

DINÁMICA DE PERFILES DE PLAYA EN ZONAS CON MEDANOS FRONTALES MODIFICADOS EN PEHUEN CO (ARGENTINA)

María Luján Bustos ^{1,2}, Gerardo Miguel E. Perillo ^{1,3}, María Cintia Piccolo ^{1,2}

¹ Instituto Argentino de Oceanografía. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (IADO-CONICET). Camino La Carrindanga Km 7,5 - Bahía Blanca (8000), Buenos Aires, Argentina.

² Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo. 12 de Octubre y San Juan, 4° piso, Bahía Blanca (8000), Buenos Aires, Argentina.

³ Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geología. Av. Alem 1253, cuerpo B, 2° Piso, Bahía Blanca (8000), Buenos Aires, Argentina. lujan.bustos@uns.edu.ar; gmeperillo@criba.edu.ar; ofpiccol@criba.edu.ar

ARTICLE INFO

Article history

Received May 2, 2017

Accepted July 26, 2017

Available online July 30, 2017

Handling Editor

Ernesto Schwarz

Keywords

Dinámica de playa

Médano frontal modificado

Perfiles de playa

Balance sedimentario

Pehuen Co (Argentina)

RESUMEN

Los asentamientos urbanos ocasionan una degradación de las playas haciéndolas más vulnerables a los efectos de eventos naturales (olas, mareas, vientos). Por este motivo, conocer el impacto del tipo de infraestructura o vegetación en médanos frontales puede ocasionar en la playa resulta de suma utilidad para la planificación urbana. En la localidad de Pehuen Co, al sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina), se analizó la evolución de un sector específico de la playa con diferentes coberturas del médano frontal para comprender su comportamiento general (erosión y/o acreción). Para ello, se realizaron perfiles de playa mensuales y luego de tormentas fuertes, desde julio de 2007 a junio de 2010. Se eligieron tres sectores diferentes, separados 50 m entre sí, para realizar los perfiles: 1) al lado de una edificación construida sobre el médano frontal, 2) sobre el pie del médano vegetado, y 3) sobre una bajada peatonal hacia la playa. Sobre los resultados se aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP) y se calcularon los volúmenes sedimentarios. Con el fin de completar el análisis se creó una matriz de doble entrada que permitió observar los desplazamientos y comportamientos de las geoformas en cada perfil. Finalmente, para evaluar los daños y respuesta en los perfiles de playa ante eventos erosivos se evaluó el impacto de uno de los temporales de viento más fuertes del período. Se concluyó que la cobertura del médano frontal es decisiva para la dinámica litoral. El impacto y la recuperación de la playa luego de eventos de tormenta fueron mejores donde había coberturas con vegetación. A su vez, los perfiles de playa en zonas con bajadas a la playa perpendiculares a la misma tuvieron fuertes procesos erosivos y lenta recuperación de sedimentos. Las diferentes respuestas de la playa según las condiciones que posee el médano frontal serán de ayuda a quienes deben tomar decisiones al momento de planificar la urbanización y emprendimientos a corto, medio y largo plazo sobre la franja costera.

EXTENDED ABSTRACT

Beach profile dynamics in zones with modified frontal dunes in Pehuen Co (Argentina)

Excessive anthropic occupation reduces the coastal extension and causes significant impacts on the ecosystem. Urban evolution in coastal areas has reached a point of no return. For this reason,

the knowledge about whether a particular type of infrastructure or vegetation on a frontal dune could cause greater or lesser impact on the beach is extremely useful for urban planning. The study area was Pehuen Co (Fig. 1), a town located in the southwest of the Buenos Aires Province (Argentina). The aim of this work is to analyze the evolution of beach profiles backed with different foredune cover in order to understand the erosion/accretion processes that may be related to the various dynamic conditions. This will provide useful information to decision makers for urban planning and sustainable management projects orientated for short, medium and long terms.

Pehuen Co is a dissipative beach with east-west coastal orientation within a region with alternating wet and dry periods. Normally, rains are concentrated in spring-summer, decreasing in autumn and becoming minimal in winter. The prevailing winds are from N and NW, with greater intensity in the spring and summer, mainly December and January.

The study area coincides with the smaller beach of the downtown sector (Fig. 2). To the west, the foredune has been heavily eroded and has a steep front, whereas to the east there are vegetated, large dunes. The dominant vegetation is *Tamarix gallica* and *Carpobrotus edulis*, which are not observed in the walkways to the beach or where there are infrastructures over the foredunes.

Beach profiles in different geomorphological situations were analyzed in order to describe their behavior. Three different sectors separated 50 m from each other were selected: ZC1 next to a restaurant on top of the frontal dune, ZC2 on the vegetated dune, and ZC3 on a walkway to the beach (Fig. 2). Monthly beach profiles were carried out from July 2007 to June 2010. The profiles were made using a modified version of the method proposed by Emery (1961), already developed in Bustos et al. (2013). The analysis of the beach profiles was performed seasonally (summer, autumn, winter and spring). Additionally, others were surveyed after strong storms. The profiles were digitalized and the volumes for the sediment budget and the Annual Variation Rate (AVR) were calculated. The volume was calculated considering a constant beach width equal to 1 m and a length defined by the shorter profile. Principal Component Analysis (PCA) was applied to complete the analysis of the seasonal beach profiles.

The study for all sectors demonstrated that during winter periods they all present concave profiles (Fig. 3), while during the summer periods were characterized by significant berms (Table 1). The profiles at ZC1 and ZC2 behaved rather similarly, whereas those at ZC3 were still more concave than the others. ZC3 during the winter of 2009 presented a 1.5 m microcliff on the dune front. Also, during the summer profiles showed areas of accumulation, mainly with the formation of berms and bars (Fig. 3).

The sedimentary balance reflected the behavior of the profiles, with volume increment in the summer periods and reduction in winter (Fig. 4). ZC1 presented a negative balance with an erosional trend. ZC3 profiles had the highest losses, with up to 60 m³ of erosion in the winter of 2008. The TVA for both profiles were negative, for ZC1 it was -12.9 m³/yr, and for ZC3 of -20.3 m³/yr. In contrast, ZC2 had a positive TVA (9.9 m³/yr). Its largest gain occurred in Autumn 2009 (65.6 m³) (Fig. 4). ZC3 showed more concave profiles than the rest and represents the place with higher sediment loss, especially during rainfall. The entrances to the beach are constructed perpendicularly to the coast and without vegetation protection. For this reason, they are easily eroded, mainly by rainwater runoff.

Monthly characteristics and trends in the behavior of the beach profiles were obtained by applying a PCA. The average profile of ZC1 presented a stable line with a slight concave tendency. Sediment loss was mainly observed in summer, winter and autumn; accretion occurred in spring (Fig. 5). The ZC2 profile showed a slightly concave shape, similar to ZC1, while small erosion cycles were observed every three months. The average profile showed losses in winter, spring and autumn, whereas it only gained sediment in summer (Fig. 6). The average profile in ZC3 is more concave than ZC1 and ZC2. The temporal components showed an erosion trend, with cycles of approximately six months of accretion-erosion. During autumn, winter and spring the sediment of the average profile decreased while increased in the summer (Fig. 7).

In order to evaluate the damages and response of the beach profiles to erosive events, the impact of a wind storm that occurred between 22 and 23 July is presented as an example. This event on the beaches of Pehuen Co was originated due to an extensive frontal storm. The winds associated with the front prevailed from the south with a maximum

intensity of 63.7 km h^{-1} . The total length of the event was approximately 33 h. The waves on the beach, favored by the strong wind, reached 5 m in height (based on SMN map data).

Beach profiles were made before and after the event to estimate volumetric differences. The effects on the beach and buildings were analyzed by field recognition after the event. Based on the profile data, we observed an erosive behavior with the profile becoming concave.

ZC1 had a total volume loss of 3.17 m^3 , specifically on the backshore. The rest of the beach remained basically constant. The erosion caused damage to the infrastructures over the dune. In September (2009) the profile had recovered 2.38 m^3 with respect to the pre-storm profile. The ZC2 had a behavior similar to ZC1 in terms of sediment loss and gain. A volume of -9.16 m^3 was lost. In September, a sediment recovery from the pre-storm profile of 9.04 m^3 was observed (Fig. 8). ZC3 had significant erosion in the dune area, with an escarpment of 1.6 m high. In this zone of the backshore, a volume loss of 6.51 m^3 was recorded between the pre- and post-storm profiles. In September, this profile did not recover as in the other two sites (ZC1 and ZC2). The escarpment began to diminish in height on December, four months after the storm occurred (Fig. 8).

The ability to differentiate the behavior of the beach according to the coverage of its frontal dune is fundamental for land-use planning. Therefore, to find solutions applicable in the short and medium term is important to the natural balance, economic and social growth of these cities. It is concluded that in an erosive zone such as the central area of Pehuen Co, the frontal dune cover is decisive for coastal dynamics. The impact and recovery of the beach after storm events were better developed in places with vegetation cover over the dunes. In turn, the beach profiles in areas with perpendicular entrances to the beach had strong erosion processes and slow recovery. We recommend to modify the entrances to the beach and reduce their number as much as possible. Therefore, risk maps are needed in order to generate better planning for coastal urban development.

Keywords: Beach dynamics, Modified frontal dunes, Beach profiles, Sediment budget, Pehuen Co (Argentina).

INTRODUCCIÓN

Un gran número de actividades se desarrollan en las zonas costeras, atrayendo población e inversiones (Liste *et al.*, 2004). En las últimas décadas se ha potenciado con el desarrollo de grandes urbes en las costas y, en especial, del turismo (Dadón *et al.*, 2002; Jiménez y Valdemoro, 2003). La zona costera es el ambiente que presenta los mayores gradientes en casi todas las variables intervinientes por lo que es donde las mayores energías están disponibles para su modificación (Perillo y Piccolo, 2011). El litoral es el amortiguador del intercambio de energía, básicamente del oleaje y del viento (Carter, 1991). Las olas de tormentas ocasionan daños en todas las costas (Bird, 2008). La ocupación antrópica desmedida reduce la franja costera y los impactos son más significativos (Del Pozo *et al.*, 2000; Phillips y Jones, 2006). Los asentamientos urbanos ocasionan una degradación de las playas haciéndolas más vulnerables a los efectos de vientos, corrientes y tormentas (Hill *et al.*, 2004).

A nivel mundial se han estudiado ampliamente los impactos de diferentes eventos meteorológicos sobre las costas (Houser, 2013; Olivares *et al.*, 2015; Scott *et al.*, 2016; O'Rourke, 2017; entre otros), las tendencias de erosión o acreción en sectores urbanizados y no urbanizados (Merlotto y Bértola, 2008; Olivares *et al.*, 2015; Pérez-Briceño *et al.*, 2016; Takagi *et al.*, 2016) o zonas costeras con reservas naturales o arqueológicas (O'Rourke, 2017). En Argentina también se han estudiado los procesos erosivos en médanos y playas, especialmente en las costas de la provincia de Buenos Aires, siendo los eventos más erosivos los ocasionados por vientos del sudeste y sudoeste (Merlotto y Bértola, 2008; Bértola *et al.*, 2009; Codignotto *et al.*, 2011; Bustos *et al.*, 2011). Asimismo, se ha encontrado escasa bibliografía sobre procesos erosivos y/o acumulativos en diferentes coberturas de los médanos frontales.

La localidad de Pehuen Co, al sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina) (Fig. 1), presenta el marco adecuado para el objetivo de este trabajo, el cual es introducir un análisis del balance sedimentario de perfiles de playa con diferentes coberturas del médano frontal. Luego, se presenta el comportamiento de estos perfiles posterior a la ocurrencia de una tormenta intensa. Esto será un aporte al conocimiento sobre las costas. El conocer si un médano con un tipo de infraestructura o

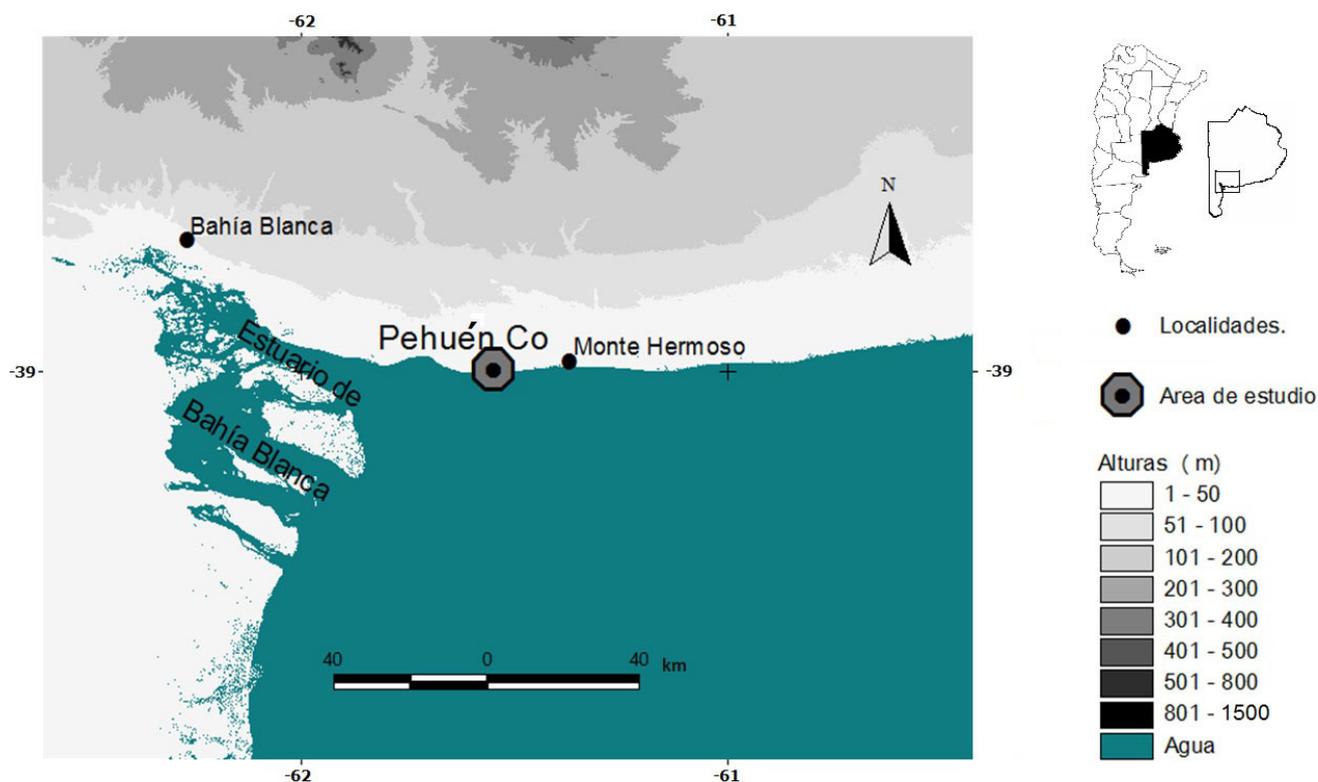


Figura 1. Ubicación de la localidad de Pehuen Co al sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina).

Figure 1. Location of the town of Pehuen Co in the southwest of the Buenos Aires province (Argentina).

vegetación en particular puede ocasionar mayor o menor impacto en la playa es de suma utilidad para la planificación urbana.

ÁREA DE ESTUDIO

Pehuen Co posee una playa disipativa con dos o tres barras paralelas. Las mareas son semidiurnas, con un nivel medio de 1,94 m por encima del plano de reducción. La altura media de pleamar es de 3,37 m y la de bajamar de 0,75 m (SHN, 2015). Según mediciones realizadas entre los años 2007-2012, la dirección predominante de las olas es del sur, con alturas promedio de 0,8 m y período promedio de 7 s (Bustos, 2012). Las rompientes son de tipo derrame, las corrientes litorales predominantes son las que fluyen con dirección oeste y la temperatura media anual del agua de mar es de 13,8° C (Bustos, 2012). Según datos de la estación meteorológica EMAC localizada en Pehuén Co, la temperatura media anual es 13,6° C. Las temperaturas en primavera-verano presentan un promedio de 16,7° C, mientras que en otoño-invierno el promedio es de 9,9° C. La

temperatura máxima media anual es 27,1° C y la mínima media anual 3,5° C. La precipitación anual de esta zona se encuentra en los 326 mm, estimados para el período 2005-2009, con una máxima en el año 2007 de 489 mm. Es una región de períodos húmedos y secos alternados. Normalmente, las lluvias se concentran en primavera-verano, decrecen en otoño, haciéndose mínimas en invierno. Los vientos predominantes son del N y NW, soplando con mayor intensidad en los meses de primavera y verano, principalmente en diciembre y enero. Su velocidad media anual oscila entre 7 y 25 km h⁻¹ (Bustos, 2012).

La zona de estudio coincide con el centro de la villa balnearia y con el menor ancho de playa de la costa de Pehuen Co, por lo cual el movimiento de personas es mucho mayor respecto de los otros sectores. Si bien la población permanente es baja (700 habitantes según el INDEC, 2010), en temporada estival, visitan el balneario más de 600.000 turistas (<http://www.rosalesmunicipio.gob.ar>). El sedimento en este sector es el más fino del balneario, compuesto por arena fina de 0,20 mm (2,31 ϕ). Hacia el oeste se

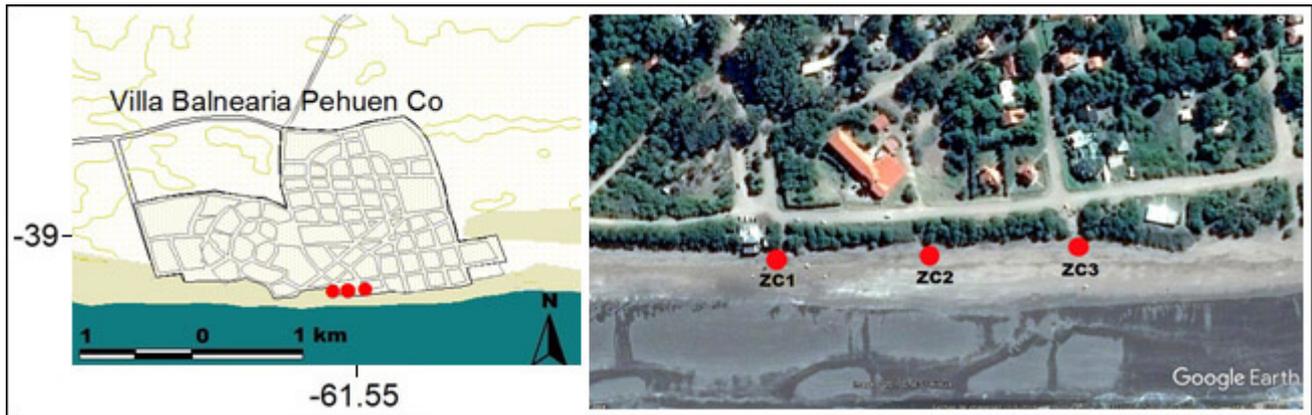


Figura 2. Ubicación de los tres perfiles de estudio: ZC1, ZC2 y ZC3.
Figure 2. Location of the three studied profiles: ZC1, ZC2, and ZC3.

encuentran acantilados, y médanos hacia el este. Los médanos se encuentran vegetados con tamariscos (*Tamarix gallica*) y uña de gato (*Carpobrotus edulis*). Esta vegetación no se observa en las bajadas peatonales a la playa o cuando hay paradores sobre la línea de médanos.

METODO DE TRABAJO

Perfiles de playa

Para este trabajo se realizaron perfiles de playa mensuales y luego de tormentas intensas, desde julio de 2007 a junio de 2010. Para realizarlos se adaptó el método de jalones propuesto por Emery (1961) y desarrollado en Bustos *et al.* (2013). Esta metodología permitió percibir el comportamiento de la playa en función del tiempo. Se realizó el trazado de los mismos en sentido perpendicular a la playa, desde los mojones ubicados en el espaldón, hasta un metro por debajo del pelo de agua en momentos de bajar.

Los perfiles de playa se distribuyeron en la zona centro de la villa y coincidente con la punta de la saliente Pehuen Co (Fig. 1). Debido a que se buscó analizar el comportamiento de los perfiles en diferentes situaciones geomorfológicas, se seleccionaron 3 sectores para realizar los perfiles, los cuales estaban separados 50 m entre sí (Fig. 2): perfil ZC1, al lado de un parador construido sobre el médano frontal, perfil ZC2, sobre el pie del médano vegetado con tamariscos y uña de gato, perfil ZC3, sobre una bajada peatonal hacia la playa.

Luego, en gabinete, mediante el programa Grap-

her 6.1.21, se trazaron los perfiles de playa (Fig. 3). El análisis de los mismos se realizó por estación del año (verano, otoño, invierno y primavera). Con el fin de completar el análisis se creó una matriz de doble entrada que permitió observar mejor los desplazamientos y comportamientos de las geoformas en cada perfil. Este cuadro incluyó bermas, bermas de tormenta, canales, barras y perfiles cóncavos cuando no aparecían en el perfil ninguna de las geoformas de acumulación (Tabla 1). Estos datos se tomaron para cada perfil estacional.

Con el programa que se trazaron los perfiles también se calcularon los volúmenes para el balance sedimentario. El área se calculó considerando un ancho de playa constante e igual a 1 m y una longitud marcada por el perfil de menor extensión. Para la realización del balance sedimentario se restó el valor del volumen de cada perfil al volumen del perfil inicial, obteniendo así el comportamiento del sedimento respecto de la primera medición. Con los datos del balance sedimentario, se obtuvo la Tasa de Variación Anual de sedimentos:

$$TVA = \frac{(V_f - V_i)}{n_a} \quad (1)$$

donde V_f es el volumen de sedimentos de la última medición, V_i es el volumen de sedimentos de la primera medición y n_a el número de años de datos.

Debido a que los sectores de medición estaban muy cercanos (50 m de separación) los datos de temperatura del agua, altura y período de olas y muestreo de sedimentos se realizaron sólo en un

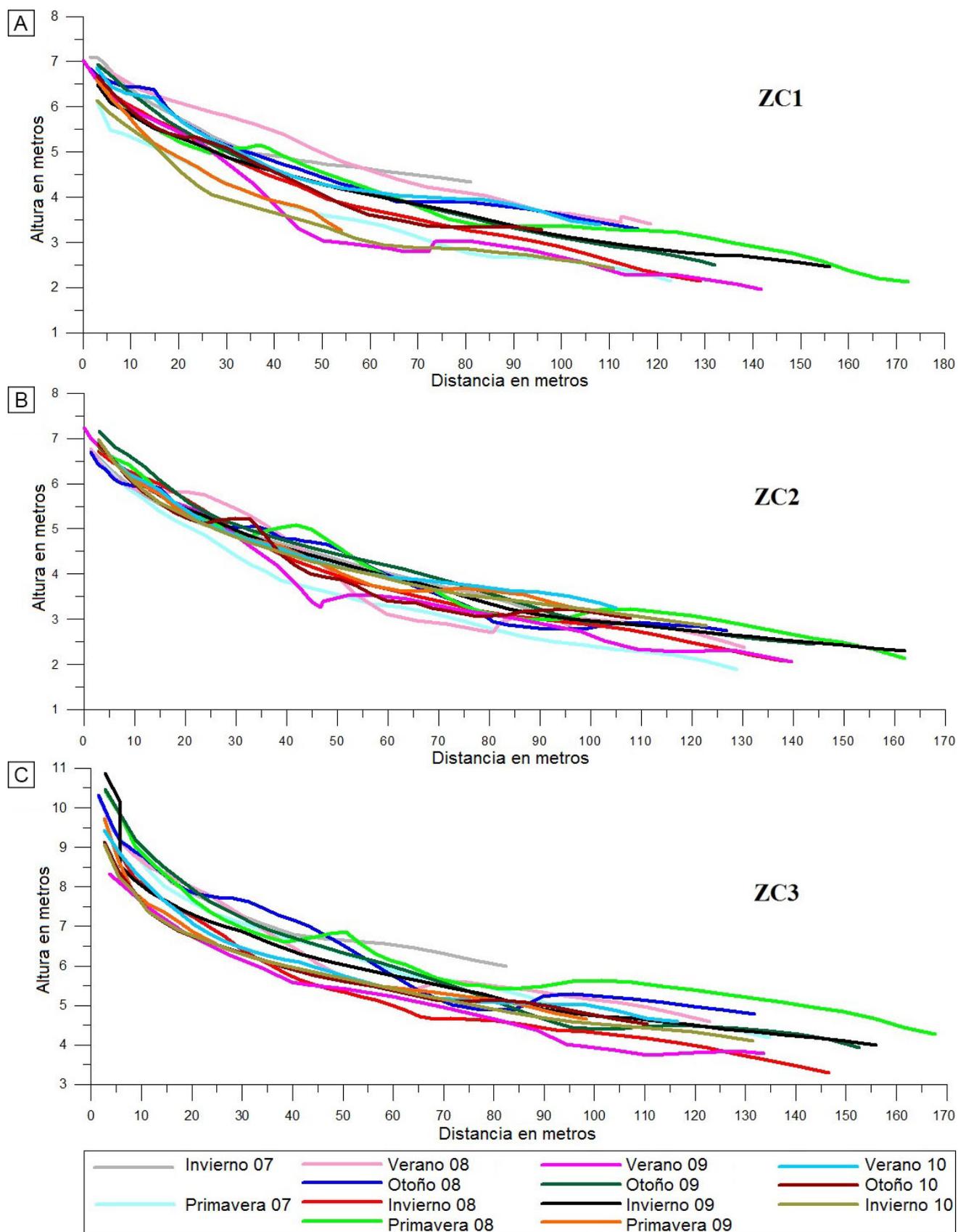


Figura 3. Perfiles de playa estacionales del sector ZC.
Figure 3. Seasonal beach profiles of the ZC sector.

Estación del año	Berma de tormenta			Berma			Canal			Barras			Perfil cóncavo		
	ZC1	ZC2	ZC3	ZC1	ZC2	ZC3	ZC1	ZC2	ZC3	ZC1	ZC2	ZC3	ZC1	ZC2	ZC3
Invierno 07															
Primavera 07															
Verano 08															
Otoño 08															
Invierno 08															
Primavera 08															
Verano 09															
Otoño 09															
Invierno 09															
Primavera 09															
Verano 10															
Otoño 10															
Invierno 10															

Tabla 1. Geoformas presentes en cada estación del año para los tres perfiles de la playa de Pehuen Co.

Table 1. Geoforms present in each season for the three profiles in Pehuen Co beach.

perfil y siguiendo el método propuesto en Bustos *et al.* (2013).

$$P_m = \frac{(X_2 - X_1)}{N} \tag{2}$$

Análisis de componentes principales de la playa

Para complementar el análisis de los perfiles de playa estacionales se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP), siguiendo la metodología descrita en Winant *et al.* (1975) y Cuadrado y Perillo (1997). Se aplicó para representar los cambios a los que se somete un perfil por medio del menor número de funciones ortogonales (autofunciones) (Medina *et al.*, 1990; Muñoz Pérez *et al.*, 2001).

Para este método, según la metodología utilizada, es necesario un intervalo equidistante en espacio y tiempo, por lo cual se creó una planilla con los datos de altura interpolados cada 2 m de distancia. A las fechas del calendario gregoriano en que se realizaron las mediciones se las reemplazó por días julianos. A estos se los interpoló para normalizarlos cada 30 días.

Con la nueva planilla de datos normalizados en distancia y fecha se realizó el promedio por fila (para cada dato de distancia) para obtener el perfil medio (P_m):

donde X es la fecha juliana y N la cantidad de días acumulados. Se realizó el mismo procedimiento para la matriz traspuesta para obtener el promedio en función del tiempo (Cuadrado y Perillo, 1997). El P_m se restó a cada valor de la matriz para dejar sólo las variaciones (Winant *et al.*, 1975; Muñoz Pérez *et al.*, 2001).

A todas las matrices, en función del tiempo y distancia y restando o no el P_m , se les aplicó ACP sobre la matriz de correlación. Con esto se obtuvieron los factores de puntuación (*factor score*), los cuales muestran las variaciones en distancia y tiempo de los perfiles, tanto del perfil medio, como de la función berma y función terraza, según las denominaciones dadas por Winant *et al.* (1975).

Impacto de tormentas sobre la playa

Se utilizó la información de velocidad del viento para estimar cambios geomorfológicos en la playa según la metodología propuesta por Bustos *et al.* (2011). Para evaluar los daños y respuesta de los

PERFIL	ZC1	ZC2	ZC3
1° Componente (función del perfil medio de playa)	98,23	98	98,59
2° Componente (función barra-berma)	1,24 (45,12)	1,35 (55,8)	0,98 (62,44)
3° Componente (función terraza)	0,29 (30,75)	0,38 (22,54)	0,19 (16,16)
4° Componente	0,14 (13,91)	0,13 (9,49)	0,15 (9,13)
5° Componente	0,05 (6,26)	0,07 (6,8)	0,03 (1,66)

Tabla 2. Análisis de Componentes Principales sobre los tres perfiles en estudio. Los números entre paréntesis representan los autovalores obtenidos al descontar a los datos el valor medio en el tiempo.

Table 2. Empirical Orthogonal Functions for the three studied profiles. The numbers in parentheses represent the eigenvalues obtained after subtracting the mean value over time.

perfiles de playa ante eventos erosivos típicos de la zona se evaluó el impacto de uno de los temporales de viento más fuertes del período de estudio. Este se presentó entre los días 21 y 24 de julio de 2009. Para el análisis de dicho evento se analizaron las cartas sinópticas de superficie y altura del Ministerio de Ciencia y Tecnología de Brasil (www.cptec.inpe.br) y del Servicio Meteorológico Nacional (www.smn.gov.ar). Por el tamaño e importancia de las olas en este evento se decidió considerar el pronóstico numérico de olas del Servicio Meteorológico Nacional. También se efectuaron perfiles de playa antes y después de ocurrido el evento. Luego se calcularon las diferencias volumétricas de los perfiles. También se comparó mediante superposición de los perfiles, la erosión y depositación ocasionada por el evento. Los efectos sobre la playa y edificaciones se analizaron mediante reconocimiento en campo con posterioridad al evento.

RESULTADOS

Análisis geomorfológico de los perfiles de playa

Las pendientes de esta zona registraron una media de 2,2°, ligeramente suave según la clasificación del MOPUT (1991). Todos los inviernos presentaron pendientes de mayor grado (superiores a 2°). El invierno de 2009 tuvo un mayor aumento de ésta debido a que las tormentas de ese año fueron muy fuertes ocasionando acantilados en la zona del espaldón. Esto fue acompañado por el mayor tamaño de granulometría registrado en la playa distal (1,57 ϕ) acompañado, en ocasiones, con alta concentración

de minerales pesados en la playa distal. En los veranos normalmente sucedió lo contrario, ya que los valores de pendiente tendieron a disminuir.

Los tres perfiles analizados mostraron, a simple vista, un comportamiento erosivo con perfil cóncavo (Fig. 3). Al realizar una observación más detallada de las geoformas presentes por estación del año (Tabla 1) se encontró que todos tuvieron perfiles cóncavos durante los inviernos, sin excepción. Los veranos se caracterizaron por importantes bermas. Los perfiles ZC1 y ZC2 se comportaron de forma muy similar. A excepción de la primavera de 2009, cuando ZC1 tuvo un perfil con berma y ZC2 un perfil cóncavo sólo con berma de tormenta (Tabla 1). Ambos perfiles (ZC1 y ZC2) tuvieron similares valores de pendiente (Tabla 2), no así en el ancho medio de la playa que fue de 172 m para ZC1 y 162 m para ZC2. Los perfiles realizados en ZC3 tuvieron un ancho medio de playa de 168 m y la pendiente media de mayor valor de los 3 perfiles (2,6°) (Tabla 2). Además, los perfiles ZC3 fueron más cóncavos en el período de estudio que los de ZC1 y ZC2. Incluso durante el invierno de 2009 presentó un acantilado de 1,5 m producto de erosión. Asimismo, en los veranos mostró perfiles con zonas de acumulación, principalmente bermas y barras en la playa frontal (Tabla 1).

El balance sedimentario reflejó el comportamiento de los perfiles, con incrementos de volumen en los veranos y reducción en invierno (Fig. 4). Los perfiles ZC1 tuvieron geoformas similares a los trazados sobre ZC2 pero, a diferencia de éste, el perfil ZC1 presentó un balance negativo y con tendencia a la erosión. Los perfiles ZC1 y ZC3 a diferencia de las geoformas presentadas en los perfiles poseen un

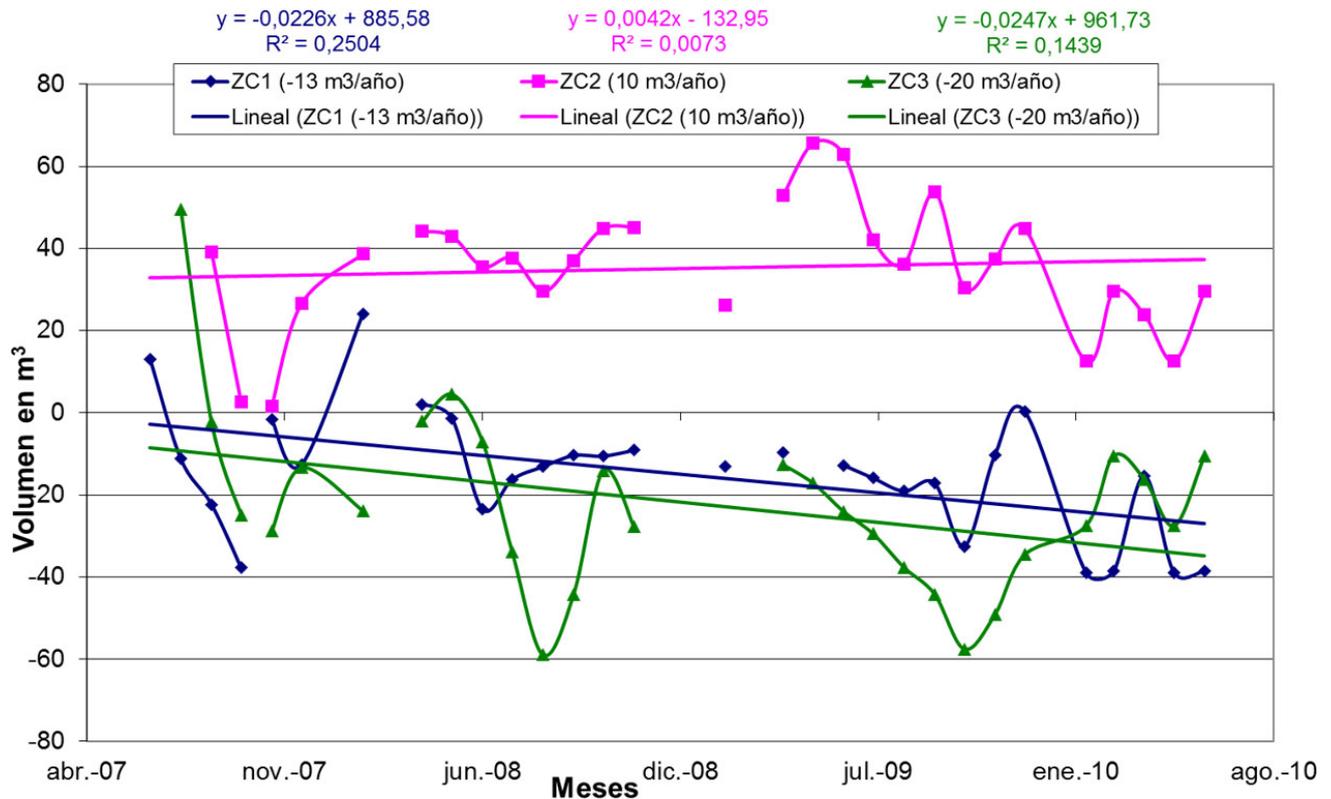


Figura 4. Balance sedimentario de los perfiles ZC.
Figure 4. Sedimentary budget of ZC profiles.

comportamiento similar en épocas de incremento y reducción de sus volúmenes, siendo más acentuadas las variaciones en el sector de ZC3. Ambos perfiles tuvieron balances negativos, siendo ZC3 el de mayores pérdidas, con hasta 60 m³ de erosión en el invierno de 2008. La TVA para ambos perfiles fue negativa, para ZC1 fue de -12,9 m³/a y para ZC3 de -20,3 m³/a. En cambio, ZC2 tuvo un balance positivo (Fig. 4). Si bien tuvo variaciones en su volumen, nunca presentó pérdidas respecto al primer perfil medido. Su mayor ganancia fue en otoño de 2009 con un aumento de 65,6 m³. Su TVA fue positiva con 9,9 m³/a (Fig. 4).

El perfil ZC3 mostró más perfiles cóncavos en el período de estudio que los del resto de su zona (Tabla 1). Representó el lugar con mayores pérdidas de sedimento resultado de la acción erosiva producida especialmente durante las precipitaciones. Las bajadas de playa están construidas en forma perpendicular a la playa y sin protección vegetal por lo que son fácilmente erosionadas, principalmente por la escorrentía del agua de lluvia. Asimismo, en los veranos mostró perfiles con zonas de acumulación,

principalmente bermas y barras en la playa frontal.

Análisis de Componentes Principales

Mediante el ACP se pudo obtener las características y tendencias mensuales en el comportamiento de los perfiles de playa. En la tabla 2 se presentan, en porcentaje (%), los autovalores correspondientes a las 5 primeras autofunciones para los 3 perfiles estudiados. La primera componente representa el porcentaje más alto de la varianza (mayor al 95 %) y el perfil medio de la playa, por ello se denomina “función media de playa”. El resto de las componentes presentan valores bajos para su análisis. Por este motivo se restó la media a los datos originales y se volvió a aplicar ACP obteniendo nuevos valores que fueron expresados entre paréntesis “(x)” (Tabla 2). De esta forma la segunda componente quedó representada con valores entre 37 y 65 %. Esta componente al graficarla representó un mínimo en la posición de la barra y un máximo en la posición de la berma y se la denomina “función barra-berma” o “función berma” (Winant *et al.*, 1975). La tercera

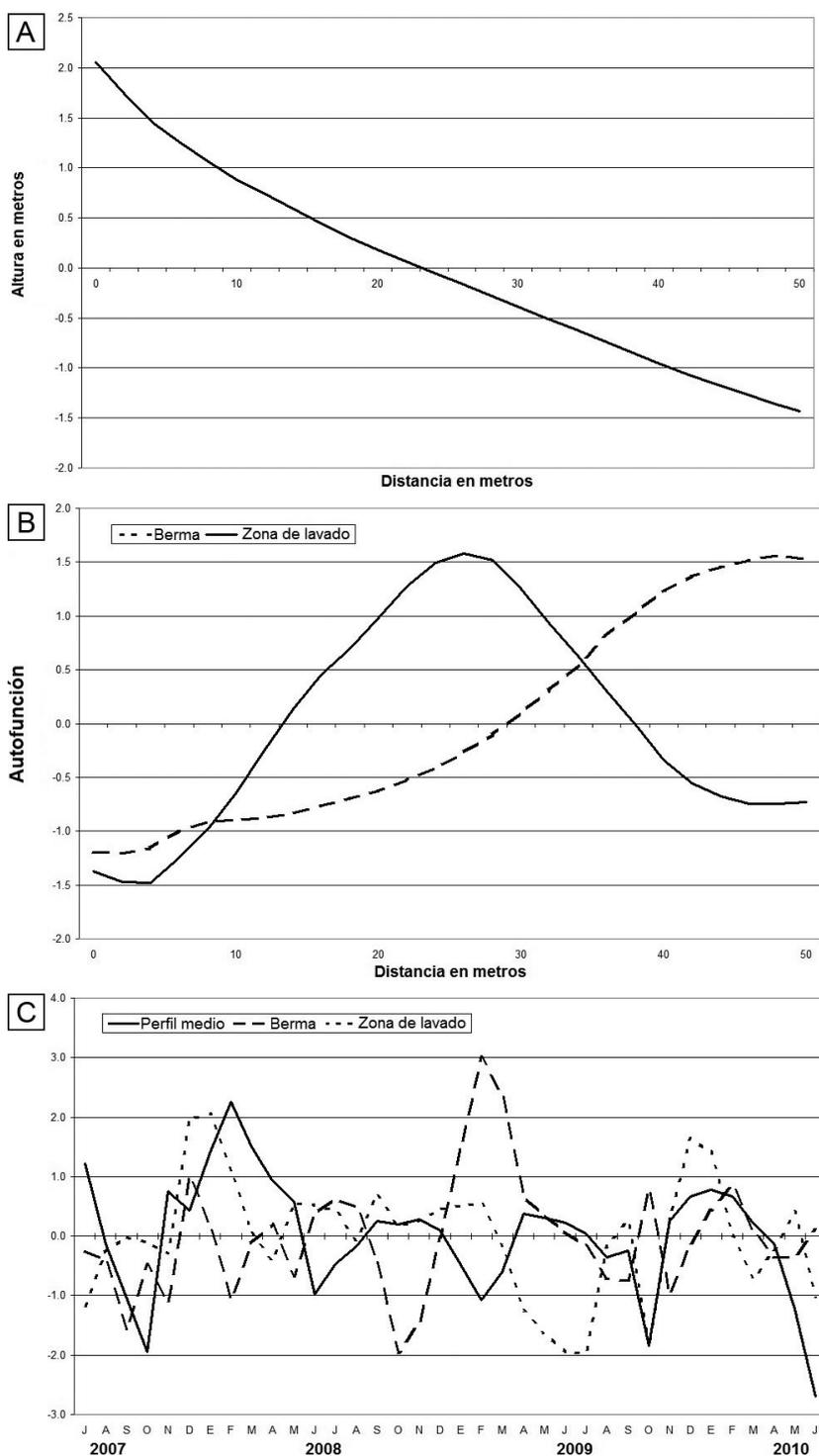


Figura 5. Autofunciones de los perfiles de playa de ZC1. **a)** Función del perfil medio, **b)** Función berma y función terraza, y **c)** Variación en el tiempo de las funciones berma, terraza y perfil medio.

Figure 5. Eigenfunctions of the beach profiles of ZC1. **a)** Average profile function, **b)** Berm and terrace function, and **c)** Variation in time of the berm, terrace and average profile functions.

componente al ser graficada mostró un máximo en la posición de la playa frontal coincidente con canales o barras de lavado denominada “función terraza” (Winant *et al.*, 1975).

De los datos de perfiles aplicando ACP se obtuvieron 3 gráficos para cada perfil: a) referido al perfil medio obtenido a partir de la primera compo-

nente en función de la distancia; b) referido al comportamiento de la berma y de la terraza, también en función de la distancia; c) referido al perfil medio, el comportamiento de la berma y de la terraza en función del tiempo (Figs. 5-7).

El perfil medio de ZC1 presentó una línea estable con leve tendencia cóncava (Fig. 5a). La berma se

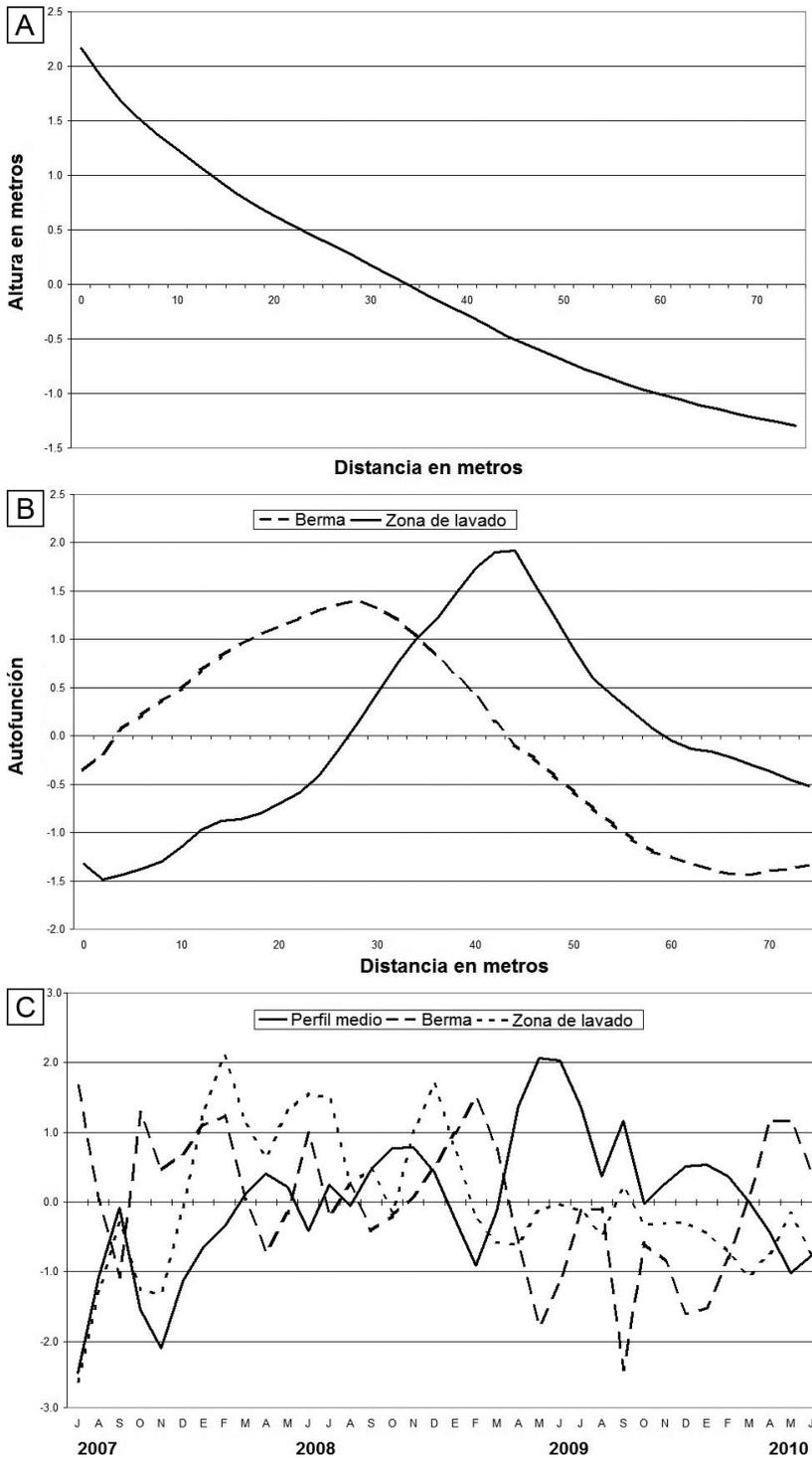


Figura 6. Autofunciones de los perfiles de playa de ZC2. **a)** Función del perfil medio, **b)** Función berma y función terraza, y **c)** Variación en el tiempo de las funciones berma, terraza y perfil medio.
Figure 6. Eigenfunctions of the beach profiles of ZC2. **a)** Average profile function, **b)** Berm and terrace function, and **c)** Variation in time of the berm, terrace and average profile functions.

generó en la playa distal, las barras y canales en la playa frontal (Fig. 5b). Temporalmente, las pérdidas se observaron principalmente en verano, invierno y otoño (Fig. 5c). En las primaveras se generaron ganancias de sedimentos. El perfil mostraba una tendencia a la acreción hasta el verano de 2007/08 cuando comenzó una reducción paulatina del volu-

men de sedimentos. Las bermas se formaron en primavera y verano, especialmente en el verano de 2008/09. Las barras se encontraron en verano y otoño y los canales en invierno y primavera. El perfil medio presentó un fuerte descenso, que se continuó en el tiempo, luego de los meses de verano 2009/10.

El perfil ZC2 mostró una forma levemente

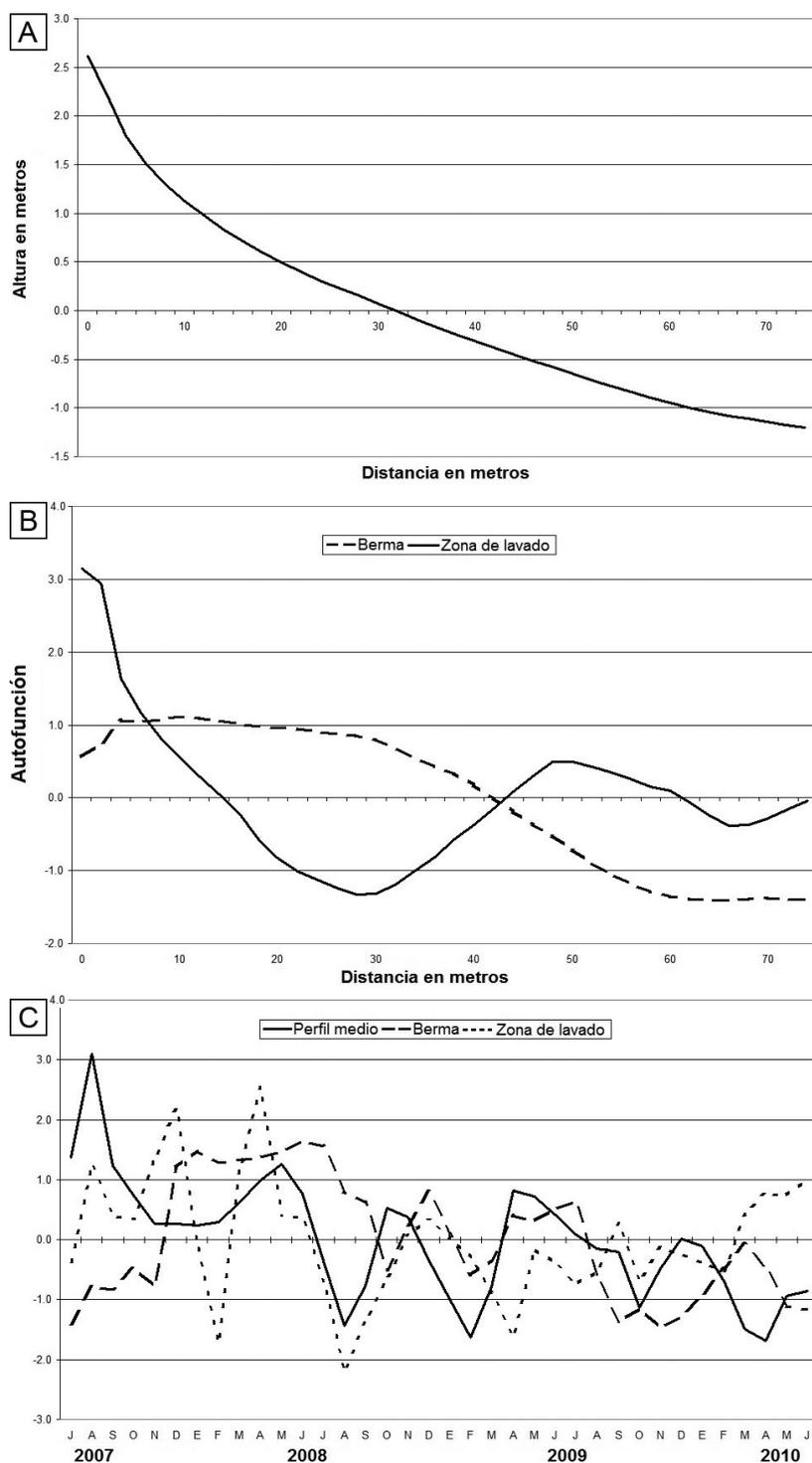


Figura 7. Autofunciones de los perfiles de playa de ZC3. **a)** Función del perfil medio, **b)** Función berma y función terraza, y **c)** Variación en el tiempo de las funciones berma, terraza y perfil medio. **Figure 7.** Eigenfunctions of the beach profiles of ZC3. **a)** Average profile function, **b)** Berm and terrace function, and **c)** Variation in time of the berm, terrace and average profile functions.

cóncava, similar a ZC1 (Fig. 6a). La berma alcanzó su punto más alto en la playa distal. En la zona de terraza se formaron barras a los 40 m del inicio del perfil y canales poco desarrollados (Fig. 6b). Temporalmente se observaron pequeños ciclos de erosión cada 3 meses aproximadamente (Fig. 6c). El perfil medio mostró pérdidas en invierno, primavera

y otoño, sólo tuvo ganancias en verano. En verano se formaron las bermas y en invierno las bermas de tormenta. Los canales, aunque reducidos, estuvieron en todas las estaciones y las barras se generaron en el verano 2007/08, primavera 2008 y otoño 2010.

En el perfil ZC3 se observó un perfil medio de forma más cóncava que ZC1 y ZC2 (Fig. 7a). La

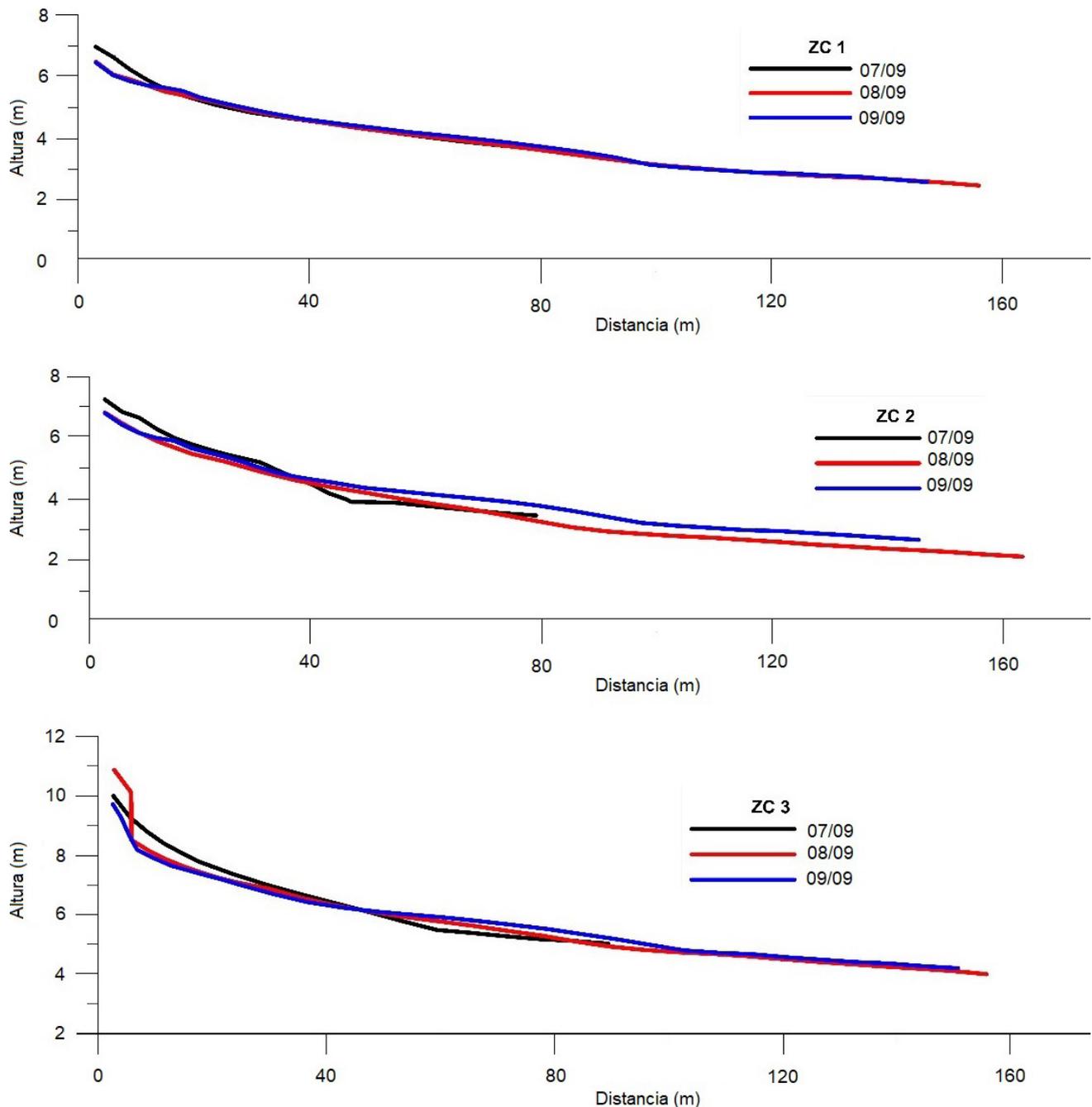


Figura 8. Perfiles de los tres sectores de Pehuen Co antes y después del evento del 22 y 23 de julio de 2009. Eje vertical exagerado para visualizar los cambios.

Figure 8. Profiles of the three sectors of Pehuen Co before and after the event of 22 and 23 July 2009. The vertical axis was exaggerated to visualize the changes.

berma se formó en la playa distal con poca elevación (Fig. 7b), mientras que la zona de terraza mostró dos zonas de canales y barras poco desarrollados. Las componentes temporales mostraron una tendencia a la erosión, con ciclos de 6 meses aproximadamente de acreción-erosión (Fig. 7c). Los otoños, inviernos

y primaveras disminuyeron el sedimento del perfil medio mientras que en verano se observaron aumentos (excepto en 2010 debido al evento de precipitaciones ya mencionado). Las bermas se formaron principalmente en verano. Los canales se generaron en todas las estaciones. La berma y la zona de terraza

acompañaron el ritmo de los ciclos mencionados junto al perfil medio.

Cambios en la geomorfología de la playa durante julio de 2009

El evento ocurrido en las playas de Pehuen Co el 22 y 23 de julio de 2009 se originó debido a la presencia de un centro ciclónico (996 hPa), localizado en el océano Atlántico, asociado a una extensa zona frontal que llegó a la provincia de Buenos Aires. Los vientos asociados al frente predominaron de los cuadrantes del sur el día 22 con ráfagas máximas de 63,7 km h⁻¹. El aumento de la velocidad del viento comenzó a las 5 h y sus mayores velocidades se extendieron hasta las 20 h el mismo día. Luego, el viento comenzó a rotar hacia el cuadrante sudoeste y escasamente superó los 55 km h⁻¹ el día 23 de julio. La extensión total del evento fue de aproximadamente 33 horas. El 22 de julio el viento fue acompañado de 20,6 mm de precipitaciones.

Este sistema generó trenes de olas de hasta 9 m de altura (datos del SMN) que viajaron por la plataforma, con dirección este-oeste, hasta impactar en la costa del sudoeste bonaerense. Los trenes de olas afectaron profundamente la playa durante dos pleamares. Las olas en la playa, favorecidas por las fuertes ráfagas de viento, llegaron a los 5 m de altura, según el modelo numérico del SMN, erosionando gran parte de los sedimentos en los sectores analizados provocando una destrucción en la playa.

El perfil ZC1 tuvo una pérdida de volumen total de -3,17 m³. La zona del espaldón fue el lugar donde disminuyó su volumen lo que representó una clara erosión del mismo (Fig. 8). El resto de la playa permaneció en similares condiciones. La erosión ocasionó algunos daños en las infraestructuras ubicadas sobre el espaldón. También se erosionó un médano vegetado lindero al parador, perdiendo los tamariscos que lo fijaban. Al mes siguiente (septiembre de 2009) el perfil había recuperado 2,38 m³ respecto del volumen del perfil previo a la tormenta. Esta acumulación se dio en forma de bermas, una cercana al espaldón y otra más amplia a los 80 m de distancia del mojón inicial.

El perfil ZC2 tuvo un comportamiento similar a ZC1 en cuanto a pérdida y ganancia de sedimentos. Asimismo, las geoformas fueron más acentuadas (Fig. 8). Disminuyeron los sedimentos en la zona de la playa distal, se perdió un volumen de -9,16

m³. En tanto que un canal formado producto de la pendiente de la berma quedó cubierto luego de la tormenta con 3,1 m³ de sedimentos. El resto de la playa continuó en similares condiciones. En septiembre, la zona de la playa distal continuó igual que en el perfil post tormenta, pero la zona de la playa frontal aumentó su volumen en 14,3 m³. Esto representó una recuperación de sedimentos respecto del perfil previo a la tormenta de 9,04 m³.

El perfil ZC3 tuvo una erosión importante en la zona del médano, donde se formó una escarpa de 1.6 m de alto en el espaldón (Fig. 8). En esta zona de la playa distal hubo una pérdida de sedimentos entre el perfil previo y el posterior a la tormenta de -6,51 m³. Pero, tal como sucedió en el perfil ZC2, el canal producto de la pendiente de la berma quedó cubierto de sedimentos, lo que ocasionó en esa zona una ganancia de 1,55 m³. En total, la pérdida de sedimentos posterior a la tormenta fue de -2,44 m³. En septiembre, este perfil no llegó a recuperarse como los otros dos (ZC1 y ZC2). La pérdida de sedimentos respecto al perfil pos tormenta en la zona de la playa distal fue de -5,4 m³ y una ganancia en la zona de la playa frontal de 2,6 m³. En suma, el perfil perdió sedimentos, en comparación con el perfil de julio (previo a la tormenta) disminuyó su volumen en -0,55 m³. La escarpa comenzó a suavizarse en diciembre, es decir, 4 meses después de ocurrida la tormenta.

DISCUSION

Las urbanizaciones costeras al igual que la erosión aumentan año a año, y ambos procesos van unidos (Hill *et al.*, 2004; Takagi *et al.*, 2016; Aouiche *et al.*, 2016). Numerosos estudios han comparado el comportamiento de perfiles de playa en sectores urbanizados y no urbanizados (Bustos *et al.*, 2011; Pérez-Briceño *et al.*, 2016). En Pehuen Co, Bustos *et al.* (2010) compararon los balances sedimentarios de perfiles en un área urbanizada y otra no urbanizada y encontraron una mayor pérdida de sedimentos en relación a la primera. El poder diferenciar el comportamiento de la playa según el estado o la cobertura de su médano frontal es fundamental para la planificación del uso del suelo. La variación entre los perfiles con edificación o los de vegetación sobre el médano coinciden con los de López *et al.* (2016), en su estudio sobre el cabo San Antonio (Argentina). Estos autores encontraron que fijar los

médanos costeros mediante especies alóctonas o el arrasamiento total o parcial de ellos para el trazado de avenidas costaneras o edificaciones, provocan alteraciones en la hidrodinámica y aerodinámica generando erosión costera.

Una tormenta ocasiona efectos diferentes en los perfiles de playa de distintas áreas de una costa (Lee *et al.*, 1998). Hill *et al.* (2004) al estudiar las costas del sur de Maine (USA) encontraron que playas con un entorno desarrollado, es decir, más modificadas por el hombre (viviendas, calles, vegetación, etc.) presentaban una mayor vulnerabilidad ante determinadas tormentas que otras playas moderadamente desarrolladas o sin desarrollar. En toda la costa de la provincia de Buenos Aires los eventos de viento denominados “Sudestadas” y también las “Sudoestadas” ocasionan importantes eventos de erosión y pueden elevar el nivel medio del mar hasta 2 m (Marcomini y López, 2008). Se producen todo el año y duran entre 24 y 140 horas. Consecuencia de estos eventos, por ejemplo, en el norte de la provincia, Bértola *et al.* (2006) evidenciaron un gran aumento de pendiente en la playa a causa de la acción de olas y vientos del sudoeste. También Marcomini y López (1997) y Fiore *et al.* (2009) coincidieron sobre el efecto erosivo y la elevación del nivel medio del mar ocasionado por las Sudestadas. Hacia el sur de la provincia, en la localidad de Pehuen Co, Bustos *et al.* (2011) hallaron que tanto los eventos de Sudestada como los de Sudoestada, ocasionaban efectos erosivos en las playas pero, estas últimas fueron más predominantes en ocurrencia generando las mayores pérdidas de sedimento. También, a 20 km al este de Pehuen Co, se observaron los efectos de las tormentas sobre la geomorfología de la playa concluyendo que las Sudestadas ocasionaban grandes daños en la costa (Caló *et al.*, 2000). Como tendencia general, los perfiles de este estudio comenzaron una recuperación de sedimentos después de los 7 u 8 días posteriores al evento. Esto mismo observaron Anfuso y del Río (2003) en las playas de Cádiz (España) donde la tasa de recuperación, a pesar de sus diferentes características geomorfológicas, era de uno a tres meses luego de eventos erosivos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Pehuen Co es una pequeña villa balnearia ubicada al sur de la provincia de Buenos Aires (Argentina). Tiene una playa disipativa, hacia el oeste se

encuentran acantilados y médanos hacia el este. En la zona urbanizada los médanos fueron vegetados hace varias décadas por los fundadores de la villa balnearia. Esta vegetación no se observa en las bajadas peatonales a la playa o cuando hay paradores turísticos sobre la línea de médanos.

Al analizar la evolución de perfiles de playa con diferentes coberturas antrópicas del médano frontal (vegetación, infraestructura, devastación) se encontró que todos mostraron una tendencia general a la erosión. Generaron aumentos de sedimentos en verano y pérdidas en el resto del año. Los resultados de este análisis fueron similares a los obtenidos en las geoformas presentes en cada perfil por estación del año. Asimismo, el ACP resultó más completo y minucioso que el análisis de geoformas pero ambos pueden complementarse para una mejor comprensión del comportamiento de los perfiles. El análisis de ACP en función del espacio y tiempo tienen una relación directa con los procesos naturales, lo que permite diferenciar y distinguir, con una metodología sencilla, los diferentes fenómenos físicos de alteraciones del perfil de la playa.

También se pudo concluir que en una zona erosiva como lo es la zona centro de Pehuen Co, la cobertura del médano frontal es decisiva para la dinámica litoral. Se observó que el impacto y la recuperación de la playa luego de eventos de tormenta fueron mejores en las coberturas con vegetación. A su vez, los perfiles de playa en zonas con bajadas a la playa perpendiculares a la misma tuvieron fuertes procesos erosivos y lenta recuperación.

Este análisis es indispensable para un futuro ordenamiento urbano. Se recomienda modificar las bajadas a la playa. En forma adicional, es necesario el trazado de mapas de vulnerabilidad, peligrosidad y/o riesgo con el fin de generar una mejor planificación del desarrollo urbano costero. Los tomadores de decisiones deben aprender de las experiencias para proponer estrategias apropiadas en el futuro. Para una gestión eficaz de la playa, también es necesario establecer mecanismos interactivos de participación y mejorar la conciencia pública y la perspectiva acerca de la participación pública.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), la Universidad Nacional del Sur (UNS) y a la Agencia

Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) por la financiación del presente trabajo. Asimismo agradecen a los dos revisores que evaluaron el trabajo y realizaron aportes interesantes para mejorarlo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Anfuso, G. y L. Del Río, 2003. Cuantificación de las variaciones volumétricas y evolución del litoral entre Chipiona y Rota (Cádiz) durante el período 1996-1998. *Revista C & G* 17:17-27.
- Aouiche, I., L. Daoudi, E.J. Anthony, M. Sedrati, A. Harti, y E. Ziane, 2016. The impact of storms in the morphodynamic evolution of a human-impacted semi-sheltered beach (Agadir Bay, Morocco). *Journal of African Earth Sciences* 115:32-47.
- Bértola G.R., M.C. Piccolo y A. Merlotto, 2006. Efecto de la tormenta del 25 de junio del 2006 en la playa de Bahía de los Vientos, Argentina. *IV Jornadas Interdisciplinarias del Sudoeste Bonaerenses* Actas:77-82, Bahía Blanca.
- Bértola, G.R., L.C. Cortizo y F.I. Isla, 2009. Dinámica litoral de la costa de Tres Arroyos y San Cayetano, Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 64:657-671.
- Bird, E., 2008. *Coastal geomorphology: an introduction*. Wiley & Sons Ltd., Londres, 439 pp.
- Bustos, M.L., 2012. *Estudio integrado ambiental del balneario Pehuén Co*. Tesis Doctoral, Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, 231 pp. (inédito).
- Bustos, M.L., G.M.E. Perillo y M.C. Piccolo, 2009. Balance sedimentario comparativo de zonas urbanizadas y no urbanizadas en el balneario Pehuén Co. *VII Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar* Actas en CD, Bahía Blanca.
- Bustos, M.L., M.C. Piccolo y G.M.E. Perillo, 2011. Efectos geomorfológicos de fuertes vientos sobre playas. El caso de la playa de Pehuén Co, Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 37:121-142.
- Bustos, M.L., M.A. Huamantincó Cisneros, G.M.E. Perillo y M.C. Piccolo, 2013. *Métodos sencillos para la medición de perfiles de playa y observaciones costeras*. EdiUns, Bahía Blanca, 55 pp.
- Caló J., E. Fernández, A. Marcos, H. Aldacour y P. Varela, 2000. Comparación del efecto de dos tormentas en la ciudad de Monte Hermoso, Argentina. *GEOACTA* 25:40-48.
- Carter, R.W.G., 1991. *Coastal environments*. Academic Press, New York, 617 pp.
- Codignotto, J.O., W.C. Dragani, P.B. Martín, M.I. Campos, G. Alonso, C.G. Simionato y R.A. Medina, 2011. Erosión en la bahía de Samborombón y cambios en la dirección de los vientos, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales* 13:135-138.
- Cuadrado, D.G. y G.M.E. Perillo, 1997. Principal component analysis applied to geomorphologic evolution. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 44:411-419.
- Dadon, J.R., G. Chiappini y M.C. Rodríguez, 2002. Impactos ambientales del turismo costero en la provincia de Buenos Aires. *Gerencia Ambiental* 9:552-560.
- Del Pozo O., S. Bazán y M. Rosell, 2000. El turismo, la apropiación de los recursos costeros y la preservación del ambiente. Un estudio de caso en el suroeste bonaerense. *Turismo: Desarrollo local y regional*:145-160.
- Emery K.O., 1961. A simple method of measuring beach profiles. *Limnology and Oceanography* 6:90-93.
- Fiore, M., E.E. D'Onofrio, J.L. Pousa, E.J. Schnack y G.R. Bértola, 2009. Storm surge and coastal impacts at Mar del Plata, Argentina. *Continental Shelf Research* 29:1643-1649.
- Hauser, C., 2013. Alongshore variation in the morphology of coastal dunes: Implications for storm response. *Geomorphology* 199:48-61.
- Hill H.W., J.T. Kelley, D.F. Belknap y S.M. Dickson, 2004. The effects of storms and storm-generated currents on sand beaches in Southern Maine, USA. *Marine Geology* 210:149-168.
- Jackson, J. E., 1991. *A User's Guide to Principal Components*. A Wiley-Interscience publication, John Wiley and Sons, Inc., New York, 567 pp.
- Jiménez, J. y H. Valdemoro, 2003. La influencia de la dinámica costera en la explotación turística de las playas (I). Erosión a largo plazo. *Equipamiento y servicios municipales* 109:28-37.
- Lee, G., R. Nicholls y W. Birkemeier, 1998. Storm-driven variability of the beach-nearshore profile at Duck, North Carolina, USA, 1981-1991. *Marine Geology* 148:163-177.
- Liste M., F. Méndez, I. Losada, R. Medina y M. Olabarrieta, 2004. Variaciones hiperanuales de parámetros medios de oleaje en el litoral mediterráneo español en los últimos cincuenta años: efectos sobre la costa. *El clima entre el mar y la montaña*, Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, Santander, Serie A, 4:51-62.
- López, R.A., S.C. Marcomini y M.P. Bunicontro, 2016. Morfodinámica de las dunas costeras del cabo San Antonio, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 23:111-125.
- Marcomini S. y R. López, 1997. Influencia de la urbanización en la dinámica costera, Villa Gesell, provincia de Buenos Aires, República Argentina. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología* 4:79-96.
- Marcomini S. y R. López, 2008. Incidencias de las variaciones climáticas en la geomorfología eólica de la costa de la provincia de Buenos Aires. *XVII Congreso Geológico Argentino* Actas:994-995, Jujuy.
- Medina, R. M. Losada y R. Dalrymple, 1990. Análisis de perfiles de playa por medio de funciones ortogonales empíricas. *Revista de obras públicas*:9-17.
- Merlotto A. y G.R. Bértola, 2008. Erosión costera en el balneario parque Mar Chiquita, Argentina. *Papeles de Geografía* 47-48:143-158.
- MOPUT (Ministerio de Obras Públicas y Transportes), 1991. *Guía para la elaboración de estudios del medio físico: Contenido y metodología*. Tercera Edición. Madrid, España, 572 pp.
- Muñoz Pérez, J., L. Tejedor y R. Medina, 2001. Las funciones empíricas ortogonales y los cambios en el perfil de playa a corto, medio y largo plazo. *Física de la Tierra* 13:139-166.
- Olivares, C., O. Chimal Vázquez, E. Annie y T. Ihl, 2015. Fenómenos hidrometeorológicos extremos en ciudades turísticas del norte de Quintana Roo. *Teoría y Praxis* 3:84-98.
- O'Rourke, M.J.E., 2017. Archaeological Site Vulnerability Modelling: The Influence of High Impact Storm Events on Models of Shoreline Erosion in the Western Canadian Arctic. *Open Archaeology* 3:1-16.
- Pérez-Briceño, P.M., E.J. Alfaro, H.G. Hidalgo y F. Jiménez, 2016. Distribución espacial de impactos de eventos hidrometeorológicos en América Central. *Revista de Climatología* 16:63-75.
- Perillo, G.M.E. y M.C. Piccolo, 2011. Global variability in estuaries and coastal settings. En E. Wolanski y D.S. McLusky (Eds.),

Treatise on Estuarine and Coastal Science, Vol. 1. Academic Press, Waltham:7-36.

Phillips, M. y **A. Jones**, 2006. Erosion and tourism infrastructure in the coastal zone: Problems, consequences and management. *Tourism Management* 23:517-524.

Takagi, H.S.L., **M.E. Mario de Leon**, **R.M. Takahito Mikami** y **S.N. Tomoya Shibayama**, 2016. Storm surge and evacuation in urban areas during the peak of a storm. *Coastal Engineering*

108:1-9.

Scott T., **G. Masselink**, **T. O'Hare**, **A. Saulter**, **T. Poate**, **P. Russell**, **M. Davidson** y **D. Conley**, 2016. The extreme 2013/2014 winter storms: Beach recovery along the southwest coast of England. *Marine Geology* 382:224-241.

Winant, C., **D. Inman** y **C. Nordstrom**, 1975. Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions. *Journal Geophysical Research* 80:1979-1986.