



Evolución histórica y actual de la línea de costa en la playa de Somo (Cantabria), mediante el empleo de la fotogrametría aérea y escáner láser terrestre

Historical and current evolution of the coastline on the beach of Somo (Cantabria), by using aerial photogrammetry and terrestrial laser scanning

Sanjosé, J.J. de⁽¹⁾; Serrano, E.⁽²⁾; Berenguer, F.⁽³⁾; González-Trueba, J.J.⁽⁴⁾; Gómez-Lende, M.⁽⁵⁾; González-García, M.⁽⁵⁾; Guerrero-Castro, M.⁽¹⁾

(1) Escuela Politécnica, Universidad de Extremadura. Avenida de la Universidad s/n, 10003, Cáceres, España. jjblasco@unex.es

(2) Departamento de Geografía, Universidad de Valladolid. Paseo del Prado de la Magdalena s/n, 47011, Valladolid, España.

(3) Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica San Antonio de Murcia. Los Jerónimos s/n, 30107, Guadalupe, España.

(4) Departamento de Estudios Culturales Hispánicos, Centro Universitario Internacional, CIESE - Fundación Comillas, Universidad de Cantabria. Avda. de la Universidad Pontificia s/n, 39520, Comillas, España.

(5) Grupo PANGEA, Universidad de Valladolid. Paseo del Prado de la Magdalena s/n, 47011, Valladolid, España.

Resumen

Los trabajos topográficos llevados a cabo en la playa de Somo en el periodo 1988-1993 mostraban ligeros cambios en la línea de costa. Para constatar estos cambios se ha estudiado el periodo 2001-2010 mediante fotogrametría aérea, y desde el año 2011 se realizan dos mediciones anuales (otoño, primavera) con escáner láser terrestre (TLS). Se ha seleccionado una porción de 400 metros en la playa de Somo, para hacer coincidir las mediciones actuales con las realizadas en el periodo 1988-1993 y 2001-2010.

Para realizar este estudio se ha utilizado instrumentación geomática (GNSS, estación total, TLS y fotogrametría aérea), y los resultados obtenidos han permitido establecer dos grupos de periodos con comportamientos netamente diferentes. Un grupo donde no hay casi retroceso de la línea de costa arenosa: 1988-1993, 2001-2013 y otro grupo de retroceso acentuado: 1994-2000 y 2014. El periodo 1994-2000 está en fase de investigación. En el año 2014, se registraron continuos temporales de grandes olas (mayores a 5 m) y mareas vivas que provocaron retrocesos de mayor rango en la línea de costa.

Palabras clave: Evolución costera; técnicas geomáticas; Somo; Cantabria.



Abstract

The topographical surveys performed on the Somo beach (Cantabria) during the years 1988-1993 showed slight changes in the coastline. To validate those changes the period 2001-2010 has been analyzed by means of aerial photogrammetry, and from 2011 through two measurement campaigns per year (autumn, spring), applying terrestrial laser scanning (TLS). A portion of 400 m long in the Somo beach has been selected for this work, coinciding with the profiles 1988-1993 and 2001-2010.

The use of geomatic techniques (GNSS, total station, TLS and aerial photogrammetry) has made it possible to establish two temporal types of beach behavior. Periods characterized by moderate erosion and slow retreat of the sandy coastline: 1988-1993, 2001-2013, and stages of quick sandy coastline retreat: 1994-2000 and 2014. The period 1994-2000 is being studied. Continuous storms in 2014, with big waves (5 m above-average) and high tides, generated major erosion and retreat in the sandy coastline.

Key words: Coastal evolution; geomatics techniques; Somo; Cantabria.

1. Introducción

El litoral de Cantabria se caracteriza por el dominio de una costa acantilada interrumpida por estuarios y bahías, y sólo en algunas ocasiones, ensenadas y sistemas de playas y dunas. Presenta una morfología muy entrecortada, en la que dominan los acantilados, que ocupan el 77,5% del frente litoral, y las playas, que representan el 22,5% de la costa (González-Amuchastegui *et al.*, 2005).

Las playas más extensas son puntas y flechas asociadas a los estuarios, como El Puntal de Somo (Figura 1), así como amplias ensenadas con playas limitadas por acantilados, como en el caso de la playa de Gerra. Los mayores arenales y playas se asocian a los estuarios y desembocaduras de los ríos, como sucede en Somo, playa ubicada en la parte exterior de la desembocadura del río Miera, denominada ría de Cubas.



Figura 1: Localización de la zona de estudio en la playa del Puntal-Somo-Loredo. En el recuadro rojo se indica la zona estudiada (Ortofotografía-2005 del Servicio de Cartografía de la CCAA de Cantabria).

Figure 1: Study area located in the Puntal-Somo-Loredo beach. The red box indicates the study area (Ortofotografía-2005 Cartography Service of CCAA Cantabria).

El interés del estudio de las costas acantiladas sobre playas y los sistemas de dunas se centra en el hecho de ser la primera línea de defensa frente a las mareas, tormentas de ola y corrientes, generando un ámbito muy cambiante donde se concentran actividades de ocio.

Los procesos que intervienen en el funcionamiento y la formación de acantilados sobre materiales blandos y dunas costeras son bien conocidos (Bird, 2008), si bien los resultados de dichos procesos varían en función de diferentes parámetros como la antropización del medio (ocupación del suelo, dragados, cambios en los prismas de mareas) y el ambiente (estuarino, mar abierto).

Nuestros estudios para conocer la dinámica costera en Cantabria comenzaron en el año 1988, dentro de un convenio de colaboración entre el Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente y el Departamento de Ingeniería Geográfica y Técnicas de Expresión Gráfica, ambos de la Universidad de Cantabria (Sanjosé, 1989). Pasados los años, se comprueba a simple vista que la playa de Somo (zona de las Quebrantas) ha sufrido un gran retroceso, visible en determinadas referencias, como los afloramientos del sustrato rocoso (Figura 2). A partir de esta impresión visual, en el

año 2011 se reinició el control del retroceso de la línea de costa en la playa de Somo (zona de Las Quebrantas) para apoyar numéricamente el retroceso costero. La evolución de la zona de las Quebrantas no es extrapolable a toda la playa del puntal, ya que para analizar la evolución de toda la playa debe realizarse cartografía a partir de fotografías aéreas históricas y compararlas con cartografías actuales.

El objetivo de esta investigación es la determinación de la magnitud del retroceso de la línea de costa en la playa de Somo (zona de las Quebrantas), conocer qué provoca este retroceso, y determinar el grado de fiabilidad de las técnicas geomáticas para el seguimiento de la línea de costa.

2. Entorno geográfico

En la zona central de la costa de Cantabria, en el margen oriental de la Bahía de Santander, se extiende un amplio tramo de costa arenosa a favor de la bien definida flecha-barrera de El Puntal de Somo, de disposición este-oeste (Figura 1). La bahía de Santander ocupa una depresión diapírica desarrollada sobre yesos y arcillas de edad triásica, y limitada por fracturas de dirección NE-SW, donde apenas

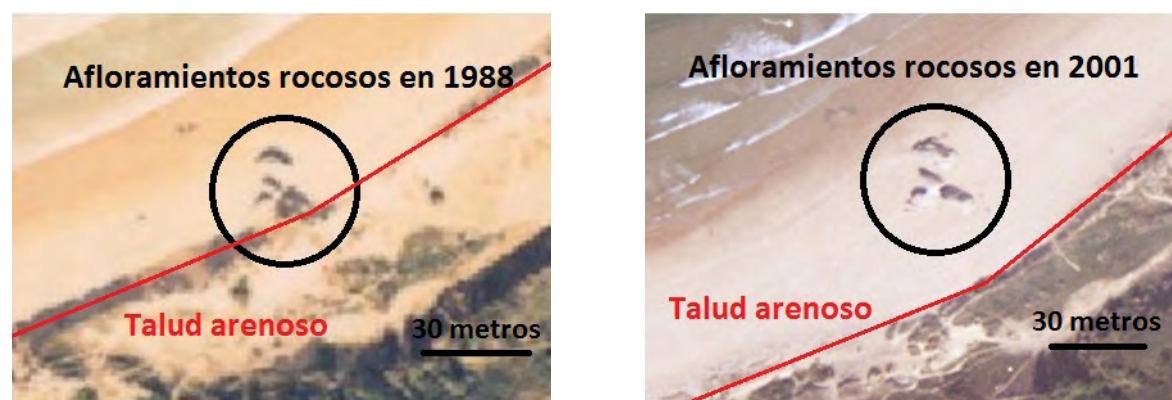


Figura 2: Fotografías aéreas de la zona de estudio de Las Quebrantas (playa de Somo) tomadas en los años 1988 y 2001. El retroceso costero se puede observar a partir de la línea roja que representa el talud arenoso con respecto a los afloramientos rocosos diseminados.

Figure 2: Aerial photographs of Las Quebrantas zone (Somo beach) taken in 1988 and 2001. The coastal retreat can be observed from the red line representing, the shoreline with respect to rocky outcrops.

afloran materiales triásicos en la actualidad (básicamente en las inmediaciones de la ría de San Salvador).

La barrera de El Puntal forma parte del complejo estuarino de la Bahía de Santander, concretamente del subsistema estuarino de la ría de Cubas, donde desembocan los ríos Miera y Aguanaz (Dantín, 1917; Cendrero *et al.*, 1981). Se trata de un sistema de playa/duna de arena de grano medio (Martínez-Cedrún *et al.*, 2014), que se extiende desde Las Quebrantas hasta Punta Rabiosa, formando una barrera confinante del sistema estuarino en forma de punta de flecha (Flor-Blanco *et al.*, 2012), generada desde el siglo XVII de modo muy rápido (Hernández-Pacheco y Asensio-Amor, 1962). El complejo arenoso culmina en dos cordones dunares diferenciados: por un lado, el cordón septentrional extendido en la playa expuesta y generado por los vientos de procedencia NO y NE; y por otro el cordón meridional abierto a favor de una playa estuarina con sedimentación de componente SE (Flor-Blanco *et al.*, 2012). La barra arenosa tiene 3 km de longitud, enlaza la ensenada con los arenales dunares de Somo-Quebrantas, y continúa como playa arenosa y sistema dunar hasta la playa de Loredo, conformando cerca de 5 km de longitud. Ambos sectores son consecuencia de la divergencia que, por refracción en la zona de Las Quebrantas, sufre el oleaje dominante del NO, dividiéndose longitudinalmente hacia Punta Rabiosa, por un lado; y por otro, hacia oriente en el entorno de Loredo (Díaz de Terán, 1976; Flor-Blanco *et al.*, 2012). La parte intermareal muestra dos comportamientos diferenciados, por un lado en la porción de playa predominan los procesos de erosión en condiciones de temporal y de acreción en fases de calma, mientras que en la zona de El Puntal domina la dinámica contraria (Losada *et al.*, 1991). Además de la sedimentación causada por la pérdida de energía de las corrientes marinas E-O, consecuencia de su encuentro con las corrientes

fluviales N-S procedentes de la ría de Cubas, se produce una recirculación de las corrientes que favorecen la sedimentación y el crecimiento de Punta Rabiosa en dirección W. Estudios de erosión en la bahía y su entorno han mostrado que Loredo es la playa con mayor número de episodios erosivos en la zona del Puntal-Somo-Loredo debido a su mayor exposición a los temporales marinos (Losada *et al.*, 1991).

En conjunto se trata de un sistema morfodinámico muy intervenido por el hombre que ha perdido aproximadamente el 50% de su superficie original postflandriense (Cendrero *et al.*, 1981; Flor y Flor-Blanco, 2005), dragándose el canal frecuentemente para permitir el paso de grandes embarcaciones. En la actualidad, la dinámica marina está provocando la erosión del frente del talud arenoso y el campo dunar, ofreciendo cortes de varias decenas de metros en respuesta a la zapa directa por impacto del oleaje en los momentos de temporal y pleamar.

3. Metodología

3.1. Medición topográfica (1988-1993)

Entre 1988 y 1993, se realizaban 19 perfiles topo-batimétricos en la playa de Somo, desde el Puntal hasta la zona de las Quebrantas, cercana a la playa de Loredo, con una periodicidad de medición mensual. Para la ejecución de los perfiles se utilizaban dos teodolitos y el método topográfico de la intersección directa (Sanjosé, 1989). Los grandes avances tecnológicos de la Geomática (Topografía, Geodesia, Fotogrametría,...) a finales de los años 80 y principios de los 90 posibilitaron cambios significativos en las técnicas aplicables (Sanjosé *et al.*, 2014a).

A partir de 1990, se utilizó la estación total, de manera que los puntos del fondo del mar se medían sobre un prisma colocado en la

vertical de la sonda (puntos batimétricos) del barco. Los puntos topográficos de la playa se hacían colocando el prisma en un jalón. En 1993, las mediciones topográficas se realizaron con la técnica del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS). Mediante cualquiera de estas técnicas (teodolito, estación total, GNSS), la cantidad de puntos medidos era muy limitada. En general, entre los datos batimétricos y topográficos de los 19 perfiles, se disponía de una cantidad inferior al millar de puntos.

En todas las campañas topo-batimétricas se buscaba la posibilidad de existencia de solape intermareal entre las mediciones batimétricas y las terrestres (playa) para comprobar los resultados de la toma de datos, por ello la batimetría se ejecutaba en pleamar y la topografía terrestre en bajamar.

3.2. Escáner láser terrestre —TLS— (2011-2014)

La tecnología del Escáner Láser Terrestre (TLS) se está aplicando al estudio de procesos geomorfológicos en muy diferentes ambientes (Tarolli, 2014; Sanjosé *et al.*, 2014b). Los TLS han permitido trabajar con una elevada precisión, y aunque tiene limitaciones por las zonas ocultas, esto se compensa con múltiples estacionamientos. Su elevada resolución permite la detección de cambios geomorfológicos a escalas de detalle, en cortos periodos de tiempo. Es una técnica ampliamente utilizada y muy útil en estudios geomorfológicos en medios litorales (O'Neal, 2014).

En la actualidad, la posibilidad de utilizar el TLS para medir la playa de Somo (zona de Las Quebrantas) ha permitido realizar los perfiles representados en la Figura 3, de los cuales el perfil denominado 4 coincide con uno de los perfiles topográficos del periodo 1988-1993. Si con las técnicas anteriores, para un determinado perfil se medía un punto en la cabeza del talud arenoso y otro en el pie del talud

arenoso, en la actualidad entre esos dos puntos topográficos, la cantidad de puntos medidos con TLS pueden superar al millar.

La zona de estudio con TLS se limita, respecto al periodo 1988-1993, al sector de Somo (Las Quebrantas), donde se ha constatado con imágenes (Figura 2) que existe un significativo retroceso de la línea de costa. Por tanto, con TLS se ha realizado un modelo digital de elevaciones de una zona de 400 metros del frente del talud arenoso. Los puntos obtenidos tienen una precisión de 6 mm, y una malla de escaneado de 50 cm a 100 m de distancia del escáner. La cantidad de puntos medidos en cada campaña es de aproximadamente 100 millones, y se han realizado dos campañas por año (otoño y primavera), para evaluar la evolución de la playa durante el periodo invernal (octubre-marzo) y estival (abril-septiembre).

3.3. Fotogrametría aérea (2001-2010)

La fotogrametría es una antigua técnica de amplio uso para la producción cartográfica. Con el paso de los años fue evolucionando de un procedimiento analógico a un proceso analítico (asistido por ordenador), y posteriormente a un proceso digital. Actualmente hay grandes posibilidades de productos cartográficos con la aplicación de las técnicas de restitución digital, siendo esta técnica muy útil para el estudio de los cambios de la línea de costa (Kraus, 1992; Moore, 2000).

El Servicio de Cartografía del Gobierno de Cantabria nos ha suministrado los vuelos fotogramétricos de los años 1985, 1988, 2001, 2005, 2007 y 2010, pero sólo nos ha entregado los certificados de calibración de las cámaras aéreas de los vuelos 2001, 2005, 2007 y 2010. Por tanto, estos son los vuelos que se han empleado, ya que sin la información de las cámaras no se puede obtener la calidad suficiente para elaborar una cartografía a escala 1/2500 (el error máximo en la

orientación de los vuelos es de 0,5 m) (Tabla 1). El proceso de orientación fotogramétrica se ha realizado mediante la medición de los mismos puntos de apoyo fotogramétricos en cada vuelo (2001, 2005, 2007 y 2010). De este modo, el mismo punto de apoyo fotogramétrico medido sobre el terreno con GNSS, aparece expuesto en el par de fotografías estereoscópicas de cada vuelo fotogramétrico. Posteriormente, sobre cada una de las cartografías restituidas a escala 1/2500 (se ha empleado el restituidor digital Digi3D para hacer la cartografía) se han medido los mismos puntos de control (con coordenadas terreno). Los puntos de control son diferentes a los puntos de apoyo fotogramétricos. Sobre los puntos de control se ha analizado la diferencia de sus coordenadas, las cuales no han superado el valor máximo de diferencia de coordenadas de 0,5 m (Tabla 1) para cada una de las componentes 3D (X, Y, Z).

Una vez realizada la orientación se han cartografiado, para cada vuelo fotogramétrico, las curvas de nivel con una equidistancia de 1

metro, y se ha dibujado la línea de cota cero, el pie del talud arenoso y la cabeza del talud arenoso (Figura 4). Posteriormente, sobre la cartografía se han realizado los mismos perfiles que actualmente se miden con TLS (Figura 3), de esta manera es posible comparar resultados del periodo 2001-2010 (fotogrametría) con el periodo 2011-2014 (TLS) y el perfil 4 (P4) enlaza con el periodo 1988-1993 (topografía).

El sistema de coordenadas utilizado en las mediciones topográficas de 1988-1993 fue UTM ED 50, pero se ha hecho un proceso de transformación al sistema de coordenadas ETRS 89, puesto que es el sistema de coordenadas oficial en España, en la actualidad.

4. Resultados y discusión

Los resultados topográficos obtenidos de los perfiles para el periodo 1988-1993, muestran un retroceso inferior a 1 metro para el periodo de seis años en la zona del pie del talud arenoso, con un promedio de 0,17 m·a⁻¹.

Tabla 1: Coordenadas (ETRS 89) y diferencia de coordenadas de los puntos de control en los distintos vuelos (2001, 2005, 2007, 2010).

Table 1: Coordinates (ETRS89) and coordinate differences of the checkpoints in the different flights (2001, 2005, 2007, 2010).

Punto		Año 2001	Año 2005	Año 2007	Año 2010	Diferencias en X	Diferencias en Y	Diferencias en Z
1	X	441240,972	441240,502	441240,947	441240,656	2001 - 2005 : 0,470 m	2010 - 2007 : 0,497 m	2007 - 2005 : 0,457 m
	Y	4812198,599	4812198,858	44812198,384	4812198,881			
	Z	6,125	6,034	6,491	6,303			
2	X	440874,910	440874,853	440874,947	440874,986	2010 - 2005 : 0,133 m	2007 - 2010 : 0,394 m	2007 - 2010 : 0,496 m
	Y	4811762,438	4811762,369	4811762,654	4811762,260			
	Z	33,698	33,641	34,002	33,506			
3	X	441367,827	441367,931	441367,949	441367,748	2007 - 2010 : 0,201 m	2010 - 2007 : 0,373 m	2007 - 2010 : 0,499 m
	Y	4812533,353	4812533,321	4812533,011	4812533,384			
	Z	12,227	12,253	12,287	11,788			
4	X	441327,802	441327,687	441327,666	441327,509	2001 - 2010 : 0,293 m	2010 - 2001 : 0,174 m	2007 - 2010 : 0,492 m
	Y	4812791,099	4812791,151	48112791,116	4812791,273			
	Z	9,110	9,326	9,327	8,835			
5	X	441270,686	441270,233	441270,542	441270,456	2001 - 2005 : 0,453 m	2007 - 2001 : 0,079 m	2005 - 2010 : 0,459 m
	Y	4812287,409	4812287,476	4812287,488	4812287,441			
	Z	2,311	2,676	2,465	2,217			
6	X	440823,379	440823,517	440823,428	440823,290	2005 - 2010 : 0,227 m	2010 - 2007 : 0,400 m	2005 - 2007 : 0,483 m
	Y	4812064,093	4812064,215	4812064,070	4812064,470			
	Z	8,491	8,749	8,266	8,427			
MÁXIMA DIFERENCIA DE COORDENADAS EN EL PROCESO DE ORIENTACIÓN FOTOGRAMÉTRICA:						Punto 1 : 0,470 m	Punto 1 : 0,497 m	Punto 3 : 0,499 m

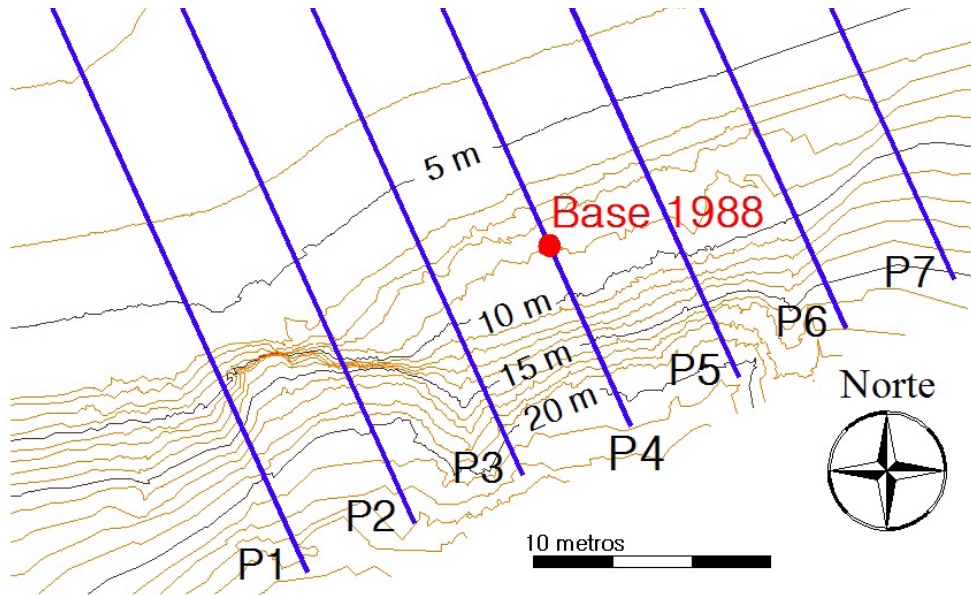


Figura 3: Situación de los perfiles para la medición con fotogrametría y TLS (la distancia entre ellos es de 15 m). El perfil 4 (P4) coincide con la medición de un perfil en el periodo 1988-1993.

Figure 3: Location of the profiles obtained from terrestrial photogrammetry and TLS (the spacing between profiles is 15 m). Profile 4 (P4) coincides with a profile obtain for the 1988-1993 period.

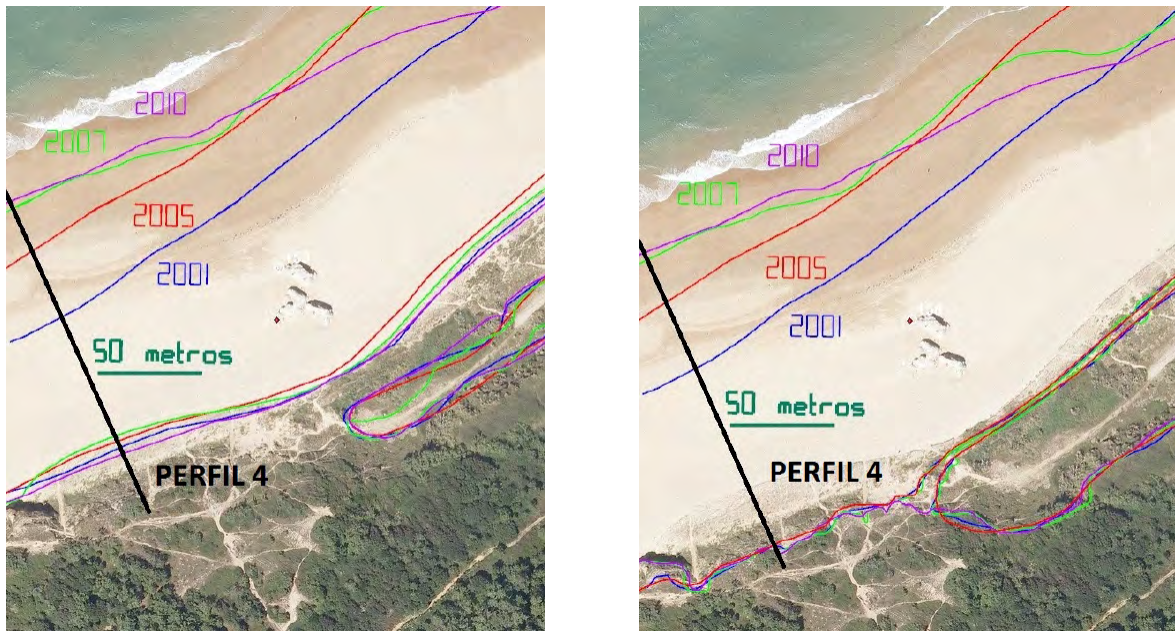


Figura 4: Se indican las restituciones fotogramétricas de los años 2001-2005-2007-2010, sobre una ortofotografía de 2005. Fotografía izquierda: Curva de nivel de cota cero y pie de talud arenoso. Fotografía derecha: Curva de nivel de cota cero y cabeza de talud arenoso. La cartografía fotogramétrica coincide con el área medido con el TLS (2011-2014) y el perfil 4 (P4) topográfico (1988-1993) de la Figura 3.

Figure 4: Photogrammetric restitution for the years 2001-2005-2007-2010 indicated on the 2005 orthophoto. Left: zero level and slope toe; right: zero level and head of the slope. Photogrammetric mapping matches the area of the TLS (2011-2014) and the topographic profile 4 (P4) (1988-1993) of the Figure 3.

Según la representación de los perfiles, para este periodo la cabeza del frente del talud arenoso permaneció inmóvil (Figura 5).

La Figura 6 muestra la evolución fotogramétrica del perfil 4, con respecto a su posición topográfica (1988-1993). Se aprecia que desde 2001 hasta 2010 se produce un retroceso del frente (2 metros) similar al periodo 1988-1993. Esto es, en diez años de estudio fotogramétrico, el retroceso promedio puede estimarse en aproximadamente $0,2 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$. Esta evolución es evidente por la aparición del afloramiento rocoso en la década de los 80,

el cual se encontraba en mitad de la playa a principios del siglo XXI (Figura 2).

Por otra parte, las seis mediciones realizadas con TLS en el periodo 2011-2014, muestran estabilidad con ligeras variaciones en la zona intermareal durante el periodo 2011-2013 (cinco observaciones). Apenas hay variaciones superiores a $0,25 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ (Figura 7). Esta evolución coincide con los cambios observados en los periodos 1988-1993 y 2001-2010, pero no clarifica lo ocurrido entre los años 1994-2000. En estos siete años, la costa retrocedió 25 metros (un promedio de $3,5 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$).

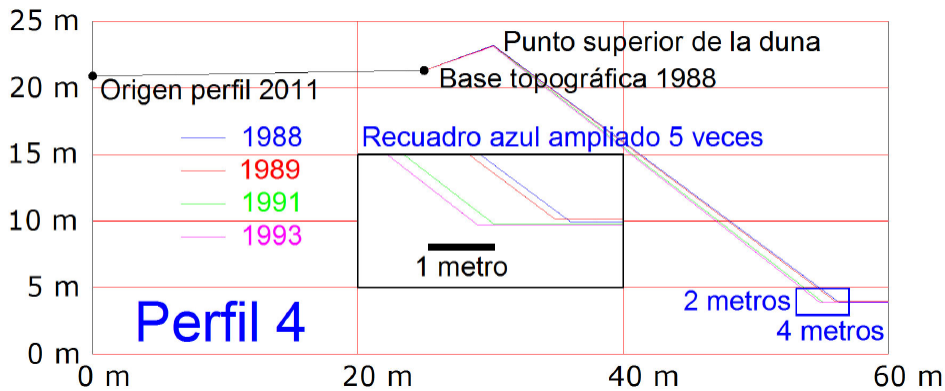


Figura 5: Evolución topográfica del perfil 4 (ver la posición P4, en la Figura 3) entre los años 1988 y 1993.
 Figure 5: Topographic evolution of profile 4 (P4 position is indicated, in Figure 3) between 1988 and 1993.

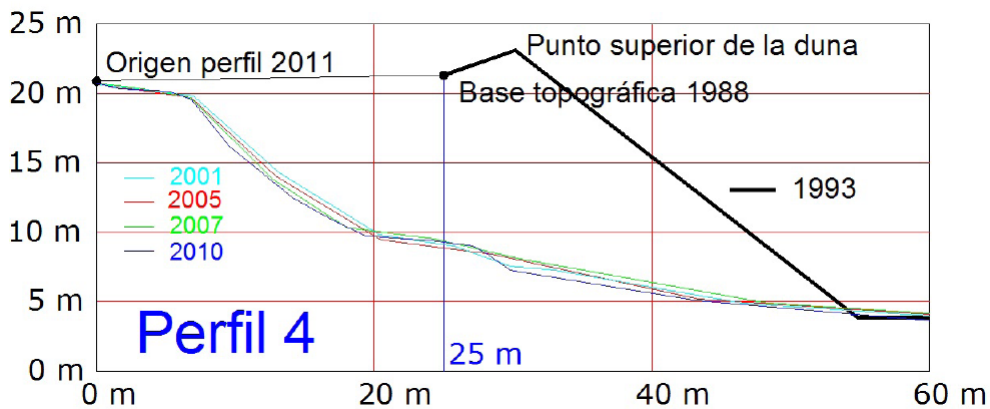


Figura 6: Evolución fotogramétrica del perfil 4 de los años 2001, 2005, 2007 y 2010 con respecto a las mediciones topográficas de 1993.

Figure 6: Photogrammetric evolution of profile 4 for 2001, 2005, 2007 and 2010, with respect to the topography of 1993.

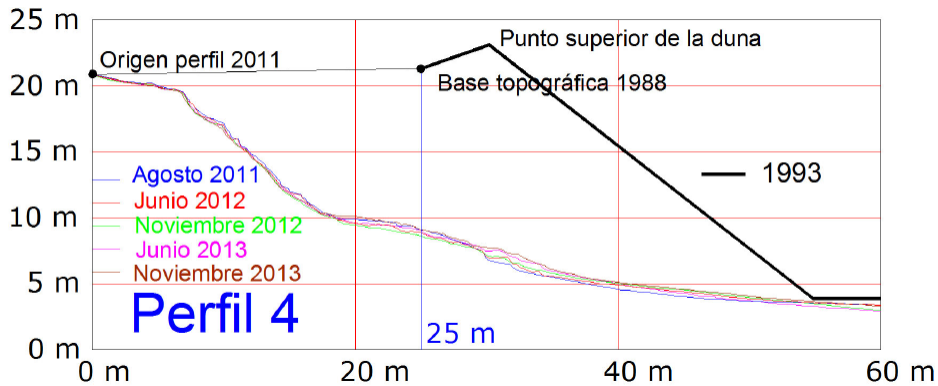


Figura 7: Representación de la evolución del perfil 4 con TLS. El retroceso de la línea de costa de las medidas del TLS coincide con las medidas fotogramétricas (ver Figura 6) respecto a la posición topográfica.

Figure 7: Profile 4 retreatment with TLS. The retreat of the coastline measured by TLS coincides with the photogrammetric measurements (Figure 6) with respect to the topographic position.

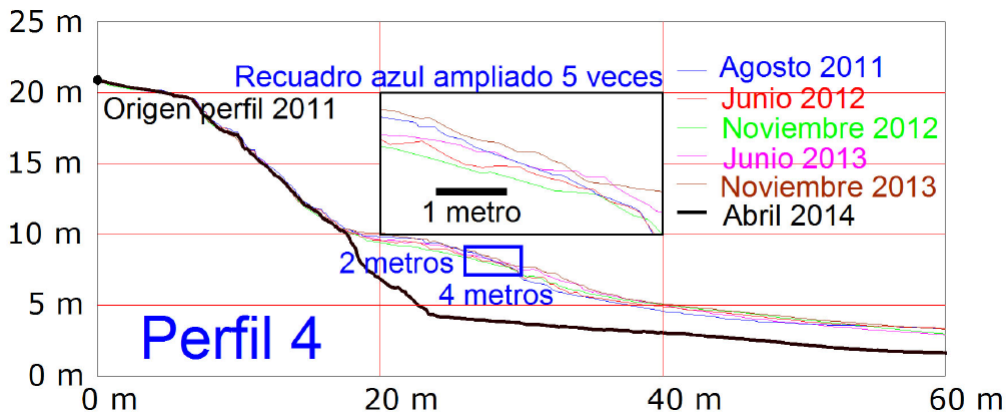


Figura 8: Gran variación del perfil 4 observada en la campaña de abril de 2014.

Figure 8: Wide variation of profile 4 from the April 2014 field campaign.

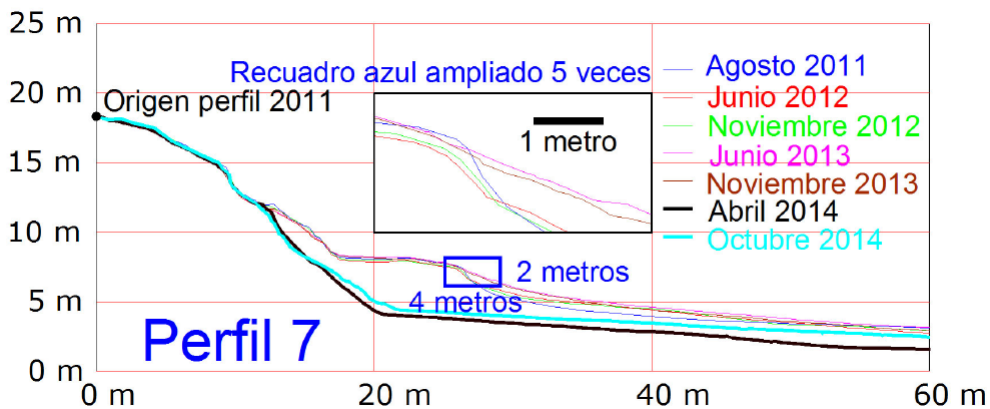


Figura 9: Gran variación del perfil 7 (ver su posición en la Figura 3) en la campaña de abril de 2014. Se incluye la campaña de octubre de 2014, donde se observa que el pie del talud arenoso no recupera la situación anterior a abril de 2014.

Figure 9: Wide variation of profile 7 from the April 2014 field campaign (see position in Figure 3). Field campaign of October 2014 is included, which shows that the sandy slope doesn't recover the situation previous to April 2014.

En la medición con TLS de abril de 2014 se constataron grandes cambios con respecto a las medidas con TLS de noviembre de 2013 (Figuras 8 y 9). El perfil 4 (Figura 8) y el perfil 7 (Figura 9) permiten evaluar el retroceso de la costa en esta zona durante el periodo de temporales continuos de 2013-2014 (cuatro meses). El retroceso en el frente del talud arenoso muestra un promedio de 5 metros de retroceso, variable entre 3 y 8 metros, según el perfil. Pero también es significativo el descenso de la cota de toda la playa en más de 2 metros. Es preciso señalar que en la observación realizada en octubre de 2014, los cambios en la línea de costa se mantuvieron durante el periodo estival (Figura 9).

Las variaciones de 2014 fueron causadas por los cinco grandes temporales que azotaron la costa cantábrica, entre diciembre de 2013 y marzo de 2014. Los temporales del 15 de diciembre, 27 de diciembre, 4 de febrero y 3 de marzo fueron las de mayor incidencia registrada en Somo, y se enmarcan en un periodo de fuertes oleajes y vientos ocurrido durante el invierno 2013-2014:

- Temporal de 15 de diciembre 2013. Un fuerte temporal de viento afectó la zona desde el 11 al 13 de diciembre y desde 18 al 19 de diciembre, coincidiendo con el temporal de mar del 15 de diciembre.
- Temporal de 27 de diciembre de 2013. En este periodo la costa estuvo sometida a olas de más de 4 metros de altura durante más de 10 días, con registro de viento máximo el día 24 y temporal de mar el día 27.
- Temporal del 6 al 8 de enero de 2014. Temporal de viento, con rachas superiores a 90 km/h, olas de más de 5 m de altura significativa, y olas extremas superiores a los 10 metros (6 de enero: 12,56 m).
- Temporal del 26 de enero al 4 de febrero de 2014. Oleaje superior a 4 metros, con olas de aproximadamente 10 metros

el día 2 de febrero, que coincidieron con pleamares de mareas vivas (31 de enero y 1 de febrero, con coeficiente 100), culminando con el temporal del 4 de febrero.

- Temporal de 3 de marzo de 2014, caracterizado por fuertes vientos entre el 1 y el 5 de marzo.

Aunque los temporales no fueron excepcionales por la altura de las olas, no superando el record de oleaje en el Cantábrico, su coincidencia con mareas vivas, las bajas presiones atmosféricas y la sucesión de agrupaciones de olas incidentes, causaron un nivel del mar capaz de ejercer una constante labor erosiva sobre las playas, con exportación de gran cantidad de sedimento y produciendo un retroceso costero significativo.

Este retroceso ocurrido en cuatro meses es muy superior a lo estimado para los otros periodos analizados y, parece indicar que los fuertes retrocesos costeros de la zona se generan en periodos extraordinarios asociados a temporales extremos.

5. Conclusiones

La instrumentación geomática (GNSS, estación total, TLS y fotogrametría aérea), permite un nivel de precisión impensable cuando empezaron estas mediciones hace 28 años (en 1988). Actualmente, es posible conseguir datos 3D (X,Y,Z) de los puntos observados con errores posicionales inferiores a 1 cm, mediante la utilización del TLS, lo que permite monitorizar los cambios y establecer tendencias en la línea de costa a largo plazo.

En un contexto de cambio global, la relación entre la dinámica de las aguas marinas y los procesos erosivos en nuestras costas, puede arrojar información de interés sobre los ritmos de dicha interacción morfodinámica. Así, la acción del oleaje propicia activas dinámicas diferenciadas sobre la costa, dependiendo de

la litología, la disposición estructural, la orientación y la exposición.

En la zona de estudio se pueden establecer dos periodos con comportamientos netamente diferentes:

- Periodos de tiempo donde apenas existen variaciones en el retroceso de la línea de costa: 1988-1993, medido con técnicas topográficas; 2001-2010, medido con fotogrametría aérea; y 2011-2013, aplicando TLS.
- Periodos de retroceso acentuado: Entre 1994-2000, se ha estimado que la línea de costa ha sufrido un retroceso aproximado de 25 metros ($3,5 \text{ m a}^{-1}$). Los registros mediante TLS de abril de 2014 han constatado un amplio retroceso, entre 5 y 10 metros, lo que permite establecer que son los temporales de grandes olas (mayores de 5 metros), incluso olas gigantes (mayores de 10 metros), coincidentes con mareas vivas, las que provocan retrocesos de mayor rango en la línea de costa. Por ello, entre 1993 y 2001, se debieron producir más de un episodio de sucesión de temporales de características similares a los acontecidos entre diciembre de 2013 y marzo de 2014. Esta hipótesis ha sido contrastada con los datos meteorológicos (grandes temporales), alturas extremas de las olas (superiores a 5 m) y coeficientes altos de pleamares (mayores a 80). En este sentido, se observa que los grandes oleajes coincidieron en horario con los altos coeficientes de las mareas. Asimismo, se ha comprobado que la sucesión de este tipo de acontecimientos fue más intensa en el periodo 1994-2000 que en los periodos anteriores y posteriores.

Es necesario continuar con las mediciones de precisión mediante técnicas geomáticas, complementándolas con otras fuentes (cartografía histórica y fotografías de satélite), para poder establecer con mayor precisión la

evolución costera reciente y su dinámica actual. De esta manera, a medida que la serie de datos vaya siendo más extensa en el tiempo, podrá arrojar más luz sobre la respuesta del sistema natural de la franja de contacto marítimo-terrestre y sobre las tendencias y los ritmos de variación, constituyendo así, un indicador de los cambios del nivel del mar y del retroceso costero, en el actual contexto de cambio global.

Bibliografía

- Bird, E. (2008). *Coastal Geomorphology: An Introduction*. Wiley and Sons, Chichester, 436 pp.
- Cendrero, A.; Díaz de Terán, J.R.; Salinas, J.M. (1981). Environmental economic evaluation of the filling and reclamation process in the Bay of Santander, Spain. *Environmental Geology* 3, 325-336. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02473522>
- Dantín, J. (1917). *Evolución morfológica de la Bahía de Santander*. Trabajos del MNCN, Serie Geológica nº 20. Madrid. 43 pp.
- Díaz de Terán, J.R. (1976). Sedimentología y dinámica de las arenas de El Puntal (Santander). *Anal. Inst. Est. Ind. Econ. Ciencias*, Institución Cultural de Cantabria, 1, 229-329.
- Flor, G.; Flor-Blanco, G. (2005). An introduction to the erosion and sedimentation problems in the coastal regions of Asturias and Cantabria (NW Spain) and its implications on environmental management. *Journal of Coastal Research*, 49, 58-63.
- Flor-Blanco, G.; Flor, G.; Martínez-Cedrún, P.; Bruschi, V. (2012). La costa occidental de Cantabria (Santander-estuario de Tina Menor). En A. González-Díez, G. Flor Blanco y J.R. Díaz de Terán (eds.) *Guía de excursiones de campo. XII Reunión Nacional de Geomorfología*, Santander 2010-2012, Santander, 25-44.
- González-Amuchastegui, M.J.; Serrano, E.; Edeso, J.M.; Meaza, G. (2005). Cambios en el nivel del mar durante el Cuaternario y morfología litoral en la costa oriental cantábrica. En E. Sanjaume y J. Mateu (eds.) *Geomorfología litoral y Cuaternario*. Universidad de Valencia, Valencia, pp. 167-180.
- Hernández-Pacheco, F.; Asensio-Amor, I. (1962). Primeros resultados del estudio sedimentológico de las arenas del Puntal (Santander). *Estudios Geográficos*, 23, 13-24.

- Kraus, K. (1992). *Photogrammetry*. Dümmler, Colonia.
- Losada, M.A.; Medina, R.; Vidal, C.; Roldán, A. (1991). Historical evolution and morphological analysis of «El Puntal» spit, Santander (Spain). *Journal of Coastal Research*, 17, 2, 711-722.
- Martínez-Cedrún, P.; Flor, G.; Flor-Blanco, G.; Maroto-González, G. (2014). Relaciones texturales y composición mineralógica de los sistemas de playa/dunas en una costa rocosa: caso de Cantabria (NO de España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 27 (2), 13-28.
- Moore, L. (2000). Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, 16, 111-124.
- O'Neal, M. A. (2014). Terrestrial Laser Scanner Surveying in Coastal Settings. En Finkl, C.W. y Makowski, C. (Eds.). *Remote Sensing and Modeling*. Coastal Research Library Series, vol. 9. Springer International Publishing, Cham, 65-76.
- Sanjosé, J.J. De (1989). *Perfiles dinámicos de la bahía de Santander*. Proyecto Final de Carrera, Universidad de Extremadura, 400 pp.
- Sanjosé, J.J. De; Serrano, E.; Berenguer, F.; González, J.J.; Gómez, M.; González, M.; Guerrero, M. (2014a). Evolución histórica y actual de la línea de costa en las playas de Somo y Gerra (Cantabria) mediante fotogrametría aérea y escáner láser. En S. Schnabel y A. Gómez (eds.) *XIII Reunión Nacional de Geomorfología*, SEG-Universidad de Extremadura, Cáceres, 560-563.
- Sanjosé, J.J. De; Berenguer, F.; Atkinson, A.D.J.; De Matías, J.; Serrano, E.; Gómez-Ortiz, A.; González-García, M.; Rico, I. (2014b). Geomatics Techniques Applied to Glaciers, Rock Glaciers, and Ice Patches in Spain (1991-2012). *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 96 (3), 307-321.
- Tarolli, P. (2014). High-resolution topography for understanding Earth surface processes: opportunities and challenges. *Geomorphology*, 216, 295-312.