



INFLUENCIA DE FORMAS Y PROCESOS HEREDADOS EN LA EVOLUCIÓN RECIENTE Y EN LOS PROCESOS MORFODINÁMICOS ACTUALES EN UN SECTOR DE COSTA ROCOSA: PUNTA GALLÍN, COSTA CANTÁBRICA GALLEGA.

A. Feal-Pérez, R. Blanco-Chao y M. Valcárcel-Díaz

Departamento de Geografía, Facultad de Geografía e Historia, Universidad de Santiago de Compostela, Praza da Universidade, 1. 15782, Santiago, A Coruña. E-mail: alejandra.feal@usc.es

Resúmen: Trabajos recientes han demostrado que, en plataformas litológicamente homogéneas, el esclerómetro puede registrar cambios en la resistencia de la superficie de la roca en función de la alteración mareal, de forma que, en ausencia de procesos de erosión mecánica, fundamentalmente de abrasión, la alteración tiende a incrementarse hacia las cotas de marea alta. En este trabajo hemos empleado una metodología semejante, para estudiar un sector de la costa cantábrica gallega en donde afloran dos pequeñas plataformas rocosas. Las plataformas que afloran en Punta Gallín se han desarrollado sobre materiales metamórficos cámbrico-ordovícicos de la Serie de los Cabos, y en su parte posterior están fosilizadas por un depósito complejo en el que alternan niveles de origen continental y marino. El análisis estadístico de los datos de resistencia obtenidos con el esclerómetro en estas plataformas ha demostrado que las diferencias morfológicas en las mismas no responden a diferencias litológicas, sino a los efectos combinados de la alteración mareal, la erosión mecánica actual y procesos de erosión mecánica y alteración heredados.

Palabras clave: plataformas litorales, costas rocosas, esclerómetro, resistencia de la roca, mareas, alteración

Abstract: Recent research in Galician Coast demonstrated that, in shore platforms with homogeneous lithology, the Schmidt Hammer is able to identify changes in the rock strength caused by tidal weathering. In absence of mechanical erosion processes, weathering degree tends to increase towards the levels of high tide. In this work we have used a similar methodology, to study two small rocky platforms in the Cantabrian Galician coast that have developed on metamorphic rocks and with a cliff deposit in which levels of continental and marine origin alternate. The statistical analysis of the strength data obtained in these platforms has demonstrated that the morphological are not directly controlled by lithological differences but by the combined effects of the tidal weathering, and the inherited processes of mechanical erosion and weathering.

Key words: shore platforms, rocky coasts, Schmidt Rock Test Hammer, rock strength, tides, weathering

Feal-Pérez, A., Blanco-Chao, R. y Valcárcel-Díaz, M. (2009): Influencia de formas y procesos heredados en la evolución reciente y en los procesos morfodinámicos actuales en un sector de costa rocosa: Punta Gallín, costa Cantábrica gallega. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 22 (1-2): 67-78

Edita: *Sociedad Geológica de España*
ISSN: 0214-2708



Las plataformas litorales son formas erosivas de las costas rocosas cuya geometría (pendiente, rugosidad y elevación) varía en función de un gran número de factores, incluyendo el tipo de roca y su estructura, el rango mareal, la energía del oleaje, morfología de los acantilados y la presencia de playas. Las investigaciones más recientes sobre los procesos que operan en las plataformas litorales rocosas se han centrado en el papel relativo de los procesos de erosión mecánica, como los arranques o la abrasión, frente a los procesos de alteración. Las investigaciones de campo y de laboratorio (Stephenson y Kirk, 1996, 1998, 2000; Kanyaya y Trenhaile, 2005; Trenhaile, 2006; Trenhaile y Porter, 2007), así como la modelización matemática (Trenhaile, 2001a, 2005, 2008) han demostrado que el grado de alteración en las plataformas intermareales rocosas varía con la elevación mareal, y que está controlada en gran parte por la inundación y exposición mareal. Stephenson y Kirk (2000) sugieren que la mayor eficacia de la alteración mareal se produce en el rango de mareas muertas, donde la frecuencia de ciclos de inundación/desecación es mayor, mientras que los resultados de la experimentación en laboratorio (Kanyaya y Trenhaile, 2005; Trenhaile, 2006) apuntan a que la alteración ha de ser más efectiva entre las cotas de media marea y la media de las mareas altas en relación al mayor tiempo de secado. Por otra parte, la alteración en las plataformas litorales pueden ser un proceso importante en cotas supramareales afectadas por las salpicaduras y el spray (Gómez-Pujol y Fornós, 2004; Gómez-Pujol *et al.*, 2006).

En ausencia de variaciones litológicas y estructurales, esta tendencia se traduce en una correlación negativa entre elevación mareal y grado de alteración, que ha podido ser registrada en ambientes morfodinámicos bien diferenciados utilizando los datos obtenidos con el esclerómetro como medida indirecta de la alteración.

Sin embargo, la presencia de algunos procesos de erosión mecánica puede modificar este gradiente de alteración. En este sentido la abrasión, cuya importancia se encuentra en función de la disponibilidad de material abrasivo y de una distribución energética del oleaje que permita su movilización, es probablemente uno de los mecanismos más efectivos, ya que al impedir el progreso en profundidad de la alteración la superficie de la roca mantiene valores de resistencia más altos que en las superficies sometidas exclusivamente a la alteración mareal (Blanco-Chao *et al.*, 2007). En costas paraglaciales o para-periglaciales la erosión de los depósitos sedimentarios con abundantes facies gruesas, que fosilizaron antiguas costas rocosas, representó un abundante aporte de material abrasivo durante la transgresión holocena, lo que en algunos casos jugó un importante papel en la evolución reciente de las plataformas litorales (Blanco-Chao *et al.*, 2007). De acuerdo a lo observado en otros sistemas de costas rocosas para-periglaciales y paraglaciales de la costa gallega y del Canal Beagle en Tierra del Fuego,

Argentina (Blanco-Chao *et al.*, 2006a, 2007), se partía de la hipótesis de que la presencia de un depósito sedimentario antiguo en el área de estudio pudo haber jugado un papel importante en las características y evolución de las plataformas.

Las plataformas que afloran en el sector de estudio (Fig. 1) muestran una gran complejidad de formas condicionadas tanto por la litología del substrato (cuarcitas y cuarzo-filitas) como por los procesos actuales y heredados. En este trabajo se pretende, en primer lugar, analizar el papel de cada uno de estos factores a partir del análisis del grado de alteración de la roca, determinando las variaciones de su importancia relativa tanto espacialmente en la superficie de las plataformas como temporalmente a lo largo de su evolución reciente. En segundo lugar, el objetivo es profundizar en la importancia de las características heredadas de dicha evolución en los procesos morfodinámicos actuales, especialmente en los de carácter erosivo, y plantear algunos aspectos sobre las posibles variaciones morfodinámicas responsables de la sedimentación de niveles de playa recientes a cotas elevadas.

El análisis estadístico de los valores de rebote del esclerómetro (valores *R*) y su integración y análisis junto a diversas variables de cada punto de muestro en un sistema de información geográfica ha permitido sectorizar estas plataformas en función de sus formas y procesos dominantes. A partir de esta sectorización se plantea una hipótesis de la evolución reciente del sector de estudio.

Metodología

El esclerómetro ha sido ampliamente utilizado en geomorfología litoral para determinar la resistencia relativa de la roca (Haslett y Curr, 1998; Trenhaile *et al.*, 1998, 1999; Stephenson y Kirk, 2000; Andrade *et al.*, 2002; Dickson, 2005; Dickson *et al.*, 2004;

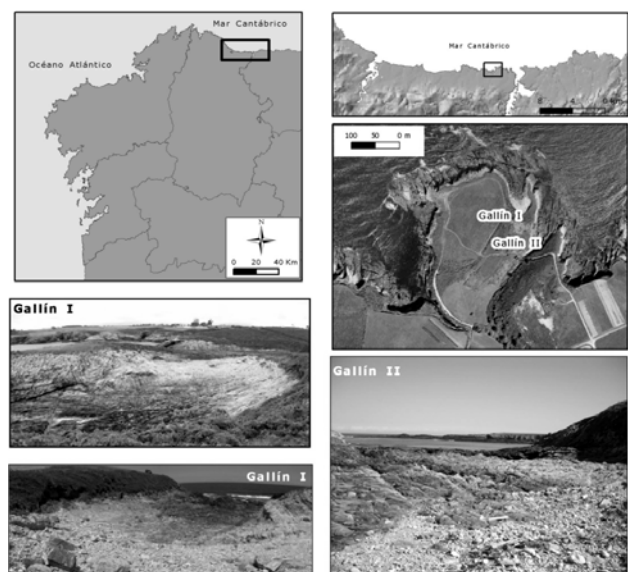


Figura 1.- Localización del sector de estudio.

Kennedy y Beban, 2005; Thornton y Stephenson, 2006; Blanco-Chao *et al.* 2006a, 2007)). En la mayor parte de los trabajos en los que el esclerómetro se ha empleado sobre plataformas litorales, el muestreo se efectuó mediante perfiles transversales, con el objetivo principal de poner en relación la variación en los valores de rebote con la elevación mareal. Sin embargo, en las plataformas objeto de este estudio, dadas sus reducidas dimensiones, se ha podido aplicar en un gran número de puntos, cubriendo en gran medida toda la superficie inter y supramareal, de forma que además de la componente mareal transversal, se pudieran considerar las variaciones laterales.

Se efectuó un levantamiento topográfico mediante estación total, con un total de 245 puntos en Gallín-I y 209 en Gallín-II. Cada punto fue posicionado por sus coordenadas UTM y su elevación mareal determinada respecto a la mínima marea baja astronómica. Se utilizó un esclerómetro Digi-Schmidt tipo L, con una energía de impacto de 0.735 Nm, en un total de 172 puntos (95 en Gallín-I y 77 en Gallín-II) distribuidos sobre toda la superficie de las plataformas. En cada punto de muestreo se efectuaron 20 medidas de rebote evitando las zonas con cobertura biológica densa y los sectores húmedos o próximos a discontinuidades. Muchos trabajos han utilizado la media muestral de un determinado número de valores R para estimar la resistencia de cada punto de muestreo. Dado que la media muestral es muy sensible a la presencia de datos atípicos, suele utilizarse el criterio de Chauvenet, según el cual, para N valores, se rechazan las observaciones con una desviación respecto a la media mayor de la que corresponde a una probabilidad de 1/2N (Göktan and Ayday, 1993; Dickson *et al.*, 2004). Sin embargo, el método exige la normalidad de la muestra y sólo permite la eliminación de un dato en cada serie de N valores, por lo que al final la decisión de rechazo puede recaer sobre el investigador. Por otro lado el criterio de Chauvenet se aplica asumiendo que únicamente pueden ser considerados atípicos los valores excesivamente bajos, que son los achacables a errores de medida del dispositivo (Dickson *et al.*, 2004). Para evitar la presencia de datos anómalos o atípicos derivados de errores en la medida, en este trabajo se ha calculado la media de los 20 rebotes (valores R) tomados para cada punto de muestreo utilizando el M-estimador robusto de Huber ($b = 1,28$). Se trata de un estimador de la media robusto o no paramétrico, que permite obtener un valor medio en presencia de datos atípicos minimizando el sesgo, eliminando la influencia de los datos atípicos sin necesidad de eliminar ningún valor al ponderar los valores extremos.

Cada punto de muestreo con esclerómetro se registró mediante una fotografía y se anotó el tipo de roca, la presencia o ausencia de formas de alteración, la presencia o ausencia de procesos de erosión mecánica, así como el grado de cobertura biológica. Dada la

dificultad de identificación de los tipos de roca en campo, se tomaron muestras que fueran analizadas mediante lámina delgada y microscopio petrográfico. La posición de todos los puntos junto con todas las variables asociadas se introdujeron en un Sistema de Información Geográfica, y se llevó a cabo un análisis estadístico de los resultados obtenidos efectuando un análisis de agrupación por clusters.

El sector de estudio

El sector de estudio pertenece a la costa cantábrica gallega, y se localiza a unos 2,5 km de la Ría de Ribadeo, muy próximo al límite administrativo entre la Provincia de Lugo y el Principado de Asturias (Fig. 1). Este tramo pertenece al dominio geomorfológico de la Rasas Cantábricas, caracterizado por la presencia de hasta nueve niveles subhorizontales (Flor, 1983, 1992), ligeramente inclinados hacia el mar, de origen continental o litoral y que han sido cortados transversalmente por cursos fluviales con dirección N-S. Punta Gallín es una pequeña península en cuyo flanco oriental se abren dos estrechas calas, en las que afloran dos complejas plataformas rocosas modeladas sobre estratos de cuarcitas, filitas y cuarzofilitas cámbrico-ordovícicas con dirección norte y buzamiento subvertical al este (Fig. 1, Tabla I). De acuerdo con el mareógrafo de Gijón (Banco de Datos Oceanográfico. Puertos del Estado) el rango mareal oscila entre 1,64 m en mareas muertas y 4,83 m en mareas vivas, registrándose valores máximos de 4,96 m en momentos de sobreelevación. El régimen del oleaje se caracteriza por un ambiente energético moderadamente alto, alcanzándose en invierno alturas significantes medias de 2,15 m y máximas de 12 m, con periodos medios espectrales entre 3 y 18 segundos (Banco de Datos Oceanográfico. Puertos del Estado, datos de la Boya de Gijón II 2001-2008). Las direcciones principales de oleaje provienen del cuarto cuadrante, a las que corresponden también las mayores alturas de ola y por lo tanto son las componentes más energéticas.

La plataforma occidental (Gallín-I) ha sido labrada sobre estratos de cuarzofilitas y cuarcitas de la Serie de Los Cabos. Las cuarzofilitas presentan grandes variaciones en la potencia de los niveles filíticos, mientras que las cuarcitas son más masivas, con capas con potencias entre 5 y 20 cm. La plataforma tiene unos 30 m de anchura, 100 m de longitud y una pendiente media de 2°, entre las cotas mareales de 3,5 y 5,5 m.

	GALLÍN I	GALLÍN II
Anchura (m)	30	10
Longitud (m)	100	73
Elevación mareal media (m)	4,84	3,97
Media de R	41,5	44,8
Litología	Cuarcitas y cuarzofilitas	Cuarcitas
Pendiente (grados)	2,16	4

Tabla I.- Características de las plataformas.

Tras la plataforma se encuentran dos depósitos sedimentarios con características bien diferenciadas. El depósito GA-I se localiza al fondo de la cala en su extremo occidental, tiene 3 m de potencia máxima y se compone de arenas medias-finas de cuarzo con niveles intercalados de gravas subangulosas de origen local (cuarcitas y cuarzofilitas). En el flanco oriental de la plataforma se sitúa un depósito más complejo (GA-II, Fig. 2), compuesto por una secuencia de materiales

formados en medios litorales y continentales. Tiene una potencia máxima de 3 m y funciona como un acantilado activo durante episodios de tormenta, con una playa de material grueso al pie cuyo borde externo se sitúa a una cota mareal entre 5,5 y 6 m, presentando una anchura entre 6 y 13 m. Estratigráficamente, el depósito se compone de 8 unidades que de muro a techo son: un nivel basal de arcillas verdes, muy compactas; un nivel de clastos angulosos a subangulosos de cuarcita matriz-

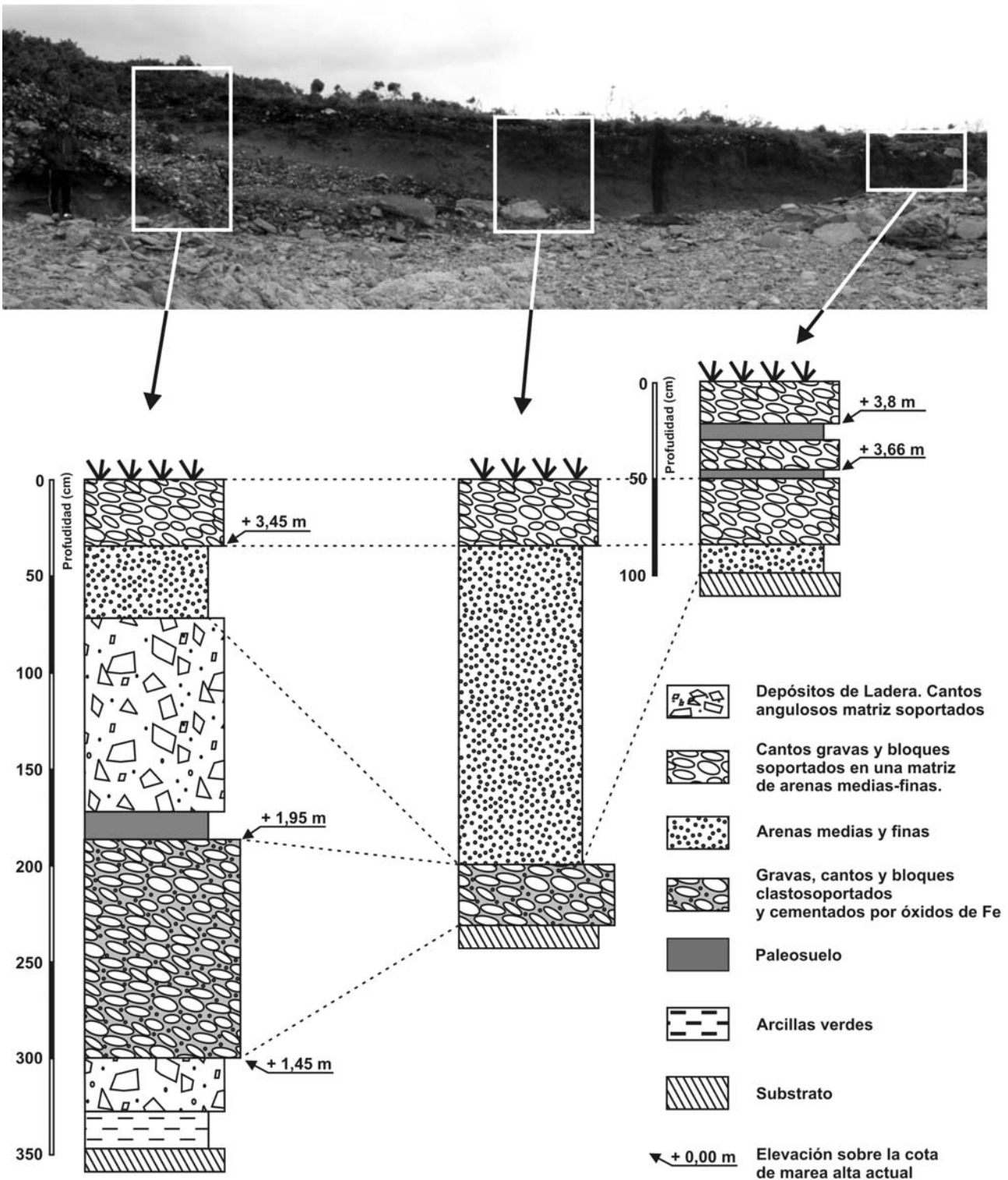


Figura 2.- Columnas sedimentarias tipo del depósito GA-II.7

soportados; un nivel de gravas y cantos clasto-soportados, muy redondeados y fuertemente cementados por óxidos de hierro, un segundo nivel de clastos angulosos a subangulosos de cuarcita matriz-soportados, un nivel de arenas muy finas, y finalmente tres niveles de arenas, gravas y cantos redondeados, separados por niveles edafizados. El análisis granulométrico y morfoscópico de los cuarzos de las arenas, gravas y cantos redondeados ha permitido identificarlos como correspondientes a 4 niveles con facies de playa. El inferior se sitúa entre los 1,45 y 1,95 m sobre el nivel actual de las mareas altas vivas y presenta una media de $-3,13 \Phi$ con tamaños máximos de cantos superiores a -6Φ y está muy bien clasificada ($0,3 \sigma I$) (Folk y Ward; 1957), lo que enmarca su formación en un ambiente de alta energía. Los otros tres niveles que presentan facies de playa aparecen hacia el techo del perfil, entre las cotas 3,45 y 4,04 m sobre el nivel de las mareas altas vivas. Presentan un tamaño medio de $-2,5 \Phi$ y una clasificación pobre ($1,8 \sigma I$), indicando un ambiente de menor energía y la concurrencia de procesos sedimentarios diferenciados en su formación. El nivel más alto presenta actualmente una morfología de cresta, y pese a su posición elevada hoy en día todavía es afectado por el oleaje en condiciones de sobre elevación por tormenta.

La posición elevada de los niveles marinos, junto al hecho de encontrarse en un perfil sedimentario erosionado, sugieren la existencia de cambios en el ambiente morfodinámico del sector de estudio durante las etapas más recientes de evolución.

La plataforma más oriental (Gallín-II) presenta dos sectores separados por un canal abierto a favor del contacto entre dos estratos litológicos diferentes. Los

resultados que aquí se exponen corresponden al más oriental (Gallín-II E) modelado sobre estratos cuarcíticos con potencias que varían entre 2 y 25 cm. La plataforma tiene unos 10 m de anchura, 73 m de longitud y una pendiente hacia el mar de 4° , situándose entre las cotas mareales de 2 y 5,5 m. En Gallín II no existen depósitos sedimentarios antiguos de características semejantes al descrito en Gallín I, aunque sí se localiza un depósito con facies de playa de unos 40 cm de potencia y escasa extensión en el fondo de la ensenada, cuyo desmantelamiento probablemente ha constituido el área fuente de la pequeña playa de cantos situada en el fondo de la ensenada.

Tanto en Gallín-I como en Gallín-II las plataformas están limitadas por un escarpe o *low tide cliff* en su borde externo, que cae verticalmente desde la cota mareal de los 2 m hacia un canal abierto a favor de una fractura de dirección aproximada oeste-este, y que permanece sumergido incluso durante las mareas bajas vivas. La presencia de este escarpe, unido a que las plataformas se encuentran bastante elevadas, determina que la mayor parte de la energía de ola se disipe en los primeros 40 metros desde el borde externo de las plataformas, y que solamente las olas con alturas significantes (H_s) entre 1 y 2 m puedan romper directamente sobre ellas. Aunque no se dispone de datos obtenidos directamente sobre las plataformas, se ha modelado la atenuación del oleaje tras la rompiente utilizando una función de atenuación (Trenhaile, 2000, 2002):

$$F_w = 0.5 \rho w (h_b) e^{-k \cdot W_s}$$

Donde F_w es la fuerza de la ola que alcanza el borde del agua después de la rompiente, ρw es la densidad del

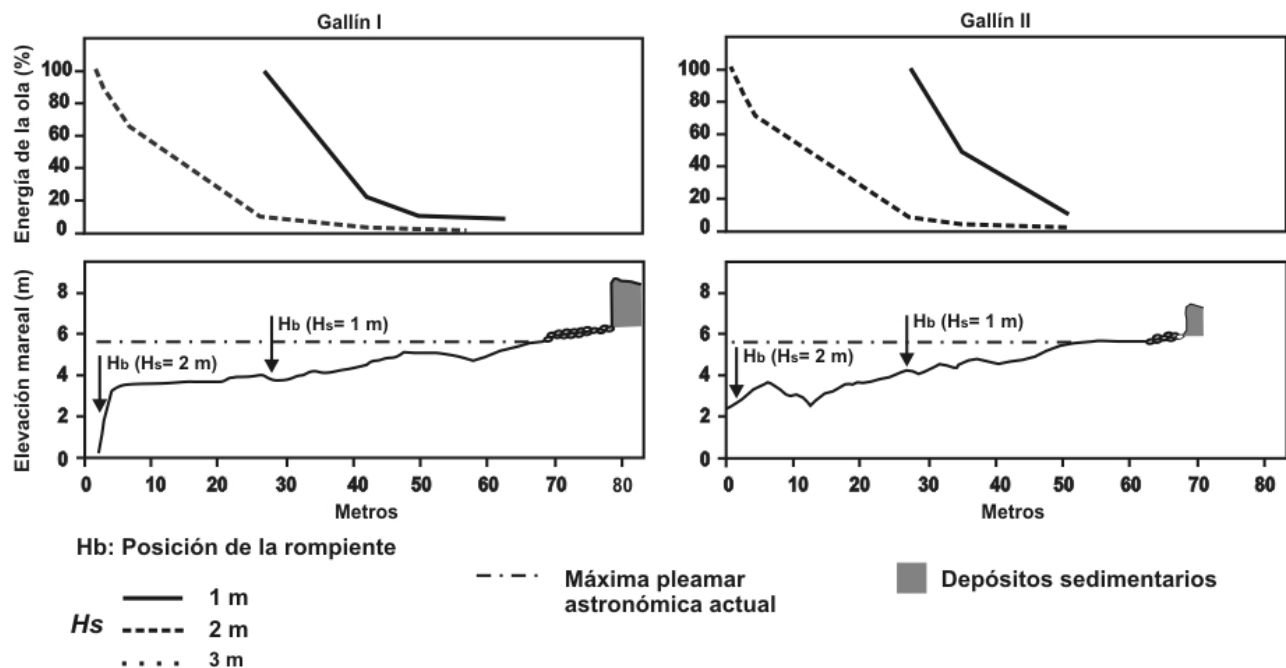


Figura 3.- Porcentaje (%) de la energía de ola disipada en las plataformas de Gallín-I y Gallín-II durante la máxima pleamar observada. El 100% de la energía coincide con el punto de rompiente. El valor k utilizado ha sido 0,1 lo que representa un índice de atenuación alto en una superficie rugosa (Trenhaile, 2002). Los cálculos se han realizado utilizando olas de altura significativa espectral de 1, 2 y 3 m con periodo medio espectral de 5, 6 y 7 segundos respetivamente. Los datos de oleaje se han obtenido de la boya CosGijón II (Puertos del Estado).

agua de mar (1025 kg m^{-3}), h_b es la profundidad de rompiente de la ola, k es una constante de atenuación de *surf* y W_s es el ancho de la zona de *surf* desde la rompiente al borde del agua, calculada a partir de los perfiles topográficos. La profundidad de rompiente se ha determinado asumiendo la relación $H_b/h_b=0.78$, y la altura de rompiente (H_b) se ha calculado a partir de datos de altura significativa (H_p) y periodo (T) de oleaje en aguas profundas según la ecuación (Komar and Gaughan, 1972):

$$H_b=0,39g^{0,2}(THp^2)^{0,4}$$

Como se observa en la figura 3 todas las olas con H_s superior a 1 m inician la rompiente mucho antes de alcanzar el escarpe o a lo sumo lo hacen directamente contra él, disipando su energía casi totalmente en los primeros 20 m desde la rompiente. Sólo las olas con H_s igual o inferior a 1 m pueden romper sobre las plataformas, conservando aproximadamente un 15% de su energía al alcanzar el borde del agua.

Resultados y discusión

En trabajos anteriores se ha podido identificar la eficacia relativa de la alteración mareal y de la abrasión mediante la correlación entre los valores R y la elevación mareal (Blanco-Chao *et al.*, 2006a, 2007). En la zona de estudio un análisis de regresión simple pone de manifiesto la ausencia de correlaciones significativas entre la elevación mareal y los valores R (Fig. 4. Tabla II). Tanto en Gallín I como en Gallín II se observa una correlación positiva en los sectores intermareales ($r = 0,17$ en ambos casos), mientras que en los supramareales la correlación es negativa en Gallín I ($r = -0,17$) y positiva en Gallín II ($r = 0,42$). Las diferencias entre ambos sectores, y la debilidad de las correlaciones puede deberse en parte a la complejidad litológica y topográfica y sugiere que la alteración inducida por la marea no es el principal factor responsable de la variabilidad en el grado de

	GALLÍN I		GALLÍN II	
	Intermareal	Supramareal	Intermareal	Supramareal
Media	41,17	41,41	22,6	26,2
Mediana	40,77	42,48	17,35	3,5
Máximo	51,88	58,41	56	62,75
Mínimo	27,33	23,92	2,77	3,77
Desv. Estándar	6,38	8,78	19,75	22,58
Coef. correl. (r)	0,17	-0,17	0,17	0,42

Tabla II.- Parámetros estadísticos de los valores R en los sectores intermareales y supramareales.

resistencia de la roca. De igual modo, si bien lógicamente existen diferencias significativas entre los valores R obtenidos en las cuarcitas masivas y en las cuarzofilitas (Fig. 5) el factor litológico resulta igualmente insuficiente para explicar la variabilidad de los datos.

Para la verificación de la influencia de las variables litológicas, mareal y el papel del depósito antiguo se excluyeron del análisis aquellos puntos correspondientes a las paredes verticales de los acantilados laterales, así como los correspondientes a cicatrices de arranques frescos y con los 96 puntos de muestreo restantes se realizó una interpolación de los valores R mediante un Sistema de Información Geográfica (Fig. 6.). El resultado reveló la existencia de un descenso general de la resistencia de la roca de oeste a este en Gallín-I y una marcada diferencia entre las dos plataformas de Gallín-II, atribuible en ambos casos a la disposición de los distintos estratos litológicos.

El análisis cluster de k-medias es una técnica estadística diseñada para asignar casos a un número fijo de grupos cuyas características son desconocidas a priori, pero que se basan en un conjunto de variables especificadas y que se considera que influyen en su agrupación. Mientras que los análisis estadísticos realizados en trabajos anteriores habían integrado únicamente la elevación mareal y la resistencia de la roca (Blanco-Chao *et al.*, 2006a, 2007; Thornton y

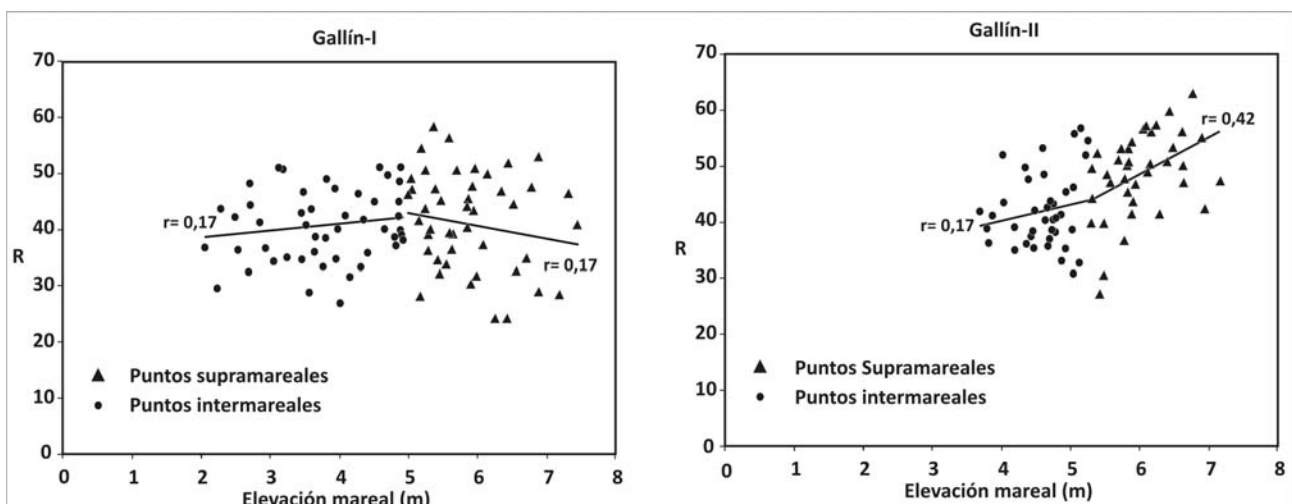


Figura 4.- Gráficos de correlación entre los puntos de muestreo situados en la zonas intermareal y supramareal para Gallín I y Gallín II.

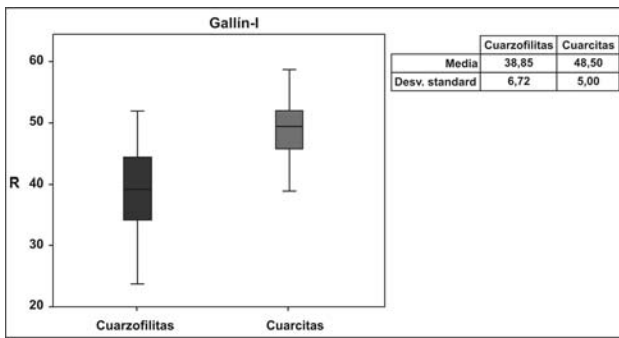


Figura 5.- Diagrama de caja de los valores *R* obtenidos con el esclerómetro para las cuarcitas y las cuarzofilitas. Se ha realizado un test t-Student de diferencia de medias para muestras independientes que ha permitido rechazar la hipótesis nula de igualdad de ambas litologías para un nivel de significación de 0,01.

Stephenson, 2006) para identificar los procesos que operan sobre las plataformas, en este trabajo se ha añadido como variable la distancia de cada punto respecto a la posición actual del frente del depósito. El resultado permitió identificar 3 grupos homogéneos de puntos de muestreo en Gallín-I y 2 grupos en Gallín-II (Figs. 7 y 8).

En Gallín-I el Grupo 1 presenta los valores *R* medios más altos, una elevación mareal media de 4,40 m y corresponde al sector al pie del depósito GA-II donde afloran las cuarcitas masivas, cuya resistencia compresiva es superior a la de las cuarzofilitas (Fig. 5, Tabla III). Presenta una morfología escalonada, controlada por la disposición de los estratos y el patrón de fracturas, muy probablemente causada por procesos de arranque, pese a que en la actualidad la superficie de la roca presenta principalmente bordes redondeados y muy pocas aristas agudas. Actualmente y dado el grado de atenuación del oleaje antes mencionado, los procesos de arranque están prácticamente limitados a los sectores más externos de la plataforma, no observándose apenas cicatrices recientes. Sin embargo, durante eventos de tormenta la energía del oleaje es suficiente para movilizar los clastos del borde externo de la playa, donde pueden observarse evidencias de actividad abrasiva en una estrecha franja. La ausencia de arranques actuales, junto a la existencia de bordes redondeados en la roca podría sugerir que se trata de una morfología en parte heredada, similar a la observada en otros sectores de la costa gallega, y vinculada a etapas recientes de retroceso del acantilado



Figura 6.- Arriba, distribución de los puntos topográficos y puntos de aplicación del esclerómetro en Gallín-I y Gallín-II. Abajo, modelo digital interpolado de los valores *R* en Gallín-I y Gallín-II.

sedimentario y a la migración hacia tierra de la playa (Blanco-Chao *et al.*, 2007).

El Grupo 2 engloba a los puntos de muestreo de la franja intermareal actual, situados por debajo de la cota mareal de 4,5 m y a mayor distancia del frente del acantilado sedimentario. Se trata de la franja intermareal actual, presentando la superficie de la roca una morfología con abundantes formas de alteración, y una densa cobertura biológica.

El Grupo 3 incluye los puntos de muestreo situados en el sector de mayor elevación mareal media (5,72 m) situado frente a la base del depósito occidental (GA-I). El análisis de las láminas delgadas de las muestras de roca permitió identificar un proceso de desferrificación de la clorita presente en las cuarzofilitas aflorantes en este sector (Fig. 9). Este proceso de alteración de la clorita se manifiesta en el campo como una patina rojiza en la superficie de los estratos o en los planos de diaclasado, bajo la que aparece una capa de color blanquecino. Estas capas aparecen casi intactas justo al

	GALLÍN I			GALLÍN II	
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 1	Grupo 2
Anchura (m)	24	27,20	12	10,23	8,40
Longitud (m)	20,65	43	29	38,50	23,78
Elevación mareal media (m)	5,51	3,54	5,72	4,48	3,47
<i>R</i> medio	48,23	39,62	35,53	50,30	39,37
Litología	Cuarcitas	Cuarzofilitas	Cuarcitas y cuarzofilitas	Cuarcitas	Cuarcitas
Pendiente (grados)	2	4	5	7	4

Tabla III.- Características de los sectores distinguidos en las plataformas para cada grupo.

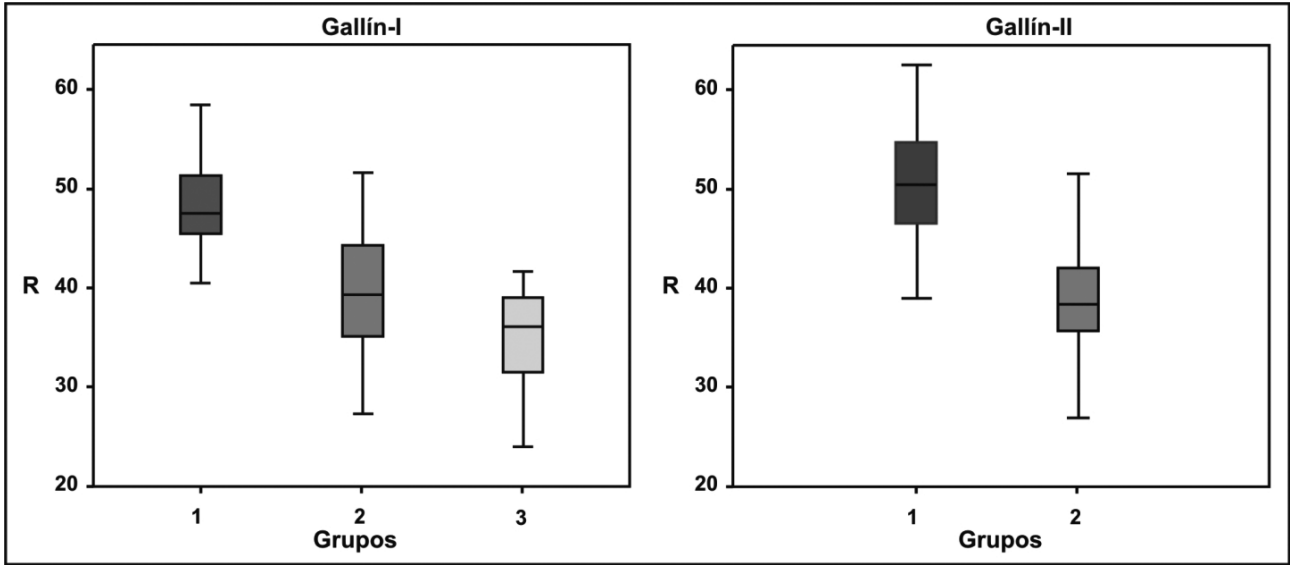


Figura 7.- Valores *R* de cada uno de los grupos identificados a partir del análisis cluster de k-medias. La diferencia de medias entre los grupos obtenidos se realizó con un test ANOVA y Tukey-b en Gallín I y con el test de Mann-Withney en Gallín II, obteniendo en ambos casos p-valores inferiores a 0,001. Las características de cada Grupo se describen en el texto.

pie del depósito GA-I, mientras que presentan un grado de lavado y erosión creciente al descender hacia las cotas afectadas por las mareas altas. La correlación negativa existente entre los valores *R* y la elevación mareal ($r = -0,413$, p -valor = 0,02) demuestra un descenso de la resistencia de la roca desde las cotas afectadas por la marea hacia el frente del depósito. Este hecho, junto a las evidencias de lavado por el oleaje de la capa alterada sugiere que el proceso de alteración de la clorita se produjo cuando la superficie de la plataforma se encontraba fosilizada por el depósito

sedimentario GA-I. Así, conforme esta capa alterada queda expuesta, es lavada por el oleaje incluso siendo este muy atenuado, y muy probablemente es también en parte erosionada por la lluvia. El gradiente en la resistencia y en el grado de lavado de la capa alterada sugieren que se trata de un proceso de exhumación reciente de la superficie de la roca causado por la erosión de las arenas del acantilado sedimentario.

Aunque el acantilado sedimentario constituye una fuente de sedimentos muy heterogénea, la elevada energía del oleaje del sector de estudio impide la retención de la fracción arena, como demuestra el hecho de que en la actualidad la playa está constituida enteramente por sedimento grueso, desde gravas a bloques. El predominio de arenas y la escasez de facies gruesas en el depósito GA-I facilitan su erosión, aún siendo éste el sector de menor energía. Las arenas erosionadas del depósito son rápidamente evacuadas del sistema, impidiendo así que efectúen una labor

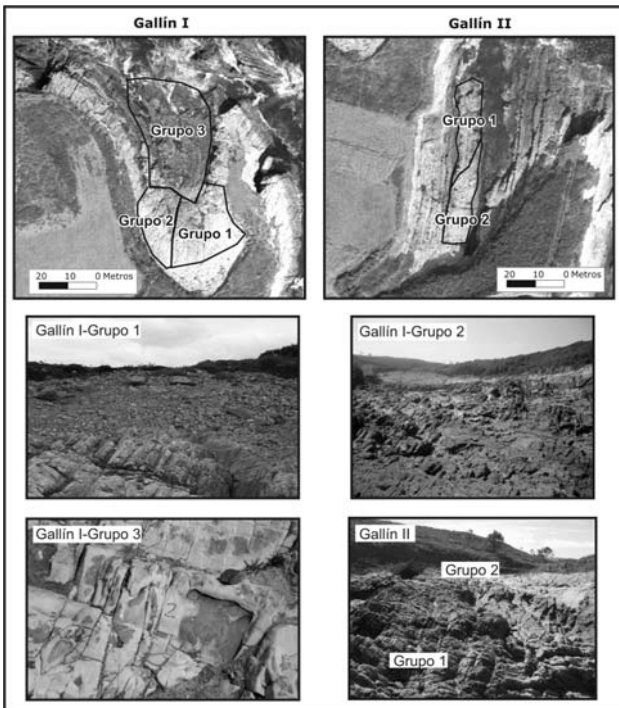


Figura 8.- Sectores de las plataformas Gallín I y Gallín II obtenidos a partir del análisis cluster de k-medias utilizando las variables resistencia de la superficie de la roca (*R*), distancia al frente actual de depósito y elevación mareal.

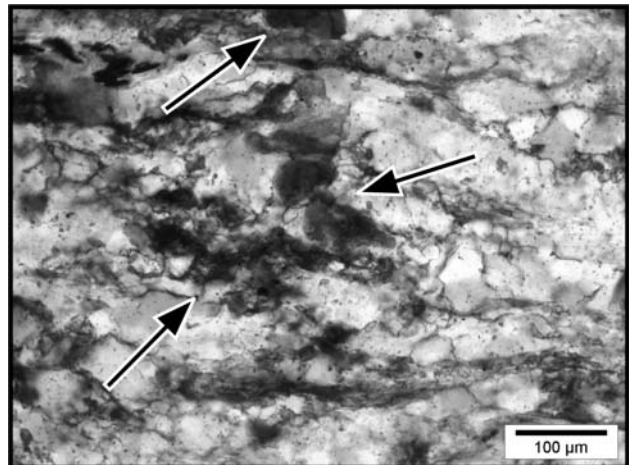


Figura 9.- Fotografía con luz natural de una lámina delgada del substrato bajo el depósito GA-I. Los granos oscuros, algunos señalados con una flecha, son minerales del grupo de clorita desferri-ferruginados.

abrasiva en el substrato exhumado que pudiera borrar los rasgos de alteración.

En Gallín-II el análisis clúster permitió identificar dos sectores diferenciados, ambos sobre el mismo afloramiento de cuarcitas (Fig. 7, Tabla III). El primer grupo se corresponde con el sector con los valores *R* más altos, situado entre las cotas mareales 3,79 y 5,16 m y con una morfología progresivamente más marcada por la diaclasación y la estratificación hacia las cotas mareales más altas. Al borde de la playa actual de cantos se observan puntualmente morfologías redondeadas. El segundo grupo, de forma similar a Gallín-I, corresponde a los puntos intermareales, situados entre las cotas de marea de 2,77 y 4,44 m y con valores *R* más bajos. La superficie de la roca presenta un aspecto más irregular, con algunas formas de alteración ruiformes y presencia de cicatrices de arranque puntuales. Se ha encontrado una correlación positiva muy débil entre los valores *R* del grupo 1 y la elevación mareal ($r = 0,083$, p -valor = 0,36), que podría responder a la existencia de mecanismos de abrasión en las cotas más altas (Fig. 10). En el grupo 2 se aprecia una correlación negativa significativa entre los valores *R* y la elevación mareal ($r = -0,36$, p -valor = 0,01), sugiriendo la existencia de una mayor alteración de la superficie de la roca hacia las cotas de marea alta.

El análisis cluster de los datos de las plataformas ha permitido distinguir en ambas dos grupos de características semejantes. Tanto en Gallín-I como en Gallín-II existe un grupo de puntos que engloba los sectores con una resistencia más elevada (Grupo 1) que en ambos casos se corresponde con estaciones de muestreo mayoritariamente supramareales. Por el contrario, en los sectores intermareales (Grupo 2) de ambas plataformas los valores *R* obtenidos presentan una correlación negativa con la elevación mareal, tendencia que sugiere un papel más importante de la alteración inducida por la marea, si bien con importantes diferencias en la fortaleza de la correlación entre Gallín-I y Gallín-II. Aunque podría pensarse en factores de orden litológico, la similitud

de los estratos en ambas plataformas apunta a que estas diferencias pueden encontrarse más en función de la evolución reciente, concretamente el tiempo de exposición a los ciclos mareales y a la efectividad de los procesos de erosión mecánica durante la transgresión Holocena.

En costas poligenéticas, el papel relativo de los procesos litorales y de los continentales durante el Pleistoceno y el Holoceno se encuentra en función de las oscilaciones del nivel del mar relativo y de los cambios climáticos. Dadas las semejanzas que presenta con otros sectores de la costa atlántica gallega, la evolución reciente en Punta Gallín ha estado influenciada en gran medida por una dinámica de tipo para-periglacial. La morfología de los segmentos superiores de las plataformas, especialmente su elevación, sugiere que se trata de formas modeladas durante episodios en que el nivel del mar relativo era alto. Al igual que en otros sectores de la costa del NW peninsular (Trenhaile *et al.*, 1999; Blanco-Chao *et al.*, 2003) en el acantilado sedimentario de Gallín-I se encuentra un nivel de playa antiguo, de facies muy gruesas, fuertemente cementada por hierro y a una cota mareal elevada. Estas características la hacen muy similar a otros depósitos de la costa gallega que en algunos casos han podido ser atribuidos indirectamente al último interglacial (Trenhaile *et al.*, 1999; Blanco-Chao *et al.*, 2003). Alonso y Pagés (2007) efectuaron recientemente dataciones por OSL en niveles con facies y cotas mareales similares, y si bien los resultados son problemáticos, confirman que se trata de depósitos marinos de edad Pleistocena. Las edades deducidas, junto a la elevación respecto al nivel del mar actual, sugieren que muy probablemente se trata de niveles correspondientes al primer episodio transgresivo del estadio isotópico 5e, entre 132.000 y 121.000 años, con un nivel medio del mar entre 2 y 3 m superior al actual (Hearty *et al.*, 2007; Shackleton, 1987). Como se mencionó antes, en la actualidad la elevación de las plataformas estudiadas genera una importante disipación de la energía del oleaje. Sin embargo, un

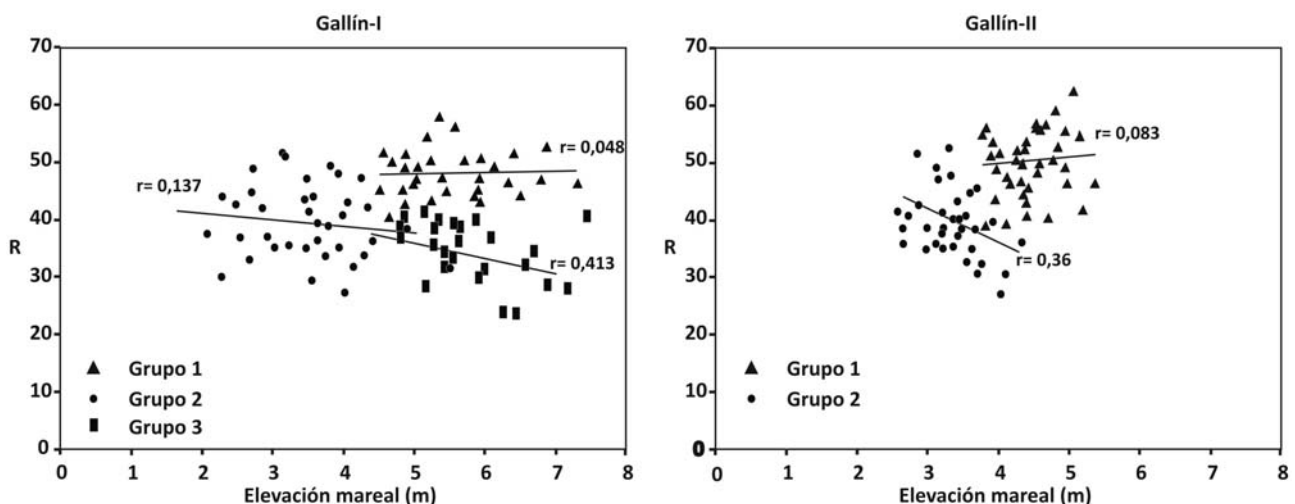


Figura 10.- Correlación entre la elevación mareal y la resistencia de la roca (*R*) medida con el esclerómetro para cada grupo cluster.

nivel relativo del mar más elevado (Fig. 11) equivaldría a una mayor profundidad de la columna de agua en la parte superior de la plataforma durante las mareas altas, permitiendo así que incluso olas de altura superior a un metro rompieran sobre la plataforma disipando una menor cantidad de energía en los sectores submareales e intermareales. Con esta distribución de la energía de ola, los segmentos superiores de las plataformas habrían estado sometidos a procesos de erosión mecánica, entre los que los arranques debieron de jugar un papel importante, ya que la litología del substrato, cuarcitas y cuarzofilitas ortogonalmente diaclasadas, resulta especialmente favorable a este tipo de proceso erosivo.

La regresión marina del último periodo glaciario supuso la fosilización de la ensenada y de las plataformas por sedimentos de origen continental, principalmente derrubios de ladera de tipo periglaciario y sedimentos eólicos. En Gallín-I la fosilización de la plataforma debió facilitar el proceso de desferrificación de la clorita presente en el substrato de cuarcitas y cuarzofilitas. Al producirse el ascenso del nivel del mar durante el Holoceno los depósitos que fosilizaron la plataforma fueron erosionados, constituyéndose en la fuente de sedimento grueso de la playa actual. Las diferencias en las facies sedimentarias, con un predominio de facies gruesas en el extremo SE y de facies finas en el extremo SW, se tradujo en la puesta en marcha de mecanismos diferenciados. En el sector SW la mayor concentración de la energía de las olas y la disponibilidad de abundante material grueso permitió que se desarrollaran intensos procesos abrasivos, actualmente limitados al borde distal de la playa. Por el contrario, en el extremo SE el oleaje llega mucho más atenuado, lo que generó un menor retroceso del

acantilado sedimentario, compuesto principalmente por facies arenosas y con escasos materiales gruesos. La baja energía del oleaje junto con la ausencia de material potencialmente abrasivo favoreció que el proceso dominante fuese la simple exhumación de la superficie rocosa, exponiendo la capa de alteración que comenzó a ser lavada por el oleaje. Las evidencias de inestabilidad actual en el acantilado, junto al gradiente detectado en la integridad de la capa de alteración y la resistencia de la roca evidencian que actualmente el proceso de exhumación continúa activo.

La presencia de facies de playa hacia el techo del acantilado sedimentario de Gallín-I demuestra que se han producido etapas de acumulación de clastos a cotas muy elevadas, con un retroceso posterior del depósito. Aunque en el momento de redactar este trabajo no disponemos todavía de dataciones que permitan determinar con precisión la cronología de los niveles de playa, puede afirmarse que se trata de niveles holocenos recientes. Actualmente y en momentos puntuales de sobre elevación del oleaje durante eventos tormentosos se producen removilizaciones de clastos hasta cotas situadas entre 2 y 3 m sobre el nivel de las mareas altas vivas, lo que permite inferir que en la sedimentación de los niveles de playa más altos los factores morfodinámicos han podido jugar un papel relevante. Sin embargo, no puede excluirse por ello la posibilidad de oscilaciones relativas del nivel del mar en el Holoceno reciente e incluso en épocas históricas. La granulometría de los niveles de playa superiores es muy diferente tanto a la del nivel interpretado como correspondiente al último interglaciario como a la de la playa actual. Su mejor clasificación, menor tamaño medio y el mayor grado de rodamiento indican unas condiciones morfodinámicas diferentes, probablemente

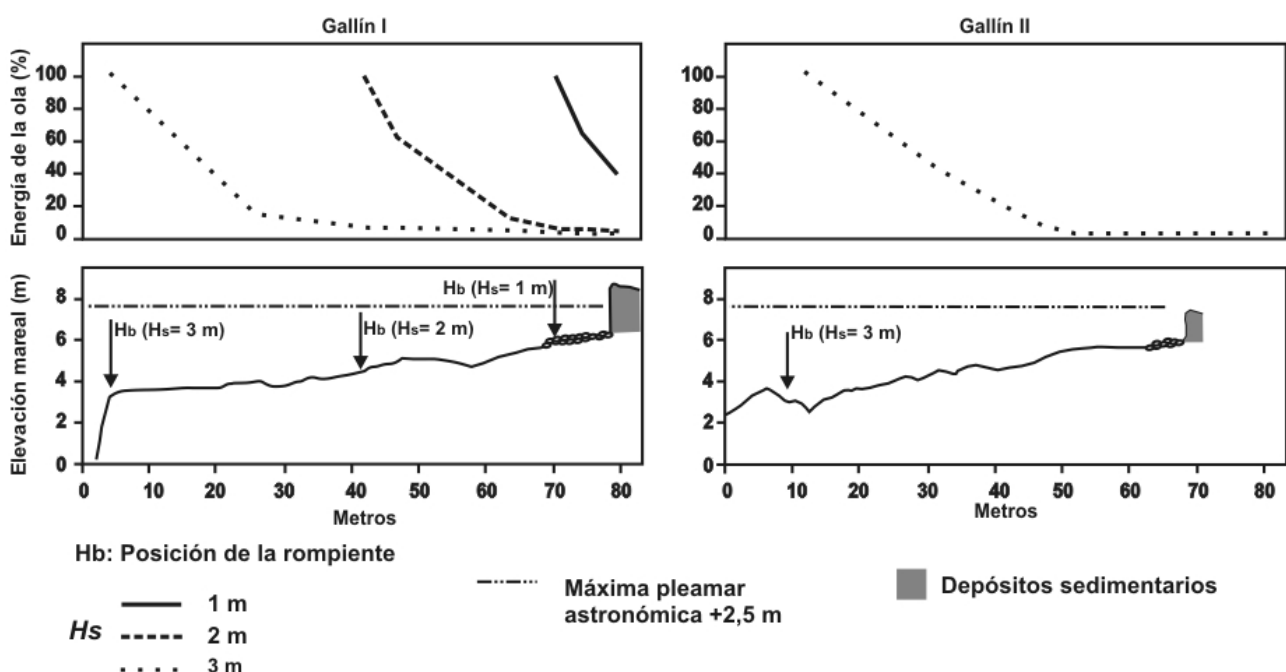


Figura 11.- Porcentaje (%) de la energía de ola disipada en las plataformas de Gallín-I y Gallín-II durante la máxima pleamar para un nivel medio del mar 2,5 m sobre el actual. Los parámetros utilizados son los mismos de la figura 3.

menos energéticas que durante el último interglaciario y con una fuente de sedimento más homogénea. El hecho de que se haya producido un retroceso del acantilado sedimentario con posterioridad a la sedimentación de estos niveles, evidencian que se formaron bajo condiciones distintas a las actuales. Las facies identificadas sugieren un ambiente de sedimentación de crestas de tormenta, en una posición elevada respecto a las cotas de marea alta y situada tras el frente de playa activo. Estas condiciones pudieron darse a causa de oscilaciones recientes del nivel del mar, porque el frente del depósito se encontraba más adelantado y en una fase de retroceso neto, o más probablemente por una combinación de ambos factores.

En Gallín-II, las diferencias en las tendencias detectadas en la resistencia de la roca parecen apuntar a un proceso más simple que en Gallín-I. Si bien en la actualidad no existen restos importantes que verifiquen la existencia de una fosilización de la plataforma durante la regresión marina, no es en absoluto descartable que ésta se hubiera producido. Antes bien, la mayor elevación, pendiente y proximidad de las laderas situadas tras la plataforma resultan más favorables para la generación de facies de tipo periglaciario que en Gallín-I. En cualquier caso, la existencia de niveles con facies marinas antiguas y posiblemente también fluviales al fondo de la ensenada supusieron una disponibilidad de material abrasivo durante la transgresión holocena. De forma similar a las estaciones del Grupo 1 de Gallín-I, aquí debió existir una fase reciente de intensa abrasión, que sería en gran medida la responsable de la correlación positiva de los valores de resistencia de la roca con la elevación mareal. Por el contrario, los puntos situados principalmente en la franja intermareal actual, correspondientes al Grupo 2, presentan la tendencia opuesta, sugiriendo una mayor influencia de la alteración inducida por la marea.

Conclusiones

En Punta Gallín se ha identificado una secuencia de modelado, fosilización y exhumación de plataformas litorales similar a la detectada en otros puntos de la costa atlántica gallega, si bien más compleja en lo referente a las facies sedimentarias que componen el acantilado.

La metodología utilizada, mediante un muestreo con esclerómetro con una elevada densidad de puntos y un mayor número de variables para cada punto ha permitido efectuar un análisis de mayor detalle y la identificación de procesos evolutivos más complejos que los deducidos en trabajos precedentes.

Por medio de la integración de los datos en un Sistema de Información Geográfica y un análisis clúster se han podido identificar varios sectores diferenciados en cuanto a los procesos de alteración y erosión actuales y heredados.

Tanto la geometría actual de las plataformas analizadas como la presencia de depósitos sedimentarios en los que alternan niveles de origen marino y continental responden a una evolución larga y compleja, en la que no solo han intervenido oscilaciones del nivel del mar relativo, sino cambios en los procesos dominantes, alternándose periodos de sedimentación continental con etapas de erosión marina y formación de playas.

Resulta necesario profundizar en el análisis de los sedimentos que conforman los depósitos sedimentarios de Gallín, establecer los ambientes deposicionales y los procesos responsables y en la medida de lo posible una secuencia cronológica apoyada en dataciones, así como establecer su correlación con otros depósitos antiguos de la costa atlántica y cantábrica de la península Ibérica.

Agradecimientos

Investigación financiada por los proyectos de investigación PGIDIT06PXIB239226PR de la Xunta de Galicia. La investigación de A. Feal se financia con la beca AP2006-03854 (FPU). Gracias a los Drs. G. Flor y G. Flor Blanco por su ayuda en el análisis de los depósitos sedimentarios y sugerencias. Gracias a Joan Fornós y a un revisor anónimo por sus comentarios y sugerencias que han contribuido a la mejora sustancial de este trabajo.

Referencias

- Alonso, A. y Pagés, J.L. (2007): Stratigraphy of Late Pleistocene coastal deposits in Northern Spain. *Journal of Iberian Geology*, 33: 207-220
- Andrade, C., Marques, F., Freitas, M.C., Cardoso, R. y Madureira, P. (2002): Shore platform downwearing and cliff retreat in the Portuguese west coast. In: Požar-Domac, A. (Ed.), *Littoral 2000, The Changing Coast*. EUROCOAST/EUCC, Porto, Portugal, pp. 423-431.
- Blanco Chao, R., Costa Casais, M., Martínez Cortizas, A., Pérez Alberti, A. y Trenhaile, A.S. (2003): Evolution and inheritance of a rock coast: western Galicia, northwestern Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28: 757-775.
- Blanco Chao, R., Pérez Alberti, A., Valcárcel Díaz, M. y Costa Casais, M. (2006): Alteración y abrasión en plataformas litorales: Canal Beagle (Argentina) y costa NW de la Península Ibérica. In: A. Pérez Alberti y J. López Bedoya (eds.) *Geomorfología y Territorio*. Servicio de Publicacións da USC, Santiago. pp. 323-336.
- Blanco-Chao, R., Pérez-Alberti, A., Trenhaile, A.S., Costa-Casais, M. y Valcárcel-Díaz, M. (2007): Shore platform abrasion in a para-periglacial environment, Galicia, northwestern Spain. *Geomorphology*, 83:136-151.
- Dickson, M.E., Kennedy, D.M. y Woodroffe, C.D. (2004): The influence of rock resistance on coastal morphology around Lord Howe Island, Southwest Pacific. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 629-643.
- Dickson, M.E. (2005): Shore platform development around Lord Howe Island, southwest Pacific. *Geomorphology*, 76: 295-315
- Flor, G. (1983): Las rasas asturianas: ensayo de correlación y emplazamiento. *Trabajos de Geología*, 13: 65-81.

- Flor, G. (1992): La marina. En: *Enciclopedia de La Naturaleza de Asturias*. La voz de Asturias. Tomo 6, (I):1-13 y (II): 17-18.
- Folk, R.L. y Ward, W.C. (1957): Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27: 3-26.
- Gómez-Pujol, L. y Fornós, J.J. (2004): Forma, procesos y zonación en el lapiaz –karren– litoral del sur de Menorca, 2: observaciones mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). In G. Benito, A. Díez Herrero (eds) *Contribuciones Recientes sobre Geomorfología*. SEG, CSIC: 357–364.
- Gómez-Pujol, L., Fornós, J.J. y Swantesson, J.A.H. (2006): Rock surface millimetre-scale roughness and weathering of supratidal Mallorcan carbonate coasts (Balearic Islands) *Earth Surface Processes and Landforms*, 31: 1792–1801.
- Haslett, S.K. y Curr, H.F. (1998): Coastal rock platforms and quaternary sea-levels in the Baie d’Audierne, Brittany, France. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 42: 507–515.
- Kanyaya, J.I. y Trenhaile, A.S. (2005): Tidal wetting and drying on shore platforms: an experimental assessment. *Geomorphology*, 70: 129–146.
- Kennedy, D.M. y Beban, J.G. (2005): Shore platform morphology on a rapidly uplifting coast, Wellington, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30: 823–832.
- Komar, P.D. y Gaughan, M.K. (1972): Airy wave theory and breaker height prediction. In: *Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers*. pp. 405-418.
- Shackleton, N.J. (1987): Oxigen Isotopes, ice volume and sea level. *Quaternary Science Reviews* 6, 183-190.
- Stephenson, W. J. y Kirk, R. M. (1996): Measuring erosion rates using the micro-erosion meter: 20 years of data from shore platforms, Kaikoura Peninsula, South Island New Zealand. *Marine Geology*, 131: 209–218.
- Stephenson, W.J. y Kirk, R.M. (1998): Rates and patterns of erosion on inter-tidal shore platforms, Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand. *Earth Surface, Processes and Landforms*, 23: 1071–1085.
- Stephenson, W.J. y Kirk, R.M. (2000): Development of shore platforms on Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand, II: the role of subaerial weathering. *Geomorphology*, 32: 43–56.
- Thornton, L.E. y Stephenson W.J. (2006): Rock strength: a control of shore platform elevation. *Journal of Coastal Research*, 22: 224-231.
- Trenhaile, A.S. (2000): Modeling the development of wave-cut shore platforms. *Marine Geology*, 166: 163–178.
- Trenhaile, A.S. (2001a): Modeling the effect of weathering on the evolution and morphology of shore platforms. *Journal of Coastal Research*, 17: 398–406.
- Trenhaile, A.S. (2001b): Modeling the effect of late Quaternary interglacial sea levels on wave-cut shore platforms. *Marine Geology*, 172: 205-223
- Trenhaile, A.S. (2002): Modeling the development of marine terraces on tectonically mobile rock coasts. *Marine Geology*, 185: 341-361
- Trenhaile, A.S. (2004): Modeling the effect of tidal wetting and drying on shore platform development. *Journal of Coastal Research*, 20: 1049–1060.
- Trenhaile, A.S. (2005): Modelling the effect of waves, weathering and beach development on shore platform development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30: 613–634
- Trenhaile, A.S. (2006): Tidal wetting and drying on shore platforms: an experimental investigation of surface expansion and contraction. *Geomorphology*, 76: 316–331.
- Trenhaile, A.S. (2008): Modeling the role of weathering in shore platform development. *Geomorphology*, 94:24–39
- Trenhaile, A.S. y Porter, N.J. (2007): Can shore platforms be produced solely by weathering processes?. *Marine Geology*, 241: 79-92
- Trenhaile, A.S., Pepper, D.A., Trenhaile, R.W. y Dalimonte, M. (1998): Stacks and notches at Hopewell Rocks, New Brunswick, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 975–988.
- Trenhaile, A.S., Pérez Alberti, A., Martínez Cortizas, A., Costa Casais, M. y Blanco Chao, R., (1999): Rock coast inheritance: an example from Galicia, Northwestern Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 605–621.
- Hearty, P.J., Hollin, J.T., Neumann, A.C., O’Leary, M.J. y McCulloch, M. (2007): Global sea-level fluctuations during the Last Interglaciación (MIS 5e). *Quaternary Science Reviews*, 26: 2090-2112

Manuscrito recibido el 14 de septiembre de 2009
Aceptado el manuscrito revisado el 16 de diciembre de 2009

