



**PROCESOS DE EROSIÓN EN UNA ZONA DE CLIMA  
SEMIÁRIDO DE LA DEPRESIÓN DEL EBRO  
(BARDENAS REALES, NE DE ESPAÑA)**

*Erosion processes on a semiarid climatic area of the Ebro Depression  
(Bardenas Reales, NE Spain)*

C. Marín & G. Desir

*Dpto. Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza.  
C/Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza. cimarín@unizar.es*

**Resumen:** En la depresión erosiva de Bardenas Reales tienen lugar varios procesos de erosión: *rilling*, *gullyng*, *pipng*, movimientos de masas, y en menor orden la formación de *armored mud balls*. El mayor o menor desarrollo de todos estos procesos guarda relación con las condiciones meteorológicas de la zona y con las características físico-químicas de los materiales. El principal condicionante de los mecanismos y procesos de erosión actuantes en esta área son las propiedades físico-químicas del material y la distribución de las precipitaciones a lo largo del año. Otros factores, como la pendiente, condicionan la infiltración de la escorrentía lo que inhibe el desarrollo del *pipng* y favorece la formación de deslizamientos y coladas de barro.

**Palabras clave:** procesos de erosión, propiedades físico-químicas, condiciones climáticas, Depresión del Ebro.

**Abstract:** Some different erosion processes take place on the Bardenas Reales erosive depression: *rilling*, *gullyng*, *pipng*, mudslides, and armored mud balls.. The major or minor development of these processes is related with climatic conditions and physico-chemical characteristics of the materials. Precipitation distribution along the year conditions the presence of mudslides or armored mud balls. Physico-chemical conditions favour the formation of *gullyng* and *rilling*. Other factors, such as slope, expedite runoff infiltration (needed for *pipng*) and the slide of mudslides.

**Keywords:** erosion processes, physico-chemical properties, climatic conditions, Ebro Depression.



C. Marín & G. Desir (2010). Procesos de erosión en una zona de clima semiárido de la depresión del Ebro (Bardenas Reales, NE de España). *Rev. C. & G.*, 24 (3-4), 63-72.

## 1. Introducción

La erosión del suelo es uno de los problemas medioambientales más importantes que se conocen (López Bermúdez, 2002; García Ruiz y López Bermúdez, 2009). Se trata de un conjunto de procesos que movilizan las partículas de suelo (Kirkby, 1980), provocando una reducción tanto de su capacidad productiva como de su diversidad vegetal (López Bermúdez, 2008). Por lo general, la erosión es un proceso natural continuo que contribuye a modelar la superficie terrestre (Zachar, 1982; López Bermúdez, 2008; García Ruiz y López Bermúdez, 2009), tratándose de un proceso geológico lento. Sin embargo, en algunas zonas y bajo unas determinadas condiciones se produce una erosión acelerada, generalmente relacionada con actividades humanas (Kirkby, 1980; Middleton y Thomas, 1997; Toy et al., 2002), siendo más evidente en zonas donde los suelos presentan un escaso desarrollo.

Los factores que condicionan la erosión hídrica son varios: 1) el clima, que controla la cantidad e

intensidad de las precipitaciones en una zona (Toy et al., 2002); 2) la litología, ya que no todos los materiales presentan la misma facilidad a ser erosionados (Bryan, 1977; Agassi, 1996) y 3) la pendiente, a mayor pendiente, mayor erosión (McCool et al., 1987). Además de los factores condicionantes, es preciso conocer también los procesos mediante los cuales actúa la erosión (Desir y Marín, 2009a). En trabajos previos sobre procesos de erosión realizados en áreas de similares condiciones climáticas se ha observado como estos procesos pueden generar morfologías distintas. También se ha observado que las formas de erosión pueden presentar un mayor o menor grado de desarrollo dependiendo de la intensidad, del tiempo y de las características físicas y químicas de los materiales (Campbell, 1989).

En España, el riesgo por erosión supone el 10,8% del total de pérdidas económicas, lo que representa 5.228 millones de euros (Ayala et al., 1987). En Bardenas Reales, el riesgo potencial de erosión está clasificado como muy alto (Donezar et al., 1990). Según el Inventario Nacional de Erosión

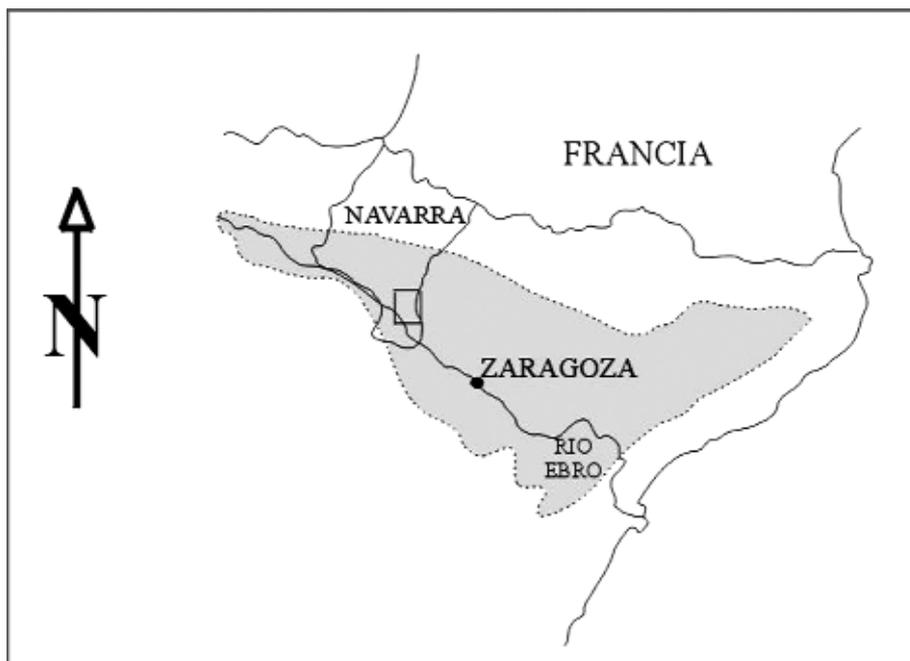


Figura 1. Mapa de situación de las Bardenas Reales.  
Figure 1. Geographic map showing Bardenas Reales.

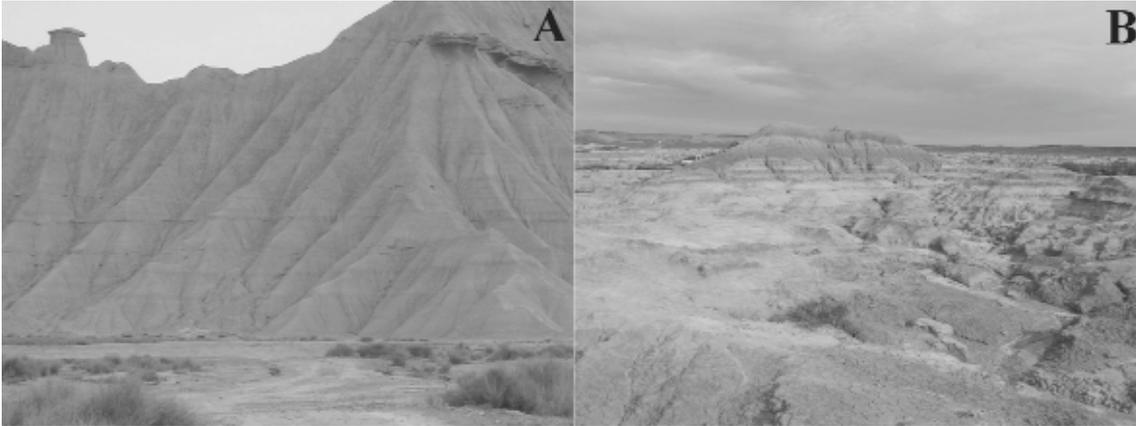


Figura 2. (A) Vista general de las arcillas terciarias (B) Vista de los depósitos holocenos.  
 Figure 2. (A) General view of the tertiary clays (B) General view of the Holocene deposits.

de Suelos 2002-2012 (2003), en la zona de Bardenas Reales, la pérdida media anual de suelo es de 9,4 Tm/Ha/año. Sin embargo, estudios previos realizados por Sirvent et al., (1997) y Desir y Marín (2007) mediante microcuencas instrumentadas señalan que esta pérdida es de 32,03 Tm/Ha/año para materiales terciarios y de 77,21 Tm/Ha/año en el caso de materiales holocenos. De ello se desprende que tan importante es cuantificar la erosión como identificar los procesos que intervienen. En la zona de estudio, la evolución del paisaje está controlada por la litología y las características climáticas, que a su vez condicionan los procesos de erosión. El principal objetivo de este trabajo es identificar estos procesos y conocer su mayor o menor incidencia.

## 2. Área de estudio

Las Bardenas Reales se sitúan al sureste de la provincia de Navarra, de la que ocupan 41.845 Has. Conforman un espacio protegido entre los ríos Aragón y Ebro, dentro de la depresión terciaria del Ebro (Figura 1). Comprende una depresión erosiva central rodeada de zonas más elevadas, donde los márgenes están constituidos por arcillas terciarias pertenecientes a la Formación Tudela (Mioceno inferior-medio) (Solé Sedo, 1977; Castiella et al., 1978). Estas arcillas presentan una potencia apro-

ximada de 320 m, con intercalaciones de calizas lacustres, areniscas y yesos (Leránoz, 1993; Faci et al., 1997; Murelaga, 2000). Las calizas que aparecen intercaladas se van haciendo más potentes hacia el techo del depósito, superando en algún caso los 2 m. de potencia (Leránoz, 1993). Esta formación se ha interpretado como facies distales de abanicos aluviales de origen pirenaico (Salvany, 1989).

A su vez, el centro de la depresión está formado por arcillas y limos holocenos poco litificados. Se considera que provienen del lavado de las arcillas terciarias circundantes (Gutiérrez et al., 1995). Sobre este material, al estar menos litificado, se encaja una red de *gullies* y valles de fondo plano de dimensiones variables (Gracia, 1985; Leránoz, 1993). Algunos de estos *gullies* pueden llegar a alcanzar más de 10 km de longitud y 8 m de profundidad, y pueden exportar anualmente hasta 12 hm<sup>3</sup> de sedimentos al río Ebro (Desir y Marín, 2007).

Geomorfológicamente, la zona de estudio se puede dividir en varias áreas diferenciadas. En el centro se ha generado una depresión erosiva, donde destaca la presencia de profundos *gullies*. Al sur de dicha depresión, se localizan relieves tabulares calizos, en cuesta, mesa o graderío dependiendo de la pendiente que presenten. Al norte, una serie de glaciares y terrazas pertenecientes al río Aragón limitan la depresión central. En las laderas escarpadas de estos glaciares y relieves calcáreos afloran las arci-

llas de la Fm. Tudela, donde se desarrolla un paisaje acarcavado muy característico. La altitud media de la zona oscila entre 280 m.s.n.m. en el centro de la depresión erosiva y 659 m.s.n.m. en La Plana Negra, el relieve más alto de la zona.

El clima es semiárido con temperaturas medias que varían de 10°C a 24°C, siendo la media anual de 13°C. La precipitación media anual es 350 mm. Estas precipitaciones se reparten en dos máximos a lo largo del año, uno a finales de primavera y otro a comienzos de otoño. Durante estos máximos, las lluvias son de carácter ciclónico y de baja intensidad, por lo que su capacidad erosiva es baja. El resto del año, son lluvias de carácter tormentoso, tratándose de precipitaciones de elevada intensidad y corta duración, lo que les confiere una alta erosividad.

### 3. Métodos

En la zona de estudio afloran tanto materiales terciarios como materiales holocenos. Las arcillas

terciarias (Fm. Tudela) presentan laderas de altas pendientes (34°) desprovistas de vegetación que conforman un característico paisaje de *badlands* (Figura 2A). En ellas, se han diferenciado varios niveles (R1 a R5) a los que se realizaron análisis físicos, químicos y mineralógicos (Tablas 1 y 2). Se trata de un material ligeramente dispersivo, de estructura masiva. Su pH es alcalino y su conductividad eléctrica alta. Cabe destacar la ausencia casi total de materia orgánica y los altos valores de SAR y ESP, que indican que en este sedimento es fácil la formación de *pipes* (Gutiérrez et al., 1995; Desir et al., 2005; Desir y Marín, 2007, 2009a). Pruebas realizadas mediante edometrías en varios niveles muestran coeficientes de hinchamiento que pueden llegar hasta el 12% (Gutiérrez et al., 1995). Mineralógicamente, estos materiales presentan un alto contenido en arcillas y calcita (Tabla 1). Los minerales de la arcilla identificados han sido illita (82-86%), clorita (9-16%) y trazas de caolinita (Gutiérrez et al., 1995; Desir et al., 2005; Desir y Marín, 2007, 2009a). Tanto la capacidad de hin-

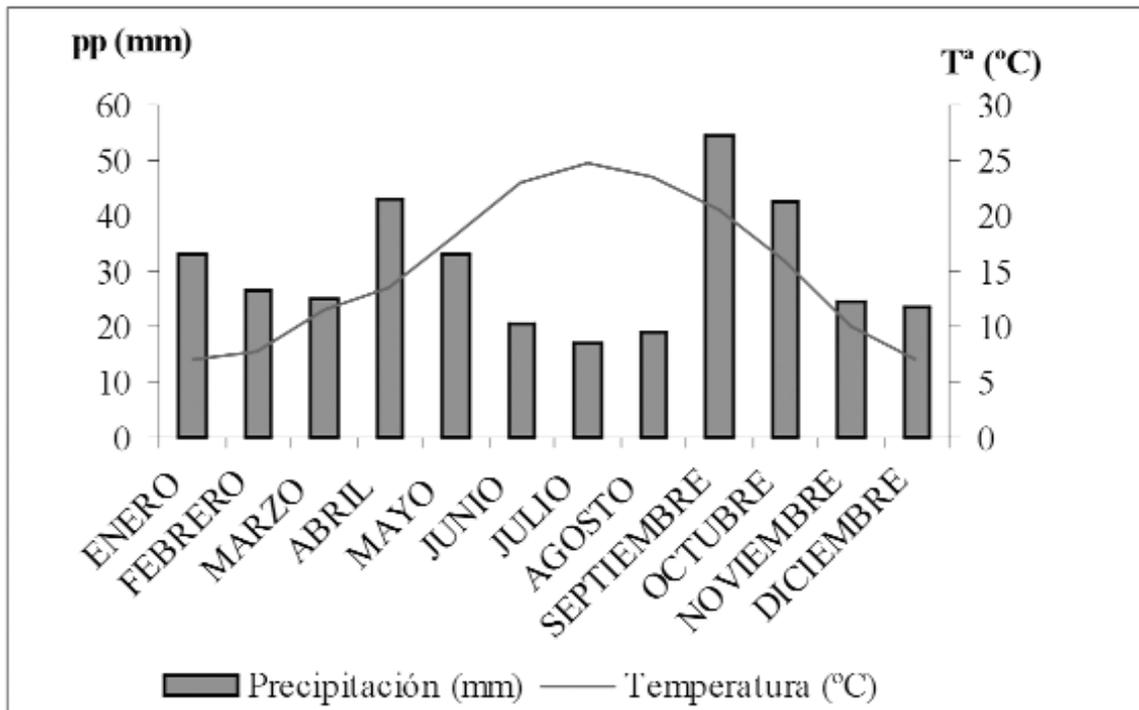


Figure 3. Precipitación y temperaturas en el centro de la depresión erosiva de Bardenas Reales.  
 Figure 3. Precipitation and temperatures at the centre of Bardenas Reales erosive depression.

Tabla 1. Análisis físico-químico y mineralógico de las arcillas terciarias (R1-R5) y de las holocenas (C1-C3).  
 Table 1. Physico-chemical analysis of the tertiary (R1-R5) and Holocene (C1-C3) clays.

	pH (1:25)	cE (mS)	M.O. (%)	Min. Arcilla	Calcita (%)	Cuarzo (%)	Otros (%)	Índice Dispersión	Densidad real (g/cm <sup>3</sup> )
<b>R1</b>	9.2	3.7	0.2	32	41	22	5	0.76	2.27
<b>R2</b>	8.9	4.1	0.2	34	39	23	4	0.35	2.26
<b>R3</b>	8.7	2.9	0.2	27	40	23	10	0.60	1.99
<b>R4</b>	8.4	5	0.3	34	40	21	5	0.56	2.27
<b>R5</b>	8.7	3.8	0.2	29	40	22	9	0.61	2.17
<b>C1</b>	8.3	5.2	0.6	26	44	25	5	0.58	1.98
<b>C2</b>	8.3	5.6	0.6	39	39	20	2	0.56	1.83
<b>C3</b>	8.4	1.5	0.5	17	48	31	4	1	2.22

chamiento de estos materiales como la dispersión son factores importantes en el desarrollo de los distintos procesos de erosión ya que ambos causan agrietamiento de los materiales (Arulanandan y Heinzen, 1977; Campbell, 1997).

En las arcillas y limos holocenos del centro de la depresión erosiva se han diferenciado 3 unidades sedimentarias diferentes (C1 a C3) (Figura 2B) (Marín y Desir, 2004; Desir et al., 2005; Desir y Marín, 2007). Como en el caso de las arcillas terciarias, se llevaron a cabo análisis físicos, químicos y mineralógicos que se muestran en las Tablas 1 y 2. En general, se trata de un material con un índice de dispersión medio y altos valores de SAR y ESP. El contenido en materia orgánica es prácticamente inexistente, el pH alcalino y la conductividad eléctrica alta.

#### 4. Resultados

La acción erosiva de la escorrentía superficial es la encargada de la movilización y transporte del

material y la responsable del modelado actual. Las condiciones climáticas, junto con la litología, van a ser fundamentales para la evolución del paisaje. Los procesos de erosión hídrica tienen una relación directa con la distribución de las precipitaciones, presentando, al igual que éstas, una marcada estacionalidad. Las precipitaciones alternan periodos de máximos pluviométricos (generalmente, lluvias de baja intensidad) con eventos más secos, donde las lluvias son de carácter tormentoso (la intensidad de la precipitación en estos casos es alta) (Fig. 3).

En función de la litología, los procesos de erosión presentes actuarán de una manera u otra. Uno de estos procesos es el *rilling* y la **formación de cárcavas**. En la zona de estudio, ambos presentan un mayor desarrollo en las arcillas terciarias (Figura 2A), debido fundamentalmente a las altas pendientes (34°) y la alta labilidad de este material. En los materiales holocenos, estas cárcavas no tienen el mismo desarrollo debido, en muchos casos, a la presencia de una biocostra, que condiciona la concentración de la arroyada.

Tabla 2. Análisis químicos del extracto de pasta saturado.  
 Table 2. Chemical analysis of the saturated extract.

	pH (1:25)	cE (mS)	M.O. (%)	Min. Arcilla	Calcita (%)	Cuarzo (%)	Otros (%)	Índice Dispersión	Densidad real (g/cm <sup>3</sup> )
<b>R1</b>	15.6	13.9	398.2	11.8	88.1	315.4	0.6	44.63	38.64
<b>R2</b>	11.7	62.3	637.7	34.9	161.3	509.4	0.9	51.43	42.19
<b>R3</b>	17.6	78.5	209	226.9	127.5	211.4	0.8	24.06	25.03
<b>R4</b>	17.6	89.6	466.2	37.9	165.6	392.2	0.09	38.88	35.36
<b>R5</b>	101.9	9.7	224.5	23.9	99.2	264.3	0.6	33.69	32.08
<b>C1</b>	2.7	55.7	755.6	144.1	187.5	503.0	0.6	39.0	35.4
<b>C2</b>	19.6	68.3	771.2	195.3	165.6	537.1	0.6	39.9	36.0
<b>C3</b>	13.7	8	152.2	36.0	24.7	153.2	0.4	27.8	27.9

Otro proceso importante en las zonas de *badlands* es el **piping**. Los *pipes* son muy frecuentes en zonas semiáridas acarcavadas (Parker, 1963; Jones, 1990; Campbell, 1997; Bryan y Jones, 1997). Varios son los factores relacionados con su formación, entre ellos un contraste estacional con marcada variabilidad en las precipitaciones (Jones, 1981; López-Bermúdez y Romero Díaz, 1989; Selby, 1993; Gutiérrez et al., 1997, entre otros) y la existencia de un gradiente hidráulico que permita al agua circular (Fletcher y Carrol, 1948; Jones, 1981; Campbell, 1997). En la zona de estudio, los *pipes* de las arcillas terciarias son de pequeñas dimensiones (Figura 4A), a pesar de que los altos valores de SAR y ESP que presentan favorecerían su aparición. En las arcillas y limos holocenos, los *pipes* desarrollados alcanzan dimensiones de varios metros de diámetro (Figura 4B).

Los *gullies* alcanzan una gran importancia en las arcillas y limos holocenos (Fig. 4C). Estos materiales, al estar menos litificados, son más susceptibles a la erosión hídrica. La evolución de estos *gullies* responde a una serie de procesos: retroceso de la cabecera, arroyada, socavamiento basal, profundización y, sobre todo, *piping* (Desir y Marín, 2004, 2006, 2009b; Desir *et al.*, 2005). Constituyen la principal vía de exportación de material fuera de

la cuenca (Desir *et al.*, 2005).

Otro proceso de importancia en la zona es la presencia de **coladas de barro** (Fig. 4D). Estos movimientos de masas ya han sido descritos con anterioridad en varios trabajos (Marín y Desir, 2006, 2008). Tienen carácter estacional y se dan fundamentalmente en las arcillas terciarias. Se producen cuando las arcillas se comportan de manera plástica y son capaces de deslizarse ladera abajo. En zonas de *badlands*, suelen moverse a lo largo de regueros preexistentes, llegando a desdibujar la geometría de éstos. Se han reconocido coladas de barro de muy diverso tamaño, alcanzando la de mayor magnitud una longitud de 42 m, una anchura media de 2,65 m y una potencia aproximada de 0,80 cms, lo que supone un volumen aproximado de 89 m<sup>3</sup> de material movilizado (Marín y Desir, 2008).

Las **armored mud balls** aparecen también en las arcillas terciarias y representan una forma menor de erosión, si bien en algunas zonas pueden alcanzar un porcentaje bastante alto dentro de la tasa anual de erosión. Se trata de un núcleo arcilloso rodeado por un revestimiento de arena y grava (Figura 4E). Su origen está asociado a pequeños clastos de arcillas que se individualizan por varias causas (procesos de humectación-secado, *pop-*

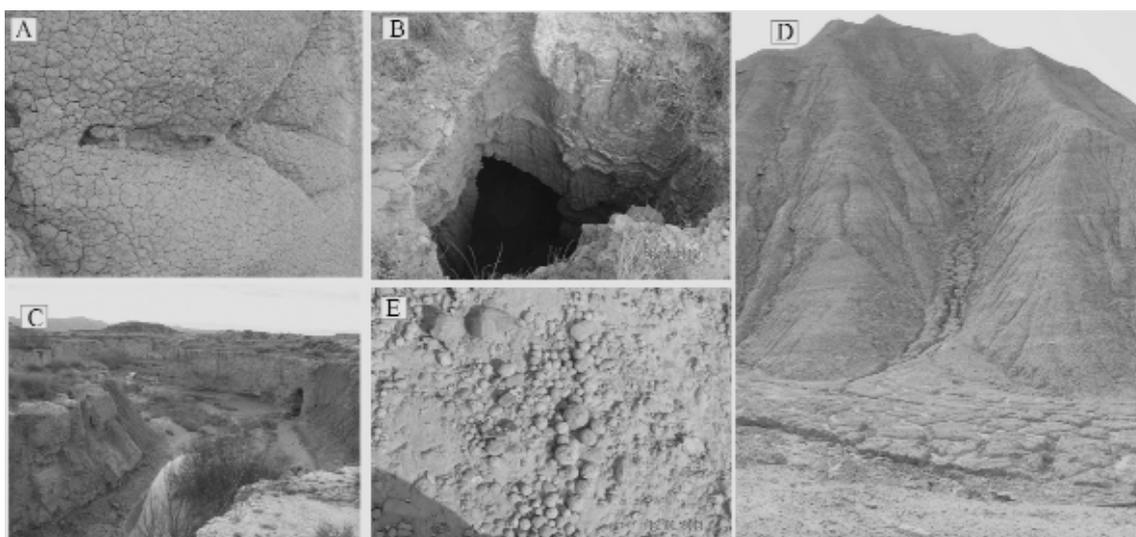


Figure 4. Principales procesos de erosión en Bardenas Reales. a) *Pipe* desarrollado sobre las arcillas terciarias; b) *Pipe* sobre material holoceno; c) *Gully* desarrollado en la depresión erosiva; d) colada de barro; e) *armored mud balls*.

Figure 4. Main erosion processes at Bardenas Reales. a) *Pipe* developed on tertiary clays b) *Pipe* above Holocene material; c) gully developed on the erosive depression; d) mudslides; e) *armoured mud balls*.

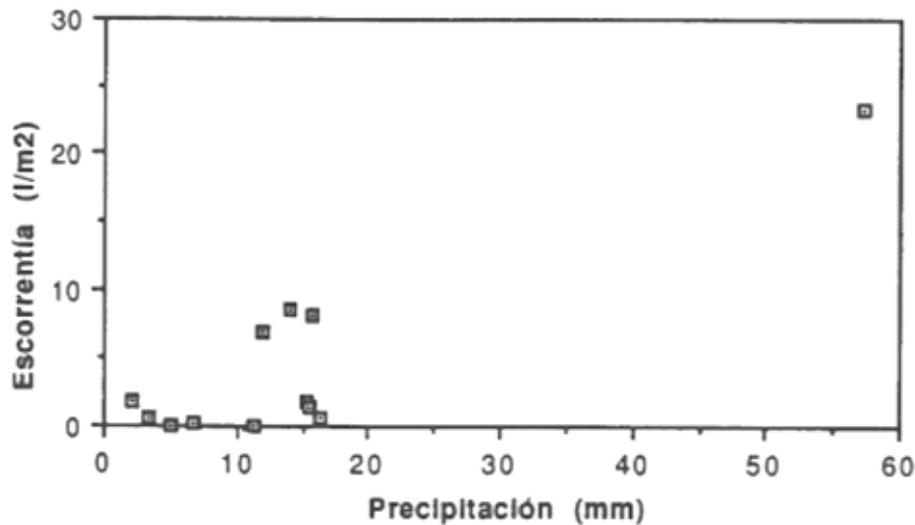


Figure 5. Relación existente entre la precipitación y la escorrentía para los sedimentos terciarios, Bardenas Reales (Tomado de Gutiérrez *et al.*, 1995).

Figure 5. Relation between precipitation and runoff in Tertiary sediments, Bardenas Reales (Gutiérrez *et al.*, 1995).

*corn*). Una vez individualizado, cae al fondo de un *gully* y comienza a circular por él, redondeándose y adquiriendo el revestimiento de arena y grava (Desir y Marín, 2008).

## 5. Discusión

Como ya hemos indicado anteriormente, las formas de erosión dependen de las características físico-químicas de los materiales, pero sobre todo, tienen una relación directa con la distribución de las precipitaciones. Gutiérrez *et al.*, (1995) y Sirvent *et al.*, (1997) señalan la existencia de dos umbrales para la producción efectiva de erosión hídrica. Uno de los umbrales, que guarda relación con la precipitación y la escorrentía, se sitúa a 11 mm. Por debajo de ese valor de precipitación no es posible encontrar escorrentía significativa (Figura 5). También existe relación entre la intensidad de la precipitación y la generación de escorrentía. Si la intensidad es muy elevada, la erosividad también esa alta, aumentando la erosión. Estos datos indican la estrecha relación existente entre la climatología y la erosión.

La formación de cárcavas y el *rilling* de una zona dependen, en gran medida, de las característi-

cas físico-químicas de los materiales. La formación de *rills* se debe a la concentración de la arroyada superficial. Para que esto ocurra, es necesario que la capacidad de infiltración del material sea baja. Imeson *et al.*, (1982) señalan, además, como factor importante para la formación de *rills* la presencia de arcillas dispersivas (altos valores de SAR y ESP). Además, se comprueba que el material holoceno cubierto por biocostra no presenta evidencias de concentración de la erosión, mientras que en zonas donde no existe biocostra, sí es posible el desarrollo de regueros.

Los *pipes* desarrollados en las arcillas terciarias son de pequeñas dimensiones, a pesar de que los valores de SAR y ESP son elevados. La ausencia de *piping* en la Fm. Tudela es debido a la pendiente de las laderas (34°). Al ser alta, impide la infiltración de la escorrentía y, por tanto, se inhibe la formación de *pipes*. En cambio, sobre el material holoceno se desarrollan *pipes* de grandes dimensiones (Figura 4B). Esto es debido, fundamentalmente, a que se trata de un material dispersivo y con un elevado porcentaje de minerales hinchables. El hinchamiento de las arcillas genera morfologías en *popcorn* facilitando la infiltración de la escorrentía (Hodges y Bryan, 1982). Además, la dispersión genera pérdida de cohesión en las arcillas, lo

que causa agrietamiento. Este agrietamiento es importante para la generación de *pipes*, siendo las vías de infiltración de la escorrentía (Arulanandan y Heinzen, 1977).

Los *gullies* de la zona de estudio desarrollan una red dendrítica de alta sinuosidad, ya que el relieve es muy somero. En estos *gullies* es posible reconocer dos etapas de relleno. La primera es de baja energía y se depositaron hasta 5 m. de limos intercalados con algunos niveles de *ripples*. En la siguiente etapa de relleno se produjo la sedimentación de un nivel de gravas con estratificación cruzada, indicando una etapa de mayor energía. La incisión actual permite reconocer estas dos etapas de relleno. La evolución de estos *gullies* está controlada, principalmente, por el *piping*, si bien se producen también vuelcos y desplomes, retroceso de las cabeceras, profundización del canal, socavamiento basal y lavado de las paredes (Desir et al., 2005).

Las coladas de barro, de carácter estacional, se producen principalmente sobre las arcillas terciarias. Las condiciones necesarias para que se generen estas coladas son: a) litología adecuada (arcillas plásticas con una rápida transición hacia un comportamiento líquido); b) elevadas pendientes, que permitan al material deslizarse y c) un aporte hídrico continuo que facilite a las arcillas alcanzar su límite plástico (Marín y Desir, 2006). Las arcillas alcanzan este límite en la época invernal, cuando la evapotranspiración del suelo es mínima y el grado de humedad, debido a la presencia de hasta 42 días de niebla, es máximo (Marín y Desir, 2008). Tanto los índices de plasticidad como las propiedades físico-químicas de las arcillas terciarias y de las holocenas son similares. El hecho de que no se produzcan coladas en el material holoceno es debido a las bajas pendientes que presentan (9°), que dificulta el movimiento ladera abajo del material. En cambio, las altas pendientes de las laderas terciarias permiten al material deslizarse fácilmente. Las coladas de barro suelen desaparecer con los eventos tormentosos de alta intensidad de la época estival.

Las *armored mud balls* necesitan eventos de alta energía para su formación. La generación de estas morfologías requiere de unas condiciones muy limitadas, y pequeños cambios en estas condiciones llevan a la destrucción de las bolas. La altura de la lámina de agua sobre la que circulan con-

trola la creación o destrucción de las *armored mud balls* (Desir y Marín, 2008, 2009a). El origen de estas morfologías se relaciona con la individualización del núcleo arcilloso debido tanto a procesos de humectación-secado como a la individualización de pequeños bloques de *popcorn*. Una vez individualizados, se desplazan dentro de cauces fluviales, adquieren la coraza y se van redondeando. Su desaparición parece estar relacionada con la destrucción del núcleo debido a procesos de helada o por humectación (Dickas y Lunking, 1968).

## 6. Conclusiones

Los procesos de erosión en Bardenas Reales guardan una estrecha relación con las propiedades físico-químicas de los materiales y, sobre todo, con las condiciones climáticas de la zona. La irregular distribución de las precipitaciones a lo largo del año favorece la presencia de un tipo de erosión u otro. Así, las condiciones necesarias para la formación de las coladas de barro (aporte continuo de humedad) son las que destruyen la *armored mud balls*, por lo que ambos procesos son excluyentes. Las propiedades físico-químicas de los materiales también juegan un papel importante en el desarrollo de los procesos de erosión. En las arcillas y limos holocenos, menos litificados, se desarrollan profundos *gullies*, la más importante vía de exportación de los materiales fuera de la cuenca. El principal proceso de evolución de estos *gullies* es mediante los procesos de *piping*, de gran desarrollo sobre el material holoceno debido a que este material se encuentra menos litificado. En cambio, en las arcillas miocenas de la Fm. Tudela el desarrollo de *pipes* se inhibe por las altas pendientes que presentan, que dificultan la infiltración de la escorrentía. En las mismas condiciones litológicas, la formación de coladas de barro o de *armored mud balls* depende de las características de las precipitaciones, mientras que las características físico-químicas de los materiales favorece el desarrollo de *badlands*, *gullies* y *piping*.

## Referencias

- Agassi, M. (ed.). (1996). *Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation*. Marcel Dekker. New York.

- Arulanandan, K. y Heinzen, R.T. (1977). Factors influencing erosion in dispersive clays and methods of identification. Erosion and solid matter transport in inland waters. *IAHS*, 122, 76-81.
- Ayala, F.J., Elizaga, E., González de Vallejo, L., Durán, J.J., Beltrán, F., Oliveros, M.A., Carbó, A., Guillaumont, M.L. y Capote, R. (1987). *Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España*. IGME. Madrid, 86 p.
- Bryan, R.B. (1977). Assessment of soil erodibility: new approaches and directions. En: *Erosion, Research Techniques, Erodibility and Sediment Delivery* (Toy, T.J., ed.). GeoBooks. Norwich 57-72.
- Bryan, R.B. y Jones, J.A.A. (1997). The significance of soil piping processes: inventory and prospect. *Geomorphology* 20, 209-218.
- Campbell, I.A. (1989). Badlands and badland gullies. En: *Arid Zone Geomorphology* (D.S.G. Thomas, ed.). Wiley. London, 159-183.
- Campbell, I.A. (1997). Badlands and badland gullies. En: *Arid Zone Geomorphology: Processes, Form and Change in Drylands* (D.S.G. Thomas, ed.). Wiley. London, 713 p.
- Castiella, J., Solé, J. y del Valle, J. (1978). *Mapa Geológico de Navarra E. 1:200.000*. Cartografía geológica a partir de la investigación Geológica de Navarra a escala 1: 25.000. Dip. Foral de Navarra. Ser. Geol. Dir. O.P. Pamplona.
- Desir, G. y Marín, C. (2004). Análisis de la erosión en gullies en las Bardenas Reales (Navarra). *Geo-Temas* 6 (4), 215-217. Zaragoza.
- Desir y Marín, C. (2006). Evolución y procesos de erosión en gullies. Bardenas Reales (Navarra), España. En: *Geomorfología y Territorio* (A. Pérez-Alberti y J. López-Bedoya, eds.). Universidad de Santiago de Compostela, 189-199.
- Desir, G. y Marín C. (2007). Factors controlling the erosion rates in a semi-arid zone (Bardenas Reales, NE Spain). *Catena*, 71, 31-40.
- Desir, G. y Marín C. (2008). Mud armored balls ¿una forma de erosión?. En: *Trabajos de Geomorfología en España* (J. Benavente y F.J. Gracia, eds.). SEG, Cádiz, 97-100.
- Desir, G. y Marín, C. (2009a). Caracterización de la erosión en áreas acarcavadas de la Fm. Tudela (Bardenas Reales, Navarra). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 35 (2), 195-213.
- Desir, G. y Marín, C. (2009b). Evolución y procesos de erosión en gullies. Bardenas Reales (Navarra). España. En: *Avances en Estudios sobre Desertificación* (A. Romero-Díaz, F. Belmonte, F. Alonso-Sarria y F. López Bermúdez, eds.). Editum. Murcia, 219-222.
- Desir, G., Marín, C. y Guerrero, J. (2005). Badlands and Talus Flatirons in the Bardenas Reales Region. Field Trip Guide B3. *VI International Conference on Geomorphology*. Zaragoza, 37 pp.
- Dickas, A.B. y Lunking, W. (1968). The origin and destruction of armoured mud balls in a fresh water lacustrine environment, Lake Superior. *Journal of Sedimentary Petrology*, 38, 1366-1484.
- Donezar, M., Illarregui, M., del Val, J. y del Valle de Lersundi, J. (1990). *Erosión actual en Navarra. Erosión potencial en Navarra. E:1:200.000*. Instituto del Suelo y Concentración Parcelaria. Gobierno de Navarra. ITGE.
- Faci, E., Castiella, J., del Valle, J., García, A., Díaz, A., Salvany, J.M., Cabra, P., Ramírez del Pozo, J. y Meléndez, A. (1997). *Memoria del Mapa Geológico de Navarra 1:200.000*. Gobierno de Navarra. 142 pp.
- Fletcher, J.E. y Carrol, P.H. (1948). Some properties of soils that are subject to piping in southern Arizona. *Soil Science Society of America Proceedings*, 13, 545-547.
- García Ruiz, J.M. y López Bermúdez, F. (2009). *La erosión del suelo en España*. Sociedad Geomorfológica de España. Zaragoza, 441 pp.
- Gracia, F.J. (1985). *Geomorfología de las Bardenas orientales*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza. 173 p.
- Gutiérrez, M., Sancho, C., Desir, G., Sirvent, J., Benito, G. y Calvo, A. (1995). *Cuantificación de la erosión hídrica y procesos geomorfológicos en terrenos arcillosos y yesíferos de la Depresión del Ebro*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Universidad de Zaragoza. Zaragoza, 389 pp.
- Gutiérrez, M., Sancho, C., Benito, G., Sirvent, J. y Desir, G. (1997). Quantitative study of piping processes in badland areas of the Ebro Basin, NE Spain. *Geomorphology*, 20, 237-253.
- Hodges, W.K. y Bryan, R.B. (1982). The influence of materials behaviour on runoff initiation in the Dinosaur Badlands, Canada. En: *Badland Geomorphology and Piping* (R. Bryan y A. Yair, eds.). GeoBooks. Norwich, 13-46.
- Imeson, A.C., Kwaad, F.J. y Verstraten, J.M. (1982). The relationship of the soil physical and chemical properties to the development of badlands in Morocco. En: *Badland Geomorphology and Piping* (R. Bryan y A. Yair, eds.). GeoBooks. Norwich, 47-70.
- Inventario Nacional de Erosión de Suelos, 2002-2012 (2003). *Navarra. Comunidad Foral de Navarra*. 4 mapas. 1 CD-ROM. Ministerio de Medio Ambiente. Tragsatec. 229 pp.
- Jones, J.A.A. (1981). *The nature of soil piping- a review of research*. British Geomorphological Research Group Research Monograph 3. GeoBooks. Norwich.
- Jones, J.A.A. (1990). Piping effects in drylands. *Geological Society of America, Special Paper* 252, 111-138.
- Kirkby, M.J. (1980). The problem. En: *Soil Erosion*. (M.J. Kirkby y R.P.C. Morgan, eds.). John Wiley & Sons. Norwich, 312 pp.
- Leránoz, B. (1993). *Geomorfología y Geología Ambiental de la Ribera de Navarra*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza. 521 pp.
- López Bermúdez, F. (2002). *Erosión y Desertificación. Heridas de la Tierra*. Nívola Ediciones. Madrid, 200 pp.
- López Bermúdez, F. (2008). *Desertificación: Preguntas y respuestas a un desafío económico, social y ambiental*. Fundación Biodiversidad. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid, 131 pp.
- López-Bermúdez, F. y Romero Díaz, M.A. (1989). Piping erosion and badland development in south-east Spain. En: *Geomorphological and Peological Aspects* (A. Yair y S. Berkowicz, eds.). Catena Supplement 14: 59-73.
- Marín, C. y Desir, G. (2004). Influencia de las propiedades físico-químicas del regolito en los procesos de erosión. Bardenas Reales (Navarra). En: *Riesgos Naturales y*

- Antrópicos en Geomorfología* (Bienes, R. y Marqués, M.J., eds.). Sociedad Española de Geomorfología. Madrid.
- Marín, C. y Desir, G. (2006). Descripción morfológica y origen de las coladas de barro desarrolladas sobre arcillas terciarias en la depresión de Bardenas Reales (Depresión del Ebro). En: *Geomorfología y Territorio* (A. Pérez-Alberti y J. López-Bedoya, eds.). Universidad de Santiago de Compostela, 221-234.
- Marín, C. y Desir, G. (2008). Procesos de formación de coladas de barro en Bardenas Reales (Navarra, España). En: *Trabajos de Geomorfología en España* (J. Benavente y F.J. Gracia, eds.). SEG, Cádiz, 93-96.
- McCool, D.K., Brown, L.C., Foster, G.C., Mutchler, C.K. y Meyer, L.D. (1987). Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions ASAE* 30 (4), 1387-1396.
- Middleton, N. y Thomas, D. (Eds.) (1997). *World Atlas of Desertification*. Arnold. London, 182 p.
- Murelaga, X. (2000). *Estudio de las faunas de vertebrados del Mioceno Inferior de las Bardenas Reales y áreas colindantes (Cuenca del Ebro, Navarra)*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad del País Vasco.
- Parker, G.G. (1963). Piping, a geomorphic agent in landform development of the drylands. *International Association for Scientific Hydrology Publication*, 65, 103-13.
- Salvany, J.M. (1989). *Las formaciones evaporíticas del terciario continental de la cuenca del Ebro en Navarra y La Rioja. Litoestratigrafía, petrología y sedimentología*. Tesis Doctoral. Dpto. Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Universidad de Barcelona. 397 pp.
- Selby, M.J. (1993). *Hillslope Materials and Processes*. Oxford University Press. Oxford, 451 pp.
- Sirvent, J., Benito, G., Desir, G., Gutiérrez, M. y Sancho, C. (1997). Erosion rates in badland areas recorded by collectors, erosion pins and profilometer techniques (Ebro basin, NE Spain). *Geomorphology* 18, 61-75.
- Solé Sedo, J. (1977). *Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Hoja 282 (Tudela)*. Madrid. IGME. 2ª Serie, 1ª Edición, 1 mapa. 18 pp.
- Toy, T.J., Foster, G.R. y Renard, K.G. (2002). *Soil Erosion. Processes, Prediction, Measurement and Control*. John Wiley & Sons. New York, 338 pp.
- Zachar, D. (1982). *Soil Erosion. Developments in Soil Science* 10. Elsevier. Amsterdam, 547 pp.