

# EROSIÓN COSTERA EN EL PARQUE COSTERO DEL SUR: LA IMPORTANCIA DE PROTEGER LOS HUMEDALES

Francisco Cellone<sup>1</sup>· Eleonora Carol<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones del Medio Ambiente (CONICET-UNLP) fcellone@fcnym.unlp.edu.ar

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones Geológicas (CONICET-UNLP) eleocarol@fcnym.unlp.edu.ar

## INTRODUCCIÓN

La línea de costa es dinámica en sí misma debido a fenómenos causados por cambios en las corrientes, en el nivel del mar y factores excepcionales como tormentas (Scott, 2005). Durante los últimos 100 años, la mayor parte de las costas del mundo ha experimentado procesos erosivos y se encuentran actualmente en retroceso (Nicholls *et al.*, 2007). Ante este panorama erosivo global se plantean diversas causas, entre las cuales las más plausibles parecen ser el aumento relativo en el nivel del mar, el cambio climático (en particular el régimen de tormentas) y el impacto de las actividades humanas (Zhang *et al.*, 2004). El estudio de los cambios en la línea de costa, y las tasas a las que estos cambios ocurren es fundamental para la delimitación de zonas de riesgo, para estudios de dinámica litoral y a su vez para predecir y modelar el comportamiento de la costa a futuro (Sherman & Bauer, 1993; Zuzek *et al.*, 2003).

Uno de los principales servicios ecosistémicos de los humedales costeros es que actúan como defensas naturales. La vegetación en ellos cumple el rol de estabilización de la costa, favoreciendo los procesos de sedimentación y acreción en conjunción con la atenuación del oleaje y los impactos de tormentas (Perillo *et al.*, 2009; Feagin *et al.*, 2011; Anderson & Smith, 2014). Sin embargo, estos humedales constituyen ecosistemas frágiles frente a la erosión que lleva irreversiblemente a su degradación y pérdida (Michener *et al.*, 1997; Brinson & Malvárez, 2002; Bird *et al.*, 2004; Zedler & Kercher, 2005).

En Argentina, muchos sectores costeros están caracterizados por la presencia de humedales, de los cuales, gran cantidad constituyen áreas protegidas (reservas naturales, reservas de biosfera MAB<sup>2</sup> y sitios RAMSAR) (Isacch *et al.*, 2010). A pesar de constituir ecosistemas

2 Man and the Biosphere (MAB) Programme <https://en.unesco.org/mab>

protegidos, son sometidos a grandes presiones tanto físicas como ecológicas debidas a la actividad humana (e.g., Isla *et al.*, 2001; Bértola *et al.*, 2009; Codignotto, 2009; Carol *et al.*, 2014) y al cambio climático (e.g., Codignotto *et al.*, 2011) que han llevado a una erosión costera significativa (e.g., Pousa *et al.*, 2007). Ante la falta de mediciones *in situ* en gran parte de los humedales costeros no sólo en Argentina, sino en el mundo, las imágenes provenientes de sensores remotos pueden ser de utilidad a la hora de cuantificar los cambios en la línea de costa (Kuenzer *et al.*, 2014). La metodología se basa en comparar una serie de imágenes de un mismo punto de la superficie terrestre a lo largo de un cierto intervalo temporal. Existen sin embargo factores a tener en cuenta con respecto a las incertidumbres implícitas en esta metodología. Algunas de estas están relacionadas con el momento de adquisición de la imagen, por ejemplo, con las condiciones climáticas y mareográficas, mientras que otras están relacionadas con el procesamiento posterior: georeferenciación y digitalización de la línea de costa. Resulta indispensable considerar estos errores e incertidumbres a la hora de producir resultados confiables y estadísticamente significativos (Anders & Byrnes, 1991; Crowell & Leatherman, 1991; Thieler & Danforth, 1994; Moore, 2000).

La Reserva Biosfera Parque Costero Sur se desarrolla en el litoral de los partidos de Punta Indio y Magdalena, Buenos Aires, Argentina, donde existen ambientes de humedales de manera prácticamente continua a lo largo de la línea de costa. Históricamente el litoral de la Reserva ha sido afectado en numerosos sectores por la actividad humana, principalmente a través de la actividad turística y del retiro de la vegetación intermareal (comunidad del Juncal, Cagnoni *et al.*, 1996) por los “junqueros”.

El presente estudio se enmarca en el sector de la Reserva Biosfera Parque Costero Sur localizado en el litoral noreste del Partido de Punta Indio. La reserva se desarrolla dentro de la planicie costera del Río de la Plata, la cual fue generada a partir de las oscilaciones en el nivel medio del mar y de los eventos transgresivo-regresivos ocurridos durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno a partir del último máximo glacial, hace unos 18000 años (Cavallotto *et al.*, 2004). Dicha planicie puede ser subdividida en tres unidades de paisaje principales: antigua llanura de mareas, planicie con cordones litorales y marisma (Figura 1), existiendo marcadas diferencias sedimentológicas entre estas unidades. La antigua llanura de mareas corresponde a una zona de topografía muy baja, actualmente desconectada del estuario, ya que se encuentra a unos 5 m sobre el nivel medio actual, pero que preserva la morfología de canales y planicies intermareales. La planicie con cordones está formada por sistemas paralelos a subparalelos de cordones de playa principalmente arenosos y conchiles y poseen una topografía más elevada que el resto de la planicie. La marisma está constituida principalmente por sedimentos arcillosos y constituye un humedal costero donde los procesos sedimentológicos e hidrológicos están principalmente regulados por la acción mareal. Los sedimentos pleistocenos loessicos se encuentran por debajo de los sedimentos de la planicie costera y afloran en la unidad de planicie continental y en una plataforma de abrasión adyacente al estuario.

El Río de la Plata juega un papel preponderante en los procesos sedimentarios actuantes en la costa de la Reserva. Posee una descarga de aproximadamente 22000 m<sup>3</sup>/s, principalmente controlada por sus dos tributarios, los ríos Paraná y Uruguay (Jaime *et al.*, 2002). La principal fuente de sedimentos es aportada por estos últimos ríos, coincidiendo el área de

la reserva con la zona de máxima turbidez del estuario, con valores de concentración de sedimentos en suspensión que van aproximadamente de 150 mg/L a 250 mg/L (Bazán y Janiot, 1991). El Río de la Plata posee un régimen micro mareal semidiurno caracterizado por una amplitud mareal media de 0,7 m (Balay, 1961). El flujo actúa alternadamente en intervalos regulares en la dirección de la descarga de los tributarios y en la opuesta. En algunos sectores este fenómeno genera pausas en el flujo que facilitan la decantación de los sedimentos transportados (Balay, 1961). Por otro lado, debido a la escasa profundidad del Río de la Plata, las variaciones en los niveles están fuertemente influenciadas por los fuertes vientos con dirección SE-SSE, que en ocasiones alcanzan los 75 a 88 km/h (D’Onofrio *et al.*, 2008). Durante dichos eventos de tormenta, localmente conocidos como “sudestadas”, el nivel del estuario puede ascender más de 3 m, adentrándose en el continente varios kilómetros y produciendo severos impactos sobre la costa e inundaciones. Además, los cambios a largo plazo en la dinámica costera se ven influenciados por el aumento relativo en el nivel medio del mar, que puede ser estimado entre 0,15 y 0,30 cm/año, valores calculados por Tosi *et al.*, (2013) para la Bahía Samborombón y el puerto de Buenos Aires, respectivamente.

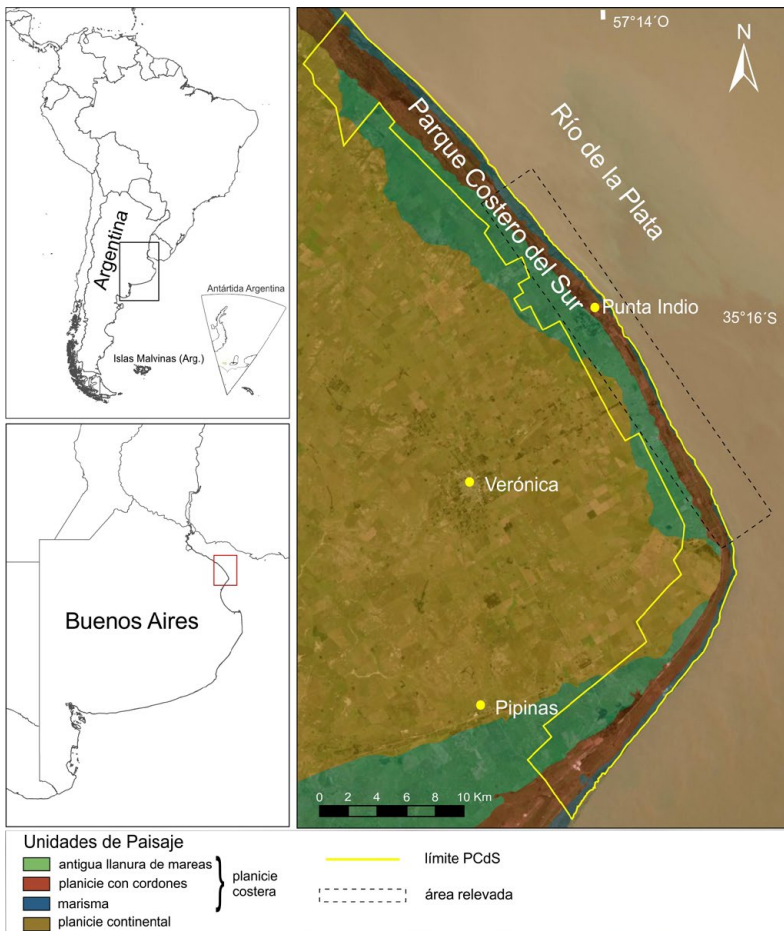


Figura 1: Mapa e imagen satelital del área de estudio que muestra las principales unidades de paisaje de la planicie costera del Río de la Plata en la Reserva de Biosfera Parque Costero del Sur. Fuente: propia del autor.

## METODOLOGÍA

Se realizó un análisis multitemporal de la línea de costa comparando fotografías aéreas de los años 1943, 1964, 1968, 1973 y 1987 e imágenes satelitales de 2003, 2010 y 2013. Las fotografías aéreas corresponden a vuelos realizados desde la Base Aeronaval de Punta Indio y poseen una escala 1:20000. Las imágenes satelitales fueron descargadas a distintas escalas desde la plataforma Google Earth y corresponden por tanto a distintos sensores (GeoEye-1, Ikonos y WorldView-2). Las fotografías e imágenes fueron georeferenciadas en el sistema de proyección WGS84/TMARG6 tomándose como base una serie de puntos de control provenientes del Instituto Geográfico Nacional y puntos de comparación visibles entre imágenes. Las distintas posiciones de la costa a lo largo del tiempo fueron mapeadas teniendo en cuenta la línea de vegetación supramareal (Ford, 2013).

El análisis multitemporal fue realizado utilizando el software Digital Shoreline Analysis System (DSAS 4.3) (Thieler *et al.*, 2009), extensión del software ArcGis. DSAS permite calcular diferentes estadísticos referentes a cambios en la línea de costa a partir de posiciones históricas de esta última. A partir de las distintas líneas de costa, automáticamente genera un cierto número de transectas perpendiculares a una línea base creada por el usuario, y utiliza las intersecciones entre estas y las líneas de costa digitalizadas para calcular una serie de datos estadísticos. Además, el programa permite definir un umbral mínimo de líneas de costa utilizadas en el cálculo, como así también definir los valores de las incertidumbres implícitas en la construcción de cada línea de costa digitalizada.

En este caso se ha utilizado el programa DSAS para calcular dos estadísticos: Weighted Linear Regression (WLR) y Net Shoreline Movement (NSM). Los mismos representan respectivamente la tasa de cambio anual en la línea de costa y la distancia entre las líneas de costa más antigua y más reciente. El peso (weight,  $w$ ) es definido como una función de la varianza en la incertidumbre de la medición de la línea de costa (e) (Genz *et al.*, 2007):  $w = 1/e^2$

DSAS requiere una serie de entradas para arrojar resultados: las líneas de costa digitalizadas con sus respectivas fechas, los valores de incertidumbre de cada una de las líneas de costa, la línea base y un espaciado entre transectas seleccionado por el usuario. El cálculo de la incertidumbre implícita en la digitalización de las líneas de costa ha sido considerado por diversos autores, tomándose en general como la raíz de la suma de los cuadrados de distintos errores (Morton *et al.*, 2004; Romine *et al.*, 2013). Romine *et al.*, (2013) identificaron distintas fuentes de posibles errores implícitos en la construcción de las líneas de costa: el levantamiento original (en el caso de utilizar mapas topográficos), la georeferenciación de la imagen, la digitalización de la línea de costa, el tamaño de píxel, el oleaje y errores debidos a fluctuaciones mareales.

En el presente análisis se utiliza la raíz de la suma de los cuadrados del error de tamaño de píxel, el error de rectificación y el error de digitalización (Ford, 2013). No se realizaron correcciones con respecto a las fluctuaciones mareales ya que se utilizó

la línea de vegetación como referencia y se comprobó además que las fotografías e imágenes utilizadas presentaban condiciones de marea baja al encontrarse expuesta aereamente la plataforma de abrasión del Río de la Plata. El error de digitalización fue tomado del estimado en trabajos previos, adoptándose un valor de 1 (Anders & Byrnes, 1991; Crowell & Leatherman, 1991; Thieler & Danforth, 1994; Moore, 2000)

Por otro lado, el error de rectificación fue tomado como el máximo valor de RMS para cada imagen, calculado en el momento de la georreferenciación. A excepción de las fotografías de 1943 donde el error es de 9 m, los errores totales estimados fueron menores a 3 m (Tabla 1). El espaciado adoptado para las transectas fue de 20 m, generándose un total de 1402 transectas. Se tomó a su vez, considerando que no todas las imágenes cubran la totalidad de la costa, un mínimo de 3 líneas de costa para realizar el cálculo de WLR.

Tabla 1: Características de los errores en la digitalización de las líneas de costa.

Imagen	Pixel (m)	Georef. min (m)	Georef. Máx (m)	Transformación	Error total (m)
1943 (fotografía aérea)	3	5,5	9,4	Polinomio de Segundo orden	9,8
1964 (fotografía aérea)	0,5	0,0	0,0	Spline	1,2
1968 (fotografía aérea)	0,5	1,5	3,6	Polinomio de Primer orden	3,8
1973 (fotografía aérea)	0,5	1,9	1,9	Polinomio de Segundo orden	2,2
1987 (fotografía aérea)	0,5	2,1	2,1	Polinomio de Segundo orden	2,3
2003 (imagen satelital)	0,5	0,3	1,9	Polinomio de Segundo orden	2,3
2010 (imagen satelital)	0,5	1,5	2,2	Polinomio de Segundo orden	2,4
2013 (imagen satelital)	0,5	0,2	2,7	Polinomio de Segundo orden	2,9

Por otra parte, en función de constatar el rol de protección costera de la vegetación intermareal, principalmente la comunidad del Juncal que se desarrolla entre las superficies medias de marea alta y marea baja, se realizó un mapeo de la misma a lo largo de toda la costa y se comparó su presencia o ausencia con los valores de WLR.

Por último, se realizó una evaluación de la evolución de la línea de costa para los años futuros en función de los valores calculados y se formularon pautas de trabajo en pos de mitigar los efectos adversos de la erosión costera.

## ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA EVOLUCIÓN EN LA LÍNEA DE COSTA 1943-2013

La caracterización de los cambios en la línea de costa que han tenido lugar entre 1943 y 2013 en la costa de la Reserva es particularmente compleja debido a la gran

variabilidad de los movimientos de la línea de costa tanto a escala temporal como espacial. Los resultados del análisis multitemporal a partir de DSAS muestran que los valores medios de WLR (tasa de desplazamiento) y NSM (desplazamiento neto) son respectivamente -0,4 m/año y -41,4 m. Aunque estos valores indican un retroceso general de bajo orden de magnitud en toda la costa, poseen grandes desviaciones estándar, 1,7 m/año para WLR y 95,5 m para NSM, que implican una gran heterogeneidad en el comportamiento de la costa. Por otra parte, la distribución de frecuencias de las transectas para cada parámetro es claramente asimétrica (Figura 2) y va de 3,1 a -7,4 m/año para WLR y entre 131,9 y -417,5 m para NSM, lo cual asimismo representa una gran heterogeneidad en los datos analizados e implica la necesidad de llevar a cabo un análisis más exhaustivo.

Se realizó un análisis de la distribución espacial de los valores de WLR y NSM a lo largo de toda la costa con el objetivo de señalar aquellos sectores con comportamientos similares en cuanto a la dinámica costera (Figura 3).

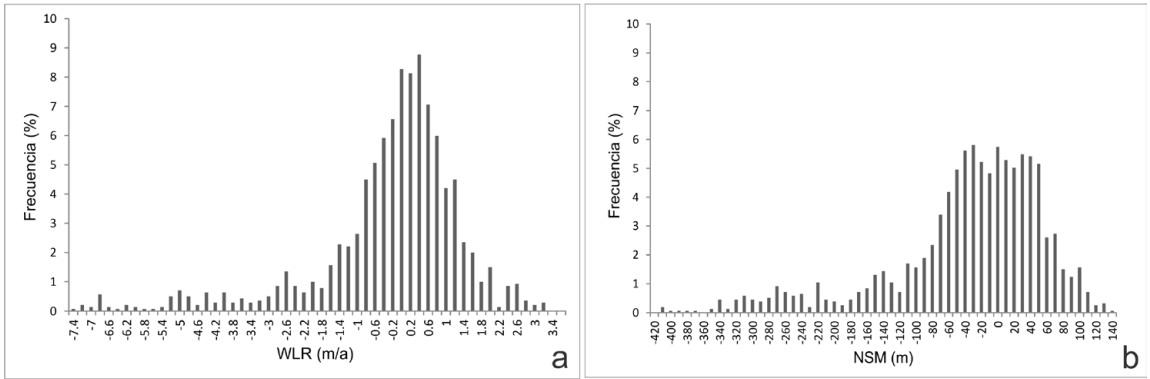


Figura 2: Distribución de frecuencias para los valores de WLR (a) y NSM (b) para las transectas de toda la costa. Fuente: propia del autor.

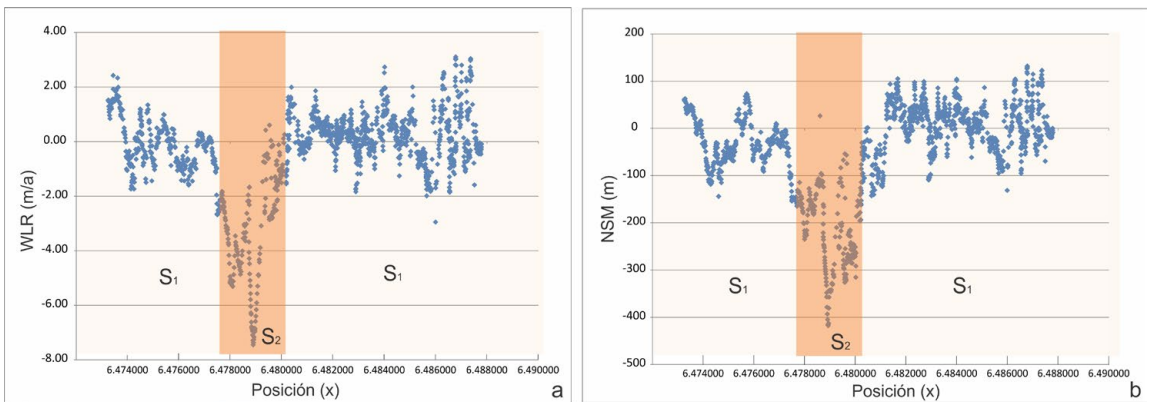


Figura 3: Distribución espacial de los valores de WLR (a) y NSM (b) a lo largo de toda la costa. Fuente: propia del autor.

Tabla 2: principales estadísticos calculados para los distintos sectores de la costa analizados.

	<b>Sector 1</b>	<b>Sector 2</b>	<b>Toda la costa</b>
WLR medio (m/año)	0,1	-3,6	-0,4
Desv. Estándar WLR	0,9	1,8	1,7
WLR máximo	3,1	0,6	3,1
WLR mínimo	-2,9	-7,4	-7,4
NSM medio	-13,9	-204,5	-41,4
Desv estándar NSM	66,8	83,7	95,5
NSM máximo	131,9	-53,8	131,9
NSM mínimo	-315,4	-417,5	-471,5

Los resultados muestran una alternancia significativa de valores positivos y negativos a nivel local en los sectores norte y sur, mientras que el sector central presenta un número significativo de transectas caracterizado por valores de WLR menores a -2 m/año y valores de NSM menores a -100 m. Este comportamiento implica la necesidad de analizar por separado los distintos comportamientos en la costa, para lo cual se distinguieron dos grupos principales de transectas caracterizados como S1 y S2, y que poseen respectivamente tasas de cambio mayores y menores a -2 m/año. En la figura 4 se observan las distribuciones de frecuencias para los sectores S1 y S2, las cuales poseen marcadas diferencias en sus comportamientos. Las transectas de los sectores S1 poseen una distribución de tipo gaussiana con valores centrados en 0. Por otro lado, las transectas del sector S2 presentan una distribución multimodal, marcadamente negativa.

En los sectores S1 los valores de WLR van de 2,9 m/año a -3,1 m/año, con una media de 0,1 m/año y una desviación estándar de 0,9 m/año. Los valores de NSM por otro lado para estos sectores van de -315,4 a 131,8 m con una media de -13,9 m y una desviación estándar de 66,8 m (Tabla 2). Los valores del sector S2 poseen marcadas diferencias de aquellos de los sectores S1. Para los valores de WLR, el rango va de -7,4 a -0,6 m/año, con un promedio de -3,6 m/año y una desviación estándar de 1,8 m/año. Los valores de NSM varían desde -417,5 m a -3,4 m con una media de -204,5 m y una desviación estándar de 83,7 m (Tabla 2).

En la figura 5 se observa la distribución de las transectas construidas a lo largo de la costa y clasificadas en base a los valores de WLR computados por DSAS conjuntamente con las ubicaciones de los sectores S1 y S2. En esta figura a su vez se observa como los valores más negativos se concentran en el sector S2, mientras que el resto de la costa presenta tanto valores positivos como negativos de WLR.

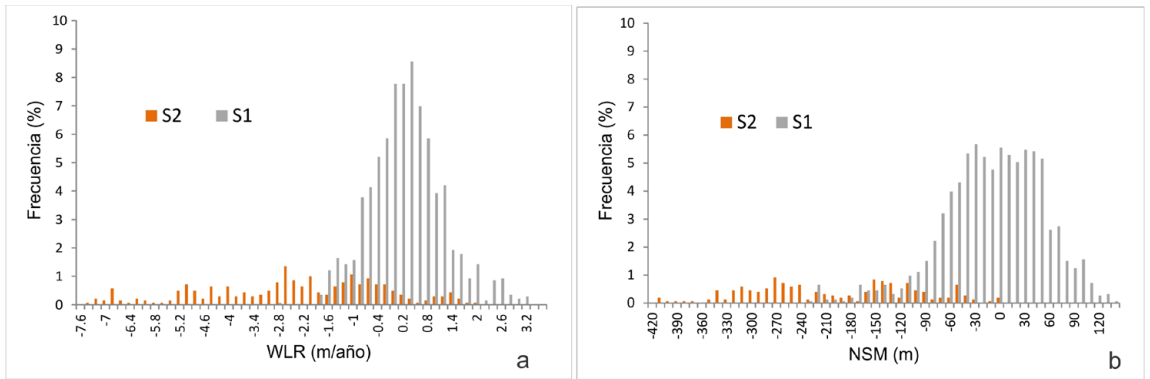


Figura 4: Histogramas de frecuencias para las transectas diferenciadas por sectores S1 y S2 para los valores de WLR y NSM. Fuente: propia del autor.

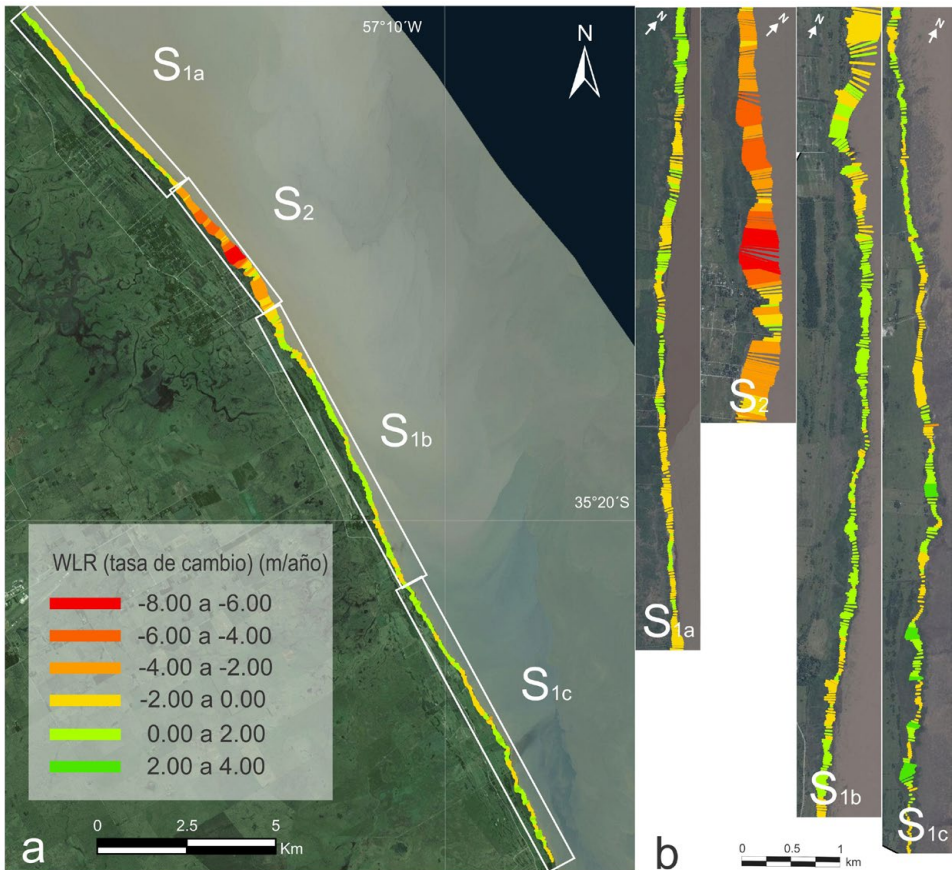


Figura 5: a) Representación de la totalidad de las transectas calculadas por DSAS clasificadas por sus valores de WLR (tasa de cambio). Los sectores S1 están divididos en S1a, S1b y S1c para garantizar una mejor visualización de las transectas. b) Detalle de las transectas. La imagen satelital pertenece a la plataforma Bing. Fuente: propia del autor.



El balneario “El Picaflor”, localizado en la localidad de Punta del Indio, constituye un ejemplo relevante de un sector costero afectado por retrocesos en la línea de costa de importante magnitud. En las figuras 6 a y 6 b se observan las distintas posiciones de la línea de costa en lo que representa el período 1943-2013. El retroceso en la línea de costa para este sector es en promedio de 320 m, con valores de WLR que van de -2,3 a -2,9 m/año. La figura 6 c muestra la relación existente entre los valores de NSM para cada año a lo largo de la transecta A-B.

La figura 7 muestra dos fotografías tomadas durante distintas condiciones de marea, en mayo de 2014 y marzo de 2016 con niveles de marea de 1,2 m y 0 m respectivamente. Aunque las fotografías no permiten una comparación directa de la posición de la línea de costa, evidencian los procesos erosivos actualmente en curso y que afectan gravemente a la costa. Por ejemplo es notoria la presencia de una escarpa erosiva y la exposición aérea de las raíces de la vegetación (*Salix*). Además la comparación de ambas fotografías permite ver como los remanentes de las raíces presentes en 2014 no se encuentran en la fotografía de 2016 al ser removidas por la erosión.

## VEGETACIÓN INTERMAREAL Y CAMBIOS EN LA LÍNEA DE COSTA

Los resultados del análisis conjunto de la presencia de vegetación intermareal y los cambios en la línea de costa, muestran una correlación significativa entre el retroceso de la línea de costa y la ausencia de vegetación intermareal y, viceversa, entre la presencia de vegetación intermareal y el avance o estabilidad de la línea de costa. La figura 8 muestra tres ejemplos que exponen condiciones de erosión o estabilidad de la línea de costa en distintas zonas de la costa de la Reserva Biosfera Parque Costero del Sur. En las zonas donde la vegetación intermareal natural se encuentra bien desarrollada y saludable, los cambios en la línea de costa son despreciables (zona 1). Por el contrario, los sectores donde la vegetación es escasa o inclusive está ausente están caracterizados por rasgos erosivos (zonas 2 y 3). La figura 9 muestra un mapa de la distribución natural de la vegetación intermareal para el año 2013 en conjunción con la posición de las transectas caracterizadas por valores positivos de WLR. La comparación entre ambos factores muestra una clara correlación entre valores positivos de WLR y la presencia de vegetación intermareal. Para estos casos, las tasas de cambio anuales medias son de 0,5 m/año con una desviación estándar de 0,3 m/año. Por otro lado, para las zonas donde la vegetación está ausente, la tasa de cambio promedio es de -1,2 m/año y la desviación estándar es de 0,3 m/año. En el caso de los valores de NSM los mismos corresponden a -8,9 y -78 m para los sectores con vegetación y sin vegetación respectivamente. Por lo tanto, la presencia o ausencia de vegetación intermareal podría explicar la asimetría en la distribución de frecuencias de los valores de WLR y NSM previamente mostrados en la figura 4. La figura 9 c y d muestran imágenes satelitales de mayor detalle donde se observan sectores de la costa con presencia y ausencia de vegetación intermareal respectivamente.

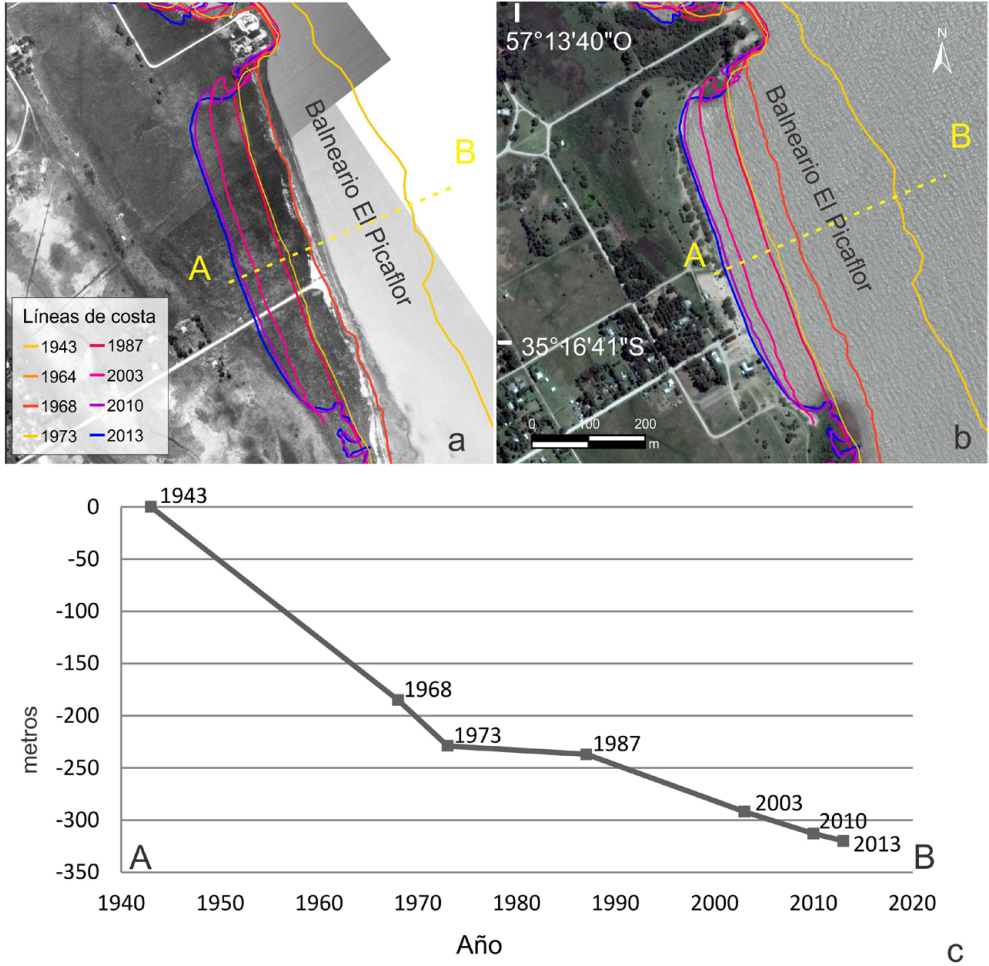


Figura 6: Mapa de las distintas líneas de costa para el período 1943 – 2013 en el balneario “El Picaflor” mostrando la variación entre las imágenes de los años 1968 (a) y 2013 (b). c) Variación en los valores de NSM a través de la transecta A-B para el mismo período. Fuente: propia del autor.

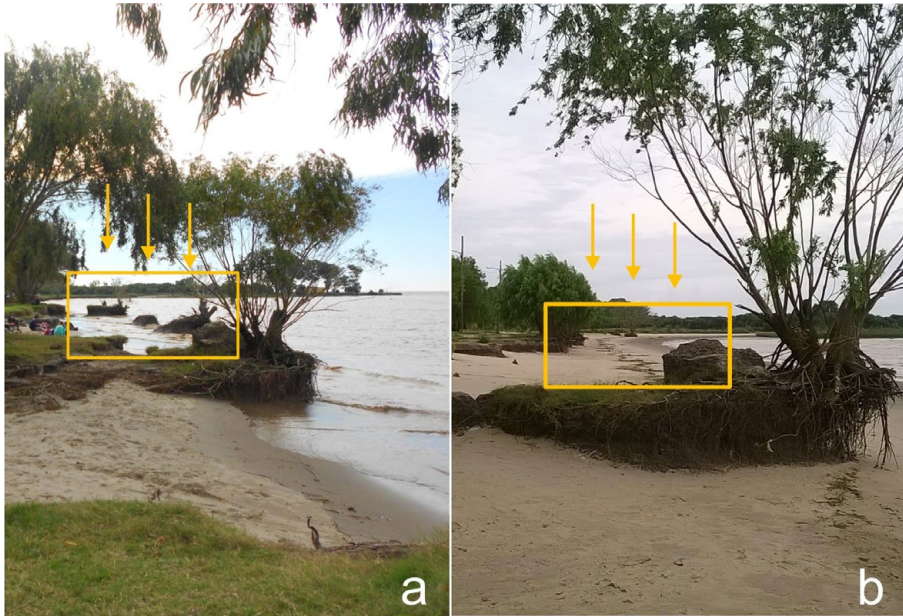


Figura 7: Erosión en el balneario “El Picaflor”. a) mayo 2014 (b) marzo 2016. Las flechas muestran que las raíces de ejemplares remanentes de *Salix* estaban presentes en mayo de 2014 y no en marzo de 2016. Fuente: propia del autor.

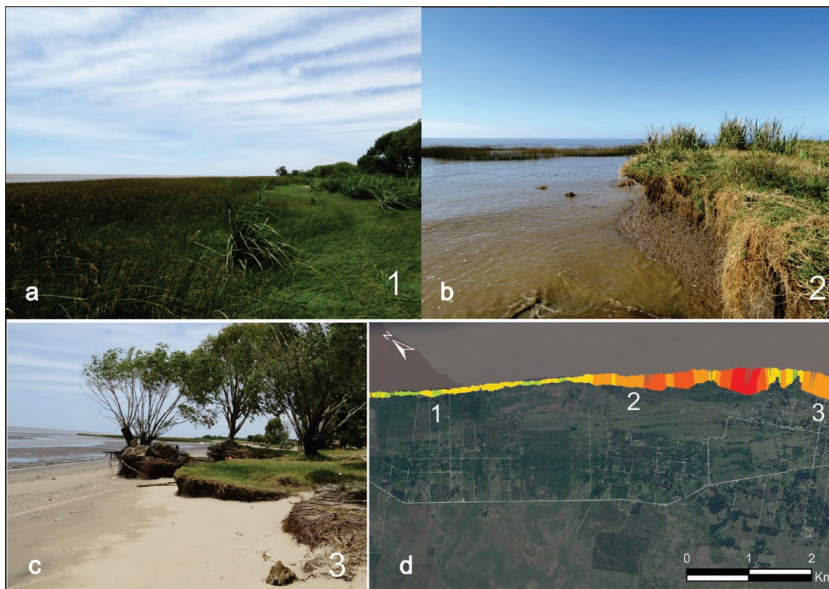


Figura 8: Estabilidad y erosión en tres zonas de la costa del Parque Costero del Sur: a) Presencia de vegetación intermareal en una zona donde se registra avance de la línea de costa (zona 1. balneario Sarandí) b) y c) Escarpa erosiva y ausencia de vegetación intermareal (zonas 2 y 3, Playa El Picaflor) d) Detalle de los valores de WLR para los sectores 1, 2 y 3. Fuente: propia del autor.

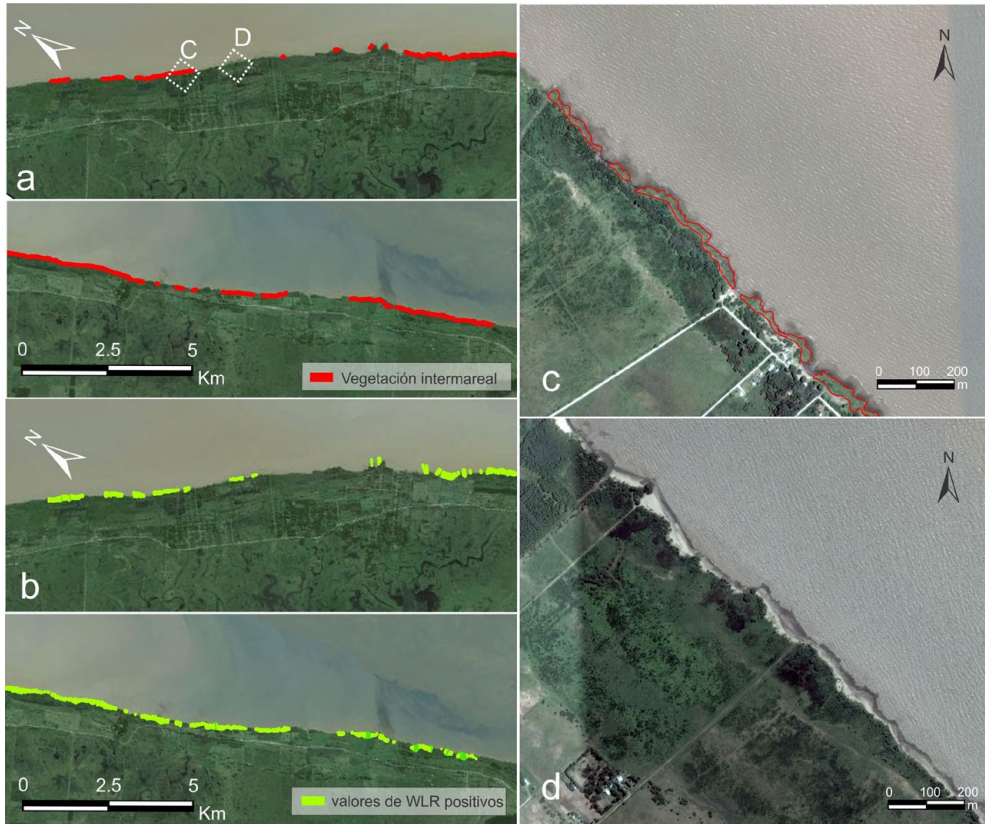


Figura 9: Mapas de la distribución de la vegetación intermareal en 2013 (a), distribución de las transectas con valores positivos de WLR (b) e imágenes detalladas de la presencia o ausencia de dicha vegetación (c y d). Fuente: propia del autor.

## EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA Y POSIBLES MEDIDAS PARA MITIGAR LA EROSIÓN

En función de las tasas de cambio calculadas, se puede estimar que grandes áreas del humedal costero serán afectadas por la erosión en las próximas décadas. Además de la degradación ecológica que esto supone, la infraestructura costera podría verse comprometida en el corto plazo. El sector S2, correspondiente a la zona donde se desarrolla la localidad de Punta del Indio, es el que mayores tasas de retroceso exhibe y por lo tanto el sector que será más afectado. El incremento de la frecuencia de los eventos de tormenta D'Onofrio *et al.*, (2008), sumado al aumento relativo en el nivel medio del mar Tosi *et al.*, (2013) podrán por otro lado agravar el panorama erosivo.

Frente a este panorama claramente erosivo resulta indispensable la implementación de estructuras tendientes, cuanto menos, a aminorar los procesos que ponen en riesgo la sustentabilidad costera. Tradicionalmente, en situaciones de este tipo se plantean la construc-

ción de murallones, escolleras, entre otras estructuras de defensa costera. Sin embargo, los efectos adversos de dichas estructuras en la dinámica litoral y en los ecosistemas costeros están ampliamente documentados e incluyen, entre otros problemas, aceleramiento de la erosión, pérdida de biodiversidad, cambios geomorfológicos e hidrográficos (Currin *et al.*, 2010). Teniendo como objetivo la preservación del medio natural, conjuntamente con la atenuación de la erosión, se plantea como posible solución a la problemática analizada la restauración costera bajo el paradigma de "living shorelines" (Benoit *et al.*, 2007). Dicho sistema involucra la utilización y construcción de estructuras artificiales (rompeolas) conjuntamente con la restauración de la vegetación natural de los humedales (Gedan *et al.*, 2011, Swann, 2008). Existen numerosos ejemplos de humedales intermareales a lo largo del mundo, donde estas técnicas comienzan a reemplazar a los enfoques tradicionales con buenos resultados, ya que tan solo una franja estrecha de humedal recuperado, es decir, pocas decenas de metros, puede atenuar significativamente la erosión (Meyer *et al.*, 1997, Piazza *et al.*, 2005, Gedan *et al.*, 2011, Currin *et al.*, 2010, Swann, 2008). En estos trabajos se plantea la implementación conjunta de estructuras artificiales (estructuras de concreto que al mismo tiempo sirven de hábitat para organismos bentónicos) con la restauración de la vegetación intermareal natural del humedal (Figura 10).

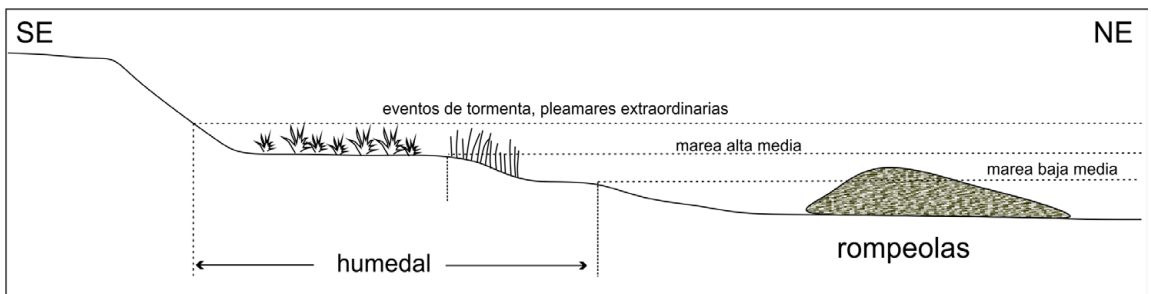


Figura 10: restauración costera. Esquema del perfil de playa con la implementación de rompeolas y ubicación de la vegetación en el humedal intermareal. Fuente: propia del autor.

## CONCLUSIONES

Los resultados del estudio demuestran que un sector de la costa del Parque Costero del Sur se ha visto afectado fuertemente por la erosión durante las últimas décadas, con tasas de retroceso de la línea de costa de aproximadamente -3,6 m/año. Las tasas de cambio en la línea de costa, se desvían en este sector del comportamiento normal para el resto del litoral. La erosión costera podría haberse desencadenado a partir del retiro de la vegetación natural de la marisma, lo que habría desencadenado un proceso erosivo continuo en algunos sectores afectados por la actividad humana. Los pronósticos futuros dan cuenta que de mantenerse las actuales tasas de retroceso de la línea de costa, amplios sectores de la costa se verían afectados, comprometiendo no solo la infraestructura y las actividades llevadas a cabo en la costa, sino también los humedales costeros y los valiosos recursos biológicos que albergan. Resulta fundamental por

ello generar estrategias tendientes a proteger y reimplantar la vegetación intermareal, la que resulta fundamental para la atenuación de los procesos erosivos.

## GLOSARIO

**Desviación estándar:** en estadística, la desviación típica es una medida que se utiliza para cuantificar la variación o la dispersión de un conjunto de datos numéricos.

**Distribución de tipo gaussiana:** en estadística y probabilidad se llama distribución normal, distribución de Gauss, distribución gaussiana, a una de las distribuciones de probabilidad de variable continua que con más frecuencia aparece en estadística y en la teoría de probabilidades

**Eventos transgresivo-regresivos:** la transgresión marina es un evento geológico por el cual el mar ocupa un terreno continental, desplazándose la línea costera tierra adentro, mientras que la regresión marina implica el proceso contrario.

**Georreferenciación:** técnica de posicionamiento espacial de una entidad en una localización geográfica única y bien definida en un sistema de coordenadas y datum específicos.

**Holoceno:** división de la escala temporal geológica, la última y actual época del período Cuaternario.

**Loessicos:** depósitos sedimentarios limosos de origen eólico.

**Pleistoceno:** división de la escala temporal geológica que pertenece al período Cuaternario; dentro de este, el Pleistoceno precede al Holoceno.

**Régimen micro mareal semidiurno:** régimen de mareas en el cual la amplitud de mareas es inferior a 2 m y donde se producen 2 pleamares diarias.

**Sedimentológicas:** La sedimentología es la rama de la geología que se encarga de estudiar los procesos de formación, transporte y depositación de material que se acumula como sedimento en ambientes continentales y marinos y que finalmente forman las rocas sedimentarias.

**Sistema de proyección:** conjunto de métodos gráficos bidimensionales que permiten presentar un objeto tridimensional, en este caso particular, la Tierra.

**Vegetación intermareal:** vegetación desarrollada entre las líneas de marea alta y baja.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores queremos agradecer a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) por apoyar financieramente

este estudio mediante los subsidios PICT 2013-2248 y N782. Además, agradecemos a la Base Aeronaval Punta Indio por su colaboración aportando fotografías aéreas de la costa y a la Municipalidad de Punta Indio por su apoyo e interés en los estudios que llevamos a cabo en el Parque Costero del Sur. Por último, agradecemos a Diego Albareda, José Athor y a la Fundación de Historia Natural Félix de Azara por la invitación a participar de este segundo volumen del libro del Parque Costero del Sur y por sus comentarios y sugerencias que ayudaron a mejorar la primera versión de este capítulo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Anders, F. J. & M. R. Byrnes. 1991. Accuracy of shoreline change rates as determined from maps and aerial photographs. *Shore and Beach*, 59, 17-26.
- Anderson, M. E. & J. M. Smith. 2014. Wave attenuation by flexible, idealized salt marsh vegetation. *Coastal Engineering*, 83, 82-92.
- Balay, M. A. 1961. El Río de la Plata entre la atmósfera y el mar. Vol. Pub. H-621, Servicio de Hidrografía Naval: Buenos Aires, Argentina, 153.
- Bazán, J. M. y L. J. Janiot. 1991. Zona de máxima turbidez y su relación con otros parámetros del Río de la Plata. Documento Técnico del Departamento de Oceanografía, Servicio Hidrografía Naval, 65-91.
- Benoit, J., C. Hardaway, D. Hernandez, R. Holman, E. Koch, N. McLellan, S. Peterson, D. Reed & D. Suman. 2007. Mitigating shore erosion along sheltered coasts. National Research Council, Washington.
- Bértola, G. R., L. C. Cortizo y F. I. Isla. 2009. Dinámica litoral de la costa de Tres Arroyos y San Cayetano, Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 64, 657-671.
- Bird, M., S. Chua, L. K. Fifield, T. S. Teh & J. Lai. 2004. Evolution of the Sungei Buloh-Kranji mangrove coast, Singapore. *Applied Geography*, 24, 181-198.
- Brinson, M. M. & A. I. Malvárez. 2002. Temperate freshwater wetlands: types, status, and threats. *Environmental Conservation*, 29, 115-133.
- Cagnoni, M., A. M. Faggi y A. Ribichich. 1996. La vegetación de la Reserva "El Destino" (Partido de Magdalena, Provincia de Buenos Aires). *Parodiana*, 9, 25-44.
- Carol, E. S., F. Braga, E. E. Kruse & L. Tosi. 2014. A retrospective assessment of the hydrological conditions of the Samborombon coastland (Argentina). *Ecological Engineering*, 67, 223-237.
- Cavallotto, J. L., R. Violante & G. Parker. 2004. Sea-level fluctuations during the last 8600 years in the de la Plata river (Argentina). *Quaternary International*, 114, 155-165.
- Codignotto, J. O. 2009. Incremento de la Erosión en la Costa Atlántica Argentina y el Calentamiento Global. *Geomorfología y Cambio Climático*, 2, 25-30.
- Codignotto, J. O., W. C. Dragani, P. B. Martin, M. I. Campos, G. Alonso, C. G. Simionato y R. Medina. 2011. Erosión en la bahía de Samborombón y cambios en la dirección de los vientos, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*, 13, 135-138.
- Crowell, M. & S. P. Leatherman. 1991. Historical Shoreline Change: Error Analysis and Mapping Accuracy. *Journal of Coastal Research*, 839-852.
- Currin, C., W. Chappell & A. Deaton. 2010. Developing alternative shoreline armoring strategies: the living shoreline approach in North Carolina. In Puget Sound shorelines and the impacts of armoring—proceedings of a state of the science workshop, USGS Scientific Investigations Report: 91-102.
- D'Onofrio, E. E., M. M. E. Fiore & J. L. Pousa. 2008. Changes in the Regime of Storm Surges at Buenos Aires, Argentina. *Journal of Coastal Research*, 24, 260-265.

- Feagin, R. A., J. L. Irish, I. Möller, A. M. Williams, R. J. Colón-Rivera & M. E. Mousavi. 2011. Short communication: Engineering properties of wetland plants with application to wave attenuation. *Coastal Engineering*, 58, 251–255.
- Ford, M. 2013. Shoreline changes interpreted from multi-temporal aerial photographs and high resolution satellite images: Wotje Atoll, Marshall Islands. *Remote Sensing of Environment*, 135, 130–140.
- Gedan, K. B., M. L. Kirwan, E. Wolanski, E. B. Barbier & B. R. Silliman. 2011. The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: Answering recent challenges to the paradigm. *Climate Change*, 106, 7–29.
- Genz, A. S., C. H. Fletcher, R. A. Dunn, L. N. Frazer, J. J. Rooney. 2007. The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, 23, 87-105.
- Isacch, J., M. Escapa, E. Fanjul & O. Iribarne. 2010. Valoración ecológica de bienes y servicios ecosistémicos en marismas del Atlántico Sudoccidental. En Valoración de servicios ecosistémicos: conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. 23, 529 – 552.
- Isla, F. I., L. C. Cortizo y H. Turno Arellano. 2001. Dinámica y Evolución de las Barreras Medanosas, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2, 73 – 83.
- Jaime, P., A. Menéndez, M. Uriburu Quirno y J. Torchio. 2002. Análisis del régimen hidrológico de los ríos Paraná y Uruguay. Informe LHA, 5-216. Instituto Nacional del Agua, Buenos Aires, Argentina.
- Kuenzer, C., S. van Beijma, U. Gessner & S. Dech. 2014. Land surface dynamics and environmental challenges of the Niger Delta, Africa: Remote sensing-based analyses spanning three decades (1986–2013). *Applied Geography*, 53, 354-368.
- Meyer, D. L., E. C. Townsend & G. W. Thayer. 1997. Stabilization and erosion control value of oyster cultch for intertidal marsh. *Restoration Ecology*, 5, 93–99.
- Michener, W. K., E. R. Blood, K. L. Bildstein, M. M. Brinson & L. R. Gardner. 1997. Climate change, hurricanes and tropical storms, and rising sea level in coastal wetlands. *Ecological Applications*, 7, 770–801.
- Moore, L. J. 2000. Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, 16, 111–124.
- Morton, R. A., T. L. Miller & L. J. Moore. 2004. National assessment of shoreline change part 1: Historical shoreline changes and associated coastal land loss along the US Gulf of Mexico. *US Geological Survey Open File Report*, 1043, 44.
- Nicholls, R. J., P. P. Wong, V. R. Burket, J. Codignotto, J. E. Hay, R. F. McLean & C. D. Woodroffe. 2007. Coastal systems and low-lying areas. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, 315–356.
- Perillo, G. M., E. Wolanski, D. R. Cahoon & M. M. Brinson. 2009. Coastal wetlands: an integrated ecosystem approach. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands.
- Piazza, B. P., P. D. Banks & M. K. La Peyre. 2005. The potential for created oyster shell reefs as a sustainable shoreline protection strategy in Louisiana. *Restoration Ecology*, 13, 499–506.
- Pousa J, L. Tosi, E. Kruse, D. Guaraglia, M. Bonardi, A. Mazzoldi, F. Rizzetto & E. Schnack. 2007. Coastal processes and environmental hazards: the Buenos Aires (Argentina) and Venetian (Italy) littorals. *Environmental Geology*, 51, 1307-1316.
- Romine, B. M, C. H. Fletcher, M. M. Barbee, T. R. Anderson & L. N. Frazer. 2013. Are Beach Erosion Rates and Sea-Level Rise Related in Hawaii. *Global and Planetary Change* 108. Elsevier B.V., 149–57.
- Scott, D. B. 2005. Coastal changes, rapid. In: *Encyclopedia of Coastal Science*. Springer, pp. 253–255.
- Sherman, D. J. & B. O. Bauer. 1993. Dynamics of beach-dune systems. *Progress in Physical Geography* 17(4), 413-447.
- Swann, L. 2008. The Use of Living Shorelines to Mitigate the Effects of Storm Events on Dauphin Island, Alabama, USA. American Fisheries Society Symposium, 64.



- Thieler, E. R. & W. W. Danforth. 1994. Historical Shoreline Mapping (I): Improving Techniques and Reducing Positioning Errors. *Journal of Coastal Research*, 549–563.
- Thieler, E. R., E. A. Himmelstoss, J. L. Zichichi & A. Ergul. 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0— An ArcGIS extension for calculating shoreline change. U.S. Geological Survey Open-File Report 1278.
- Tosi, L., E. E. Kruse, F. Braga, E. S. Carol, S. C. Carretero, J. L. Pousa, F. Rizzetto & P. Teatini. 2013. Hydro-morphologic settings of the Samborombón Bay (Argentina) at the end of the 21st century. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 1–12.
- Zedler, J. B. & S. Kercher 2005. Wetland resources: status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annual Review of Environment and Resources*, 30, 39–74.
- Zhang, K., B. C. Douglas & S. P. Leatherman. 2004. Global Warming and Coastal Erosion. *Climate Change*, 64, 41–58.
- Zuzek, P. J., R. B. Nairn & S. J. Thieme. 2003. Spatial and temporal considerations for calculating shoreline change rates in the great lakes basin. *Journal of Coastal Research*, 125-146.