

## EL PROCESO OLVIDADO DE LA EROSIÓN DE SUELO: EVALUACIÓN DE UN MODELO DE RETROCESO DE CABECERAS DE CÁRCAVAS

A. Hayas<sup>1\*</sup>, A. Carmona<sup>2</sup>, A. Peña<sup>1</sup>, A. Laguna<sup>3</sup>, J.V. Giráldez<sup>2,4</sup> y T. Vanwalleghem<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Depto. de Ingeniería Rural, Universidad de Córdoba, Edif. Da Vinci, Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba. e-mail: z22haloa@uco.es (A. Hayas); ir1peala@uco.es (A. Peña)

<sup>2</sup> Depto. de Agronomía, Universidad de Córdoba, Edif. Da Vinci, Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba. e-mail: o42carca@uco.es (A. Carmona); ag1gicej@uco.es (J.V. Giráldez); ag2vavat@uco.es (T. Vanwalleghem)

<sup>3</sup> Depto. de Física Aplicada, Universidad de Córdoba, Edif. C2, Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba. e-mail: fa1lalu@uco.es (A. Laguna)

<sup>4</sup> Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Avda. Menéndez Pidal s/n. 14004 Córdoba

**RESUMEN.** La erosión por cárcavas produce importantes daños económicos y de calidad del agua en el área mediterránea, produciendo entre otros efectos la reducción de la superficie de cultivo y de la transitabilidad de la finca, la colmatación de embalses, etc. El objetivo de este trabajo es evaluar la eficacia del módulo REGEM de AnnAGNPS para estimar la evolución de la longitud de cárcavas permanentes. Entre 2005 y 2013 se analizaron los crecimientos de 15 cárcavas en una red que comprendía 94 cárcavas en la campiña cordobesa, España. Los crecimientos se obtuvieron mediante la identificación de las cabeceras y su posterior digitalización. Las simulaciones se realizaron con las cabeceras ya formadas, siendo el crecimiento de su longitud más sensible al coeficiente de resistencia de Manning y a la profundidad de laboreo ( $T_D$ ) que al resto de variables. El modelo se ajustó a los datos reemplazando la estimación de la longitud máxima utilizada por el modelo a una relación empírica específica de la zona estudiada y se calibró el valor de la profundidad  $T_D$ .

**ABSTRACT.** Gully erosion leads to important economic losses and impacts water quality in the Mediterranean region, causing among other effects the reduction of the cultivable land, the trafficability of the farms, dam siltation, etc. The aim of this study was to evaluate the performance of the REGEM model implemented in AnnAGNPS to estimate gully length evolution. Fifteen gullies from a network of 94 units were analysed in the Campiña of Córdoba (Spain) between 2005 and 2013. Gully retreat rate was obtained by photointerpretation from the gully heads in consecutive periods in a GIS. The

analyses indicated that the Manning resistance coefficient  $n$  and the plow depth ( $T_D$ ) were the most sensitive parameters in the model. The original model was modified by replacing the maximum gully length in the model with an empirical relation for the study area, as well as calibrating the plow depth ( $T_D$ ).

### 1.- Introducción

Diversos estudios han demostrado que el acarcavamiento puede llegar a ser uno de los procesos erosivos con mayor peso en el balance de sedimentos (Poesen et al., 2003), siendo, además, particularmente frecuentes en regiones del Mediterráneo (Martínez-Casasnovas et al., 2003; De Santisteban et al., 2006). A diferencia de los cauces de ríos y arroyos, las cárcavas presentan márgenes muy escarpados, con un mayor cociente profundidad/anchura y abundantes cabeceras (Knighton, 1998). La aparición de las cabeceras suele atribuirse a actuaciones humanas como la modificación de la cobertura vegetal natural (Prosser and Soufi, 1998), tratamientos agrícolas (Vandekerckhove et al, 2000) o pavimentaciones (Crocke and Mockler, 2001).

El crecimiento de las cárcavas se produce por el retroceso de la cabecera ladera arriba, por el ensanchamiento de la sección y/o por la incisión del cauce. El proceso de formación de la cabecera se considera el punto crítico, ya que tras su formación es difícil controlar su desarrollo (Prosser and Soufi, 1998; Woodward, 1999). Alonso et al. (2002) propusieron un modelo hidráulico para la predicción de la erosión en cabecera de las cárcavas. Posteriormente, Flores-Cervantes et al. (2006)

integraron este modelo en un modelo morfodinámico para reproducir los procesos de evolución de cuencas. Hay dos modelos que relacionan la erosión en cabecera de cárcavas con la evolución de la cabecera, AnnAGNPS (*Annualized Agricultural NonPoint Source Pollution Model*) y CHILD (*Channel Hillslope Integrated Landscape Development*).

El modelo AnnAGNPS ha sido aplicado para predecir la evolución de cárcavas efímeras en diferentes condiciones (Yuan et al., 2001; Yuan et al., 2003; Li et al. 2016; Gudino Elizondo et al., 2018), con resultados diversos (Chachor et al., 2012). Por su parte, Campo-Bescos et al. (2013) obtuvieron resultados relativamente buenos utilizando el modelo CHILD en las Bardenas Reales en el norte de España. El módulo REGEM de AnnAGNPS, basado en el modelo de Alonso et al. (2002), estima la masa de sedimento generado *in situ* y transportado, así como la anchura, profundidad y longitud de la cárcava en diversos tiempos y en diferentes secciones transversales de la misma. REGEM estima para cada chubasco que genera escorrentía el arranque de partículas, la carga y el depósito de sedimentos en diferentes secciones, la anchura y la longitud final de la cárcava.

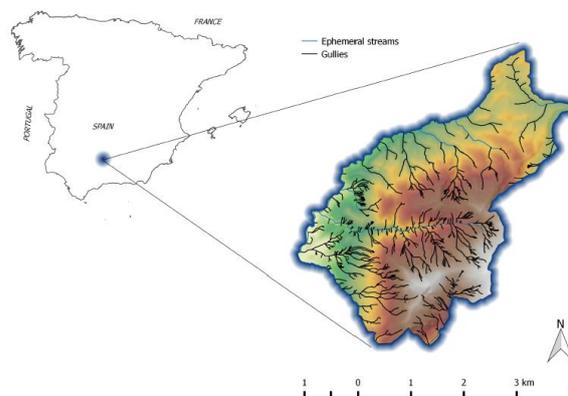
El objetivo de este trabajo es evaluar la capacidad de REGEM para estimar la evolución de la longitud de cárcavas permanentes. Para ello, primero se estudió su sensibilidad con respecto a las diferentes variables de. Además, se estudió la posibilidad de realizar mejoras en el módulo que permitieran obtener una mejor aproximación de los datos simulados a los medidos. Finalmente, se contrastaron los resultados obtenidos de las simulaciones con las longitudes medidas por Hayas et al. (2017) a partir de ortofotos en diferentes periodos, en una cuenca en el suroeste de Andalucía, de esta forma confirmar la utilidad de este modelo para predecir la evolución de cárcavas permanentes en la región.

## 2.- Materiales y métodos

La zona de estudio se encuentra en la campiña occidental de la cuenca del Guadalquivir, en la provincia de Córdoba, al suroeste de España (Figura 1). Se trata de una zona de colinas suaves con una elevación de unos 558 m sobre el nivel medio del mar, y pendientes que varían entre el 9 y el 20%. El material parental del suelo lo constituyen margas y areniscas con abundante carbonato cálcico. El orden

de suelos predominante es vertisol, gran tipo chromoxerert con una gran concentración de arcillas expansivas, entre 60 y 70 %, y menor de limo, entre el 20 y 25%. El perfil medio del suelo tiene un horizonte de labor Ap de 0.05 a 0.10m de profundidad, y un horizonte AC de hasta 0.5m, al menos. Los suelos están dedicados al cultivo del olivar y cultivos herbáceos en una proporción 63-36%, respectivamente. Para controlar las malas hierbas se realizan tres laboreos anuales en el olivar. La precipitación anual media es de 550 mm, concentrada fundamentalmente entre septiembre Los datos de precipitación diaria proceden de la estación meteorológica de AEMet de Castro del Río (37.69o N, 4.47o W).

Debido a la importancia de los procesos erosivos ocurridos en 2009-2011 en esta zona, atribuidos a chubascos no muy intensos pero muy persistentes, y a cambios en el uso del suelo (Hayas et al. 2016), se seleccionó el periodo 2005-2013. Además, en este periodo la resolución espacial de las fotos aéreas es mayor y se ha podido determinar el crecimiento en cabecera con mayor precisión que en periodos anteriores.



**Figura. 1.** Localización del sitio experimental y su red de drenaje.

Se tomó una muestra de 94 cárcavas con crecimientos positivos (sin presencia de operaciones de relleno significativas) y sin bifurcaciones, distribuidas en el periodo de estudio. Esta muestra presenta una superficie de drenaje media de 0.93 ha con una desviación típica de 1.04 ha, y un intervalo desde 0.04 ha hasta 5.13 ha. La pendiente media es 13.2% y su desviación típica 6.5%.



**Figura 2.** Cabecera en un cultivo de olivar sobre vertisoles en la zona de estudio.

Las variables de entrada del modelo REGEM son la densidad aparente, el coeficiente de resistencia al flujo superficial de Manning,  $n$ , la pendiente media en el lecho de la cárcava, la superficie vertiente en la cabecera de la cárcava al inicio del periodo de simulación, el caudal máximo en la misma, el volumen de escorrentía, la profundidad labor y la textura del suelo y la concentración de agregados finos y gruesos. Para cárcavas efímeras diferencia tres tipos de condiciones del suelo en función del laboreo realizado. Puesto que no es objeto de este trabajo estudiar la estimación de la producción de sedimentos, no son necesarios los datos texturales del suelo ya que éstos solo son utilizados para calcular la pérdida de las diferentes fracciones y para el cálculo interno del esfuerzo de corte crítico ( $\tau_{cr}$ ) y del coeficiente de erodibilidad ( $k_d$ ). Estos últimos fueron obtenidos a partir de la bibliografía (tabla 1).

Los incrementos de longitud de las cárcavas se obtuvieron mediante la identificación de las cabeceras en ortofotos consecutivas y posterior digitalización del tramo que las separa en QGIS. Esta operación se realizó para cada uno de los años en los que se disponía de ortofotos en el periodo de estudio (2005, 2007, 2009, 2011 y 2013). Las superficies de drenaje y las pendientes medias se obtuvieron de un Modelo Digital de Elevaciones con resolución espacial de 5 m. El caudal máximo y volumen total de escorrentía se generaron a partir de la precipitación diaria de la estación de Castro del Río. Se generaron 100 hietogramas para cada precipitación diaria y la duración del chubasco a partir de una función exponencial. Se aplicó el modelo de Green y Ampt para calcular el exceso de lluvia y el hidrograma unitario instantáneo de Karlinger y Troutman (1985) para el caudal

máximo. La escorrentía total se obtuvo como el producto del exceso de lluvia por la superficie de la cuenca de drenaje. En las simulaciones se despreciaron los chubascos con precipitación inferior a 5 mm por no causar erosión, un valor bastante menor que los 13 mm propuestos por Wischmeier y Smith (1978).

**Tabla 1.** Valores de  $n$  de Manning, esfuerzo cortante en el lecho de la cárcava ( $\tau_{cr}$ ) y erodibilidad ( $k_d$ ) considerados.

Variable	Intervalo	Fuente
$n$	0.03 - 0.29	Limerinos 1970; Campo-Bescós et al. 2013; Castillo et al. 2014; Rengers et al. 2014; Gudino-Elizondo et al. 2018
$\tau_{cr} (Pa)$	0.05 - 60	Hanson et al. 2004; Knapen et al. 2007; Gudino-Elizondo et al. 2018
$k_d$ ( $m^3 N^{-1} s^{-1}$ )	$6 \cdot 10^{-9}$ - 0.1	Hanson et al. 2004; Knapen et al. 2007; Mazurek 2010

En el modelo REGEM, antes de que empiece la migración de la cabecera en ésta debe alcanzarse la suela de labor, A partir de ese momento la cárcava empieza a crecer en longitud. La excavación puede tardar más o menos en función de la profundidad de laboreo, el esfuerzo de corte crítico del suelo y del chubasco. Sin embargo, en el modelo de Alonso et al. (2002) no se considera el caso de suelos sin capa de labor evidente asimilable a un horizonte de suelo más resistente a la erosión. En nuestro caso, en la zona de estudio, se han medido profundidades en algunas secciones de las cárcavas que alcanzan los 4 m y siendo la profundidad media de las cabeceras de 0.78 m. Por ello, se ha tratado el valor de esta variable como un parámetro a ajustar, realizándose varias simulaciones para determinar el intervalo de valores que podría tomarse para el análisis de sensibilidad.

El proceso de simulación se realizó considerando que la cabecera ya estaba formada, por lo que el socavamiento inicial quedo fuera del proceso. De la muestra inicial se tomó una submuestra de 15 cárcavas para las cuales se calculó su evolución para un periodo equivalente a la resolución temporal de las ortofotos (2 años). Las longitudes producidas en cada evento fueron guardadas para cada cárcava de la muestra. Otra de las limitaciones de la aplicación de REGEM es el cálculo de la longitud máxima que puede alcanzar la cárcava. Esta fue descrita por Leopold et al. (1964) como una función exponencial dependiente de la superficie de drenaje. En REGEM

las cuencas de drenaje se asemejan a triángulos con uno de los vértices en la cabecera. Posteriormente, con el crecimiento de la cárcava la superficie de drenaje se va reduciendo y, con ella, la escorrentía que llega a la cabecera. La longitud a la que se detiene el avance de la cabecera es la mitad de la altura de ese triángulo. Se estudió la relación de esta longitud con la superficie de la cuenca y se insertó una nueva relación en el código. Sin embargo, esta mejora no resuelve el problema de las bifurcaciones, fenómeno muy común en las cárcavas. La relación entre el esfuerzo de corte y el caudal no es lineal, por tanto, no puede esperarse que la división de la cárcava tenga un efecto lineal y el crecimiento total de las cárcavas no será igual a la suma para ambas subcuencas. Se realizó un análisis de sensibilidad en SimLab v2.2 (Saltelli et al., 2004) para el primer chubasco del periodo de estudio considerando que la cabecera ya estaba formada. Se utilizó el método eFAST (*extended Fourier Amplitude Sensitivity Test*) con una muestra de 2500 valores. Se consideraron aquellas variables de entrada de las cuales se posee incertidumbre: el coeficiente de resistencia de Manning, el esfuerzo de corte crítico del lecho  $\tau_{cr}$ , el coeficiente de erodibilidad  $k_d$  y la profundidad de laboreo  $T_D$ . Para todas ellas se usó una distribución uniforme, teniendo igual peso todos los valores posibles. Se recurrió a la bibliografía (Tabla 1) en busca de valores aplicables a las condiciones del sitio, seleccionándose, finalmente, los intervalos mostrados en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Intervalos utilizados para las variables estudiadas en el análisis de sensibilidad.

	n	$\tau_{cr} (Pa)$	$k_d (m^3 N^{-1} s^{-1})$	$T_D (m)$
Mín.	0.015	0.05	0.35	0.1
Máx.	0.4	7	23	1

### 3.- Resultados

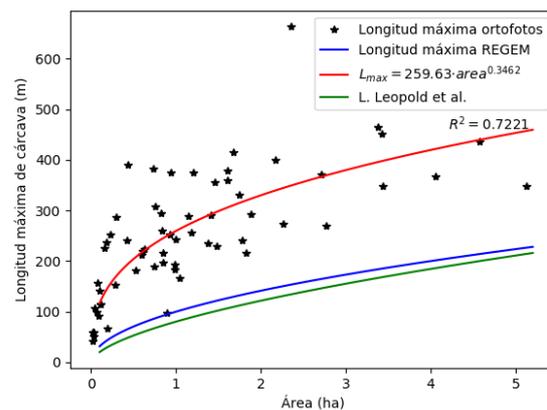
#### 3.1 Mejora del modelo

Durante la prueba del modelo con los datos de campo, las simulaciones rápidamente tendían a la longitud máxima tras una decena de chubascos, debido a la dificultad para determinar una profundidad de laboreo válida. Estas longitudes no se correspondían con las medidas a partir de las ortofotos y, además, las cárcavas de la zona de estudio podían presentar crecimientos en años posteriores, por lo que no habían alcanzado su

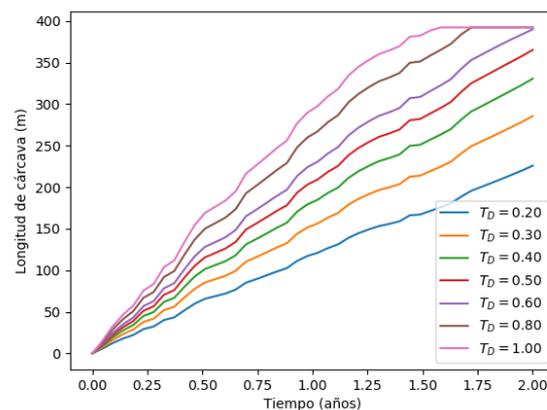
longitud máxima. Se consideró que el modo de cálculo de la longitud máxima no era adecuado para el tipo de cárcava objeto de estudio, debido a las formas alargadas o rectangulares de las cuencas, y se decidió adoptar una relación empírica entre el área de drenaje y la longitud máxima que podría tener la cárcava. Se prefirió una ecuación exponencial siguiendo los trabajos de Leopold et al. (1964). Se realizaron nuevas simulaciones con una submuestra de 15 cárcavas (Figura 3), quedando la relación empírica del siguiente modo:

$$L_{max} = 259,63 \text{ area}^{0,3462} \quad (1)$$

Las longitudes máximas se midieron como la línea recta más larga entre la cabecera y la divisoria del área de drenaje de la cárcava. No se espera que se alcance este valor, sino que sirva para relacionar la disminución de la superficie que vierte sobre la cabecera conforme al crecimiento en longitud.



**Figura 3.** Relación entre el área de drenaje y la longitud máxima que pueden alcanzar las cárcavas.



**Figura 4.** Evolución de la longitud de una cárcava con una superficie de drenaje de 3.3 ha, 20% de pendiente media, coeficiente de resistencia de Manning  $n=0.1$  a lo largo del periodo 2005-2007 para diferentes profundidades de laboreo  $T_D$ .

Con la nueva relación área – longitud máxima, debía buscarse una  $T_D$  con la que se obtuviesen evoluciones similares a las experimentadas en la zona de estudio. Se hicieron simulaciones para varias cárcavas variando los valores de  $T_D$ . Con  $T_D$  igual a 0.20 m se obtienen como resultado valores próximos a las longitudes de cárcavas medidas a partir de las ortofotos para la mayoría de la muestra. En la Figura 4 se observa la evolución simulada para una cárcava con área de drenaje de 3.3 ha y pendiente de 20% (utilizada como modelo en las representaciones) utilizando diferentes valores de  $T_D$ . El crecimiento medido en las ortofotos era de 197 m, puede verse que, en este caso, con  $T_D$  igual a 0.20 m se sobrestima la longitud y con 0.60 m se alcanza el máximo.

### 3.2. Análisis de sensibilidad

De las simulaciones realizadas en el análisis de sensibilidad del primer evento de lluvia del periodo, 9.5 mm, para la cárcava modelo resultaron crecimientos cuya mayoría eran de entre 6 y 10 m. Los índices de sensibilidad de los parámetros estudiados se muestran en la Tabla 3, teniendo una importancia despreciable las variables  $\tau_{cr}$  y  $k_d$ .

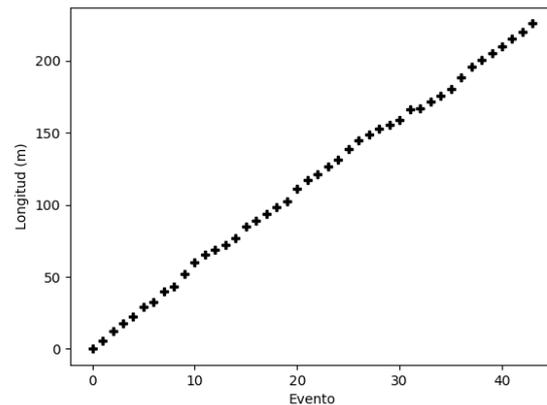
**Tabla 3.** Valores de los índices de sensibilidad total de las variables estudiadas.

	Índice de sensibilidad total
$n$	0.8366
$\tau_{cr}(Pa)$	0.000488
$k_d (m^3 N^{-1} s^{-1})$	0.000248
$T_D(m)$	0.1299

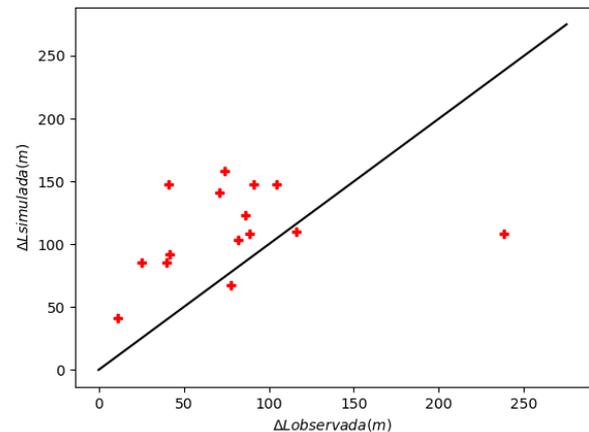
### 3.3. Validación

Se estudió el crecimiento en longitud de las cárcavas en relación a la magnitud del evento de precipitación. La figura 5 muestra estos crecimientos en la cárcava modelo con sus correspondientes precipitaciones diarias ordenadas de menor a mayor para el periodo 2005-2007.

Finalmente, se compararon las diferencias existentes entre los crecimientos observados en las ortofotos con los simulados para la submuestra de 15 cárcavas (figura 6) tras ser corregido el cálculo de la longitud máxima y con un valor de  $T_D$  igual a 0.20 m.



**Figura 5.** Crecimiento acumulado de una cárcava referido a cada evento de precipitación en el periodo 2005-2007 con  $n = 0.10$  y  $T_D = 0.20$  m, en una cuenca de 3.3 ha y pendiente media del 20%. Los eventos han sido ordenados de menor a mayor precipitación.



**Figura 6.** Crecimientos registrados a partir de las ortofotos frente a los simulados con REGEM para la submuestra de 15 cárcavas con  $T_D = 0.20$  m,  $n = 0.1$ , en el periodo 2005-2013.

## 4.- Discusión y conclusiones

El método para calcular la longitud máxima propuesto por Gordon (2007) no parece ser válido para esta zona de estudio. La relación longitud máxima – área es especialmente importante ya que la superficie de drenaje va reduciéndose con el aumento de la longitud de la cárcava, de modo que el caudal y volumen de agua se ven afectados. Esta disminución es proporcional en REGEM, si bien la forma de la cuenca debe determinar el tipo de relación. Por lo que podría estudiarse la inclusión de un coeficiente de forma de la cuenca y así evitar calcular relaciones empíricas en cada situación. Se ha propuesto una función alternativa que mejora las

predicciones y elimina la limitación del crecimiento que se alcanzaba demasiado rápido, probablemente por tratarse de cuencas más alargadas.

En las primeras simulaciones las longitudes máximas se alcanzaban rápidamente, debido a la aproximación de semejanza entre la profundidad de labrado y la profundidad de la cabecera o de la cárcava. El valor de  $T_D$  debería utilizarse para calcular la energía del impacto del agua en la base de la cabecera en el modelo de Alonso et al. (2002). Sin embargo, este valor no ha podido identificarse como la profundidad de la cabecera de forma satisfactoria en este trabajo. En la figura 4, puede apreciarse la importancia de esta variable. Se obtiene una longitud aproximada a la observada en las ortofotos (197 m) para la cárcava modelo con una profundidad de labrado de 0.20 m. Con profundidades más próximas a la media de las cabeceras medidas en campo, 0.78 m, rápidamente se alcanza el valor máximo de longitud, que no solo sobrestima, sino que también impide el crecimiento en futuros eventos.

En el análisis de sensibilidad se observa que la variable que, con diferencia, tiene mayor peso en los resultados es el coeficiente de resistencia de Manning,  $n$  (0.8366). Gudino-Elizondo et al. (2018) encontraron en su estudio de cárcavas efímeras con AnnAGNPS en caminos no asfaltados que  $T_D$  y  $\tau_{cr}$  eran los parámetros más sensibles lo cual contrasta con los resultados obtenidos en este trabajo en cárcavas producidas en cultivos de olivar, si bien, en su experimento, las simulaciones se realizaban con la formación de la cabecera de la cárcava que es cuando  $\tau_{cr}$  tiene mayor importancia. Los trabajos coinciden en que el coeficiente de erodibilidad es un factor poco significativo. Esto concuerda con la hipótesis generalmente aceptada de que una vez formada la cabecera, el control de la erosión en cárcavas es complicado (Prosser and Soufi, 1998; Woodward, 1999).

La determinación con precisión del coeficiente de resistencia de Manning para las cárcavas es difícil si se consideran las asperezas que pueden encontrarse de forma temporal, como restos de vegetación que pueden ser arrastrados, y la variación del relieve del fondo de la cárcava con el tiempo (Arcement y Schneider, 1984).

También presenta un índice de sensibilidad total importante la profundidad de labrado, pero éste es bastante menor (0.1299). Sin embargo, la asimilación de esta variable a una medida física en cárcavas permanentes no ha sido definida, por lo que la incertidumbre, a priori, es total.

Se exploró si se podía suponer que el crecimiento de la cárcava podía deducirse de los chubascos de mayor magnitud y considerar que el resto tienen un impacto despreciable. Al reordenar los chubascos de menor a mayor precipitación se detecta una tendencia que, en principio, no parece apoyar esta hipótesis. Se debe a que la mayor parte de los grandes chubascos ocurrieron más tarde en la simulación. Si bien se aprecian saltos mayores en algunos puntos, estos parecen responder más al momento en el que la precipitación tiene lugar, con respecto al aumento en longitud de la cárcava, que a la magnitud del propio chubasco. Es en los primeros chubascos cuando la cárcava crece con mayor rapidez y con el aumento en longitud de la cárcava se reduce su área de drenaje.

A pesar de la modificación de las longitudes máximas que pueden alcanzar las cárcavas y del uso de una profundidad de labrado que se ajusta específicamente a los datos, existen ciertas diferencias entre las longitudes observadas y las simuladas (figura 6). Para esta submuestra de 15 cárcavas las longitudes observadas son un 29% inferiores a las calculadas.

En conclusión, la aplicación del modelo a cárcavas permanentes y la estimación de sus longitudes presentan varios problemas cuya solución debería ser estudiada en más profundidad antes de poder ser aplicado satisfactoriamente:

- Por un lado, la obtención de los datos a partir de las ortofotos con los que poder comparar los resultados obtenidos es complicada, ya que requiere la identificación precisa y de forma manual de las cárcavas con la red de drenaje, y discerniendo entre cárcavas sobre las que se ha actuado.
- No contempla bifurcaciones en cárcavas que suponen la división de las áreas de drenaje y, por consiguiente, la reducción de la velocidad de avance de la cabecera. Por lo que las situaciones en las que podría utilizarse el modelo se verían limitadas a tramos en cuya evolución no se produce bifurcación entre sucesivas ortofotos.
- El parámetro más sensible es especialmente difícil de determinar ya que el coeficiente de resistencia de Manning en la cárcava no sólo depende del material del lecho, que también cambia al variar la textura de los horizontes socavados, sino que se ve influido por el aumento de la sinuosidad de la cárcava, la aparición de vegetación y raíces leñosas de los cultivos y de otros obstáculos que puedan ser arrastrados por el agua. Todos estos factores cambian a lo largo del periodo de simulación.

- El ajuste del parámetro de profundidad de laboreo de forma empírica reduce la base teórica del modelo. Además, el ajuste de este parámetro para obtener una longitud similar a la observada en campo reduce la capacidad del modelo para determinar la masa de sedimentos generados. Además, esta profundidad en el modelo es invariante para cualquier sección de la cárcava, mientras que en campo se han registrado profundidades de hasta cuatro metros en cárcavas en cuyas cabeceras la profundidad era de 1 m.

## 5.- Bibliografía

- Alonso, C. V., S. J. Bennett y O. R. Stein, 2002. Predicting headcut erosion and migration in concentrated flows typical of upland areas. *Water Resour. Res.* vol. 38 doi:10.1029/2001WR001173.
- Arcement G.J. y V.R. Schneider, 1984. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. USGS Water-supply. Paper 2339. Superintendent of Documents, Washington, D.C.
- Campo-Bescós, M. A., J. H. Flores-Cervantes, R. L. Bras, J. Casalí y J. V. Giráldez, 2013. Evaluation of a gully headcut retreat model using multitemporal aerial photographs and digital elevation models. *J. Geophys. Res.*, 118, 2159 - 2173, doi:10.1002/jgrf.20147.
- Castillo, C., R. Pérez, y J. A. Gómez, 2014. A conceptual model of check dam hydraulics for gully control: efficiency, optimal spacing and relation with step-pools. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 1705-1721, <https://doi.org/10.5194/hess-18-1705-2014>.
- Chahor, Y., J. Casalí y R. Giménez, 2012. Testing AnnAGNPS model in predicting ephemeral gully erosion in Navarre (Spain). *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 14252.
- De Santisteban, L.M., J. Casalí y J.J. Lopez, 2006. Assessing soil erosion rates in cultivated areas of Navarre (Spain). *Earth Surf. Proc. Landf.*, 31(4), 487 - 506, doi:10.1002/esp.1281.
- Gordon M. L., 2005. A rational approach to modelling ephemeral gully erosion, REGEM: The Revised Ephemeral Gully Erosion Model. Department of Geography, State University of New York at Buffalo.
- Gudino-Elizondo, N., T.W. Biggs, R.L. Bingner, Y. Yuan, E.J. Langendoen, K.T. Taniguchi, T. Kretzschmar, E.V. Taguas y D. Liden, 2018. Modelling Ephemeral Gully Erosion from Unpaved Urban Roads: Equifinality and Implications for Scenario Analysis. *Geosciences* 2018, 8, 137.
- Hanson, G.J. y K.R. Cook, 2004. Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in-situ. *Trans. ASAE*, 20(4), pp 455-462.
- Hayas A., T. Vanwallegem, A. Laguna, A. Peña y J.V. Giráldez, 2017. Reconstructing long-term gully dynamics in Mediterranean agricultural areas. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21: 235 - 249. <https://doi.org/10.5194/hess-21-235-2017>.
- Hayas A., J. Poesen y T. Vanwallegem, 2017. Rainfall and vegetation effects on temporal variation of topographic thresholds for gully initiation in Mediterranean cropland and olive groves. *Land Degrad. Develop.* 28: 2540 - 2552.
- Flores-Cervantes, J.H., E. Istanbuloglu y R. Bras, 2006. Development of gullies on the landscape: A model of headcut retreat resulting from plunge pool erosion. *J. Geophys. Res.* vol. 111, doi:10.1029/2004JF000226.
- Karlinger, M.R. y B.M. Toutman, 1985. Assessment of the instantaneous unit-hydrograph derived from the theory of topologically random networks. *Water Resour. Res.* 21: 1693-1702.
- Knapen A., J. Poesen, G. Govers, G. Gyssels y J. Nachtergaele, 2007. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Sci. Rev.* 89. 75-109.
- Knighton, D., 1998. Fluvial Forms and Processes, 383 pp., Edward Arnold, Londres.
- Leopold, L.B., M.G. Wolman y J.P. Miller, 1964. Fluvial Processes in Geomorphology. W.H. Freeman and Co., San Francisco.
- Li H., R.M. Cruse, R.L. Bingner, K.R. Gesch y X. Zhang, 2016. Evaluating ephemeral gully erosion impact on Zea Mays L. yield and economics using AnnAGNPS. *Soil Till. Res.* 155. 157-165.
- Limerinos J.T., 1970. Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels. USGS, Water-Supply Pap. 1898-B. US Superintendent of Documents, Washington, D.C.
- Martínez-Casasnovas, J. A., C. Antón-Fernández, y M. C. Ramos, 2003. Sediment production in large gullies of the Mediterranean area (NE Spain) from high-resolution digital elevation models and geographical information systems analysis. *Earth Surf. Proc. Landf.*, 28(5), 443 - 456, doi:10.1002/esp.451.
- Mazurek K.A. 2010. Erodibility of a cohesive soil using a submerged circular turbulent impinging jet test. *2nd Joint Federal Interagency Conference*, Las Vegas. NV. June 27 - July 1, 2010.
- Muñoz-Carpena, R., Z. Zajac, y Y.M. Kuo, 2007. Global sensitivity and uncertainty analyses of the water quality model VFSMOD-W. *Trans. AASABE*. 50(5): 1719-1732.
- Poesen, J., J. Nachtergaele, G. Verstraeten y C. Valentin, 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50, 91 - 133.
- Prosser, I. P., y M. Soufi, 1998. Controls on gully formation following forest clearing in a humid temperature environment. *Water Resour. Res.*, 34(12), 3661 - 3671.
- Rengers, F. K., y G. E. Tucker, 2014. Analysis and modelling of gully headcut dynamics, North American high plains. *J. Geophys. Res.* 119, 983-1003, doi:10.1002/2013JF002962.
- Saltelli A., S. Tarantola, F. Campolongo y M. Ratto, 2004. Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models. John Wiley and Sons: Chichester.
- Vandekerckhove, L., J. Poesen, D.O. Wjdenes, J. Nachtergaele, C. Kosmas, M.J. Roxo y T. D. Figueiredo, 2000. Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe. *Earth Surf. Proc. Landf.*, 25, 1201- 1220.
- Wischmeier, W.H. y D.D. Smith, 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning, *USDA Ag. Hbk.* 537, USDA, Washington, D.C.
- Woodward, D. E., 1999. Method to predict cropland ephemeral gully erosion. *Catena*, 37, 393 - 399.
- Yuan, Y., R.L. Bingner y R.A. Rebich, 2003. Evaluation of AnnAGNPS nitrogen loading in an agricultural watershed. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 39, 457- 466.
- Yuan, Y., R.L. Bingner y R.A. Rebich, 2001. Evaluation of AnnAGNPS on Mississippi Delta MSEA watersheds. *Trans. ASAE* 2001, 44, 1673-1682.