

Capítulo 4

Impacto del Cambio Climático en la Costa y el Mar Argentino

Enrique J. Schnack y Alberto R. Piola

1. Introducción

Los océanos cubren alrededor 70% de la superficie del planeta, con profundidades medias de 4.000 m. Con un volumen de 14.000 millones de m³, sus aguas son un gran reservorio de carbono inorgánico y sólo ca. 700 Pg de carbono orgánico, del cual un porcentaje ínfimo (1.7-3.3 %) consiste en biomasa viva y muerta (Denman et al., 2007). A pesar de la escasa biomasa, el fitoplancton es responsable de casi la mitad de la producción global primaria y es la base de la cadena trófica marina (Field et al., 1998). Una biodiversidad sustancial caracteriza a los dominios pelágicos (toda la masa de agua oceánica) y bentónicos (los fondos marinos) y a las zonas costeras en un rango diverso de ecosistemas desde aquéllos altamente productivos (e.g. regiones de surgencia o upwelling) hasta los de baja productividad (e.g. los giros oceánicos de latitudes medias). La productividad primaria oceánica depende de la luz solar y los nutrientes provenientes de las aguas profundas (Sarmiento et al., 2004). Los ecosistemas marinos proveen bienes y servicios tales como pesquerías, energía, recreación y turismo. También se destaca su función por la absorción de CO₂ y regulación del clima, descomposición de materia orgánica, regeneración de nutrientes y desarrollo de sistemas costeros (Costanza et al., 1997). El océano habría absorbido cerca del 70% del carbono emitido por la actividad humana desde el inicio de la revolución industrial (Sabine et al., 2004). La biodiversidad marina sostiene el funcionamiento ecosistémico que, entre otros aspectos, provee fuentes de proteína animal a más de 1.000 millones de personas que dependen de los recursos pesqueros. Las zonas costeras, especialmente las áreas bajas, son particularmente importantes por sus servicios socio-económicos y ecológicos, ya que soportan asentamientos humanos y actividades conexas (infraestructura, turismo), zonas de reproducción de especies de interés comercial, áreas de asentamiento de especies migratorias, y por ello son vulnerables al cambio climático.

El cambio climático puede impactar ecosistemas marinos a través del calentamiento oceánico, incrementando la estratificación térmica y reduciendo el upwelling (Sarmiento et

al., 2004) y la producción primaria en las zonas estratificadas del océano (Behrenfeld et al., 2006) aumentando el nivel del mar (IPCC, 2001) y causando modificaciones en el régimen de olas y tormentas e incrementando la vulnerabilidad de las poblaciones costeras.

2. Los cambios del nivel del mar

Los cambios del nivel del mar han ejercido una fuerte influencia en la evolución del planeta y en la historia de la humanidad. Han influenciado la evolución del fitoplancton, la química oceánica y la distribución y actividad de carbonato, carbono orgánico y sedimentos silicoclásticos, estos últimos compuestos por granos y partículas inorgánicas, fundamentalmente silicatos (Miller et al., 2005). En una escala de tiempo geológico, las variaciones de los niveles oceánicos han dejado un registro ampliamente distribuido en la forma de depósitos sedimentarios. Durante la mayor parte del Fanerozoico (543 Ma- 33 Ma) prevalecieron condiciones de “planeta de invernadero”, con niveles del mar considerablemente más altos que los actuales, hasta + 250 m. En los últimos 100 Ma, los cambios del nivel del mar reflejan la evolución climática global desde tiempos de casquetes polares antárticos efímeros (100 a 33 Ma) hasta el establecimiento de grandes casquetes primariamente en Antártida (33-2,5 Ma) y un planeta con grandes casquetes en la Antártida y en el Hemisferio Norte (2,5 Ma-presente). Es decir, desde hace unos 33 Ma el mundo es un “planeta frío” (“ice house”), con niveles del mar con tendencia descendente, aunque con fluctuaciones de amplitudes máximas de 200 m.

Durante el período Cuaternario (últimos 2,5 millones de años) el nivel del mar fluctuó con una variación vertical del orden de los 100 m, en respuesta a los ciclos glaciales/deglaciales, alcanzando niveles máximos en los últimos. El descenso del nivel del mar durante la Última Glaciación, que alcanzó unos 120 metros hace unos 18.000 años, permitió la emergencia del estrecho de Bering y la migración humana y de otras especies desde Eurasia hacia América.

La Antártida y Groenlandia contienen suficiente hielo para elevar el nivel del mar mundial unos 70 metros. Aunque los registros mareográficos centenarios indican que el nivel medio del mar aumentó entre 1 y 2 mm/año durante el siglo pasado, nuevos aportes de la altimetría satelital señalan un incremento de 3 mm/año a partir de 1992 (Meier et al.,

2007), lo que indica una aceleración reciente de la elevación del nivel medio del mar.

Durante el último siglo el nivel del mar ascendió globalmente 1-2 mm/año, de los cuales la expansión térmica del océano contribuyó solamente 0,5-±0.2 mm, debiéndose la mayor parte a la adición de agua al océano (cambio eustático) debido al derretimiento de hielo terrestre (Church et al., 2001). Se han planteado diferentes escenarios relativos a las concentraciones de gases de invernadero. A partir de ellos y teniendo en cuenta las incertidumbres de los modelos, la pérdida de la masa de hielo de Groenlandia más las contribuciones por expansión térmica y un colapso parcial del casquete antártico occidental contribuiría durante el presente milenio a un incremento del nivel del mar de 1m/siglo (Nicholls and Lowe, 2004). Sin embargo, otros modelos muestran que Groenlandia es el mayor contribuyente al aumento del nivel del mar, mientras que la Antártida estaría casi balanceada (Alley et al., 2005)

Según algunas evidencias, la mayor contribución proviene del derretimiento de Groenlandia, con aportes menores de la Antártida, glaciares de montaña y pequeños casquetes de hielo (Shepherd and Windham, 2007). Según Meier et al. (2007), la desintegración de los glaciares constituye una causa sustancial en la aceleración del nivel del mar global. La pérdida de hielo representa virtualmente todo el aumento del nivel del mar no atribuible al calentamiento del océano. Alrededor del 60% de la pérdida de hielo proviene de los glaciares y “mantos” de hielo antes que de los dos casquetes (Antártida y Groenlandia). La contribución de estos pequeños glaciares se ha acelerado durante la década pasada, en parte debido al adelgazamiento y retroceso de glaciares en contacto con el mar. Esta aceleración puede causar 0.1 a 0.25 m de incremento adicional hacia el 2100 (Meier et al., 2007).

El incremento de los gases de invernadero y el calentamiento global resultante plantean escenarios inquietantes ante una futura aceleración del aumento del nivel del mar. El informe preparado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2001) indica que la temperatura media sobre la superficie terrestre, promediada globalmente, ha aumentado en 0,6°C (con un error de 0,2°C) durante el siglo XX. Las proyecciones sugieren que la temperatura en superficie aumentará entre 1,4°C y 5,8°C durante el siglo XXI, y el aumento del nivel medio del mar, también promediado

globalmente, se hallará entre 0,09 y 0,88 m para el mismo período, con un valor medio de ca. 0,50 m (Fig. 1). El aumento de temperatura induciría un aumento en el gradiente meridional de temperatura en las capas medias de la atmósfera, provocando un desplazamiento hacia el sur y una intensificación de los vientos del oeste (Shindell y Schmidt, 2004). Los cambios del patrón e intensidad de los vientos del hemisferio sur tendrían un impacto significativo sobre la circulación oceánica regional y global (Toggweiler y Russell, 2008).

Las áreas costeras son sistemas frágiles y se verán severamente afectadas por las tendencias señaladas, en caso de confirmarse los pronósticos. Se estima que actualmente reside en ellas, incluyendo su “hinterland”, un 60 % de la población mundial. Entre los efectos esperados pueden citarse el incremento de la erosión de las playas, la inundación de zonas bajas, la restricción o desaparición de humedales y acuíferos costeros, el aumento de la frecuencia e intensidad de procesos episódicos (e.g. ondas de tormenta, ENSO) que provocarán impactos de variada magnitud sobre los ecosistemas y el hombre. Actualmente se encuentran en desarrollo distintas iniciativas tendientes a formular estrategias de adaptación y respuesta ante los escenarios de cambio global.

3. La Costa Argentina

Características morfodinámicas

La costa argentina (excluyendo las Islas Malvinas y el sector antártico) se extiende por unos 5.700 km desde el Río de la Plata-Delta moderno del Paraná hasta el Canal Beagle, en Tierra del Fuego. Exhibe una variedad de rasgos ecológicos y morfodinámicos, incluyendo ambientes estuáricos y deltaicos, marismas templadas, playas de arena y grava (cantos rodados) y frentes rocosos que constituyen acantilados (Fig. 2).

A lo largo de los sectores más deprimidos, se manifiestan evidencias de niveles marinos producto de las oscilaciones del nivel del mar ocurridas durante el período Cuaternario, de las cuales las más conservadas corresponden a depósitos de playa, planicies de marea y estuarios emergidos del Holoceno medio, cuando el mar alcanzó una altura de 3-4 m sobre el nivel actual, hace aproximadamente 6000 años (Schnack, 1985; Schnack et al., 2005). Esto significa que la distribución actual de ambientes costeros está relacionada

con la historia geológica (Fig. 3).

Los dominios del delta moderno del Paraná-Río de la Plata, constituyen un complejo morfosedimentario que se caracteriza por el avance del frente deltaico sobre el estuario (Codignotto y Kokot, 2005), por lo que el Río de la Plata puede considerarse desde este punto de vista un delta en evolución. Cabe destacar que son importantes en la evolución del delta y en la sedimentación del estuario y áreas conexas (e.g. planicies costeras) los aportes sedimentarios de la cuenca del Paraná y, particularmente, los provenientes de los flujos pulsátiles (excesos hídricos) asociados a la fase positiva de El Niño, a cuya causa se ha atribuido el origen de la selva marginal que, aunque restringida en la actualidad, se manifiesta en las cercanías de La Plata (Schnack, 2000).

La Bahía Samborombón representa un ambiente transicional de planicie mareal y marismas y es un ambiente de gran importancia no sólo desde el punto de vista conservacionista sino también porque es un área de reclutamiento y reproducción de especies de interés comercial (Fig. 4).

El litoral atlántico, desde Cabo San Antonio hasta Monte Hermoso, presenta costas arenosas expuestas a la dinámica de olas que, a partir de las cercanías de Mar del Plata, cambian a frentes de acantilados que, alternando con costas bajas, llegan hasta cerca de Bahía Blanca. En esta se desarrolla un estuario que continúa con rasgos deltaicos heredados hasta la zona del delta del río Colorado. Hacia el sur, comienza un verdadero dominio patagónico, tanto climáticamente como por la presencia de cantos rodados en sus cordones litorales. A lo largo de toda la costa patagónica, predominan sectores con acantilados interrumpidos en parte por las desembocaduras de cursos fluviales y por depresiones que, como en la Bahía de San Antonio, presentan vastas acumulaciones arenosas y ambientes de marismas. En general, las marismas son muy comunes a lo largo de la costa patagónica y fuegina oriental, aunque no representan grandes extensiones.

En cuanto a la dinámica costera asociada a las mareas (semidiurnas), en el norte son características las micromareas (rango menor a 2 m) mientras que a la altura de Bahía Blanca y hasta algo al sur de la desembocadura del río Negro el régimen es mesomareal (2-4 m) y en casi toda la costa patagónica operan condiciones macromareales (rangos mayores a 4 m), alcanzándose valores superiores a los 12 m (e.g. Río Gallegos, Bahía San

Sebastián). Los rangos de marea decrecen hasta micromareales en el Canal Beagle.

Problemas de erosión e inundación

La erosión es un proceso común a lo largo de la costa atlántica. Sus causas naturales están vinculadas a las ondas de tormenta en conjunción con alta energía de olas. La configuración costera sufre importantes modificaciones con un pronunciado cambio en el perfil de la playa y un retroceso de la línea de costa, tanto en playas de zonas bajas, asociadas con dunas, como en áreas de acantilados. Por otro lado, las ondas de tormenta, según su intensidad y duración, causan la inundación de zonas bajas, como los bordes costeros entre La Plata y Buenos Aires o las planicies mareales (e.g. Bahía de Samborombón, estuario de Bahía Blanca). El incremento del nivel del mar (v. sección 3.2.2) puede contribuir a exacerbar estos fenómenos.

Ondas de tormenta

El esquema regular de la marea astronómica es modificado, por factores meteorológicos irregulares que actúan sobre la superficie del mar. Las denominadas “ondas de tormenta” son el resultado de fuertes vientos que apilan las aguas sobre la costa, provocando inundaciones, pérdida de vidas, ingentes daños materiales y severa erosión costera, en especial cuando se combinan con la pleamar. Además del viento, la baja presión atmosférica en el centro de la tormenta ciclónica eleva aún más el nivel de las aguas.

Las ondas de tormenta que se desarrollan a lo largo de la costa argentina son de carácter extratropical, del mismo tipo de las que se producen en la costa atlántica de América del Norte y en el Mar del Norte. En la región del Atlántico sudoccidental se las reconoce como “sudestadas” (“nordestadas” en América del Norte). Aunque persistentes ondas de tormenta de alta energía se originan sobre el propio frente costero de la provincia de Buenos Aires, muchas de ellas provienen de la región austral de la plataforma continental argentina y llegan hasta las costas de la provincia de Buenos Aires después de recorrer cientos de kilómetros.

Muchas ondas de tormenta han sido registradas a lo largo de la costa argentina simultáneamente con la onda de marea dirigida hacia el norte. La duración de estas

tormentas varía desde unas pocas horas hasta dos o tres días. Se producen básicamente por la acción combinada de un anticiclón localizado hacia el oeste de Argentina (anticiclón semi-permanente Pacífico) y un ciclón localizado sobre el Atlántico hacia el sudeste que se mueve hacia el este o noreste. Debido a esta situación, se generan fuertes vientos desde el sur o sudoeste y los altos niveles del agua afectan toda la costa argentina, incluyendo el Río de la Plata, Uruguay y el sur de Brasil.

Sin embargo, las más típicas y peores inundaciones se producen en el Río de la Plata y su área de influencia, con la acción de vientos muy fuertes desde el sudeste, a menudo causados por un anticiclón ubicado sobre el sur argentino y el océano adyacente. Pero para que el nivel del agua alcance una magnitud significativa es necesario, entre otros factores, que se forme una depresión hacia el norte de Buenos Aires.

La mayor sudestada registrada en esta área desde el comienzo de los registros en 1905 fue la que ocurrió el 15 de abril de 1940, cuando el nivel predicho de la marea fue excedido en 3.18 m, causando 25 fatalidades y cuantiosos daños materiales, especialmente en la zona ribereña desde Ensenada al norte. Las aguas ocuparon prácticamente toda la planicie costera (ver Fig. 3), llegando hasta el pie del terraplén del ferrocarril que une la ciudad de La Plata con la Capital Federal (Balay, 1961; Schnack and Pousa, 2004). Otros episodios similares, aunque no de la magnitud del anterior, ocurrieron en 1958 y 1959 y, más recientemente, en 1989, 1993 y 2001 (Fig. 5) (ver Barros, este volumen).

La ciudad de Buenos Aires, con una alta densidad poblacional y gran desarrollo urbano y portuario, está expuesta a ondas de tormenta. Las positivas (niveles altos sobre los predichos) causan inundaciones severas, mientras que las negativas (niveles inferiores= “bajantes”) afectan la navegación y el suministro de agua. Barros et al. (2006) evaluaron significativos impactos socio-económicos para el área metropolitana rioplatense ante episodios de inundación que superen los 2,5 m sobre el nivel medio del mar. D’Onofrio et al. (2008) estudiaron los cambios en frecuencia, duración y altura de las ondas en el período 1905-2003, concluyendo que los promedios decadales de frecuencia y duración de las ondas positivas se incrementaron en las últimas tres décadas pero disminuyeron para las ondas negativas. Sin embargo, la altura de las ondas positivas ha decrecido en la última década y las negativas se han manifestado más intensamente en las dos últimas décadas.

Los cambios en la frecuencia y duración de las ondas de tormenta positivas pueden exacerbar impactos sobre esta área, reduciendo el efecto de las defensas costeras y incrementando la probabilidad de inundaciones. Algunos sectores del Gran Buenos Aires son severamente afectados con niveles del agua superiores a 2,80 m (referidos al cero del Riachuelo) y serían completamente inundados si el nivel del agua alcanzara los 3,50 m (Fig. 6).

La erosión es un proceso común a lo largo de la costa atlántica bonaerense. Sus causas naturales están vinculadas a las ondas de tormenta en conjunción con alta energía de olas. La configuración costera sufre importantes modificaciones con un pronunciado cambio en el perfil de la playa y un retroceso de la línea de costa (Schnack et al., 1998).

El primer estudio sistemático de variaciones de playas en la Argentina fue realizado por Cortelezzi et al. (1972). Este trabajo analiza perfiles promedio anuales sobre la base de relevamientos mensuales realizados durante los años 60 en playas de San Clemente del Tuyú, Mar Chiquita, Mar del Plata y Miramar. Los dos perfiles relevados en la playa de Mar Chiquita resultaron en un retroceso de 60 m y 35 m en el lapso de seis años. Este retroceso fue nuevamente mencionado en estudios posteriores (Schnack, 1985), confirmando un ritmo de más de 6 m/año (Fig. 7). Sin embargo, este retroceso fue atenuado en los últimos años mediante la construcción de diversas obras de defensa.

En el Partido de la Costa (Santa Teresita y Mar del Tuyú) se han estudiado casos de erosión severa (con significativa destrucción de las dunas costeras por la urbanización y actividades extractivas). López (1996) menciona importantes pérdidas de arena en el Partido de la Costa durante las sudestadas (ondas de tormenta) que se manifestaron en distintas estaciones del año desde 1989 hasta 1993, y las atribuye a la contribución de la actividad humana. En Mar del Tuyú, la onda de tormenta de febrero de 1993 causó modificaciones severas en el perfil de la playa con variaciones verticales hasta 1,40 m, de acuerdo a mediciones realizadas por la Dirección de Hidráulica, y la destrucción de propiedades. El 30 de diciembre de 2003 una fuerte sudestada afectó severamente un importante sector del frente costero de Villa Gesell. Hacia fines de agosto de 2005 un fenómeno similar causó erosión en localidades del Partido de la Costa (Fig. 8).

La costa atlántica oriental bonaerense es estructuralmente del tipo acrecional (de

acumulación). Sin embargo, la intervención humana, a través de la minería de playas, fijación y degradación de dunas costeras, obras de infraestructura y urbanización, es la responsable primaria de los procesos erosivos que caracterizan a este sector. Las ondas de tormenta son agentes de significativa influencia en la erosión costera, pero debe notarse que en ausencia de actividades humanas el perfil de la playa tiende a restablecerse.

Procesos erosivos han sido identificados en otras áreas del litoral atlántico bonaerense, aunque debe señalarse que el grado de intervención humana no es tan decisivo como en el sector oriental, que se extiende entre Miramar y el Partido de la Costa.

En Mar del Plata y zonas aledañas, el emplazamiento de obras de defensa para detener la erosión (consecuencia, entre otros factores, de la construcción del puerto de Mar del Plata), incrementó los procesos erosivos deriva arriba, hacia el norte. Mar del Plata, el más antiguo sitio turístico costero-marino, ha evolucionado a una ciudad con actividades múltiples, desde hace varias décadas asiento de industrias, actividad portuaria y población estable. La erosión de sus playas, que comenzó durante la primera mitad del siglo pasado, motivó la construcción de numerosas obras de defensa, que permitieron la conservación del recurso arena para su utilización turística y al mismo tiempo como defensa de la costa. Las obras, concebidas por la Dirección Provincial de Hidráulica, aportaron buenas soluciones locales, tal como las experiencias de varios países con problemas similares. Pero, al interrumpir el transporte litoral de arenas (hacia el norte), se fue incrementando la erosión en las localidades vecinas (Camet, Santa Clara del Mar, Mar Chiquita, entre otras). En este sector, el retroceso de los acantilados ha motivado el replanteo de la ruta costanera en varias oportunidades. Al sur de Mar del Plata, en la zona conocida como Ensenada Mogotes, se desarrolla un tramo de costa en el que predominan acantilados de gran altura, que se extienden hacia la localidad de Miramar. En este sector, tal vez el de mayor imponencia de la región, se ha venido desarrollando un intenso proceso erosivo durante las últimas décadas, producto de la combinación de actividades humanas (extracción de arenas en el norte; obras de defensa costera en la costa de Miramar, al sur) combinadas con factores oceánicos naturales relacionados con la poca disponibilidad de sedimentos y la acción del oleaje (Fig. 9).

La costa patagónica muestra sectores con erosión de acantilados, producto

combinado de la abrasión marina y procesos de remoción en masa (deslizamientos, derrumbes) que caracterizan a estas costas altas (Fig. 10).

Codignotto y Ercolano (2006) describen casos de incremento de la erosión costera en la Argentina debido al cambio climático. El análisis abarca a todo el litoral atlántico, con referencia a algunos sectores particulares. En la región patagónica, mencionan algunos casos de aceleración de la erosión manifestada en el retroceso de los acantilados, a partir de 1980. Estos valores serían de 0,6 m/año en las proximidades de Comodoro Rivadavia (Chubut), casi 1 m/año en el sector costero de Monte León y al sur de Punta Loyola (Santa Cruz). Isla y Cortizo (2005) mencionan un retroceso de ca. 1 m/año para la costa patagónica, sobre la base de estimaciones realizadas en algunos sectores.

El incremento del nivel del mar

El estudio de los registros mareográficos de la Argentina ha aportado resultados que muestran un incremento del nivel del mar coincidente con la tendencia global.

El cálculo de valores absolutos a partir de mediciones horarias del nivel del mar del mareógrafo de Mar del Plata (período 1954-2002) muestra una tendencia de $1,4 \pm 0,01$ mm/año (Pousa et al., 2007; Fig 11).

El análisis de niveles medios anuales del registro del Río de la Plata sobre un período de 98 años arroja un incremento de $1,68 \pm 0,05$ mm/año, sin mostrar aceleración significativa, por lo que de confirmarse esta tendencia sus efectos se harán evidentes a largo plazo (D'Onofrio et al., 2008; Fig. 12). El registro del estuario del Quequén muestra un incremento de 1.6 ± 0.2 mm/año.

Los valores obtenidos son bastante coincidentes y sugieren estabilidad geológica (sin movimientos verticales en la interfase continente/océano). Si bien dos de los mareógrafos se encuentran en zonas estuáricas (Río de la Plata y Quequén), por lo que podría suponerse un efecto de las variaciones en la descarga superficial, en el caso del Río de la Plata los aportes hídricos de la cuenca del Paraná no tienen en general influencia sobre el nivel del mar debido a la geometría del cuerpo receptor (el estuario del Plata) , que permite la redistribución de las aguas sin efectos verticales significativos y, pese a

algunas alteraciones debidas a los excesos hídricos causados por El Niño (e.g. 1983; 1992; 1998), éstas no modifican la serie temporal (D´Onofrio et al., 2008).

La Oscilación Austral El Niño

Los procesos interanuales vinculados a El Niño/Oscilación Austral (ver sección 4 y Barros, este volumen), en sus expresiones más intensas (e.g. 1982-1983, 1991-1992, 1997-1998) provocaron severas inundaciones en la planicie aluvial del río Paraná y en amplios sectores del delta. Los daños económicos de la inundación de 1982-1983, la mayor ocurrida en el siglo XX con más de 3 millones de ha inundadas en el noreste argentino, fueron calculados en US\$ 1800 (Bergman, 1994).

El delta medio-inferior del río Paraná, que se desarrolla desde Rosario hasta el Río de la Plata con una longitud de 300 km y una superficie de 17.500 km², forma parte del complejo morfosedimentario del Río de la Plata y su expresión actual obedece a procesos asociados con las variaciones del nivel del mar en los últimos 6000 años, por lo que su formación es bastante reciente en términos geológicos. La inundación de 1983 cubrió prácticamente la totalidad del delta, con diversos efectos morfológicos, hidrológicos y ecológicos (De Francesco et al., 2002). Desde 1974 los episodios de inundación han sido más frecuentes y severos. Las crecidas prolongadas alteran la cubierta vegetal y modifican sensiblemente los parámetros de escurrimiento (Borús y Goniadzki, 2002). La porción inferior, en contacto con el Río de la Plata, es particularmente vulnerable a estos fenómenos pulsátiles, dada su exposición a otros procesos, especialmente las sudestadas.

Escenarios futuros

En una perspectiva regional, tomando como caso la costa oriental y norte de Sudamérica, debido a la alta densidad poblacional en las zonas costeras, así como por las actividades turísticas, portuarias y asociadas, una aceleración del aumento del nivel del mar según los escenarios del IPCC, produciría daños severos, especialmente en sus zonas bajas (Schnack 1993, Brooks et al. 2006). Incrementos en riesgos de inundación costera se manifestarán en la cuenca del Paraná-La Plata (Barros, 2005), y en áreas de humedales, así como una exacerbación de procesos erosivos preexistentes en las playas, que demandarán varios tipos de respuestas para mitigar la exposición de la población

humana a los riesgos asociados al aumento del nivel del mar.

La vulnerabilidad de la costa argentina al incremento del nivel del mar fue tratada en distintas contribuciones. Schnack et al. (1992) y Dennis et al. (1995), basados en relevamientos aéreos con videos y comprobaciones de campo, estimaron los impactos de una aceleración sobre los sistemas costeros y las pérdidas potenciales de tierra, valores actuales de mercado de tierra y propiedades (al año 1991) y costos posibles de las respuestas, tomando como valor, dentro de varios escenarios, un aumento de un metro como referencia. El análisis abarcó el área costera entre el Delta del Paraná y Rawson (Chubut). Los mayores impactos ocurrirían en la Provincia de Buenos Aires y el área metropolitana, que concentran gran parte de la población e infraestructura. Se propone que un metro de elevación del nivel del mar afectaría por inundación y erosión por lo menos 2000 km² de la costa argentina, gran parte de la cual consiste en zonas bajas. Si bien este escenario excede los generalmente establecidos, aún en magnitudes menores serían afectadas las planicies costeras cuyas altitudes son menores de 5 m, en general desarrolladas entre 3 y 0 m con respecto al nivel medio del mar. Entre las zonas más vulnerables pueden citarse los dominios del Delta inferior del Paraná (también sujeto a efectos de inundación ENSO), la Bahía Samborombón (Fig. 4), los ambientes aledaños al estuario de Bahía Blanca y las más pequeñas, aunque extendidas a lo largo de depresiones costeras, de la Patagonia. Desde la Bahía Samborombón hacia el sur, los humedales costeros están compuestos por planicies de mares (“cangrejales”) y marismas, pobladas por vegetación halófila típica de zonas templadas (*Spartina* sp., *Salicornia* sp., entre otras). En caso de producirse un avance de las aguas sobre estos ambientes existe la posibilidad de su migración pueda ser impedida por rasgos geológicos o por construcciones (e.g. carreteras), por lo cual muchos de estos ambientes podrían reducirse sustancialmente o desaparecer.

En las costas arenosas, una elevación del nivel medio del mar del orden del metro, o aún menor, puede ocasionar efectos erosivos ulteriores como consecuencia del potente oleaje asociado con las tormentas. Análisis de datos del período 1950-2002 no revela tendencias en la altura de las olas en el área del Atlántico Sudoeste (Gulev y Grigorieva, 2004). Las zonas más vulnerables, con procesos erosivos ya existentes, son las playas

situadas entre San Clemente del Tuyú y Mar del Plata. Sin embargo, se han registrado procesos erosivos en otras localidades, principalmente aquéllas con ocupación humana asociada al turismo y actividad portuaria (e.g. Quequén-Necochea) y localidades turísticas de la Patagonia.

Es evidente, por sus características naturales y socio-económicas, que la región costera de la Provincia de Buenos Aires es la más vulnerable a los cambios planteados por el aumento del nivel del mar. La aplicación de índices de vulnerabilidad (Diez et al., 2007) arroja resultados coincidentes con los expuestos, señalando como las zonas de mayor exposición a inundación y pérdida de superficie las áreas bajas de Bahía Samborombón, el estuario de Bahía Blanca y la Bahía Anegada, mientras que asigna alta vulnerabilidad a la erosión a la costa atlántica entre Punta Rasa y Bahía Blanca.

Dentro de los escenarios formulados, tomando el valor medio de 0,50 m de incremento del nivel del mar hacia fines del presente siglo, puede sumarse el potencial aumento de la frecuencia e intensidad de las tormentas.

Sin embargo, debe notarse que en muchos casos la intervención directa del hombre a través de construcciones costeras, urbanización, sobreexplotación y contaminación de recursos hídricos y bióticos, entre otras actividades, tiene una gravitación ostensiblemente mayor que los procesos asociados al cambio global, al menos en los escenarios más prudentes planteados de aceleración del aumento del nivel del mar.

4. Flujos del Continente al

Mar Impacto del Río de la Plata

El Río de la Plata descarga aproximadamente 23000 m³ por segundo al océano cerca de 35°S. El agua “dulce” del río flota sobre el agua oceánica más densa y aporta sedimentos y nutrientes, dando características únicas al ambiente marino circundante. Los fosfatos y nitratos abundantes en el agua de río promueven el desarrollo de algas microscópicas llamadas fitoplancton, que son la base de la cadena alimentaria marina. Sin embargo, los sedimentos acarreados por el agua de río limitan la penetración de la luz e inhiben el desarrollo de las plantas marinas. Las variaciones estacionales de los vientos predominantes, del sudoeste en invierno y primavera y del noreste en verano y otoño,

alteran la distribución de aguas diluidas promoviendo importantes cambios en el ambiente marino (Piola et al., 2000). En invierno las aguas diluidas por la descarga del Plata se extienden hacia el noreste a lo largo de la costa uruguaya y del sur de Brasil superando los 28°S (Fig. 13) y en verano se retraen hacia el sur de la desembocadura, eventualmente llegando a las proximidades de Mar del Plata. Estas fluctuaciones de la llamada pluma del Plata impactan sobre la distribución de huevos y larvas de peces (Muelbert y Sinque, 1995) e influyen sobre las pesquerías (Sunyé y Servain, 1998) de especies de interés comercial sobre una amplia región de la plataforma continental de Argentina, Uruguay y sur de Brasil. La extensión de aguas diluidas hacia el noreste también produce la disminución de la temperatura superficial a lo largo de la costa, por lo tanto las variaciones de extensión de la pluma pueden generar variaciones del clima costero (Fig. 13 b).

El Plata también presenta grandes variaciones de caudal. Los períodos de máximo caudal están relacionados con las lluvias más intensas en la cuenca hidrográfica, en algunos casos asociada a eventos Niño/Oscilación Austral y existe evidencia de un aumento del caudal en las últimas décadas (ver Figura 7 en Capítulo Barros, este volumen). Durante estos períodos, en particular los eventos de 1982-1983 y 1997-1998 las lluvias intensas triplican el caudal del Plata, aumentando la disponibilidad de agua dulce al océano adyacente. Por ejemplo, modelos numéricos de la distribución de aguas diluidas muestran que su extensión hacia el noreste típica de invierno debería aumentar con el aumento del caudal. Sin embargo, los vientos predominantes durante períodos de caudal alto tienden a oponerse al desarrollo de la pluma y, en consecuencia, las aguas diluidas no presentan habitualmente mayores extensiones hacia el noreste en respuesta a los mayores caudales (Piola et al., 2005).

Durante el periodo 1944-1970 el caudal medio anual del Río de la Plata fue 17800 m³ por segundo, mientras que durante 1970-2002 alcanzó 23900 m³ por segundo, representando un aumento del 34%. Este aumento refleja variaciones en el balance hidrológico, que incluye a las precipitaciones, la humedad del suelo y la evapotranspiración sobre la cuenca. La mayor disponibilidad de agua dulce debería producir una expansión de la pluma e impactar sobre la biota y el balance de los sedimentos vertidos sobre el océano adyacente. Sin embargo, dado que la componente del viento paralelo a la costa parece

ejercer más eficientemente el control de la distribución de la pluma en la plataforma continental, la evolución del ecosistema costero dependerá de las futuras variaciones del campo de viento.

En las últimas décadas se ha observado evidencias que sugieren el desplazamiento hacia el sur del anticiclón del Atlántico Sur, aumentando el flujo de humedad desde Amazonia hacia la cuenca del Plata (ver Barros, este volumen). Este proceso podría inducir el aumento de las precipitaciones sobre partes de la cuenca del Plata y un aumento del caudal. Al mismo tiempo, el desplazamiento del anticiclón hacia el sur induciría la menor frecuencia de vientos del oeste sobre el área de influencia de las aguas del Plata. El análisis del campo de vientos entre 1948 y 1997 sugiere que la transición vientos predominantes del noreste en verano a vientos predominantes del sudoeste en invierno tiende a adelantarse y que durante los períodos de transición ha aumentado la influencia de vientos del norte (Simionato et al., 2005). Los cambios observados en el campo de viento sugieren el paulatino aumento de las situaciones semejantes al verano, las que reducirían la penetración hacia el noreste de la pluma del Plata, reforzando las penetraciones hacia el sur y hacia el borde exterior de la plataforma continental, donde las aguas diluidas tienden a ser mezclarse rápidamente con las aguas de la Confluencia Brasil-Malvinas, y son arrastradas hacia el sudeste fuera de la plataforma continental.

Otros efectos

Los cambios de la temperatura superficial y del régimen de precipitaciones pueden inducir modificaciones en los caudales de los ríos y en sus aportes de agua dulce a la plataforma continental. Según Barros et al. (2006) los caudales de los ríos de las provincias del Chubut y Santa Cruz, no sufrirían la reducción de sus caudales durante la primera mitad del siglo actual debido a que, si bien disminuirán las precipitaciones en la cordillera de los Andes, donde tienen sus nacientes, la recesión de los glaciares, que continuaría por el resto del siglo, compensará los aportes de agua de estos cursos superficiales.

En la cuenca del Plata se prevén aumentos de temperatura de cerca de 2° C en los próximos 50 años, lo que resultaría en una mayor tasa de evaporación y una reducción de los caudales de hasta el 30% (ver Barros, este volumen). En este escenario, cabe esperar cambios en la influencia de ENSO, en sus fases cálidas (El Niño), implicando mayores

precipitaciones y caudales, en sus fases frías (La Niña), con seguías y menores caudales, y en sus fases intermedias. Las contribuciones hacia el estuario del Plata y la plataforma continental cercana por el transporte de materia orgánica, nutrientes y sedimentos podrán sufrir modificaciones de importancia.

La descarga de efluentes sanitarios urbanos y de nutrientes derivados de la fertilización agraria constituye un riesgo potencial de eutrofización. El proceso está asociado al desarrollo excesivo de vegetación o fitoplancton debido a la incorporación de nitratos y fosfatos, acumulación de materia orgánica y drástica reducción de los niveles de oxígeno disuelto. También existen evidencias que ciertos tipos de floraciones, algunas de las cuales pueden ser tóxicas, favorecidas por el aumento de temperatura (e.g. Paerl y Huisman, 2008). La eutrofización puede conducir a un deterioro general de la calidad del agua y el ambiente. Dicho proceso actúa sobre lagunas del humedal pampeano (Quirós et al., 2006) y reservorios de agua dulce, existiendo registros episódicos en sectores de los ríos Paraná y Uruguay, lagunas costeras (Conde y Rodríguez Gallego, 2002) y áreas del Río de la Plata (Nagy et al., 2002). En el caso de éste último la estratificación vertical, principalmente debida a la presencia de agua de densa de alta salinidad en la capa profunda y agua de baja salinidad en la capa superior, jugaría un rol importante en el ecosistema (Nagy et al., 2002). El aumento de la temperatura superficial tendería a aumentar la estratificación vertical y el *stress* biológico en el área del estuario exterior.

Estudios recientes en las capa superior del Océano Atlántico, a través del análisis de la concentración de un trazador radioactivo, el radio ²²⁸ (Ra²²⁸, de origen terrestre), revelan que el agua subterránea submarina, consistente en flujos de agua terrestre y marina que han penetrado sedimentos costeros permeables, contribuye significativamente, a veces con mayor incidencia que los flujos fluviales, en el aporte de nutrientes, carbono y metales al océano (Moore et al., 2008). En investigaciones realizadas en aguas poco profundas adyacentes a la Laguna de los Patos (Brasil), se determinaron contribuciones significativas de hierro disuelto atribuibles a flujos de agua subterránea (Windom et al., 2006). Si bien parte de estos flujos podría tener tiempos de residencia prolongados y por lo tanto debidos a condiciones pasadas, nuevas y futuras contribuciones asociadas al cambio climático podrían inducir cambios en los ecosistemas costero-marinos. Este aspecto merece especial atención en el caso del Mar Argentino, tanto en la región costera pampeana como en la

patagónica donde existen acuíferos subterráneos que drenan al mar, sin que hasta el momento se hayan estudiado.

5. La Circulación Oceánica

La expansión de los anticiclones de latitudes medias y la intensificación de los vientos del oeste son escenarios posibles frente al calentamiento global. Estas alteraciones del campo de vientos tendrían un impacto sobre las corrientes oceánicas regional y global.

Las corrientes en las plataformas continentales están dominadas por la acción del viento. Al sur de aproximadamente 40°S el viento produce un flujo hacia el NE en la capa superficial y un flujo compensatorio hacia la costa en capas más profundas. En promedio, la corriente se dirige hacia el noreste (Palma et al., 2008). En verano se forma una capa superficial cálida que se extiende unas decenas de metros, separada de la capa profunda más fría por una capa delgada, llamada termoclina. A medida que progresa el otoño e invierno, la capa superficial va cediendo el calor almacenado durante el verano, disminuye su temperatura y aumenta la densidad. Hacia el final del invierno la columna de agua es prácticamente homogénea en la vertical. Estas variaciones estacionales de la estructura de la columna de agua están acompañadas por variaciones en la concentración de nutrientes, que tienden a agotarse por el consumo del fitoplancton hacia el final de la primavera. Sin embargo, en ciertas regiones la mezcla vertical suministra nutrientes suficientes a la capa superior, favoreciendo un crecimiento sostenido. En la plataforma continental patagónica estas regiones se limitan a zonas de la plataforma interior (sector más próximo a la costa), asociada a los llamados frentes de marea, y al talud continental.

El fitoplancton se desarrolla más eficientemente cerca de estos frentes (Romero et al., 2006). Los frentes también sustentan el crecimiento de una variedad de especies de niveles superiores de la cadena alimentaria marina, incluyendo varias especies de interés comercial (Acha et al., 2004). Los frentes también son importantes desde el punto de vista geoquímico y climático pues son áreas de transición entre regiones en las que el océano absorbe dióxido de carbono atmosférico, que coinciden aproximadamente con las de máximo crecimiento del fitoplancton, y áreas de emisión. Sin embargo, en promedio, la plataforma patagónica es una región de elevada absorción de dióxido de carbono (Bianchi

et al., 2005). Al absorber CO₂ el océano contribuye a reducir la concentración del gas en la atmósfera y reduce, parcialmente, la magnitud del efecto invernadero asociado. Sin embargo, el CO₂ se combina con el agua e iones carbonato disueltos en agua de mar produciendo la “acidificación” del océano (Caldeira y Wickett, 2003). La acidificación producida por la absorción de CO₂ antrópico ha reducido el pH del océano y la concentración de carbonato que utiliza una gran variedad de especies marinas para formar sus caparazones de carbonato de calcio, representando una amenaza potencial considerable para el ambiente marino.

Al norte de 40°S los vientos son más débiles y variables. Los vientos variables y el aporte de agua dulce del Río de la Plata son importantes en la configuración de las corrientes en ese sector de la plataforma. Fuera de la plataforma, las Corrientes de Brasil y Malvinas interactúan con las aguas de la plataforma y, en alguna medida, extienden su influencia hacia el interior de la plataforma, generando la penetración de aguas de la plataforma patagónica hacia el noreste hasta aproximadamente 32°S. La teoría sugiere que la intensidad y localización de la Corriente de Brasil depende principalmente del sistema de vientos sobre el sector subtropical del Atlántico Sur.

Las corrientes hacia el noreste sobre la plataforma continental son muy sensibles al viento (Palma et al., 2004). Posibles cambios en la latitud del centro de alta presión del Atlántico Sur y de los vientos del oeste, podrían impactar sobre la circulación en la plataforma continental y la intensidad y latitud del encuentro de las corrientes de Brasil y Malvinas. Dichas variaciones podrían influir sobre la disponibilidad de nutrientes en el talud, y el desarrollo de diversas especies marinas que el mismo sustenta.

6. Síntesis y Conclusiones

En el marco de los escenarios planteados a escala planetaria, y teniendo en cuenta las incertidumbres en cuanto a la magnitud de los impactos del cambio climático, es evidente que el nivel medio del mar ascendió durante el siglo pasado a un ritmo de entre 1 y 2 mm/año. Estos valores son coincidentes con los determinados en los mareógrafos más representativos de la Argentina. Dentro de los escenarios de aceleración del aumento del nivel del mar propuestos por el IPCC, adoptando un valor de 0,50 m para el siglo actual, se puede estimar que los efectos se verificarán en distintos ambientes con magnitudes

variables. En este sentido, pueden indicarse factores adicionales, como el posible incremento de la frecuencia e intensidad de ondas de tormenta.

Teniendo en cuenta la tipología costera, pueden considerarse los siguientes ambientes:

Zonas costeras bajas, generalmente yaciendo a altitudes de entre 5 y 0 m sobre el nivel del mar, pero muy comúnmente con menos de 3 m. Dentro de esta categoría se encuentran los humedales costeros (e.g. Bahía Samborombón, áreas vinculadas al estuario de Bahía Blanca), y áreas deprimidas, usualmente de menor extensión, pero frecuentes de la Patagonia. El área ocupada por la porción emergida del Delta del Paraná sufre inundaciones periódicas, en casos vinculadas con descargas excesivas asociadas al fenómeno El Niño. Este ambiente, además de presentar actividad económica, recreativa y población estable.

La ribera y la planicie costera del Río de la Plata albergan concentraciones urbanas, complejos industriales, actividades agrícolas y áreas protegidas (e.g. selva subtropical, humedales). El principal factor de erosión e inundación son las ondas de tormenta extratropicales (“sudestadas”) que se originan en el Atlántico Sur y se producen frecuentemente a lo largo del año, con aumentos significativos en el nivel de las aguas acompañados por fuertes vientos provenientes del cuadrante sudeste. Cuando las aguas alcanzan niveles elevados que exceden los valores de alerta, los pobladores deben ser evacuados con cierta frecuencia.

Costas arenosas, principalmente aquéllas situadas en las zonas de mayor intervención humana, fundamentalmente afectadas al turismo, donde el estado de deterioro puede atribuirse mayormente a la acción directa del hombre. En los escenarios planteados, la contribución del cambio climático exacerbará efectos erosivos ya existentes.

Estos procesos no son nuevos ni han sido reconocidos sólo recientemente, sino que se han manifestado a través de los tiempos. Pero debido a que en las últimas décadas las costas han experimentado un incremento en la presión antrópica motivada por la ocupación turística y la demanda de infraestructura y servicios asociada, se han hecho cada vez más vulnerables ante los factores de cambio, tanto naturales como antropogénicos.

Tradicionalmente, la respuesta ante los fenómenos de erosión o inundación consistió en obras de defensa (muros, espigones, rompeolas, entre otras), pero en las últimas décadas han ganado aceptación procedimientos denominados “blandos”, tales como el relleno artificial de playas desde costa afuera, el control de médanos, reservorios de agua potable en las costas arenosas, medidas de manejo, o soluciones mixtas.

Un ejemplo de buenas prácticas es el procedimiento realizado por el Municipio de Villa Gesell después de la fuerte sudestada de fines de diciembre de 2003, cuando dispuso la desactivación de la Av. Costanera y la instalación de pasarelas de madera, disponiendo además una reducción en la densidad de balnearios y el progresivo reemplazo de las construcciones rígidas por instalaciones de madera en el frente costero. Esta metodología se está aplicando en el Partido de la Costa (Schnack y Lasta, 2006).

Costas rocosas, con presencia de acantilados y restingas, que presentan procesos erosivos naturales y antrópicos, tanto en la costa bonaerense como en la patagónica.

La conservación de este tipo de costa presenta algunas limitaciones, considerando que la falta de suficientes acumulaciones de arena favorece el alcance de las olas sobre el pie de los acantilados. Muchas de estas costas contienen un valor estético significativo, por lo cual es desaconsejable el emplazamiento de estructuras de defensa intrusivas en el paisaje costero. Esta situación es visible en la zona al sur de Punta Mogotes, donde se han planteado diversas alternativas, una de las cuales consistiría en el emplazamiento de arrecifes artificiales sumergidos (estructuras geotextiles rellenas con arena), con lo que se atenuaría la energía de las olas. En la costa patagónica los problemas están concentrados en algunas localidades costeras, una de ellas Las Grutas (Río Negro), donde no es posible el relleno a partir de sedimentos costa afuera, dado que albergan recursos biológicos de importancia y la zona está incluida en el “Area Natural Protegida Bahía de San Antonio”. En este caso deben considerarse limitaciones en la ocupación urbana y de los drenajes producidos desde esa fuente.

En todas las tipologías costeras existen distintos tipos de áreas protegidas, de carácter municipal, provincial y nacional, con planes de manejo específicos. La Bahía Samborombón es una Reserva Natural Integral y sitio RAMSAR. La zona inferior del

Delta del Paraná se encuentra protegida como de reserva de la biósfera. La laguna Mar Chiquita y Bahía San Blas-Bahía Anegada son Areas Naturales Protegidas de la Provincia de Buenos Aires. El único Parque Nacional Costero de la Argentina es Monte León, en la Provincia de Santa Cruz.

En las zonas sometidas a mayor presión humana, especialmente las más urbanizadas, industriales y portuarias o destinadas al turismo, se están generando –y en algunos casos aplicando- iniciativas orientadas al “manejo integrado de la zona costera”, que involucra acciones interactivas entre los componentes naturales y socio-económicos, en concordancia con las tendencias mundiales. Estas acciones son generalmente de carácter provincial, con la participación de los municipios y de la comunidad. Aunque en estas áreas la acción directa del hombre es de mayor incidencia, al menos en una proyección de algunas décadas, deben tenerse en cuenta los escenarios futuros en el contexto del cambio climático, incluyendo el abordaje de buenas prácticas, ambientalmente compatibles con el desarrollo.

En el ámbito marino, los escenarios climáticos futuros predicen el aumento de la temperatura superficial del mar en la mayor parte del globo (ver por ejemplo Meehl et al., 2007). El aumento de la temperatura superficial puede conducir al aumento de la estratificación vertical, el mayor aislamiento entre la capa superior y las subsuperficiales ricas en nutrientes y, consecuentemente, la disminución de la productividad biológica. Cambios recientes de esa naturaleza han sido observados en el océano tropical y subtropical (Behrenfeld et al., 2006). Cerca de las áreas costeras de la plataforma austral, donde la mezcla vertical que promueve el enriquecimiento de nutrientes de la capa superior está ligada a la acción de la marea, es improbable que aún en un escenario de aguas superficiales más cálidas, se altere significativamente el aporte de nutrientes desde la capa profunda. Por otra parte, la mezcla vertical que favorece el intercambio entre la capa superficial y la profunda también depende de la intensidad del viento. Los cambios en el suministro de nutrientes a la capa superior son importantes pues modulan la abundancia del fitoplancton, e, indirectamente, pueden influir sobre el desarrollo de otras especies marinas. Los escenarios climáticos no presentan una tendencia definida en el patrón e intensidad de vientos en la superficie del mar, aunque la mayoría de los modelos sugieren un desplazamiento hacia el sur de las áreas de máxima actividad ciclónica (Meehl et al., 2007),

pero el conocimiento de los cambios del viento es todavía muy limitado. Dada la incerteza en relación a las posibles variaciones del viento, las variaciones de las corrientes que estos generan, y la estratificación vertical sobre la plataforma continental, sería aventurado especular sobre el posible impacto ecológico de las variaciones futuras del clima. Sin embargo, estudios realizados en otras regiones sugieren que la acción directa del hombre sobre las pesquerías podría ejercer un mayor impacto sobre el ecosistema marino (ver Pauly y Maclean, 2002).

**La presente publicación constituye la opinión de sus autores en los temas tratados y no necesariamente coincide con la de las entidades que integran el Foro de la Cadena Agroindustrial Argentina.*

Bibliografía

- Acha E.M., Mianzan H.W., Guerrero, R.A., Favero, M., y Bava, J., 2004, Marine fronts at the continental shelves of austral South America: physical and ecological processes, *Journal of Marine Systems*, 44, 83–105
- Alley, R.B., Clark, P.U., Huybrechts, P. y Joughin, I., 2005. Ice-sheet and sea-level changes. *Science* 310, 456-460. Balay, M.A., 1961. El Río de la Plata entre la atmósfera y el mar. Servicio de Hidrografía Naval, Publ. H-621, Buenos Aires, 153 p.
- Barros, V., 2005: Inundación y cambio climático: costa Argentina del Río de la Plata. *El Cambio Climático en el Río de la Plata*, V. Barros, A. Menéndez and G.J. Nagy, Eds., Proyectos AIACC, 41-52.
- Barros, V., A. Menéndez, C. Natenzon, R.R. Kokot, J.O. Codignotto, M. Re, P. Bronstein, I. Camilloni and Co-authors, 2006. *Vulnerability to floods in the metropolitan region of Buenos Aires under future climate change*. Working Paper 26. Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change (AIACC), 36 pp.
- Behrenfeld, M. J., O'Malley R.T., Siegel D.A., McClain C.R., Sarmiento J.L., Feldman G.C., Milligan A.J., Falkowski P.G., Letelier R.M. y Boss E.S., 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity, *Nature*, **444**, 752-755.
- Bergman, R., 1994. Informe sobre daños: Recopilación de antecedentes de los daños de crecidas de 1983 y 1992. Evaluación económica. Secretaría de Asistencia para la Reforma Económica Provincial, Ministerio del Interior, Buenos Aires, SUCCE, 185 pp.
- Bianchi, A. A., L. Bianucci, A. R. Piola, D. R. Pino, I. Schloss, A. Poisson, and C. F. Balestrini, 2005, Vertical stratification and air-sea CO₂ fluxes in the Patagonian shelf, *Journal of Geophysical Research*, **110**, C07003, doi: 10.1029/2004JC002488.
- Borús, J. y Goniadzki, D., 2002. Eventos severos de El Niño y su impacto en el delta. En: E. Schnack (ed.), Taller El Niño: sus Impactos en el Plata y en la Región Pampeana. Com. Inv. Cient. de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Asociación Bonaerense de Científicos. Contribuciones , 3-8.
- Brooks, N., Nicholls, R. and Hall, J., 2006. Sea level rise: Coastal impacts and responses. Final Draft, WBGU, 46 p.
- Central Pacific Hurricane Center–NOAA, 2006. Tropical

cyclone climatology. <http://www.pch.noaa.gov/cphc>.

- Chen, J.L., Wilson, C.R. y Tapley, B.D., 2006. Satellite gravity measurements confirm accelerated melting of Greenland Ice Sheet. *Science* 313, 1958-1960.
- Church, J.A., y Gregory, M., 2001. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. J.T. Houghton et al., Eds. Cambridge University Press, Chap. 11, 641-693.
- Codignotto, J.O. y Kokot, R., 2005. Geología y geomorfología. En: V. Barros, A. Menéndez y G. Nagy (eds.), *El Cambio Climático en el Río de la Plata, Parte II, Cap. 8*, 85-106.
- Codignotto, J.O., y Ercolano, B., 2006. Incremento de la erosión costera en Argentina. VI Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar, Puerto Madryn, diciembre de 2006. Res., 147.
- Cortezzi, C.R., Colado, U.R., Mouzo, F.H., Robbiano, J.A. y E.J. Schnack, 1972. Estudio de las variaciones morfológicas y sedimentológicas en el litoral atlántico de la Provincia de Buenos Aires entre San Clemente del Tuyú y Miramar. V Congr. Geol. Arg. (C. Paz 1972): 341-345.
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R. V., Paruelo J., Raskin R. G., Sutton P. y van den Belt, M., 1997, The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature* **387**, pp 253-280.
- De Francesco, F., Colado, U.R., Schnack, E.J., Schnack, J.A., García Lozano, L.C., 2002. La inundación de 1982/1983 en la porción argentina de la cuenca del Río Paraná. En: J.Lugo Hubp y M. Invar. (eds.), *Desastres Naturales en América Latina*. Fondo de Cultura Económica. Cap. XVI, 317-333.
- Denman, K.L., G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciais, P. Cox, R.E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S. Ramachandran, P.L. da Silva Dias, S.C. Wofsy y X. Zhang, 2007: Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z.

- Chen,
M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 499-587. Dennis, K., Schnack, E.J., Mouzo, F. y Oroná, C., 1995. Sea-Level Rise and Argentina: Potential Impacts and Consequences. *J. of Coastal Research*, SI N° 14: 205-223 Diez, P.G., Perillo, G.M.E. y Piccolo, M.C., 2007. Vulnerability to sea-level rise on the coast of the Buenos Aires Province. *Journal of Coastal Research* 23 (1), 119-126. D´Onofrio, E.E., Fiore, M.M.E. y Pousa, J.L., 2008. Changes in the regime of storm surges at Buenos Aires, Argentina. *Journal of Coastal Research* 24, 260-265. Field, C.B.,M.J. Behrenfeld, J.T. Randerson y P. Falkowski, 1998: Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281, 237-240.
- Gulev, S.K., y V. Grigorieva, 2004: Last century changes in ocean wind wave height from global visual wave data. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L24302, doi:10.1029/2004GL021040.
- Isla, F. I., y Bértola, G. R., 2005. Litoral bonaerense. In: de Barrio, R., Etcheverry, R. O., Caballé, M. y Llambías, E. (eds.) *Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio XVI Congreso Geológico Argentino*, La Plata, 265-276.
- Isla, F.I.y Cortizo, L. C., 2005. Patagonian cliff erosion as sediment input to the continental shelf. *Actas XVI Congreso Geológico Argentino*, La Plata, tomo IV, 773-778.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 967 p.
- Isla, F.I. y Cortizo, L. C., 2005. Patagonian cliff erosion as sediment input to the continental shelf. *Actas XVI Congreso Geológico Argentino*, La Plata, tomo IV, 773-778.
- López, R.A., *Erosión de playas en el Partido de la Costa, Pcia. De Buenos Aires. XIII Congr. Geol.. Arg. Y III Congr. De Exploración de hidrocarburos. Actas IV: 295.1996.*

- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao, 2007: Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Meier, M.F., Dyurgerov, M.B., Rick, U.K., O'Neill, S., Pfeffer, W.T., Anderson, R.S., Anderson, S.P. y Glazovsky, A.F., 2007. Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st century. *Science* 317, 1064-1067.
- Miller, K.G., Kominz, M.A., Browning, J.V., Wright, J.D., Mountain, G.S., Katz, M.E., Sugarman, P.J., Cramer, B.S., Christie-Blick, N. y Pekar, S.F., 2005. The Phanerozoic record of global sea-level change. *Science* 310, 1203-1298.
- Moore, W.S., Sarmiento, J.L. y Key, R.M., 2008. Submarine groundwater discharge revealed by 228Ra distribution in the upper Atlantic Ocean. *Nature Geoscience* 1, 309-3011.
- Muelbert, J. H. y Sinque, C., 1996, Distribution of bluefish (*Pomatomus saltatrix*) larvae in the southern Brazilian continental shelf, *Marine Freshwater Research*, **47**, 311-314.
- Nicholls, R. J. y Lowe, J. A. 2004. Benefits of mitigation of climate change for coastal areas. *Global Environmental Change* 14, 229–244.
- Nicholls, R.J., P.P. Wong, V.R. Burkett, J.O. Codignotto, J.E. Hay, R.F. McLean, S. Ragoonaden and C.D. Woodroffe, 2007: Coastal systems and low-lying areas. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 315-356.
- Palma, E.D., Matano, R.P., Piola, A.R. y Sitz, L.E., 2004, A comparison of the circulation patterns over the Southwestern Atlantic Shelf driven by different wind climatologies, *Geophysical Research Letters*, **31**, L24303.
- Palma, E.D., Matano, R.P., y Piola, A.R., 2008, A Numerical Study of the Southwestern

- Atlantic Shelf Circulation, *Journal of Geophysical Research*, en prensa.
- Pauly, D. y Maclean, J., 2002, *In a perfect ocean*, Island Press, Washington D.C., 175pp.
- Piola, A.R., Campos, E.J.D., Möller, O.O., Charo, M. y Martinez, C.M., 2000, Subtropical shelf front off eastern South America, *Journal of Geophysical Research*, **105**, C3, 6566-6578.
- Piola, A.R., Matano, R.P., Palma, E.D., Möller, O.O., y Campos, E.J.D., 2005, The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf, *Geophysical Research Letters*, **32**, L01603.
- Pousa, J.L., Kruse, E., Guaraglia, D., Mazzoldi, A., Carbognin, L., Tosi, L., Bonardi, M., Rizzetto, F. and Schnack, E.J., 2007. Geological Hazards in two sandy environments: the eastern coast of Buenos Aires (Argentina) and Venice (Italy). *Environmental Geology*, 51(8), 1307-1316.
- Romero, S.I., Piola, A.R., Charo, M. y Garcia, C.A.E., 2006, Chlorophyll-a variability off Patagonia based on SeaWiFS data, *Journal of Geophysical Research*, 111, C05021.
- Sabine, C.L., et al., 2004, The Oceanic Sink for Anthropogenic CO₂, *Science*, **305**, 367.
- Sarmiento, J.L., R. Slater, R. Barber, L. Bopp, S.C. Doney, A.C. Hirst, J. Kleypas, R. Matear, U. Mikolajewicz, P. Monfray, V. Soldatov, S.A. Spall and R. Stouffer, 2004. Response of ocean ecosystems to climate warming. *Global Biogeochem. Cy.*, **18**, GB3003, [doi:10.1029/2003GB002134](https://doi.org/10.1029/2003GB002134).
- Schnack, E.J., 1985. Argentina. In: E. Bird and M. Schwartz (eds.). *The World's Coastlines*, van Nostrand-Reinhold Co., 69-78.
- Schnack, E.J., 1993. The vulnerability of the east coast of South America to sea-level rise and possible adjustment strategies. In: *Climate and Sea Level Changes: Observations, Projections and Implications*, R.A. Warrick, E.M. Barrow & M.L. Wigley, Eds. Cambridge Univ. Press: 336-348.
- Schnack, E.J., 2000. El Niño en el Plata. *Revista Museo*, 3 (14), 71-76**
- Schnack, E.J., Dennis, K.C., Nicholls, R.J. and Mouzo, F.H., 1992. Impact of sea-level rise on the coast of Argentina. In: *Global Climate Change and the Rising Challenge of the Sea. Proc., Int. Workshop, Isla Margarita, Venezuela* :275-292

- Schnack E.J, Pousa J.L, Isla F.I., 1998. Erosive processes on the sandy coastline of Argentina. *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, **132**, 133-136.
- Schnack E.J, Pousa J.L., 2004. Episodic Processes (Storm surges and tsunamis). In: F. Isla (ed) *Coastal zones and Estuaries, from Encyclopedia on Life Support Systems (EOLSS)-UNESCO*, Eolss Publishers Co.Ltd, Oxford, UK, www.eolss.net
- Schnack, E.J. y Lasta, C., 2006. Sobre conservación y manejo de la línea de costa, la gestión de balnearios y facilidades asociadas. El caso del Partido de la Costa. Informe técnico, para servir de sustento al decreto municipal sobre emergencia costera en el Partido de la Costa”, 4 pp. texto + 5 pp. figs.
- Shepherd, A. y Windham, D., 2007. Recent sea-level contributions from the Antarctic and Greenland ice sheets. *Science* **315** (5818), 1529-1532.
- Shindell, D. T. & Schmidt, G. A., 2004, Southern Hemisphere climate response to ozone changes and greenhouse gas increases, *Geophysical Research Letters*, **31**, L18209.
- Simionato, C.G.; Vera, C.S., y Siegismund, F., 2005, Surface wind variability on seasonal and interannual scales over Rio de la Plata area. *Journal of Coastal Research*, **21**(4), 770– 783.
- Sunyé, P.S. y Servain, J., 1998, Effects of seasonal variations in meteorology and oceanography on the Brazilian sardine fishery, *Fisheries Oceanography* **7**, 89-100.
- Toggweiler, J.R. y J. Russell, 2008, Ocean circulation in a warming climate, *Nature*, **451**, 286-288.
- Windom, H.L., Niendieski, L.F., Moore, W.S y Jhrke, R. Submarine groundwater discharge: A large, previously unrecognized source of dissolved iron to the south Atlantic ocean. *Marine Chemistry* **102**, 252-266.

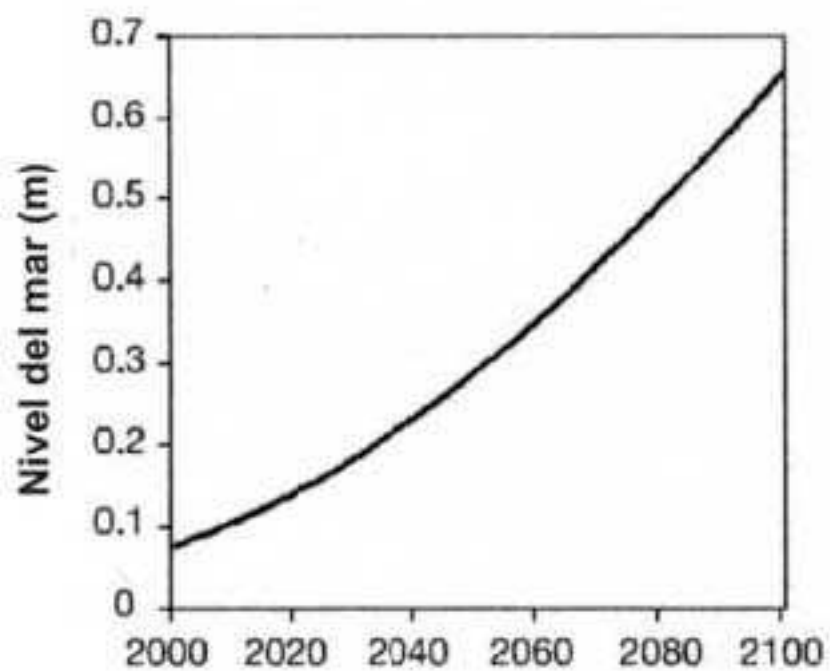


Figura 1. Curva de aceleración del nivel del mar, tomando el escenario de aumento de aproximadamente 0,50 m para fines del siglo actual (Nicholls et al., 2007)

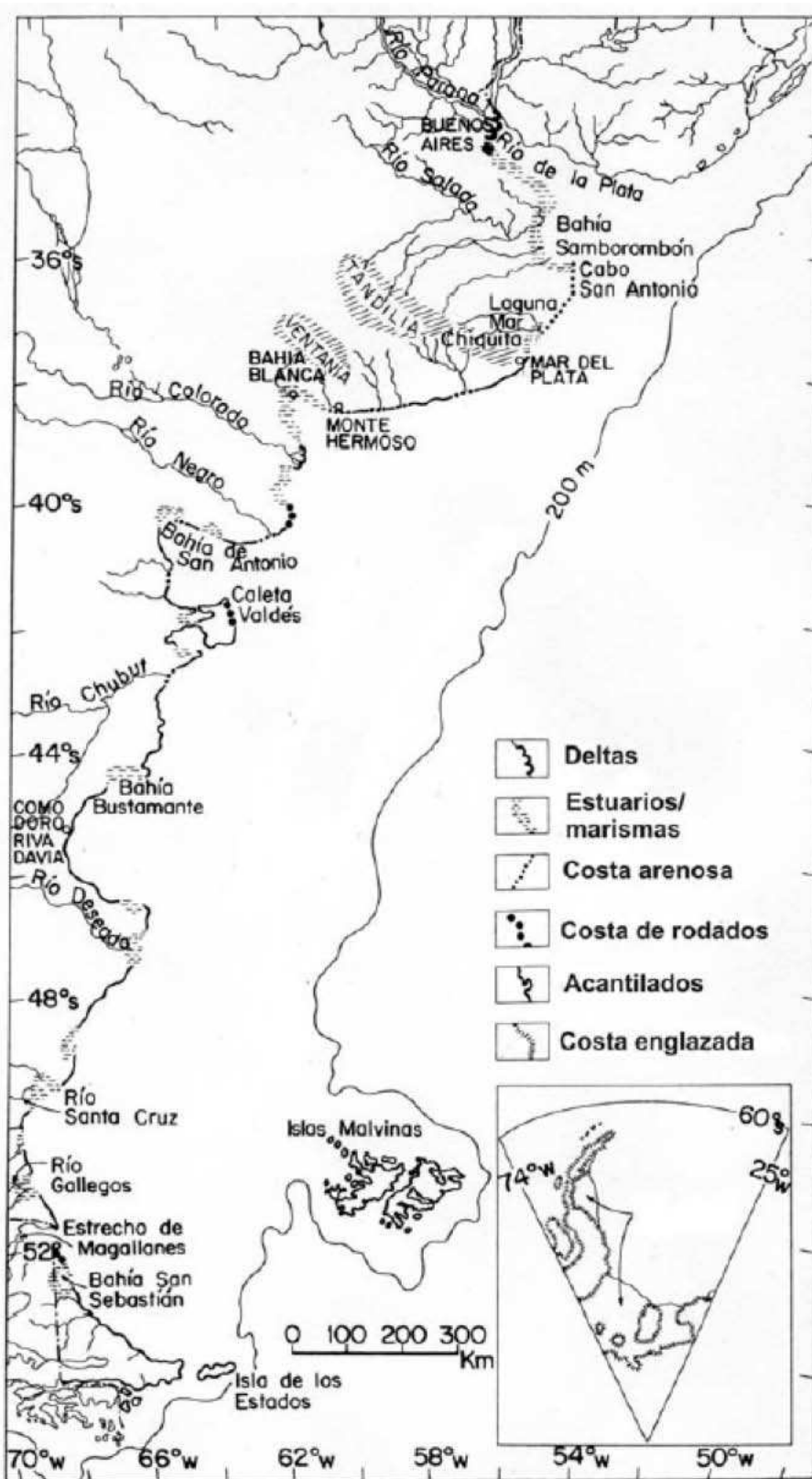


Figura 2. Rasgos geomorfológicos predominantes en la costa argentina (Schnack, 1985).

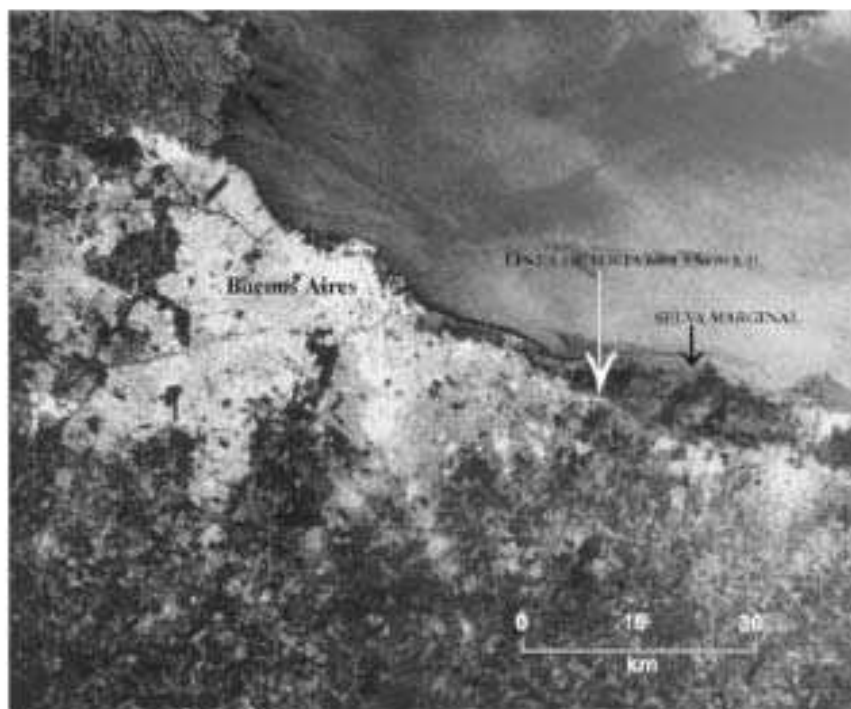


Figura 3. Ambientes costeros vinculados al Río de la Plata en la zona próxima a Buenos Aires. Puede observarse la planicie costera formada durante la última pulsación postglacial del nivel del mar. La flecha blanca indica la línea de costa hace unos 6000 años. En el borde costero se encuentra la selva marginal, un relicto de bosque en galería de origen subtropical. Prácticamente toda la planicie costera fue inundada durante la mayor sudestada registrada en la región, el 15 de abril de 1940 (Imagen LANDSAT TM provista por la CONAE).

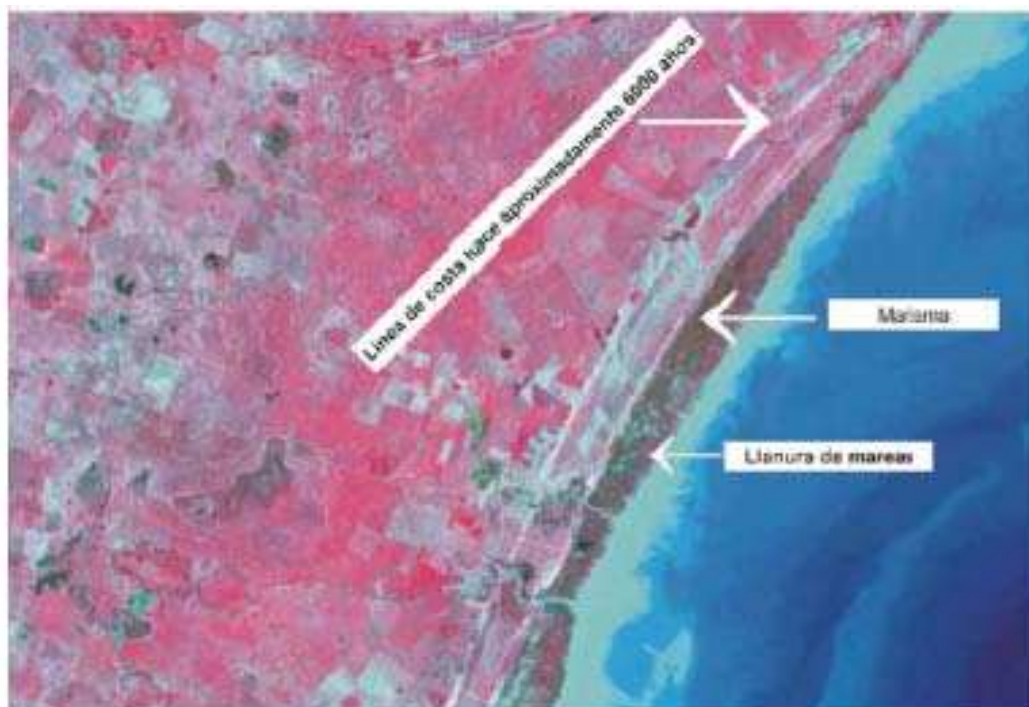


Figura 4. Imagen LANDSAT TM de un sector de la Bahía Samborombón. Se observa la llanura de mareas (“cangrejal”), los ambientes de marisma y los cordones de playa fósiles que indican la línea de costa de hace unos 6000 años.



Figura 5. Fotografía de la tormenta del 21 de marzo de 2001. Ondas de tormenta sobre el muro costero y el camino en Punta Lara, Provincia de Buenos Aires (gentileza del Diario El Día, La Plata).



Figura 6. Áreas de la ciudad de Buenos Aires y zonas aledañas (en gris) que serían inundadas si el nivel del agua alcanzara una altura de 3,50 m con respecto al cero del Riachuelo (D'Onofrio et al., 2008).

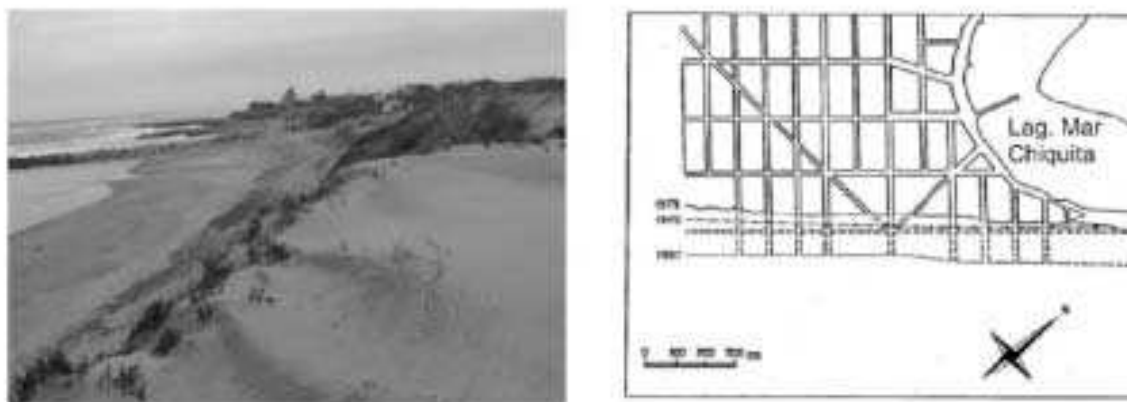


Figura 7. Playa erosiva de Mar Chiquita, unos 30 km al norte de Mar del Plata. A la izquierda pueden observarse espigones emplazados en los últimos años. A la derecha, el retroceso de la línea de costa entre 1957 y 1979, que causó la pérdida de lotes y propiedades (Schnack, 1985).

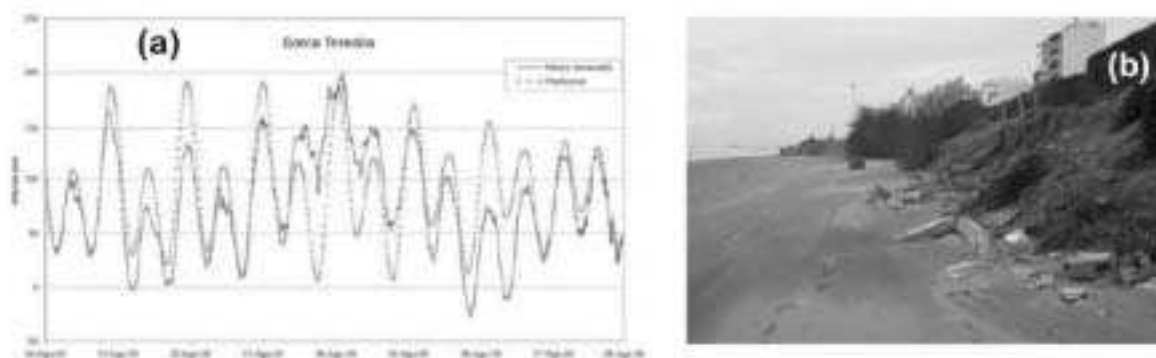


Figura 8. La onda de tormenta de fines de agosto de 2005. (a) gráfico de niveles del mar observados y predichos; (b) impacto en la playa de Santa Teresita.



Figura 9. Vista aérea del sector de Punta Mogotes hacia el sur. En primer plano, se puede observar un sector con acumulación de arenas que disminuye, hasta desaparecer, hacia el sur, con prominentes acantilados, en un proceso erosivo que lleva décadas y para el cual no se han hallado soluciones a la fecha.

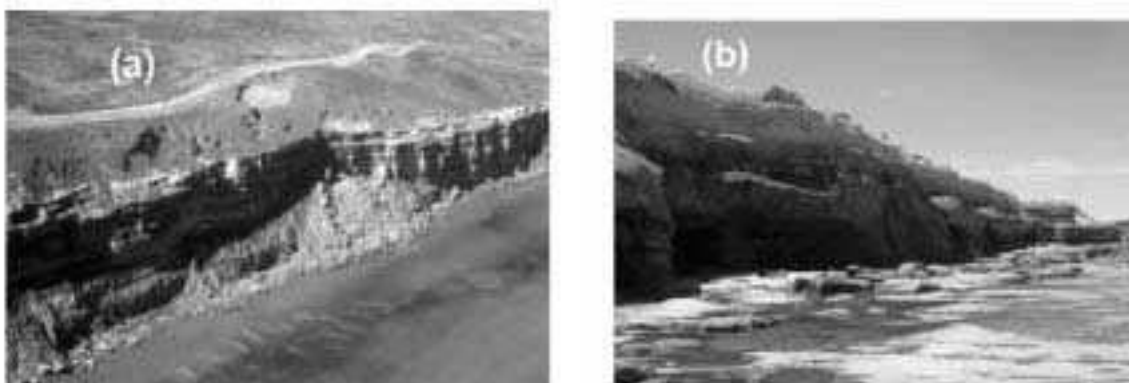


Figura 10. Costa con procesos de erosión de acantilados. (a) sector de la costa del Chubut; (b) sector de Las Grutas, en la Provincia de Río Negro.

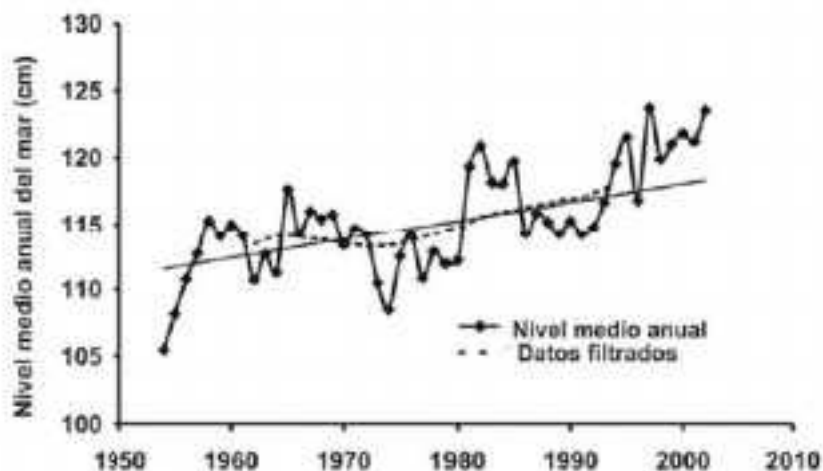


Figura 11. Regresión lineal calculada a partir de datos filtrados de niveles medios absolutos anuales en Mar del Plata, periodo 1954-2002, indicando un incremento de $1,4 \pm 0,01$ mm/año (Pousa et al., 2006).

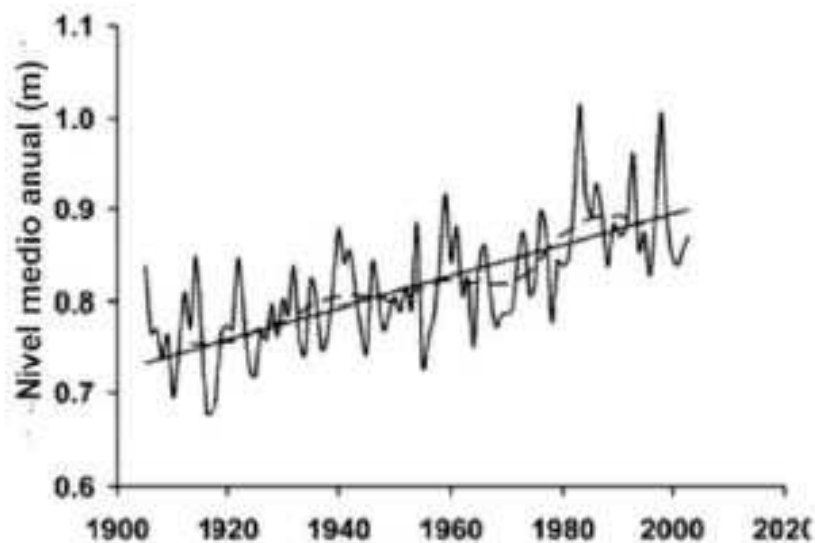


Figura 12. Regresión lineal (línea sólida recta) calculada de datos filtrados (trazo punteado) de los niveles medios anuales en Buenos Aires (trazo sólido curvo), periodo 1905-2003, mostrando un incremento de $1,68 \pm 0,05$ mm/año (D'Onofrio et al., 2008).

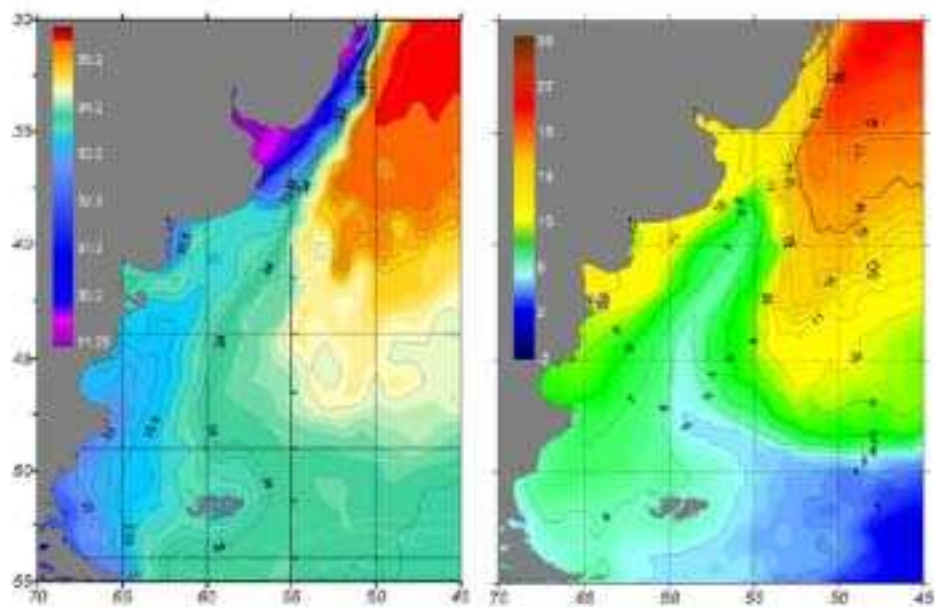


Figura 13. a (izq): climatología de salinidad superficial en invierno. b (der) : imagen de SST de invierno ilustrando la penetración de la pluma de baja temperatura.

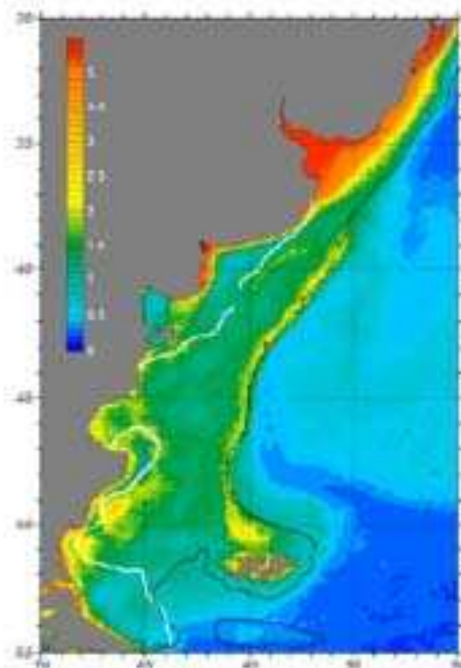


Figura 14. Distribución de clorofila satelital y esquema de frentes oceánicos y patrones de absorción/emisión de CO₂.