PROCESOS DE EROSIÓN Y BALANCE DE SEDIMENTOS EN LAS CUENCAS DE VALLCEBRE: RESULTADOS OBTENIDOS Y CUESTIONES ABIERTAS

F. GALLART[1], J. LATRON[1], N. PÉREZ-GALLEGO[1], N. MARTÍNEZ-CARRERAS[2]

[1] IDAEA, CSIC. Jordi Girona 18, 08034 Barcelona. E.mail: francesc.gallart@idaea.csic.es
[2] CRPGL, Belvaux, Luxembourg

RESUMEN

Las cuencas de Vallcebre fueron instrumentadas entre 1988 y 1990 para estudiar primordialmente el aporte de sedimentos de las áreas de montaña media mediterránea y, en particular, la contribución de las zonas de cárcavas o *badlands.* Antes de instrumentar las cuencas ya se disponía de observaciones sobre las tasas de erosión en los *badlands*, sobre su contribución primordial al aporte de sedimentos de la alta cuenca del Llobregat, y sobre la estacionalidad de su dinámica marcada por la meteorización invernal y la erosión estival. Los principales resultados obtenidos durante estos años han mostrado: (i) el papel protector del suelo de las terrazas de cultivo incluso después de su abandono, (ii) el papel antagónico de las heladas y la vegetación en el desarrollo de las áreas de ***badlands***, (iii) la desconexión temporal y espacial de la generación de escorrentía y producción y transporte de sedimentos en la cuenca, asociada a (iv) la importancia del almacenamiento temporal de sedimentos en los cauces, y (v) las incertidumbres asociadas a las tasas de erosión y transporte de sedimentos debidas principalmente a la variabilidad espacial de las primeras y temporal de las segundas. La principal cuestión abierta es la importancia relativa, durante los eventos mayores, del almacenamiento temporal en el cauce de sedimentos procedentes de la erosión en las áreas de cárcavas respecto a la erosión linear de las cabeceras de los barrancos.

Palabras clave: *Erosión, balance de sedimentos, badlands, Vallcebre.*

ABSTRACT

The Vallcebre research catchments were instrumented between 1988 and 1990 mainly for studying the sediment production from mountain Mediterranean areas and, particularly, the contribution of badland areas. Before the instrumentation some observations were already available on the erosion rates in badlands, on their main contribution to the sediment budget of the high Llobregat basin, and on the seasonality of their dynamics driven by weathering in winter and erosion in summer. The main results obtained during the instrumented period have shown: (i) the soil protecting role of agricultural terraces even after their abandonment, (ii) the contradictory role of freezing and vegetation on the development of badlands, (iii) the spatial and temporal disconnection of runoff generation and sediment production and transportation in the catchments, associated to (iv) the relevance of temporal storage of sediments in the stream beds, and, finally, (v) the uncertainties associated with the erosion and sediment transport rates due mainly to their corresponding spatial and temporal variability. The main open question is the relative importance, during major events, of temporal storage in the stream of sediments coming from badlands respect to the linear erosion in gully heads.

Key words: *Erosion, sediment budget, badlands, Vallcebre.*

1. INTRODUCCIÓN

Las cuencas de investigación de Vallcebre se empezaron a instrumentar en 1988 principalmente para el estudio de los procesos y tasas de erosión de suelos en una zona de montaña media (Balasch *et al.,* 1992), gracias a la financiación recibida de dos proyectos del programa LUCDEME (Lucha contra la Desertificación del Mediterráneo) del ICONA. Para que esto fuera posible se habían dado una serie de circunstancias que eran el reflejo de tendencias en el ámbito internacional: por un lado, los estudios de balances de agua y nutrientes se habían iniciado en España en pequeñas cuencas de Prades, el Montseny y el alto Pirineo Jacetano; por el otro lado, había un interés creciente en el estudio de los procesos actuales en Geomorfología, tanto desde el punto de vista fundamental como de su utilidad para la prevención de riesgos naturales y la conservación de los recursos hídricos y de los suelos. Gracias a la obtención de diversos proyectos y convenios y al esfuerzo continuo de diversas personas en el grupo de Hidrología Superficial y Erosión del IDAEA (CSIC), se han podido continuar los estudios en estas cuencas hasta el presente, lo que ha requerido rediseñar regularmente los objetivos científicos en base a los resultados obtenidos en los proyectos anteriores.

En el presente trabajo se resumen los principales resultados alcanzados sobre procesos y tasas de erosión, siguiendo algunos de los trabajos realizados publicados o inéditos. En Gallart (1991) se pueden consultar las líneas de trabajo y las referencias correspondientes a 32 trabajos realizados hasta 1991, y en Gallart *et al*. (2013) se describe detalladamente la instrumentación y se recogen la mayor parte de los principales trabajos hasta esa fecha. Las principales características de las

cuencas y los resultados referentes a los procesos hidrológicos pueden consultarse en Latron *et al*. (en este volumen); solamente cabe añadir que en Vallcebre hiela aproximadamente unos 100 días al año (Regüés *et al.*, 1995), y que los *badlands* se desarrollan sobre lutitas continentales Paleocenas de facies Garumnense, con presencia de arcillas esmectíticas (Solé *et al.,* 1992).

2. ESTUDIOS INICIALES: SECUENCIA ESTACIONAL DE LOS PROCESOS Y TASAS DE EROSIÓN EN ÁREAS DE *BADLANDS*

En Clotet & Gallart (1986) y Clotet *et al*. (1988) se resumen los trabajos realizados desde 1981 en áreas acarcavadas de Vallcebre, basados en fotointerpretación, observaciones de campo, instrumentos sencillos (pluviómetros totalizadores, clavos de erosión, sacos de plástico) y una campaña de sondeos manuales para cubicar el depósito de sedimentos originado por un deslizamiento que en 1945 había cerrado la salida de una pequeña cuenca. Los principales resultados fueron los siguientes:

- Las heladas invernales originan una fuerte meteorización de las rocas lutíticas del substrato, formándose un regolito de pocos centímetros. La fusión de la nieve o las lluvias suaves de primavera causan la saturación del regolito y la formación de flujos que se acumulan al pie de las vertientes escarpadas. Posteriormente, el desecamiento del regolito origina el desprendimiento de fragmentos que caen por gravedad formando taludes que cubren los cauces elementales. Las lluvias cortas e intensas de verano, a veces acompañadas de granizo, originan la erosión de casi todo el manto de meteorización y su deposición en los cauces principales; estos sedimentos precisan de crecidas de mayor duración en otoño o invierno para ser transportados a mayor distancia, aunque algunas acumulaciones en conos o glacis son almacenes semipermanentes.

- Los sedimentos recogidos en sacos en una vertiente (4 m^2) y una "cuenca" (37,5 m^2) elementales durante un año mostraron tasas de entre 11 y 14 kg m^{-2} (7,3 y 9,3 mm, respectivamente), mientras que los clavos de erosión indicaron una tasa de 37,0 mm (55 kg m^{-2}), después de haber mostrado temporalmente tasas negativas en invierno a causa de la meteorización; tres años más tarde los clavos dieron una tasa anual de 15,3 mm (23 kg m^{-2}), un valor más cercano a los obtenidos con los sacos. Las lluvias de moderada intensidad pero de extraordinario volumen de Noviembre de 1982 (340 mm en 48 h) originaron una erosión de orden similar a la producida por las lluvias de verano en las formas elementales, pero efectuaron una limpieza generalizada de los sedimentos previamente depositados en los cauces. La cubicación de los sedimentos en la pequeña cuenca cerrada por el deslizamiento durante un período de unos 40 años proporcionaría tasas de erosión entre 9,3 y 1,2 mm $año^{-1}$, dependiendo de si se considera que el sedimento procede exclusivamente de las áreas con formas de disección en el primer caso, o también de las áreas semidegradadas (con manchas de vegetación y árboles dispersos) en el segundo. Por último, las etapas de relleno sedimentario mostraron una recurrencia media de 3 años, que se atribuye al efecto de lluvias lo bastante copiosas para originar un transporte eficiente de

los sedimentos. Se sugiere en conclusión que las tasas de erosión a largo plazo estarían controladas por la meteorización, mientras que el transporte de sedimentos a larga distancia estaría controlado por los eventos lluviosos, que tienen un patrón temporal más irregular.

3. TASAS DE EROSIÓN Y BALANCES DE SEDIMENTO EN SUBCUENCAS SIN ÁREAS DE *BADLANDS*

Las primeras cuencas en ser instrumentadas fueron las de Cal Parisa, en un área ocupada casi totalmente por terrazas de cultivo abandonadas, sin áreas de *badlands* pero con dos cicatrices de deslizamientos superficiales (flujos) producidos durante el evento de Noviembre de 1982. Los trabajos publicados sobre la respuesta de la cuenca (Llorens & Gallart, 1992) y sobre el balance de sedimentos (Llorens *et al*., 1997) ofrecieron las siguientes conclusiones principales:

- La exportación anual de sólidos de la cuenca está fuertemente dominada por el transporte en disolución (0,14 Mg ha^{-1}), unas cuatro veces mayor que el transporte en suspensión (0,04 Mg ha^{-1}), y casi 100 veces mayor que los arrastres de fondo estimados.

- La erosión bruta en las cicatrices de deslizamiento y otras áreas degradadas representaría para toda la cuenca una tasa de erosión media anual de 3,5 Mg ha^{-1}, unas 100 veces más grande que la del transporte en suspensión a escala de cuenca. La baja exportación de sedimentos en suspensión se atribuye a la excelente protección aportada por la cubierta vegetal y las terrazas de cultivo, que favorecen además la discontinuidad de la transferencia de sedimentos.

4. AVANCES EN EL COMPORTAMIENTO ESTACIONAL DE LAS SUPERFICIES DE LOS *BADLANDS*

Las propiedades de las rocas lutíticas, regolitos y suelos fueron estudiadas en el laboratorio por Solé *et al.* (1992). Posteriormente, el comportamiento del regolito fue analizado detalladamente en el campo a lo largo de varios años por Regüés *et al*., (1995) y Regüés & Gallart, (2004), así como en el laboratorio por Pardini *et al*., (1996). Los principales resultados fueron los siguientes:

- Cuando la roca lutítica fresca es sometida a ciclos de hielo-deshielo, la formación de cristales de hielo por criosucción cerca de la superficie produce la disrupción progresiva de la estructura de la roca (*frost heaving)* y la obertura de numerosos poros y fisuras de diverso tamaño. Estas fisuras favorecen la llegada de agua a paquetes de arcilla esmectítica causando su expansión y disgregando la roca. La densidad aparente pasa de valores máximos cercanos a 1,4 g cm^{-3} en verano (a causa de la compactación y erosión del regolito por las lluvias de alta intensidad) a valores mínimos de 0,6 g cm^{-3} en invierno. A finales de invierno, la parte superficial del regolito suele mostrar un aspecto de agregados sueltos en forma de palomitas de maíz (*popcorn*). La humedad volumétrica del regolito muestra un patrón temporal inverso al de la densidad, con valores máximos de hasta 0,4 en invierno y mínimos de 0,05 en verano; los ciclos de humectación-desecación tienen un papel muy secundario en la meteorización, pero los agregados secos de regolito se disgregan rápidamente al humedecerse.

- El comportamiento del regolito frente a experimentos de lluvia simulada va-

ría fuertemente según las condiciones de densidad aparente y humedad previa, que siguen un patrón estacional; ésto implica que las observaciones realizadas en un período de pocos meses podrían llevar a resultados no representativos. En otoño y en primavera las condiciones son relativamente estables, con capacidad de infiltración mínima y erodibilidad máxima respectivamente. Durante el verano se produce un descenso de la erodibilidad, mientras que durante el invierno se produce un aumento de la capacidad de infiltración.

5. PROCESOS GEOMÓRFICOS Y VEGETACIÓN EN LOS *BADLANDS*

En las cuencas de Vallcebre existe un fuerte contraste entre las áreas densamente vegetadas por pastos o bosques y las áreas casi totalmente desnudas de los *badlands*. A. Kotarba sugirió en una visita que estas geoformas podrían ser heredadas de períodos secos subactuales, mientras que J. Tricart y A. Yaïr sugirieron el posible papel de la salinidad de la roca en dificultar la colonización vegetal.

Guàrdia *et al.* (2000) y Regüés *et al.* (2000) analizaron detalladamente las interacciones entre procesos geomórficos y el desarrollo de la vegetación; los principales resultados fueron los siguientes:

- La energía disponible para los procesos de meteorización es dos órdenes de magnitud mayor que la energía cinética de la lluvia. La energía de gelivación, teniendo en cuenta las diferencias de temperatura y de contenido en agua, es entre tres y cuatro veces mayor en las exposiciones Norte que en las exposiciones Sur.

- En las superficies de los *badlands* el banco de semillas es de más de 1000 semillas por m^2, un valor inesperadamente elevado en comparación con los *badlands* de zonas semiáridas. Las semillas germinan entre Mayo y Julio con una densidad relativamente baja (4% del banco); el 50% de las plántulas perecen antes del invierno y menos del 20% sobreviven un año.

- El análisis de la vegetación muestra claramente que las exposiciones Norte tienen una vegetación más pobre en composición de especies y en cubierta que las exposiciones Sur. Esta disposición es totalmente opuesta a la de los *badlands* en áreas semiáridas, donde las solanas son más desnudas que las umbrías. En las cuencas de Vallcebre, las condiciones potencialmente mejores para la colonización vegetal en las vertientes en umbría (formación más rápida del regolito, mayor infiltración y disponibilidad hídrica) parecen por lo tanto ser compensadas por las condiciones térmicas adversas y las elevadas tasas de erosión. La vegetación crece mejor en las solanas gracias a un periodo vegetativo más largo, que se inicia cuando todavía hay suficiente agua disponible; la formación más lenta del regolito se compensaría por una menor tasa de erosión gracias a la misma cubierta vegetal incipiente.

En los *badlands* de Vallcebre se puede observar también la presencia de algunos pinos dispersos, solitarios o conectados con placas de vegetación herbácea, que suelen mostrar raíces exhumadas. En 1992, M.C. Heuzey (estudiante de la Université Louis Pasteur de Strassburg dirigida por J.L. Mercier), realizó un estudio para estimar las velocidades de denudación a partir de la exposición de las raíces de estos pinos en el área del Carot (Heuzey, 1992). Las principales conclusiones de este estudio fueron las siguientes:

- Las tasas de denudación más elevadas se obtuvieron en lugares específicos como márgenes de torrente (>3 cm año^{-1}) o paredes subverticales (>2 cm año^{-1}), pero para la mayor parte del terreno, la presencia simultánea de árboles y erosión implica una tasa menor de 2 cm año^{-1} y una exhumación de hasta 60 cm.

- En las partes altas de las vertientes, donde el tapiz herbáceo se rompe en placas, la ablación media es de 1 cm año^{-1}, mientras que una ablación de 1,2 cm año^{-1} marca el límite de la destrucción total de la placa de vegetación.

- Cuando no hay cobertura de materiales gruesos, la ablación en material homogéneo es relativamente débil (0,56 cm año^{-1}) e incluso nula (10 casos de 63), indicando una transferencia generalizada del material en régimen permanente.

6. INTEGRACIÓN DEL PAPEL DE LOS *BADLANDS* A ESCALA DE CUENCA

Un primer intento de integración de los resultados obtenidos después de más de 10 años de funcionamiento de las cuencas, así como de 3 años de mediciones de la producción de sedimentos en una macroparcela (Castelltort, 1995), se publicó en Gallart *et al.* (2005). Este trabajo confirmó las principales hipótesis establecidas en los estudios preliminares, con algunos matices relevantes:

- La dinámica de sedimentos en las cuencas de Vallcebre está dominada por la existencia de los *badlands*. Hay unas fuertes discontinuidades espaciales y temporales en la transferencia de sedimentos en las cuencas: El regolito formado durante el invierno es erosionado y transportado hasta los cauces principales durante las precipitaciones intensas de verano. Posteriormente, es transportado fuera de las cuencas durante las crecidas principales (otoño) que pueden movilizar sedimentos acumulados durante varios años (véase también Soler *et al*., 2008). El elevado coeficiente de correlación lineal entre escorrentía y transporte de sedimentos a escala del evento (0,78) muestra que el transporte de sedimentos está controlado por la energía, ya que siempre hay sedimentos disponibles en la red de drenaje (véase también Duvert *et al.,* 2012).

- El transporte de sedimentos medido en la estación de Ca l'Isard muestra variaciones interanuales de hasta dos órdenes de magnitud. El valor medio obtenido en aquel momento fue de 1375 Mg km^{-2} anuales, un valor notablemente más elevado que la producción estimada de los *badlands* en la subcuenca (correspondiente a 500 Mg km^{-2} anuales), siendo la diferencia atribuible en gran parte al papel de grandes crecidas registradas en 1997 y 1999. Esta disparidad plantea diversas posibilidades que no se excluyen entre sí: la contribución de importantes fuentes de sedimento no contabilizadas, como la erosión de las riberas, los movimientos en masa o la incisión de cauces o cabeceras de barranco; la falta de representatividad de las mediciones de tasas de erosión en *badlands*; o una elevada incertidumbre asociada a la medición del transporte de sedimentos en la estación.

En vistas a estos resultados, se utilizó el modelo de erosión KINEROS2 para simular un registro representativo de una mayor extensión de *badlands* y más largo en el tiempo (Martínez-Carreras *et al.*, 2007). Los resultados permitieron un me-

jor análisis de la discontinuidad temporal entre la dinámica de los *badlands* y de los cauces, pero remarcaron la insuficiencia de la producción de sedimentos de los *badlands* para explicar los aportes a escala de cuenca.

Posteriormente, en Gallart *et al.* (2013) se realizó una actualización de los resultados a las distintas escalas, teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a la variabilidad temporal de los eventos de erosión en los *badlands* y del transporte en los cauces. Esta actualización se ha revisado posteriormente en Gallart *et al.* (2014) incluyendo las incertidumbres asociadas a las simulaciones realizadas con KINEROS2 y a las mediciones en la estación de aforos. Las principales conclusiones de estos estudios más recientes fueron las siguientes:

- La producción de sedimentos de la cuenca de Ca l'Isard a largo plazo se estima en 880 mg km^{-2} anuales. La marcada variabilidad temporal de los procesos erosivos y de transporte se sedimentos en Vallcebre hacen necesario un registro de por lo menos 5 años para poder determinar el orden de magnitud de las tasas a largo plazo (véase también Soler *et al*., 2007).

- A pesar de la elevada variabilidad interanual de ambos y de las diversas incertidumbres asociadas, la producción de sedimentos en las áreas de *badlands* en la cuenca de Ca l'Isard es significativamente menor que los transportes en suspensión medidos en la estación de aforos a largo plazo, debido principalmente a las grandes crecidas con un periodo de recurrencia del orden de 4-5 años. La hipótesis más probable es la producción, durante estas grandes crecidas, de sedimentos por incisión de las cabeceras de la red, que cortan profundos barrancos en el substrato lutítico.

7. PERSPECTIVAS Y CONCLUSIÓN

Los resultados comentados anteriormente muestran el interés de los estudios a largo plazo que no se limitan a las salidas de la cuenca sino también a lo que sucede dentro de ella (García-Ruiz & Gallart, 1991), pero muestran también las limitaciones de los métodos empleados, aunque sean sofisticados (Nord *et al.,* 2014). Desde el punto de vista del balance de sedimentos, la incertidumbre de las mediciones en las estaciones durante los grandes eventos (véase Soler *et al.,* 2012) y la variabilidad espacial de las tasas de erosión en los *badlands* son las principales dificultades.

De un modo similar a lo que ya se ha iniciado en el estudio del comportamiento hidrológico (Latron *et al.,* este volumen) estas limitaciones nos han llevado a la conveniencia de utilizar trazadores para verificar los resultados obtenidos y avanzar en la definición y verificación de hipótesis sobre el funcionamiento de las cuencas. La metodología adoptada se basa en el uso de dos isótopos radioactivos de origen natural que se depositan con la lluvia. El ^{7}Be, que tiene un período de semidesintegración de 53,5 días, apenas tiene tiempo de acumularse en los suelos y regolitos pero por esta razón puede emplearse para comparar la conectividad de la erosión en las cárcavas con el transporte de sedimentos durante eventos de distinta actividad erosiva en los *badlands*. El ^{210}Pb, que tiene un período de semidesintegración de 22,3 años, se acumula en los suelos y puede ser utilizado para cartografiar las tasas de erosión y para el trazado de sedimentos si se

establecen una serie de hipótesis de trabajo adecuadas a los procesos que actúan en Vallcebre.

8. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado gracias a los proyectos RespHiMed (CGL2010-18374) y MEDHYCON (CGL2012-32446), así como la RESEL (convenio CSIC-MAGRAMA). J. Latron ha participado gracias a un contrato del programa Ramón y Cajal. Los autores agradecemos la colaboración de numerosas personas que han participado en los estudios realizados en Vallcebre, especialmente a O. Ávila, G. Catari, X. Huguet, P. Llorens, D. Regüés, M. Soler y los diversos coautores de los artículos reseñados, así como la colaboración de J. Estrany en el programa de trazado de sedimentos. También queremos agradecer el apoyo incondicional de José Mª García-Ruiz, con quien hemos compartido inquietudes, ideas y proyectos durante estos largos años.

9. REFERENCIAS

Balasch, C., Castelltort, X., Llorens, P. & Gallart, F. (1992): Hydrological and sediment dynamics network design in a Mediterranean mountainous area subject to gully erosion. In: *Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins*, Bogen, J., Walling, D.E. and Day, T. (Eds), IAHS Pub., 210: 433-442.

Castelltort, F.X. (1995): *Erosió, transport i sedimentació fluvial com a integració dels processos geomorfològics d'una conca (conca de Cal Rodó, Alt Llobregat)*. Tesis Doctoral, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona.

Clotet, N. & Gallart, F., (1986): Sediment yield in a mountainous basin under high Mediterranean climate. *Zeits. für Geomorphologie Supp*. Bd., 60: 205-216.

Clotet, N., Gallart, F. & Balasch, J. (1988): Medium term erosion rates in a small scarcely vegetated catchment in the Pyrenees. *Catena,* Sup. 13: 37-47.

Duvert C., Nord G., Gratiot N., Navratil O., Nadal-Romero E., Mathys N., Némery J., Regüés D., García-Ruiz. J.M., Gallart F. & Esteves M. (2012). Towards prediction of suspended sediment yield from peak discharge in small erodible mountainous catchments (0.45–22 km2) of France, Mexico and Spain. *Journal of Hydrology*, 454-455: 42-55.

Gallart, F. (1991): Land conservation and hydrological studies in the high Llobregat basin (Barcelona). in: Sala, M., Rubio, J.L., García-Ruiz, J.M. (Ed.), *Soil Erosion Studies in Spain.* Geoforma Ediciones: 91-96, Logroño.

Gallart F., Balasch C., Regüés D., Soler, M. & Castelltort, X. (2005): Catchment dynamics in a Mediterranean mountain environment: the Vallcebre research basins (South Eastern Pyrenees). II: Temporal and spatial dynamics of erosion and stream sediment transport, in: C. Garcia and R. Batalla (editors), *Catchment Dynamics and River Processes: Mediterranean and other climate regions*. Elsevier: 17-29, Amsterdam.

Gallart, F., Pérez-Gallego, N., Latron, J., Catari G., Martínez-Carreras, N. & Nord, G. (2013): Short and long-term studies of sediment dynamics in a small subhumid mountain Mediterranean basin with badlands. *Geomorphology*, 196: 242-251.

Gallart, F., Latron, J., Martínez-Carreras, N., Pérez-Gallego, N. & Catari G. (2014): Tasas de erosión y balances de sedimento en las cuencas de Vallcebre: conectividad espacio-temporal del transporte e incertidumbres asociadas. En: Schnabel, S. & Gómez Gutiérrez, Á. (eds.). *Avances de la Geomorfología en España 2012-2014*. Fundicotex, Cáceres.

García Ruiz, J.M. & Gallart, F. (1997): Las cuencas experimentales como base para el estudio de la erosión y la desertificación. *In*: J.J. Ibáñez, B. Valero Garcés y C. Machado, (eds.): *El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación*, Geoforma Ediciones, 221-238, Logroño.

Guàrdia, R., Gallart, F. & Ninot, J.M. (2000): Soil seed bank and seedling dynamics in badlands of the upper Llobregat basin (Pyrenees). *Catena,* 40 (2): 189-202.

Heuzey, M.C. (1992): *Érosion des sols: Essai d'application de deux méthodes de mesure*

d'érosion dans deux zones de bad-lands du bassin de Vallcebre (Catalogne). Mémoire de Maîtrise présentée à l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, UFR de Géographie, 59 pp. et annexes.

Latron, P., Llorens, P., García-Estríngana, P., Roig Planasdemunt, M. & Gallart, F. (este volumen): Estudio y modelización de la dinámica hidrológica de un ambiente Mediterráneo de montaña. Síntesis de los resultados obtenidos a lo largo de 25 años de investigaciones en las cuencas de Vallcebre (Pirineo Oriental).

Llorens, P. & Gallart, F. (1992): Small basin response in a Mediterranean mountainous abandoned farming area: research design and preliminary results. *Catena*, 19: 309-320.

Llorens, P., Queralt, I., Plana, F. & Gallart, F. (1997): Studying sediment transfer in a small Mediterranean mountainous basin subject to land abandonment. *Earth Surface Processes and Landforms,* 22: 1027-1035.

Martínez-Carreras N., Soler M., Hernández E. & Gallart F. (2007): Simulating badland erosion with KINEROS2 in a small Mediterranean mountain basin (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Catena*, 71: 145-154.

Nord G., Gallart F., Gratiot N., Soler M., Reid I., Vachtman D., Latron J., Martín Vide J.P. & Laronne J.B. (2014): Applicability of acoustic Doppler devices for flow velocity measurements and discharge estimation in flows with sediment transport. *Journal of Hydrology*, 509: 504-518.

Pardini, G., Vigna Guidi, G., Pini, R., Regüés, D. & Gallart, F. (1996): Structure and porosity of smectitic mudrocks as affected by experimental wetting-drying cycles and freezing-thawing cycles. *Catena* 27 (3-4): 149-165.

Regüés, D., Guàrdia, R. & Gallart, F. (2000): Geomorphic agents versus vegetation spreading as causes of badland occurrence in a Mediterranean subhumid mountainous area. *Catena,* 40 (2): 173-187.

Regüés D., Pardini, G. & Gallart, F. (1995): Regolith behaviour and physical weathering of clayey mudrock in a gullied area, as dependent on seasonal weather conditions. *Catena,* 25: 199-212.

Regüés, D. & Gallart, F. (2004): Seasonal patterns of runoff and erosion responses to simulated rainfall in a badland area in Mediterranean mountain conditions (Vallcebre, south eastern Pyrenees). *Earth Surface Processes and Landforms,* 29: 755-767.

Solé, A., Josa, R., Pardini, G., Aringhieri, R., Plana, F. & Gallart, F. (1992): How mudrock and soil physical properties influence badland formation at Vallcebre (Pre-Pyrenees, Spain). *Catena* 19: 208-300.

Soler M., Latron J. & Gallart, F. (2008): Relationships between suspended sediment concentrations and discharge in two small research basins in a mountain Mediterranean area (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Geomorphology*, 98: 143-152.

Soler, M., Nord, G., Catari, G. & Gallart, F. (2012): Assessment of suspended sediment concentration measurement error in relation to particle size, using continuous sensors in a small mountain stream (Vallcebre catchments, Eastern Pyrenees). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 56 Sup. 3 : 99-113.

Soler M., Regüés D., Latron J. & Gallart, F. (2007): Frequency-magnitude relationships for precipitation, stream flow and sediment load events in a small Mediterranean basin (Vallcebre basin, Eastern Pyrenees). *Catena*, 71: 164-171.