



Erosión diferencial de acantilados y plataformas de abrasión en Mar del Plata, Argentina

Federico Ignacio ISLA¹, Marcia MOJICA¹, Jorge GUTIERREZ¹

¹Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Mar del Plata, Argentina.

E-mail: fisla9@gmail.com; maar.mojica@hotmail.com; jgutierrez@grieta.org.ar

Editor: Ricardo A. Astini

Recibido: 15/10/2025

Aceptado: 13/03/2026

RESUMEN

La erosión de acantilados y plataformas de abrasión es un proceso natural pero que tiene variaciones espaciales y temporales. Ambos rasgos caracterizan el sur de Mar del Plata (Argentina) y han tenido cambios provocados por la magnitud y recurrencia de tormentas, pero también por efecto de antiguas extracciones de arena, el manejo de instalaciones balnearias y las obras de defensa mal implementadas. A todo esto debemos sumarle los efectos futuros derivados del cambio climático, principalmente a través del aumento antropogénico del nivel del mar. Existen variaciones locales derivadas de la resistencia de las rocas, su distribución vertical y espacial a lo largo de la costa. Estos acantilados y plataformas están compuestos por limos loeésicos con niveles de tosca que le dan resistencia en algunos tramos y niveles. Donde la costa está compuesta de cuarcitas, estos cabos más resistentes a la erosión conforman playas de bolsillo. Localmente, hay sectores donde la erosión depende de los excesos hídricos o la percolación de agua en grietas. Los organismos bentónicos pueden tanto erosionar las plataformas de abrasión como acorazarlas.

Palabras clave: acantilados, plataformas de abrasión, resistencia de las rocas, percolación de aguas subterráneas, efectos biológicos.

ABSTRACT

Differential erosion of cliffs and wave-cut platforms in Mar del Plata, Argentina. Cliff retreat and abrasion platform erosion are natural processes that exhibit significant spatial and temporal variability. Both features characterize the southern coast of Mar del Plata (Argentina) and have undergone changes driven by the magnitude and recurrence of storm events, as well as by anthropogenic factors such as the past sand extraction, the management of coastal resort infrastructure, and inadequately implemented coastal defense works. These factors are further compounded by future impacts associated with climate change, particularly those linked to anthropogenic sea-level rise. Local variability is also controlled by lithological resistance and its vertical and lateral distribution along the coast. The cliffs and abrasion platforms are primarily composed of loessic silts containing calcrete (tosca) horizons, which locally enhance resistance. Where the coastline is formed by more resistant quartzites, these units develop prominent headlands that bound pocket beaches. At smaller scales, erosion may be influenced by water excess and infiltration processes, including runoff and percolation through fractures. Additionally, benthic organisms play a dual role, contributing either to the bioerosion of abrasion platforms or to their stabilization through biogenic armoring.

Keywords: cliffs, abrasion platforms, rock resistance, groundwater percolation, biological effects.

INTRODUCCIÓN

La costa de Mar del Plata –ubicada en el extremo SE de la provincia de Buenos Aires (partido de General Pueyrredon) y, sobre las estribaciones del sistema de Tandilia (Fig. 1)-, se caracteriza por acantilados y plataformas de abrasión indicadores de erosión intensa y crónica, por lo que ha obligado a planificar y ejecutar obras de defensa desde principios del siglo XX. Ambos rasgos geomorfológicos del Cuaternario han heredado características típicas de este período, y a su vez, se ven afectados por las variaciones espaciales y temporales originados por los aumentos previstos en la magnitud y recurrencia de tormentas del sur, y del nivel del mar (Oppenheimer et al. 2019), como así también por el aumento de las precipitaciones en el SE de Sudamérica (Magrín et al. 2014) que también impactará al aumentar los excesos hídricos en la costa acantilada. Esta tendencia ha sido registrada para el intervalo 1901-2020 en la estación Camet, General Pueyrredon (Fig. 1).

Las tasas de meteorización y erosión de plataformas de roca intermareal dependen de factores físicos (Por ej., propiedades de las rocas, energía de olas, régimen climático) y también biológicos. Entre las influencias biológicas, la más documentada es la bioerosión (organismos que debilitan o perforan la roca; Trudgill 1987, Spencer 1988, Pinn et al. 2005, Bagur et al. 2014). Los principales agentes de bioerosión en plataformas intermareales son (a) herbívoros como lapas, caracoles, y erizos de mar que raspan la superficie de la roca para consumir microalgas y que ingieren sedimentos de forma incidental o, (b) microalgas e invertebrados que habitan el interior de las rocas (endolíticos) y que para ello las perforan por medios mecánicos o químicos (Naylor et al. 2012). Hay casos donde estos organismos contribuyen sustancialmente

a la erosión de las plataformas intermareales (Donn y Boardman 1988), aunque estos estudios son escasos. Para el área de Santa Elena (Santa Clara del Mar), Bagur et al. (2014) estimaron que, colectivamente, estos organismos erosionan 348 cm³ de roca por metro cuadrado por año (equivalente a 713 g m⁻²/año) siendo el bivalvo *Leiosolenus patagonicus* la especie que más contribuye en este aspecto (47% de la bioerosión total). No obstante, esta tasa de bioerosión equivale apenas al 1,3% de las estimaciones de erosión física medidas a partir de experimentos (Bagur et al. 2014).

El presente manuscrito informa los cambios morfológicos, sedimentológicos y en la fauna asentada en estas formas y de las modificaciones inducidas por actividades humanas (turismo, obras de defensa). Se destaca que la novedad de este trabajo radica en que contempla los cambios climáticos previstos (aumento de precipitaciones, del nivel del mar, recurrencia de tormentas) y sus impactos en la evolución de estas formas costeras en situaciones críticas de erosión.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se extiende entre los 38° 05' y 38° 14' 45" S, unos 26 km de costa y se ubica al sur de la ciudad de Mar del Plata. El clima de la zona se caracteriza por ser templado subhúmedo. La temperatura media es de 13,9 ° C con precipitaciones que han aumentado desde 1901 (Isla 2025; fig. 2).

Esta costa tiene un régimen micromareal (entre 0,6 y 0,91 m) con desigualdades diurnas. Debido a las diferentes orientaciones la energía de ola varía significativamente con playas reflectivas, intermedias y disipativas (Isla et al. 1994). En mar abierto la altura de ola es de 0,9 m con períodos de 9,5 s, aun-

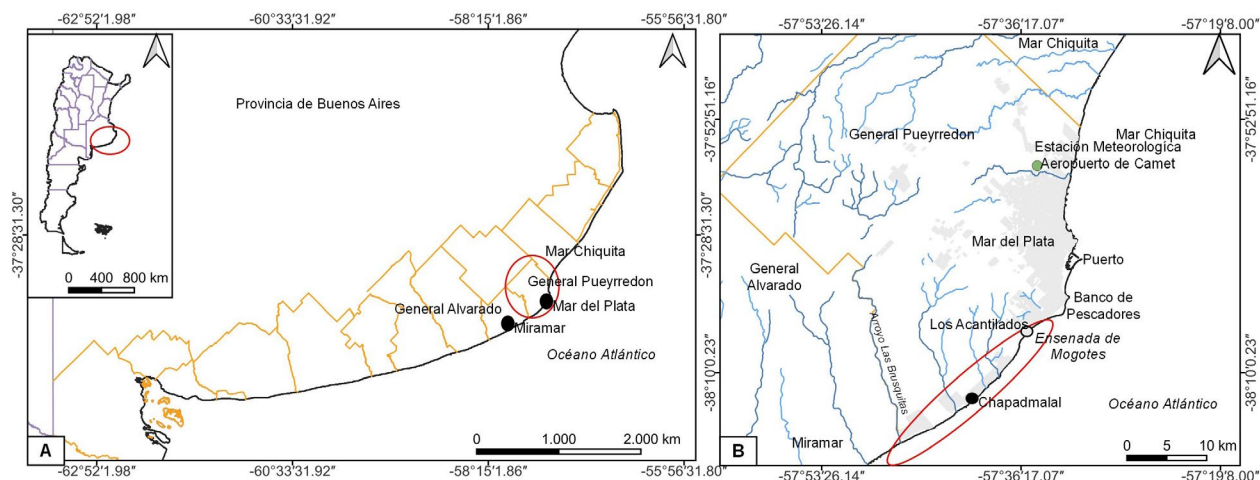


Figura 1. A. Ubicación del partido de General Pueyrredon y de la ciudad de Mar del Plata. B. Ubicación de la zona de acantilados y sitios de interés.

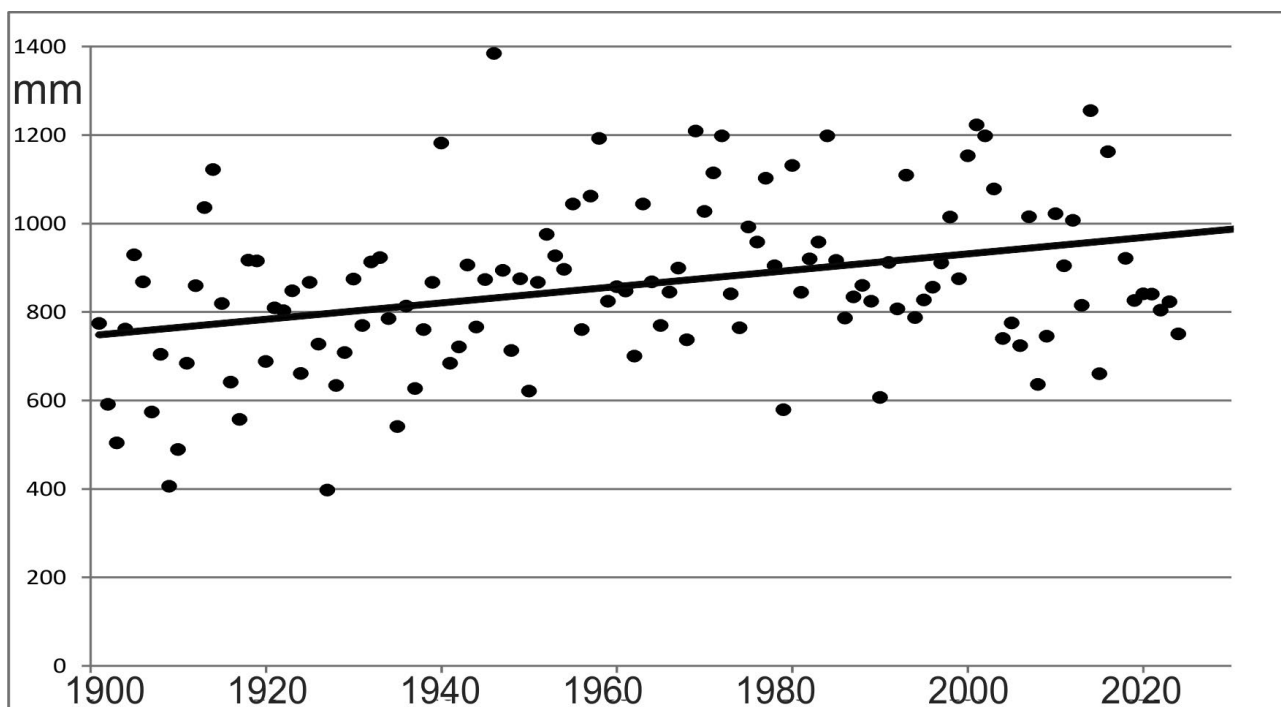


Figura 2. Aumento de las precipitaciones entre 1901 y 2024 (Estación Aeropuerto de Camet, Mar del Plata; modificado de Isla 2025)

que alturas de 2,3 m fueron estimadas (Lanfredi et al. 1992). La deriva potencial ha sido estimada en 400.000 a 700.000 m³/año según mediciones de oleaje de 1967-68 (Caviglia et al. 1992). Aplicando el modelo UNIBEST se calculó una deriva potencial de 250.000 a 1.230.000 m³/año para la Ensenada de Mogotes (Fig. 1B; Algeria et al. 2004). No obstante estas estimaciones potenciales, la deriva efectiva es de al menos 100.000 m³/año hacia el norte, aunque se han registrado años de mayor caudal sedimentario (Isla 2014). Dentro de la ensenada existe una celda litoral con erosión en el sur (Los Acantilados) y depositación en el norte, que genera un tómbolo (Banco Pescadores; Farenga et al. 1993, Isla 2010). Las playas de la ensenada están compuestas de arenas medias a finas (Farenga et al. 1993) que llegan a arenas gruesas en proximidades del tómbolo.

Las tormentas extratropicales (localmente llamadas sudestadas) impactan episódicamente esta costa, principalmente la orientada al SE. Se ha estimado una recurrencia de una tormenta de energía considerable cada dos años de acuerdo al índice del potencial erosivo SEPI según datos de marea medidos entre 1987 y 2004 (Fiore et al. 2009, Isla 2010; Isla et al. 2022); no habiendo estadísticas posteriores informadas.

Los acantilados están compuestos de limos loésicos con niveles resistentes de tosca de diferentes edades y ambientes de depositación ya descritos en detalle (Kraglievich 1952, Zárate y Fasano 1989, Isla et al. 2015). Se extienden desde la zona media de la ensenada de Mogotes hasta la localidad

de Miramar, interrumpidos sólo por las desembocaduras de arroyos (Fig. 3).

En este sector el 76 % de los acantilados son activos y retroceden a más de 0,5 m/año (Isla y Cortizo 2023; Fig. 4). En algunos sectores del acantilado afloran aguas subterráneas (Isla et al. 2018) que favorecen el desarrollo de la cubierta vegetal (mayormente forestado) y generando que el frente del acantilado este cubierto por uña de gato (*Carpobrotus* sp.). De acuerdo a relevamientos con sonar lateral sobre las aguas costeras, se detectaron sectores con fondos rocosos de cuarcitas y limos entoscados, y otros predominantemente arenosos (Isla 2010).

MÉTODOS

A partir de una búsqueda de trabajos previos aplicados en el área de estudio, se recopiló la información necesaria para asociar y contextualizar los cambios morfológicos y sedimentológicos registrados y previstos, analizando tanto los procesos físicos como los derivados de la actividad biológica y de las modificaciones inducidas por las actividades humanas.

Se levantaron perfiles sedimentológicos de los acantilados y de las plataformas de abrasión entre 2009 y 2010 reconociendo las unidades geológicas ya definidas (Kraglievich 1952, Isla et al. 2015). Hubo que utilizar escaleras especiales para acceder a ciertas alturas de los acantilados. Los mapeos

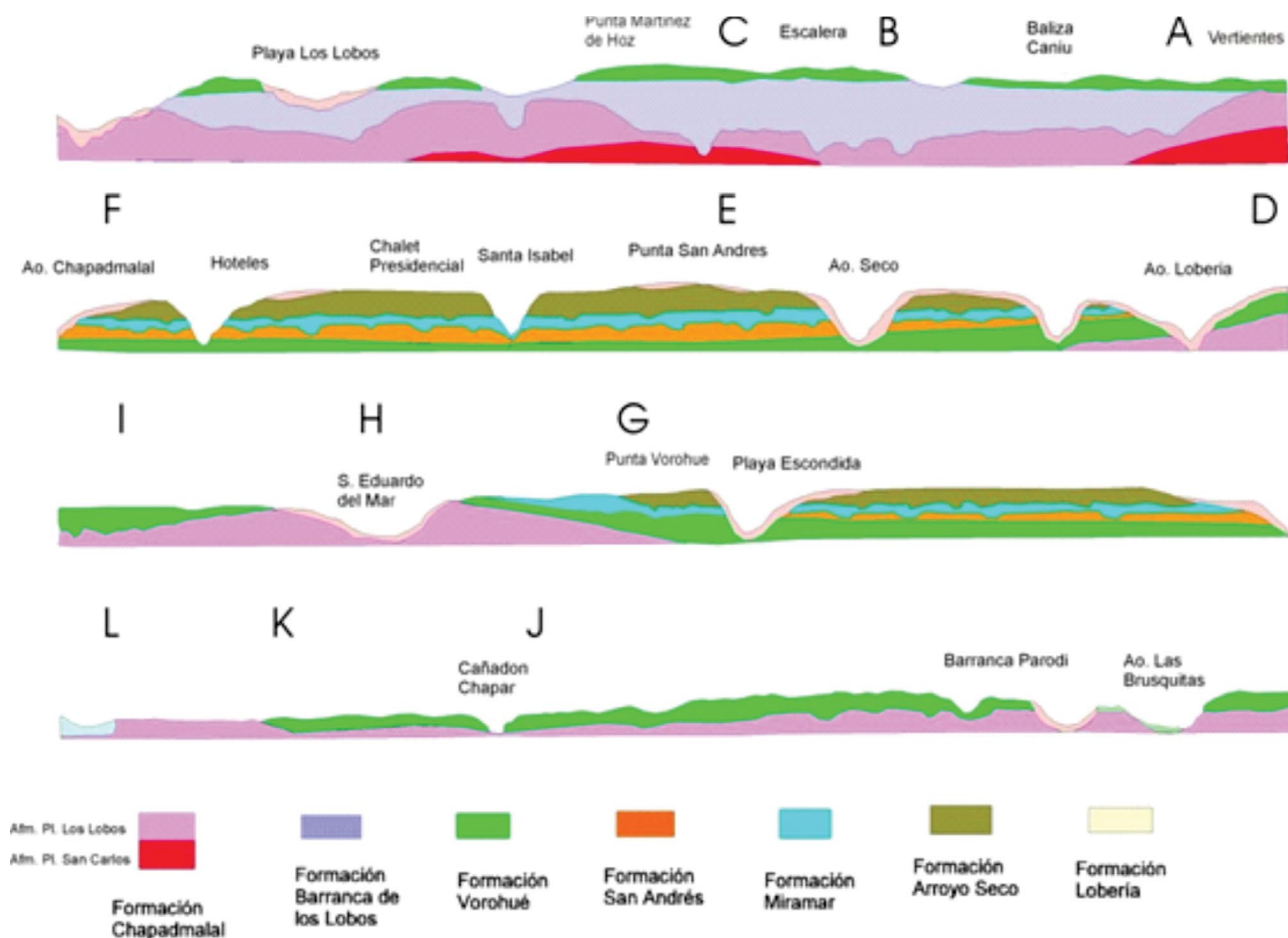


Figura 3. Estratigrafía de los acantilados del sur de General Pueyrredon (modificado de Kraglievich 1952, Isla et al. 2015). Como algunos rasgos geográficos han cambiado de nombre se mantienen las letras mayúsculas de la figura original de Kraglievich. Los extremos orientales se representan hacia la derecha y los occidentales hacia la izquierda.

submareales se ejecutaron con un sonar lateral Klein 422 con depresor K-Wing, transductor Klein 350 A y graficando en un registrador EPC (GSP 1086). La embarcación se transportó a velocidades 4-5 nudos y posicionada cada 60 s con GPS Trimble (Ensign XL). Las muestras de fondo fueron extraídas con Snapper.

Se cuantificaron los ritmos de erosión comparando fotografías aéreas e imágenes satelitales en los intervalos 1970-1987, 1987-2003 y 2003-2020 (Mojica et al. 2023). Para el mapeo de los cambios litorales se recurrió al programa Arc-Map versión 10.6.1 complementado con el *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS; Himmelstoss et al. 2018). Para este análisis se ha considerado una escala temporal media de 33 años (1987-2020), intervalo suficiente para evitar el sesgo dado por las variaciones estacionales y efecto de las tormentas puntuales (Crowell et al. 1993).

Las imágenes satelitales de los años 2003, 2011, 2015 fueron extraídas del *Google Earth*, mientras que la imagen satelital del año 2020 corresponde a una Sentinel 2 descargada desde la página Copernicus de la Unión Europea (Mojica

et al. 2023). Se utilizó el EPR (*End-Point Rate* o tasa de punto final), que tiene en cuenta únicamente la línea más antigua y la más reciente, desechando los datos intermedios, y el LRR (*Linear Regression Rate* o tasa de regresión lineal), que estima la velocidad de cambio de la distancia de la línea base y las diferentes líneas de costa. Los efectos de la refracción inducida por el Banco Pescadores se lograron a través de relevamientos de la línea de ribera con GPS Ensign entre 2012 y 2016 (Mojica et al. 2023).

RESULTADOS

Erosión heredada

Se considera erosión heredada la localizada en sectores donde no se ha intensificado por actividades humanas. Si bien los ritmos de erosión mayores se dan en el norte, los del sur representan mayor volumen erosionados (Isla y Cortizo 2014). Esto obedece a que en los sectores orientados al SE y S los acantilados son más altos (Isla y Cortizo 2023). Si bien

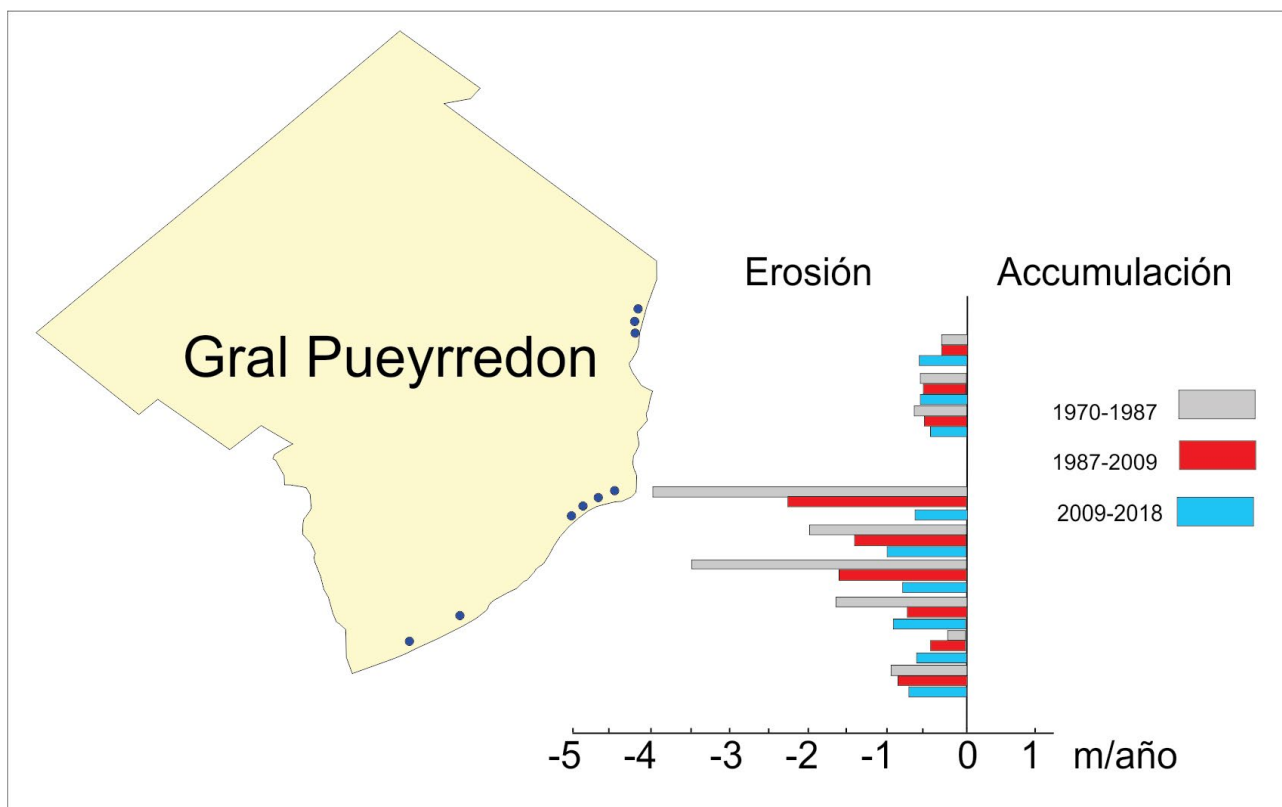


Figura 4. Ritmos de retroceso de acantilados en el sur del partido de General Pueyrredon según intervalos (modificado de Isla y Cortizo 2023).

los ritmos de erosión heredados superan los 0,5 m/año, en algunos sectores han disminuido significativamente aunque en otros se han incrementado (Fig. 4).

El loess de Argentina es particularmente rico en ceniza volcánica. En los acantilados de Mar del Plata el muestreo realizado por Teruggi y colaboradores (1957) se concentró en los niveles loésicos. Los niveles basales que corresponden a las formaciones Chapadmalal y Barranca de los Lobos son bastante uniformes compuestos mayormente por limos arcillosos a arenosos (Fig. 5). Existen no obstante paleosuelos con preservación de niveles de edáficos (Zárate y Fasano 1989) de mayor erosión, y niveles de arenas y gravas principalmente originadas por facies fluviales o de fondo de planicie aluvial (Isla et al. 2015). Los niveles de tosca y depósitos de tobas son los más resistentes a la erosión (Fig. 5 y 6).

Las formaciones Vorohué y San Andrés conservan apariencia uniforme como depósitos de planicie fluvial. En cambio, la Formación de Miramar tiene niveles fluviales con gravas y brechas intraformacionales. Si bien esta sucesión de facies ya ha sido descrita aún no se había analizado en términos de la resistencia diferencial a la erosión costera. Algunas pendientes de estos acantilados son muy empinadas no sólo por su composición volcanoclástica (cenizas y tobas), sino también por la alternancia con niveles de tosca, tanto como formas nodulares como producto de fluctuacio-

nes freáticas que le dan mayor resistencia a la erosión por olas (Fig. 6).

Meteorización física en acantilados y plataformas de abrasión

La lluvia que percola en grietas del acantilado durante el invierno induce un aumento de la meteorización física. Por la noche el hielo se expande y la grieta aumenta su tamaño (Fig. 7). Cuando las olas atacan la base el acantilado agrietado se desploma.

Las oscilaciones térmicas y los ciclos de hidratación-desecación también inciden en el desgaste y fragmentación de las plataformas de abrasión intermareales (Balson et al. 2006, Moses 2014). Esto facilita el embate del oleaje sobre el pie de los acantilados (Trenhaile 2002, Sunamura 2015). Otros atributos de las plataformas que pueden determinar el nivel de protección a los acantilados dependen de su extensión a lo largo del nivel de ataque del frente de olas y su perfil (pendiente u horizontal con escarpa; equivalente a *sloping* y "horizontal" en los términos de Sunamura 2015). Estas características condicionan la energía disipada por las olas antes de atacar la base del acantilado (Stephenson y Kirk 2000, Trenhaile y Kanyaya 2007, Bagur et al. 2022). Plataformas extensas (intermareales) o con bancos de erosión (supramar-

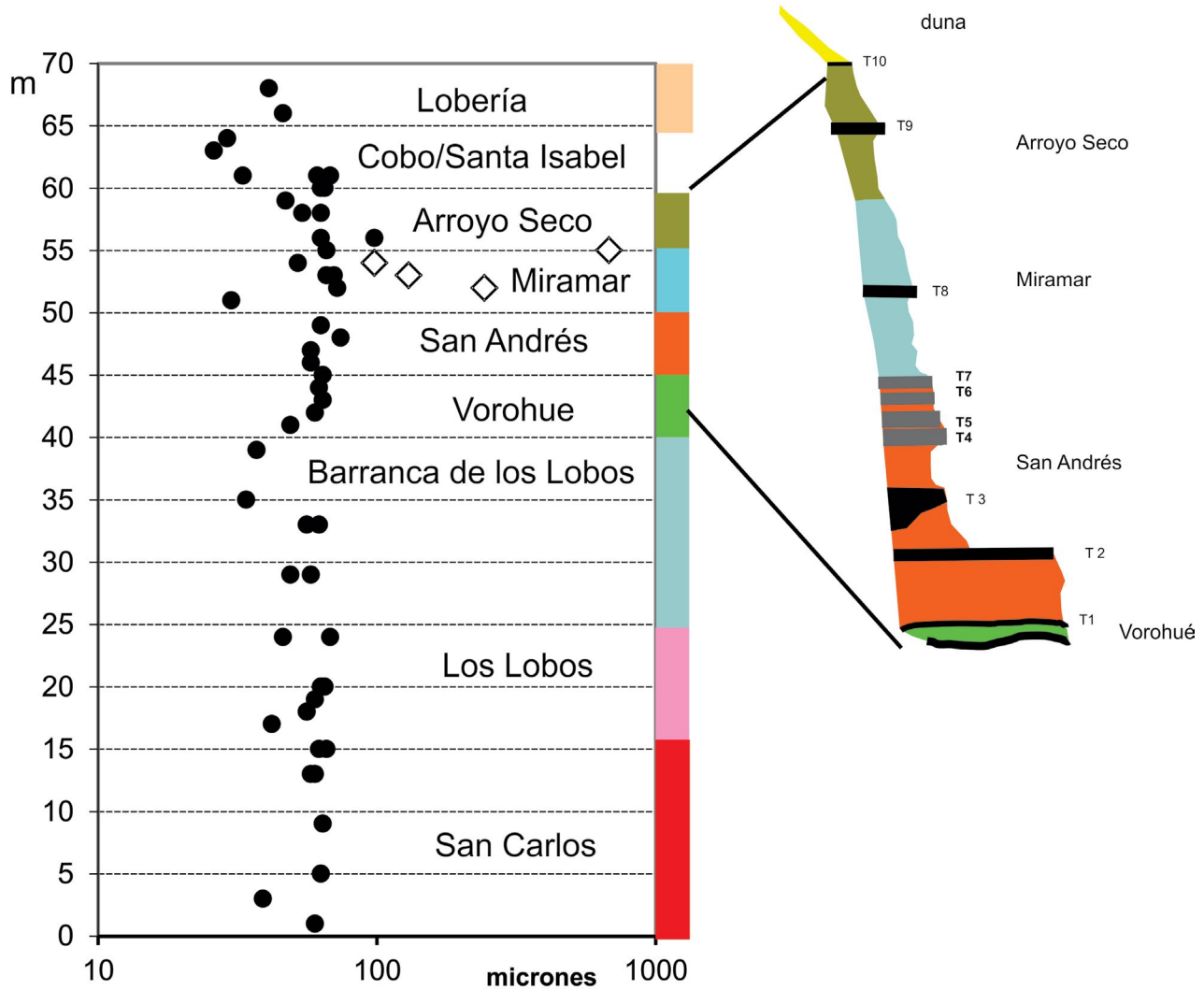


Figura 5. Izquierda. Granulometría de los acantilados en micrones (niveles loésicos fueron graficados como círculos e informados por Teruggi et al. 1957; niveles fluviales fueron graficados como diamantes e informados en Isla et al. 2015). Derecha. Perfil de Punta San Andrés (ver Figura 2) con 10 niveles de tosca de diferente estructura (modificado de Teruggi et al. 1974).

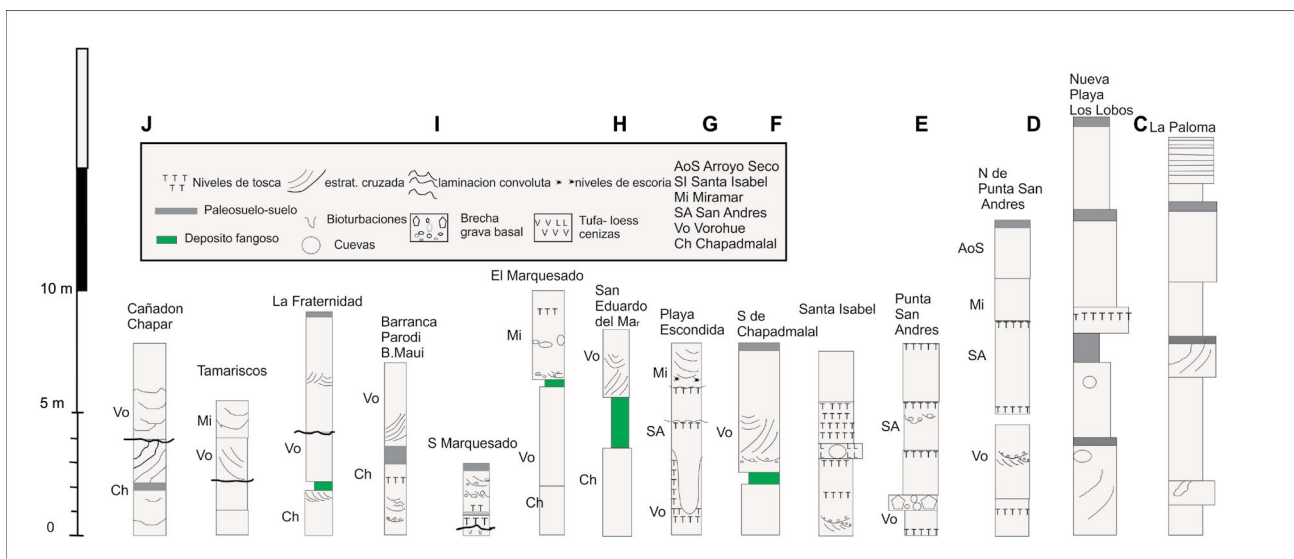


Figura 6. Los niveles de tosca, gravas y tobas originan niveles más resistentes a la erosión física. Los paleosuelos son menos resistentes a la erosión. Las letras corresponden a las mismas divisiones de la figura 2 (modificado de Isla et al. 2015).



Figura 7. La meteorización física domina en los sectores donde la lluvia se infiltra en grietas en los acantilados al sur de Chapadmalal (la escala es una mira estadimétrica extendida en 4 m).

reales) son más efectivas como protección al retroceso de la costa.

Erosión diferencial de acantilados

Originalmente la mayor erosión se produjo en las playas orientadas al S y SE donde impactan directamente las tormentas (Isla y Cortizo 2023; fig. 3). Dado que la construcción del puerto de Mar del Plata significó un obstáculo a la deriva litoral se construyeron espigones rígidos perpendiculares, que luego fueron reemplazados por otros más simples ordenados según pedraplenes de bloques de ortocuarcita. La obstrucción de la deriva litoral originó que se extendiera la erosión hacia el norte, al vecino partido de Mar Chiquita (Fig. 1). La prohibición de extracciones de arena en la Ensenada de Mogotes produjo una recuperación de las playas al norte; en realidad la erosión persistió pero en menor medida (Farenga et al. 1993). En las playas del sur del partido la erosión, también se incrementó debido a la construcción de los espigones del partido de General Alvarado generando la disminución del caudal de arena aportado por deriva.

Si bien la erosión de acantilados obedece principalmente al oleaje, su acción se incrementa en relación a los efectos de las mareas altas (Lim et al. 2011), y las mareas meteorológi-

cas, predominantemente provenientes del sur. Olas de menor altura pueden tener mayores efectos erosivos si coinciden con mareas meteorológicas que acceden a la base de los acantilados (Isla et al. 2022).

La acumulación de arenas debido a la dinámica de la celda litoral de la Ensenada de Mogotes (Fig. 1B, y 8) favoreció la formación de rampas eólicas adjuntas al acantilado. Esta celda fue alterada cuando se construyeron los rompeolas desvinculados (*detached breakwaters*) que indujeron acumulación en las playas cercanas. Sin embargo, hacia el NO de estas estructuras la erosión no sólo se mantiene sino que se ha incrementado dada la obstrucción de la deriva litoral (que se había prometido que no iba a ocurrir).

Acorazamiento de plataformas intermareales

Las plataformas intermareales de la zona varían en extensión entre unos pocos a varias decenas de metros predominando las de pendiente suave, aunque también las hay horizontales o subhorizontales (1 a 3 grados). En algunos sectores se desarrollan bancos de erosión de 1 m de altura respecto al nivel de arena (Escalera de Barranca de Los Lobos, Miramar; fig. 3). Al igual que los acantilados, estas se componen de limos loésicos pero se destacan como niveles

de carbonato de calcio. Aquellas con menor contenido de carbonato de calcio y, por lo tanto, más friables se encuentran atravesadas por cárcavas (Fig. 9a) y subdivididas en bancos de tamaño variable (Fig. 9b, c). Estas cárcavas son zonas de intensa abrasión debida al transporte hidráulico de arenas y gravas, lo que causa su ensanchamiento y fusión a merced de la erosión de los bancos (Fig. 9d). Es de esperar que la disminución de los bancos de arena y el aumento en área de la plataforma cubierta por cárcavas facilite el ataque de las olas sobre el pie del acantilado. La formación de cuevas al pie del acantilado y los derrumbes son habituales detrás de plataformas donde el área cubierta por bancos y la altura media de los mismos se han visto reducidas debido a la coalescencia de cárcavas.

La altura relativa de estas plataformas intermareales condiciona las especies de invertebrados y algas que colonizan esos niveles. En general, pueden discernirse por: 1) un nivel superior donde dominan las superficies de roca expuesta y que se caracteriza por la presencia de lapas pulmonadas (*Siphonaria lessonii*), el cirripedio exótico (*Balanus glandula*), algas incrustantes (*Ralfsia* sp.) y parches dispersos de mejillín (*Brachidontes rodriguezii*) (Fig 9e), 2) un nivel intermedio mayormente cubierto por bancos de mejillín donde también se encuentra *S. lessonii*, *B. glandula* y macroalgas (Por ej., *Ulva* sp., *Porphyra/Pyropia* sp.) (Fig. 9a, b, d), y 3) un nivel inferior donde dominan las algas coralinas (principalmente *Corallina officinalis* y *Jania rubens*) y es cada vez más frecuente el alga roja exótica (*Schyzimonia dubyi*) (Fig. 9c).

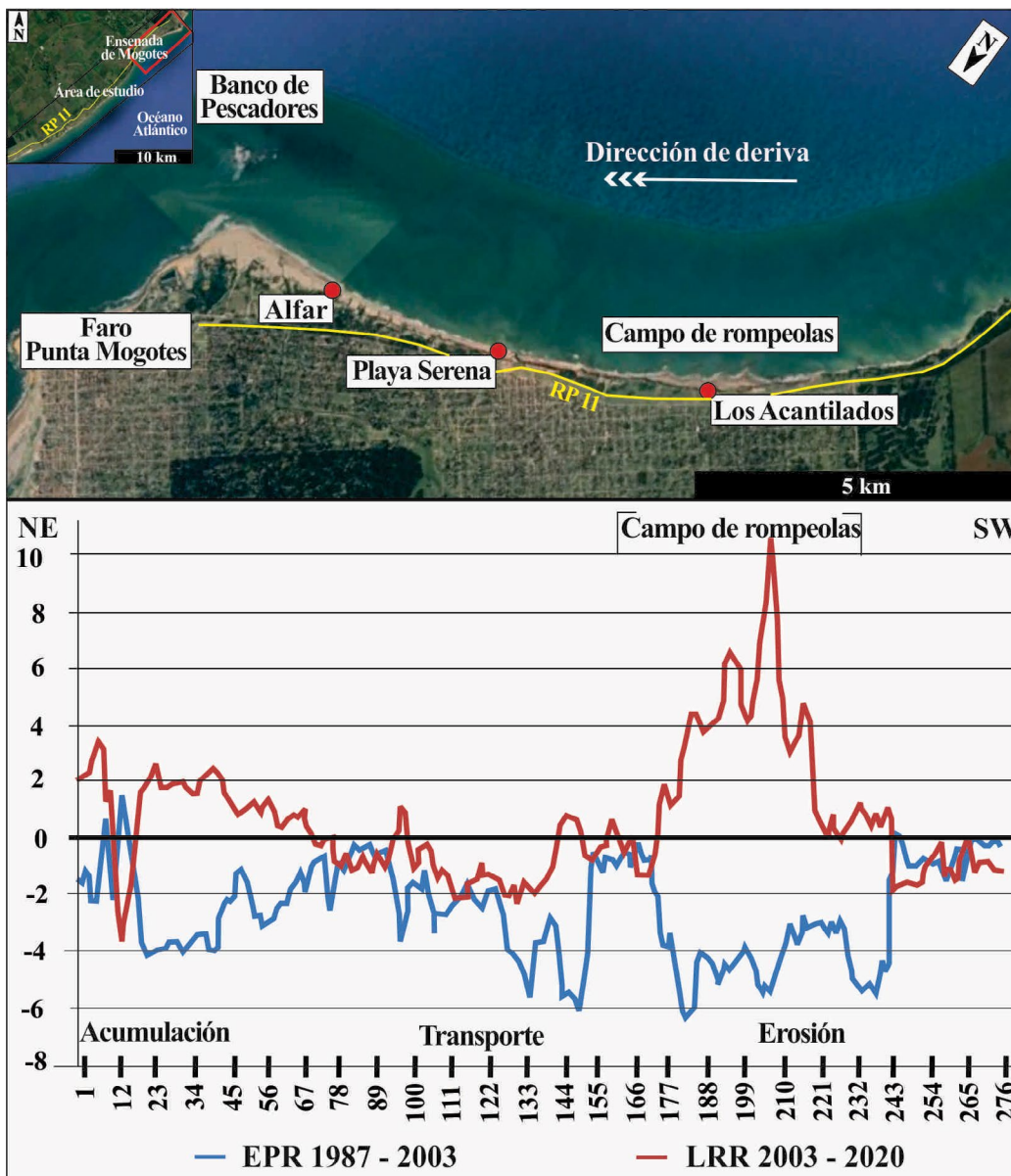


Figura 8. Variaciones de la erosión costera en la Ensenada de Mogotes. El EPR (End-Point Rate o tasa de punto final) tiene en cuenta únicamente la línea más antigua y la más reciente. En cambio, la LRR estima la velocidad de cambio de la línea de costa (modificado de Mojica et al. 2023).

La mayor parte de las plataformas intermareales ubicadas entre Santa Clara del Mar (partido de Mar Chiquita) y Miramar son bajas donde solo se observa el nivel dominado por algas coralinas, mientras que los niveles superiores no presentan rocas expuestas sino acumulaciones arenosas (Por ej. Playa Los Lobos, Punta San Andrés, San Eduardo del Mar; Fig. 9d). Plataformas de alturas medias con presencia de bancos de mejillín pueden observarse en Los Acantilados. Niveles altos se reconocen en Barranca de los Lobos (Chapadmalal), y en el tramo entre el Arroyo Las Brusquitas y la Barranca Parodi (Miramar) (Fig. 9e).

Las plataformas de mayor altura, más extensas y/o menos fragmentadas están coronadas por niveles de tosca de mayor dureza que los limos subyacentes, que le confieren mayor resistencia a la erosión. Este tipo de plataformas suele encontrarse asociada a cabos y puntas como Punta Martínez de Hoz, Punta Hermengo o Punta San Andrés (Fig. 3).

En las plataformas de abrasión de la costa marplatense se han encontrado 9 especies de invertebrados: 6 bivalvos, 2 poliquetos, y un sipuncúlido, que perforan las rocas ya sea por medios mecánicos o químicos (Amor et al. 1991, Bagur et al. 2013, 2014). En principio estos hallazgos sugieren que los



Figura 9. (a) Plataforma blanda fragmentada por cárcavas (Barranca Parodi). (b) Fragmento de la plataforma anterior (o “banco”) acorazado por mejillines, *Brachidontes rodriguezii*. Nótese también la acumulación de arena y gravas en las cárcavas circundantes. (c) Plataforma baja dominada por algas coralinas y desarrollo estacional de algas verdes, *Ulva* spp. (Punta San Andrés). (d) Plataforma baja con playa de arena ocupando los niveles medio y alto de la pendiente intermareal (San Eduardo del Mar). (e) Superficie colonizada por el cirripedio exótico, *Balanus glandula*, y la lapa pulmonada *Siphonaria lessonii*, en el nivel intermareal alto. (f) La disposición de pedraplenes en la base de los acantilados induce rampas de gravas y arenas que protegen la base del acantilado pero que minimizan el acorazamiento de moluscos al aumentar los efectos de abrasión (El Marquesado).

organismos perforadores son una fuente menor de erosión en estos ambientes, aunque su importancia relativa podría variar en función de la dureza de la roca, la exposición al oleaje, la abundancia de estos organismos perforadores y la composición de sus ensamblajes.

Más allá de estos efectos bioerosivos en las plataformas intermareales, en las últimas dos décadas se ha comenzado a considerar los posibles efectos "bioprotectores" (Carter y Viles 2005) de organismos como algas, mejillones y cirripe-dios. Estos organismos pueden limitar la meteorización física (Naylor et al. 2012), atenuando las variaciones de temperatura y humedad y, por lo tanto, reduciendo la meteorización debida a calentamiento-enfriamiento, hidratación-deseccación y cristalización de sales (Coombes et al. 2013, 2017, La Marca et al. 2014, Gowell et al. 2015, González et al. 2021). Asimismo, la cubierta de organismos sésiles puede proteger a la superficie rocosa del impacto del flujo de agua y la abrasión (González et al. 2021, Baxter et al. 2022, González 2024).

Localmente, estudios realizados en San Eduardo del Mar y Los Acantilados muestran que la cubierta de mejillín (*Brachidontes rodriguezii*) moderan la temperatura y desecación de la roca subyacente durante la marea baja y, de este modo, reducen su potencial de meteorización como resultado de oscilaciones térmicas, hidratación-secado y acumulación intersticial de sales (González et al. 2021, González 2024). La remoción experimental de mejillines en los bancos limo-loés-sicos friables de San Eduardo del Mar suscitó una reducción en su altura de 2 mm en 5 meses (González et al. 2021), siendo esta una de las primeras evidencias de campo de los impactos de la cubierta de organismos sésiles sobre la erosión de las plataformas. Algunos efectos bioprotectores compara-

bles se observaron más recientemente para el caso del alga *Ulva intestinalis* (disminución de la temperatura y desecación de la roca durante la marea baja, reducción del impacto del flujo de agua y la abrasión); especie que reemplaza al mejillín en áreas con influjo de agua dulce (González 2024). Al limitar las tasas de erosión de la plataforma intermareal, se espera que las especies sésiles bioprotectoras puedan mitigar, de modo indirecto, el retroceso de los acantilados (González et al. 2021). No obstante, diferencias entre las especies sésiles dominantes, su abundancia, y su potencia bioprotector entre distintas plataformas. Por ejemplo, diferencias en su altura o influjos de agua dulce podrían introducir variabilidad en este aspecto.

Escurrimiento superficial

Las previsiones de cambio climático del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) indican un aumento de las lluvias en el SE de Sudamérica (Magrín et al. 2014). Particularmente, durante el siglo XX las medias anuales del aeropuerto de Camet (Mar del Plata) aumentaron desde 1901 (Isla 2025, fig. 2), aunque hubo intervalos de sequía como el 2022-2023. A estos valores debemos sumarle los excesos hídricos que se canalizan a través de cuencas que se fueron activando. En las localidades residenciales del sur de General Pueyrredon no existe red pluvial bien definida y poseen un crecimiento urbano exponencial (Mojica et al. 2023b). En varios sectores los arroyos se están reactivando por aumento de la urbanización aunque hay excesos pluviales canalizados hacia la cima de acantilados (Fig. 10).

En la localidad Los Acantilados existe un manantial de agua subterránea que aflora entre rocas de diferente permea-

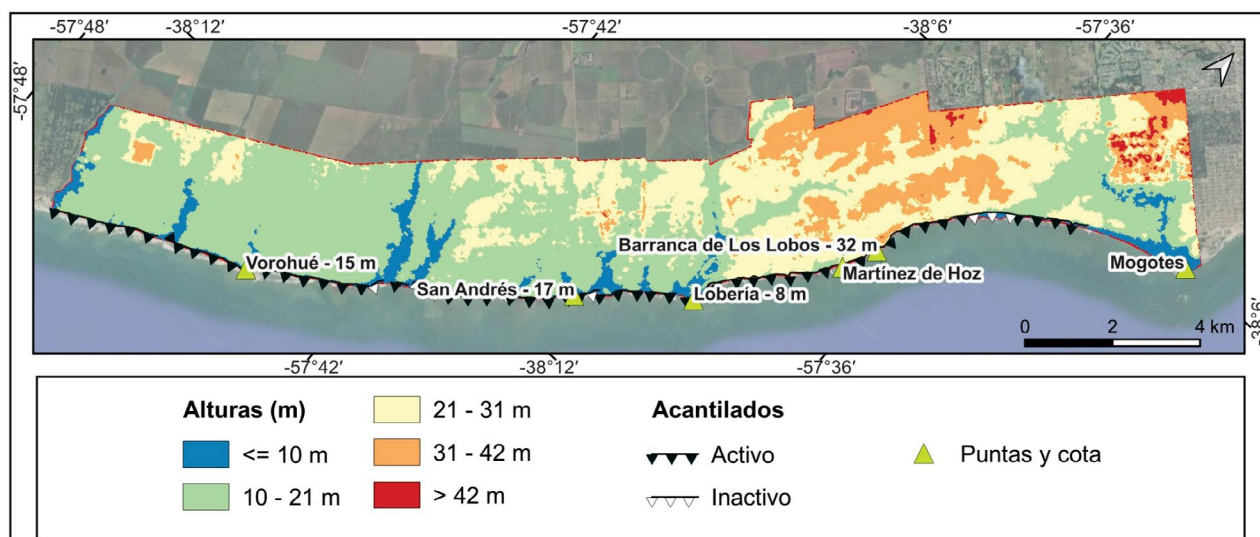


Figura 10. Modelo digital de elevación del sector de acantilados del sur de General Pueyrredon (desde Punta Mogotes a la desembocadura del arroyo Las Brusquitas).



Figura 11. A. Filtración de agua dulce en el contacto entre las formaciones Chapadmalal y Barranca de los Lobos. B. Escurrimiento superficial en la misma zona. C. Aumento del escurrimiento durante una tormenta (modificado de Isla et al 2018).

bilidad (Isla et al. 2018). Los excesos hídricos mencionados originan ocasionales cataratas que aceleran la erosión de los acantilados y la playa (Fig. 11).

Acantilados protegidos por dunas rampantes

Las dunas rampantes son acumulaciones de arena de playa que se han transportado por acción del viento hacia el tope de acantilados. Compuestas por arena fina se han movido de acuerdo a la pendiente de reposo de la arena fina de aproximadamente 34 grados (Al-Hashemi y Al-Amoudi 2018). Cuando llegan al tope adquieren formas de lengua en planta (Fig. 12) antes de ser fijadas por la vegetación. Vestigios de estas rampas pueden reconocerse como acumulaciones are-

nosas adjuntas a los acantilados con estructuras cruzadas. En muchos casos, las rampas han sido alteradas para nivelar estacionamientos de concesiones balnearias. Su ritmo de retroceso se ha estimado en 1,5 m/año (Isla y Cortizo 2023).

Efecto del oleaje

Si bien el oleaje medio y episódico son determinantes del retroceso de acantilados y erosión de playas, también tiene beneficios. Mar del Plata tiene las olas más altas de la provincia de Buenos Aires por ubicarse en la saliente de las Sierras de Tandilia con mínimos efectos de fricción en la más angosta plataforma continental (aproximadamente 190 km). Puntas y cabos originan la refracción del tren de olas (Isla



Figura 12. Evolución de la rampa de dunas de San Eduardo del Mar según los vientos pamperos del OSO (flecha). Las manzanas están trazadas cada 100 m.

2010; fig. 13). El ángulo de despegue (*peel angle*) aumenta el recorrido de la rompiente. La ola rompe cuando la altura es 0,78 de la profundidad, y según la pendiente de cada sector se producen rompientes de desgarre, volteo (tubo), colapso o *surging* (Isla 2010). En Mar del Plata, no todas las rompientes sucesivas son iguales. Normalmente hay una interacción de olas provenientes del sudeste, y este-sudeste que tienen períodos y alturas diferentes (Isla 2010). Normalmente hay una secuencia cíclica de 6 olas chicas y 3 olas grandes (ó 5 y 2). Luego de una tormenta proveniente del sur (mayor *fetch* o distancia de generación de olas) llegan las olas más rápidas (que son las más altas y de mayor período); posteriormente las olas se hacen menores porque son más lentas.

Construcciones balnearias y extracciones de arena

Los balnearios son concesiones que brindan sombra pero además abrigo al frío y viento. Las construcciones balnearias se han emplazado en muchos casos en las pendientes de los acantilados. Aquellas que se han fundado sobre los limos entoscados han tenido más estabilidad. En cambio, las fundadas sobre acumulaciones eólicas (rampas de dunas) son susceptibles de ser alcanzadas por olas que socavan sus bases (Fig. 14). El ritmo de retroceso de acantilados atenta contra la estabilidad de algunas construcciones durante eventos episódicos o interanuales (Griggs y Patsch 2019). A su vez, las concesiones balnearias generan modificaciones en los acantilados o aterrazan rampas, impermeabilizando las superficies y realizando canalizaciones pluviales (Isla et al. 1994; Mojica et al. 2023) que inducen mayor erosión diferencial. Lamentablemente, a estas construcciones no se les requiere evaluación de impacto ambiental previamente.

Durante muchos años hubo una extracción de arenas por parte de privados en la Ensenada de Mogotes que fue finalmente prohibida en 1987 debido a las consecuencias erosivas en las playas públicas ubicadas más al norte (Farenga

et al. 1993). Una vez prohibida la minería en playas los movimientos de arena continuaron en sectores concesionados. Actualmente, son normales movimientos furtivos para “acomodar” la arena dispuesta según dos bermas a diferente cota, o simplemente para alimentar los sectores de carpas con arena acumulada en el dominio público intermareal (Fig. 15).

DISCUSIÓN

En general la estabilidad del loess depende del contenido en humedad (Luttenegger y Hallberg, 1988). La erosión de barrancas de loess sigue diferentes características morfológicas de acuerdo a sus intercalaciones de paleosuelos y con la roca de base (Li y Mo 2019). En algunas costas, la meteorización física es dominante, y su variación está relacionada con las fluctuaciones de los niveles freáticos, como es el caso de los acantilados de tiza del norte de Francia (El Khattabi et al., 2018). El loess chino se caracteriza por diferentes porcentajes de arcilla que impiden grandes pendientes de sus laderas (Zhuang et al. 2021). La composición volcániclastica del loess pampeano asegura acantilados de mayor pendiente. A ellos se suma –para el caso de las barrancas de Mar del Plata–, la alternancia de niveles de tosca que le dan especial resistencia en determinados sectores (ver figura 5).

Diversas variables han sido consideradas para determinar la estabilidad de acantilados, entre ellos la intensidad del ataque de las olas, las pendientes de la playa y de las plataformas rocosas, la orientación de la costa, los efectos de tormentas, aunque la resistencia de las rocas es un factor determinante (Bezerra et al. 2011). Además de este último factor, la recurrencia temporal de tormentas ha probado ser particularmente crítica para el SE de Buenos Aires. Estos efectos son particularmente importantes para el caso de evaluar los efectos de la deriva litoral en el SE de la Provincia de Buenos Aires (Isla 2014). Las defensas costeras practicadas



Figura 13. En las salientes se produce la refracción de olas que aumenta el recorrido de las rompientes de volteo.

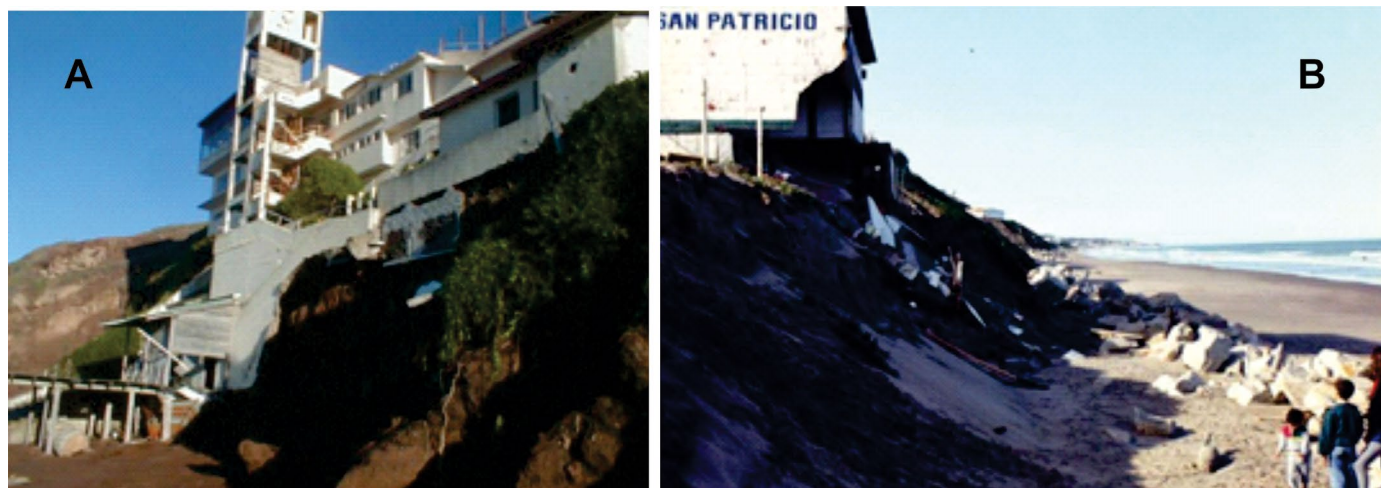


Figura 14. A. Algunos accesos a balnearios fueron construidos apoyados en los limos entoscados. B. Otros accesos fueron construidos sobre acumulaciones medanosas adosadas al acantilado y debieron ser protegidas. La tormenta de 1993 deslizó el piso del Balneario San Patricio.

en los acantilados han disminuido las contribuciones de este proceso erosivo a las playas de California (Young et al. 2010).

Respecto a la funcionalidad de las estructuras costeras se han evaluado sus dimensiones espaciales y la edad de la estructura. En ese sentido se consideran la funcionalidad ecológica, la ingenieril y la funcionalidad para los administradores y tomadores de decisiones. En general se prioriza la funcionalidad ingenieril en desmedro de la ecológica (Sealey et al. 2021). De todos modos, en sectores turísticos se considera más adecuado optar por soluciones que no produzcan alteraciones significativas a la playa como es el repoblamiento con arena (Phillips y Jones 2006).

Algunas comunidades costeras han considerado las olas, y particularmente las rompientes, como un recurso social y económico, que puede ser mejorado o desmejorado de acuerdo a las obras construidas (Corne 2009). El objetivo principal es no perder rompientes que pudieran ser de interés (Nelsen et al. 2013) como ha pasado en Mar del Plata (Punta Piedras, Cabo Corrientes). En 1991 Nueva Zelanda reconoció la pro-

tección y conservación de las rompientes, teniendo particularmente en cuenta aquellas que pudieran ser modificadas o destruidas por construcciones costeras (muros, espigones, escolleras, rellenos, puertos; Scarfe et al. 2009a). Modificaciones en la playa submarina, como montículos, pináculos o arrecifes, pueden mejorar el comportamiento de las olas para la práctica del surf (Scarfe et al. 2009 b) y al mismo tiempo minimizar la erosión de la base de los acantilados.

CONCLUSIONES

1. La erosión de acantilados varía espacial y temporalmente. Los ritmos de erosión varían a lo largo de la costa y de acuerdo a la resistencia de los diferentes niveles sedimentarios del perfil de acantilado. La composición volcániclastica y los bancos de tosca provocan niveles de estabilidad y pendientes pronunciadas.



Figura 15. A. Fiscalía de Estado prohibió la extracción de arena en 1987. B. No obstante algunas prácticas clandestinas persistían en 2022 en los balnearios del sur con varias demandas en contra de estas actividades.

2. Los excesos hídricos pueden ser significativos localmente desde el tope de los acantilados donde se encauzan las aguas de lluvia. Existe una erosión crónica inducida por el oleaje, principalmente durante las pleamares, y otra episódica provocada por tormentas.

3. La actividad biológica puede aumentar (organismos in-crustantes) o disminuir (acorazamiento) la erosión en la base de los acantilados (plataformas de abrasión). Acumulaciones de gravas y arenas pueden también proteger la base como las laderas (rampas de dunas) de los acantilados.

4. Las actividades humanas como accesos, estacionamientos, defensas (muros, pedraplenes) o extracciones de arena alteran los balances sedimentarios y debilitan algunos sectores acantilados.

5. Las obras construidas recientemente no lograron el objetivo prometido de acumular arena sin disminuir la deriva litoral.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a colegas que contribuyeron con información recabada en el manuscrito original. La CONAE proveyó las imágenes satelitales de los sitios de interés. El Servicio Meteorológico Nacional (gentileza Fiorela Bertone) permitió actualizar los datos de lluvia. S. Marcomini, J. F. Ponce, R. Astini y otro revisor realizaron aportes al texto original.

REFERENCIAS

Algera, A., Burger, B., Hartog, W. M. y De Rijke, Q. C., 2004. A study on the reconstruction of Los Acantilados Beach. Final Report. Unpublished report, Delft University of Technology, Project group Argentina, Mar del Plata, 2004, 73 pp.

Al-Hashemi, H. M. B. y Al-Amoudi, O. S., B., 2018. A review on the angle of repose of granular materials. *Powder Technology* 330, 397-417.

Amor, A., López Armengol, M. F., Iñiguez Rodríguez, A. M. y Traversa, L. P. 1991. Intertidal endolithic fauna and its relationship to the mineralogical, physical and chemical characteristics of the substrate. *Marine Biology*, 111, 271-280.

Bagur, M., Gutiérrez, J. L., Arribas, L. P. y Palomo, M. G., 2014. Endolithic invertebrate communities and bioerosion rates in Southwestern Atlantic intertidal consolidated sediments. *Marine Biology* 161, 2279–2292., 2014.

Bagur, M., Gutiérrez, J. L., González, J. A., Arribas, L. P. y Palomo, M. G. 2022. Physical rather than biotic factors set the lower limit of mussel beds in a horizontal rocky intertidal platform. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 548, 151680.

Bagur, M., Richardson, C. A., Gutiérrez, J. L., Arribas, L. P., Doldan, M. S. y Palomo, M. G., 2013. Age, growth and mortality in four populations of the boring bivalve *Lithophaga patagonica* from Argentina. *Journal of Sea Research*, 81, 49-56.

Balson, P. S., Brew, D. S., Charman, R. O., Hobbs, P., Moses, C. A., Pearson, S., et al.. 2006. Coastal retreat: the role of eroding cohesive shore platforms. In *Proceedings of the Defra Conference on Flood and Coastal Erosion Risk Management* (York, UK),. 1-9.

Baxter, T. I., Coombes, M. A. y Viles, H. A., 2022. The bioprotective properties of the blue mussel (*Mytilus edulis*) on intertidal rocky shore platforms. *Marine Geology* 445, 106734.

Bezerra, M.M.; Moura, D.; Ferreira, O. y Taborda, R., 2011. Influence of wave action and lithology on sea cliff mass movements in Central Algarve coast, Portugal. *Journal of Coastal Research*, 27 (6A), 162–171.

Carter, N. E. A. y Viles, H. A. 2005. Bioprotection explored: the story of a little-known Earth Surface Process. *Geomorphology* 67, 273–281.

Caviglia, F. J., Pousa, J. L. y Lanfredi, N. W. , 1992. Transporte de sedimentos: una alternativa de cálculo. 2° Congreso de Ciencias de la Tierra, Memorias, Santiago, Chile, 413-422.

Coombes, M. A., Naylor, L. A., Viles, H. A. y Thompson, R. C. 2013. Bioprotection and disturbance: seaweed, microclimatic stability and conditions for mechanical weathering in the intertidal zone. *Geomorphology* 202, 4-14.

Coombes, M. A., Viles, H. A., Naylor, L. A., y La Marca, E. C., 2017. Cool barnacles: do common biogenic structures enhance or retard rates of deterioration of intertidal rocks and concrete? *Science of the Total Environment* 580, 1034–1045.

Corne, N.P., 2009. The implications of coastal protection and development on surfing. *Journal of Coastal Research* 25(2), 427-434.

Crowell, M., Leatherman, S.P. y Buckley, M. 1993. Shore-line change rate analysis: long term versus short term data. *Shore and Beach*, 61(2):13-20.

Donn, T. F. y Boardman, M. R., 1988. Bioerosion of rocky carbonate coastlines on Andros Island, Bahamas. *Journal of Coastal Research* 4:381-394.

El Khattabi, J., Carlier, E. y Louche, B., 2018. The effect of rock collapse on coastal cliff retreat along the chalk cliffs of northern France. *Journal of Coastal Research*, 34(1): 136-150.

Farenga, M. O., Adamini, R. e Isla, F. I., 1993. Evaluación de playas de intensa extracción de arena: Ensenada Mogotes, Mar del Plata, Argentina, 1987-1990. *Revista Thalassas* 10, 41-47.

Fiore, M., D'onofrio, E. E., Pousa, J. L., Schnack, E. J. y Bértola, G. R., 2009. Storm surge and coastal impacts at Mar del Plata, Argentina. *Continental Shelf Research* 29, 1643-1649.

González, M. J., Coombes, M. A., Palomo, M. G., Isla, F. I., Soria, S. A. y Gutiérrez, J. L., 2021. Enhanced weathering and erosion of a cohesive shore platform following the experimental removal of mussels. *Frontiers in Marine Science* 8, 756016.

- González, J. A. 2024. Relación entre organismos sésiles y la erosión en sedimentos consolidados intermareales. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Gowell, M., Coombes, M. A. y Viles, H. A. 2015. Rock-protecting seaweed? Experimental evidence of bioprotection in the intertidal zone. *Earth Surface Processes and Landforms* 40, 1364-1370.
- Griggs, G. y Patsch, K., 2018. The protection/hardening of California's coast: Times are changing. *Journal of Coastal Research* 35(5), 1051-1061.
- Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G. y Farris, A.S. 2018. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2018-1179:110. https://doi.org/10.3133/ofr20181179_2
- Isla, F. I. 2010. Natural and artificial reefs at Mar del Plata, Argentina. *Journal of Integrated Coastal Management* 10, 1, 81-93. <http://www.aprh.pt/rgci/revista10f1.html>
- Isla, F. I., 2014. Variaciones espaciales y temporales de la deriva litoral, SE de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Geográfica del Sur*, 5, 8, 24-41.
- Isla, F. I., 2025. Predictions of the impacts of the sea-level rise in Argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 32, 35-47.
- Isla, F.I., y Cortizo, L.C., 2014. Sediment input from fluvial sources and cliff erosion to the continental shelf of Argentina. *Journal of Integrated Coastal Zone Management* 14, 4, 541-552.
- Isla, F. I. y Cortizo, L. C., 2023. Coastal erosion in Argentina: the retreating rates of southern South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 126, 1043442.
- Isla, F. I., Cortizo, L. C., Merlotto, A., Bertola, G., Pontrelli Albisetti, M. y Finocchietti, C., 2018. Erosion in Buenos Aires province: Coastal-management policy revisited. *Ocean and Coastal Management*, 156, 107-116.
- Isla, F., Prario, B., Maenza, R., Bértola, G., Cortizo, L. y Lamarchina, S., 2022. Las sudestadas del sudeste y del sur en la provincia de Buenos Aires, Argentina y el aumento antropogénico previsto del nivel del mar. *Revista Universitaria de Geografía* 31, 1, 11-37.
- Isla, F., Quiroz Londoño, O. M. y Cortizo, L. C. 2018. Groundwater content within loessic deposits: the coastal springs of Los Acantilados, Mar del Plata, Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 77: 610, <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7766-y>.
- Isla, F. I., Taglioretti, M. L. y Dondas, A. 2015. Revisión y nuevos aportes a la estratigrafía y sedimentología de los acantilados entre Mar de Cobo y Miramar, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 72, 2, 235-250.
- Isla, F. I., Witkin, G., Bertola, G. R. y Farenga, M. O., 1994. Variaciones morfológicas decenales (1983-1993) de las playas de Mar del Plata. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 49, 3-4, 55-70.
- La Marca, E. C., Coombes, M. A., Viles, H. A. y Naylor, L. A., 2014. The bio-protective role of a biological encrustation. *Biología Marina Mediterránea*. 21, 345-346.
- Lanfredi, N. W., Pousa, J. L., Mazio, C. A. y Dragani, W. C., 1992. Wave-power potential along the coast of the Province of Buenos Aires, Argentina. *Energy* 17(11): 997-1006.
- Li, Y. y Mo, P., 2019. A unified landslide classification system for loess slopes: A critical review. *Geomorphology* 340, 67-83.
- Lim, M., Rosser, N.J., Petley, D.N. y Keen, M., 2011. Quantifying the controls and influence of tide and wave impacts on coastal rock cliff erosion. *Journal of Coastal Research*, 27(1), 46-56.
- Lutenegger, A. J. y Hallberg, G. R., 1988. Stability of loess. *Engineering Geology* 25, 247-261.
- Magrin, G.O., Marengo, J.A., Boulanger, J.P., Buckeridge, M.S., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, S.J. y Vicuña, S. 2014. Central and South America. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros VR, CB, Field DJ, Dokken MD, Mastrandrea KJ, Mach TE et al (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2, 1499-1566.
- Mojica, M., Anfuso, G. e Isla, F. I., 2023. Evolución de la costa entre 1987-2020 para la zona sur de la ciudad de Mar del Plata, provincia de Buenos Aires (Argentina). *Quaternary and Environmental Geosciences* 14, 2, 1-14.
- Mojica, M., Garzo, P. e Isla, F. I. 2023b. Surgimiento y evolución de las villas balnearias al sur del partido de General Pueyrredon, Argentina. *Revista Universitaria de Geografía*, 32(2), 72-110.
- Moses, C., 2014. The rock coast of the British Isles: shore platforms. In *Rocky Coasts: a Global Synthesis* En D. Kennedy, W. Stephenson, and L. Naylor (eds.) London: Geological Society, 39-55, 2023 b.
- Naylor, L. A., Coombes, M. A. y Viles, H. A., 2012. Reconceptualising the role of organisms in the erosion of rock coasts: a new model. *Geomorphology* 15, 17-30.
- Nelsen, C., Cummins, A. y Tagholm, H., 2013. Paradise lost: Threatened waves and the need for global surf protection Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, 904-908.
- Openheimer, M., Glavovic, B.C., Hinkel, J., Van De Wal, R., Magnan, A. K., Abd-Elgawad, A., Cai, R., Cifuentes-Jara, M., Deconto, R.M., Ghosh, T., Hay, J., Isla, F., Marzeion, B., Meyssignac, B. y Sebesvari, Z. 2019. Sea level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New YORK, NY, USA, 321-445.

- Phillips, M. R. y Jones, A. L. 2006. Erosion and tourism infrastructure in the coastal zone: Problems, consequences and management. *Tourism Management* 27, 517-52.
- Pinn, E. H., Richardson, C. A., Thompson, R. C. y Hawkins, S. J. 2005. Burrow morphology, biometry, age and growth of piddocks (Mollusca: Bivalvia: Pholadidae) on the south coast of England. *Marine Biology* 147, 943-953.
- Scarfe, B. E., Healy, T.R., Rennie, H.G. y Mead, S.T., 2009 a. Sustainable management of surfing breaks: case studies and recommendations. *Journal of Coastal Research*, 25(3), 684-703.
- Scarfe, B.E., Healy, T.R. y Rennie, H.G., 2009 b. Research-based surfing literature for coastal management and the science of surfing. A review. *Journal of Coastal Research*, 25(3), 539-557.
- Sealey, K.S.; Andiroglu, E.; Lamere, J.; Sobczak, J., and Suraneni, P., 2021. Multifunctional performance of coastal structures based on South Florida coastal environs. *Journal of Coastal Research*, 37(3), 656-669.
- Spencer, T., 1998. Limestone coastal morphology: the biological contribution. *Progress in Physical Geography* 12: 66-101.
- Stephenson, W.J. y Kirk, R.M., 2000. Development of shore platforms on Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand: Part One: The role of waves. *Geomorphology* 32, 21-41.
- Sunamura, T., R., 2015. Rocky coast processes: with special reference to the recession of soft rock cliffs. *Proceedings of the Japan Academy, Series B* 91:481-500.
- Teruggi, M. E., Andreis, R. H., Mazzoni, M. M., Dalla Salda, L. H. y Spalletti, L. A., 1974. Nuevos criterios para la estratigrafía de las barrancas de Mar del Plata-Miramar. *Lemit Serie II*, 268, 134-148.
- Teruggi, M. E., Etchichury, M. C. y Remiro, J., 1957. Estudio sedimentológico de los terrenos de las barrancas de la zona Mar del Plata-Miramar. *Revista Museo Argentino de Ciencias Naturales, Geología* 4: 107-250.
- Trenhaile, A. S., 2002. Rock coasts, with particular emphasis on shore platforms. *Geomorphology* 48, 7-22.
- Trenhaile, A.S. y Kanyaya, J.I., 2007. The role of wave erosion on sloping and horizontal shore platforms in macro-and mesotidal environments. *Journal of Coastal Research* 23, 298-309.
- Trudgill, S. T. 1987. Bioerosion of intertidal limestone, Co. Clare, Eire 3: zonation, process and form. *Marine Geology* 74, 111-121.
- Young, A.P.; Raymond, J.H.; Sorenson, J.; Johnstone, E.A.; Driscoll, N.W. y Flick, R.E., Guza, R.T., 2010. Coarse sediment yields from seacliff erosion in the Oceanside Littoral Cell. *Journal of Coastal Research*, 26(3), 580-585.
- Zárate, M.A. y Fasano, J.L. 1989. The Plio-Pleistocene record of the central eastern Pampas, Buenos Aires Province, Argentina: The Chapadmalal case study. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 72: 27-52.
- Zhuang, J., Peng, J. y Zhu, Y., 2021. Study of the effects of clay content on loess slope failure mode and loess strength. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 80:1999-2009.