

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE FLUJO DE ENERGÍA EN EL LITORAL DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA

Mariano J. VERÓN¹ y Germán R. BÉRTOLA²

¹ CONICET - Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Mar del Plata, Argentina,
mariano.javier.veron@gmail.com

² CONICET e Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario. Universidad Nacional de
Mar del Plata. C.C. 722 – Correo Central. (7600) Mar del Plata, Argentina, gbertola@mdp.edu.ar

Resumen: El objetivo de este trabajo es estimar el potencial transporte longitudinal marino de sedimentos, desde la ciudad balnearia de Monte Hermoso hasta Punta Rasa (Provincia de Buenos Aires), a través del método de flujo de energía (CERC, 2002), utilizando datos de clima de olas de los modelos WAVEWATCH III (NOAA, 2009). El método relaciona la altura de ola significativa, su ángulo de incidencia y otros parámetros característicos de playas, con la tasa de transporte de sedimentos paralela a la costa. Los resultados permitieron generar mapas de flujo de energía y del consiguiente transporte potencial de material sedimentario. A través de la comparación con antecedentes de estudios previos basados en relevamientos *in situ* se logró verificar la concordancia existente entre el clima de ola y la morfología regional de playas. La aplicación de los modelos de olas brindó continuidad al cálculo a lo largo del área de estudio, aportando un panorama integral al fenómeno de deriva litoral.

Abstract: The objective of this work is to estimate the potential longitudinal marine sediment transport from the seaside city of Monte Hermoso to Punta Rasa (Buenos Aires, Argentina), through the Energy Flux method (CERC, 2002) data from WAVEWATCH III wave climate models (NOAA, 2009). The method relates the significant wave height, the angle of incidence and other parameters characteristic of beaches, to the rate of sediment transport along the coast. The results allowed to generate maps of energy flux and the consequent potential transport of sedimentary material. Through comparison with previous *in situ* studies, it was possible to verify the concordance between wave climate and of regional beaches. The application of wave models to the calculation provided continuity throughout the study area, giving a comprehensive scenario to the phenomenon of longshore drift.

Palabras clave: olas, deriva litoral, transporte de sedimentos.

Keywords: waves, littoral drift, sediment transport, Buenos Aires.

INTRODUCCIÓN

En el medio marino costero la energía que hace posible la dinámica sedimentaria litoral llega principalmente en trenes de ondas superficiales que rompen sobre la costa en forma de olas de

rompiente. Estas viajan desde mar adentro hacia la costa y disipan su energía en diferentes formas, entre las cuales la erosión de roca, la re-suspensión de material sedimentario y el movimiento neto de masas de agua, en forma de corrientes (transversales y longitudinales), absorbe gran parte de la energía

que ingresa al sistema.

El ángulo de incidencia de los frentes de olas y el gradiente energético de las mismas a lo largo de la costa determinan un flujo neto de masa paralelo, el cual conforma una corriente longitudinal. Esta componente es mayormente responsable de las alteraciones morfológicas de playas y del transporte de sedimentos entre sistemas costeros consecutivos y regionales. Este transporte longitudinal (*deriva litoral*) es responsable del movimiento de miles y hasta millones de metros cúbicos de arena cada año. Se desarrolla principalmente en la zona de deslizamiento y se encuentra entre los más importantes procesos que determinan la morfología costera y su balance de erosión/acreción (CERC, 2002).

El presente trabajo tiene como objetivo representar una estimación del transporte potencial de sedimentos, resultado de la aplicación del método de flujo de energía (CERC, 2002), desde la ciudad balnearia de Monte Hermoso hasta Punta Rasa (Provincia de Buenos Aires, Argentina) durante el año 2009. Su versión más reciente fue desarrollada por el *Scripps Institute of Oceanography* y posteriormente aplicada por el cuerpo de ingenieros del ejército de Estados Unidos de América (*US Army Corps of Engineers*). El método utiliza la altura significativa de ola, su ángulo de incidencia, el azimut de costa, la porosidad y la densidad de sedimentos, para calcular el flujo de energía y la consecuente tasa de transporte paralela a la costa.

En el litoral argentino existen trabajos previos que, muchas veces enmarcados en otros propósitos, han realizado estimaciones reales y potenciales de transporte. Los cálculos que merecen destacarse por su vinculación con este trabajo fueron realizados por Framiñan (1987) y Caviglia *et al.* (1991, 1992) bajo variantes del método de flujo de energía. También hay numerosas caracterizaciones geomorfológicas, que determinan la evolución periódica que sufren muchas playas de la provincia de Buenos Aires (Isla *et al.*, 1997, 2001a, 2001b, 2001c; Bértola, 2001, 2006; Bértola *et al.*, 1999, 2013), dada por la disponibilidad de sedimentos, presencia de médanos, acantilados y superficies de abrasión.

Para la aplicación del método propuesto son necesarios una cantidad extendida de registros de oleaje, y dada la existencia de escasas fuentes en toda el área de estudio, se recurrió a los resultados de los modelos WAVEWATCH III (NOAA, 2009), utilizados en el Sistema de Pronóstico Global (GFS).

Estos conforman un conjunto de modelos numéricos de predicción del clima atmosférico y oceanográfico, pertenecientes al *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), división de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) de los Estados Unidos. En particular, los modelos utilizados para GFS estiman condiciones oceanográficas en profundidades medias y su resolución espacial es de hasta 55 km. Dichos cálculos proveen información regional con gran aproximación general y extendida espacialmente, lo que resulta en una alternativa a la escasez de datos reales para la región de estudio, dando continuidad al cálculo de flujo litoral.

ÁREA DE ESTUDIO

La región litoral marítima bonaerense se extiende por alrededor de 1000 km desde su límite sur con la Provincia de Río Negro, hasta Punta Rasa al norte, limitando con el Río de La Plata. El área estudiada comienza en la ciudad de Monte Hermoso y abarca la costa bonaerense hasta llegar al norte de la ciudad de San Clemente del Tuyú (Punta Rasa), límite sur de la Bahía Samborombón (Fig. 1). Toda la región alcanza una extensión de aproximadamente 600 km y en su recorrido se encuentran las ciudades balnearias más importantes del país, como Monte Hermoso, Claromecó, Necochea, Mar del Plata, Villa Gesell, Pinamar, Santa Teresita y San Clemente del Tuyú, entre otras.

En una caracterización general se pueden distinguir dos tipos de playa de importancia dentro del área: playas bajas arenosas, con grandes campos de médanos y playas de bolsillo ubicadas entre acantilados de loess u ortocuarcitas (Isla y Bértola, 2005). En toda la costa de la región de estudio, al norte y sur de Mar del Plata, hay extensas playas arenosas que conforman lo que se denomina Barrera Oriental y Austral (Isla *et al.*, 2001c), respectivamente, con características de rompiente principalmente disipativas, lo que reduce el efecto de bajío (crecimiento de la altura de ola por reducción de la profundidad). Por su parte, la ciudad de Mar del Plata está asentada sobre las estribaciones del Sistema de Tandilia, con afloramientos de ortocuarcitas (de edad Ordovícica) sobre los que se apoyan en discordancia erosiva el Loess Pampeano y sedimentos eólicos, presentando menor disponibilidad de arena para el transporte longitudinal (Isla y Bértola, 2005).

Desde el punto de vista del clima de olas, las pla-

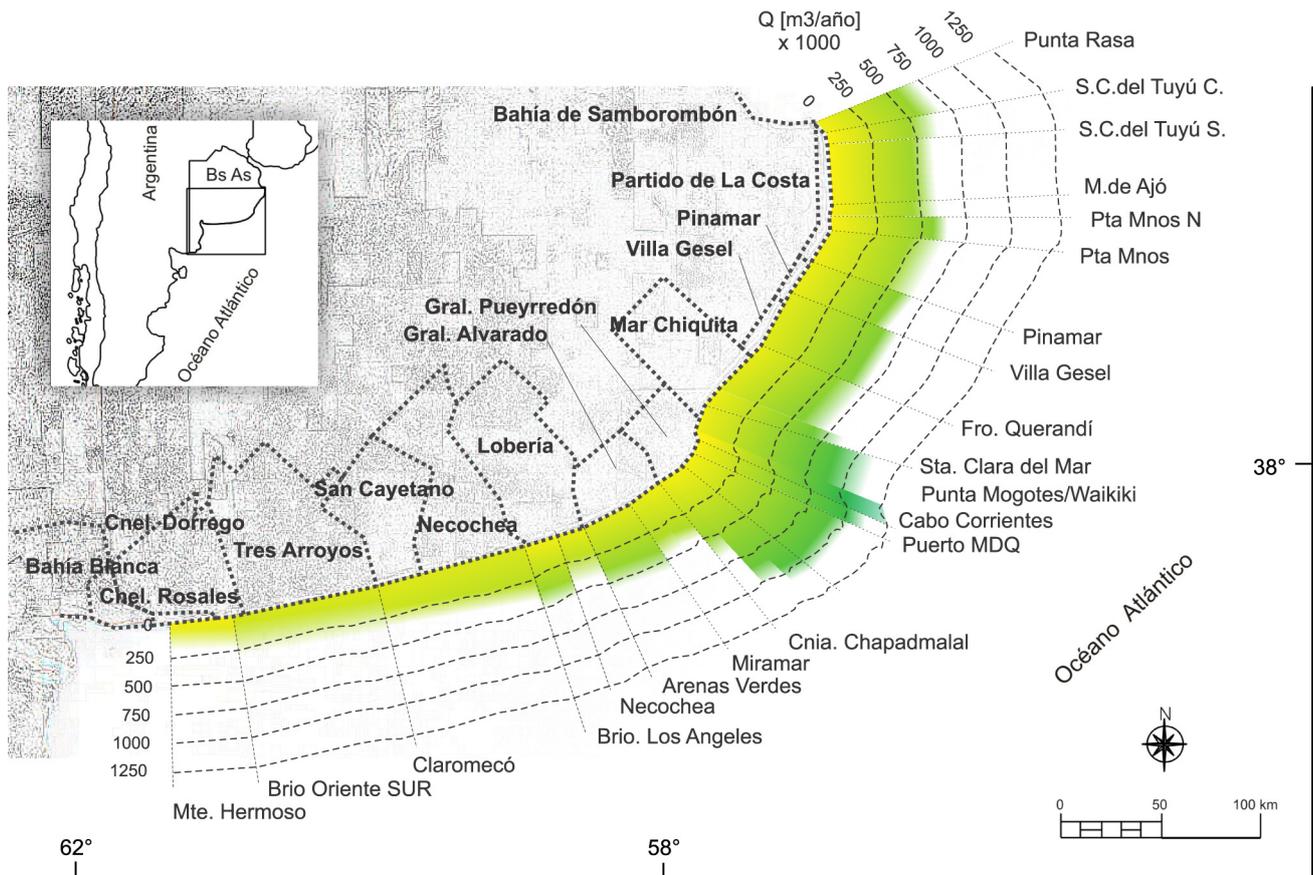


Figura 1. Segmentación del área de estudio y estimaciones de Transporte Potencial Neto Anual de Sedimentos (Q) para cada segmento analizado. Las líneas perpendiculares a la costa representan el eje de la variable Tasa de Transporte.

Figure 1. Segmentation of the study area and estimates of Potential Annual Net Sediment Transport (Q) for each considered segment. The lines perpendicular to the coast represent the axis of the rate of transport.

yas de alta energía son comunes en los alrededores de Mar del Plata, debido a que su plataforma continental es la más angosta de Argentina. En cambio, hacia los extremos del área de estudio (Samborombón y Bahía Blanca) las olas son atenuadas en razón de la pendiente de una plataforma continental más amplia (Isla y Bértola, 2005).

METODOLOGÍA

Dado que el método de flujo de energía se basa en la altura significativa de ola en zona de rompiente, es necesario realizar correcciones de los ángulos de aproximación y altura de olas dadas por los registros. Esto se debe a que los datos provenientes del GFS proveen información de zonas más profundas que la de la línea de ruptura de olas (aproximadamente 20 m según GFS). Para corregir esto, se aplicó la ley de Snell de refracción de ondas (CERC, 2002). De este modo se consigue simular la reducción del ángulo

de los frentes de ondas al ingresar en aguas menos profundas y la subsecuente alteración de altura. Cabe destacar que el efecto de bajío no se encuentra simulado bajo la presente metodología.

El paso de oleaje es relativamente abierto para toda el área en estudio y, por lo tanto, desde un punto de vista regional, es posible aproximar la línea de costa a segmentos rectos. Para estimar el flujo de energía en función del azimut se dividió la costa en sectores que representan de manera ideal un sistema de entrada y salida de sedimentos. El criterio utilizado indica que toda la fracción de costa representada en un segmento debe poseer un azimut relativamente constante.

De este modo se consiguieron 24 secciones (Fig. 1), separadas por puntos de quiebre entre el azimut del segmento anterior con el azimut del siguiente. Gracias a la uniformidad de gran parte del litoral oceánico se consiguieron tramos costeros con longitudes desde los 10 km hasta los 94 km de

longitud. Dentro del partido General Pueyrredón (Fig. 1), y debido a la gran cantidad de accidentes costeros allí presentes, se tomaron segmentaciones más pequeñas de aproximadamente 2 km de longitud. Es importante aclarar que alcanzar resoluciones tan pequeñas para calcular parámetros regionales implica cometer un error mayor, ya que en esta escala del cálculo debe ser considerada la modelación con mapas batimétricos precisos y dinámicas de flujos con mayor cantidad de condiciones de contorno.

Para estimar el flujo de energía (P) y la tasa de transporte potencial (Q) se utilizaron las formulaciones recomendadas por el *Shore Protection Manual* (CERC, 2002), definidas por:

$$P = (EC_g)_b \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (1)$$

donde E_b y C_{gb} representan el valor de la energía de ola y la velocidad de grupo de las ondas sobre la línea de rompiente, respectivamente,

$$E_b = \rho g H_b^2 / 8 \quad (2)$$

$$C_{gb} = \sqrt{g d_b} = (g H_b / k)^{1/2} \quad (3)$$

La constante k es la relación de ruptura entre la altura de ola significativa (H_b) y la profundidad de rompiente (d_b). El término $(EC_g)_b$ representa el flujo de energía de olas evaluado en la zona de ruptura y α_b es el ángulo de ruptura relativo a la línea de costa. La relación final utilizada para el transporte potencial queda determinada por:

$$Q_i = K [\rho \sqrt{g} / 16 k^{1/2} (\rho_s - \rho) (1 - n)] H_b^{5/2} \sin(2\alpha_b) \quad (4)$$

donde ρ y ρ_s corresponden a la densidad del agua de mar y del sedimento en suspensión, respectivamente, g es la aceleración de la gravedad y n la porosidad del sedimento.

Se realizaron los cálculos de flujo de energía y la tasa de transporte potencial para cada segmento costero (caracterizado por un azimut promedio, una altura significativa de olas y la dirección de aproximación de éstas), a partir de los cuales se obtuvieron resultados diarios, mensuales y posteriormente anuales. Los valores positivos para P y Q representan direcciones de flujo en sentido Sur, por el contrario, valores negativos indican transporte en sentido Norte.

APLICACIÓN DEL MÉTODO EN EL LITORAL BONAERENSE

Tanto el flujo de energía como la tasa potencial asociada presentan, en promedio anual, dirección preferencial al noreste (Figs. 1, 2). Desde el extremo sur del área de estudio (Monte Hermoso) hasta el partido de General Alvarado, la energía crece paulatinamente desde 87 N/s a 354 N/s, generando un transporte potencial de entre 10^5 m³/año en el extremo cercano a Bahía Blanca, hasta unos 4×10^5 m³/año en Miramar. El litoral del partido de General Pueyrredón se encuentra gobernado por un flujo de energía que varía entre 500 N/s y 1100 N/s en promedio anual. La deriva potencial asociada alcanza $1,3 \times 10^6$ m³/año. Desde Santa Clara hasta el extremo norte del área de estudio (Punta Rasa) el flujo de energía y la tasa de transporte se estabilizan en el orden de los 500 N/s y 6×10^5 m³/año, respectivamente (Figs. 1, 2).

A diferencia del presente estudio, los resultados obtenidos por Framiñan (1987) muestran un pico de energía desplazado hacia al sur, entre las playas de Claromecó y Necochea. Esta diferencia puede deberse a que en el estudio mencionado se utilizaron datos de vientos locales para estimar clima de oleaje. Esto no contempla el aporte de marejadas provenientes de sistemas climáticos lejanos a la costa, lo cual puede influir significativamente, aumentando la energía real sobre el litoral. Aún así, existe una similitud en ambos estudios en el orden de magnitud de las tasas de transporte, relativas a la energía que fluye a lo largo de la costa bonaerense por acción del oleaje. Lo mismo sucede respecto de las estimaciones realizadas por Caviglia *et al.* (1991, 1992).

Al relacionar la distribución de perfiles de playas, acantilados y médanos en la costa bonaerense (Isla *et al.*, 2001a), con los resultados de flujo potencial obtenidos en el presente trabajo, se denota una gran concordancia (Fig. 2). Alta energía en el clima de oleaje deja expuestos los sistemas rocosos en formas de acantilados. En oposición, baja energía favorece mayor depositación y disponibilidad de arena. En particular, se pueden diferenciar tres grandes zonas a escalas regionales caracterizadas por su flujo de energía y transporte a lo largo de la costa, que se denominan aquí Región Sur, Central y Norte (Fig. 2).

La Región Sur comprende desde Monte Hermoso hasta Miramar. Posee la menor tasa de transporte potencial de todo el litoral. Si bien la altura de

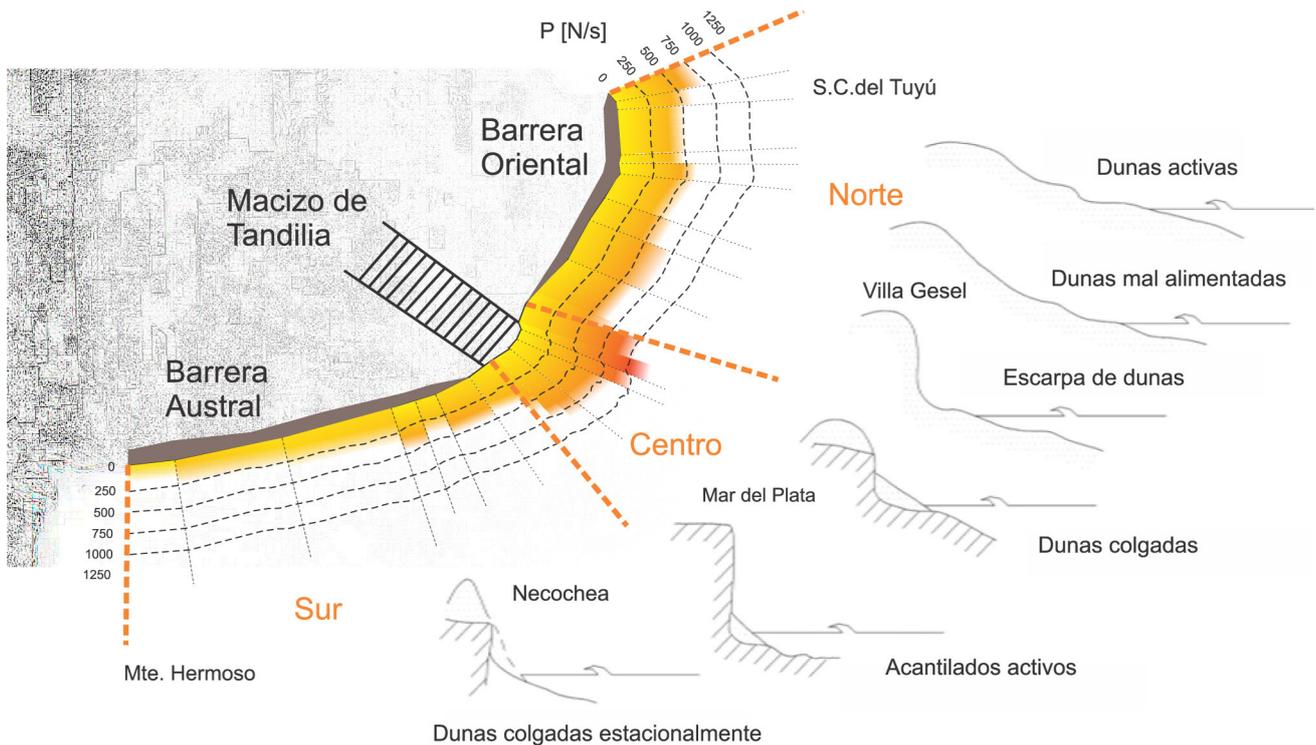


Figura 2. Flujo de Energía Neto (P) a lo largo de la costa y distribución de geoformas características de la costa bonaerense según Isla *et al.* (2001a).

Figure 2. Net Energy Flow (P) along the coast and distribution of typical geomorphs along the Buenos Aires province coast according to Isla *et al.* (2001a).

ola promedio aumenta hacia el NE, el ángulo de incidencia promedio decrece reduciendo el flujo litoral. Así, la tasa de transporte potencial media en toda esta región crece desde unos 10^5 m^3 en el extremo cercano a Bahía Blanca, hasta unos $4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{año}$ en Miramar. En concordancia, la morfología comienza con playas suaves y arenosas, y progresivamente aparecen acantilados hacia el noreste, en la dirección de crecimiento del flujo de energía, donde se comienzan a observar dunas colgadas estacionalmente (Fig. 2). Toda la región se encuentra caracterizada por la presencia de la denominada Barrera Austral, con una alta disponibilidad de arena (Isla *et al.*, 2001c).

La Región Central se extiende desde Miramar hasta Mar Chiquita. Aquí, el litoral bonaerense se encuentra particularmente expuesto a los eventos climáticos del Atlántico Sur y la energía entregada por el oleaje es la más alta de todo el litoral. La barrera arenosa desaparece y el macizo de Tandilia queda expuesto. Según los registros del GFS, se encuentra la altura de ola promedio más alta, 1,25 m. Esto, sumado a la orientación de la costa respecto del frente de olas provenientes del sur generadas mar

adentro, favorece el aumento de la tasa potencial de transporte hacia el norte (Figs. 1, 2). Las geoformas presentes en este sector son acantilados más expuestos y de mayor altura que en el sector anterior, con dunas colgadas y acantilados activos (Isla *et al.*, 2001c), lo que denota una gran energía erosiva (Fig. 2). Hacia el norte de Mar del Plata se encuentra el mayor transporte litoral que alcanza valores de $1,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$, lo cual resulta mayor a los $4 \times 10^5 \text{ m}^3$ estimados por Caviglia *et al.* (1992). La principal diferencia podría radicar en la puntualización del cálculo a una escala donde los parámetros pueden verse atenuados.

Finalmente, en la Región Norte, desde Mar Chiquita a Punta Rasa, el transporte potencial anual se reduce y estabiliza entre $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ y $6 \times 10^5 \text{ m}^3$ (Figs. 1, 2). Las acumulaciones arenosas vuelven a aparecer en lo que se denomina Barrera Oriental (Isla *et al.*, 2001b). La brusca reducción de $1,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ a $5 \times 10^5 \text{ m}^3$ en el transporte potencial anual estimado, debería producir una potencial acumulación entre Santa Clara del Mar y Faro Querandí de la arena removida de la región del partido de General Pueyrredón (con mayor actividad). Pero, probablemente, la menor

disponibilidad de arena, sumado a la presencia de estructuras que favorecen la obstrucción de la deriva litoral, provoca que la tendencia real se encuentre alterada, dando paso a la existencia de escarpas de dunas. De aquí hacia el norte, existen pocas variaciones en la tasa de transporte potencial. Sin grandes interferencias antropogénicas, esta debería ser una región de dinámica más libre y presentar alteraciones por erosión de manera más uniforme, al igual que los primeros tramos del segmento Sur. En concordancia con los resultados obtenidos en el presente trabajo, en esta zona se encuentran playas con disponibilidad de arena y las formaciones medanosas aparecen regularmente como dunas activas y mal alimentadas, geoformas que se mantienen hasta Punta Rasa (Isla *et al.*, 2001b).

Cabe aclarar que al reducir la escala de detalle y concentrarse en sectores costeros particulares, se observan discrepancias entre aspectos teóricos de transporte potencial y balances reales de playas. El trabajo actual no contempla el análisis profundo de las desviaciones, pero es dable inferir que variables como la disponibilidad de arena y obstrucciones de deriva (antrópicas y naturales) poseen una influencia determinante sobre la situación final. Además, la inexactitud de los modelos del GFS puede provocar un aumento en la propagación de errores sobre el método. Para la estimación del error asociado se debe realizar una exhaustiva validación del GFS para la región de estudio, ya que su exactitud varía de un sitio a otro.

Para lograr una mejor visión histórica es necesario abarcar los datos de mayor número de años, ya que los promedios anuales pueden variar. En cierta medida la condición aleatoria de los eventos climáticos determina que se ofrezcan situaciones promedio distintas, aunque quizás sea posible observar una tendencia general.

CONSIDERACIONES FINALES

La posibilidad que brinda el método de flujo de energía de obtener una estimación potencial del transporte de sedimentos a través del clima de olas, resultó importante para la obtención de un panorama integral sobre el fenómeno de deriva litoral bonaerense. Además, en función de la escasez de datos reales, la utilización de modelos globales de clima permitió que dicho cálculo posea una robusta continuidad a lo largo del área de estudio,

enriqueciendo el conocimiento actual sobre su dinámica sedimentaria desde un punto de vista poco desarrollado en esta región.

La comparación entre los resultados obtenidos y los relevamientos *in situ* de los estudios preexistentes permitieron dilucidar la gran concordancia que existe entre el clima de olas regional y la geomorfología superficial de playas dentro del área de estudio, aseverando su responsabilidad sobre la dinámica del sistema.

Es dable recomendar una profundización sobre las desviaciones existentes entre los resultados de flujos potenciales y la situación real de playas para, de este modo, poder ponderar la responsabilidad que poseen las acciones antropogénicas sobre la erosión costera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bértola G.**, 2001. 21 years of morphological modifications in an urbanised beach (Playa Grande, Mar del Plata), Argentina. *Revista Thalassas* 17:21-36.
- Bértola, G.**, 2006. Morfodinámica de playas del Sudeste de la provincia de Buenos Aires (1983 a 2004). *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 13:31-57.
- Bértola G., M. Farenga, L. Cortizo y F.I. Isla**, 1999. Dinámica Morfológica de las playas de Villa Gesell (1994-1996), Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 54:23-35.
- Bértola, G., A. Merlotto, L. Cortizo y F. Isla**, 2013. Playas de bolsillo en Mar Chiquita, Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 70:267-278.
- Caviglia F.J., J.L. Pousa y N.W. Lanfredi**, 1991. A Determination of the Energy Flux Constant from Dredge Records. *Journal of Coastal Research* 7:543-549.
- Caviglia F.J., J.L. Pousa y N.W. Lanfredi**, 1992. Transporte de Sedimentos: una alternativa de cálculo. *II Congreso de Ciencias de la Tierra*:413-422, Chile.
- Coastal Engineering Research Center**, 2002. *Shore Protection Manual*. 2 tomos, 2da edición. Coastal and Hydraulics Laboratory, U.S. Army Engineer Research and Development Center, 2500 pp.
- Framiñan M.**, 1987. Deriva litoral en la costa bonaerense. *Informe final CONICET*, 52 pp.
- Isla, F.I. y Bértola, G.R.**, 2005. Litoral bonaerense. En R. de Barrio, R.O. Etcheverry, M.F. Caballé y E. Llambías (Eds.), Geología y recursos minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio XVI Congreso Geológico Argentino:265-276.
- Isla F.I., G. Bértola y E. Schnack**, 2001a. Morfodinámica de playas meso y macromareales de Buenos Aires, Río Negro y Chubut. *Asociación Argentina de Sedimentología Revista* 8:51-60.
- Isla F.I., G. Bértola, M. Farenga y L. Cortizo**, 2001b. Morfodinámica y balance sedimentario de las playas del Partido de Pinamar (1995-1999), Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56:150-160.
- Isla F.I., G.R. Bértola, M.O. Farenga y L.C. Cortizo**, 2001c. Variaciones Antropogénicas de las playas del Sudeste de

Buenos Aires, Argentina. *Revista de Geociencias del Instituto de Geociencias* 28:27-35.

Isla F.I., M. Farenga, L. Cortizo, G. Bértola y S. Serra, 1997. Dinámica morfosedimentológica de playas de arena y grava de la Barrera Austral: Mar del Sur, Arenas Verdes y Costa Bonita. *Asociación Argentina de Sedimentología Revista* 4:15-24.

Ministerio de Transporte, Obras Públicas y obras Sanitarias del Gobierno de los Países Bajos, 1997. Estudio del Puerto y la costa de Mar del Plata. *Informe Interno de Municipalidad de General Pueyrredón*, 142 pp.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2009. Modelos WAVEWATCH III. <http://polar.ncep.noaa.gov/>.