

Dinámica geomorfológica de la desembocadura del Arroyo Pando, Uruguay. Geografía histórica y SIG, análisis de tendencias naturales y efectos antrópicos sobre sistemas dinámicos.

Ofelia Gutiérrez, Daniel Panario
Universidad de la República - Uruguay

RESUMEN. La desembocadura de redes de drenaje en playas arenosas son ambientes muy dinámicos y particularmente sensibles a perturbaciones de origen antrópico; en el presente estudio de caso se analizan las relaciones entre las diversas intervenciones producidas, tanto a nivel de la cuenca del Arroyo Pando, Uruguay, como en las playas aledañas y las dunas costeras, y las modificaciones observadas a través de una serie de imágenes y cartografía digital, manejadas con un encare metodológico de geografía histórica y el moderno instrumental que se dispone a partir de los softwares de Sistemas de Información Geográfica. Con estas técnicas se analizan los impactos de diversas obras de infraestructura, forestación de dunas y extracción de áridos sobre el sistema, deslindándolos de los procesos inerciales del Holoceno tardío y de los atribuibles al cambio climático global.

Palabras clave: dinámica costera, erosión de playas, SIG

ABSTRACT. The outlet of rivers in sandy beaches is a very dynamic and particularly sensitive environment to human influences. In the present study, the relationships between the interventions and the observed coastal evolution are analyzed through an image series and digital cartography. Anthropogenic interventions have taken place at the stream basin level, and also on the beaches and coastal dunes. Images were handled with a historical geography approach and with the modern instrumental of Geographical Information Systems for the outlet of Pando Stream, Uruguay. These techniques point out the impacts of diverse infrastructure works, dunes afforestation and sand extraction, putting them away from the inertial processes from the late Holocene and others, attributable to the global climatic change.

Keywords: coastal dynamics, beach erosion, GIS

Recibido: 29 de septiembre de 2004.

Aceprado: 1 de septiembre de 2005.

Introducción

El Río de la Plata es el mayor estuario del mundo, su margen norte (Uruguay) presenta una extensa franja de playas arenosas, que pueden tipificarse como ambientes micromareales, conformando arcos entre salientes rocosas. Estas playas evolucionan de Oeste a Este de disipativas a reflectivas, presentando en general, al menos una barra sumergida.

Sobre esta franja costera uruguaya, compuesta mayoritariamente por playas y sistemas dunares, se han realizado fundamentalmente a partir de la década del año 1930, intervenciones cuyos efectos producen complejas interacciones con las tendencias naturales. En primer lugar, hay que hacer constar que fue forestada casi en su totalidad con especies exóticas fundamentalmente del género *Pinus*, y posteriormente se desarrollaron procesos de urbanización con fines recreativos o de vivienda permanente, a los que debe sumarse la extracción de arena para la construcción, y obras de infraestructura como costaneras, directamente sobre el cordón dunar o próximas al mismo. Concomitante con estas intervenciones, a partir de la década del año 1950, comenzaron a observarse en las playas crecientes procesos de deterioro, lo que indujo a la construcción de espigones en aquellas zonas más urbanizadas, como forma de recuperarlas. En la actualidad, la casi totalidad de las playas del estuario se encuentran sometidas a diversos procesos degradativos, lo que ha motivado un retroceso de la línea de costa, afectando vías de comunicación y viviendas.

Aislar las relaciones causales entre las intervenciones descritas y los procesos degradativos actualmente en curso, resulta particularmente difícil debido a los diferentes tiempos de relajación, que como resultado de distintas forzantes que presentan estos sistemas extremadamente dinámicos; los que además, son sometidos a fluctuaciones diurnas, estacionales, decadales y hasta centenales, a las que debe sumársele procesos evolutivos naturales y los complejos efectos del cambio global.

La presente investigación se desarrolla en un punto crítico del estuario medio, la desembocadura del Arroyo Pando, lugar donde una combinación de factores fluviales y marítimos, amenazan seriamente a Neptunia, una pequeña ciudad balneario próxima a Montevideo, la capital del país (Fig. 1).

El análisis de una problemática como la descrita, no parece posible sin la conjunción de técnicas de geografía histórica, con las modernas herramientas que proporcionan los Sistemas de Información Geográfica, tales como las aplicadas para el litoral NE de Haití (Menanteau *et al.*, 2002), la Ensenada de Bolonia en España (Alonso Villalobos *et al.*, 2003a) y la Bahía de Cádiz (Alonso Villalobos *et al.*, 2003b).

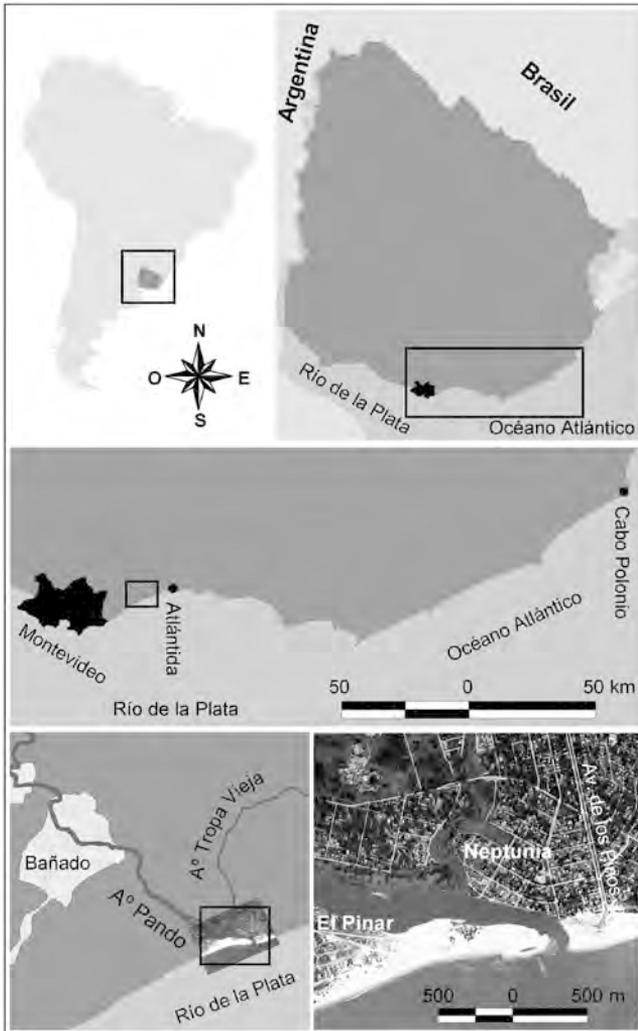


Figura 1. Ubicación del área de estudio, y de las referencias geográficas mencionadas en el texto.

Descripción

El Arroyo Pando cuenta con un área de cuenca de 974 km² y un caudal medio de 10,9 m³/s. En la margen Este de su desembocadura, recibe al Arroyo Trova Vieja con un área de cuenca de 78 km² y un caudal medio de 0,88 m³/s (Medina y Jackson, 1980), que drena las aguas de la Laguna del Cisne, pequeño espejo de agua formado por el represamiento del arroyo por dunas transgresivas durante el Holoceno superior.

La orientación general del Arroyo Pando desde sus nacientes es N-S, teniendo actualmente su último tramo una dirección WNW-ESE, sin que exista un control estructural que lo justifique. Su curso tiene un ancho máximo de 320 m a 1.200 metros de la desembocadura; sin embargo, en la desembocadura (Tabla I) alcanza 109 m (medidas realizadas sobre foto de mayo de 2002). Su boca ha variado, entre un máximo de 597 m (imagen SPOT XS del 2 de junio de 1990) y un mínimo de 22 m (sobre una foto oblicua con rectificación para la zona de interés, del 19 de mayo de 1937). Existiendo versiones de cierre de la boca, las que no han podido ser documentadas.

En el sector se pueden individualizar a ambos márgenes del arroyo, dos playas Neptunia y El Pinar:

- Neptunia, situada al E de la desembocadura, comprende un tramo del arco de playa de algo más de 200 m de ancho, en el tramo comprendido entre la desembocadura del Arroyo Pando y la Avenida de Los Pinos (ver Fig. 1). En la actualidad carece de cordón dunar o duna primaria, aunque a partir del verano del 2002-2003 al presente, se pudieron observar la aparición de incipientes estructuras eólicas constructivas más o menos efímeras (Fig. 2). Por detrás se encuentra la urbanización y en algunos casos existen defensas rígidas (Fig. 3).
- El Pinar, ubicada en la margen W, estructuralmente es una barra, conformando una playa de arena fina, que denota un claro dominio eólico en su origen. Presenta un cordón dunar discontinuo, y por detrás del mismo, existe un sistema complejo que incluye dunas y formas erosivas como *aeolians flat plains* y *blowout*.

Por delante de lo que es la ubicación predominante de la desembocadura, acorde a la serie histórica de información analizada, en el Río de la Plata existe un potente depósito arenoso que conforma un bajo fondo, con una estructura similar a la de un abanico aluvial; como se desprende de la observación de la refracción de las olas que pudo apreciarse en las fotos en las cuales el *swell* es dominante.

Antecedentes

A partir de observaciones realizadas en 1930, Legrand (1959) realizó una descripción botánica y una interpretación de los procesos geomorfológicos actuantes en la zona. Ese trabajo tiene la virtud de que su autor, desde la perspectiva de un naturalista, expresa en pocas líneas una comprensión integral de la dinámica de este sistema, cuando las intervenciones humanas aun no eran tan significativas. Su perspectiva permite una aproximación a la idea del funcionamiento prístino de la zona, la que reinterpretada a la luz de los conocimientos actuales, brinda algunas claves de cuales eran los procesos tendenciales a comienzos del siglo XX. Con posterioridad, el área también fue estudiada desde un punto de vista geomorfológico por Medina y Jackson (1980).

Tabla I. Información y fecha de la cartografía y vuelos aerofotográficos.

Cartografía				
Carta del Uruguay	Fecha	Fuente	Escala	Ancho (m) Desembocadura
Hoja La Unión IX-29	apoyo de campo 1928 (edición 1930)	SGM	1:50.000	60,9
Hoja Montevideo 24	edición 1933	SGM	1:200.000	*
Hoja El Pinar J-29-a	apoyo de campo mayo 1987 (edición noviembre 1988)	SGM	1:25.000	*
Hoja La Unión J-29	apoyo de campo junio 1984 (edición agosto 1984)	SGM	1:50.000	*

Aerofotografía e imagen satelital

Fecha	Característica	Fuente	Escala	Ancho (m) Desembocadura
1937, 19 de mayo	panorámica	FAU	--	21,5
1943, 14 de marzo	oblicua	SGM	1:40.000	268,7
1951, 22 de octubre	vertical	FAU	1:20.000	47,6
1960, 25 de octubre	vertical	FAU	1:20.000	289,5
1964, 14 de setiembre	vertical	FAU	1:20.000	131,4
1966, 27 de enero	vertical	SGM	1:20.000	93,5
1966, 26 de diciembre	vertical	SGM	1:20.000	43,5
1967, 13 de junio	vertical	SGM	1:40.000	70,9
1971, 26 de enero	vertical	FAU	1:10.000	178,4
1971, 26 de agosto	vertical	FAU	1:10.000	122,1
1975, 21 de enero	vertical	FAU	1:20.000	84,0
1976, 06 de febrero	vertical	FAU	1:10.000	184,0
1976, 17 de junio	vertical	FAU	1:20.000	125,8
1977, 13 de mayo	vertical	FAU	1:20.000	141,5
1978, 26 de abril	vertical	FAU	1:20.000	62,6
1980, 12 de enero	vertical	FAU	1:50.000	60,4
1980, 25 de mayo	vertical	FAU	1:20.000	216,7
1982, 13 de febrero	vertical	FAU	1:20.000	112,0
1982, 4 de diciembre	vertical	FAU	1:10.000	NR
1987, marzo	vertical	SGM	1:40.000	254,6
1990, 2 de junio	SPOT XS	-----	pixel 25 m	596,9
1994, mayo-junio	vertical	DINAMA	1:5.000	264,3
1995, 23 de octubre	vertical	FAU	1:10.000	105,6
1996, 22 de enero	vertical	FAU	1:5.000	197,3
1997, abril	vertical	DINAMA	1:5.000	439,4
1998, 1 de diciembre	vertical	CCG	pixel 0.75 m	117,5
1999, 16 de noviembre	vertical	FAU	1:20.000	187,2
2000, 25 de abril	vertical	FAU	1:10.000	NR
2000, 24 de noviembre	vertical	FAU	1:20.000	NR
2001, 21 de enero	vertical	FAU	1:20.000	NR
2001, 21 de noviembre	vertical	FAU	1:25.000	65,5
2002, marzo	vertical	DINAMA	--	*
2002, mayo	vertical	Pyke y Cia	pixel 0.20 m	159,9

* No se realizaron medidas sobre ellas.

Abreviaturas: FAU: Fuerza Aérea Uruguaya; DINAMA: Dirección de Medio Ambiente; SGM: Servicio Geográfico Militar; CCG: Comisión de Cambio Global; NR: no tiene recubrimiento de la desembocadura.



Figura 2. Durante el verano 2002-2003 incipientes estructuras eólicas constructivas (señaladas con la flecha negra) se desarrollaron ubicadas por delante de las defensas de la playa Neptunia (entre el Arroyo Pando y la Avenida de Los Pinos). En el actual estado del sistema su permanencia suele ser efímera. (Foto: Ing. Aelita Moreira).



Figura 3. En las fotos se presentan algunas vistas de las defensas rígidas (muros y piedras), por detrás se observa la urbanización. (Foto: Ing. Aelita Moreira).

Como se desprende de los archivos del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, existen una larga serie de iniciativas de intervenciones invasivas (de estilo en la época), como respuesta a las afectaciones que han provocado las migraciones de la desembocadura y la línea de costa (Dirección Nacional de Hidrografía, 1970, 1984, 1985, 1986); las que afortunadamente no fueron implementadas.

Recientemente otros trabajos (Dean, 1998; Grupo de Trabajo Interministerial - Neptunia, 1997; Saizar, 2000), continúan presentando propuestas de obras de ingeniería civil, sin tener tampoco en cuenta los resultados de las investigaciones de carácter científico anteriores, las cuales, reinterpretadas a la luz de los conocimientos actuales, brindan elementos de juicio suficientes para desaconsejar obras duras.

Materiales y métodos

Se realizó una revisión en la que se procuró acceder a la mayor cantidad de cartografía, imágenes aéreas y estudios anteriores de la zona, tanto en poder de privados como de públicos (Servicio de Sensores Remotos Aeroespaciales de la Fuerza Aérea, Servicio Geográfico Militar, Dirección Nacional de Hidrografía [Ministerio de Transporte y Obras Públicas], Dirección Nacional de Medio Ambiente [Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente]), archivos propios de la UNCIEP, así como un recubrimiento aerofotogramétrico tomado por encargo para el presente estudio (mayo de 2002).

Estas imágenes son de muy diferente calidad e incluyen, tomas verticales y oblicuas, en diferentes escalas y resoluciones. Se obtuvieron a partir de la digitalización de fotos papel por escaner de mesa, o de negativos digitalizados en escaner de alta resolución. A su vez, se rescató la información de fotos en papel, de las que únicamente se ha preservado un registro tomado con cámara digital, y también se utilizó una imagen Spot.

Debe destacarse que por fiables que puedan resultar los archivos (como el del Servicio de Sensores Aeroespaciales de la Fuerza Aérea), siempre se requiere analizar la congruencia de la fecha con lo observado en imágenes anteriores o posteriores, pues se ha verificado que los rollos fotográficos, pueden contener imágenes copiadas por contacto y por tanto, incluir fotos de otro año; y que tampoco los datos que aparecen en la propia toma son siempre fiables, en la medida que el calendario de la cámara pudo haberse detenido o atrasado, sin que ello aparezca en los metadatos que se conservan de la misión, cuando ellos están disponibles.

Utilizando *ArcView* 3.2a con la extensión *Image Analysis* 1.1a se procedió a referenciar en formato digital la hoja cartográfica “El Pinar J-29-a” (escala 1:25.000) del Servicio Geográfico Militar (proyección Gauss, meridiano de contacto 62G, *Datum*

Yacaré). Esta carta fue confeccionada sobre la base de fotos aéreas de marzo del año 1987 y apoyo de campo de mayo del mismo año.

Para la georreferenciación de las imágenes, se comenzó por la de marzo de 1987 (base de la cartografía), a partir de la cual, se buscaron puntos de referencia con la foto inmediata anterior de diciembre de 1984 (creándose una cobertura de puntos de georreferenciación, a partir de objetos más o menos persistentes a través de los años, como ser árboles, calles o trillos, construcciones y estructuras geomorfológicas). La secuencia de referenciación se hizo tomando siempre la imagen más próxima en el tiempo. Lo mismo se repite hacia el presente. Con esta metodología, se logró referenciar toda la serie de imágenes sobre la misma base cartográfica, minimizando de este modo las deformaciones y errores en términos comparativos entre las mismas. Las fotos verticales con cierto grado de deformación, fueron recortadas (independizando para su georreferenciación el recubrimiento de cada margen), formando luego mosaicos que permitieran alcanzar la precisión deseada. En todos los casos, se consiguió un error promedio aceptable para el tramo de costa analizado, excepto para la imagen SPOT y fotos de muy mala calidad u oblicuas, las que de todas formas permitieron tener una idea de las modificaciones que a lo largo del tiempo se produjeron en el sistema.

Comprobada la precisión de la georreferenciación (un error inferior a 6 metros en las zonas de interés) se procedió a la digitalización en pantalla de las líneas de costa siguiendo la línea de marea alta (según Shalowitz, 1964; Anders y Byrnes, 1991; Byrnes *et al.*, 1991 citados en Mc Bride *et al.*, 1995), utilizando una escala 1:3.000 para estandarizar el procedimiento.

La utilización de la línea de marea alta es de estilo, porque diferencias relativamente importantes entre mareas, producen un error mínimo en la traslación cartográfica horizontal de la línea de costa, dado que el segmento de playa entre el nivel medio del mar y la marea alta es el que presenta mayor pendiente en el perfil transversal de la misma. Además, es una estructura que siempre está visible en los registros, permitiendo una relativa estandarización del nivel del mar para la serie de fotos.

Sobre la línea de costa de mayo del año 2002, fueron dibujadas dos transectos perpendiculares, una sobre cada playa, que fungieran como límite externo, para entre ellas medir la evolución histórica de la costa. Para realizar estas medidas, en la línea de marea alta de mayo del 2002, se unieron ambas márgenes con una recta, a efectos de lograr una línea continua que permitiera intersectar entre los dos transectos perpendiculares, cada una de las líneas de costa. Posteriormente la superficie así comprendida fue convertida a polígono, y medida en hectáreas (Fig. 4). Estimándose la pérdida, medida como superficie, entre las diferentes ubicaciones que la línea de costa ha tenido entre el año 1928 y el año 2002. Como algunas de las fotos no cubrían la totalidad del área, frente a la observación de que hacia los transectos de los extremos Este y Oeste (que oficiaban de límite a estas medidas), las líneas de costa convergían

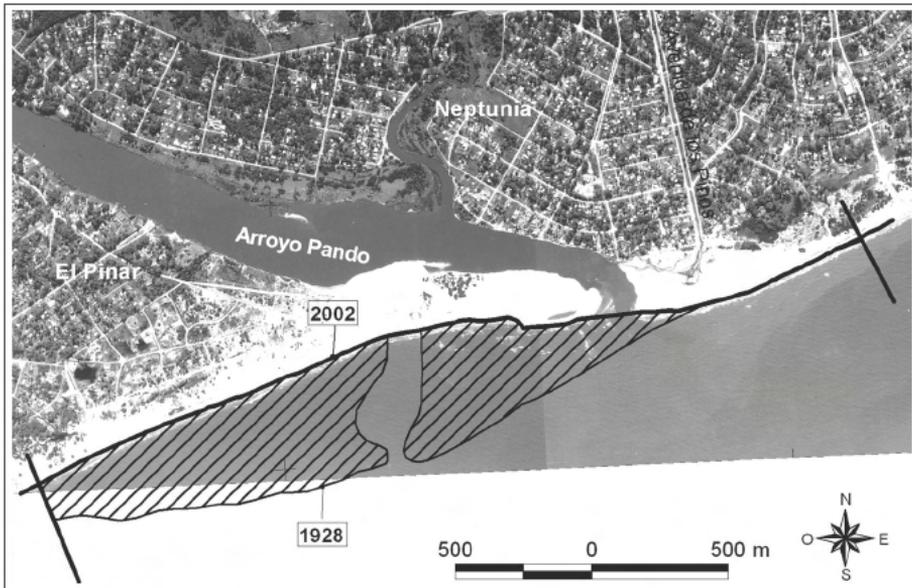


Figura 4. Sobre la foto de mayo del 2002, se observa la zona rayada que indica la pérdida de playa para el período 1928 - 2002. La línea negra gruesa señala la línea de marea alta de mayo de 2002 intersectada por los dos transectos perpendiculares utilizados para medir el retroceso. (Aerofotografía: Cor. Av. (R) Antonio Ruik - Pyke & Cia. S.A).

asintóticamente hacia una posición de la costa casi invariante, se procedió a reconstruir dicho trazado para aquellas vistas en las que no se disponía de la totalidad de la zona bajo análisis.

Se realizaron a su vez, dos levantamientos batimétricos (16/7/2002 y 19/11/2002), para determinar el trazado y características del canal del Arroyo Pando, mediante la utilización de un sonar de señal vertical (resolución de un pie) y un GPS (12 satélites). Los puntos así colectados fueron introducidos al SIG (tema de eventos) usando *ArcView 3.2a*, y con la extensión *Spatial Analyst* se realizó un TIN (Triangulated Irregular Network) de dicha cobertura, a efectos de determinar áreas de isoprofundidad. A su vez se tomaron muestras de sedimentos del canal para caracterizar su textura.

Resultados y discusión

Evolución costera

De la comparación de las imágenes y cartografía existente desde 1928 al presente, puede apreciarse un retroceso de 480 m de la línea de costa de la playa de El Pinar;

Tabla II. Perdida de superficie territorial debida al retroceso de la línea de costa, medida entre los años 1928 y 2002.

Períodos de medida	Ganancia/perdida entre período medida en Ha	Perdida acumulada en Ha	Indicador de velocidad de cambios para el período, estimado en Ha/año	Días por período	Años por período
1928 - 10/1951	-8,045	8,045	0,35	8509	23,3
10/1951 - 10/1960	-28,185	36,230	3,13	3288	9,0
10/1960 - 9/1964	-0,275	36,505	0,07	1419	3,9
9/1964 - 1/1966	-4,447	40,952	3,25	500	1,4
1/1966 - 12/1966	-0,318	41,270	0,35	333	0,9
12/1966 - 6/1967	-4,882	46,152	10,54	169	0,5
6/1967 - 8/1971	-2,342	48,494	0,56	1534	4,2
8/1971 - 1/1975	-5,132	53,626	1,51	1243	3,4
1/1975 - 2/1976	0,729	52,897	-0,70	381	1,0
2/1976 - 6/1976	-1,097	53,994	3,06	131	0,4
6/1976 - 5/1977	-0,481	54,475	0,53	330	0,9
5/1977 - 4/1978	-3,630	58,105	3,81	348	1,0
4/1978 - 1/1980	4,346	53,759	-2,53	626	1,7
1/1980 - 5/1980	-4,944	58,703	13,57	133	0,4
5/1980 - 2/1982	10,488	48,215	-6,09	629	1,7
2/1982 - 3/1987	-5,956	54,171	1,17	1855	5,1
3/1987 - 6/1990	-1,935	56,106	0,60	1174	3,2
6/1990 - 5-6/1994	-0,133	56,239	0,03	1458	4,0
5-6/1994 - 10/1995	1,163	55,076	-0,83	510	1,4
10/1995 - 1/1996	-2,957	58,033	11,86	91	0,2
1/1996 - 4/1997	-3,694	61,727	3,01	448	1,2
4/1997 - 12/1998	-0,277	62,004	0,17	595	1,6
12/1998 - 11/1999	-0,661	62,665	0,69	350	1,0
11/1999 - 5/2002	-5,718	68,383	2,29	910	2,5

Ganancia o perdida de territorio estimada a partir de las modificaciones de la posición de la línea de costa, medidas en hectáreas. Se toma como punto cero para medir este proceso, la ubicación de la línea de costa del año 1928. Más allá de las fluctuaciones, la componente es el retroceso.

aunque este retroceso se hace notorio y persistente a partir de 1950. Sin embargo la orientación del tramo inferior del Pando que entre 1928 y 1936 era N-S, ya en 1943 se había comenzado a desplazar contrariamente a lo que era dable esperar, hacia el Este, en dirección contraria a la deriva litoral predominante, la que a partir de Cabo Polonio es E-W. Los desplazamientos de la desembocadura hacia el Este, con posterioridad al 1937, comienzan quizá como efecto retardado del drenaje de un humedal (ver Fig. 1). El registro de las variaciones se muestran en la Tabla II, habiéndose perdido sesenta y ocho hectáreas (68,383 ha) en el transcurso del período 1928-2002, para un frente

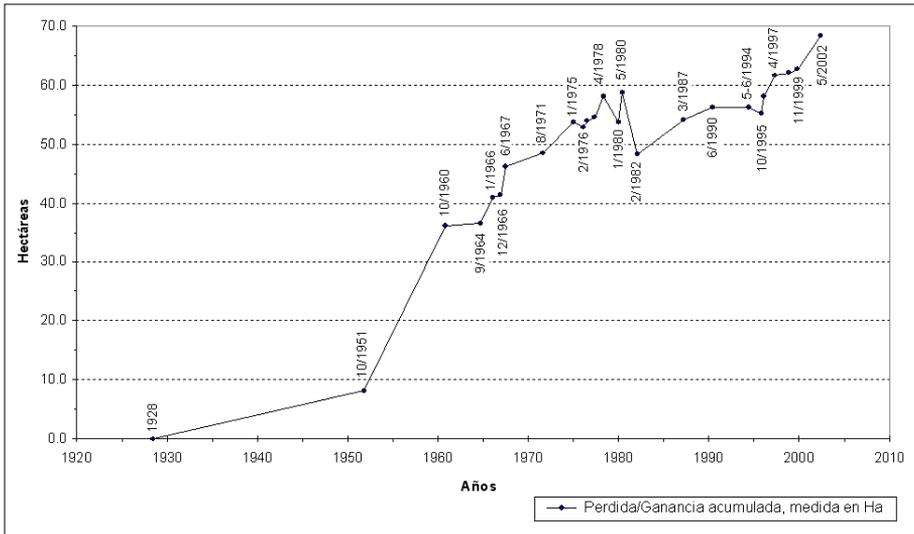


Figura 5. La curva acumulativa de pérdida de playa muestra un abrupto incremento a partir de la forestación de las dunas (entre 1951 y 1960); luego con algunas fluctuaciones menores, mantiene un ritmo relativamente constante hasta el presente.

de playa de 3.220 m de longitud. Lo que indicaría para dicho período, una pérdida de 21,24 ha/km, a una tasa de 0.3 ha/km/año. Sin embargo, si observamos dicha pérdida por períodos, esta fue de 0,35 ha/año entre 1928 y 1951, luego se acelera con un promedio de pérdida de 2,44 ha/año hasta 1967. Entre 1967 y 1978 desciende a 1,10 ha/año. Entre 1980 y 1982 se produce una recuperación del sistema que lo mantiene sin pérdidas significativas hasta 1995, y luego se acelera nuevamente entre 1995 y el 2002, con una tasa promedio de 2,03 ha/año (Fig. 5).

La explicación de estos cambios puede deberse a una serie de modificaciones que ha sufrido el sistema desde comienzos de la década de 1920, ninguna de las cuales puede aisladamente explicar los procesos observados; ellas son:

1) El Río de la Plata, entre 1902 y el 2000, ha ascendido en 9,3 cm su nivel medio, como consecuencia del aumento de caudales de sus tributarios, los ríos Paraná y Uruguay, y de cambios en el régimen de vientos (Forbes, 2003). Desde el punto de vista de la variación de la línea de costa, dado que no se observan retrocesos en todas las playas estudiadas (incluso en zonas cercanas), aunque no pueda descartarse algún efecto, claramente no es la forzante principal. Este aumento del nivel medio se produce por pulsaciones intensas y de corta duración, por tanto las playas tienen posibilidad de regenerarse entre pulsaciones sucesivas.

2) El Arroyo Pando, hasta comienzos de la década de 1920, desembocaba en un humedal de su mismo nombre, el que luego desaguaba, por el canal conocido como

Pando del Plata, en el Río de la Plata. Entre 1920 y 1925, el humedal fue canalizado y el arroyo represado para mantener la altura de la columna de agua.

Esta intervención provocó un cambio significativo en la hidrología del canal que perdió el poder regulador de un humedal de 900 ha, y por tanto pasó a ser dominado por las mareas, entre pulsaciones de crecidas producidas por precipitaciones torrenciales, lo que justificó que la desembocadura quedase a merced de la deriva, aunque ello no explica la migración de la flecha en dirección contraria a la deriva dominante.

3) Ya en las fotos aéreas de 1936 puede observarse una activa forestación; con especies exóticas de género *Pinus*, de los sistemas dunares en la costa del Río de la Plata, la que se torna notoria en la zona de estudio, a partir de 1943.

Dado que estas playas son caracterizables como de equilibrio dinámico, se requiere comprender el balance entre ingresos y egresos de sedimentos, a efectos de determinar el origen de los procesos degradativos.

Las fuentes de arena

En primera instancia, analizaremos las posibles fuentes de arena y los flujos que permiten la conformación de una playa, tal como puede observarse en el diagrama (Fig. 6).

Las fuentes posibles de arena pueden resumirse en: 1) las altas cuencas fluviales, 2) los campos de dunas y playas sumergidas durante la última transgresión marina (actual), 3) el reciclaje de cordones dunares por la acción combinada del viento y/o las olas durante las tormentas, 4) la recirculación de arena desde las dunas a los tramos finales de los ríos, y de estos al mar, 5) el desgaste de acantilados y puntas rocosas, y 6) la arena en tránsito entre playas más o menos contiguas.

1) *Las altas cuencas fluviales*. La arena proveniente de la misma, no es significativa en este caso, por quedar retenida en el vaso de la represa de El Pinar, y antes de la canalización del Arroyo Pando (a principios del Siglo XX) en el humedal. Además, aguas abajo de la represa, el Arroyo carece de competencia para transportar arena de playa, como lo demuestra el análisis textural de los sedimentos del lecho activo o canal (Tabla III).

2) *Los campos de dunas y playas sumergidas durante la última transgresión marina (actual)*. Este arco de playa, como la mayoría de los del Río de la Plata, presenta en su playa subacuática, luego de una estrecha franja de sedimentos arenosos disponibles, un piso consolidado de rocas sedimentarias (cenozoicas) y/o barros estuarinos, por tanto, no ingresan cantidades significativas de arena proveniente de la plataforma.

3) *El reciclaje de cordones dunares por la acción combinada del viento y/o las olas durante las tormentas*. La recirculación de arena entre el cordón dunar y la playa

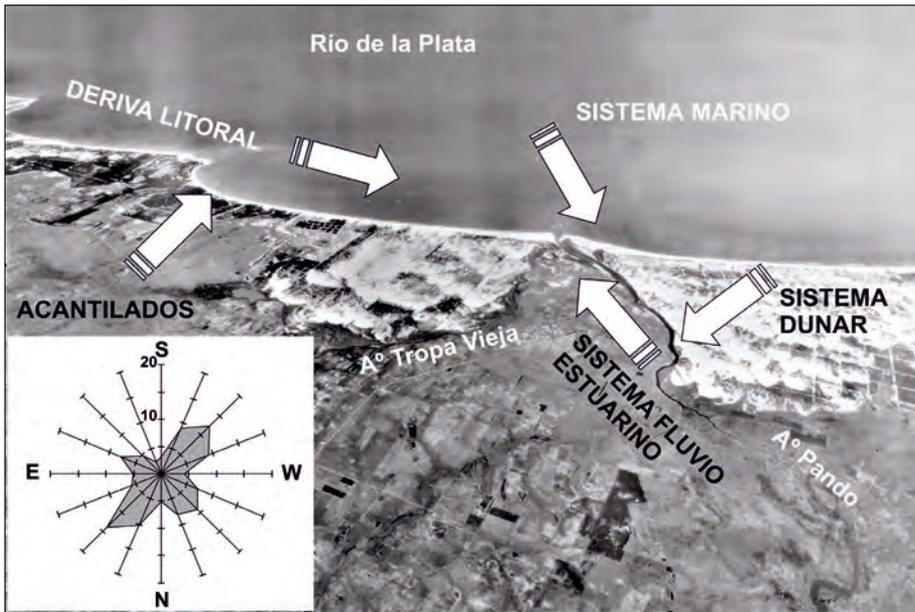


Figura 6. Diagrama de circulación de la arena. La Rosa de los Vientos fuertes indica aquellos con capacidad de movilizarla. Foto oblicua del vuelo Trimetrogón del 14 de marzo de 1943. (Aerofotografía: Servicio Geográfico Militar, Uruguay).

Tabla III. Análisis de los sedimentos del fondo del canal del Arroyo Pando.											
% en peso de las diferentes fracciones											
ARENA					LIMO						
2-1 mm	1-0,5 mm	0,5-0,25 mm	0,25-0,1 mm	0,1-0,05 mm	50-20 μ	20-2 μ	Arena total	Limo total	Arcilla > 2 μ	Clase Textural	
--	0,4	5,2	47,0	10,2	5,6	6,1	62,8	11,7	25,5	FAcAr	

Análisis realizado por el método de la pipeta (Robinson, 1922 en Soil Conservation Service, 1972) realizado por el Laboratorio de Física de Suelos de la Dirección de Suelos y Aguas, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Uruguay.

durante los eventos de tormenta, es significativa donde aún estos están más conservados, pero diversas intervenciones han tendido a dañarlos.

4) *La recirculación de arena desde las dunas a los tramos finales de los ríos, y de estos al mar.* Al igual que la anterior constituye una fuente importante de sedimentos para el mantenimiento de la línea de costa. La recirculación entre los médanos y las redes de drenaje en su tramo final, ha sido la primera en ser impactada al fijarse las dunas con forestación exótica (De Álava y Panario, 1996; Panario y Gutiérrez, 2005), y como consecuencia de ello se desencadenaron una serie de intervenciones pretendidamente correctivas, pero que funcionaron generando nuevos impactos (los que se describirán más adelante).

Como puede observarse en la Rosa de los Vientos (ver Fig. 6), los vientos fuertes del cuadrante SW, impulsaban arena hacia el Arroyo Pando, en un frente de 2.400 m (medida a escala 1:25.000) desde el campo de dunas de El Pinar, y en un frente en el entorno de 1.000 m, desde la barra de arena ubicada al W de dicho Arroyo. Considerando que la resultante calculada para Uruguay, por metro y por año del transporte de arena en dirección noreste es del orden de 40 m³/m/año (Panario y Piñeiro, 1997), se puede estimar que se aportaba al Arroyo, desde los campos dunares cercanos, un volumen en el entorno de los 136.000 m³/año. Este proceso, producía un estrechamiento del cauce (evidenciable en las primeras fotos de las que se tiene registro) con el consiguiente incremento de la velocidad del flujo en el mismo, y por lo tanto, se producía el retransporte de la arena hacia el mar durante las crecientes pluviales. Este transporte al pasar del tiempo, fue interrumpiéndose por la forestación y urbanización de la zona. Del total, hoy resta lo aportado exclusivamente en el tramo de la barra, con una longitud modal estimada en 800 m, con un aporte máximo estimado en 32.000 m³/año.

5) *El desgaste de acantilados y puntas rocosas.* Este aporte, es difícil de estimar. En el cercano Balneario de Atlántida (11 km al E), que presenta un importante acantilado con una playa de arena por delante, la forestación y posterior urbanización a montante de la deriva, produjo sus efectos. Ante la constatación de que se estaba produciendo una severa erosión de su playa, se impulsó la construcción de espigones a partir del año 1970; sin embargo, su instalación, contribuyó a acelerar el proceso, y a partir del penúltimo espigón construido, por efecto de las pérdidas que generan las corrientes de retorno que producen su presencia, el acantilado sedimentario (cuaternario) de 7 m de altura ha tenido un retroceso de más de 11 m, entre 1985 y el 2003 (Fig. 7). Se desconoce la propagación de ese efecto hacia Neptunia, y por tanto es muy difícil estimar los volúmenes de arena incorporados por él. Puede estimarse que los volúmenes de arena son importantes, y han contribuido significativamente en el mantenimiento del ancho de la playa al Este del Balneario de Neptunia, sin embargo no han resultado suficientes para producir el mismo efecto a la altura de la desembocadura del Arroyo Pando.

6) *La arena en tránsito entre playas más o menos contiguas.* La arena en tránsito entre playas más o menos contiguas, está dominada por la componente W de la deriva, y puede estimarse -de no mediar falta de sedimentos en tránsito- en un orden de magnitud de las decenas de miles de metros cúbicos por año (MTOP/PNUD/UNESCO, 1979; IMFIA, 1998).

Evolución de la desembocadura del Arroyo Pando

El tramo final de la desembocadura del Arroyo Pando en sus aproximadamente últimos 1.000 m, giró en sentido antihorario más de 80 grados en dirección Este, entre



Figura 7. Vista panorámica de parte del arco de playa que se extiende entre el Balneario Atlántida y la desembocadura del Arroyo Pando. Pueden observarse los procesos de erosión de barranca, indicado por la distancia existente entre la cabeza del espigón y la misma, a su vez se ha producido el descalce del espigón por falta de suficiente arena circulante por deriva litoral. (Foto: Dr. Augusto Pérez Alberti).

el año 1937 y el 2002. La causa de este giro y su dirección obedece a fenómenos complejos, algunos vinculados a procesos naturales que responden a inercias del pasado reciente, y otros a modificaciones antrópicas como las anteriormente referidas. Entre las primeras habremos de resaltar el transporte eólico de arena; en efecto, Legrand (1959) en 1930 pudo observar la existencia de dos sistemas dunares, uno de ellos, bien evolucionado ubicado al Norte de El Pinar, que acorde a nuestras observaciones forma parte de los grandes campos de dunas de toda la costa uruguaya, y cuya formación se habría dado durante el Holoceno, en un período árido y cálido ocurrido desde al menos el 3.800 B.P. hasta el 2.000 B.P. (Bracco *et al.*, 2004).

El otro sistema observado por Legrand, era un nuevo campo dunar, conformado con arena proveniente de la playa actual, y que ya en 1943, había cubierto un humedal existente en la margen Este del Arroyo (aun visible en la imagen de 1937). La huella de su estructura es aun observable en la actualidad bajo una capa de arena de espesor variable. La presión ejercida sobre la margen Oeste por estos volúmenes de arena que ingresaban al cauce, pueden haber disparado el proceso de migración del canal, y sin embargo este cambio no hubiera sido tan notorio de no existir la desecación del humedal principal. Este último fue formado por la colmatación de una laguna litoral (que data presumiblemente de la transgresión del Hipsitermal, ubicada según Martín y Suguio [1992] en el 5.200 B.P.) en la que desembocaba el curso fluvial.

La desecación del humedal hizo perder regularidad al flujo del arroyo, por lo cual comenzaron a formarse en la desembocadura dos barras arenosas con direcciones opuestas, respondiendo a direcciones también contrarias de la deriva, debidas a

que la altura del nivel del mar difiere según la dirección del viento. En efecto, cuando la deriva es hacia el Este, respondiendo a vientos del Sur o SW, la barra que se proyecta a partir de la margen Oeste, avanza en dirección Este, con un perfil transversal de mayor pendiente y conformando una playa más angosta. El *swell*, luego reconstruye una segunda barra desde la margen Este, en dirección Oeste, por delante de la anterior, de menor altura y pendiente, obligando al arroyo a generar un meandro en la propia playa (Fig. 8).

El aporte de arena eólica recirculada por el arroyo hacia el mar, genera un bajo fondo frente al punto en que la desembocadura se ubica con mayor frecuencia, equivalente a un abanico aluvial subacuático, que al refractar los trenes de olas refuerza la deriva hacia el Este en un corto tramo próximo a la desembocadura, lo que en conjunto con la migración natural del meandro por erosión en su concavidad, provoca migraciones de la barra que han tenido hasta un kilómetro de extensión hacia el Este.

En las condiciones descritas, las olas de tormenta que superan la barra, construirán hacia el interior del arroyo un perfil de avalancha con tendencia a trasladarse hacia el continente. Esta tendencia sólo la puede contrarrestar la existencia de robustos cordones dunares que durante el período primavera-verano, aportaban arena desde la costa opuesta, por ser también inversa la dirección de los vientos dominantes durante el período.

Evolución de las playas

En la década de 1940, comenzó la forestación con eucaliptos y pinos de *Neptunia*, la que alcanzó hasta el propio cordón dunar. Los árboles de alto porte producen un reparo a barlovento lo que redundó en que la arena de la playa deje de alcanzar la duna. Cuando la playa es suficientemente ancha, se pueden formar nuevos cordones por delante, los que en la medida en que los árboles crecen, se irán corriendo hacia el mar generando un nuevo espacio, que también fue forestado. Este proceso redundó en que se programara urbanizar lo que con anterioridad era playa. Al alcanzar las olas un cordón forestado, las raíces de los árboles mantienen la verticalidad del corte producido, y con ello un cambio en la dinámica, con un retroceso acelerado del cordón, vinculado a la poca coherencia de las arenas de la duna. Esto facilita el traslado de la barra hacia el continente, afectando rápidamente, en una primera instancia la zona con urbanización proyectada, y luego la efectivamente realizada (Fig. 9).

A comienzos de la década de 1990, se autorizó la extracción de arena de las dunas ubicadas en la zona de la barra, la cual se realizó en algunos sitios hasta el nivel de la freática. La disminución de la rugosidad del terreno así generada, provocó una aceleración del transporte eólico hacia el interior del arroyo en un estrecho corredor. La arena así transportada provocó una protuberancia en la cara interior de la barra, que empujó el canal del arroyo hacia la margen noreste, como se desprende de la bati-

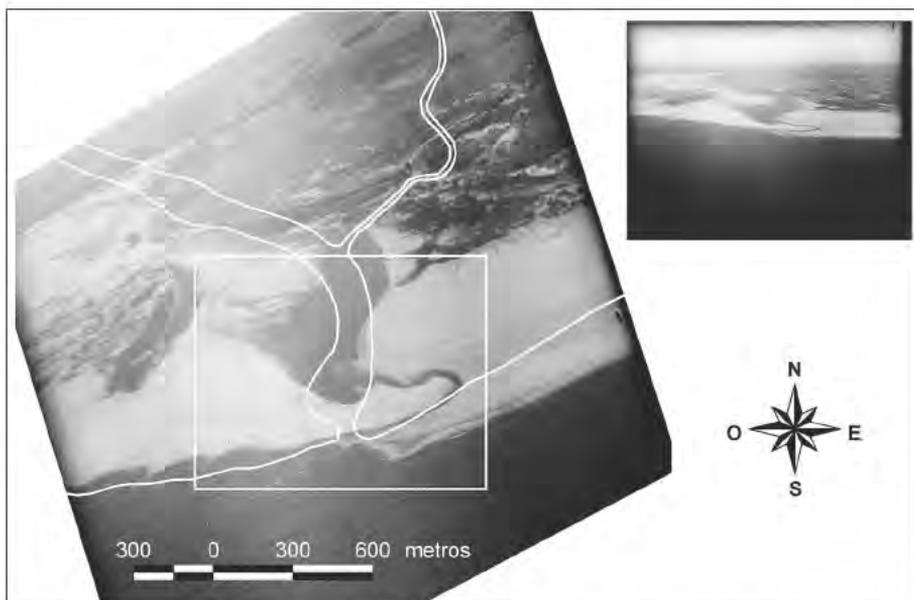


Figura 8. En la esquina superior derecha se reproduce una foto panorámica de mayo de 1937 de la desembocadura del Arroyo Pando. A la izquierda sobre la misma imagen, el rectángulo blanco indica la zona para la cual se ha logrado una razonable aproximación de georreferenciación y rectificación, tal como se desprende en la comparación con la línea de costa digitalizada a partir de la cartografía del año 1928 del Servicio Geográfico Militar (escala 1/50.000). Obsérvese como para el año 1937, comenzaban los procesos que dieron lugar a la migración de la barra hacia el este. (Aerofotografía: Servicio de Sensores Remotos de la Fuerza Aérea Uruguaya).

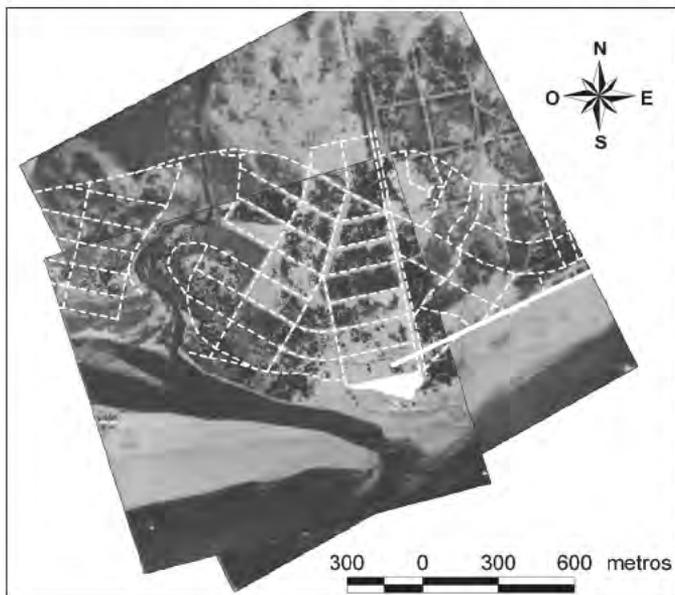


Figura 9. Por encima de la foto del 22 de octubre de 1951 (escala 1:20.000), en la que puede observarse la ubicación original del cordón dunar (señalado en trazo grueso blanco), se despliega la foto del 25 de octubre de 1960 (escala 1:20.000), en la que se había forestado en la propia playa. En línea punteada blanca se indica la urbanización realizada; la manzana más próxima al mar (en blanco) ya ha desaparecido, así como parte de la calle de la manzana siguiente y la rambla costanera del arroyo. (Aerofotografías: Servicio de Sensores Remotos de la Fuerza Aérea Uruguaya).

metría realizada. La proximidad del canal aumenta la energía de las olas en el interior del arroyo y el césped de los solares condiciona el mantenimiento de la verticalidad del perfil erosivo, con lo cual las pequeñas olas generadas al interior del arroyo son suficientes para producir un retroceso de esa margen de hasta 50 cm en una sola tormenta, habiendo derribado algunas casas de la costanera.

En resumen, del análisis de estos datos se desprende, que hubo un período de fuerte crecimiento de la erosión a partir de 1951 (ver Fig. 5 y Tabla II), cuando se comienza a notar fuertemente el efecto de la forestación y fijación de dunas. Entre los años 1980 y 1982 hubo un fuerte avance (recuperación), que si bien coincide con un evento de El Niño fuerte (Severov *et al.*, 2004), no existen elementos suficientes que indiquen causalidad. A partir de 1982, comienzan las migraciones frecuentes de la desembocadura, que podrían relacionarse sobre todo con el déficit de arena que podría sufrir el arco de playa ubicado al Este, por efecto de la construcción de espigones, que se completaron a comienzos de esa década. A partir del año 1995 comienza otro fuerte retroceso atribuible al menos en parte a la extracción de arena de la barra y procesos asociados (*blowout*). A partir de esa época, el proceso volvió a tener la misma intensidad (velocidad de pérdida de playa) que se aproxima a la del período de máxima pérdida (1951-1967), lo que torna relativamente predecible la evolución futura, si no se realizan trabajos tendientes a la mitigación de los impactos referidos.

Conclusiones

Las modificaciones que se producen en ambientes de alta complejidad como las desembocaduras de redes de drenaje en playas arenosas, responden a factores inerciales fruto de modificaciones de un pasado más o menos remoto, y a intervenciones humanas de períodos históricos. Si bien aún resulta difícil cuantificar los efectos de cada factor aisladamente, un análisis como el propuesto en este estudio de caso permite al menos determinar cuales procesos han condicionado la evolución del sistema. A su vez, los efectos de una intervención pueden sentirse muchos años después de producida, sin embargo en el caso de estudio, la mayoría de las intervenciones propagaron sus efectos con relativa rapidez, diferenciándose de los efectos inerciales.

Tanto el conocimiento de las tendencias de largo plazo, como de las respuestas a intervenciones más o menos recientes, resultan claves a los efectos de proponer medidas de mitigación o corrección de tendencias, las que al presente han comenzado a implementarse.

Agradecimientos

Al Dr. Augusto Pérez Alberti por sus sugerencias, lectura crítica y estímulo para comunicar estos resultados.

Bibliografía

- Alonso Villalobos, C.; Gracia Prieto, F. J.; Ménanteau, L.; Ojeda Calvo, R.; Benavente González, J.; Martínez del Pozo, J. A. (2003a): “Paléogéographie de l'anse de Bolonia (Tarifa, Espagne) à l'époque romaine”. En *Dynamiques des zones humides et mobilité des lignes de rivage/Swamp Areas and Seashores Dynamics*. Elsevier SAS, pp. 405-415.
- Alonso Villalobos, C.; Gracia Prieto, F. J.; Ménanteau, L. (2003b): “Las salinas de la Bahía de Cádiz durante la Antigüedad: visión geoarqueológica de un problema histórico”. *Rev. Prehistoria y Arqueología Univ. Sevilla*, Nº 12. pp. 317-332.
- Bracco, R.; del Puerto, L.; Inda, H.; Castiñeira, C. (2004): “Middle-late Holocene cultural and environmental dynamics in the east of Uruguay”. *Quaternary International*. (En prensa).
- De Álava, D.; Panario, D. (1996): “La Costa Atlántica: ecosistemas perdidos y el nacimiento de un monte de pinos y acacias”. *Almanaque Banco de Seguros del Estado*. Montevideo, pp. 44-51.
- Dean, R. G. (1998): *Estabilización de la margen norte del Arroyo Pando. Informe Final*. Estudio de consultoría dirigido a Dirección Nacional de Hidrografía. Montevideo, Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2 de mayo. 14 p. y apéndices.
- Dirección Nacional de Hidrografía. (1970): *Anteproyecto obras de regulación de la desembocadura del Arroyo Pando (según relevamiento del Agrimensor B. S. Castillo)*. Montevideo, Ministerio de Transporte y Obras Públicas, Mayo. Plano H7337.
- Dirección Nacional de Hidrografía. (1984): *Arroyo Pando proyecto para la protección de la margen izquierda de su desembocadura*. Montevideo, Ministerio de Transporte y Obras Públicas, Junio. Plano H9085. (Código 610.88).
- Dirección Nacional de Hidrografía. (1985): *Apertura de nueva desembocadura y defensas de la costa del Balneario Neptunia. Escala 1:10.000*. Montevideo, Ministerio de Transporte y Obras Públicas, Mayo. Plano H9173. (Código A610.50.88).
- Dirección Nacional de Hidrografía. (1986): *Plano de mensura de un fraccionamiento de terreno para nueva desembocadura del Arroyo Pando*. Montevideo, Ministerio de Transporte y Obras Públicas, Mayo. Plano H9270. (Código 610.08).
- IMFIA. (1998): *Estudio de las Obras de Navegación en el A° Cufre y sus impactos sobre la Zona Costera*. Abril. Montevideo, Facultad de Ingeniería. Universidad de la República.
- Forbes, E. (2003): “Variabilidad del Nivel Medio del Mar en Montevideo entre 1902 y 2000”. *AIACC Workshop on the Río de la Plata*, Montevideo, setiembre, 2002.
- Grupo de Trabajo Interministerial - Neptunia. (1997): *Problemática de erosión e inundación en fraccionamientos en la margen izquierda del Arroyo Pando - Neptunia. Informe Final*. Montevideo. 22 de setiembre. 10 p. y figuras.
- Legrand, C. D. (1959): “Comunidades psamófilas de la región de Carrasco (Uruguay)”. *Anales del Museo de Historia Natural de Montevideo*. 2da. Serie, Vol. 7, Nº 7, 64 p. y láminas.
- Martín, L.; Suguio, K. (1992): “Variation of coastal dynamic during the last 7000 years recorded in beach – ridge plains associated whit river mouths: example from central Brazilian coast”. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 99, pp. 119-140.

- McBride, R.; Byrnes, M.R.; Hiland, M. W. (1995): "Geomorphic response-type model for barrier coastlines: a regional perspective". *Marine Geology*, 126, pp. 143-159.
- Medina, L.; Jackson, J. M. (1980): *Estudio de la erosión en la costa del Balneario Neptunia y de la inestabilidad de la desembocadura del Arroyo Pando. Informe*. Proyecto Conservación y Mejora de Playas. Montevideo, Ministerio de Transporte y Obras Públicas, Enero. 24 p. y anexos.
- Ménanteau, L.; Thomas, Y.-F.; Vanney, J.-R. (2002): "La télédétection spatiale du littoral Nord-Est d'Haïti: comparaison avec les cartographies ancienne et actuelle". En *124^e Congrès des Sociétés Historiques et Scientifiques, Nantes, 19-26 avril 1999. La défense des côtes et cartographie historique*, pp. 289-307.
- MTOP/PNUD/UNESCO. (1979): *Conservación y mejora de playas - URU 73.007*. Montevideo. 593 pp.
- Panario, D.; Gutiérrez, O. (2005): "La vegetación en la evolución de playas arenosas. El caso de la costa uruguaya". *Ecosistemas, Revista de la Asociación Española de Ecología Terrestre*. XIV(2), mayo - agosto www.revistaecosistemas.net.
- Panario, D.; Piñeiro, G. (1997): "Vulnerability of oceanic dune systems under wind pattern change scenarios in Uruguay". *Climate Research*, 9(1-2), pp. 67-72.
- Saizar, A. (2000): *Erosión de la margen izquierda en la desembocadura del Arroyo Pando. Informe Técnico. Documento borrador para discusión*. Montevideo, EcoPlata. Junio. 12 p.
- Severov, D. N.; Mordecki, E.; Pshennikov, V. A. (2004): "SST anomaly variability in Southwestern Atlantic and El Niño/Southern oscillation". *Advances in Space Research*, 33, pp 343-347.
- Soil Conservation Service. (1972): *Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soils samples*. Washington, Soil Surv. Report, USDA.