente, en 1 minuto. Este tiempo podía ser menor, principalmente para evitar que el flotador se perdiera en la espuma o fuera arrojado a la playa. El ancho de la zona de la rompiente se estimaba visualmente como la distancia entre la costa y el punto más alejado donde se produce la primera rompiente. Los valores son aproximados y el error es mayor cuando la zona de la rompiente es extensa. La velocidad y dirección del viento se obtenía con un anemómetro manual.

DESCRIPCION DEL AREA DEL ESTUDIO

Pinamar está localizada en el sector central de la costa

de la Provincia de Buenos Aires, Argentina (Fig. 1). Esta localidad posee un muelle de pesca de una longitud de 156 m, que fue utilizado como una plataforma fija para realizar las observaciones costeras mencionadas anteriormente.

Las pendientes del frente de playa son suaves, con un valor típico de 1:33. El ancho de la playa varía entre los 70 m y 100 m, y está constituida por arenas finas con bajo porcentaje de gravas y conchillas. El diámetro medio de los sedimentos es de 0.25 mm.

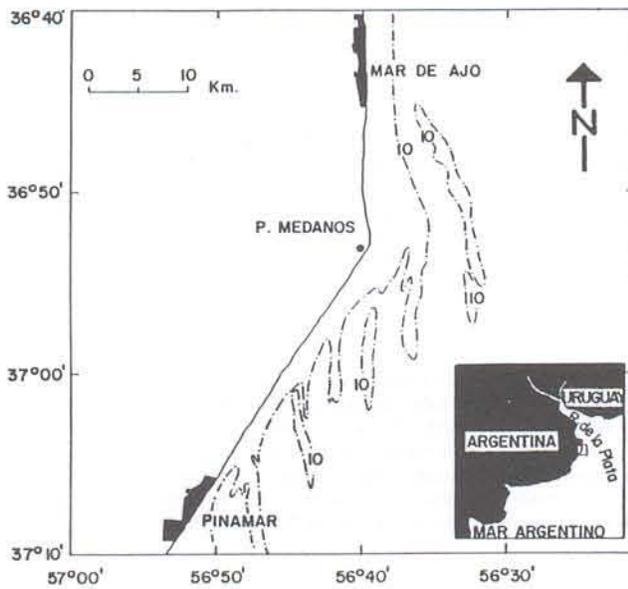


Figura 1 – Ubicación del área del estudio.

El régimen de la marea es semidiurno con desigualdades diurnas, con amplitudes medias en sicigias y cuadraturas de 0.74 m y 0.50 m respectivamente. Las alturas mínimas y máximas de las olas observadas fueron de 0.30 m y 2.85 m respectivamente, con un valor medio de 1.08 m. Los períodos variaron entre 5 s y 9 s, y los valores más frecuentes de la velocidad de la corriente a lo largo de la costa fluctuaron entre 0.30 m/s y 0.50 m/s. Las direcciones de ataque del frente de las olas se hallan entre los 40° y 140° respecto a la costa.

METODO DE ANALISIS

Se utilizó el análisis de la regresión lineal simple y múltiple para establecer la relación existente entre la velocidad de la corriente a lo largo de la costa y sus fuerzas generadoras: olas y vientos. Este método permitió determinar cuales son las variables que tienen mayor importancia en el proceso y elaborar con ellas una ecuación de predicción de la velocidad de la corriente.

Los datos de la corriente a lo largo de la costa (*v* en m/s) se correlacionaron con la altura de la ola en la rompiente (*H_b* en m), el período (*T* en s), el ancho de la zona de la rompiente (*X_b* en m), el seno del doble del ángulo que forma el frente de las olas con la normal a la costa (*α_b* en grados) y la componente a lo largo de la playa de la velocidad del viento (*W_p* en m/s). De esta manera, y de acuerdo a la importancia de cada variable, se elaboró una ecuación de predicción, considerando que

$$v = f(H_b, T, X_b, \text{sen } 2\alpha_b, W_p) \tag{1}$$

En la Tabla 1 se presentan los coeficientes de la regresión lineal simple, el porcentaje de la variación explicada por la regresión, %R², y el coeficiente de correlación, *r*, para cada una de las variables consideradas.

Coeficientes de la regresión							
<i>b₀</i>	<i>H_b</i>	<i>T</i>	<i>X_b</i>	<i>W_p</i>	sen2 <i>α_b</i>	%R ²	<i>r</i>
0.5438	-0.6999					39.69	0.630
-0.4557		0.0215				0.74	0.086
0.5183			-0.0048			20.25	0.450
-0.1097				0.1705		46.38	0.681
-0.0642					0.8120	57.30	0.757

Tabla 1 – Coeficientes de la regresión lineal simple.

De la comparación de los coeficientes *r* surge que las mejores correlaciones se obtienen con las variables sen 2*α_b*, *W_p* y *H_b*. Se conoce con cierta certeza que la velocidad *v* depende sensiblemente de *α_b*, y existen razones teóricas que demuestran que la relación debería ser del tipo sen 2*α_b* (Galvin & Eagleson, 1965; Longuet-Higgins, 1970). En la Tabla 1 se observa que es posible obtener una predicción de la velocidad relativamente aceptable considerando sólo la expresión

$$v = b_0 + b_1 \text{sen } 2\alpha_b \tag{2}$$

con un coeficiente de correlación de 0.757. La segunda variable de acuerdo a su importancia es el viento. Las Figuras 2a y 2b corresponden a los diagramas de dispersión de las variables sen 2*α_b* y *W_p* versus la velocidad de la corriente observada. Se han trazado en ellas las rectas de regresión obtenidas en cada caso. En dichas figuras, los valores negativos de la velocidad de la corriente indican dirección hacia el norte y los valores positivos dirección hacia el sur.

La regresión lineal múltiple se utilizó para obtener la ecuación de predicción que mejor aproxima la velocidad de la corriente. Se empleó el método de selección hacia adelante (Walpole & Myers, 1983). En este, se parte de una variable inicial elegida que es la que da el mayor porcentaje de la variación explicada %R² en la regresión simple. El resto de las variables se incorporan una a una, de acuerdo al %R² que producen en presencia de las variables elegidas anteriormente. La contribución neta al %R² de cada una de las variables al ser incorporadas a la ecuación se muestra en la Tabla 2. La ecuación de predicción resultante es

$$v = 0.2284 - 0.2943 H_b + 0.4963 \text{sen } 2\alpha_b + 0.0557 W_p \tag{3}$$

con un coeficiente de correlación de 0.818 y un error estándar en la estimación de la velocidad de 0.289. En ella aparecen únicamente aquellas variables cuya contribución neta al %R² fue mayor del 1%. En la Figura 3 se presenta la velocidad medida versus la calculada con la ecuación (3).

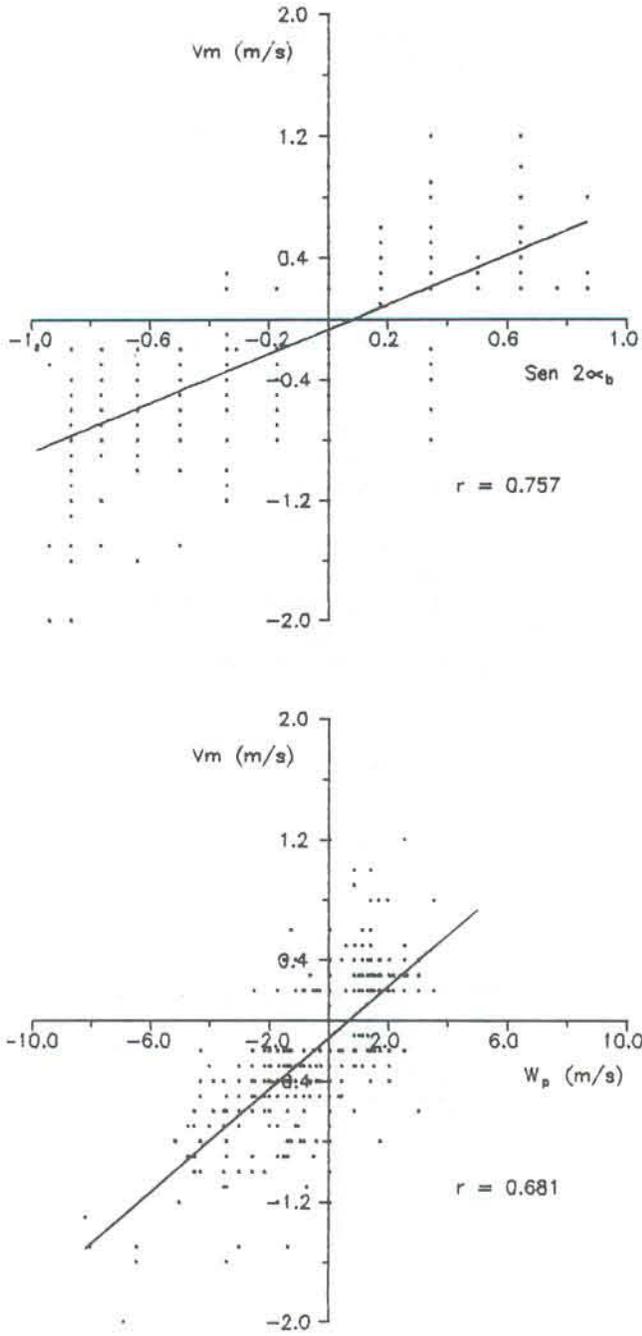


Figura 2 – Diagramas de dispersión de la velocidad de la corriente a lo largo de la costa versus el seno del doble del ángulo de incidencia, $\text{sen } 2\alpha_b$, (a) y versus la componente paralela a la playa del viento, W_p , (b).

La regresión múltiple mostró que el período y el ancho de la zona de la rompiente no son significativos en la predicción de la velocidad de la corriente. A diferencia de Sonu *et al.* (1966), Nummedal & Finley (1978), y Lanfredi & Framiñan (1986), en este trabajo se encontró que la altura de la ola en la rompiente es importante en el cálculo de la velocidad.

Cuando el viento sopla sobre la superficie del agua genera una corriente de deriva cuya velocidad puede ser del 3 al 4% de la velocidad del viento. Es interesante notar que esto concuerda razonablemente bien con el factor que multiplica a la velocidad del viento en la ecuación (3). En ella, el viento contribuye con el 5.6% de la intensidad de la corriente.

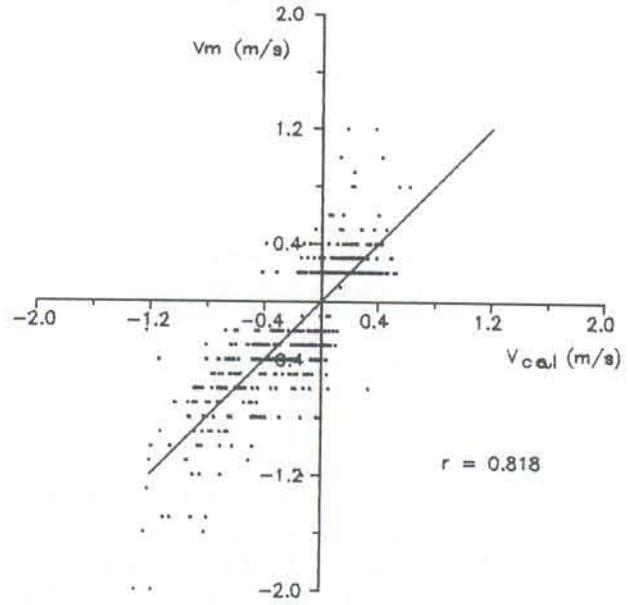


Figura 3 – Correlación lineal entre la velocidad medida, V_m , y la velocidad calculada, V_{cal} , con la ecuación (3).

PREDICCIÓN UTILIZANDO FORMULAS TEORICAS Y EMPIRICAS

La forma de la ecuación (3) tiene la ventaja de que permite analizar en forma individual la contribución de cada variable sobre la velocidad de la corriente a lo largo de la costa. No obstante, este tipo de expresiones tienen la desventaja de ser dimensionalmente incorrectas y de no concordar con ninguna de las expresiones teóricas conocidas.

Existen en la bibliografía numerosas fórmulas de predicción de origen teórico o empírico (Basco, 1982). En esta parte del trabajo se verifica el poder de predicción de varias de estas fórmulas, con el objeto de comprobar si alguna de ellas es aplicable en la zona de Pinamar. La ventaja de este tipo de expresiones con respecto a la ecuación (3) es que serían dimensionalmente correctas y que no dependerían del conjunto de datos utilizados. Esto es porque fueron desarrolladas en forma independiente y los datos se utilizaron sólo para adecuarlas a la zona estudiada.

Galvin & Eagleson (1965) presentaron una ecuación basada en la continuidad de masa,

Contribución neta de las variables

Variables	%R ²	Contribución	r
sen $2\alpha_b$	57.30	57.30	0.757
sen $2\alpha_b, H_b$	64.48	7.18	0.803
sen $2\alpha_b, H_b, W_p$	66.91	2.43	0.818
sen $2\alpha_b, H_b, W_p, X_b$	67.24	0.33	0.820
sen $2\alpha_b, H_b, W_p, X_b, T$	67.24	0.00	0.820

Tabla 2 – Contribución neta de las variables en el análisis de regresión lineal múltiple.

$$v = K_{Gal} g s T \text{ sen } 2\alpha_b \tag{4}$$

donde g es la aceleración debida a la gravedad, s la pendiente del frente de playa y K_{Gal} un factor de proporcionalidad adimensional. Galvin (1987) le asigna a K_{Gal} el valor 1.

Longuet-Higgins (1970) desarrolló la siguiente expresión basado en la teoría de la tensión radiante,

$$v = K_{L-H} s (gH_b)^{1/2} \text{ sen } 2\alpha_b \tag{5}$$

El *Shore Protection Manual* (1973) le asigna a K_{L-H} el valor 20.7. Fox & Davis (1972) analizando datos de campo propusieron la siguiente expresión empírica

$$v = K_{F-D} \frac{H_b}{T} \text{ sen } a\alpha_b \tag{6}$$

donde $K_{F-D} = 5.42$ y $a = 4$

Los mismos autores en 1973 modificaron la expresión para que tenga en cuenta la pendiente del fondo,

$$v = K_{1F-D} s \frac{H_b}{T} \text{ sen } a\alpha_b \tag{7}$$

donde $K_{1F-D} = 100$ y $a = 4$.

Las expresiones de la velocidad de Fox & Davis dependen del $\text{sen } 4\alpha_b$, no obstante, el análisis de la regresión lineal simple muestra que esta variable no produce buenos resultados cuando se la coteja con los datos. En consecuencia, se decidió modificar las expresiones (6) y (7) reemplazando el $\text{sen } 4\alpha_b$ por el $\text{sen } 2\alpha_b$. A continuación se denomina fórmulas de Fox & Davis (1972, 1973) modificadas a las ecuaciones (6) y (7) que contienen el valor $a = 2$.

Komar (1975) obtuvo una expresión empírica similar a la ecuación (5) por que no incluía la pendiente de la playa,

$$v = K_{Kom} (gH_b)^{1/2} \text{ sen } 2\alpha_b \tag{8}$$

donde $K_{Kom} = 0.585$.

Las expresiones resumidas aquí se utilizaron para cotejarlas con las observaciones realizadas en Pinamar. Desafortunadamente, el programa de observaciones costeras no preveía la medición de la pendiente del frente de playa, presente en algunas de las fórmulas de cálculo. De esta manera, la pendiente s se estimó utilizando el siguiente procedimiento. La derivación de las expresiones teóricas de la corriente a lo largo de la costa generalmente utilizan la aproximación $s = h_b/X_b$, donde h_b es la profundidad en la rompiente. Teniendo en cuenta que en la rompiente $h_b/H_b = \beta$, finalmente se obtiene que

$$s = \frac{\beta H_b}{X_b} \tag{9}$$

donde el valor típico de β es 1.28.

En la Tabla 3 se presentan los coeficientes de las regresiones simples, el porcentaje de la variación explicada

Coeficientes de la regresión

	Regresión Simple			Regresión Múltiple			
	K	%R ²	r	K	C	%R ²	r
Galvin & Eagleson (1965)	0.7561	50.55	0.711	0.5150	0.0983	60.37	0.777
Longuet-Higgins (1970)	21.9764	55.20	0.743	15.7767	0.0809	64.48	0.803
Fox & Davis (1972) mod.	5.1531	49.56	0.704	3.4595	0.0874	55.50	0.745
Fox & Davis (1973) mod.	402.1399	40.96	0.640	232.2224	0.1118	51.98	0.721
Komar (1975)	0.2489	61.62	0.785	0.1931	0.0643	65.77	0.811

Tabla 3 – Coeficientes de la regresión lineal simple y múltiple obtenidos para las distintas fórmulas de predicción.

y el coeficiente de correlación para cada una de las fórmulas propuestas. Las expresiones que arrojaron mejores resultados son las fórmulas de Komar (1975) y Longuet-Higgins (1970) con nuevos valores para los coeficientes de la regresión. El valor hallado para el coeficiente K_{Kom} fue de 0.249 aproximadamente la mitad del valor 0.585 propuesto por Komar (1975); la fórmula original propuesta por el autor sobreestima el conjunto de datos. Fox & Davis (1972), y Lanfredi & Framiñan (1986) obtuvieron resultados simila-

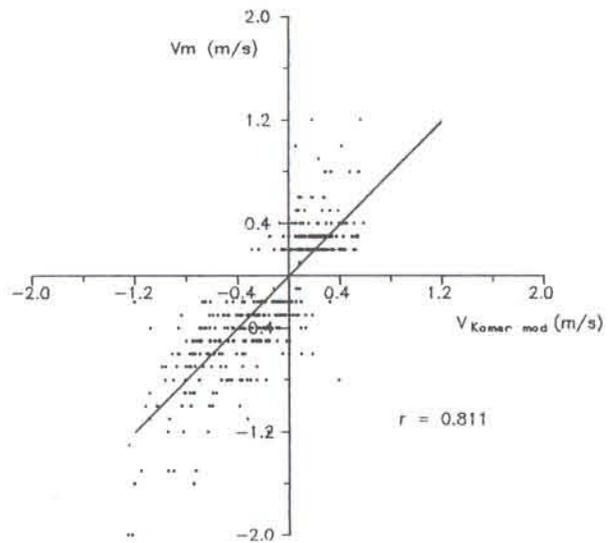
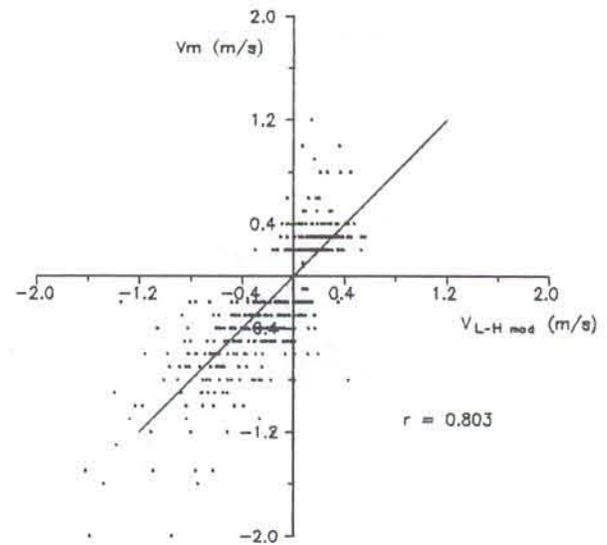


Figura 4 – Correlación lineal entre la velocidad medida, V_m , y las velocidades calculadas con las ecuaciones modificadas de Longuet-Higgins, $V_{L-H\text{ mod}}$, (a) y de Komar, $V_{Komar\text{ mod}}$, (b).

res. El valor hallado para el coeficiente K_{L-H} fue de 21.98, el cual concuerda razonablemente con el valor 20.7 propuesto por el *Shore Protection Manual* (1973). Un resultado similar fue hallado para las fórmulas de Galvin & Eagleson (1965), y Fox & Davis (1972) modificada.

El análisis de la regresión confirmó la importancia del viento en la predicción de la corriente a lo largo de la costa. La inclusión de éste podría mejorar los resultados obtenidos con las expresiones anteriores. Para investigar esta posibilidad, el efecto del viento se introdujo de la siguiente manera

$$v = v_o + CW_p \quad (10)$$

donde v_o representa a las expresiones teóricas y empíricas mencionadas anteriormente.

La Tabla 3 muestra los coeficientes de la regresión múltiple, el porcentaje de la variación explicada y el coeficiente de correlación para cada una de las fórmulas propuestas. Nuevamente, las fórmulas modificadas, para que incluyan el efecto del viento, de Komar y Longuet-Higgins son las que dan la mejor predicción, con coeficientes de correlación superiores 0.80. En las Figuras 4a y 4b se grafica la velocidad observada *versus* la velocidad calculada con las ecuaciones modificadas de Longuet-Higgins y Komar respectivamente. Repasando los coeficientes de correlación de la Tabla 3, se observa que la inclusión del efecto del viento produjo mejores ecuaciones de predicción.

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio demuestran que es posible predecir la velocidad de la corriente a lo largo de la costa en Pinamar utilizando observaciones visuales. La variable más importante es el seno del doble del ángulo que forma el frente de las olas con la normal a la costa, $\sin 2\alpha_o$. Las variables que siguen de acuerdo a su importancia son la componente paralela a la costa de la velocidad del viento, W_p , y la altura de la ola rompiente, H_o .

Se verificó que las expresiones que mejor describen el

conjunto de datos son las ecuaciones de Longuet-Higgins y Komar. La inclusión del efecto del viento produjo un mejor ajuste con la velocidad observada. La predicción basada en esas ecuaciones subestima el valor de la velocidad observada. El error estándar obtenido en la estimación de las ecuaciones modificadas de Komar y Longuet-Higgins fue de 0.304 y 0.310, respectivamente.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Basco, D.R. 1982. *Surf zone currents state of knowledge*. MR 82-7 (I) Coastal Engineering Research Center, U.S. Army, Corps of Engineers, 243 p.
- Fox, W.T. & Davis, R.A. Jr. 1972. *Coastal processes and beach dynamics at Sheboygan*, Wisconsin, 94p. Tech. Rept. N° 10, ONR Contract N00014-69-c-0151.
- _____ & _____ 1973. Simulation model for storm cycles and beach erosion on Lake Michigan. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **84**: 1769-1790.
- Galvin, C. 1987. The continuity equation for longshore current velocity with breaker angle adjusted for a wave-current interaction. *Coastal Engineering*, **11**: 115-129.
- _____ & Eagleson, P.S. 1965. *Experimental Study of longshore currents on a plane beach*. TM-10. Coastal Engineering Research Center, U.S. Army, Corps of Engineers, p. 1-80.
- Harrison, W. 1968. Empirical equation for longshore current velocity. *Journal of Geophysical Research*, **73**: 6929-6936.
- Komar, P.D. 1975. Nearshore currents: generation by obliquely incident waves and longshore variations in breaker height. In: Hails J. and Carr A. (ed.), *Nearshore Sediment Dynamics and Sedimentation*. J. Wiley, New York. p.17-45.
- Lanfredi, N.W. & Framiñan, M.B. 1986. Field study and prediction of longshore currents, Argentine Coast. *Journal of Coastal Research*, **2**(4): 409-417.
- Longuet-Higgins, M.S. 1970. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves 1. *Journal of Geophysical Research*, **75**: 6778-6789.
- Nunnedal, D. & Finley, R.J. 1978. Wind-generated longshore currents. *Proceedings of the 16th. Conference on Coastal Engineering*, Hamburgo 1428-1438.
- Schneider, C. 1981. *The Littoral Environmental Observation (LEO)*. Data Collection Program. CETA81-5. Coastal Engineering Research Center, U.S. Army, Corps of Engineers, 23p.
- Shore Protection Manual. 1973. U.S. Vicksburg, MS, Army Engineer Waterways Experiment Station 2v.
- Sonu, C.J.; McCloy J.M. & McArthur, D.S. 1966. Longshore currents and nearshore topographies. *Proceedings of the 10th. Conference on Coastal Engineering* Tokio: 524-549.
- Walpole, R.E. & Myers, R.H. 1983. *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*. Nueva Editorial Interamericana, México D.F. 579p.