

Análisis de alta resolución temporal y espacial mediante SfM-MVS de los cambios en la morfología de la costa en el balneario El Picaflor, Punta Indio, Buenos Aires, Argentina

Francisco A. CELLONE^{1*}, Luciano LÓPEZ², Guido L. BACINO³ e Irene BRAYER⁴

¹ Centro de Investigaciones del Medio Ambiente, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional de La Plata (CONICET-UNLP), La Plata, Argentina.

² Instituto de Recursos Minerales, Comisión de Investigaciones Científicas - Universidad Nacional de La Plata (CIC-UNLP), Calle 64 #3, La Plata, Argentina.

³ Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata (FCEN-UN-MdP), Mar del Plata, Argentina.

⁴ Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata (FCNyM - UNLP), La Plata, Argentina.

Email: fcellone@fcnym.unlp.edu.ar

Editor: Francisco E. Córdoba

Recibido: 7 de junio de 2022

Aceptado: 1 de diciembre de 2022

RESUMEN

El litoral de Punta Indio, en el estuario medio del Río de la Plata, se ha visto afectado durante las últimas décadas por un fuerte proceso de erosión costera. Particularmente, se ha detectado que en el balneario El Picaflor las tasas erosivas son mayores que en el resto de la costa, viéndose comprometidos los ambientes naturales, la infraestructura y el recurso turístico. El objetivo del trabajo es analizar la hidrodinámica costera y evaluar la evolución en la morfología de la costa mediante un análisis de alta resolución temporal y espacial. Para ello se efectuó un estudio de la hidrodinámica costera, a partir de un modelo de olas, y se realizaron levantamientos mediante fotogrametría SfM-MVS. A partir del análisis de las ortofotografías y nubes de puntos obtenidas se calculó un valor promedio de retroceso de la línea de costa de -0.71 m/a y se observaron cambios morfológicos con una predominancia de la erosión por sobre la progradación a lo largo de toda la línea de costa. Los factores desencadenantes de los procesos erosivos pueden deberse a las modificaciones antrópicas en la fisonomía natural del ambiente. El impacto del oleaje puede tener una contribución significativa a la erosión, directamente proporcional al tiempo del impacto de la ola y se daría principalmente bajo condiciones de oleaje de mediana intensidad. La heterogeneidad registrada en los valores de retroceso en la línea de costa puede deberse tanto a variaciones en la orientación general de la costa como en el perfil y a variaciones en el uso del suelo.

Palabras clave: VANT, erosión costera, marismas, clima de olas.

ABSTRACT

High temporal and spatial resolution analysis by SfM-MVS of the morphological changes of the coast in El Picaflor beach, Punta Indio, Buenos Aires, Argentina.

The coast of Punta Indio, in the middle Río de la Plata estuary, has been affected in recent decades by a strong erosional process. In particular, it has been detected that the erosive rates on the Picaflor beach are higher than those on the rest of the coast. For this reason, the coastal infrastructure, the natural environment, and the tourist activities are compromised. The aim of the work is to carry out an analysis of the coastal hydrodynamics and the evolution of the coastline with high temporal and spatial resolution. A study of coastal hydrodynamics and surveys using SfM-MVS photogrammetry were carried out. From the analysis of orthophotos and point clouds, an

average value of shoreline retreat of -0.71 m/a was obtained, and a predominance of erosion over progradation was observed along the entire beach. The triggering factors of the erosive processes may be due to human alterations in the natural environment. Wave impact can have a significant contribution to erosion, directly proportional to the time of wave impact and would occur mainly under medium-intensity wave conditions. The heterogeneities recorded in the beach erosional rates may be due to variations in the general orientation of the coast as well as in the profile and to differences in land use.

Keywords: UAV, coastal erosion, marshes, wind waves.

INTRODUCCIÓN

Los cambios morfológicos en las costas tienen como desencadenantes diversos factores, tanto naturales como antrópicos, y su análisis resulta sumamente relevante a la hora de planificar el desarrollo de las zonas costeras (Nicholls 2007). Dentro de los principales factores naturales se pueden identificar las variaciones del nivel del mar, cambios en el aporte sedimentario y las modificaciones en la dinámica litoral, como el cambio en el clima de olas (Leonardi et al. 2018). Entre los factores antrópicos, se pueden citar los cambios en la dinámica sedimentaria costera debidos a la construcción de estructuras artificiales, la urbanización de las costas y la actividad turística, la sobreexplotación de acuíferos, las actividades mineras, la alteración de los ecosistemas costeros, entre otras (Pilkey et al. 2009, Young y Griffith 2009, Van Rijn 2011, López y Marcomini 2013, Buniconro et al. 2019).

La creciente presión de las actividades humanas sobre los ambientes litorales (López y Marcomini 2013) y las consecuencias del cambio climático, como por ejemplo el aumento relativo del nivel del mar y el cambio en el clima de olas a lo largo de la costa (Lanfredi et al. 1998, Codignotto et al. 2012, Dragani et al. 2010, 2013, Mentaschi et al. 2018, Bacino et al. 2019, Castelle et al. 2022), pueden modificar y/o acelerar ciertos procesos sedimentarios en la evolución de largo plazo de la línea de costa. Frente a este panorama, la cuantificación, monitoreo y predicción de los cambios morfológicos en las costas a través del tiempo resulta indispensable con el objetivo de generar pautas de ordenamiento territorial y planes de mitigación de las consecuencias adversas (Williams et al. 2018). Con tales objetivos, dentro de las técnicas disponibles para el monitoreo de las zonas litorales, recientemente el uso de fotogrametría Structure from motion-Multi View Stereo (SfM-MVS) por medio de vehículos aéreos no tripulados (VANT) ha comenzado a ser utilizada con éxito, debido en parte a los costos operativos accesibles, la buena resolución espacial de los productos digitales que se obtienen y la celeridad con que pueden realizarse los levantamientos (Jaud et al. 2016, Duró et al. 2018). Existe una amplia variedad de

casos de estudio en diferentes costas del mundo en donde la técnica fotogramétrica SfM-MVS mediante VANT ha comenzado a ser aplicada y en las que comienza a reemplazar o complementar técnicas tradicionales, incluso aquellas de alta resolución (Sturdivant et al. 2017, Turner et al. 2016, Seymour et al. 2018, Westoby et al. 2018, Genchi et al. 2020).

En Argentina, amplios sectores de la costa se encuentran afectados por erosión, debido tanto a factores intrínsecos de la dinámica natural de las costas, algunos de ellos acelerados por el cambio climático, como a factores netamente antrópicos, producto de los efectos adversos del manejo costero. Dentro de los primeros se puede citar por ejemplo la reducción significativa del flujo de energía de olas paralelo a la costa detectado en la zona de Pinamar, traducido en una disminución de aporte sedimentario a las playas hacia el norte de esta localidad (Dragani et al. 2013) o el aumento en el potencial erosivo de los eventos de tormenta para la costa de Mar del Plata durante las últimas décadas relacionado al aumento relativo en el nivel del mar (Fiore et al. 2009). Entre los factores humanos, se pueden mencionar por ejemplo a las estructuras de defensa costera construidas a lo largo de la costa atlántica bonaerense, las cuales bloquean la deriva litoral (Isla et al., 2018) o la urbanización de médanos y la extracción de arena (Merlotto y Bértola 2009), actividades que generan desbalances en la disponibilidad de arena en las playas.

Particularmente, en el litoral del Río de la Plata, en el partido de Punta Indio, se ha detectado durante las últimas décadas un importante proceso de erosión que compromete tanto la infraestructura como los ambientes naturales. A través del uso de sensores remotos y sistemas de información geográfica, se cuantificó para todo el litoral norte del Partido un retroceso de la línea de costa con tasas promedio de -0.4 m/a, aunque con una gran variabilidad espacial (Cellone et al. 2016, Bacino 2018) (Fig.1). Dicho estudio fue realizado para el período 1943-2013 a través del análisis multitemporal de imágenes satelitales (Google Earth, con una resolución espacial de 0.5 m) y fotografías aéreas. Particularmente, un sector de la costa presenta altas tasas erosivas con máximos

de hasta -7.4 m/a y un promedio de -3.6 m/a, mientras que el resto de la costa presenta valores promedio de avance de 0.1 m/a.

El balneario con mayor actividad recreativa y turística en la localidad de Punta Indio es El Picaflor. En este balneario el paisaje natural, caracterizado desde el punto geomorfológico como una marisma, ha sido intensamente modificado con la instalación de infraestructura, el relleno con arena, bloques de hormigón y el retiro de la vegetación natural. Asimismo, en el sector NO del balneario se encuentra instalada una obra de defensa costera correspondiente a una escollera de unos 100 m de longitud aproximadamente. Este balneario forma parte del área donde se registraron unas de las mayores tasas ero-

sivas para el litoral del estuario Río de la Plata (Cellone et al. 2016, Bacino et al. 2018).

El objetivo del presente trabajo es realizar una caracterización de la hidrodinámica costera y evaluar la evolución de la morfología de la costa en el balneario El Picaflor mediante un análisis de alta resolución temporal y espacial. Además, se presenta una manera rápida y económica de capturar datos de alta calidad y precisión mediante la repetición de relevamientos fotogramétricos SfM-MVS, la cual tiene un potencial significativo para informar a los tomadores de decisiones y a las autoridades locales.

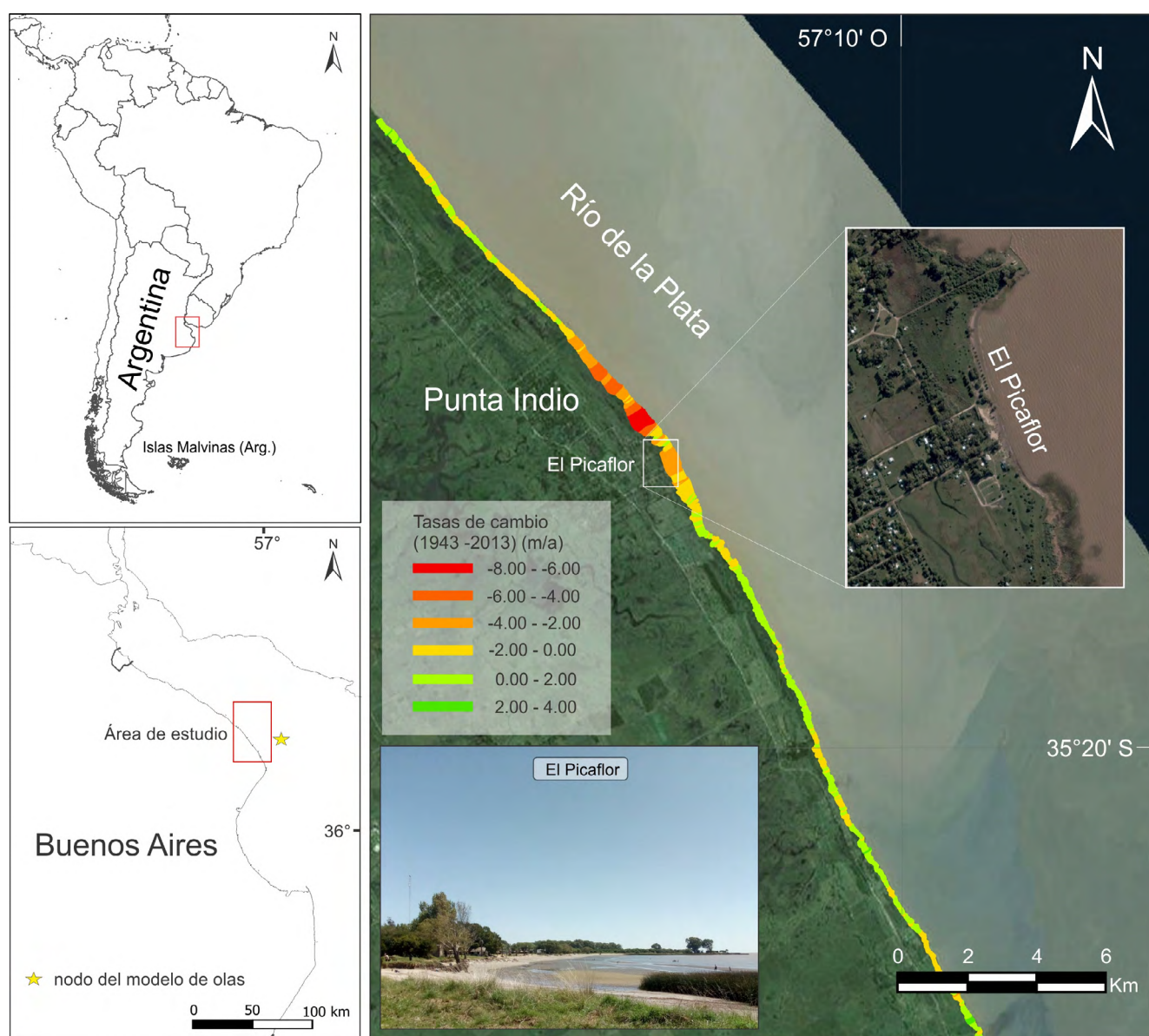


Figura 1. Ubicación del área de estudio, panorámica del balneario El Picaflor y tasas de cambio promedio calculadas para el periodo 1943-2013 por Cellone et al., 2016 para todo el litoral norte del Partido de Punta Indio.

MARCO GEOLÓGICO

Este estudio se localiza en el sector norte del Partido de Punta Indio, sobre la margen sur del estuario Río de la Plata. Particularmente, el trabajo se llevó a cabo en el balneario El Picaflor, sobre un sector de costa de unos 700 m de longitud. Esta zona también forma parte de la reserva Parque Costero del Sur, la cual es parte del programa de reservas de biósfera de UNESCO desde el año 1985 (www.unesco.org/mab/). El Parque Costero del Sur se encuentra casi en su totalidad dentro de lo que se conoce como la planicie costera del Río de la Plata, la cual corresponde a una unidad resultante de los eventos transgresivos-regresivos ocurridos durante el Pleistoceno Superior y el Holoceno (Cavallotto et al. 2004, Violante y Parker 2004, Richiano et al. 2012).

Desde el punto de vista geomorfológico se reconocen distintas unidades dentro de la planicie costera del Río de la Plata: una llanura de mareas relictas, cordones litorales y una marisma. Desde el punto de vista litoestratigráfico estas unidades han sido agrupadas dentro de la Formación Canal de las Escobas (Fucks et al. 2010) y corresponden respectivamente a los Miembros Canal 18, Cerro de la Gloria y Canal 15, las cuales yacen sobre una superficie transgresiva desarrollada sobre la Formación Pampeano. La llanura de marea relictas es la más alejada de la costa y se identifica como una zona de baja topografía desconectada actualmente del estuario pero que preserva la morfología de antiguos canales mareales caracterizada por sedimentos limo arcillosos desde superficie. Los cordones litorales constituyen cordones elongados de manera paralela a la costa, elevados entre unos 5 y 2.5 m s.n.m. (Cavallotto 2002) y consisten en depósitos de antiguas playas, principalmente representados por fragmentos esqueléticos de moluscos, rodados y arenas (Cellone 2019). Por último, la marisma consiste en una estrecha franja paralela a la línea de costa que recibe actualmente los flujos mareales provenientes desde el estuario y se encuentra compuesta principalmente por sedimentos arcillosos desde superficie. De estas unidades, la más afectada por la erosión costera ha sido la unidad de marisma, la cual en algunos puntos ha sido totalmente degradada alcanzando la erosión a un sector de los cordones litorales (Cellone et al. 2016, Cellone 2019).

El estuario Río de la Plata cumple el principal rol en los procesos sedimentarios en el área de estudio. Su descarga está mayormente controlada por sus dos principales tributarios: los ríos Uruguay y Paraná, y ronda los 22000 m³/s (Jaime et al. 2002). Ambos ríos aportan a su vez la mayor carga de sedimentos, mientras que la contribución de los arroyos

que desembocan en el estuario es despreciable. En este sentido, el proceso de sedimentación de materiales más finos se da mayoritariamente en el frente salino (Punta Piedras-Montevideo), donde se observa un máximo de concentración alrededor de Punta Piedras, motivado principalmente por la intensificación de las corrientes de marea y el oleaje (Simionato et al. 2018). Otra fuente de aporte sedimentario proviene de la deriva litoral con sentido hacia el Noroeste (Codignotto y Kokot 2005).

La zona costera del Parque Costero del Sur se encuentra dentro del estuario medio del Río de la Plata. En este sector, este último reduce su ancho y profundidad con respecto al estuario exterior (Moreira et al. 2016). La costa se presenta expuesta a las condiciones de oleaje generadas por el viento local, ya que la escasa profundidad y suave pendiente en el Río de la Plata medio, limitan la propagación de oleaje de baja frecuencia desde la plataforma continental adyacente (Dragani y Romero 2004). El viento juega un rol principal en la dinámica del estuario, presentando una variabilidad estacional marcada, con vientos predominantes del E/NE en verano y más débiles del O/NO en invierno (Simionato et al. 2005). Los eventos de oleajes más severos en el Río de la Plata se encuentran asociados a fuertes vientos del SE, generados por la presencia de ciclones localizados en la plataforma continental adyacente y a las costas de Uruguay y Brasil (Dragani et al. 2013). Para un sitio cercano a Punta Indio/Punta Piedras y a 5 m de profundidad, la altura de ola significativa (H_s) media simulada fue de 0.21 m y su valor extremo (percentil H_{s99}) de 0.52 m, con dirección predominante del sector Este-Noreste (Bacino et al. 2019).

Asimismo, el estuario posee un régimen micro mareal semidiurno con un rango medio de mareas de 0.7 m. Sin embargo, las oscilaciones en el nivel medio en el estuario se encuentran fuertemente controladas por el viento, principalmente debido a su forma, orientación y profundidad (D'Onofrio et al. 2008). De esta manera, los vientos persistentes y fuertes del SE-SSE, que alcanzan ocasionalmente 75- 88 km/h, producen la elevación del nivel medio del estuario durante períodos que pueden extenderse desde algunas horas hasta varios días (D'Onofrio et al. 2008). Durante estas ondas de tormenta (positivas), conocidas localmente como "sudestadas", el nivel medio del estuario puede alcanzar más de 3 m, inundando amplios sectores de la costa y generando un fuerte impacto sobre el litoral.

En cuanto a los aspectos socioeconómicos, además de las actividades agropecuarias llevadas a cabo en todo el Partido, la localidad de Punta Indio tiene como particularidad que una de sus principales actividades económicas es el turismo en la zona costera. Esta localidad tiene una población de 569

residentes permanentes (INDEC 2010), aunque, durante fines de semana y los meses de verano a estos se les suman hasta 5000 turistas (autoridad de turismo de Punta Indio, comunicación personal).

METODOLOGÍA

Hidrodinámica costera

Para caracterizar el principal forzante hidrodinámico modelador de la costa, se analizó el clima de olas en el área de estudio para el período 2010-2021, y en particular, durante el período entre los relevamientos de campo de febrero 2020 y 2021. Para ello, se utilizó el *Global Ocean Wave Reanalysis Wavereys del Copernicus Marine Environmental Monitoring Service* (CMEMS), disponible en <https://marine.copernicus.eu/>. El producto se basa en el modelo de olas de tercera generación MFWAM, que calcula el espectro del oleaje en una grilla irregular de 1-5° con una salida del total del espectro cada 3 horas. Este modelo se forzó con los vientos de reanálisis ERA5 y la batimetría que utiliza es de la base de datos global de ETOPO2.

Se seleccionó el nodo más cercano y representativo del área de estudio en la longitud 57.0°O y latitud 35.2°S (Figura 1), de donde se obtuvo la serie de tiempo de altura significativa de ola (H_s), período pico y dirección media del oleaje. Para describir el potencial de erosión del impacto del oleaje (Mariotti et al. 2010) se calculó la energía de ola incidente en la línea de rompiente (P_i), que estima la tasa de energía de ola que es transmitida a lo largo de un plano, con un ancho determinado, perpendicular a la dirección de avance de la ola:

$$P_i = (\rho g H_s^2 C_g \cos \alpha) / 8 \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del agua (igual a 1022.5 kg/m³; Piola y García, 1993), g la aceleración de la gravedad (9.86 m/s²), C_g es la velocidad de grupo de la ola en la línea de rompiente y α el ángulo de ola entre la cresta de la ola y la línea de costa, estimado a partir de la orientación predominante de la línea de costa que es NNW-SSE (N 155°) para Punta Indio.

Por otro lado, se computó el flujo de energía de olas paralelo a la costa por unidad de cresta (P_l), ya que es proporcional a la tasa de transporte de sedimentos paralelo a la costa. El PI asume que el transporte de materiales se da a lo largo de la costa cuando en promedio presentan un desplazamiento neto paralelo a ella (CERC, 1984), y se puede estimar de la siguiente manera:

$$P_l = 0.05 \rho g^{3/2} H_s^{5/2} (\cos \alpha)^{1/4} \sin 2\alpha \quad (2)$$

P_l sólo puede fluir en dos direcciones posibles, dependiendo del signo del valor instantáneo de α : hacia la derecha (positivo) o hacia la izquierda (negativo), con respecto a un

observador situado en la costa y mirando al estuario.

A modo de caracterizar los eventos más energéticos en el período estudiado, se identificaron los eventos de extremos en la serie de H_s , a partir del método de picos por encima de cierto umbral (Harley 2017). La determinación de estos criterios para identificar eventos con poder erosivo sobre la costa, van a ser específicos de cada sitio (Armaroli et al. 2012). Para la zona de estudio, se utilizó el umbral de referencia propuesto por Dragani et al. (2013) para eventos energéticos y se utilizó bibliografía de referencia para determinar los umbrales (Angnuureng et al. 2017, Armaroli et al. 2012, Masselink et al. 2016). Se eligió el criterio de pico máximo de $H_s > H_{s99}$, y para identificar el inicio y fin de los eventos, se definió el umbral H_{s80} de la media móvil diaria. Por último, se fijó una duración mínima para los eventos de 36 hs, mientras que se estableció una independencia entre eventos (períodos de calma) de 48 hs.

Adquisición de datos de campo

Para el levantamiento topográfico de alta resolución se utilizó la técnica fotogramétrica Structure from Motion Multi-View Stereo (SfM-MVS) (Furukawa y Ponce 2007, Westoby et al. 2012, Carrivick et al. 2016). El primer paso del flujo de trabajo fue la obtención de fotografías mediante un VANT, a partir de las cuales se generaron los modelos de elevación digital de resolución centimétrica, construido sobre una nube de puntos densa, y ortofotos con similar resolución. Una de las mayores ventajas de esta técnica, frente a otras técnicas fotogramétricas, es la posibilidad de generar los modelos tridimensionales sin calibración ni orientación espacial de la cámara (Carrivick et al. 2016).

Se realizaron dos relevamientos, el primero de ellos el 14 de febrero del 2020 y el segundo el 18 de febrero de 2021. Se recolectaron fotografías con un solapamiento de 70% en la línea de vuelo y 60% entre líneas paralelas mediante un VANT Phantom 4 Pro con una cámara de 20 Mpx con sensor CMOS de 1''. El software asistente del vuelo utilizado fue el Pix4D Capture, a fin de optimizar la obtención de las fotografías. La altura de los vuelos fue configurada a 80 m y la velocidad a 10 m/s. Las líneas de vuelo fueron paralelas; sin embargo, con el fin de evitar el efecto de deformación dómica descrito por James and Robson (2014) y obtener imágenes que minimicen la oclusión del terreno por la vegetación, se realizaron vuelos manuales paralelos a la línea de costa recolectando fotos con un ángulo de -30° desde la horizontal, con un intervalómetro de 2 segundos.

Para georreferenciar y calibrar el modelo se utilizaron 8 puntos de control de campo y 8 *check points* para evaluar el ajuste del modelo con puntos independientes. Los errores (RMSE) resultaron en 0.06 y 0.1 m, respectivamente. Estos

puntos fueron materializados con marcadores de 20 x 30 cm dispuestos adecuadamente sobre el área a relevar (Clapuyt et al. 2016, Sanz-Ablanedo et al. 2018). Las coordenadas X, Y, Z de los puntos fueron obtenidas mediante una Estación Total Kolida 440 con una precisión de $\pm 2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ con prisma montado en un báculo telescópico.

Procesamiento de las imágenes SfM-MVS

El procesamiento de las imágenes para generar las nubes de puntos densas, las ortofotos y los modelos de elevación digital fue realizado con AgiSoft Metashape 1.7.5. La alineación de las fotografías es el primer proceso del SfM-MVS, con la cual, mediante la identificación de puntos claves, se obtienen los parámetros intrínsecos y orientación de la cámara como también la nube dispersa tridimensional. Para los análisis dinámicos multitemporales, una posible limitación es el error intrínseco del método durante la alineación, que produce un error aproximado de 1/600 la distancia de la toma de las fotografías (Carrivick et al. 2016). En este caso, el error esperable para cada modelo es de 13 cm.

Con el fin de minimizar este error, durante la alineación de las nubes de puntos entre ambos períodos (2020, 2021) se utilizó la técnica MESI (Multi-Epoch Single Imagery; Feurer y Vinatier 2018, Cook y Dietze 2019, Blanch et al. 2021, López y Cellone 2022). Este proceso se diferencia del flujo de trabajo clásico en que, en lugar de utilizar cada conjunto de fotografías de cada período de forma independiente para cada alineación, se utilizan las fotografías de ambos períodos para realizar el *bundle adjustment*. Posteriormente, las fotografías ya alineadas se separan en dos conjuntos, de acuerdo a las fechas de adquisición y se construyen las dos nubes densas que serán el insumo para los cálculos del análisis dinámico. El resultado del *bundle adjustment*, utilizando MESI, muestra una reducción de los errores sistemáticos espaciales intrínsecos al SfM-MVS (Blanch et al. 2021) y se ha demostrado que, sin puntos de control de campo, el ajuste MESI genera una precisión relativamente más alta que la técnica tradicional de alineación individual y georeferenciación (Feurer and Vinatier 2018, Cook and Dietze 2019, de Haas et al. 2021).

A partir de los relevamientos de 2020 y 2021 se construyó para cada período una ortofotografía georeferenciada de 1.63 cm/píxel, un modelo de elevación de superficie de 10 cm/píxel y nubes de puntos densas tridimensionales de aproximadamente 30 millones de puntos.

Posprocesamiento

Existen diferentes técnicas para comparar la diferencia entre dos modelos digitales de la superficie (MDS). En terrenos planos es posible realizar un análisis 2.5D haciendo un

cálculo aritmético entre dos DEMs para obtener un DEM-of-difference (DoD). Sin embargo, este enfoque asume que las variaciones son solo verticales. En contextos de terrenos con topografía pronunciada o para este análisis en particular, sobre el retroceso de una escarpa, las diferencias deben calcularse en una dirección normal al plano de la superficie.

A fin de comparar las nubes de puntos correspondientes a los años 2020-2021 y establecer variaciones en el terreno entre ambos períodos, se utilizó el *plugin* M3C2 *distance* (Multiscale Model to Model Cloud Comparison, Lague et al. 2013) desde el *software* Cloud Compare. Esta metodología es la más apropiada para el análisis de las diferencias entre nubes de puntos, ya que divide las mismas en pequeños bloques y promedia la orientación de los planos promedio y establece un cilindro de búsqueda de un diámetro determinado desde una de ellas hasta la otra (Esposito et al. 2017). Para realizar el análisis tridimensional, las nubes de puntos de los años 2020 y 2021 fueron segmentadas verticalmente de los valores extremos para filtrar el agua ($< 3 \text{ m}$) y árboles y edificaciones ($> 6 \text{ m}$).

Para el procesamiento, mapeo y análisis de la información 2D se utilizó un sistema de información Geográfico (QGIS 3.16), mientras que para el análisis de los productos 3D, particularmente la nube de puntos, se utilizó el programa Cloud Compare. A partir del procesamiento de los datos y la información obtenida se generaron productos (mapas, perfiles, visualizaciones tridimensionales) que permitieron identificar las modificaciones en la zona costera. Se mapearon manualmente las líneas de costa para 2020 y 2021 a escala 1:100. Se utilizó como referencia la escarpa erosiva presente en la mayor parte de la costa (Fig. 2). Cuando esta no se encontraba presente, se utilizó la altura equivalente o bien la línea de vegetación ribereña.

El análisis multitemporal de los cambios en la línea de costa fue realizado mediante el *software* Digital Shoreline Analysis System (DSAS 4.3) (Thieler et al. 2009), el cual funciona como una extensión dentro de ArcGis. DSAS permite computar tasas de cambio a partir de una serie de líneas de costa digitalizadas en un SIG. A partir de transectas perpendiculares a una línea base generada por el usuario y equidistantes entre sí, se utilizan las intersecciones entre estas y las líneas de costa para calcular distintos estadísticos. En este trabajo se utilizó el estadístico *End Point Rate* (EPR), el cual representa la distancia entre la línea de costa más antigua y la más reciente dividido sobre el tiempo que existe entre ambas. En total se generaron 142 transectas con un espaciado de 5 m.

La relevancia que tiene calcular las tasas de desplazamiento en la línea de costa está relacionada con la predicción de la evolución futura en la posición de la línea de costa, lo

cual tiene implicancias tanto en la generación de planes de manejo territorial para salvaguardar la infraestructura presente y futura, como así también, para diagramar estrategias de mitigación de las consecuencias adversas de la erosión costera más focalizadas.

RESULTADOS

Hidrodinámica costera

En el período utilizado para describir el clima de olas del sitio (2010-2021), la H_s media simulada fue de 0.57 m, el oleaje extremo ($H_{s_{99}}$) de 1.57 m y la dirección predominante fue del cuadrante Este-Sudeste (Fig. 2). Los eventos de mayor energía ($H_s > 1.2$ m) se proyectaron desde el cuadrante Sudeste (Fig. 2). El flujo neto de energía de ola paralelo a la costa (a partir del PI medio mensual) en todo el período resultó de -0.2 KJ/ms, es decir, con sentido hacia el NO. Se destaca sobre la serie de PI, que el flujo de energía de ola hacia el SE (PI positivo) es casi marginal, indicando que existiría una tendencia del transporte de sedimentos con sentido SE-NO. Este flujo se ve magnificado durante los eventos de tormenta, que en su mayoría tienen una componente SE. Del mismo modo resultó el período entre vuelos, resaltando el PI neto mensual de febrero de 2021, donde se computó el valor más alto del período completo, con -1.08 KJ/ms. Por otro lado, el PI medio mensual en la década observada fue de 62.2 KJ/ms, con un valor extremo (percentil 99) de 118 KJ/ms. Se pudo observar un ciclo donde los mínimos de ambos indicadores (Pi y PI) se sitúan en los meses de invierno, mientras que los máximos se dan en verano. Esto puede observarse gráficamente a partir de la media móvil trimestral (Fig. 3). De igual manera, se encontraron menor cantidad de eventos de tormenta en los meses de invierno.

En todo el período se identificaron 62 eventos extremos de olas, con un promedio de 5 por año (Fig.3). De los 7 eventos encontrados durante el período entre vuelos VANT, se puede destacar dos eventos significativos que se desarrollaron en los primeros 12 días de febrero del 2021, apenas 6 días antes del último relevamiento. Estos eventos, separados entre sí por 60 hs, tuvieron una H_s pico de 1.94 m y 1.48 m, con una duración media de 138 horas y 102 horas, respectivamente. Ambos eventos se dieron con una dirección media del sector Sudeste y Este, es decir, con una incidencia oblicua sobre el sector en estudio que tiene una costa con orientación NO-SE. Se destaca que estos eventos se encuentran dentro de los 7 eventos más severos de la última década, desarrollándose los dos seguidos en menos de 15 días.

Cambios morfodinámicos

Se realizó un análisis de cambios comparando los levantamientos fotogramétricos realizados para el balneario El Picaflor en los años 2020 y 2021. Se presenta a continuación la cuantificación de los cambios tanto en planta como considerando la componente vertical para dicho sector de la costa de Punta Indio.

El balneario El Picaflor tiene una extensión de 700 m en dirección NNO-SSE (N155). La línea de costa está caracterizada en algunos sectores, principalmente en el sector SE, por una escarpa de pendiente pronunciada con una altura de unos 40-50 cm. En el sector NNO la pendiente de la escarpa es menos pronunciada y más difusa, por lo que en este sector la línea de costa fue definida a partir de la línea de vegetación supramareal (Fig. 4). En algunas zonas se colocaron bloques de hormigón de aproximadamente 1 m de diámetro y unos 20-30 cm de espesor con el propósito de mitigar la erosión (Fig. 5). Dichos bloques fueron removilizados en parte del balneario por personal de la Municipalidad entre los períodos relevados (autoridad de gobierno de la Municipalidad de Punta Indio, comunicación personal).

Cambios en la línea de costa: El mapeo de las líneas de costa para los años 2020 y 2021 muestra un retroceso generalizado, sin embargo, estos cambios no presentan un comportamiento homogéneo, existiendo algunos sectores donde se registran ligeros avances y otros donde el retroceso es más

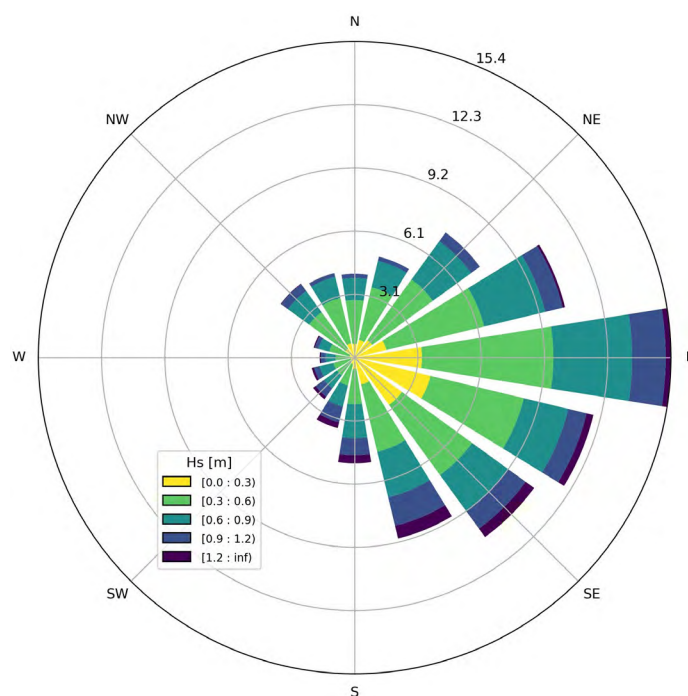


Figura 2. Rosa de olas indicando distribución direccional de H_s , indicando en colores la intensidad de la H_s .

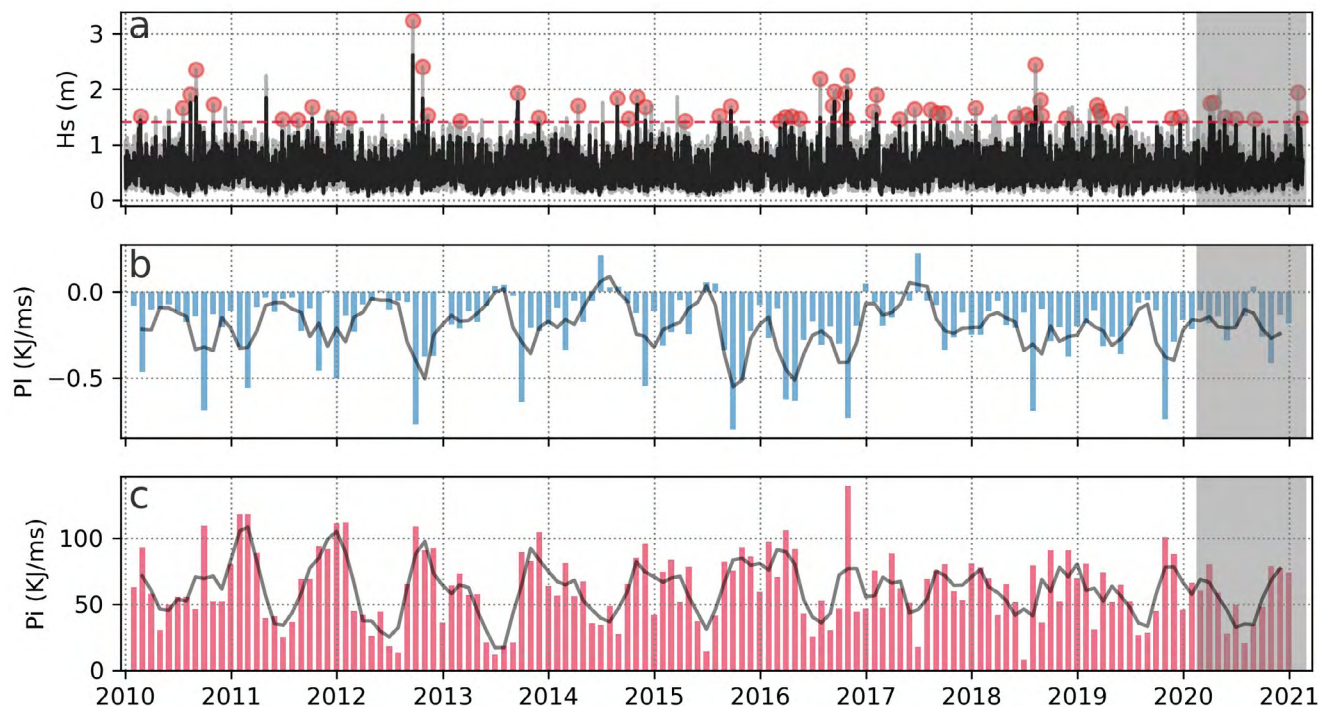


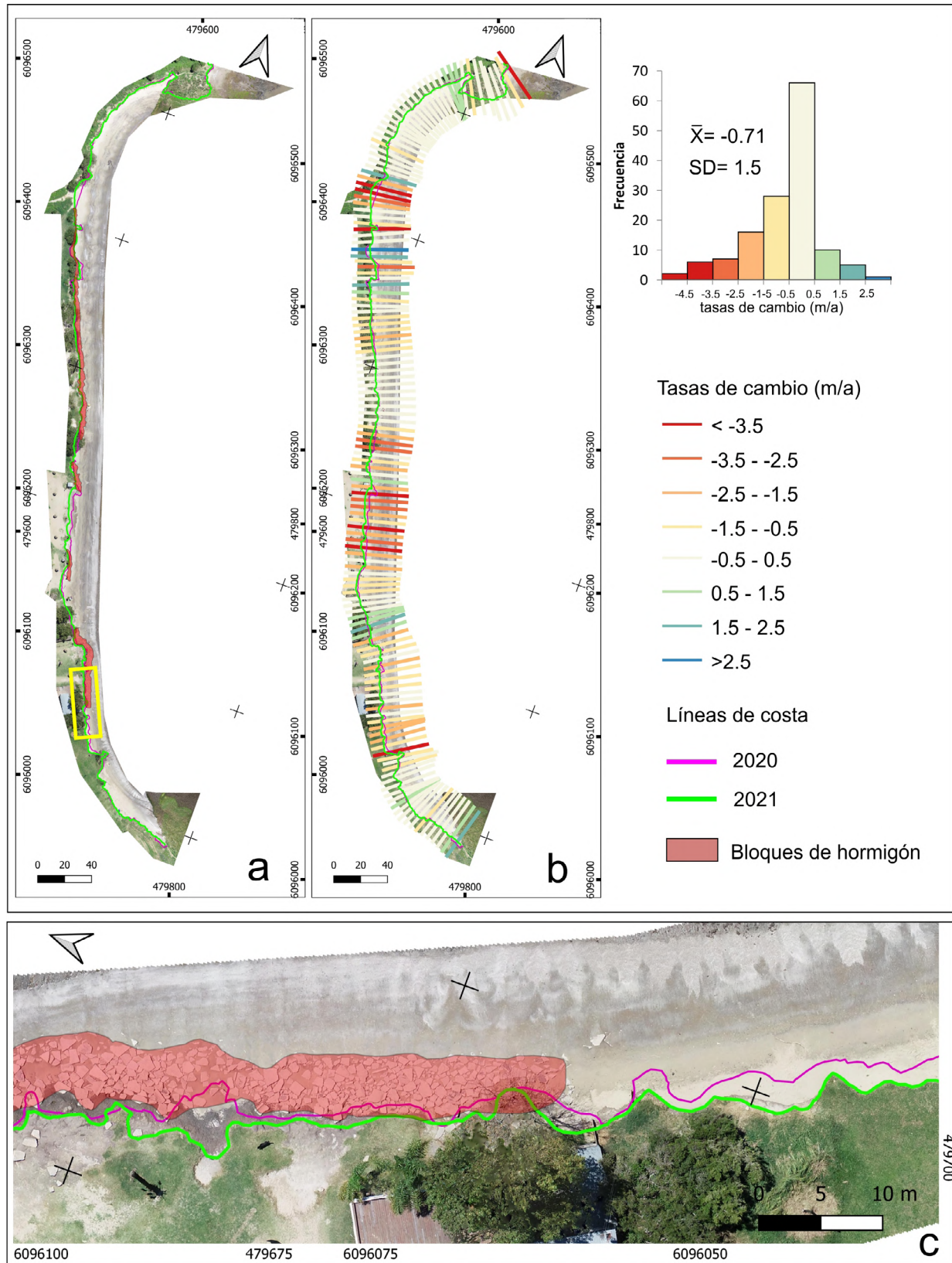
Figura 3. a) Promedio móvil diario de la H_s (en negro), identificando los eventos extremos (círculos rojos) por encima del umbral H_{s99} (línea discontinua roja); b) Promedio mensual del flujo de energía de ola paralela a la costa (P_i), en celeste. c: Energía de ola incidente a la costa (P_i) acumulada mensual, en rojo. La línea gris en b y c indica el promedio móvil trimestral de ambos indicadores. La franja gris indica el período entre relevamientos.



Figura 4. Fotografías de distintos sectores del balneario El Picaflor: a) Línea de costa caracterizada por escarpa erosiva en el sector SSE del balneario, se observan a su vez los bloques de hormigón utilizados como contención; b) Línea de costa más tendida representada por la línea de vegetación supramareal en el sector NNO. Ambas fotografías fueron tomadas durante el relevamiento de 2021.

acentuado. A partir del análisis efectuado mediante el DSAS, fue posible establecer con precisión las tasas a las cuales ocurren los cambios en la línea de costa y la variabilidad que presentan para este sector (Fig. 5). El análisis estadístico de las tasas de cambio arroja un valor promedio de -0.71 m/a (retroceso de la línea de costa), con una desviación estándar de 1.5 m. Las mayores tasas de retroceso se registraron en el sector central y sur con valores que se sitúan entre -3.5 y -0.5 m/a. Las tasas calculadas entre -0.5 y 0.5 m/a se interpre-

tan como sectores de la costa donde el comportamiento es relativamente estable o bien donde los cambios registrados podrían no ser significativos, producto de errores implícitos en la digitalización de las líneas de costa. Estos sectores se encuentran principalmente en ambos extremos del balneario. También se observan sectores en los que se registró un ligero avance de la línea de costa, aunque de menor magnitud que en aquellos en los que la costa retrocede. El histograma de frecuencias correspondiente a los valores de cada una de las



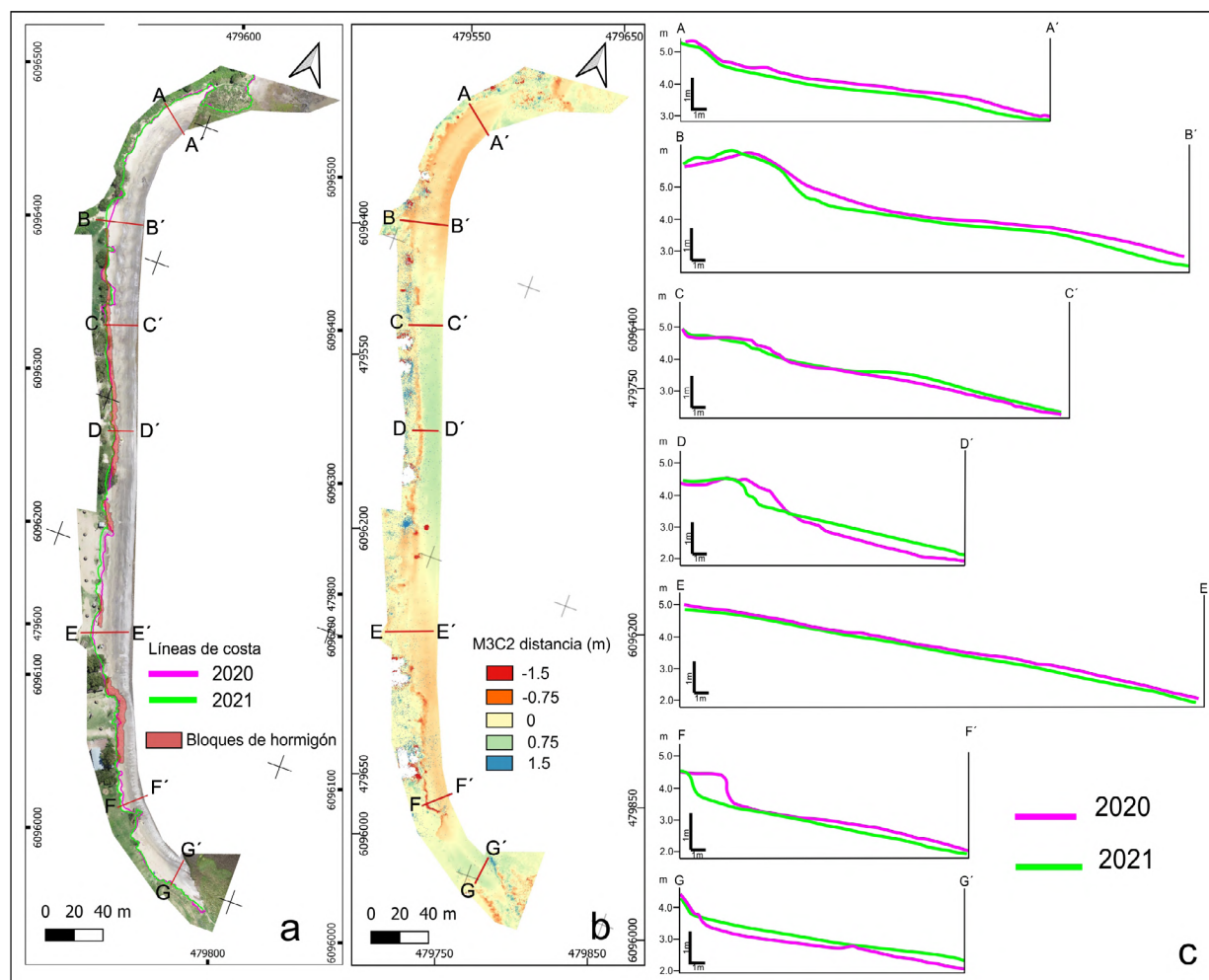


Figura 6. a) Líneas de costa para los años 2020 y 2021, ubicación de los bloques de hormigón y ubicación de perfiles; b) Comparación de las nubes de puntos para el balneario El Picaflor para los años 2020 y 2021 a través del complemento M3C2, ubicación de perfiles; c) Perfiles obtenidos a partir de las nubes de puntos para los años respectivos.

transectas muestra una distribución asimétrica con un comportamiento ligeramente negativo. Al analizar las relaciones entre los bloques de hormigón y las tasas de desplazamiento de la línea de costa se obtuvo analíticamente que los sectores que poseen acorazamientos presentan una tasa promedio de -0.72 m/a, mientras que en los sectores que no poseen bloques de hormigón la tasa promedio es de -0.70 m/a.

Cambios en la componente vertical: La Figura 6 muestra el resultado de la comparación de las nubes de puntos a través de la función M3C2. A lo largo de la línea de costa se observa que los cambios son en general negativos, con algunos sectores donde la diferencia entre ambos modelos es nula o ligeramente positiva. A su vez, se construyeron perfiles transversales a la línea de costa, a partir de ambas nubes de puntos. Esto permitió observar en detalle los cambios en distintos sectores a lo largo de cada perfil y observar su comportamiento en la evolución de un año al siguiente. En los perfiles A-A', B-B' y E-E' se observó que existe un descenso homogéneo del nivel en sentido vertical sin observarse en es-

tos casos un retroceso de la escarpa erosiva (línea de costa). En los perfiles C-C' y D-D' se observó un retroceso de la escarpa por detrás de los bloques de hormigón utilizados como contención. Sin embargo, al pie de los mismos se registró un ligero ascenso del nivel del terreno en sentido vertical, como también puede constatar en el resultado de la comparación mediante M3C2.

En el sector donde la escarpa es más pronunciada, principalmente al sur del balneario, se observaron los valores de cambio negativos de mayor magnitud en la comparación entre ambas nubes de puntos. Dichos sectores se encuentran concentrados en una franja estrecha paralela a la costa de unos 2 a 3 m en planta. Esta situación se verifica en el perfil F-F', donde se constata que este comportamiento se debe al retroceso de la escarpa erosiva en el período considerado. Finalmente, el perfil G-G' está caracterizado por presentar un ligero ascenso del nivel del terreno a lo largo del perfil con un mínimo retroceso de la escarpa.

DISCUSIÓN

En el presente estudio, la resolución obtenida mediante el uso de la técnica SfM-MVS permitió incrementar en dos órdenes de magnitud la utilizada previamente en el análisis de la línea de costa en el área, realizada mediante imágenes satelitales y fotografías aéreas (Cellone et al. 2016, Bacino et al. 2020). La tasa de cambio promedio histórica exclusivamente para el balneario El Picaflor era de -2.5 m/a mientras que la obtenida por este estudio (2020-2021) fue de -0.71 m/a. Este valor obtenido es significativamente menor al valor histórico, aunque ya se observaba una ligera disminución en las tasas de retroceso para este sector al menos desde las últimas dos décadas (Cellone et al. 2016). Asimismo, la mayor resolución permitió observar sectores tanto erosivos como acrecionales dentro del sector de costa analizado. El monitoreo periódico de los cambios de la línea de costa permitirá corroborar si esta menor tasa es producto de una tendencia sostenida en el tiempo o una situación particular atribuible al año analizado en cuestión.

La continua erosión sobre este sector de la costa, con mayores retrocesos sobre el sector central que hacia los extremos, ha determinado que la morfología de la costa se asemeje a la de una bahía. Esto puede deberse a que hacia los extremos la línea de costa se encuentra parcialmente estabilizada por la presencia de un muro defensivo de hormigón hacia el Norte y abundante vegetación intermareal hacia el Sur. El análisis de los resultados obtenidos en el comportamiento de la línea de costa, registró un proceso erosivo con una tasa promedio de retroceso de -0.71 m/a con una tendencia levemente asimétrica negativa en el histograma de frecuencias de las transectas computadas para toda la costa, donde se identifica el sector central de la playa como más comprometido por la erosión. También, se encontraron sectores alternados de unas pocas decenas de metros de estabilidad y/o acreción (Fig. 5). El análisis de la información del M3C2 arrojó resultados similares al realizado a partir de DSAS, con una predominancia de la erosión sobre la acumulación a lo largo de todo el tramo de costa analizado. La construcción de perfiles a partir de las nubes de puntos permitió diferenciar distintos comportamientos en la costa: en algunos casos se observó un retroceso tanto en la componente horizontal como en la vertical, mientras que en otros el retroceso se concentró en la escarpa, con acumulación de material o no al pie de esta (Fig. 6). La comparación de ambos resultados debe realizarse teniendo en cuenta que a diferencia del M3C2, el análisis mediante DSAS no constituye un proceso automatizado. Por ello, los sectores caracterizados como estables (con tasas de

cambio entre -0.5 y 0.5 m) podrían también asociarse a incertidumbres implícitas en el mapeo de la línea de costa por parte del usuario (Thieler et al. 2009). De cualquier manera, la ventaja de esta metodología no automatizada es que permite definir la línea de costa en función de los objetivos del estudio y establecer con mayor precisión la velocidad en que ocurre el desplazamiento de la misma.

En cuanto a los factores que se postulan como posibles desencadenantes de los procesos erosivos en la zona costera, existe en la literatura especializada una incertidumbre especialmente en la erosión del borde de las marismas y la causa de su variabilidad espacial (Valentine y Mariotti 2019). Estas variabilidades en la erosión pueden ser causadas por la diferencia natural de la resistencia del suelo, y de sus procesos biológicos y ecológicos (Leonardi y Fagherazzi 2014; 2015), atribuidos a la composición de los sedimentos, las propiedades de la vegetación y las comunidades invertebradas bentónicas (Escapa et al. 2007, Feagin et al. 2009, Wang et al. 2017). En el caso del balneario El Picaflor, se torna difícil ponderar estas variables, ya que las condiciones naturales de la marisma se encuentran fuertemente alteradas por el relleno con materiales artificiales, la instalación de infraestructura, el retiro de la vegetación natural y la instalación de especies exóticas y el intensivo uso turístico y recreativo. Con respecto al rol que juega la vegetación intermareal en la protección costera, el mismo ha sido ampliamente estudiado y se encuentra profusamente documentado en la literatura científica. Los efectos positivos de la vegetación sobre los ambientes litorales, y en particular para la atenuación o mitigación de los procesos erosivos, se deben a su doble función de retención de sedimentos, y construcción de nueva costa, y, por otro lado, a la atenuación del oleaje (Gedan et al. 2011, Borsje et al. 2011, Spalding et al. 2014).

Asimismo, los valores de mayor retroceso de la línea de costa se identifican en el sector donde se encuentra el principal acceso a la costa y uno de los lugares de mayor uso, lo que podría haber tenido consecuencias en la degradación del ambiente. Dicha erosión de la escarpa podría haber brindado el sedimento para la acumulación en la zona intermareal inmediata cuantificado con M3C2 (Fig. 6). Para comprobarlo deberían realizarse a futuro estudios sedimentológicos de detalle. A partir de los valores obtenidos en la comparación entre las zonas que poseen acorazamientos con bloques de hormigón y las que no, se plantea que las medidas de protección costera implementadas han sido poco eficaces a la hora de mitigar los procesos erosivos.

En sistemas micromareales, la tasa de retroceso ha sido frecuentemente relacionada con la energía de ola (Schwimmer 2001, Marani et al. 2011, Leonardi et al. 2016), aunque va

a depender del porcentaje de tiempo al que la energía de ola impacta efectivamente sobre la escarpa (Valentine y Mariotti 2019). A futuro se espera lograr correlacionar efectivamente el nivel del estuario con los modelos digitales del terreno generados a partir de VANT y la energía de ola. De este modo, se podrá tener una integración de la energía de ola que efectivamente impacta sobre la escarpa.

Las características del oleaje, que suelen actuar a escalas de grandes a intermedias, afectarían de manera distinta al largo de la costa estudiada debido a su configuración y orientación. De esta manera, protege ciertos sectores de la costa dependiendo de la dirección del oleaje. El sector sudeste, por la presencia de vegetación intermareal, se encuentra protegido del oleaje de mayor frecuencia y energía proveniente del cuadrante Sudeste (Figura 2). Por otro lado, durante los eventos de alta energía de ola, que en general se encuentran acompañados con una amplificación del nivel de agua, el efecto del oleaje podría disiparse al sobrepasar la altura de la escarpa o erosionar sectores más altos de la marisma. Se puede observar que, en el sector noroeste del balneario, orientado al sudeste, la escarpa se ubica en un sector levemente más alto que el sector sur y la altura de la misma es menor (Fig. 4). Aquí el área intermareal es más ancha, dado que existe una interrupción de la deriva litoral efectuada por la obra de defensa (escollera de 100 m aproximadamente, ubicada al NO del balneario). Se hipotetiza que los procesos erosivos y acumulativos observados mediante M3C2 en la zona intermareal, más variables temporal y espacialmente (Leonardi et al. 2018), hayan sido movilizados por eventos de alta energía identificados 6 días antes del último relevamiento, en febrero de 2021 (Fig. 6). La erosión de la zona intermareal, frente al borde de la marisma, posibilita el alcance de una mayor energía de ola, incrementando su erosión potencial durante el período entre tormentas, es decir, bajo condiciones normales de oleaje (Leonardi et al. 2018). Para comprender mejor el proceso erosivo sería relevante incorporar al análisis, la morfología de la planicie de marea teniendo en cuenta su pendiente, ancho y las formas submareales, como así también, las propiedades del sedimento. En cuanto a la variabilidad estacional encontrada en la energía de ola, coincide con la estacionalidad de los vientos observada en el Río de la Plata (Simionato et al. 2005) y también con las anomalías positivas de las Hs simuladas con SWAN en el periodo 1979-2016 (Alonso, 2019), cercano al sector de Punta Piedras, entre los meses de septiembre y febrero. Algo similar ocurrió con los eventos de tormenta, donde la mayor cantidad de eventos se da en los meses entre agosto y noviembre, de 6 a 12 eventos por mes en todo el período.

A futuro sería deseable contar con relevamientos que con-

sideren la variabilidad estacional que presentan tanto la intensidad en la energía del oleaje y como la frecuencia en los eventos de tormenta en el sector analizado, a fin de cuantificar si los cambios en la línea de costa pueden ser atribuibles a la misma. Este monitoreo periódico de la línea de costa debería contar con al menos de dos relevamientos anuales para considerar dicha variabilidad y su continuidad en el tiempo resulta esencial también para establecer variaciones producto de los cambios de usos de suelo en la costa, como aquellos esperables del cambio climático y el aumento en el nivel medio del estuario (Tosi et al. 2013).

CONCLUSIONES

Se realizaron dos levantamientos de alta resolución mediante fotogrametría SfM-MVS para los meses de febrero de 2020 y febrero de 2021 en el balneario El Picaflor, Punta Indio, Buenos Aires, y se efectuó una caracterización de la hidrodinámica costera a partir del análisis del clima de olas en el área. Dicho estudio permitió cuantificar los principales cambios morfológicos y discutir las posibles causas de los procesos erosivos observados en la costa. En cuanto a la hidrodinámica costera se cuantificaron el flujo neto de energía de ola paralelo a la costa, la energía de ola incidente a la costa y la cantidad de eventos de tormenta para la serie 2010-2021. El PI neto mensual de febrero de 2021, fue el valor más alto de toda la serie con -1.08 KJ/ms mientras que el PI mensual medio fue de 62.2 KJ/ms. De los 7 eventos encontrados durante el período entre vuelos, se pueden destacar dos eventos significativos que se desarrollaron en los primeros 12 días de febrero de 2021.

Mediante el análisis efectuado a partir de SIG de las ortofotografías se obtuvo un valor promedio de retroceso de la línea de costa de -0.71 m/a para todo el sector analizado, aunque con un comportamiento heterogéneo. A su vez, se realizó un análisis comparativo de las nubes de puntos obtenidas, el cual también demuestra una predominancia de los procesos erosivos por sobre la acumulación a lo largo de todo el balneario con algunos sectores donde existe una ligera agradación. Ambos análisis resultaron comparables y complementarios a la hora de cuantificar las tasas a las que se producen los procesos de acumulación y erosión. El presente estudio permitió incrementar en dos órdenes de magnitud la resolución utilizada previamente en el análisis de la línea de costa en el área, siendo los valores de retroceso de la línea de costa menores a aquellos calculados previamente para el periodo 1943-2013.

En cuanto a los posibles desencadenantes de los pro-

cesos erosivos en el área de estudio se pueden destacar las modificaciones efectuadas en la fisonomía natural de la costa con la consecuente pérdida de la vegetación natural, la cual cumple la doble función de retención de sedimentos y atenuación del oleaje. Por otro lado, el impacto del oleaje puede tener una contribución significativa a la erosión costera directamente proporcional al tiempo que la ola impacta efectivamente sobre la escarpa. Esta situación podría darse principalmente bajo condiciones de oleaje de mediana intensidad en detrimento de cuando se producen eventos extremos, situaciones en las cuales las olas alcanzan sectores por encima de la escarpa. La heterogeneidad registrada en los valores de retroceso de la línea de costa puede deberse tanto a variaciones en la orientación general como en el perfil, como así también, a cambios en la ocupación y uso de los distintos sectores analizados.

A futuro se evidencia necesario aumentar la frecuencia de los relevamientos, con el objetivo de detectar cambios en la morfología de la línea de costa que sean vinculables a la variabilidad interanual, estacional o a eventos específicos. Por otro lado, resulta necesario acotar los modelos de superficie con respecto al nivel medio del estuario a fin de efectuar una correlación de manera más adecuada con los datos mareales.

Por último, es de destacar que este estudio representa uno de los primeros relevamientos utilizando estas técnicas relativamente novedosas en el estuario Río de la Plata. Asimismo, ofrece una metodología que resulta beneficiosa por su bajo costo y alta resolución y para complementar mediciones in-situ u otras técnicas de teledetección. De esta manera se pueden proponer estrategias focalizadas de protección que tiendan a hacer un uso sostenible de la costa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores deseamos agradecer al gobierno de la Municipalidad de Punta Indio por su interés y colaboración en el presente estudio. Asimismo, deseamos agradecer a la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata, y en particular a la cátedra de Levantamiento Geológico la cual aportó el equipamiento con el cual se realizaron los relevamientos.

REFERENCIAS

Alonso, G. 2019. El clima de olas y su impacto sobre las playas del nordeste bonaerense, Argentina. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (inédito), 125 p., Buenos Aires.

Angruureng, D.B., Almar, R., Senechal, N., Castelle, B., Addo, K.A.,

Marieu, V. y Ranasinghe, R. 2017. Shoreline resilience to individual storms and storm clusters on a meso-macrotidal barred beach. *Geomorphology* 290: 265–276.

Armaroli, C., Ciavola, P., Perini, L., Calabrese, L., Lorito, S., Valentini, A. y Masina, M. 2012. Critical storm thresholds for significant morphological changes and damage along the Emilia-Romagna coastline, Italy. *Geomorphology* 143–144: 34–51.

Bacino G.L., Dragani W.C. y Codignotto J.O. 2019. Changes in wave climate and its impact on the coastal erosion in Samborombón Bay, Río de la Plata estuary, Argentina. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 219: 71–80.

Bacino G.L., Dragani W.C., Codignotto J.O., Pescio A.E. y Farenga, M.O. 2020. Shoreline change rates along Samborombón Bay, Río de la Plata estuary, Argentina. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 237: 106659.

Blanch X., Eltner A., Guinau M. y Abellan A. 2021. Multi-Epoch and Multi-Imagery (MEMI) Photogrammetric Workflow for Enhanced Change Detection Using Time-Lapse Cameras. *Remote Sens* 13(8):1460.

Borsje, B.W., van Wesenbeeck, B.K., Dekker, F., Paalvast, P., Bouma, T.J., van Katwijk, M.M. y de Vries, M.B. 2011. How ecological engineering can serve in coastal protection. *Ecological Engineering* 37(2): 113–122.

Buniconro, M.P., Marcomini, S.C. y Casas, G.N. 2019. Environmental impacts of an Alien Kelp species (*Undaria pinnatifida*, Laminariales) along the Patagonian coasts. En: *Impacts of Invasive Species on Coastal Environments*. Springer, Cham: 373–396.

Carrivick J.L., Smith M.W. y Quincey J.D. 2016. *Structure from Motion in the geo*. Wiley Blackwell, 197 p., West Sussex.

Castelle B., Ritz A., Marieu V., Lerma A. N. y Vandenhove M. 2022. Primary drivers of multidecadal spatial and temporal patterns of shoreline change derived from optical satellite imagery. *Geomorphology* 413: 108360.

Cavallotto J.L. 2002. Evolución holocena de la llanura costera del margen sur del Río de la Plata. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 57 (4):376–388.

Cavallotto, J.L., Violante, R.A., Parker G. 2004. Sea-level fluctuations during the last 8600 years in the de la Plata river (Argentina). *Quaternary international* 114(1): 155–165.

Cellone F., Carol E. y Tosi L. 2016. Coastal erosion and loss of wetlands in the middle Río de la Plata estuary (Argentina). *Applied Geography* 76: 37–48.

Cellone, F.A. 2019. Evaluación de los recursos hídricos en un sector de la planicie costera del Río de la Plata. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata(inédito). La Plata.

CERC 1984. *Shore Protection Manual*. Volume 1. Department of the Army, US Army Corps of Engineers I, Washington DC.

Clapuyt F., Vanacker V. y Van Oost K. 2016. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. *Geomorphology* 260: 4–15.

- Codignotto J.O. y Kokot R. 2005. Geología y geomorfología. El Cambio Climático en el Río de la Plata, 85-106; Buenos Aires.
- Codignotto J.O., Dragani W.C., Martin P.B., Simionato C.G., Medina R.A. y Alonso G. 2012. Wind-wave climate change and increasing erosion in the outer Río de la Plata, Argentina. *Continental Shelf Research* 38: 110-116.
- Cook K.L. y Dietze, M. 2019. Short Communication: A simple workflow for robust low-cost UAV-derived change detection without ground control points. *Earth Surface Dynamics Discuss.* (May): 1-15.
- D'Onofrio E.E., Fiore M.M. y Pousa J.L. 2008. Changes in the regime of storm surges at Buenos Aires, Argentina. *Journal of Coastal Research* 24 (10024): 260-265.
- de Haas, T., Nijland, W., McArdell, B.W., Kalthof, M.W. 2021. Case Report: Optimization of Topographic Change Detection With UAV Structure-From-Motion Photogrammetry Through Survey Co-Alignment. *Frontiers in Remote Sensing* 2:626810.
- Dragani, W.C. y Romero, S.I. 2004. Impact of a possible local wind change on the wave climate in the upper Río de la Plata. *International Journal of Climatology* 24(9): 1149-1157.
- Dragani, W.C., Martin, P.B., Simionato, C.G. y Campos, M.I. 2010. Are wind wave heights increasing in south-eastern south American continental shelf between 32° S and 40° S?. *Continental Shelf Research* 30(5): 481-490.
- Dragani, W.C., Cerne, B.S., Campetella, C.M., Possia, N.E. y Campos, M.I. 2013. Synoptic patterns associated with the highest wind-waves at the mouth of the Río de la Plata estuary. *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 61: 1-13.
- Duró G., Crosato A., Kleinhans M.G. y Uijttewaall W.S.J. 2018. Bank erosion processes measured with UAV-SfM along complex banklines of a straight mid-sized river reach. *Earth Surface Dynamics* 6(4):933-953.
- Escapa, M., Minkoff, D. R., Perillo, G. M. y Iribarne, O. 2007. Direct and indirect effects of burrowing crab *Chasmagnathus granulatus* activities on erosion of southwest Atlantic *Sarcocornia*-dominated marshes. *Limnology and Oceanography* 52(6): 2340-2349.
- Esposito, G., Mastrorocco, G., Salvini, R., Oliveti, M. y Starita, P. 2017. Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy. *Environmental Earth Sciences* 76(3): 1-16.
- Feagin, R.A., Lozada-Bernard, S. M., Ravens, T. M., Möller, I., Yeager, K. M., Baird, A. H. 2009. Does vegetation prevent wave erosion of salt marsh edges?. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106(25): 10109-10113.
- Feurer D. y Vinatier F. 2018. Joining multi-epoch archival aerial images in a single SfM block allows 3-D change detection with almost exclusively image information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 146: 495-506.
- Fiore, M.M., D'Onofrio, E.E., Pousa, J.L., Schnack, E.J. y Bertola, G.R. 2009. Storm surges and coastal impacts at Mar del Plata, Argentina. *Continental Shelf Research* 29(14): 1643-1649.
- Fucks, E.E., Schnack, E.J. y Aguirre, M.L. 2010. Nuevo ordenamiento estratigráfico de las secuencias marinas del sector continental de la Bahía Samborombón, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 67(1): 27-39.
- Furukawa Y. y Ponce J. 2009. Accurate camera calibration from multi-view stereo and bundle adjustment. *International Journal of Computer Vision* 84(3): 257-268.
- Gedan, K.B., Kirwan, M.L., Wolanski, E., Barbier, E.B. y Silliman, B.R. 2011. The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm. *Climatic change* 106(1): 7-29.
- Genchi, S.A., Vitale, A.J., Perillo, G.M., Seitz, C. y Delrieux, C.A. 2020. Mapping topobathymetry in a shallow tidal environment using low-cost technology. *Remote Sensing*, 12(9): 1394.
- Harley, M.D. 2017. Coastal storm definition. En: Coco, G. y Ciavola, P. (eds.), *Coastal Storms. Process and Impacts*. Wiley Blackwell: Hoboken, 1-19, New Jersey.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC). 2010. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010: Censo del Bicentenario: Resultados definitivos Serie B N° 2. <https://www.indec.gov.ar/>.
- Isla F.I., Cortizo L., Merlotto A., Bértola G., Albisetti M.P. y Finocchietti C. 2018. Erosion in Buenos Aires province: Coastal-management policy revisited. *Ocean & Coastal Management*, 156: 107-116.
- Jaime P.R., Menéndez A.N., Uriburu Quirno M. y Torchio, J. 2002. Análisis del régimen hidrológico de los ríos Paraná y Uruguay. Informe LHA, 05-216. Instituto Nacional del Agua, Buenos Aires.
- James M.R. y Robson S. 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*. 39(10):1413-1420.
- Jaud M., Grasso F., Le Dantec N., Verney R., Delacourt C., Ammann J., Deloffre J., Grandjean P. 2016. Potential of UAVs for monitoring mudflat morphodynamics (Application to the Sein e Estuary, France). *ISPRS International Journal of Geo-Information* 5(4): 1-20.
- Lague D., Brodu N. y Leroux J. 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82:10-26.
- Lanfredi N.W., Pousa J.L. y D'Onofrio E.E. 1998. Sea-level rise and related potential hazards on the Argentine coast. *Journal of Coastal Research*, 47-60.
- Leonardi, N. y Fagherazzi, S., 2014. How waves shape salt marshes. *Geology* 42 (10): 887-890.
- Leonardi, N. y Fagherazzi, S. 2015. Effect of local variability in erosional resistance on large- scale morphodynamic response of salt marshes to wind waves and extreme events. *Geophys. Res. Lett.* 42 (14): 5872-5879
- Leonardi, N., Ganju, N. K. y Fagherazzi, S. 2016. A linear relationship between wave power and erosion determines salt-marsh resilience to

- violent storms and hurricanes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113(1): 64-68.
- Leonardi, N., Carnacina, I., Donatelli, C., Ganju, N.K., Plater, A.J., Schuerch, M. y Temmerman, S. 2018. Dynamic interactions between coastal storms and salt marshes: A review. *Geomorphology* 301: 92-107.
- López L. y Cellone F. 2022. SfM-MVS and GIS analysis of shoreline changes in a coastal wetland, Parque Costero del Sur biosphere reserve, Argentina. *Geocarto International* (0):1-17.
- López, R.A. y Marcomini, S.C. 2013. Consequences of anthropic activity in Mar del Tuyú partido de La Costa, Buenos Aires, Argentine. *Ocean Coast. Manag.* 77: 73-79.
- Mariotti, G., Fagherazzi, S., Wiberg, P. L., McGlathery, K. J., Carniello, L. y Defina, A. 2010. Influence of storm surges and sea level on shallow tidal basin erosive processes. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 115(11): 1-17.
- Marani, M., D'Alpaos, A., Lanzoni, S. y Santalucia, M. 2011. Understanding and predicting wave erosion of marsh edges. *Geophysical Research Letters* 38(21): L21401.
- Masselink, G., Austin, M., Scott, T., Poate, T., Russell, P. 2014. Role of wave forcing, storms and NAO in outer bar dynamics on a high-energy, macro-tidal beach. *Geomorphology* 226: 76-93.
- Mentaschi, L., Voudoukas, M. I., Pekel, J. F., Voukouvalas, E. y Feyen, L. 2018. Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific reports* 8(1): 1-11.
- Merlotto A., Bértola G.R. 2009. Coastline evolution at Balneario Parque Mar Chiquita, Argentina. *Ciencias Marinas* 35(3): 271-286.
- Moreira D., Simionato C.G., Dragani W., Cayocca F., Tejedor M.L.C. 2016. Characterization of bottom sediments in the Río de la Plata estuary. *Journal of Coastal Research* 32(6): 1473-1494.
- Nicholls, R.J., Wong, P.P., Burkett, V.R., Codignotto, J., Hay, J., McLean, R., Ragoonaden, S., Woodroffe, C.D. 2007 Coastal systems and low-lying areas. En: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Pilkey, O.H., Neal, W.J., Bush, D.M. 2009. Coastal erosion. En: F.I. Isla (ed.) *Coastal Zones and Estuaries*. Eolss Publishers: 32-42, Oxford.
- Richiano S., Varela A.N., D'Elia L., Bilmes A., Aguirre M. 2012. Evolución paleoambiental de cordones litorales holocenos durante una caída del nivel del mar en la Bahía Samborombón, Buenos Aires, Argentina. *Latin American journal of sedimentology and basin analysis* 19(2):105-124.
- Sanz-Ablanedo E., Chandler J.H., Rodríguez-Pérez J.R., Ordóñez C. 2018. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing*. 10(10): 0-19.
- Schwimmer, R. A. 2001. Rates and processes of marsh shoreline erosion in Rehoboth Bay, Delaware, USA. *Journal of Coastal Research*: 672-683.
- Seymour A.C., Ridge J.T., Rodriguez A.B., Newton E., Dale J., Johnston D.W. 2018. Deploying Fixed Wing Unoccupied Aerial Systems (UAS) for Coastal Morphology Assessment and Management. *Journal of Coastal Research* 34(3):704-717.
- Simionato, C.G., Vera, C.S., Siegismund, F. 2005. Surface Wind Variability on Seasonal and Interannual Scales Over Río de la Plata Area. *Journal of Coastal Research*, 214(214): 770-783.
- Simionato, C.G., Moreira, D. 2018. Modeling the Processes that Control Fine Sediments Transport in the Río de la Plata Estuary. *Journal of Coastal Research* 85(SI): 31-35.
- Spalding, M.D., Ruffo, S., Lacambra, C., Meliane, I., Hale, L. Z., Shepard, C. C., Beck, M. W. 2014. The role of ecosystems in coastal protection: Adapting to climate change and coastal hazards. *Ocean & Coastal Management* 90: 50-57.
- Sturdivant, E.J., Lentz, E.E., Thieler, E.R., Farris, A.S., Weber, K.M., Remsen, D.P., Miner S., Henderson, R.E. 2017. UAS-SfM for coastal research: Geomorphic feature extraction and land cover classification from high-resolution elevation and optical imagery. *Remote Sensing*, 9(10): 1020.
- Thieler, E.R., Himmelstoss E.A., Zichichi, J.L., Ergul A. 2009. The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0-an ArcGIS extension for calculating shoreline change (No. 2008-1278). US Geological Survey.
- Tosi L., Kruse E.E., Braga F., Carol E.S., Carretero S.C., Pousa J.L., Rizzetto F., Teatini P. 2013. Hydro-morphologic setting of the Samborombon Bay (Argentina) at the end of the 21st century. *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHES)*. 13(3):523-534.
- Turner I.L., Harley, M.D., Drummond C.D. 2016. UAVs for coastal surveying. *Coastal Engineering*, 114: 19-24.
- Valentine, K., Mariotti, G. 2019. Wind-driven water level fluctuations drive marsh edge erosion variability in microtidal coastal bays. *Continental Shelf Research*, 176: 76-89.
- Van Rijn, L.C. 2011. Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*, 54(12): 867-887.
- Violante, R.A., Parker, G. 2004. The post-last glacial maximum transgression in the de la Plata River and adjacent inner continental shelf, Argentina. *Quaternary International*, 114(1): 167-181.
- Wang, A. J., Ye, X., Du, Y. F., Yin, X. J. 2017. Hydrodynamic and biological mechanisms for variations in near-bed suspended sediment concentrations in a *Spartina alterniflora* marsh—a case study of Luoyuan Bay, China. *Estuaries and Coasts*, 40(6), 1540-1550.
- Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M. 2012. "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* .179: 300-314. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Westoby M.J., Lim M., Hogg M., Pound M.J., Dunlop L., Woodward J. 2018. Cost-effective erosion monitoring of coastal cliffs. *Coastal Engineering* 138 (June 2017):152-164. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.04.008>
- Williams A.T., Rangel-Buitrago N., Pranzini E., Anfuso G. 2018. The management of coastal erosion. *Ocean & Coastal Management*, 156: 4-20.

Young, R., Griffith, A. 2009. Documenting the global impacts of beach sand mining. En EGU General Assembly Conference Abstracts (p. 11593).