

MODELIZACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA Y DE LA EROSIÓN DEL SUELO EN LA CUENCA DE LAS LAGUNAS DE ESTAÑA (HUESCA)

M. LÓPEZ-VICENTE¹, L. GASPAR², L. PALAZÓN¹, L. QUIJANO¹, S. BEGUERÍA¹, J. MACHÍN¹, A. NAVAS¹

¹ Grupo de Erosión y Evaluación de Suelo y Agua, Depto. de Suelo y Agua, Estación Experimental de Aula Dei, EEAD-CSIC. Avda. Montañana 1005, 50059 Zaragoza. mvicente@eead.csic.es; mlopezvicente@gmail.com; lpalazon@eead.csic.es; lquijano@eead.csic.es; sbegueria@eead.csic.es; javiermachingayarre@gmail.com; anavas@eead.csic.es

² Environmental Science Program, University of Northern British Columbia, Prince George, BC, V2N 4Z9, Canadá. leticia.gasparferrer@unbc.ca

RESUMEN

En el marco de una serie de proyectos de investigación llevados a cabo en la Cuenca de Estaña (246 ha, Prepirineo oscense) hemos aplicado y/o modificado los modelos SEMMED, MMF, RMMF, ModRMMF y RUSLE de erosión, SEDD e IC de transporte, y creado y programado los modelos DR2 hidrológico y SERT de erosión. Numerosos escenarios se han simulado y las tasas de redistribución del suelo se han validado con ¹³⁷Cs.

Palabras clave: *Lagunas de Estaña, modelos de predicción, escorrentía, erosión del suelo*

ABSTRACT

Within the framework of several research projects carried out in the Estaña Catchment (246 ha, Huesca Pre-Pyrenees) we have applied and/or modified the models: SEMMED, MMF, RMMF, ModRMMF and RUSLE of soil erosion, SEDD and IC of transport, and created and programmed the hydrological DR2 and SERT soil erosion models. Numerous scenarios were simulated and the soil redistribution rates were validated with ¹³⁷Cs.

Key words: *Estaña Lakes, predicting models, runoff, soil erosion*

1. INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica del suelo puede causar perjuicios en las tierras de cultivo y en la calidad del agua, y amenazar la sostenibilidad de los ecosistemas e infraestructuras. En los suelos agrícolas, el principal daño es la reducción de la profundidad y superficie cultivable, así como la pérdi-

da de carbono y nutrientes (N y P), que conducen a una menor productividad y calidad del suelo (Navas *et al.*, 2012). Entre las consecuencias negativas fuera del área de erosión se encuentran el transporte de pesticidas y otros contaminantes a los cursos de agua, así como el aporte de sedimento a los embalses (Navas *et*

al., 2011). La erosión del suelo no sólo se debe a factores geo-ecológicos (litología, topografía y clima) sino también a factores antrópicos de uso del terreno (expansión de la agricultura, pastos y ganadería, edificaciones e infraestructuras) y gestión de las cubiertas vegetales (tala y quema de bosques, abandono de cultivos, incremento del tamaño de las parcelas, regadíos) (García-Ruiz, 2010). La actividad humana ha modificado los paisajes y las dinámicas hidro-morfológicas durante los últimos 4000 años incrementando la magnitud y en algunos casos desencadenando la erosión y degradación del suelo (García-Ruiz & Valero-Garcés, 1998).

Los modelos hidrológicos y de erosión del suelo son herramientas útiles capaces de estimar tasas espacialmente distribuidas de escorrentía y agua en el suelo, y de desagregación, transporte, redistribución y exportación del suelo (López-Vicente & Kirkby, 2013). Los diferentes modelos se aplican en un amplio rango de escalas espaciales y temporales y en múltiples ambientes (climáticos, agrícolas y naturales) y escenarios (pasados, presentes y futuros). Todos los modelos requieren una primera etapa de parametrización, en algunos casos de calibración y una final de validación de las estimaciones (Palazón & Navas, 2013). En este artículo presentamos una síntesis de los trabajos de modelización hidrológica y de la erosión del suelo realizados en la Cuenca de las Lagunas de Estaña (246 ha, Prepirineo oscense) por investigadores del Grupo de Erosión y Evaluación de Suelo y Agua, de la Estación Experimental de Aula Dei (EEAD-CSIC) en el marco de una serie de proyectos de investigación del Plan Nacional y del Gobierno de Aragón y Obra Social “la Caixa” durante el periodo 2002-2013. Con esta síntesis

mostramos la evolución en los estudios de modelización realizados destacando la eficacia y limitaciones de cada modelo así como las líneas de trabajo futuras para dar respuesta a los retos de sostenibilidad de los recursos suelo, agua y planta bajo las amenazas de cambio global.

2. COMPLEJO KÁRSTICO DE LAS LAGUNAS DE ESTAÑA

El complejo kárstico de las Lagunas de Estaña o Cuenca de Estaña está formado por tres lagunas permanentes de agua dulce, denominadas Estanque de Arriba, Estanque Grande de Abajo y Estanque Pequeño de Abajo, por sus cuencas vertientes y por 12 sub-cuencas endorreicas (Figura 1). Con una extensión total de 246 ha, la superficie máxima inundada es de 17.3 ha (López-Vicente *et al.*, 2009a). Las tres lagunas y su vegetación lacustre están bajo protección del Gobierno de Aragón desde 1997, incluidas en el Inventario de Humedales Singulares de Aragón y forman parte de la red NATURA 2000 de la UE como Lugar de Interés Comunitario (LIC) (Figura 2a). La cuenca se sitúa en las Sierras Marginales del Prepirineo oscense, entre los 676 y los 896 m s.n.m. y con una pendiente media del 19.5%. Las áreas de alta pendiente ocupan el 20% de la superficie y las de baja pendiente el 33%. El acuífero que alimenta a las lagunas muestra un flujo preferencial del NO (Estanque de Arriba) al SE (Estanque Grande de Abajo), con valores de transmisividad entre 400 y 1600 m² día⁻¹ y un tiempo de respuesta corto frente a los eventos de lluvia (Pérez-Bielsa *et al.*, 2012). Los suelos se desarrollan sobre materiales mesozoicos del tipo margas yesíferas, dolomías, calizas y depósitos salinos. Veintiuna unidades de suelos se identifican (clasificación

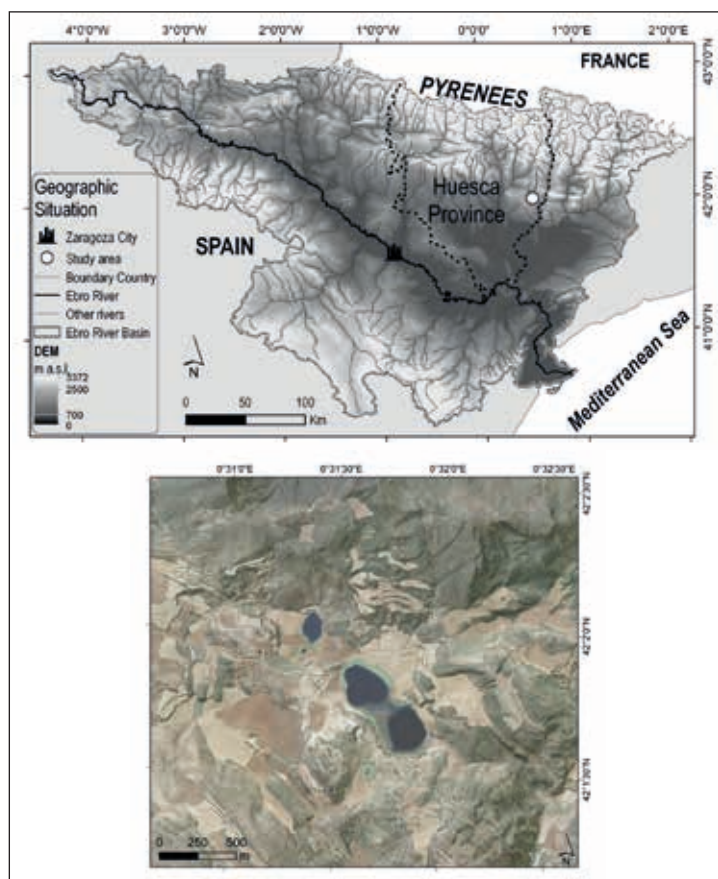


Figura 1. Situación geográfica de la Cuenca de Estaña e imagen 3D (MDE-LiDAR) de la cuenca.

FAO) agrupadas en seis tipos: Calcisoles, Leptosoles y Regosoles como los tres más importantes (88% de la superficie no inundada), y Gypsisoles, Gleysoles y Vertisoles como suelos minoritarios (Machín *et al.*, 2008). La textura es franco-limosa y en algunas zonas franco-arcillo-limosa.

La Cuenca de Estaña ha estado habitada desde el siglo X, con un máximo poblacional y de ocupación en el siglo XIX y una progresiva despoblación y abandono de los campos de las laderas desde mediados

del siglo XX. Estos cambios se reflejan en variaciones de la intensidad de los procesos de erosión del suelo y en la magnitud de los aportes de sedimentos a las lagunas, que actualmente se estiman en 3.41 mm año^{-1} (Morellón *et al.*, 2011). El 31% de los suelos están cultivados con cereal de invierno (cebada y trigo) o se dedican a pastos, mientras que el resto de los suelos están cubiertos por bosques mediterráneos (encina, coscoja y quejigo) y arbustos (boj), con mayor o menor densidad (Figura

En las laderas se desarrollan 16 sistemas de cárcavas, con una longitud promedio de 220 metros, y comienzan a una distancia promedio de 303 metros desde la divisoria (Figura 2d). Ningún sistema alcanza las lagunas y aparecen inconexos entre sí. Mediante el uso del radionucleido ^{137}Cs se han podido cuantificar las tasas de pérdida y acumulación netas de suelo en los distintos tipos de suelo (Gaspar *et al.*, 2014), y en la totalidad de la Cuenca de Estaña (Navas *et al.*, 2013; Navas *et al.*, en revisión), apareciendo las mayores tasas de erosión en los suelos cultivados en las laderas y en aquellos con escasa cubierta vegetal (entre casi cero y $108 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

3. MODELOS DE PREDICCIÓN UTILIZADOS

En el desarrollo de los tres proyectos de investigación se han utilizado diferentes modelos, empíricos y semi-físicos, a distintas escalas espaciales (sub-cuencas a 1×1 metro de tamaño de celda, totalidad de la cuenca a 5×5 metros) y temporales (diario, quincenal, mensual y anual):

3.1. Modelos RUSLE y MMF de erosión y SEDD e IC de transporte

La primera modelización de la erosión del suelo se realizó con el modelo SEMMED (*Soil Erosion Model for MEDiterranean regions*) que es la versión adaptada al clima mediterráneo del modelo semi-físico MMF (*Morgan-Morgan-Finney*) obteniendo una tasa promedio de erosión de $0.1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en la cuenca del Estanque de Arriba (López-Vicente *et al.*, 2006). Posteriormente, realizamos un estudio comparativo a escala mensual entre el modelo original MMF y su versión

mejorada RMMF (*Revised Morgan-Morgan-Finney*) en campos de cultivo, pastos y campos abandonados en diferentes fechas, obteniendo mejores predicciones con la versión mejorada frente a las tasas cuantificadas con ^{137}Cs (López-Vicente *et al.*, 2008a) (Tabla 1). A escala anual y para el conjunto de la Cuenca de Estaña aplicamos el modelo empírico RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) (López-Vicente & Navas, 2009) bajo tres escenarios del factor K de erodibilidad del suelo, destacando el peso de los procesos de infiltración y el contenido de rocas en el suelo sobre las tasas estimadas (Figura 3a). A escala quincenal y en cultivos bajo condiciones fisiográficas homogéneas aplicamos RUSLE, identificando tres periodos erosivos diferentes en el año, y cuantificamos el peso de los procesos de hielo/deshielo sobre el factor K , frente a las variaciones temporales de la erosividad de la lluvia y de la escorrentía (López-Vicente *et al.*, 2008b).

Con el objetivo de calcular los aportes de sedimento anuales a las tres lagunas de la Cuenca aplicamos de modo conjunto los modelos RMMF de erosión y SEDD (*Sediment Delivery Distributed*) de transporte, obteniendo los mapas espacialmente distribuidos de erosión, transporte y producción de sedimento que posteriormente se compararon con los elementos geomorfológicos de la Cuenca (López-Vicente & Navas, 2010a) (Figura 3b) (Tabla 1). Con el objetivo de mejorar la capacidad predictiva del modelo RMMF, modificamos las ecuaciones de estimación de la escorrentía para dar cabida a diferentes tipos de algoritmos de enrutamiento, adaptando el algoritmo de flujo combinado al inicio de las cárcavas de la Cuenca (López-Vicente & Navas, 2010b).

Tabla 1. Escalas de aplicación y tasas estimadas con los distintos modelos aplicados.

MODELO/S	ESCALA ESPACIAL	EROSIÓN (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)		TRANSPORTE / REDISTRIBUCIÓN Rango	EXPORTACIÓN (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹) Total	
		media	máx.			
RUSLE	C. Estaña	2.3	306.3	ND	ND	
	Cultivo baja pendiente	3.3		ND	ND	
RMMF	Cultivo / Pasto / Abandonado reciente / Abandonado antiguo		81/1/ 62/22	ND	ND	
SEMMED	Sub-C. Est. Arriba	9.0	12.5	ND	ND	
	C. Estaña	16.1	126.8	ND	ND	
ModRMMF	Sub-C. Est. Grande de Abajo	3.7	303.2	ND	0.3	
RMMF + SEDD	C. Estaña	11.9	170.3	SDR = 0.41	4.8	
ModRMMF + IC	Sub-C. Est. Arriba	Año 1960	3.7	380.1	IC = -4.8	ND
		Año 2009	2.5	380.3	IC = -5.0	ND
		Año 2020	1.5, 2.3	373.3, 373.8	IC = -5.4 - -5.2	ND
SERT-2013	Sub-C. Piloto	11.0	99.2	Redist. = -10, +9	Balance = -1.15	

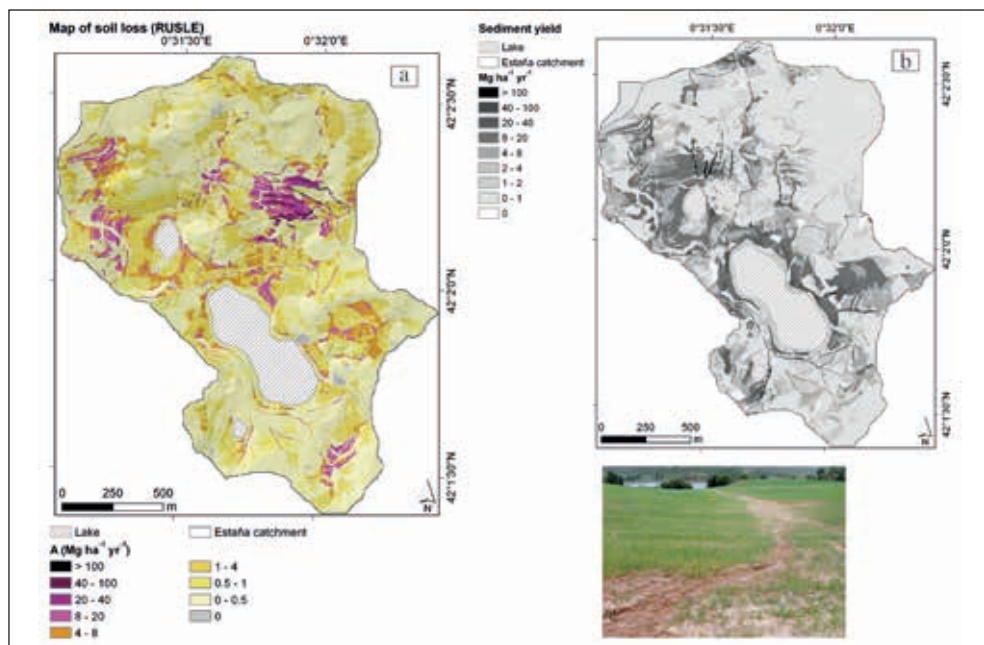


Figura 3. (a) Mapa de erosión promedio anual calculado con el modelo RUSLE, y (b) mapa de producción de sedimento a las Lagunas de Estaña calculado con los modelos RMMF y SEDD e imagen de una cárcava efímera.

Los elementos lineales del paisaje (pistas de tierra, caminos de grava y asfaltados, muros elevados, paredes de piedra, franjas de vegetación entre campos, acequias y canales, taludes, construcciones, etc.) condicionan la conectividad espacial de la escorrentía y por lo tanto del transporte, acumulación temporal y exportación de las partículas de suelo erosionadas aguas arriba. Con el objetivo de introducir estos procesos en la modelización de la erosión unimos el modelo IC (*Index of Connectivity*) de conectividad al modelo ModRMMF (López-Vicente *et al.*, 2013a) y los aplicamos en diferentes escenarios de usos del suelo y gestión de la vegetación (Tabla 1).

3.2. Modelos propios del Grupo: hidrológico DR2 y SERT de erosión

Con el objetivo de aproximarnos a una modelización más física de los procesos que tienen lugar durante los eventos de lluvia y en los intervalos entre eventos, desarrollamos el modelo hidrológico DR2 de balance hídrico (*Distributed Rainfall-Runoff model*; López-Vicente & Navas, 2012). La considerable variabilidad espacial y temporal de algunas propiedades físicas medidas en la Cuenca de Estaña, como el contenido de agua en el suelo (López-Vicente *et al.*, 2009b), y de los parámetros climáticos y fenológicos, recomienda una modelización a escala mensual en lugar de la clásica promedio anual. El modelo DR2 nos ha permitido estimar la escorrentía mensual, el contenido de agua en el suelo y su estado de humedad frente a la demanda por *ET* potencial y real.

Con la segunda versión del DR2 (*DR2-2013*[®] *SAGA v1.0*; <http://digital.csic.es/handle/10261/84613>) evaluamos el im-

pacto de la creación de nuevas áreas verdes incluidas en el borrador de la reforma de la PAC, sobre la producción y el patrón espacial de la escorrentía (Figura 4a) y además, calculamos el estado de humedad del suelo en las condiciones actuales para los diferentes usos del terreno (Figura 4b) (López-Vicente *et al.*, 2014). La tercera y actual versión del modelo DR2 corresponde al programa *DR2-2013*[®] *SAGA v1.1* (<http://digital.csic.es/handle/10261/93543>) y se ha implementado con 8 algoritmos de enrutamiento para generar 15 patrones espaciales de escorrentía y permite calcular el tiempo y distancia de viaje de la escorrentía durante y después del evento de lluvia (Figura 4c) (López-Vicente *et al.*, en revisión).

El modelo SERT (*Soil Erosion and Redistribution Tool*), desarrollado por López-Vicente *et al.* (2013b) simula los procesos mensuales de hidrología, erosión y redistribución del suelo en tres módulos independientes. Se ha aplicado y validado en una sub-cuenca piloto (Figura 5) obteniendo una alta correlación con los valores cuantificados con ¹³⁷Cs. El programa *SERT-2014*[®] *SAGA v1.0*, actualmente en periodo de registro ante notario, corresponde a la segunda versión del modelo SERT e incluye una serie de mejoras en el módulo de redistribución del suelo. Recientemente, hemos aplicado el modelo SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*) en la cuenca del Estanque de Arriba (Gaspar *et al.*, 2013) con el fin de evaluar su capacidad predictiva en un entorno endorreico.

4. CONCLUSIONES Y EVOLUCIÓN PREVISTA

Tras doce años de trabajos de campo, laboratorio y simulaciones con diferentes

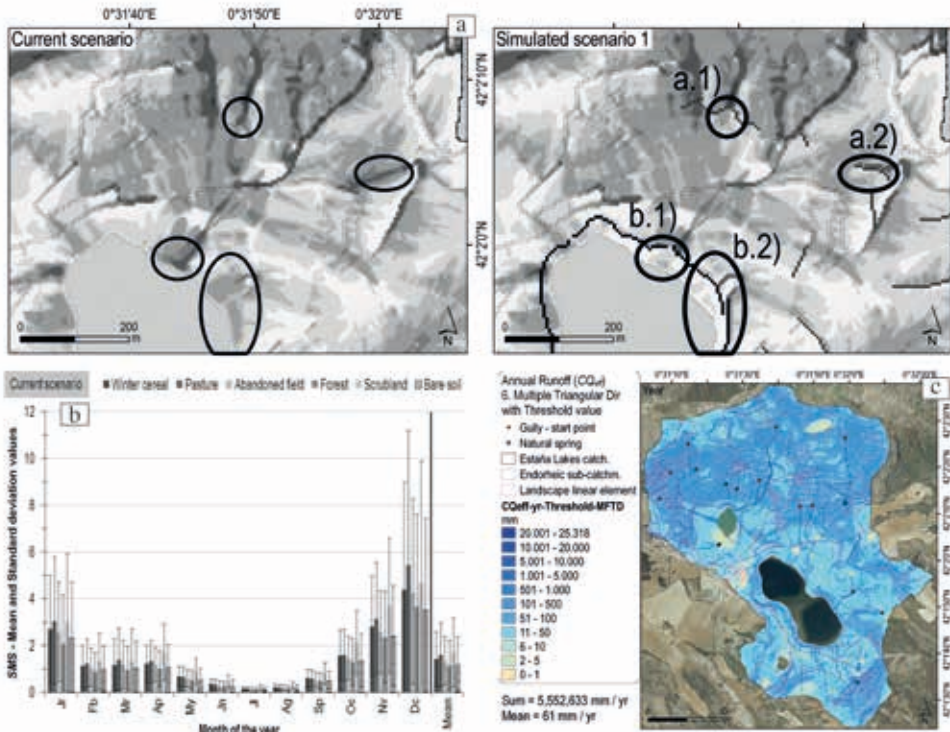


Figura 4. Modelo DR2: (a) Escorrentía en el escenario actual y de creación de nuevas áreas verdes en el entorno del Estanque Grande de Abajo, (b) estado de humedad del suelo en diferentes usos del suelo y (c) escorrentía calculada con el algoritmo de flujo múltiple triangular y con valor umbral de flujo lineal asociado al inicio de las cárcavas.

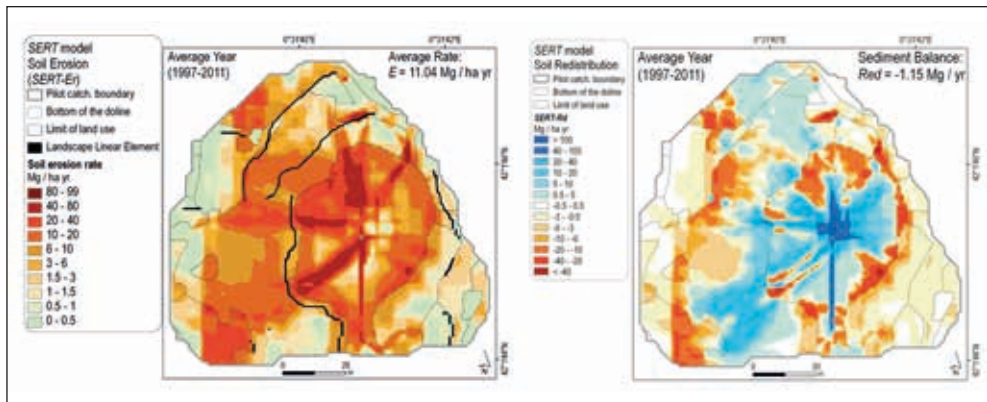


Figura 5. Mapas de erosión y redistribución del suelo en la Subcuenca Piloto (modelo SERT).

modelos de predicción, hemos podido aproximarnos a los procesos que tienen lugar en los suelos de la Cuenca de Estaña y cuantificar sus tasas de redistribución. Cada modelo aplicado nos ha suministrado una visión diferente y nos ha permitido entender mejor la dinámica espacio-temporal de la hidrología superficial y de los procesos de pérdida, transporte y redistribución del suelo. Los procesos asociados a la costra superficial del suelo y a la profundidad hidrológica efectiva forman parte de las actuales líneas de investigación con el fin de mejorar la eficiencia de los modelos. También apostamos por la difusión gratuita de los modelos DR2 y SERT entre los diferentes agentes socio-económicos, académicos y de investigación para ayudar a identificar, desarrollar e implementar políticas de conservación y sostenibilidad del suelo y del agua en ambientes mediterráneos.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha financiado mediante los proyectos de investigación CICYT REN2002-02702/GLO, CGL2005-02009/BTE, CGL2008-00831/BTE, CGL2011-25486 y del Gobierno de Aragón y Obra Social "la Caixa" 2012-GALCO34.

6. REFERENCIAS

García-Ruiz, J.M. (2010): The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. *Catena*, 81(1): 1-11.

García-Ruiz, J.M. & Valero-Garcés, B.L. (1998): Historical geomorphic processes and human activities in the Central Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 18(4): 309-320.

Gaspar, L., Navas, A., Machín, J., López-Vicente, M. & Gómez-Arozamena, J. (2014): Edaphic characterization and distribution of 137Cs of representative soil profiles on mountainous

Mediterranean agroecosystems. *ITEA-Información Técnica Económica Agraria*, En Prensa.

Gaspar, L., White, S., Navas, A., López-Vicente, M. y Palazón, L. (2013): Application of the SWAT model to an endorheic watershed in the Central Spanish Pre-Pyrenees: Methodological approach and preliminary results. *Geophysical Research Abstracts*, 15: EGU2013-552-1.

López-Vicente, M., López-Montero, T., Pérez-Bielsa, C., Lambán, L.J. & Navas A. (en revisión): Runoff simulation with different flow accumulation algorithms and the spatially distributed and open-source DR2 model. *Environmental Modelling & Software*.

López-Vicente, M. & Kirkby, M. (2013): Soil erosion modelling nowadays: insights of a young scientist. *Geophysical Research Abstracts*, 15: EGU2013-1665-1.

López-Vicente, M. y Navas, A. (2009): Predicting soil erosion with RUSLE in Mediterranean agricultural systems at catchment scale. *Soil Science*, 174(5): 272-282.

López-Vicente, M. & Navas, A. (2010a): Relating soil erosion and sediment yield to geomorphic features and erosion processes at the catchment scale in the Spanish Pre-Pyrenees. *Environmental Earth Sciences*, 61(1): 143-158.

López-Vicente, M. & Navas, A. (2010b): Routing runoff and soil particles in a distributed model with GIS: implications for soil protection in mountain agricultural landscapes. *Land Degradation and Development*, 21(2): 100-109.

López-Vicente, M. & Navas, A. (2012): A new distributed rainfall-runoff model (DR2) based on soil saturation and runoff cumulative processes. *Agricultural Water Management*, 104: 128-141.

López-Vicente, M., Navas, A., Gaspar, L. & Machín, J. (2014): Impact of the new Common Agricultural Policy of the EU on the runoff production and soil moisture content in a Mediterranean agricultural system. *Environmental Earth Sciences*, 71(10): 4281-4296.

- López-Vicente, M., Navas, A., Gaspar, L. & Machín, J. (2013b): Advanced modelling of runoff and soil redistribution for agricultural systems: the SERT model. *Agricultural Water Management*, 125: 1-12.
- López-Vicente, M., Navas, A. y Machín, J. (2008a): Modelling soil detachment rates in rainfed agrosystems in the south-central Pyrenees. *Agricultural Water Management*, 95(9): 1079-1089.
- López-Vicente, M., Navas, A. & Machín, J. (2008b): Identifying erosive periods by using RUSLE factors in mountain fields of the Central Spanish Pyrenees. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(2): 523-535.
- López-Vicente, M., Navas, A. & Machín, J. (2009a): Geomorphic mapping in endorheic catchments in the Spanish Pyrenees: an integrated GIS analysis of topographic-karstic features. *Geomorphology*, 111(1-2): 38-47.
- López-Vicente, M., Navas, A. & Machín, J. (2009b): Effect of physiographic conditions on the spatial variation of seasonal topsoil moisture in Mediterranean soils. *Australian Journal of Soil Research*, 47(5): 498-507.
- López-Vicente, M., Navas, A., Machín, J. & Gaspar, L. (2006): Modelización de la pérdida de suelo en una cuenca endorreica del Pirineo oscense. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 32: 29-42.
- López-Vicente, M., Poesen, J., Navas, A. & Gaspar, L. (2013a): Predicting runoff and sediment connectivity and soil erosion by water for different land use scenarios in the Spanish Pre-Pyrenees. *Catena*, 102: 62-73.
- Machín, J., López-Vicente, M. & Navas, A. (2008): Cartografía digital de suelos de la Cuenca de Estaña (Prepirineo Central). En: *Trabajos de Geomorfología en España. 2006-2008* (J. Benavente y F.J. Gracia, eds.). Sociedad Española de Geomorfología: 481-484, Cádiz.
- Morellón, M., Valero-Garcés, B., González-Sampériz, P., Vegas-Vilarrúbia, T., Rubio, E., Riera-devall, M., Delgado-Huertas, A., Mata, P., Romero, O., Engstrom, D.R., López-Vicente, M., Navas, A. & Soto, J. (2011): Climate changes and human activities recorded in the sediments of Lake Estanya (NE Spain) during the Medieval Warm Period and Little Ice Age. *Journal of Paleolimnology*, 46(3): 423-452.
- Navas, A., Gaspar, L., Quijano, L., López-Vicente, M. & Machín, J. (2012): Patterns of soil organic carbon and nitrogen in relation to soil movement under different land uses in mountain fields (South Central Pyrenees). *Catena*, 94: 43-52.
- Navas, A., López-Vicente, M., Gaspar, L. & Machín, J. (2013): Assessing soil redistribution in a complex karst catchment using fallout ^{137}Cs and GIS. *Geomorphology*, 196: 231-241.
- Navas, A., López-Vicente, M., Gaspar, L., Palazón, L. & Quijano, L. Establishing tracer based sediment budget to preserve wetlands in Mediterranean mountain agroecosystems (NE Spain). *Science of the Total Environment*, en revisión.
- Navas, A., Valero-Garcés, B.L., Gaspar, L., Palazón, L. & Machín, J. (2011): Radionuclides and stable elements in the sediments of the Yesa Reservoir, Central Spanish Pyrenees. *Journal of Soils and Sediments*, 11: 1082-1098.
- Palazón, L. & Navas, A. (2013): Sediment production of an alpine catchment with SWAT. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 57(Suppl. 2): 069-085.
- Pérez-Bielsa, C., Lambán, L.J., Plata, J.L., Rubio, F.M. & Soto R. (2012): Characterization of a karstic aquifer using magnetic resonance sounding and electrical resistivity tomography: a case-study of Estaña Lakes (northern Spain). *Hydrogeology Journal*, 20(6): 1045-1059.