



DINÁMICA ESTACIONAL DE LOS PROCESOS DE METEORIZACIÓN EN CÁRCAVAS DEL PIRINEO CENTRAL

*Seasonal dynamic of weathering processes in badlands of the
Central Spanish Pyrenees*

E. Nadal-Romero, D. Regüés, C. Martí-Bono y P. Serrano Muela

*Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC), Campus de Alula Dei, Apdo. 202, 50192 Zaragoza
E-mail: estelanr@ipe.csic.es - Fax 976 71 60 19*

Resumen: Las cárcavas constituyen un elemento característico del paisaje en la Depresión Interior Altoaragonesa (Pirineo Central). La génesis y desarrollo de estas morfologías está favorecida por la litología margosa del substrato, la topografía y la estacionalidad climática. El objetivo principal de este trabajo es analizar y describir las relaciones espacio-temporales de los procesos de meteorización. El estudio se ha centrado en el seguimiento de algunas variables físicas que permiten contrastar temporalmente el desarrollo del regolito superficial, actuando como indicadores del estado de meteorización. Los resultados han facilitado la identificación de procesos, su secuencia cronológica y su relación con parámetros climáticos y topográficos. Destaca un importante contraste entre vertientes N y S, con mayor dinámica y desarrollo del regolito en laderas norte, dónde predomina la meteorización asociada a procesos de hielo-des-hielo además de una mayor disolución de carbonatos, mientras las laderas sur están más afectadas por procesos de humectación-deseccación y encostramiento.

Palabras claves: cárcavas, marga, meteorización, regolito, indicadores de estado físico, Pirineo Central.

Abstract: Badland morphologies are one of the most characteristic elements, due to abundance and hydro-sedimentological impact, in the Central Pyrenees. The genesis and development of badlands is favoured by bedrock lithology, topography and climate. The main purpose of this paper is to study geomorphological dynamics of these badlands and, particularly, the temporal and spatial relationships of the weathering processes. The study, performed in a small mountain catchment (45 ha) with a dense network of badlands (9 ha), is focused in the election and control of some physical variables that allow the temporal comparison of surface regolith development and that can be considered as weathering indicators of the marls. The results validate the methodology in use, favouring processes description, their chronological sequence and their relationship with climatic and topographic parameters. The development and dynamics of regolith on the north-facing slope is more active than on the south-facing slope. On the north-facing slope freeze-thawing are the main weathering processes, while on the south-facing slope prevails the crusting development associated to wetting-drying processes. On the other hand, the dissolution of carbonates is higher in the north exposition, and especially on the upper layers of the regolith, because to the washing effects and minor temperatures.

Keywords: badlands, marl, weathering, regolith, indicators of physical state, Central Pyrenees.



E. Nadal-Romero, D. Regüés, C. Martí-Bono & P. Serrano Muela (2006). Dinámica estacional de los procesos de meteorización en cárcavas del Pirineo Central. *Rev. C & G.*, 20 (1-2), 61-77.

1. Introducción

El término cárcava o “badland” ha sido tradicionalmente definido como “un paisaje natural, con vegetación escasa o inexistente y no apto para la agricultura” (Bryan y Yair, 1982). Su origen es fluvial y se caracteriza por una densa red de drenaje que da lugar a un paisaje de microcuencas, con fuertes pendientes en las que se desarrollan incisiones y profundos barrancos. Suelen desarrollarse en materiales poco consolidados, generalmente en medios áridos o semiáridos, donde son frecuentes tormentas de gran intensidad y largos períodos secos, aunque también aparecen en medios de montaña subhúmedos y fríos (Torri et al., 1994).

Estudios previos desarrollados en el Pirineo catalán (Regüés, 1995; Pardini, 1996) muestran que el desarrollo de estas morfologías en zonas subhúmedas está relacionado con una combinación de factores litológicos y topográficos, y con una climatología marcada por la estacionalidad térmica e hídrica. En este contexto, las cárcavas muestran una dinámica muy activa, con gran variedad de procesos que suelen producirse de manera rápida y eficaz. Esto explica que en ellas se produzcan tasas de erosión extremas (Brochot, 1993, Regüés et al., 2000a).

Trabajos realizados en el Pirineo Central (Beguiría, 2005) revelan la importancia de los afloramientos de litologías margosas como fuentes de sedimento, por la relativa amplitud de la extensión de sus afloramientos y su elevada actividad geomorfológica, que inhiben, por un lado, la colonización y estabilización de una cobertera vegetal y causan, por otro lado, el desarrollo y evolución de una densa red de cárcavas conectadas directamente con la red fluvial. De este modo, la marga, una roca dura en estado inalterado, por su elevado contenido en arcillas y carbonatos se muestra muy susceptible frente a la meteorización y, en consecuencia, posteriormente frente a la erosión. Así, estas áreas constituyen la principal fuente de sedimento (principalmente material fino en suspensión), como sucede en las cabeceras de los ríos Aragón y Gállego, afectando a su dinámica fluvial y al aterramiento de embalses.

El objetivo principal de este trabajo es comprender la dinámica geomorfológica de las morfologías acarcavadas en el Pirineo Central y más

detalladamente los procesos de meteorización que afectan a las margas eocenas, con el fin de identificar los principales procesos que intervienen en su dinámica, así como establecer las relaciones de estacionalidad espacial y temporal de dichos procesos. Asimismo, la información obtenida es indispensable para abordar posteriores estudios sobre procesos de erosión y de transporte y, de esta forma, alcanzar un entendimiento adecuado e integral de la dinámica de estas morfologías.

2. Área de estudio

El área de estudio se localiza en un amplio valle que estructuralmente pertenece a la Depresión Interior Altoaragonesa, también conocida localmente como Canal de Berdún. Se trata de un corredor elevado (500-800 m), con orientación esteoeste y cuya extensión alcanza 70 km de longitud (entre Sabiñánigo y Pamplona). El modelado fluvial del sector central corresponde al río Aragón, que recorre unos 40 km desde Jaca hasta el embalse de Yesa, mientras que el río Gállego atraviesa la Depresión de norte a sur por su sector más oriental (Solé Sabarís, 1942).

El desarrollo de áreas acarcavadas en la Depresión Interior Altoaragonesa, está asociado con el afloramiento de margas eocenas (marga de Larrés) (Mapa Geológico de España 1:50000, 1994). La abundante presencia de morfologías acarcavadas en la Depresión Interior Altoaragonesa, alrededor de 15 km² con más de 100 morfologías (entre Sabiñánigo y el embalse de Yesa), constituye un elemento paisajístico característico de toda la Depresión, representado un 2,5 % de la superficie total.

El clima, definido como submediterráneo de montaña, se caracteriza por una marcada estacionalidad, propiamente mediterránea pero con cierta influencia continental y atlántica. Las precipitaciones se distribuyen en dos estaciones húmedas y dos secas, con promedios anuales que oscilan entre 600 y 900 mm y una media de 85 días de lluvia al año. Las precipitaciones tienden a concentrarse principalmente en otoño (máximo primario) y primavera. El invierno no es muy seco, debido al paso frecuente de frentes, que pueden provocar precipitaciones en forma de nieve. En verano son habituales

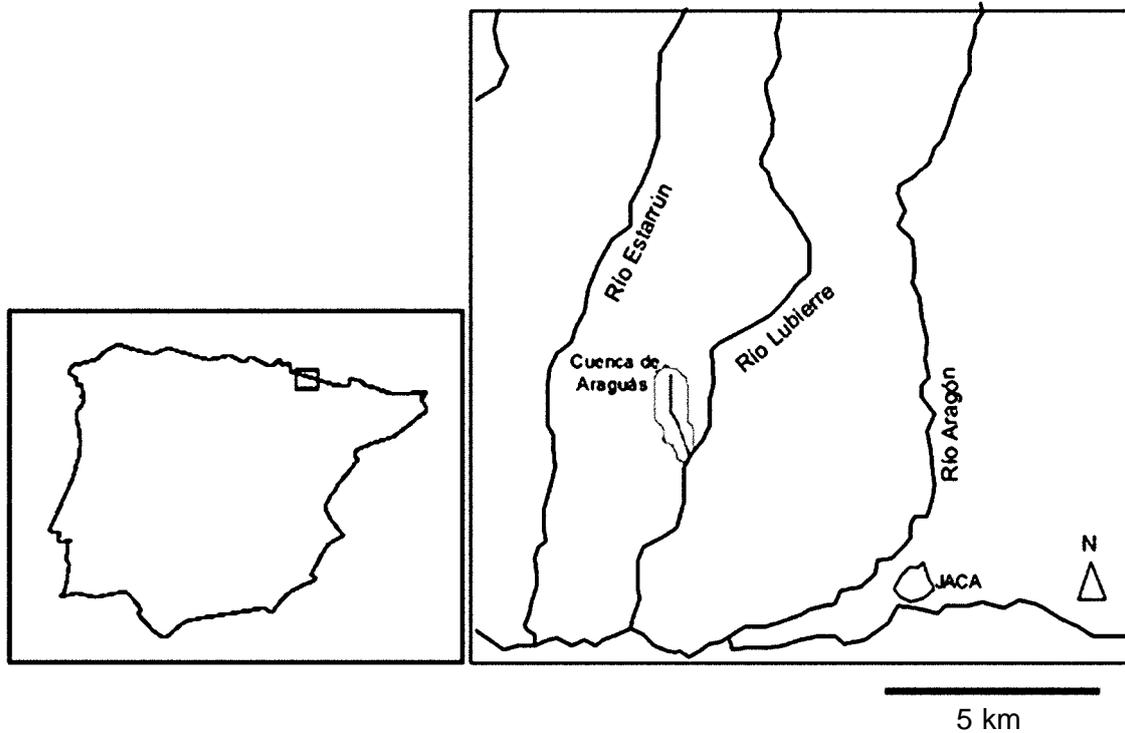


Figura 1. Localización del área de estudio.
Figure 1. Location of the area of study.

las tormentas convectivas, de corta duración pero alta intensidad. En otoño y primavera predominan las lluvias ciclónicas, de mayor duración, asociadas al paso de frentes y grandes borrascas.

La distribución de la vegetación está fuertemente determinada por el relieve y por las condiciones climáticas, litológicas y edáficas de la zona, además de estar afectada por factores locales como la exposición (solana/umbría). De forma general, el fondo de la Canal de Berdún ofrece un paisaje mediterráneo, con pinares, encinares y matorrales, que ahora sólo están presentes allí donde la presión humana ha sido menor. Esta última ha reducido las masas forestales a porciones marginales, predominando los campos de cereal y de forrajeras.

Para el estudio detallado de procesos de meteorización, erosión y transporte de sedimento se seleccionó la cuenca experimental de Araguás, situada en la zona central de la Canal de Berdún. Se trata de una pequeña cuenca con límites bien definidos, drenada por el barranco de la Rebullesa. Está

localizada a 8 kilómetros al noroeste de Jaca, junto a la localidad de Araguás del Solano (Fig. 1).

La extensión de la cuenca de Araguás es de 45 ha, con una energía de relieve de 325 metros entre la divisoria (1105 m) y el punto más bajo a la salida del torrente (780 m).

La parte superior de la cuenca está compuesta por Flysch eoceno, en delgados estratos alternantes de areniscas y margas, sobre el que se desarrolla un bosque de repoblación, realizada en las décadas de los sesenta y setenta, compuesto principalmente de pinos (*Pinus sylvestris* y *Pinus nigra*) y un sotobosque bien desarrollado, con presencia de boj (*Buxus sempervirens*) y aliaga (*Genista scorpius*).

La litología de la parte baja y media de la cuenca es la marga de Larrés (Fig. 2), compuesta principalmente por carbonatos, con un elevado contenido de calcita y dolomita (50 %), minerales arcillosos como la clorita y la illita (30 %) y cuarzo en menor proporción (20%). La marga es una roca dura, que al exponerse a la intemperie sufre cam-



Figura 2. Cuenca de Araguás, cárcavas vistas desde el Norte.
Figure 2. Araguás catchment, badlands view from the North.

bios importantes en su composición y estructura, causando la pérdida de cohesión y su meteorización. Como resultado de estos procesos se genera una capa superficial de roca alterada que se conoce como regolito. Estos cambios son más efectivos hacia la superficie, donde el regolito está más expuesto a las variaciones hídricas y térmicas y, en consecuencia, está más desarrollado. Así, las elevadas tasas de erosión que presentan estas morfologías están condicionadas por la tasa de meteorización y la disponibilidad de material susceptible de ser transportado. La dinámica de los procesos de meteorización y de erosión influye en la morfología superficial de las áreas acarcavadas. El diferente comportamiento de dichos procesos en las exposiciones norte y sur (Regüés et al., 2000b) suele ser un factor determinante en la dinámica y morfología de estas áreas. De hecho, la observación y el análisis de fotografías aéreas mostraron una cierta asimetría en la extensión de las áreas acarcavadas, reflejando que las vertientes umbrías (5,1 ha) son más susceptibles al acarcavamiento que las solanas

3,9 ha, siendo la proporción 60 y 40 % aproximadamente.

La vegetación en las cárcavas está limitada por las condiciones extremas (erosión y fuertes contrastes térmicos y de humedad), por el fuerte dinamismo que se sucede en las laderas y por la topografía (Cantón et al., 2004). Por ello, existe una distribución irregular de la cubierta vegetal. En las laderas sur esa cubierta está mucho más desarrollada, mientras que en las que miran al norte la vegetación es escasa, con un mayor número de laderas desnudas.

3. Metodología

El estudio de la meteorización física es complejo y requiere el seguimiento continuo del estado físico de la roca y su relación con las condiciones ambientales. Por este motivo, los estudios relativos a procesos de meteorización física son escasos,

siendo más abundantes los trabajos que estudian procesos químicos.

Estudios previos (Regüés et al., 2000b), destacan la exposición de la ladera como un factor determinante en la intensidad de los procesos de meteorización. Por este motivo, en el diseño del presente estudio se ha considerado la exposición como uno de los factores que intervienen en la meteorización de las margas. Así, fueron seleccionadas dos laderas como parcelas experimentales abiertas, representativas del área de estudio y con diferente exposición (Norte y Sur), en las que se han realizado los muestreos y mediciones que se exponen en este estudio. Los trabajos de muestreo se iniciaron en enero de 2004 y en el análisis que presenta este trabajo se han utilizado datos obtenidos entre el 5 de febrero de 2004 y el 17 de octubre de 2005, aunque todavía se mantiene el registro de datos en ambas parcelas.

3.1. Indicadores físicos

El estado de alteración del regolito puede determinarse a partir de la medición de propiedades físicas que actúan como indicadores (Regüés et al., 1995). Para ello fueron seleccionados tres indicadores: densidad aparente, resistencia mecánica superficial y resistencia al corte. Sin embargo, este último indicador fue descartado por las limitaciones que comporta el método de medición ("Vane Tester" o Molinete), pues requiere que el regolito presente un grado mínimo de humedad y este requisito se cumple raramente en las vertientes orientadas al sur.

3.1.1. Densidad aparente

Estudios previos demuestran que la densidad aparente es una variable adecuada para el seguimiento temporal del estado de alteración del regolito (Regüés et al., 1995). Esta variable proporciona una relación entre masa y volumen que, en comparación con la densidad aparente medida en marga inalterada, informa sobre el grado de cohesión que presenta el regolito. La toma de muestras se realiza mediante un tubo de acero inoxidable, cuyo diámetro interior es de 29 mm y se obtienen muestras a dos profundidades, 0-5 y 5-10 cm. Así, el volumen que se atribuye a las muestras es de 33,03 cm³.

Por otro lado, es importante señalar que se han llevado a cabo dos tipos de muestreo: un muestreo ordinario (semanal-quincenal) y un muestreo intensivo estacional (trimestral-semestral). Durante el muestreo ordinario se recogen 10 muestras por parcela (5 de 0-5 cm y otras 5 de 5-10 cm), mientras en el muestreo intensivo se recogen 20 muestras por parcela y profundidad. Hasta el momento, se han realizado 35 muestreos ordinarios (un total de 700 muestras) y 5 muestreos intensivos (un total de 400 muestras) (Tabla 1).

El muestreo ordinario informa sobre la variabilidad temporal de la densidad aparente, mientras el muestreo intensivo estacional permite validar los datos adquiridos a través de los muestreos ordinarios, ya que proporcionan información sobre la heterogeneidad espacial y su varianza, para determinar si las variaciones temporales observadas, a partir del reducido número de muestras adquiridas en el muestreo ordinario, son aceptables estadísticamente y representativas de la variabilidad temporal que experimenta la densidad aparente. Por tanto, este procedimiento ha permitido corroborar si las variaciones temporales detectadas a través de la densidad aparente son reales o un reflejo de la heterogeneidad espacial propia de la variable seleccionada. Así, las desviaciones típicas obtenidas en los muestreos estacionales determinan unos límites de tolerancia variables a lo largo del tiempo y, a su vez, característicos de unas determinadas condiciones climáticas y del estado físico del regolito.

3.1.2. Resistencia mecánica superficial

A través de la medición de la resistencia mecánica superficial es posible estimar el grado de encostramiento del regolito, dado que la costra superficial es una capa endurecida y densa asociada a la compactación (Farres, 1978). El encostramiento comporta también una importante pérdida de porosidad (Mc Intyre, 1958a y 1958b). Estas medidas se han obtenido mediante un penetrómetro de bolsillo Geotester G.Weber, y se han realizado con la misma frecuencia que el muestreo ordinario. En cada caso se han obtenido 10 medidas por parcela.

El penetrómetro da una idea de la dureza que presenta el regolito superficial, lo cual facilita unos valores comparativos del grado de alteración del

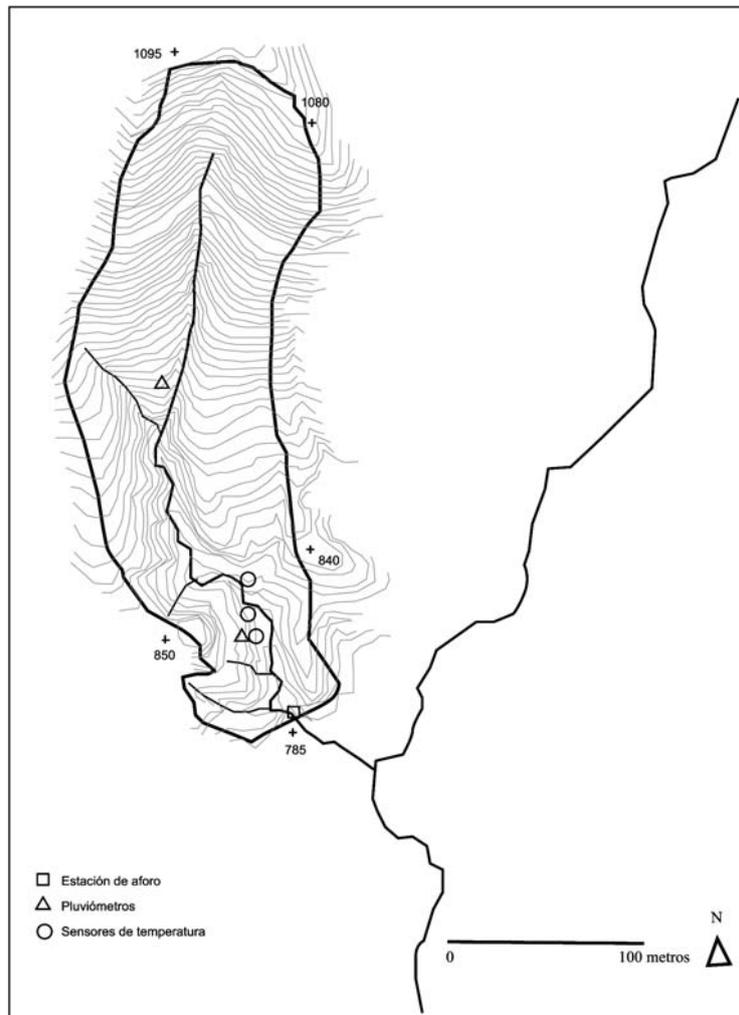


Figura 3. Mapa de instrumentación de la cuenca experimental de Aragón.
Figure 3. Instrumentation design of the Aragón experimental catchment.

regolito. La medida se obtiene presionando la punta del instrumento contra la superficie de la roca hasta que la punta del penetrómetro traspasa el nivel superficial, la fuerza máxima aplicada queda registrada en $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$.

3.2. Variables ambientales

3.2.1. Precipitación y temperatura ambiental

El estudio de procesos geomorfológicos requiere establecer balances entre entradas de energía y

las respuestas derivadas. En este sentido, los procesos de meteorización física están asociados a las energías implicadas en los cambios de estado del agua (Regüés et al., 2000b), mientras la erosión está estrechamente relacionada con procesos vinculados a la precipitación y la transferencia del agua. Por ello, para este trabajo se vienen registrando las precipitaciones mediante tres pluviómetros de cesta o balancín (Davis Instruments) y la instalación de una sonda para el registro cada media hora de la temperatura del aire (Hobo), localizada en la parte media de la cuenca. En la parte baja de cuenca, cerca de la desembocadura del

barranco (780 m s.n.m.), se ha ubicado uno de los pluviómetros. El segundo pluviómetro se instaló a 800 m s.n.m., sobre un rellano localizado en la cara norte (junto a la sonda que registra la temperatura del aire). Un tercer pluviómetro se instaló en la zona media de la cuenca (1000 m s.n.m.), en un antiguo campo de cultivo, hoy en día abandonado, localizado en la proximidad del límite superior de la zona acarcavada (Fig. 3).

3.2.2. Estado térmico e hídrico del regolito

La caracterización de los estados térmico e hídrico es indispensable, pues se trata de factores que intervienen en la meteorización física y, por tanto, afectan a la dinámica del regolito y son dependientes de la variabilidad climática estacional. En este caso también se tiene en cuenta el efecto de la exposición (Norte y Sur).

El contenido de humedad se ha estimado mediante la diferencia porcentual entre peso húmedo y peso seco, definida como humedad gravimétrica. Para ello se utilizan las muestras obtenidas manualmente para el seguimiento de la densidad aparente (0-5 y 5-10 cm) y se muestrea la capa superficial del regolito, que puede oscilar entre 1 ó 2 cm y que constituye en determinados momentos la llamada costra superficial.

Con respecto al seguimiento del estado térmico del regolito se registran las temperaturas cada media hora en dos perfiles monitorizados junto a las parcelas de muestreo. En este caso se utilizan sistemas de registro multicanal Hobo H8, al cual van conectadas cuatro sondas (Hobo, TMC6-HA). Estas sondas están instaladas a diferentes profundidades (1, 10, 20 y 30 cm) y en ambas exposiciones (Norte y Sur) para contrastar los regímenes térmicos en profundidad y su efecto sobre el desarrollo del regolito.

3.3. Meteorización química: disolución de carbonatos

El elevado contenido en carbonatos que presentan las litologías margosas, considerando su elevada solubilidad, es indicativo de la susceptibilidad que pueden presentar frente a procesos químicos de meteorización. Los carbonatos constituyen un elemento fundamental en la matriz de estas litologías

y, a su vez, actúan como cemento. Esto implica que su disolución motiva la pérdida de cohesión o meteorización de la roca y, por ello, es indispensable valorar la importancia de este proceso.

Para conocer el porcentaje de CaCO_3 , en las muestras de regolito, se ha usado la determinación gasométrica de CO_2 , método de estimación semi-cuantitativo, realizando calcimetrías. En el laboratorio se ha efectuado un centenar de análisis para determinar la presencia de carbonatos en las muestras mediante la técnica del *Calcímetro de Bernard*. Los análisis se han realizado en las muestras obtenidas en los muestreos ordinarios. Esto ha permitido considerar la variabilidad temporal y la espacial, tanto con respecto a la orientación (exposición Norte y Sur) como con la profundidad (costra superficial, 0-5 cm y 5-10 cm). Este procedimiento permite determinar, mediante comparación, la intensidad y efectividad con que se produce el proceso en relación con las variaciones estacionales de los regímenes térmicos e hídricos y la dinámica que presenta el regolito.

Asimismo, este procedimiento facilita el estudio de algunas interrelaciones entre los procesos químicos y físicos que intervienen en la meteorización de la marga.

4. Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos desde enero de 2004 han permitido establecer la dinámica temporal de los procesos de meteorización, demostrando una alta sensibilidad a las variaciones climáticas estacionales de los indicadores seleccionados. Asimismo, se han evidenciado diferencias significativas entre las vertientes, reflejadas en primer lugar en los regímenes térmico e hídrico y, lógicamente, en los indicadores de meteorización física y los análisis efectuados para el estudio de la meteorización química.

4.1. Indicadores del estado físico y régimen hídrico del regolito

La información proporcionada por los indicadores del estado físico del regolito ha permitido establecer una pauta general relativa a su dinámica anual. Con respecto a la densidad aparente, los

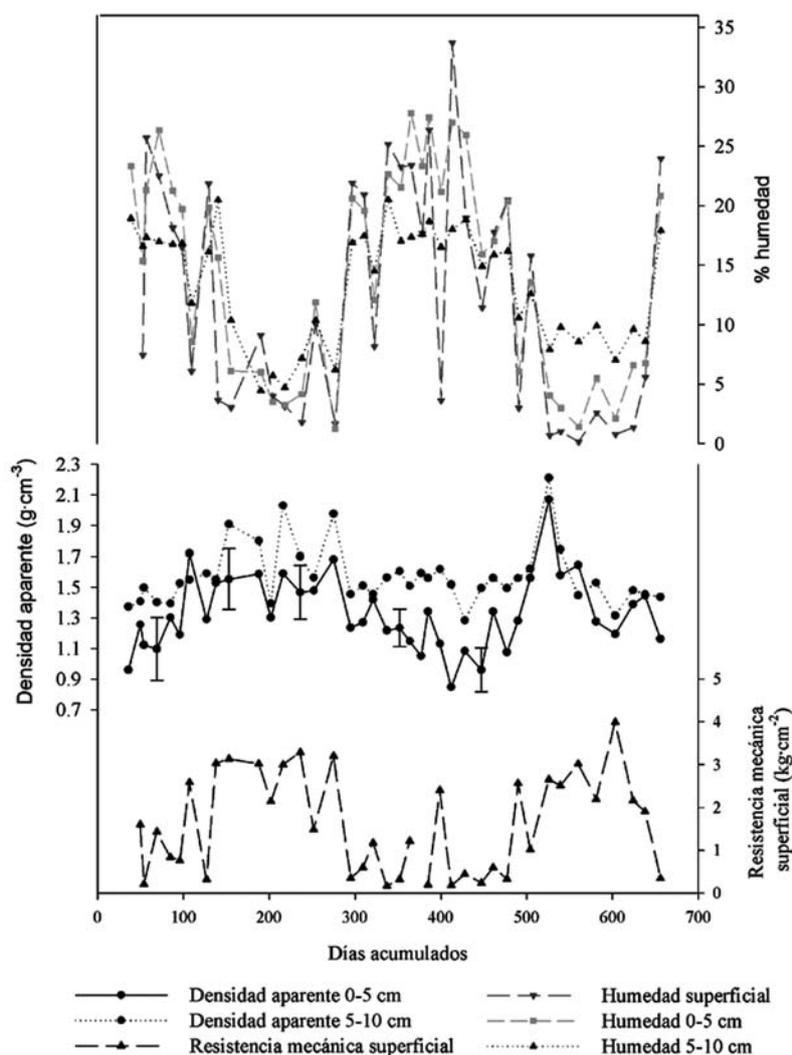


Figura 4. Evolución temporal de la densidad aparente, resistencia mecánica superficial y humedad del regolito en la ladera Norte.
 Figure 4. Regolith bulk density, crust resistance and moisture temporal evolution on the north-facing slope.

valores máximos se registran en verano; descienden durante el otoño, hasta alcanzar los mínimos en los meses invernales (siendo especialmente bajos si el regolito ha estado cubierto por un manto nival). Posteriormente, a lo largo de la primavera, se observa que la densidad aparente se va incrementando progresivamente.

Los valores de resistencia mecánica superficial muestran una elevada variabilidad a lo largo del año, incluso mayor que la observada en la densidad aparente. En cualquier caso, ambos indicadores

muestran una tendencia temporal paralela, coincidiendo los valores mínimos y máximos.

Los registros de humedad también muestran una marcada oscilación estacional, aunque la tendencia es inversa a la observada en los indicadores de estado físico. Así, los valores más bajos se han observado durante el periodo estival y los mayores entre otoño e invierno, lo cual está más asociado al potencial de evaporación (régimenes térmicos y niveles de radiación) que a la distribución estacional de las precipitaciones.

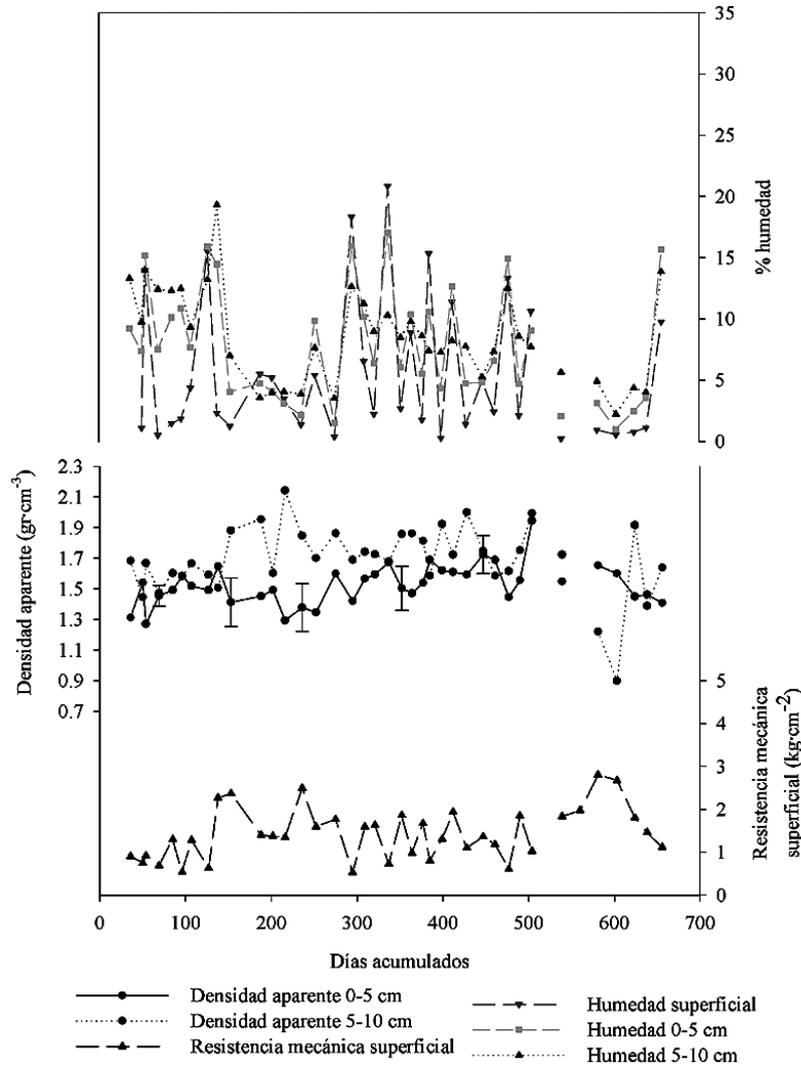


Figura 5. Evolución temporal de la densidad aparente, resistencia mecánica superficial y humedad del regolito en la ladera Sur.
 Figure 5. Regolith bulk density, crust resistance and moisture temporal evolution on the south-facing slope.

4.1.1. Ladera Norte

En la ladera Norte la densidad aparente muestra los mínimos absolutos, alcanzando en invierno valores inferiores a 1 gr·cm⁻³, mientras en verano los valores máximos superan los 2,1 gr·cm⁻³ (Fig. 4).

Las dos muestras (0-5 cm y 5-10 cm) tienen un comportamiento semejante a lo largo de todo el año, siendo los valores en profundidad algo más elevados en todos los casos, como consecuencia de

una menor exhibición y por lo tanto una menor alteración del regolito.

Con respecto a la humedad del regolito, las muestras recogidas a tres profundidades (costra superficial, 0-5 cm, y 5-10 cm) muestran una fuerte oscilación estacional relacionada de forma inversa con la temperatura, así los valores más bajos se registran en verano y los más elevados durante las estaciones frías. Los mayores contrastes se registran en la capa superficial, ya que ésta se halla más

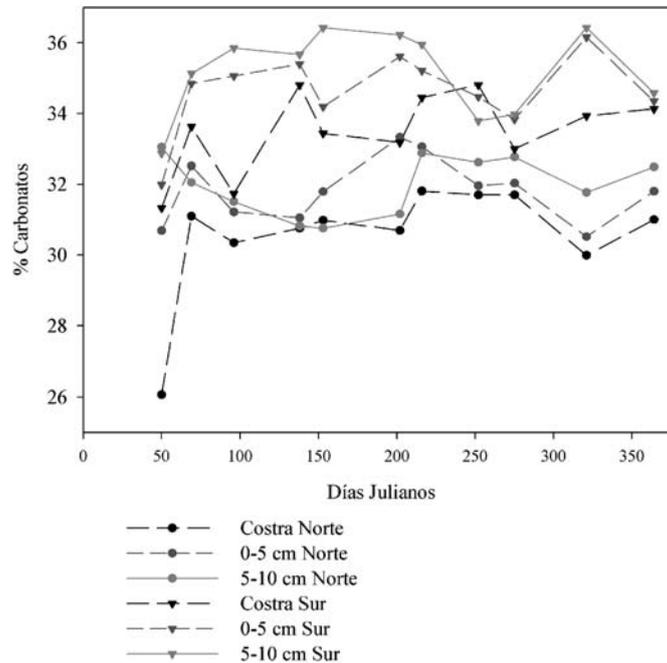


Figura 6. Contenido en carbonatos a lo largo del año, en las laderas Norte y Sur y a distintas profundidades del regolito.
 Figure 6. Carbonate Content along the year, in north and south-facing slopes and at different depths of the regolith.

expuesta a oscilaciones térmicas, viento, radiación, precipitación y rocío, lo cual favorece que el regolito esté permanentemente expuesto a procesos de humectación-desección.

4.1.2. Ladera Sur

En la ladera Sur los valores de densidad aparente, resistencia mecánica superficial y humedad gravimétrica muestran menos fluctuaciones que las observadas en la ladera Norte. Cabe destacar que los valores medios de densidad aparente y resistencia mecánica son mayores y los valores medios de humedad son inferiores (Fig. 5). Esta mayor estabilidad de los indicadores evidencia una menor intensidad y eficacia de los procesos de meteorización.

Por otro lado, entre las muestras tomadas a diferentes profundidades (densidad aparente y humedad) se observa que las mayores diferencias se registran en verano, lo que parece poner en evidencia que los procesos de humectación-desección afectan principalmente a los primeros centímetros del regolito superficial, mientras en profundidad pierden eficacia rápidamente.

4.2. Estado térmico del regolito

4.2.1. Oscilación térmica diaria

Un análisis inicial de los datos indica que las mayores oscilaciones las encontramos en superficie y en exposición Sur, debido a las diferencias en insolación o radiación directa, donde estas oscilaciones superan claramente la amplitud térmica del aire. Los registros obtenidos en la superficie del regolito indican que las temperaturas máximas son notablemente mayores en exposición Sur mientras las mínimas son claramente inferiores en la ladera Norte. Por otro lado, en ambas laderas la amplitud térmica disminuye rápidamente conforme se desciende en profundidad (Tabla 2), aunque en este caso se observan diferencias menos acentuadas entre ambas exposiciones. Lógicamente en profundidad los factores ambientales afectan en menor grado y por lo tanto, las temperaturas son más constantes a mayor distancia de la superficie, por ello los registros de temperatura por debajo de 20-30 cm muestran muy poca variación diaria.

Tabla 1. Diagrama de las fechas, días de muestreos y tipos de muestreo realizados en la cuenca de Araguás.
 Table 1. Diagram of the dates, days of samplings and sampling types carried out in the Araguás catchment.

Fechas de muestreo y análisis	Días acumulados	Estación	Indicadores físicos y variables ambientales	Análisis carbonatos
05/02/04	36	Invierno		
19/02/04	50	Invierno		
23/02/04	54	Invierno		
09/03/04	69	Invierno	Intensivo	
25/03/04	85	Primavera		
05/04/04	96	Primavera		
16/04/04	107	Primavera		
06/05/04	127	Primavera		
17/05/04	138	Primavera		
01/06/04	153	Primavera	Intensivo	
06/07/04	188	Verano		
20/07/04	202	Verano		
03/08/04	216	Verano		
23/08/04	236	Verano	Intensivo	
08/09/04	252	Verano		
01/10/04	275	Otoño		
21/10/04	295	Otoño		
04/11/04	309	Otoño		
16/11/04	321	Otoño		
02/12/04	337	Otoño		
17/12/04	352	Otoño	Intensivo	
29/12/04	364	Invierno		
11/01/05	377	Invierno		
19/01/05	385	Invierno		
02/02/05	399	Invierno		
15/02/05	412	Invierno		
03/03/05	428	Invierno		
22/03/05	447	Primavera	Intensivo	
05/04/05	461	Primavera		
21/04/05	477	Primavera		
04/05/05	490	Primavera		
18/05/05	504	Primavera		
09/06/05	526	Primavera		
22/06/05	539	Verano		
13/07/05	560	Verano		
03/08/05	581	Verano		
25/08/05	603	Verano		
15/09/05	624	Verano		
29/09/05	638	Otoño		
17/10/05	656	Otoño		

4.2.2. Las oscilaciones térmicas en torno a 0 °C

El descenso de la temperatura del regolito junto con la presencia de humedad, provoca el crecimiento de cristales de hielo, especialmente en la porosidad del regolito más superficial. Por otro lado, muchos autores han reconocido que los ciclos de hielo y deshielo inducen a cambios físicos, que afectan a la cohesión, la densidad aparente y la resistencia del regolito entre otras (Ferrik, 2005).

Por ello, en este trabajo, y a partir de las temperaturas medias, máximas y mínimas diarias se ha utilizado el criterio de clasificación de Raso Nadal y García Loureiro (1998). Con ello se ha establecido el número de días de helada, y de esta forma se ha determinado y valorado el efecto de estos ciclos de hielo-deshielo en la dinámica del regolito.

-Días de helada: medias, máximas y mínimas inferiores a 0 °C

Tabla 2. Máximas amplitudes térmicas registradas en el regolito (Norte-Sur) y la temperatura del aire.
 Table 2. Maximum daily temperature oscillation recorded in the regolith (North-South) and the air temperature.

Máximas amplitudes térmicas (°C)	1 cm	10 cm	20 cm	30 cm	Aire
Norte	28,97	9,65	4,19	2,67	27,25
Sur	31,75	17,91	9,93	5,34	27,25

-Días con tendencia al deshielo: mínimas inferiores a cero y máximas y medias superiores a 0 °C

-Días con tendencia a la helada: mínimas y medias inferiores a cero y máximas superiores a 0 °C

Se observa que en la ladera Norte los días de helada alcanzan incluso la capa más profunda del perfil (30 cm). En todo caso la frecuencia de heladas es mayor en las capas superficiales y desciende en profundidad, y por lo tanto existe un potencial mayor de formación de cristales de hielo. Por otro lado, en la ladera Sur los días de helada son inexistentes (Tabla 3), lo cual implica diferencias muy significativas en cuanto a la posible acción de procesos de meteorización física derivados del hielo-deshielo.

Así, algunos procesos de meteorización están asociados a variaciones térmicas que inducen a cambios de estado del agua y producen generalmente importantes cantidades de energía (Regüés et al., 2000b). En este sentido, es importante subrayar que las diferencias observadas, en el contenido hídrico y el régimen térmico, entre exposición Norte y Sur sugieren claramente que las energías implicadas en los procesos de meteorización, tanto

físicos como químicos, deben diferir bastante en ambas exposiciones, siendo mayores las producidas en las laderas Norte.

4.3. Análisis estadísticos

4.3.1. Muestreo intensivo estacional

La información obtenida a través del muestreo estadístico estacional, no solamente ha permitido validar la información proporcionada por el muestreo ordinario, también ha servido para determinar similitudes y diferencias entre los valores de densidad aparente obtenidos en periodos estacionales diferentes. En otras palabras, se ha analizado cómo son de importantes las diferencias observadas entre los valores de densidad aparente medidos en distintos momentos estacionales.

Para adquirir esta información se ha aplicado un análisis estadístico de la varianza (ANOVA) con los valores medios y las desviaciones estándar de la densidad aparente, de los días en los que se han realizado muestreos intensivos.

Tabla 3. Clasificación de los regímenes térmicos que afectan al regolito, basada en Raso Nadal y García Loureiro (1998), en las laderas Norte y Sur.

Table 3. Classification of the thermal patterns affecting the regolith, according to Raso Nadal and García Loureiro (1998), on the North and South facing slopes.

Norte	1 cm	10 cm	20 cm	30 cm
Días de helada	56	56	43	27
Días con tendencia al hielo	42	7	2	0
Días con tendencia al deshielo	27	3	4	3
Total	135	66	49	30
Sur	1 cm	10 cm	20 cm	30 cm
Días de helada	0	0	0	0
Días con tendencia al hielo	65	15	3	0
Días con tendencia al deshielo	4	2	0	0
Total	69	17	3	0

Los resultados indican que la heterogeneidad espacial observada en los muestreos de densidad aparente es inferior a la variabilidad temporal estacional (Tabla 4) entre muestras de una misma parcela. Sin embargo, esta observación sólo es válida para los valores obtenidos en la ladera Norte, pues el análisis de las muestras de la parcela Sur indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las series de datos estacionales y, por tanto, se puede asumir que la variable considerada no muestra cambios temporales determinantes.

Por otro lado, los resultados obtenidos en la parcela con exposición Norte tampoco han revelado un nivel aceptable de significación estadística (< 5%) sin embargo, los resultados han mostrado diferencias suficientemente amplias en algunos casos (en los que los coeficientes determinados por ANOVA están rozando la significación estadística) que permiten extraer conclusiones interesantes. Las mayores diferencias se producen entre invierno y primavera, siendo estas diferencias menores entre invierno y verano o primavera y otoño, mientras la serie de verano es muy similar a la de otoño y no hay diferencias entre primavera y verano e invierno con otoño.

4.3.2. Correlaciones lineales

Para profundizar en las relaciones existentes entre todas las variables estudiadas se ha aplicado el índice de correlación lineal de Pearson. El análisis se ha realizado a partir de una serie de 38 observaciones para todas las variables.

Como valoración general, las relaciones estadísticas obtenidas entre los indicadores físicos del regolito y las variables ambientales son mejores en la ladera Norte que en la ladera Sur. Así, en la ladera Norte, la densidad (0-5 cm) y la humedad (0-5 cm) se correlacionan entre sí, aunque de manera negativa ($r = -0,773$), mientras se observan buenas correlaciones con la variables térmicas. Las mismas relaciones se han obtenido con respecto a la resistencia mecánica superficial, aunque en este caso la variable mejor correlacionada es la humedad de la costra ($r = -0,862$). Sin embargo, ninguno de los dos indicadores muestra una buena correlación con la precipitación. Por otro lado, es importante destacar la buena correlación existente entre la densidad aparente (0-5 cm) y la resistencia mecánica superficial ($r = 0,743$).

En cambio, en la ladera Sur sólo se han observado correlaciones significativas entre la densidad aparente y las temperaturas del aire y del regolito a 1 y 10 cm de profundidad (Tabla 5). Mientras la resistencia mecánica superficial solamente muestra correlaciones estadísticamente significativas con la humedad de la costra ($r = -0,473$) y la humedad 0-5 cm ($r = -0,457$).

4.4. Contenido en carbonatos (calciometrías)

Los resultados obtenidos a partir de las calciometrías demuestran que existe algún tipo de relación entre el contenido en carbonatos y la orientación de la vertiente, la profundidad del regolito y la estación climática.

Así, se ha observado en todos los análisis una mayor presencia de carbonatos en profundidad (5-10 cm) y en laderas orientadas hacia el Sur (Fig. 6). Asimismo, parece que durante las estaciones frías y húmedas los porcentajes de carbonatos son sensiblemente menores que durante las estaciones más cálidas y secas. En este sentido, conviene tener en cuenta que la solubilidad del CaCO_3 aumenta inversamente con la temperatura del agua.

5. Discusión y conclusiones

Los resultados obtenidos han demostrado la validez de la metodología aplicada, pues los indicadores seleccionados se han revelado muy sensibles a la dinámica del regolito.

Los resultados confirman la influencia de la orientación en la intensidad y eficacia de los procesos de meteorización, reflejando que las vertientes umbrías son más susceptibles al acarcavamiento que las vertientes solanas. Esto coincide con estudios previos realizados en cárcavas desarrolladas en condiciones similares, aunque en el Pirineo oriental (Regüés, 1995). De este modo, se comprueba que estas áreas acarcavadas de montaña sub-húmeda son más una consecuencia de la agresividad de las condiciones climáticas y la intensidad de los procesos geomórficos que del déficit hídrico, que estaría más relacionado con cárcavas desarrolladas en medios áridos y semiáridos, donde la cobertera vegetal se desarrolla con mayor eficacia en vertientes umbrías (Solé et al., 1997).

Tabla 4. Resultado del análisis estadístico (ANOVA) aplicado sobre las medias y desviaciones típicas de los valores de densidad aparente obtenidos a partir del muestreo intensivo estacional. El nivel de significación estadística considerado es 0,05.

Table 4. Statistical analyses (ANOVA) performed with the averages and standard deviations of bulk density values from the intensive seasonal sampling. The level of significant statistical correlation considered is 0.05.

	Norte	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
Invierno					
Primavera		0,083			
Verano		0,205	1		
Otoño		1	0,361	0,894	

Asimismo, estudios previos han asociado la escasez o ausencia de cubierta vegetal a la incapacidad de la vegetación de colonizar unas laderas altamente inestables, como consecuencia de su fuerte dinamismo (Regüés et al., 2000b). Todo ello es de gran importancia, pues es reflejo de diferencias significativas con cárcavas de climas más cálidos y semiáridos, donde el ritmo de desarrollo y las tasas de erosión son menores que en estas zonas más frías y húmedas.

La meteorización física de la marga inalterada y el desarrollo del regolito coinciden con porcentajes elevados de humedad y valores bajos de temperatura. De este modo, se ha observado un descenso progresivo de la densidad aparente y de la resistencia mecánica superficial durante las estaciones frías, otoño e invierno (Nadal-Romero et al., 2004). Además, los valores mínimos de estos indicadores coinciden con momentos en los que las condiciones climáticas favorecen la acción continuada del hielo-deshielo. En este sentido, Hall (2004) destaca el gran protagonismo de estos procesos como agente destructor de rocas en regiones húmedas y frías. Asimismo, se ha observado que el desarrollo del regolito es más rápido cuando se encuentra bajo la cubierta de un manto nival durante algunos días. Esta observación coincide también con estudios que indican la eficacia de estas condiciones en la alteración de rocas arcillosas (Regüés, 1995) idóneas para la génesis de la morfología denominada "popcorn" (Regüés et al., 1995) que es característica del máximo estado de degradación de rocas arcillosas o margas. Así, las vertientes umbrías presentan mejores condiciones para alcanzar el máximo estado de degradación de la marga, con un mayor desarrollo de la morfología "popcorn". En este caso el espesor de regolito alterado puede afectar hasta 10 o 15 cm.

Por otro lado, se observa que el incremento de la densidad aparente y la resistencia mecánica superficial coincide con el aumento de las temperaturas y de la radiación. En estas condiciones se produce un descenso importante de la humedad superficial, asociado a una mayor evaporación, y el regolito muestra mayor fragilidad frente al impacto de las gotas de lluvia. En este sentido, Bryan (1971) observa que los agregados secos son menos resistentes frente al "splash". Regüés y Torri (2002) asocian los suelos secos con una mayor susceptibilidad al descenso de la rugosidad superficial, también relacionado con el "splash". De este modo, durante los meses de primavera y verano el efecto combinado de precipitaciones y desecado causa una compactación progresiva del regolito, que también ha sido observada en estudios antecedentes (Regüés y Gallart, 2004). Así, en esta situación el regolito superficial experimenta los siguientes cambios estructurales:

- la redistribución y acumulación del material disperso en las pequeñas concavidades, que motiva el descenso progresivo de la rugosidad superficial y de la macro-porosidad.

- la eliminación del sedimento disperso, transportado por la escorrentía superficial, evidenciada por la formación de regueros a lo largo de las vertientes y acumulaciones de sedimento formando abanicos deposicionales al pie de las mismas.

- la pérdida de volumen que experimenta la marga al deshidratarse, que motiva la aparición de grietas de retracción.

Los cambios estructurales asociados a estos procesos favorecen el encostramiento superficial del regolito. Es en este momento cuando se alcanzan los valores elevados de densidad aparente y resistencia mecánica superficial.

Tabla 5. Correlaciones lineales calculadas entre los indicadores de estado físico del regolito y el resto de variables consideradas.

Los niveles de significación considerados son: *p-nivel<0,05 **p-nivel<0,01.

Table 5. Lineal correlations calculated between the regolith physical state indicators and the other considered variables.

Significance levels considered are: *p-level<0.05 **p-level<0.01.

<i>Ladera Norte</i>	<i>Densidad 0-5 cm</i>	<i>Densidad 5-10 cm</i>	<i>Resistencia Mecánica Superficial</i>
Días de muestreo			
Densidad 0-5 cm	1		
Densidad 5-10 cm	0,620**	1	
Resistencia Mecánica Superficial	0,743**	0,631**	1
Temperatura del aire	0,660**	0,594**	0,629**
Oscilación térmica del aire	0,323	0,401*	0,521**
Oscilación térmica 1 cm	0,608**	0,573**	0,673**
Oscilación térmica 10 cm	0,717**	0,529**	0,699**
Temperatura 1 cm	0,676**	0,566**	0,663**
Temperatura 10 cm	0,693**	0,563**	0,663**
Humedad de la costra	-0,673**	-0,460*	-0,862**
Humedad 0-5 cm	-0,773**	-0,628**	-0,787**
Humedad 5-10 cm	-0,649**	-0,646**	-0,710**
Precipitación	0,076	0,002	-0,239
<i>Ladera Sur</i>	<i>Densidad 0-5 cm</i>	<i>Densidad 5-10 cm</i>	<i>Resistencia Mecánica Superficial</i>
Días de muestreo			
Densidad 0-5 cm	1		
Densidad 5-10 cm	-0,201	1	
Resistencia Mecánica Superficial	0,001	0,354	1
Temperatura del aire	-0,671**	0,242	0,368
Oscilación térmica del aire	-0,066	0,159	0,288
Oscilación térmica 1 cm	-0,081	0,379	0,367
Oscilación térmica 10 cm	-0,141	0,354	0,381
Temperatura 1 cm	-0,659**	0,192	0,319
Temperatura 10 cm	-0,667**	0,199	0,313
Humedad de la costra	0,020	0,202	-0,473*
Humedad 0-5 cm	0,048	-0,546**	-0,457*
Humedad 5-10 cm	-0,007	-0,616**	-0,308
Precipitación	-0,304	-0,141	-0,212

El análisis de carbonatos indica que existe un porcentaje de carbonatos mayor en las capas profundas, debido al mayor lavado que experimentan las capas superficiales del suelo. De este modo, se ha observado que en la ladera Sur hay una mayor presencia de carbonatos debido a la menor disponibilidad de agua y mayores temperaturas.

Las diferencias observadas entre vertientes con orientación opuesta demuestran que la intensidad y persistencia de los procesos de meteorización (hielo-deshielo) es mayor en las laderas de exposición Norte, mientras que los procesos asociados al encostramiento (húmedación-desección) predo-

minan en las laderas de exposición Sur (Pardini et al., 1996, Regüés et al., 2000b). En estas condiciones es lógico observar un desarrollo y una dinámica mayor en las vertientes umbrías, reflejado en una mayor heterogeneidad espacio-temporal del estado físico del regolito, con respecto a las vertientes solanas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con el apoyo de los siguientes proyectos: "Procesos hidrológicos en

cuenca pirenaicas en relación con cambios de uso del suelo y fluctuaciones climáticas” (PIRIHEROS, REN 2003-08678/HID) y “Caracterización y modelización de procesos y regímenes hidrológicos en cuencas aforadas para la predicción en cuencas no aforadas” (CANOA, CGL 2004-04919-C02-01). La monitorización de la cuenca también ha sido financiada mediante el convenio entre el CSIC y el Ministerio de medio ambiente (Proyecto RESEL). Asimismo, el primer autor cuenta con una beca predoctoral I3P concedida por el CSIC junto al Programa Social Europeo. Por último los autores desean expresar su agradecimiento a Noemí Lana-Renault, Eugenio Mingo, Ethel Navarro y Jérôme Latron por su colaboración en algunas tareas de campo, al Dr. José María García Ruiz por su ayuda en la selección del área de estudio y al Dr. Ignasi Queralt por los análisis mineralógicos de las margas.

Referencias bibliográficas

- Beguería, S. (2005). *Identificación y características de las fuentes de sedimento en áreas de montaña: erosión y transferencia de sedimento en la cuenca alta del río Aragón*. Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Zaragoza, 158 pp.
- Brochot, S. (1993). Modélisation du comportement hydrologique et érosive des bassins versants expérimentaux de Draix (Alpes de Aute-Provence). En : *Erosion de badlands dans le système Durance-Etang de Berre, 1ère partie*. pp. 32 CEMAGREF eds. Grenoble.
- Bryan, R.B. (1971). The efficiency of aggregation indices in the comparison of some English and Canadian soils. *Journal of Soil Sciences*, 22, 166-178.
- Bryan, R.B. & Yair, A. (1982). Perspectives on studies of badland geomorphology. En: *Geomorphology and Piping*. (R. Bryan & A. Yair, eds.). Norwich, 1-12.
- Cantón, Y., Del Barrio, G., Solé-Benet, A. & Lázaro, R. (2004). Topographic controls on the spatial distribution of ground cover in the Tabernas badlands of SE Spain. *Catena*, 55, 341-365.
- Fares, P. (1978). The role of time and aggregate size in the crusting process. *Earth Surface Processes*, 3, 243-254.
- Ferrik, M.G. & Gatto, L.W. (2005). Quantifying the effect of a freeze-thaw cycle on soil erosion: laboratory experiments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 1305-1326.
- Hall, K. (2004). Evidence for freeze-thaw events and their implications for rock weathering in northern Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 43-57.
- Mapa Geológico de España (1:50000)*. Instituto Tecnológico Geominero de España. Jaca 176, 28-9. Madrid, 1994.
- Mc Intyre D.S. (1958a). Permeability measurements of soil crust formed by raindrop impact. *Soil Science*, 85, 188-189.
- Mc Intyre D.S. (1958b). Soil splash and the formation of surface crust by raindrop impact. *Soil Science*, 85, 261-266.
- Nadal-Romero, E., Regüés, D., Martí-Bono, C., Serrano, P. & Lana-Renault, N. (2004). Regolith development and dynamics in a Pyrenean badland area: methodology and preliminary results. En: *Progress in surface and subsurface water studies at the plot and small basin scale*. (D. Tropeano, M. Arattano, F. Maraga, C. Pelissero, eds.). European Network of Representative Basins, Torino, 284-287.
- Pardini, G. (1996). *Evoluzione temporale della microtopografia superficiale, della micromorfologia e della struttura in relazione ai processi di meteorizzazione nelle marne smectitiche di Vallcebre*. Ph. D. Thesis. Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica. Facultat de Ciències Geològiques. Universitat de Barcelona. 409 pp.
- Pardini G., Vigna Guidi G., Pini R., Regüés D. & Gallart F. (1996). Structure and porosity of smectitic mudrock as affected by experimental wetting-drying cycles and freezing-thawing cycles. *Catena*, 27, 149-165.
- Raso Nadal, J.M. & García Loureiro M.C. (1998). Oscillacions termomètriques a l'entorn de 0 °C a Andorra. En: *Procesos biofísicos actuales en medios fríos*. Publicaciones de la Universitat de Barcelona. Barcelona, 55-71.
- Regüés, D. (1995). *Meteorización física en relación con los procesos de producción y transporte de sedimentos en un área acaravada*. Ph. D. Thesis. Universidad de Barcelona, 302 pp.
- Regüés D., Pardini G. & Gallart F. (1995). Regolith behaviour and physical weathering of clayey mudrock as dependent on seasonal weather conditions in a badland area at Vallcebre, Eastern Pyrenees. *Catena*, 25 (1-4), 199-212.
- Regüés D., Balasch J.C., Castellort X., Soler M. & Gallart F. (2000a). Relación entre las tendencias temporales de producción y transporte de sedimentos y las condiciones climáticas en una pequeña cuenca de montaña mediterránea (Vallcebre, Pirineos orientales). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 26, 41-65.
- Regüés, D., Guàrdia, R. & Gallart, F. (2000b). Geomorphic agents versus vegetation spreading as causes of badland occurrence in a Mediterranean subshumid mountainous area. *Catena*, 40, 173-187.
- Regüés D. & Torri D. (2002). Efecto de la energía cinética de la lluvia sobre la dinámica de las propiedades físicas y el encostramiento en un suelo arcilloso sin vegetación. *Cuaternario y Geomorfología*, 16 (1-4), 57-71.
- Regüés D. & Gallart F. (2004). Seasonal patterns of runoff and erosion responses to simulated rainfall in a badland area in mediterranean mountain conditions (Vallcebre, southeastern Pyrenees). *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 755-767.
- Solé Sabaris, L. (1942). La Canal de Berdún. En: *Primera Reunión de Estudios Geográficos*, 7, 271-318. Madrid.

- Solé A., Calvo A., Cerdà A., Lázaro R., Pini R., Barbero J. (1997). Influences of micro-relief patterns and plant cover on runoff related to processes in Badlands from Tabernas (SE Spain). *Catena*, 31, 28-38.
- Torri, D., Colica, A. & Rockwell, D. (1994): Preliminary study of the erosion mechanisms in a biancana badland (Tuscany, Italy). *Catena*, 23, 281-294.