

## PRÓLOGO

La naturaleza nos somete a retos intelectuales cada vez más complejos. A medida que vamos entendiendo algunos de sus mecanismos surgen nuevas preguntas que requieren planteamientos y métodos bien diferentes de los anteriores y también más arriesgados por la incertidumbre de sus resultados. Pero la naturaleza es también la mejor escuela a la que pueden asistir geógrafos y geólogos, interesados en conocer la sucesión de hechos que explican la evolución del relieve y sus formas, allí donde la imaginación relaciona procesos y depósitos, laderas y fondos de valle, cambios climáticos y sucesión de niveles, actuación humana y erosión. Porque son muchos los factores que intervienen en geomorfología, pero entre ellos el clima y, recientemente, el hombre han concitado la mayor atención de los científicos.

Entre los geomorfólogos, los estudios sobre erosión del suelo han cobrado especial importancia en las últimas décadas. Las razones son muy sencillas: Por un lado, los procesos de erosión son el resultado de una interacción múltiple, a diferentes escalas espaciales y temporales, de factores muy dinámicos, tales como los cambios de uso del suelo, las fluctuaciones climáticas y las características de los suelos, junto a otros más estáticos como la topografía. Por otro lado, algunos geomorfólogos han visto en esos estudios una vertiente aplicada que reivindica socialmente a la profesión y la sitúa a la altura de otras barnizadas de una etiqueta de utilidad que, si he de ser sincero, me parece innecesaria a la hora de hablar de Ciencia. Sea por lo que fuere, lo cierto es que un número muy elevado de trabajos se han preocupado por jerarquizar los factores que explican la erosión del suelo y, mediante estaciones y cuencas experimentales, analizar la generación de escorrentía y el transporte de sedimento bajo diferentes condiciones de cubierta vegetal, cultivos, pendientes, tipos de suelo o, incluso, intensidad de la lluvia mediante simuladores. Los países ribereños del Mediterráneo y, en particular, España e Italia, han sido los más favorecidos por este impulso. En este sentido, es bien conocido que muchos científicos del centro y norte de Europa han contribuido a estudiar áreas de *badlands*, el efecto de gradientes climáticos sobre la erosión, o las consecuencias de distintas cubiertas forestales en España.

Se ha comentado con frecuencia que las diferentes Ciencias avanzan a saltos. Una nueva percepción del problema y la incorporación de técnicas avanzadas de análisis (de campo, laboratorio o estadísticas) producen en un momento dado un avance significativo que concentra esfuerzos y nuevas ideas que progresivamente se agotan. Se entra así en una fase plana en la que no hay nuevas contribuciones de gran relevancia. Tengo la impresión de que, desde el punto de vista de los estudios sobre erosión del suelo, estamos ahora en una de estas fases planas. Se sabe mucho sobre procesos, se conocen los factores de la erosión, incluso se pueden cuantificar e implementar en ecuaciones más o menos realistas. Pero ¿no tenemos todos la sensación de agotamiento? ¿no pensamos íntimamente que ha llegado el momento de un nuevo salto en el que estaciones y cuencas experimentales cobren otro protagonismo diferente del de producir tasas de erosión o jerarquizar factores? ¿no es ya imprescindible hablar de escalas, que hasta ahora se han incorporado de manera tímida? Los datos que salen de las parcelas son importantísimos, pero corren el riesgo de ser demasiado estáticos: ¿qué aporta una parcela de erosión en, por ejemplo, un jaral si no se sitúa en un contexto temporal y espacial más amplio? Cuando digo en este caso *temporal* me refiero a la necesidad de considerar los procesos como algo dinámico, que está cambiando continuamente en función de las fluctuaciones climáticas y en función de la mayor o menor presión

humana. Así, las preguntas que nos tenemos que hacer sobre ese jaral no deben estar relacionadas con cuánto sedimento se exporta, sino sobre todo cuánto en comparación con otras presiones humanas y con otros posibles usos y regímenes de precipitación. El paisaje actual es resultado de una evolución temporal, difícil de desentrañar, eso sí, pero imprescindible para saber en qué momento de la evolución nos situamos.

Por otro lado, cuando aludo a lo espacial, es evidente por qué lo hago y más desde mi perspectiva como geógrafo. La respuesta hidrológica y erosiva del territorio es heterogénea, como corresponde a la diversidad topográfica, litológica o geobotánica. Resolver esa diversidad es básica para todos nosotros. Recuerdo un libro de Hayward, para mí clásico por su contenido científico, aunque poco conocido en España, sobre una cuenca experimental neozelandesa en el que se abordan algunos de los problemas más importantes sobre generación de escorrentía y sedimento, en especial los relacionados con la identificación de las áreas fuentes de agua y de sedimento durante una tormenta y cómo varían esas áreas en función de la humedad antecedente del suelo y de la intensidad y duración de la tormenta. Hoy sabemos que las áreas sujetas a erosión no son necesariamente contribuyentes a la red fluvial. Para que lo sean es necesario que exista conectividad o accesibilidad y, en caso afirmativo, no todo el sedimento que se produce en la ladera llega finalmente al cauce. Durante tormentas cortas en estación seca se genera muy poca escorrentía y el sedimento procede del mismo cauce y áreas muy próximas; por el contrario, en estación húmeda, con lluvias prolongadas, toda la cuenca acaba siendo contribuyente, incluso las áreas bien protegidas por la vegetación, aunque la mayor parte del sedimento procede de los taludes que se desmoronan durante la avenida y de sectores próximos sujetos a saturación o incluso a flujos hortonianos. La identificación de las áreas fuente y su variabilidad según el estado de humedad antecedente y según las características de la lluvia es difícil de abordar incluso en pequeñas cuencas experimentales, pero existen ya resultados de gran interés en las cuencas de Vallcebre, gestionadas desde el Institut de Ciències de la Terra “Jaume Almera” (CSIC) por el grupo de Francesc Gallart

Es cada vez más evidente que las características de la respuesta hidrológica y del transporte de sedimento están muy relacionadas con la escala, que controla el tipo de flujos dominantes y su energía, a la vez que condiciona la accesibilidad de las fuentes de sedimento y la existencia o no de almacenes temporales. Por esta razón, el Departamento de Procesos Geoambientales y Cambio Global del Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC) inició sus trabajos de campo con la Estación Experimental “Valle de Aísa”, donde se estudian las relaciones entre los cambios de uso del suelo, la escorrentía y la erosión a escala de ladera. Paralela y posteriormente se han instalado varias cuencas experimentales (Izas, Arnás, San Salvador y Araguás), donde es posible identificar los factores que explican la variabilidad de la respuesta hidrológica y del transporte de sedimento. Además las cuencas representan un salto cualitativo para aplicar y validar modelos hidrológicos espacialmente distribuidos y para analizar la variación espacio-temporal de las áreas contribuyentes.

El siguiente paso ha sido el análisis a escala regional, en cuencas de varios cientos o incluso miles de kilómetros cuadrados, cuyo estudio requiere la captación de información mediante métodos muy diferentes (estaciones de aforo, teledetección, cartografías ya elaboradas, modelos digitales del terreno). Santiago Beguería Portugués ha optado por esta vía para tratar de resolver los dos grandes problemas que afectan a los estudios sobre erosión a escala regional: (i) la identificación de las áreas erosionadas de forma relativamente rápida mediante el empleo de imágenes de satélite y las consiguientes reglas de experto, y (ii) la accesibilidad de tales áreas hacia los cauces,

mediante sistemas de información geográfica y la aplicación de un modelo que tiene en cuenta tanto la capacidad de generación de escorrentía como la “rugosidad” de la topografía. Los resultados son muy positivos y contribuyen a crear una metodología nueva en la que pueden apoyarse los escasos gestores interesados en la conservación del territorio y en su restauración. Los mapas incluidos en el CD que acompaña al libro son ilustrativos de las posibilidades del método y reflejan la importancia de determinadas áreas como productoras de sedimento hacia la red fluvial principal y el embalse de Yesa. Sorprende en este sentido el poco interés mediático y político que despierta la sostenibilidad de las grandes infraestructuras hidráulicas y de los recursos hídricos, cuyo futuro depende no sólo de la evolución del clima y de la vegetación, sino también de la velocidad de aterramiento de los embalses. El esfuerzo (financiero, social y ambiental) que representa la construcción de un gran embalse debería ir acompañada de una mayor implicación en la conservación del suelo y en el control de las áreas productoras de sedimento para prolongar en lo posible su vida útil. El trabajo de Santiago Beguería Portugués va en esa línea, en la que ha demostrado sobrada preparación, como también en diferentes aspectos hidrológicos y estudios probabilísticos de eventos extremos. Su capacidad para trabajar en equipo y su querencia por la innovación metodológica y por la investigación de riesgo hacen de él una pieza clave para el futuro de nuestro Departamento y quizás para que los estudios sobre hidrología y erosión den ese necesario salto a que aludía al inicio de este Prólogo, si la cara más oscura de la política científica no se cruza en su camino.

José M. García Ruiz, Profesor de Investigación del CSIC en el Instituto Pirenaico de Ecología, Zaragoza, mayo de 2005, mientras suena *Long time comin'*, una de las canciones más hermosas de Bruce Springsteen.



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Erosión y transferencia de sedimento: definición y dependencia de la escala

El estudio de la erosión es abordado desde disciplinas y perspectivas muy diferentes, por lo que la terminología es variada y en muchos casos ambigua. No obstante, existe un acuerdo general sobre su extrema importancia como conjunto de procesos que contribuyen a limitar la capacidad de producción de los sistemas naturales, a reducir la diversidad de especies vegetales y a alterar el funcionamiento hidrológico de laderas y cuencas (Hudson, 1976; Morgan, 1986; López Bermúdez, 2002; Toy *et al.*, 2002).

En una definición sencilla pero suficiente, la *erosión* (del latín 'erodere', desgastar) 'es un proceso de denudación de la corteza terrestre' (López Bermúdez, 2002, p. 13). El *Diccionario Oxford de Ciencias de la Tierra* define la erosión como 'parte del conjunto de procesos de denudación que incluye la rotura física o mecánica, la disolución química y el transporte de material', y también como 'el movimiento de material del suelo y las rocas por agentes tales como el agua de escorrentía, el viento, el hielo o el deslizamiento gravitacional' (Fregenal *et al.*, 2000). En un enunciado más completo podemos definir, pues, la erosión geomorfológica como la transformación del paisaje debida a la eliminación o reubicación de una parte de la materia que lo conforma, y como tal comprende los procesos de disgregación, movilización, transporte y sedimentación de partículas de suelo o roca, en los que pueden intervenir mecanismos diversos como la acción de la lluvia y la arroyada superficial, del viento, del empuje glacial, o la simple acción de la gravedad. Como la erosión tiende a recolocar los materiales en posiciones inferiores a las que ocupaban originalmente, se puede definir también la erosión como el conjunto de procesos que conllevan una pérdida de energía potencial o aumento de la entropía en el paisaje. Según estas definiciones, no es necesaria la exportación completa del material fuera de la unidad de estudio, pues una reubicación de los materiales dentro del propio paisaje constituye un cambio geomorfológico, que puede implicar nuevas relaciones de fuerzas y nuevos procesos. En Geomorfología, pues, toda movilización del material contribuye a la modificación del paisaje, y por tanto constituye erosión.

En un sentido mas restringido, se utiliza frecuentemente el término *erosión* para referirse a la remoción mecánica de materia de un punto o unidad concretos del paisaje, es decir, como sinónimo de *pérdida de suelo*. Conviene tener en cuenta que la erosión, así entendida, no implica necesariamente un proceso de degradación, puesto que la tasa de pérdida de suelo puede equilibrarse con la tasa de creación de suelo a partir de la roca madre. En general se acepta que bajo condiciones de equilibrio un sistema natural mostrará una cierta erosión de suelo, compensada por la creación de suelo de modo que la cantidad total de suelo en el paisaje permanecerá más o menos constante (Nikiforoff, 1942). Hay que distinguir, pues, entre erosión natural o aceptable por el sistema y erosión acelerada, constituyendo esta última un proceso de degradación que puede conducir en último extremo a la pérdida de las condiciones necesarias para el sostenimiento de la vida.

Aunque como se ha dicho la erosión es un fenómeno que presenta una variación continua en el espacio, en la práctica las tasas de erosión se expresan referidas a unidades espaciales discretas como un anillo de erosión, una parcela de cultivo o una cuenca hidrográfica. Este hecho, conocido como la paradoja espacial (Dickinson y Wall,

1977), se debe a que en la práctica es muy difícil medir en el campo la erosión como un fenómeno continuo, de manera que habitualmente la erosión se estima a partir del flujo de sedimento exportado hacia el exterior por una unidad de paisaje acotada, como las antes mencionadas. En este contexto el sentido del término 'erosión' es sustancialmente diferente a la noción apuntada más arriba, y se utiliza en ocasiones de forma incorrecta. Un término más adecuado para expresar la exportación de sedimento por parte de una unidad del paisaje determinada es el de *transferencia de sedimento* (ingl. *sediment yield* o *sediment delivery*). Esta precisión resulta de gran relevancia, pues es incorrecto atribuir el flujo de sedimento medido en un punto concreto de un paisaje, como el desagüe de una cuenca hidrográfica o una parcela experimental, a toda la superficie que vierte hacia dicho punto (Walling, 1983). Es recomendable, por tanto, hablar de transferencia de sedimento, pues el término conlleva implícita la referencia a una unidad espacial determinada, y engloba todos los procesos internos de transporte y almacenamiento.

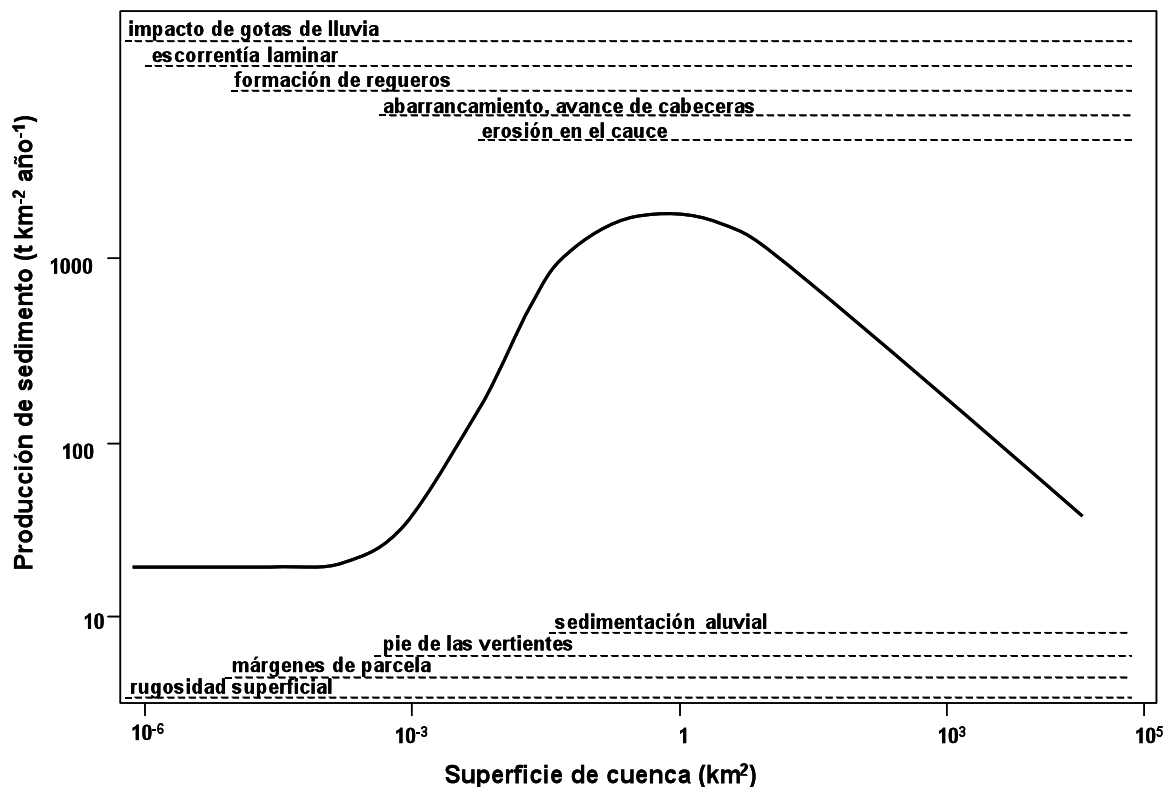


Figura 1.1. Relación entre la producción de sedimento y la superficie de cuenca, y procesos de erosión y sedimentación dominantes a las distintas escalas (a partir de Vente y Poesen, 2005)

Dado que a diferentes escalas espaciales predominan diferentes procesos de erosión y transporte de sedimento, las tasas de transferencia de sedimento (o tasas medias de erosión) son difícilmente comparables. Vente y Poesen (2005) proponen un modelo conceptual de los procesos de erosión y sumideros que dominan la producción y transferencia de sedimento en cada escala de estudio (Figura 1.1). La figura ofrece además una estimación de la producción de sedimento relativa ( $t \cdot km^{-2} \cdot año^{-1}$ ), basada en una abundante base de datos bibliográfica sobre tasas de erosión medias a diferentes escalas. Como se puede observar en la figura, se produce una ordenación jerárquica de

los procesos que actúan en cada caso, resultando en una forma compleja de la curva de exportación de sedimento en función de la superficie. A escala de detalle (área acumulada de drenaje entre 1 y 50m<sup>2</sup>) los únicos procesos erosivos relevantes son el impacto de las gotas de lluvia, la escorrentía laminar y la formación de regueros efímeros escasamente conectados. Parte del sedimento generado se acumula en las propias micro-depresiones superficiales y en los márgenes de las parcelas. Esta es la escala propia de la mayoría de experimentos de lluvia simulada y de las parcelas experimentales, y la producción de sedimento es relativamente pequeña y aproximadamente constante respecto al tamaño de la unidad.

Con un área acumulada de entre 300 y 3 km<sup>2</sup>, según estos autores, la acumulación de escorrentía permite la aparición de abarrancamientos permanentes, que pasan a ser el proceso erosivo dominante. La conexión entre la fuente de sedimento y la red hidrográfica es inmediata, lo cual es responsable del aumento de la producción de sedimento. El principal sumidero de sedimento, a esta escala, lo constituyen las partes bajas de las laderas, donde la pendiente se suaviza y el perfil pasa a ser convexo, lo cual retiene una gran parte del sedimento generado por la erosión laminar y en regueros.

A una escala superior, en pequeñas cuencas entre 3 y 30 km<sup>2</sup>, se produce teóricamente la mayor tasa de producción de sedimento. A los procesos anteriores se incorporan procesos de erosión y acumulación netamente fluviales, además de los movimientos en masa producidos por socavamiento basal. A partir de dicho tamaño, el incremento del área de drenaje de la cuenca suele conllevar un descenso paulatino de la producción de sedimento, debido a que los procesos de almacenamiento fluvial comienzan a predominar sobre los procesos de erosión.

Esta relación inversa entre tamaño de la cuenca y producción de sedimento a partir de un cierto tamaño de cuenca se ha constatado en numerosos estudios, como en Dendy y Bolton (1976), Einsele y Hinderer (1997), Milliman y Meade (1983), Milliman y Syvitski (1992), Inbar (1992) o, para el caso de España, Avendaño et al. (1997). Sin embargo, esta relación general puede verse alterada por las condiciones locales, como también se ha referido en algunos trabajos (Dedkov y Moszherin, 1992; Chuch et al., 1999; Dedkov, 2004; García Ruiz et al., 2004).

En general, se ha observado que el sedimento exportado por una cuenca no procede de la erosión homogénea de la misma, sino de partes muy localizadas que experimentan intensa erosión. Se definen así las *áreas fuente de sedimento* (ingl. *sediment source areas*; ver p. ej. Russell et al., 2001) como las zonas de una cuenca hidrográfica donde se genera toda o una gran parte del sedimento exportado por ésta al exterior. Como se deduce de la exposición anterior, la relación entre fuentes de sedimento y zonas erosionadas es estrecha, pero no de identidad: no todos los lugares donde se produce erosión aportan sedimentos a los cauces. En efecto, el material erosionado en una parte de la cuenca puede ser redepositado en otro lugar de la misma durante periodos muy prolongados o indefinidamente.

## **1.2. Erosión y transferencia de sedimento como problema ambiental**

La erosión acelerada de los suelos es uno de los más graves problemas a los que se enfrenta la humanidad, y está causada, en general, por un uso deficiente del territorio: deforestación, sobrepastoreo, cultivos en pendiente, sistemas inadecuados de riego o rotación de cultivos, etc. López Bermúdez (2002) pone de relieve que una gran parte de los problemas que causa la erosión en el mundo están relacionados con la alteración de

la cubierta vegetal y las actividades humanas, que propician un aumento espectacular de las tasas de erosión y transferencia de sedimento. Entre los estudios llevados a cabo en España, son muchos los que confirman el papel decisivo de los usos del suelo y la gran importancia de la erosión acelerada, en tiempos históricos y en la actualidad (ver p. ej. García Ruiz, 1997; García Ruiz y Valero, 1998; López Bermúdez, 1994; Pérez Cueva, 1982; Puigdefábregas, 1995).

Si la erosión constituye un importantísimo factor de riesgo ambiental, por cuanto supone la pérdida del recurso suelo que es imprescindible para la vida, la producción de sedimento puede suponer también un desequilibrio de los sistemas naturales, implicando procesos de degradación como por ejemplo (ver también Osterkamp *et al.*, 1998):

- pérdida de calidad de las aguas por el aumento de la turbidez, que incide en el deterioro de los ecosistemas fluviales y en la necesidad de tratamientos más costosos del agua para su consumo humano;
- transferencia de nutrientes y contaminantes al sistema fluvial, debido a que muchas veces éstos se movilizan formando agregados con las partículas de sedimento (USDA, 1976);
- desequilibrio de la dinámica del río, pues la elevada carga de sedimento es un factor de inestabilidad y propicia la aparición de formas de deposición no permanentes (barras) y el carácter divagante de los cursos fluviales en zonas donde no lo eran;
- aterramiento de los embalses, que conlleva una pérdida de su capacidad de almacenamiento y la reducción de la vida útil de la obra (Valero *et al.*, 1998; Einsele y Hinderer, 1997).

Esta última es quizá una de las afecciones más importantes en nuestra región mediterránea, dada la dependencia existente del agua embalsada en las regiones montañosas para la irrigación y el suministro industrial y doméstico. Dado que, por lo menos con la tecnología presente, el aterramiento de los grandes embalses es un proceso irreversible, la capacidad de embalsado se convierte en un recurso no renovable. El estudio de la producción de sedimentos adquiere así un interés más allá del valor teórico, pues constituye un punto de partida imprescindible para la gestión sostenible de los embalses y por extensión de los recursos hídricos.

Debido a la importancia de las afecciones de la erosión y la producción de sedimento, son muchos los recursos que se dedican al estudio de las mismas, a diferentes escalas temporales y espaciales y con distintas metodologías. En España pueden citarse varios grupos que, desde una perspectiva hidrológica y geomorfológica, dirigen sus esfuerzos hacia la identificación y jerarquización de los factores que explican la erosión, así como en la validación de modelos que permitan predecir las consecuencias de posibles cambios de uso del suelo o de un cambio climático (ver García-Ruiz, 1999; o García-Ruiz *et al.*, 2001a). La mayoría de estos grupos de investigación se vieron apoyados desde sus inicios por el Proyecto LUCDEME (Lucha Contra la DEsertificación en el MEditerráneo) (Carrera, 1989), y más tarde por la creación de la Red de Estaciones experimentales de Seguimiento y Evaluación de la erosión y desertificación (RESEL), que engloba a los grupos con instalaciones de campo (parcelas y cuencas experimentales) para la medición de la erosión (Rojo y Sánchez Fuster, 1997). La financiación del proyecto LUCDEME procedió del ICONA, mientras que la RESEL es financiada por la Dirección General de Conservación de la Naturaleza (Ministerio de Medio Ambiente). El Consejo Superior de Investigaciones Científicas llegó a elaborar un Programa Interáreas sobre desertificación en ambientes mediterráneos (García-Ruiz *et al.*, 1996c).