

IV Reunión de Geomorfología
Grandal d'Anglade, A. y Pagés Valcarlos, J., Eds.
1996, Sociedad Española de Geomorfología
O Castro (A Coruña)

EVOLUCIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE UN ÁREA ARCILLOSA ACARCAVADA, EN RELACIÓN CON EL ESTADO FÍSICO SUPERFICIAL MEDIANTE EXPERIENCIAS DE SIMULACIÓN DE LLUVIA

Regüés Muñoz, D. y Gallart Gallego, F.

Institut de Ciències de la Terra (Jaume Almera). c/ Lluís Solè i Sabarís s/n.
Barcelona 08028

RESUMEN

Las geomorfologías acarcavadas desarrolladas en áreas de montaña, suelen mostrar condiciones físicas superficiales altamente dinámicas. Como consecuencia, la producción de escorrentía y de transporte sedimento muestran una marcada variabilidad estacional. Para adquirir un mayor conocimiento al respecto, fueron realizadas periódicamente simulaciones de lluvia, durante tres años y en dos litologías representativas del área de Vallcebre.

Los resultados confirmaron claramente esta estacionalidad y su dependencia del estado de alteración física del regolito, más determinante que las condiciones hídricas previas al experimento.

Palabras clave: cárcava, meteorización, escorrentía, transporte de sedimento

ABSTRACT

Badland geomorphologies developed on mountainous areas usually show a high dynamics of the surface. In consequence, runoff and sediment production rates show clear seasonal changes. In order to increase knowledge on this subject, periodical rainfall simulations were carried out during three years in the Vallcebre badlands area.

Results clearly confirm the seasonality and its relationship with antecedent regolith physical conditions, more determinant than previous hydric conditions.

Key words: badland, weathering, runoff, sediment transport

INTRODUCCIÓN

En áreas acarcavadas de montaña, a causa de la rapidez e intensidad con que se producen cambios en las condiciones físicas del regolito superficial, hay una elevada dinámica superficial. Principalmente por la acción de la helada (BULLOCK *et al.*, 1988; RENAU, 1992; PARDINI *et al.* 1995 y REGÜÉS, 1995). Esto causa enormes variaciones en el efecto y respuesta hídrica que causa

la lluvia.

Así, la producción de escorrentía queda absolutamente condicionada por este estado superficial, que por supuesto es uno de los factores determinantes de la erosión. Para adquirir un mayor conocimiento al respecto, fue planificado un estudio basado en simulaciones de lluvia.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE TRABAJO

La zona acarcavada en la que fue desarrollado este estudio, está ubicada en la Cuenca de Vallcebre, concretamente en la subcuenca de Ca L'Isard. La citada Cuenca se encuentra en la cabecera del río Llobregat y sector marginal surpirenaico. Las características climáticas de la zona muestran rasgos propios de los climas mediterráneo y de montaña, por ello MARTÍN-VIDE (1985) lo definió como submediterráneo.

El régimen de precipitaciones es marcadamente estacional, con picos en Otoño y Primavera, la media anual es de unos 850 mm y en Invierno dominan las precipitaciones en forma de nieve. La temperatura media anual es de unos 9°C, con mínimas de unos -10°C y máximas de 35°C (LLORENS, 1991).

El régimen térmico en la superficie de las cárcavas es extremado, con grandes oscilaciones térmicas en Verano, de hasta 50°C; mientras en Invierno dominan los ciclos de hielo-deshielo, alrededor de 100 ciclos por año (REGÜÉS, 1995).

La litología que constituye el substrato de la Cuenca, es básicamente de rocas arcillosas de la formación Tremp (límite Cretácico-Paleoceno). La mineralogía de esta litología esta dominada por arcillas (esmectita e illita) y carbonatos (calcita y dolomita) (SOLÉ *et al.*, 1992). Precisamente, las cárcavas se desarrollan en zonas donde el substrato arcilloso queda expuesta a la superficie, predominantemente en vertientes con orientación norte.

CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA EXPERIMENTAL

La selección de las litologías, donde fue desarrollado el estudio, se basó en los conocimientos adquiridos previamente tras un año de estudios. Así, fueron seleccionadas dos litología con mineralogía similar, pero de características morfológicas distintas, procurando que fuesen representativas del contexto general. Las litologías fueron denominadas S1 y S2:

Parcela S1. Regolito marrón anaranjado, con baja pedregosidad superficial, exposición NNE y pendiente de 20 a 25°. Mineralogía: 6 % cuarzo; 11,3 % calcita; 22,8 % dolomita; 45,7 % esmectita; 12,3 % illita y 2 % caolinita.

Parcela S2. Regolito morado-grisáceo, con alta pedregosidad superficial, exposición NNE y pendiente de 30 a 35°. Mineralogía: 9,9 cuarzo; 10,1 % calcita; 20 % dolomita; 41 % esmectita; 13,9 % illita y 5,1 % caolinita.

METODOLOGÍA

Las experiencias de simulación de lluvia fueron realizadas con un simulador con boquilla o pulverizador, similar al diseñado por CALVO *et al.* (1988). Las simulaciones fueron realizadas sobre una área de 0,233 m², delimitada mediante un aro metálico que era insertado parcialmente en el regolito.

En un principio se pensó aplicar una intensidad media constante y similar para todas las experiencias, sin embargo, la simplicidad del sistema utilizado para el bombeo y la ausencia de un sistema para asegurar una presión constante del caudal de agua, imposibilitó alcanzar satisfactoriamente este objetivo. Las intensidades de lluvia medias, estimadas por medio de tres pequeños pluviómetros, fueron de 49,7±5,7 mm.h⁻¹ en S1 y de 48,0±6,1 en S2 (tabla 1).

Fecha	Simulación	Parcela	Período estacional	Tiempo (min:seg)	Pre.(mm.h ⁻¹)
08/07/92	S1	S1	Ini.Verano	20:52	49,9
08/07/92	S2	S2	Ini.Verano	14:40	50,9
07/10/92	S3	S1	Ini.Otoño	05:46	58,3
07/10/92	S4	S2	Ini.Otoño	08:36	49,1
03/12/92	S5	S1	Fin.Otoño	21:14	45,4
03/12/92	S6	S2	Fin.Otoño	15:36	45,6
22/12/92	S7	S1	Ini.Invierno	27:57	56,1
22/12/92	S8	S2	Ini.Invierno	22:52	51,9
11/02/93	S9	S1	Med.Invierno	34:47	54,9
11/02/93	S10	S2	Med.Invierno	34:03	49,7
27/05/93	S11	S1	Med.Primavera	33:52	40,5
27/05/93	S12	S2	Med.Primavera	31:22	48,8
05/08/93	S13	S1	Med.Verano	34:20	46,1
05/08/93	S14	S2	Med.Verano	39:40	34,8
15/09/93	S15	S1	Fin.Verano	37:05	44,9
15/09/93	S16	S2	Fin.Verano	37:36	47,9
27/10/93	S17	S1	Med.Otoño	20:02	57,2
27/10/93	S18	S2	Med.Otoño	18:20	56,5
08/03/94	S19	S1	Fin.Invierno	58:38	44,6
08/03/94	S20	S2	Fin.Invierno	51:10	40,1
26/04/94	S21	S1	Ini.Primavera	38:04	44,5
26/04/94	S22	S2	Ini.Primavera	39:18	47,8
22/06/94	S23	S1	Fin.Primavera	34:07	48,1
22/06/94	S24	S2	Fin.Primavera	40:30	42,5
11/10/94	S25	S1	Ini.Otoño(R)	14:54	55,4
11/10/94	S26	S2	Ini.Otoño(R)	11:56	58,2

Tabla 1. Relación de la distribución y características de las simulaciones de lluvia.

La duración de las simulaciones no fue fija, pues el objetivo prioritario

era provocar la escorrentía superficial y mantenerla hasta que se mostrase constante, o en el peor de los casos hasta el agotamiento del suministro de agua. Dada la enorme variabilidad de las condiciones físicas superficiales, era imposible estimar a priori cuando se alcanzarían estos objetivos.

Desde el inicio de la escorrentía, establecido cuando el ritmo de goteo en la salida del aro era de 2 gotas por segundo, fueron tomadas muestras de forma ininterrumpida.

También fueron tomadas muestras de los 5 cm superiores del regolito, en cada parcela, antes y después de cada simulación. Esto permitió evaluar los cambios en las condiciones hídricas y de la densidad aparente.

La distribución y frecuencia con que fueron realizadas las experiencias, fue planificada considerando dos aspectos:

a) Los momentos críticos en la evolución natural del estado físico del regolito superficial.

b) Un espaciado temporal suficientemente amplio para permitir la regeneración natural de la superficie.

Atendiendo a estos criterios, fueron planteadas tres experiencias por estación climática: al inicio, en mitad y en su etapa final. El orden, el momento estacional, el tiempo de duración y la intensidad media de cada precipitación están expuestos en la tabla 1.

Las experiencias de simulación de lluvia proporcionaron datos referentes a:

- 1.- Los tiempos de encharcamiento y generación de escorrentía.
- 2.- Las variaciones de las tasas de escorrentía.
- 3.- La susceptibilidad al transporte de sedimento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS PARCELAS

La valoración de densidad aparente y humedad superficial (entre 0 y 5 cm), mostró una elevada variabilidad temporal en ambos parámetros, confirmando la estacionalidad observada en estudios previos (REGÜÉS *et al.*, 1992 y 1993). Sin embargo, S1 evidenció una variabilidad ligeramente mayor.

En general, los máximos de humedad suelen coincidir con los mínimos de densidad aparente (figuras 1), normalmente durante el Invierno; mientras que los picos de densidad aparente frecuentemente coinciden con mínimos de humedad, en el Verano, aunque en algún caso también se observan durante el Otoño o final de Primavera.

Como es lógico, tras las simulaciones de lluvia la humedad superficial siempre experimentó incrementos, aunque de magnitudes variables y relativas al período estacional. Los menores cambios se produjeron, entre Otoño y principios de Invierno.

En cuanto a la evolución de la densidad aparente, tras las simulaciones lo normal fue el incremento, esto coincide con las observaciones de TARCHITZKY *et al.* (1984) o SLATTERY & BRYAN (1992b), que describieron esto mismo en distintas situaciones y litologías, este efecto se debe a la compactación que ocasionan los impactos continuados de las gotas de lluvia.

Sin embargo, en algunos casos estas variaciones fueron casi imperceptibles e incluso inversas, siempre coincidiendo con densidades elevadas o con humedades moderadamente altas.

ANÁLISIS GENERAL DE LOS RESULTADOS

En las tablas 2 y 3 están expuestos algunos de los datos obtenidos a partir de las simulaciones de lluvia. Los resultados solamente fueron considerados cualitativamente, pues sería absurdo pretender extrapolarlos al conjunto de las cárcavas, sin embargo la información comparativa que proporcionaron fue de gran interés.

simulación	Inicio esc	concentración (g/l)		escorrentia (%)		transporte Tm/ha.h	
	(seg)	media	máxima	media	máxima	media	máxima
S1 IV	428	5.8	7.4	41.7	79.8	1.3	2.9
S3 IO	21	10.6	17.9	74.2	81.8	5.0	7.6
S5 FO	130	8.3	14.9	84.1	96.8	3.2	4.2
S7 II	785	8.8	18.0	35.6	48.5	1.7	2.2
S9 MI	551	7.0	15.4	50.2	71.0	1.9	5.4
S11 MP	629	16.5	25.9	44.7	63.4	2.9	4.6
S13 MV	460	13.5	46.6	39.0	72.7	2.3	6.9
S15 FV	505	7.4	9.6	48.7	67.0	1.7	2.5
S17 MO	207	16.0	25.1	55.4	74.8	4.9	7.2
S19 FI	1530	12.3	17.7	17.3	28.0	1.0	2.2
S21 IP	896	18.9	24.8	40.1	66.1	3.5	6.1
S23 FP	375	21.7	30.7	45.7	56.0	4.9	7.4
S25 IO2	41	9.2	11.0	65.8	89.2	3.5	5.4

Tabla 2. Resultados generales de las simulaciones en S1. La primera letra indica el momento de la estación (Inicio, Mitad, Final), la segunda letra la estación (Primavera, Verano, Otoño, Invierno).

simulación	inicio esc	concentración (g/l)		escorrentía (%)		transporte Tm/hah	
	(seg)	media	máxima	media	máxima	media	máxima
S2 IV	178	6.5	10.0	36.0	47.6	12	2.0
S4 IO	30	14.3	20.7	88.2	98.3	6.5	10.0
S6 FO	120	11.6	16.6	54.0	73.3	2.9	4.2
S8 II	788	14.1	23.4	18.7	25.9	1.6	1.8
S10 MI	240	10.7	22.5	74.7	98.0	4.0	6.2
S12 MP	519	22.6	31.0	24.5	32.0	2.7	4.5
S14 MV	1470	7.8	14.1	23.7	42.3	0.7	1.0
S16 FV	738	13.7	23.1	33.9	52.7	2.4	5.7
S18 MO	203	16.0	25.1	67.5	96.3	5.6	7.6
S20 FI	2408	10.6	15.9	5.9	7.0	0.4	0.5
S22 IP	463	21.1	34.8	31.1	47.5	3.0	4.7
S24 FP	658	23.6	31.6	28.7	37.5	3.3	5.4
S26 IO2	31	17.0	22.7	76.8	93.2	7.9	10.8

Tabla 3. Resultados generales de las simulaciones en S2.

Los resultados indican la evidente tendencia estacional en la respuesta hídrica y de movilización de sedimento superficial, relacionadas con estado físico superficial del regolito.

Así, en Otoño los tiempos de retardo en la producción de la escorrentía superficial son inferiores que en las otras estaciones, y a finales del Invierno se produce el máximo retardo. Esta observación puede ser contrastada con los datos relativos a las condiciones físicas superficiales, de manera que que estos valores mínimo y máximo coinciden con porcentajes de humedad muy similares, sin embargo las densidades aparentes muestran grandes diferencias. Este análisis es aplicable a todos los demás casos. Así, el porcentaje de humedad gravimétrica superficial, solamente puede ser considerado cuando el estado de alteración superficial es similar.

Las condiciones de baja alteración del regolito superficial, favorecen un rápido sellado superficial. La movilización y reordenación de las partículas superficiales que produce el impacto del las gotas de agua elimina la macroporosidad superficial (MCINTYRE, 1958b y SLATTERY & BRYAN, 1992b y 1994).

Otros trabajos indican que el sellado se relaciona principalmente con el flujo posterior a la lluvia, porque las turbulencias causadas por el impacto de las gotas de lluvia impiden la reordenación de las partículas superficiales (MUALEM *et al.*, 1990 y SLATTERY & BRYAN, 1992a). El elevado porcentaje de arcillas también facilita un rápido sellado (MCINTYRE 1958a).

En cualquier caso, independientemente del mecanismo que causa el sellado, es una consecuencia del efecto compactante de la lluvia.

El rápido sellado explicaría los pobres incrementos del porcentaje de

humedad, pues reduce la infiltración (MCINTYRE, 1958 y FARRELL & LARSON, 1970). Los descensos de densidad aparente, pueden relacionarse con el hinchamiento de las arcillas expandibles, más evidente por las condiciones de baja humedad o poca alteración.

ANÁLISIS ESTACIONAL DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos fueron interpretados por medio de un análisis de componentes principales o ACP, que es un tipo de análisis multifactorial.

En este análisis fueron utilizados los datos expuestos en las tablas 2 y 3, excepto los correspondientes a la simulación de iV e iO (presentaron ciertos problemas y por ello fue aconsejable descartarlas). Los resultados indicaron las relaciones temporales existentes entre los procesos de escorrentía y transporte de sedimento (figura 2).

El ACP reveló dos factores que en conjunto explican el 86,6 % de la variabilidad temporal (54,5 % factor 1 y 32,1 % factor 2). El factor 1 contrapone el tiempo de retardo en el inicio de la escorrentía con las tasas medias y máximas de escorrentía, mientras que el factor 2 contrapone el tiempo de retardo con las concentraciones de sedimento, en la figura 3 están expuestos conjuntamente los resultados de S1 y S2.

Según estos resultados pueden diferenciarse los períodos estacionales en dos categorías:

1. Períodos de estabilidad (Otoño y Primavera).
2. Períodos de transición (Verano e Invierno).

En los momentos de estabilidad existen unas características poco variables en el tiempo, que por ello son generalizables a toda la estación.

Así en Otoño, la rápida génesis del flujo superficial coincide con elevadas tasas de escorrentía y concentraciones de sedimento moderadas. En Primavera el flujo superficial se inicia en tiempos moderados y porcentajes moderados, combinados con elevadas concentraciones de sedimento.

En los períodos de transición, solo pueden indicarse unas características generalizables si consideramos la evolución temporal de las respuestas. En cualquier caso, los resultados evidencian una alta correlación con las conocidas variaciones del regolito superficial.

En Invierno, varía enormemente el tiempo y las tasas de generación de escorrentía, mientras que las concentraciones de sedimento cambian poco y son relativamente bajas, así la variabilidad temporal se relaciona básicamente factor 1. En Verano, por el contrario, la variabilidad está relacionada con la concentración de sedimento, que oscila entre valores muy bajos y muy elevados, mientras que los tiempos y tasas de escorrentía se muestran mucho más estables.

Como se ha citado anteriormente, estas respuestas están reguladas por la capacidad de generación del sellado superficial. Los estados físicos que favorecen el sellado, están asociados a las condiciones de baja rugosidad superficial, óptimas para la generación de la escorrentía (MWENDERA & FEYEN, 1992). Por ello la rugosidad superficial se incrementa proporcionalmente a la alteración del regolito, (en este caso, durante el Invierno) y desciende proporcionalmente a la eliminación del material meteorizado (entre el final de Primavera y el Verano) (REGÚÉS, 1995).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación de los proyectos "Badlands" (NAT89-1072-C06-01), "Deserma" (AMB93-0844-C06-05) y al convenio CSIC-ICONA (LUCDEME).

También queremos expresar nuestro agradecimiento a todas las personas que han colaborado desinteresadamente en la realización de las simulaciones de lluvia, Giovanni Pardini, Ignasi Queralt, Felicià Plana, Maria Cinta Salvany, Jérôme Latron, Colangelo y sobre todo a Oscar Avila que colaboró en más de la mita de las experiencias.

BIBLIOGRAFÍA

- BULLOCK, M.S.; KEMPER, W.D. & NELSON, S.D. (1988). Soil cohesion as affected by freezing, water content, time and tillage. *Soil Sci.Soc.Am.J.*, 52, 770-776.
- CALVO, A.; SIRVENT, J.M.; PALAU, E. Y ROMERO, M. (1988). Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción. *Métodos y técnicas para la medición en el campo de procesos geomorfológicos*, monografía nº1, S.E.G. M.Sala y F.Gallart (eds.), 6-19.
- FARRELL, D.A. AND LARSON, W.E. (1970). Dynamics of the soil water system during rainstorm. *Soil Science* 113 (2), 88-95.
- LLORENS, P. (1991). *Resposta hidrològica i dinàmica de sediments en una petita conca pertorbada de muntyanya mediterrània*, Tesis Doctoral Univ.Barcelona, 276 p.
- MARTIN-VIDE, X. (1985). Estacionalidad de la precipitación y mediterraneidad en el Pirineo catalán. *Notes de Geografía Física*, 13-14, 57-65.
- MCINTYRE, D.S. (1958a). Permeability measurements of soil crust formed by raindrop impact. *Soil Science* 85, 185-189.
- MCINTYRE, D.S. (1958b). Soil splash and the formation of surface crust by raindrop impact. *Soil Science* 85, 261-266.
- MUALEM, Y.; ASSOULINE, S. and ROHDENBURG, H. (1990). Rainfall induced soil seal. (A) A critical review of observations and models. *Catena*, 17, 117-124.
- MWENDERA, E.J. and FEYEN, J. (1992). Estimation of depression storage and Mannin's resistance coefficient from random roughness measurements. *Geoderma*. 52, 235-250.
- PARDINI, G.; PINI, R.; BARBINI, R.; REGÜÉS, D.; PLANA, F. & GALLART, F. (1995). Laser elevation measurements of a smectite-rich mudrock following freeze-thaw and wetting-drying cycles. *Soil Technology*, 8, 161-175.
- REGÜÉS, D.; PARDINI, G.; PINI, R. & GALLART, F. (1992). Estudio del comportamiento de regolitos arcillosos de zonas abarrancadas frente a variaciones de la temperatura y la humedad. *Estudios de Geomorfología en España, actas de la II reunión nacional de geomorfología*, tomo I, 171-181.
- REGÜÉS, D.; LLORENS, P.; PARDINI, G.; PINI, R. & GALLART, F. (1993). Physical weathering and regolith behaviour in a high erosion rate badland area at the Pyrenees: research design and first results. *Pirineos*, nº 141-142, 63-84.
- REGÜÉS, D.; PARDINI, G.; VIGNA GUIDI, G. & GALLART, F. (1994). El efecto de los ciclos térmicos e hídricos sobre las rocas arcillosas, un experimento de laboratorio. *Geomorfología en España, III reunión de geomorfología*, tomo I, 63-72.
- 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*, vol.25, nos.1-4, 199-212.
- REGÜÉS, D. (1995). *Meteorización física en relación con los procesos de producción y transporte de sedimento en un área acaravada*. Tesis Doctoral Univ.Barcelona, 302 p.
- RENAU, P. (1992). The contribution of frost to the erodibility of loamy soils in western Europe, according to the continentality gradient: working programme. *European Soc. for*

Soil Conservation, Newsletter 2, 20-22.

SLATTERY, M.C. and BRYAN, R.B. (1992a). Hydraulic conditions for rill incision under simulated rainfall: a laboratory experiment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17, 127-146.

SLATTERY, M.C. and BRYAN, R.B. (1992b). Laboratory experiments on surface seal development and its effect on interrill erosion processes. *Journal of Soil Science* 43, 517-529.

SLATTERY and BRYAN (1994). Surface seal development under simulated rainfall on an actively eroding surface. *Catena* 22, 17-34.

SOLÈ, A.; JOSA, R.; PARDINI, G.; ARINGHIERI, R.; PLANA, F. & GALLART, F. (1992). How mudrock and soil physical properties influence badland formation at Valcebre (pre-Pyrenees, NE Spain). *Catena*, vol. 19, 287-300.

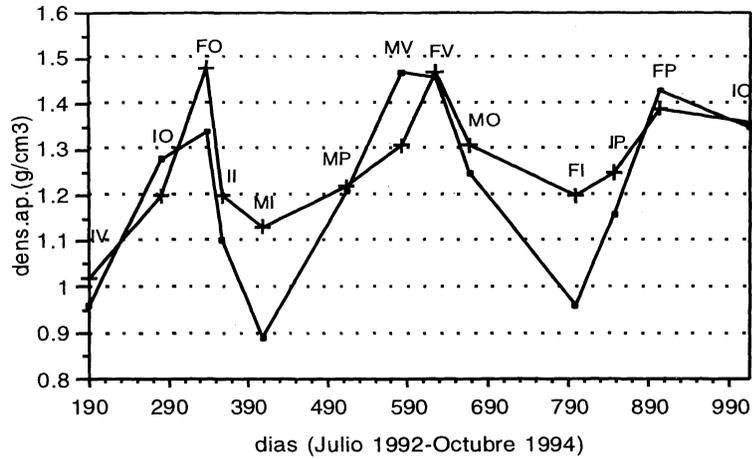
TARCHITZKY, J.; BANIN, A.; MORIN, J. and CHEN, Y. (1984). Nature, formation and effects of soil crusts formed by water drop impact. *Geoderma* 33, 135-155.

Pies de Figura

Figura 1. Conciones físicas del regolito superficial en S1 y S2, antes y después de las experiencias.

Figura 2. Representación gráfica de los factores 1 y 2 que proporcionó el ACP.

Parcela S1



Parcela S2

