

APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) A LA ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN EN LA CUENCA DEL EMBALSE DE ARGUIS (HUESCA)

Pedro Ignacio CRUCHAGA¹

RESUMEN.— En este texto se analiza la aplicación del modelo de predicción de la erosión RUSLE a la cuenca vertiente al embalse de Arguis, en Huesca, mediante distintos Sistemas de Información Geográfica (SIG). Esta técnica permite determinar, a un bajo coste en recursos y tiempo, las zonas más productoras de sedimentos responsables de la colmatación de este embalse. El modelo define como zonas más fácilmente erosionables las margas y los campos de cultivo situados sobre areniscas. Para la determinación de los factores que hacen a estas zonas tan vulnerables sería necesario un trabajo de campo más detallado.

ABSTRACT.— The application of the prediction model of watershed erosion RUSLE to the basin of the Arguis Dam in Huesca, using GIS tools, is discussed in this text. This technique allows to determine, at a low cost in time and resources, the areas which contribute the sediments responsible for the clogging of the reservoir. The model define as more easily erodible areas the marls badlands and the fields located on sandstone. The determination of which factors make these areas are being so vulnerable would require a more detailed field work.

KEY WORDS.— GIS, erosion, clogging, RUSLE, Arguis Dam, Huesca (Spain).

¹ pedro.cruchaga.ambiental@gmail.es

INTRODUCCIÓN

El aterramiento de los embalses es un importante problema en su gestión, al disminuir paulatinamente su capacidad de almacenamiento. Durante siglos el embalse de Arguis ha sido una importante reserva de agua para los riegos de la ciudad de Huesca. Construido a finales del siglo xvii, ha sido objeto de varios recrecimientos debido a problemas de colmatación por la naturaleza margosa de su cuenca, como muestra a modo de ejemplo la figura 1, tomada antes del último recrecimiento.

La determinación de las zonas más sensibles a la erosión y, por tanto, aportadoras de sedimentos a este embalse facilitaría y optimizaría el efecto de cualquier posible medida correctora que pudiera acometerse *a posteriori* por los gestores o responsables de su mantenimiento, alargando su vida útil y, por tanto, reduciendo los costes materiales y sociales de posibles recrecimientos.

El modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) es el modelo de predicción de erosión aplicado, ya que ha sido ampliamente probado



Fig. 1. Aterramiento en el embalse de Arguis hacia 1921.
(Foto: Archivo Grupo Excursionista ADACAS)

en distintos trabajos de toda índole, ha demostrado fiabilidad y adaptabilidad a distintas condiciones ambientales y ha dado unos valores orientativos aceptables.

El empleo de herramientas del tipo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) facilita y disminuye el coste para la aplicación de modelos de predicción. Esta mejora se debe a la posibilidad de ser llevada a cabo por un solo técnico y a la optimización del número de muestreos necesarios, minimizando las salidas de campo.

El objetivo de este artículo es obtener una primera estimación de la erosión en la cuenca alta del río Isuela, en la zona del embalse de Arguis, mediante la aplicación de un SIG.

ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio es la cuenca vertiente al embalse de Arguis, en el municipio oscense del mismo nombre. Este embalse represa la cabecera del río Isuela, pequeño afluente del Flumen. La cuenca del río Isuela se suele subdividir en zona alta y baja, que limitan en Nueno, donde se modifica la morfología del río por el cambio de geología y la pendiente del terreno.

El Isuela nace en la sierra de Bonés. Dentro de la cuenca del embalse discurre un pequeño tramo como cauce superficial a través de la cubeta margaosa, con *badlands*, antes de alcanzar la cola del mismo. El embalse de Arguis, con más de 300 años de antigüedad, tiene su vaso en margas y la cerrada en calizas. El volumen máximo almacenable es del orden de 2,3 hm³ de agua (GRASA, 1997). Desde el pie del embalse (donde se acaba la zona de estudio), el río se encaja linealmente, a través del congosto fluviokarstico del Isuela, hasta Nueno. A partir de allí discurre con alguna sinuosidad por el piedemonte hasta su desembocadura en el Flumen, cerca del núcleo de Buñales.

La geología de la zona estudiada, siguiendo a PUIGDEFÁBREGAS (1975), se compone de cuatro tipos de materiales geológicos. En la base aparecen calizas del Eoceno, de la formación Guara. Sobre ellas, formando el vaso del pantano, margas grises del Eoceno, de la formación Arguis. Encima, margas y areniscas de la formación Belsué. A techo, areniscas continentales de la formación Campodarbe, que conforman la sierra de Bonés y el puerto del Monrepós.

Las características climáticas del área de estudio dan valores medios anuales del orden de los 800 milímetros de precipitación y 10 °C de temperatura. La vegetación se compone de quejigos en las zonas de solana y pinar de pino silvestre en la cara norte. En estas zonas, en especial en las de canchales, se llevaron a cabo repoblaciones hacia 1940. En la zona del pico del Águila quedan algunos pies de hayas aislados. El uso del territorio comprende algunos campos todavía en cultivo y otros muchos que estuvieron en producción hasta 1960, pinares de repoblación, algún bosque natural, antiguas zonas de pastoreo y *badlands*.

La cubeta de Arguis se encuentra comunicada de norte a sur mediante la A-23 (antigua N-330) y hacia el oeste por la carretera comarcal hacia Bentué de Rasal. La zona de estudio se define gráficamente en la figura 2. La cota más alta es de 1631,65 msnm y la más baja de 633,276 msnm. La coordenada UTM del centroide del polígono estudiado es X: 715000, Y: 4687500, Huso 30 (Datum ETRS89) – EPSG: 25830.

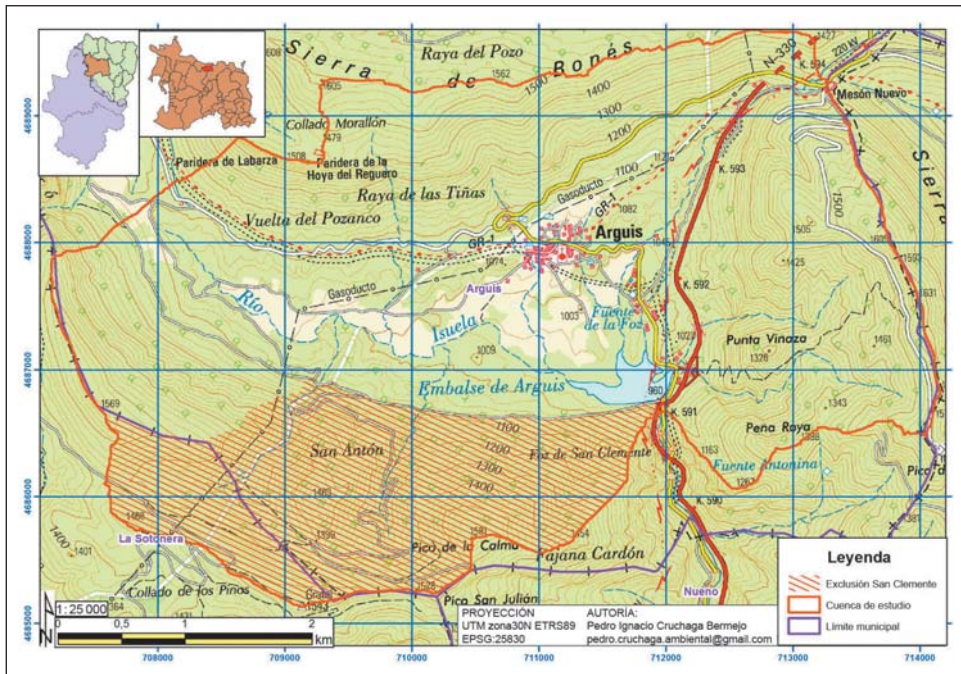


Fig. 2. Localización de la zona de estudio.

MATERIAL Y MÉTODOS

Herramientas digitales

En este artículo se han empleado tres bases cartográficas. En primer lugar se ha utilizado el modelo digital del terreno (MDT), con un tamaño de pixel de 5 metros, generado en 2011 y ofrecido por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). La segunda base son las ortofotos de “máxima actualidad”, de julio de 2012, ofrecidas también por el IGN. Se han utilizado para las descargas las hojas del mapa topográfico nacional 1: 50 000 (MTN 50) números 209, 210, 247 y 248. La tercera base es la geología de Aragón, en formato vectorial, de la plataforma SITAR de la DGA. Todos estos productos se encontraban en la proyección estándar de este trabajo definida por el EPSG: 25830.

Estas bases se han manejado, para el análisis mediante SIG, con los programas arcGIS 10.1, Kosmo 3.0, Qgis 2.0.1 y arcSWAT 2012.10.1.14, y el conjunto de paquetes independientes Libreoffice 4.1.4.2.

En primer lugar se ha definido la zona de estudio. Para ello se ha realizado un análisis de la cuenca de Arguis, que se ha dividido en subcuencas, sirviéndonos de la herramienta arcSWAT (extensión del programa arcGIS) sobre el MDT del IGN. Con esta extensión se obtienen los cauces superficiales que vierten al embalse, las subcuencas y la cuenca vertiente, tomando como punto final de vertido el pie del embalse.

A esta zona inicial de estudio se le ha eliminado la parte de la cuenca de Arguis vertiente a la foz de San Clemente. Según GIMENO y CUCHÍ (1996), se trata de una zona de calizas muy karstificadas que drenan subterráneamente el paraje de las Calmas. Se le ha estimado en este trabajo una superficie de 480,271 hectáreas, que vierten directamente a la foz. Este drenaje kárstico hace despreciable el poco arrastre de materiales que se pueda dar en esta zona hacia el embalse, al ser mínima la escorrentía superficial.

La RUSLE

Se ha empleado el modelo matemático RUSLE, de predicción de pérdida de suelos, definido por Chris M. Mannaerts en 1999, según el texto de ANTEZANA (2001).

La RUSLE estima las pérdidas de suelo anuales (A) para una cuenca dada mediante la ecuación

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

R es la contribución del factor lluvia, K es la erosionabilidad del suelo, LS es el factor que relaciona la longitud de las laderas y su pendiente, C está relacionada con la cobertura vegetal y P indica el efecto de las actuaciones para controlar la erosión. La determinación de los distintos factores de cálculo que componen la ecuación RUSLE es un proceso complejo y específico para cada uno de ellos, que se resume a continuación.

El factor R es un factor de cálculo complicado, para el que se necesitan largas series de hietogramas. Al no haberse podido disponer de los mismos, R se ha obtenido a partir de los valores promedio que ofrece ICONA (1988). Para toda la cuenca de Arguis se ha aplicado un valor constante de 150. Este parámetro se podría definir con más exactitud a partir del análisis de datos de distintos pluviómetros que habría que colocar en el perímetro, dentro de la zona de estudio, en el embalse y a media ladera. Estos habrían de registrar los datos durante un mínimo de tres años. A partir de ellos se calcularía el valor R de cada uno, de acuerdo con la metodología presentada en ICONA (1988). Posteriormente, se extrapolarían estos valores a una capa *raster*, definiendo un valor para cada píxel de 5 metros en la zona de estudio.

Hay que reseñar que no existe un estudio de suelos para esta zona. Para definir los distintos valores de K se han estimado distintos tipos de suelo a partir del producto cartográfico ofrecido por la DGA para la geología de Aragón. Para cada uno de los tipos de material geológico en la zona se han definido, con criterio de experto, unos parámetros medios edafológicos que se presentan en la tabla 1. Luego, se define un valor de K para cada tipo de

Tabla 1. Propiedades físicas estimadas de los distintos suelos de la cuenca de Arguis empleadas para determinar su erosionabilidad (K).

| <i>Roca</i> | <i>Textura</i> | <i>Limo + arena fina (%)</i> | <i>MO (%)</i> | <i>Arena gruesa (%)</i> | <i>Permeabilidad</i> | <i>Estructura</i> |
|-------------|----------------|------------------------------|---------------|-------------------------|----------------------|-------------------|
| Arenisca | Arenosa | 60 | 1 | 5 | 4 (baja) | 1 |
| Marga | Arcillo-limosa | 40 | 0,5 | 0,5 | 6 (muy baja) | 4 |
| Caliza | Franca | 20 | 3 | 2 | 2 (alta) | 3 |

Tabla II. Resultados estimados de erosionabilidad (K) tras la aplicación del nomograma ARS (1975).

| <i>Tipos de suelo</i> | <i>Primera aproximación de K</i> | <i>K</i> |
|-----------------------|----------------------------------|----------|
| Arenisca | 0,32 | 0,32 |
| Marga | 0,24 | 0,28 |
| Caliza | 0,03 | 0,05 |

suelo en un archivo vectorial, tras aplicar la nomografía para determinar el factor de erosionabilidad del suelo (K) según ARS (1975). El resultado final por tipos de suelo se muestra en la tabla II y, gráficamente, en la figura 3.

Para concluir, se definió para cada parcela con su tipo de suelo el valor de K obtenido en un archivo vectorial SIG. El resultado final se muestra en la figura 3. Se trata de valores aproximados. Evidentemente, sería bueno contar con un estudio de suelos detallado para esta zona.

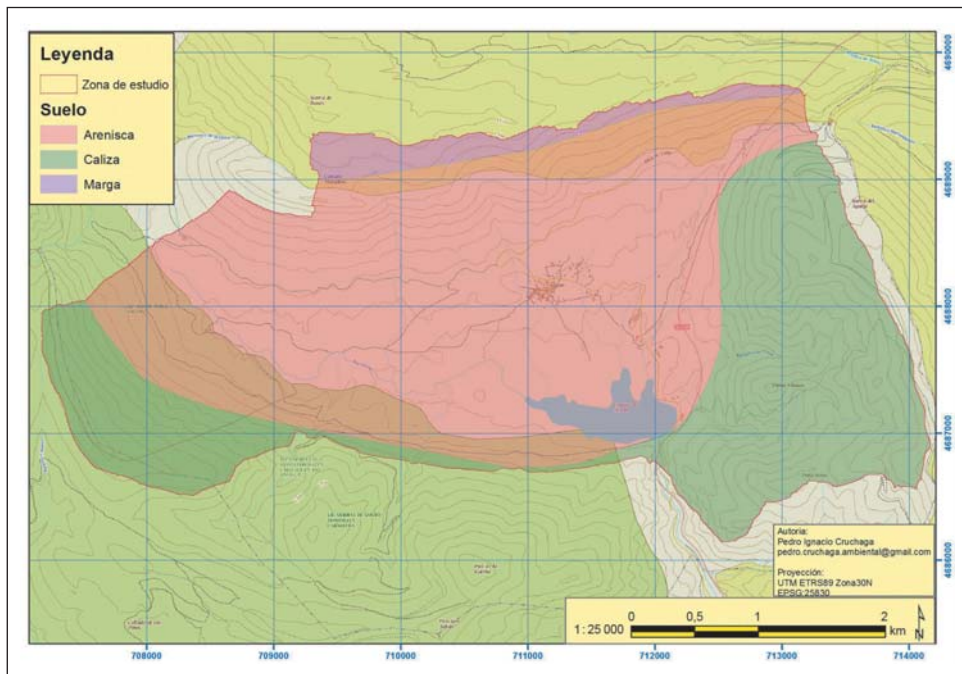


Fig. 3. Mapa de tipos de suelo en la zona de estudio, subdivididos en suelos sobre calizas, margas y areniscas.

Para calcular el valor de LS se necesita la longitud del recorrido máximo y la inclinación de la pendiente vencida. Para lograr esto se han dividido las subcuencas vertientes en 24 unidades de ladera, con el corte de estas zonas y los cauces superficiales que se presentan en la figura 4. Para la cuenca vertiente al inicio del cauce superficial se ha dividido esta siguiendo el cauce superficial, desde su nacimiento hasta el punto en la divisoria de menor cota. Una vez delimitadas las laderas vertientes, se ha definido para cada una de ellas el recorrido del agua desde el punto más elevado de la ladera hasta el cauce superficial estable vertiente. Este recorrido es el valor que se ha tomado como l. En los extremos de cada uno de estos recorridos se han definido los dos puntos e importado los valores de elevación de cada punto desde el MDT. Se exporta este valor máximo y mínimo de cota correspondiente a cada línea que define l. Conocidos el recorrido en metros y el desnivel salvado, se obtienen los dos datos necesarios para despejar el valor del factor LS mediante la ecuación

$$LS = (l / 72,6)^m \times S$$

Los valores de m y S se calculan mediante las ecuaciones

$$m = 0,1342 \times \log \text{ neper } (P) + 0,192$$

$$S = 10,8 \times \text{sen}A + 0,03, \text{ cuando } P < 9\%$$

$$S = 16,8 \times \text{sen}A - 0,5, \text{ cuando } P \geq 9\%$$

Para todas estas fórmulas, l es el recorrido (m) del agua desde el punto más elevado de la ladera hasta el cauce superficial estable vertiente, P es la inclinación en % (adimensional) y A es el ángulo del recorrido en grados. Los resultados se presentan en la figura 4, donde se han definido 24 unidades que aparecen con coloración individual.

Para obtener el valor de C se ha definido una zonificación de usos del suelo mediante fotointerpretación de las ortofotos del IGN. Para cada una de ellas se ha asignado un valor de C según ICONA (1988) y ANTEZANA (2001). Las unidades de usos del suelo y valores asignados de C se presentan en la tabla III.

Para la determinación del valor de P se consideró que la única intervención de prevención de erosión existente en la zona son algunos cultivos en bancales, que pueden datar desde el siglo XVII hasta principios del siglo pasado. Aunque están en un proceso de degradación, a estas zonas se ha asignado

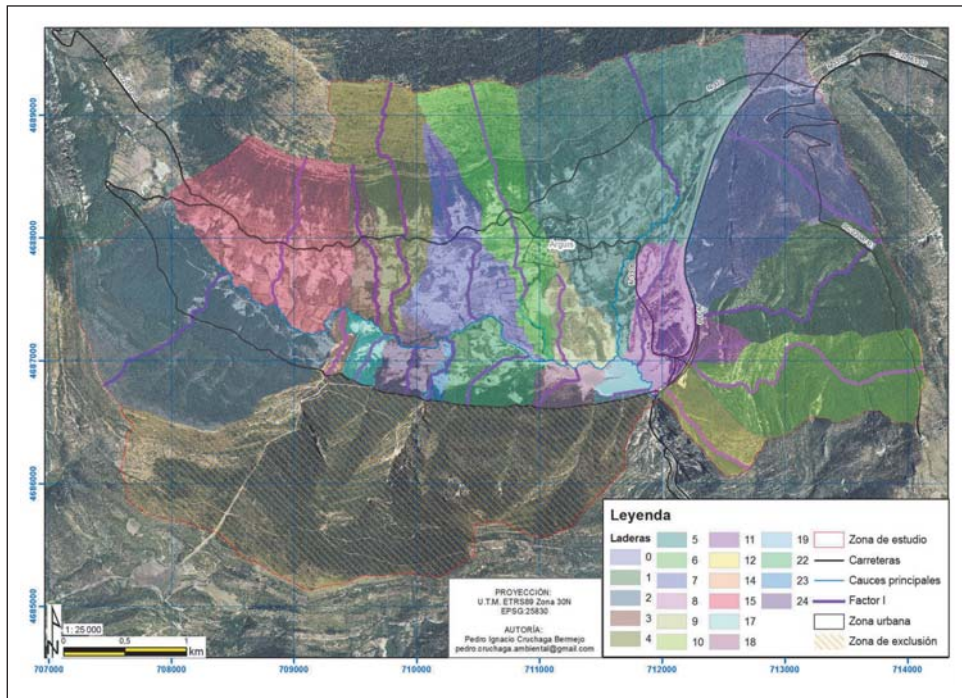


Fig. 4. Mapa de laderas en la cuenca del embalse de Arguis.

Tabla III. Unidades de usos del suelo y valor de C (cobertura vegetal) para la cuenca de Arguis.

| Unidad | Descripción | Valor C |
|------------------------|--|---------|
| Marga | Afloramientos de margas grises | 0,45 |
| Roca | Afloramientos de roca viva | 0,45 |
| Canchal | Canchales o gleras | 0,45 |
| Bosque | Comunidades silvícolas | 0,03 |
| Arbusto | Comunidades arbustivas | 0,13 |
| Campo abandonado | Antiguos campos de labor claramente abandonados | 0,2 |
| Campo | Campos de labor en activo | 0,46 |
| Agua | Superficie ocupada por agua, lámina del embalse | 0 |
| Urbano | Zona urbana o edificada | 0 |
| Perturbación antrópica | Zona de perturbaciones antrópicas: carreteras, taludes, desmontes... | 0 |

un valor de 0,3. Para el resto de las zonas se asignó el valor 1, que indica que no hay ninguna intervención siguiendo la normativa de ICONA (1988).

Para obtener el valor final de la RUSLE se ha realizado un geoproceso de intersección entre las distintas capas de polígonos que contenían los diferentes valores, y en esta capa final se ha realizado el cálculo del valor A mediante la multiplicación de los distintos valores de cada una de las componentes del modelo.

Para concluir, combinando los valores de las diversas unidades se ha obtenido A, la degradación potencial anual en tm/ha, y se ha realizado un análisis estadístico descriptivo básico de los valores obtenidos por el SIG.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La superficie inicial que se ha de estudiar, tras el análisis de cuencas vertientes, es de 2112,875 hectáreas. De esta superficie inicial se ha excluido la zona kárstica, vertiente subterráneamente a la foz de San Clemente, y se considera inapreciable el arrastre de materiales hasta el embalse. La superficie de trabajo donde se aplica el modelo, tras la exclusión de esta zona, es de 1632,604 hectáreas.

Los resultados obtenidos al analizar los datos del modelo RUSLE, según los usos del suelo, se muestran en la tabla IV. Para cada una de las áreas definidas se presentan los valores de los diversos componentes de la RUSLE, más el correspondiente valor de A en tm/ha/año. Para cada una de las unidades se ofrecen los valores medio, máximo y mínimo, varianza y desviación específica.

Los valores obtenidos son valores estimados, por lo que deben ser tomados con todas las precauciones. Desde luego sería más que interesante realizar una validación de resultados a partir de trabajo de campo. Los valores más altos se dan para las áreas de margas y campos, algo esperable. Los valores correspondientes a los afloramientos de roca carecen de sentido. Son afloramientos muy reducidos, pero escarpados. Y, evidentemente, no hay suelo sobre ellos.

Los datos que presenta la tabla I permiten establecer un primer valor sobre la masa de sedimentos teórica que se está desplazando hacia el

Tabla iv. Resultados medios de los valores de la RUSLE por usos del suelo para la cuenca de Arguis.

| | | Área (m ²) | C | P | K | LS | R | A (tm/ha/año) |
|-------------------------|-----------------------|------------------------|-------|-------|-------|---------|---------|------------------|
| <i>Agua</i> | Suma | 353 236,971 | | | | | | |
| | Media | 32 112,452 | 0,000 | 1,000 | 0,246 | 23,477 | 150,000 | 0,000 |
| | Mínimo | 62,368 | 0,000 | 1,000 | 0,050 | 2,756 | 150,000 | 0,000 |
| | Máximo | 82 621,198 | 0,000 | 1,000 | 0,320 | 75,297 | 150,000 | 0,000 |
| | Varianza | 947 408 828,269 | 0,000 | 0,000 | 0,014 | 852,807 | 0,000 | 0,000 |
| | Desviación específica | 30 780,007 | 0,000 | 0,000 | 0,120 | 29,203 | 0,000 | 0,000 |
| <i>Arbusto</i> | Suma | 4 600 249,758 | | | | | | |
| | Media | 28 396,603 | 0,130 | 0,987 | 0,296 | 61,676 | 150,000 | 352,164 |
| | Mínimo | 0,001 | 0,130 | 0,300 | 0,050 | 3,481 | 150,000 | 3,394 |
| | Máximo | 693 571,258 | 0,130 | 1,000 | 0,320 | 84,871 | 150,000 | 529,593 |
| | Varianza | 7 314 597 864,244 | 0,000 | 0,009 | 0,006 | 593,850 | 0,000 | 29 569,454 |
| | Desviación específica | 85 525,422 | 0,000 | 0,094 | 0,076 | 24,369 | 0,000 | 171,958 |
| <i>Bosque</i> | Suma | 7 937 078,631 | | | | | | |
| | Media | 81 825,553 | 0,030 | 1,000 | 0,189 | 53,985 | 150,000 | 43,872 |
| | Mínimo | 0,013 | 0,030 | 1,000 | 0,050 | 2,756 | 150,000 | 0,620 |
| | Máximo | 1 049 564,166 | 0,030 | 1,000 | 0,320 | 84,871 | 150,000 | 122,214 |
| | Varianza | 31 546 015 567,901 | 0,000 | 0,000 | 0,018 | 930,721 | 0,000 | 1988,414 |
| | Desviación específica | 177 611,980 | 0,000 | 0,000 | 0,135 | 30,508 | 0,000 | 44,592 |
| <i>Campo</i> | Suma | 798 861,912 | | | | | | |
| | Media | 25 769,739 | 0,460 | 0,797 | 0,320 | 63,049 | 150,000 | 1131,737 |
| | Mínimo | 0,013 | 0,460 | 0,300 | 0,320 | 3,579 | 150,000 | 79,027 |
| | Máximo | 167 097,482 | 0,460 | 1,000 | 0,320 | 84,871 | 150,000 | 1873,943 |
| | Varianza | 1 811 803 608,971 | 0,000 | 0,101 | 0,000 | 471,311 | 0,000 | 429 941,643 |
| | Desviación específica | 42 565,286 | 0,000 | 0,318 | 0,000 | 21,710 | 0,000 | 655,699 |
| <i>Campo abandonado</i> | Suma | 287 097,419 | | | | | | |
| | Media | 8444,042 | 0,200 | 0,876 | 0,288 | 63,483 | 150,000 | 449,690 |
| | Mínimo | 0,001 | 0,200 | 0,300 | 0,050 | 3,579 | 150,000 | 34,360 |
| | Máximo | 47 372,404 | 0,200 | 1,000 | 0,320 | 84,871 | 150,000 | 814,758 |
| | Varianza | 102 696 266,278 | 0,000 | 0,071 | 0,008 | 560,776 | 0,000 | 78 926,617 |
| | Desviación específica | 10 133,917 | 0,000 | 0,267 | 0,087 | 23,681 | 0,000 | 280,939 |

Tabla IV. (continuación)

| | | Área (m ²) | C | P | K | LS | R | A (tm/ha/año) |
|-------------------------------|-----------------------|------------------------|-------|-------|-------|----------|---------|------------------|
| <i>Canchal</i> | Suma | 38 486,309 | | | | | | |
| | Media | 5498,044 | 0,450 | 1,000 | 0,127 | 74,164 | 150,000 | 655,574 |
| | Mínimo | 732,406 | 0,450 | 1,000 | 0,050 | 65,565 | 150,000 | 221,282 |
| | Máximo | 13 318,507 | 0,450 | 1,000 | 0,320 | 80,520 | 150,000 | 1681,129 |
| | Varianza | 13 678 745,401 | 0,000 | 0,000 | 0,015 | 36,187 | 0,000 | 421 056,102 |
| | Desviación específica | 3698,479 | 0,000 | 0,000 | 0,122 | 6,016 | 0,000 | 648,888 |
| <i>Marga</i> | Suma | 1 575 460,985 | | | | | | |
| | Media | 10 503,073 | 0,450 | 0,986 | 0,307 | 58,662 | 150,000 | 1226,129 |
| | Mínimo | 0,119 | 0,450 | 0,300 | 0,050 | 3,481 | 150,000 | 29,105 |
| | Máximo | 136 632,944 | 0,450 | 1,000 | 0,320 | 84,871 | 150,000 | 1833,205 |
| | Varianza | 361 104 514,161 | 0,000 | 0,010 | 0,003 | 796,366 | 0,000 | 404 969,223 |
| | Desviación específica | 19 002,750 | 0,000 | 0,098 | 0,057 | 28,220 | 0,000 | 636,372 |
| <i>Perturbación antrópica</i> | Suma | 391 660,585 | | | | | | |
| | Mínimo | 0,041 | 0,000 | 1,000 | 0,050 | 3,481 | 150,000 | 0,000 |
| | Máximo | 117 002,207 | 0,000 | 1,000 | 0,320 | 84,871 | 150,000 | 0,000 |
| | Varianza | 447 655 090,882 | 0,000 | 0,000 | 0,009 | 671,888 | 0,000 | 0,000 |
| | Desviación específica | 21 157,861 | 0,000 | 0,000 | 0,094 | 25,921 | 0,000 | 0,000 |
| <i>Roca</i> | Suma | 156 378,931 | | | | | | |
| | Media | 12 029,149 | 0,450 | 1,000 | 0,278 | 72,132 | 150,000 | 1333,966 |
| | Mínimo | 1571,848 | 0,450 | 1,000 | 0,050 | 62,227 | 150,000 | 269,720 |
| | Máximo | 60 058,572 | 0,450 | 1,000 | 0,320 | 79,917 | 150,000 | 1681,129 |
| | Varianza | 213 506 336,217 | 0,000 | 0,000 | 0,009 | 44,446 | 0,000 | 221 525,890 |
| | Desviación específica | 14 611,856 | 0,000 | 0,000 | 0,097 | 6,667 | 0,000 | 470,665 |
| <i>Urbano</i> | Suma | 187 532,966 | | | | | | |
| | Media | 8930,141 | 0,000 | 1,000 | 0,269 | 31,730 | 150,000 | 0,000 |
| | Mínimo | 126,882 | 0,000 | 1,000 | 0,050 | 2,756 | 150,000 | 0,000 |
| | Máximo | 49 706,475 | 0,000 | 1,000 | 0,320 | 75,297 | 150,000 | 0,000 |
| | Varianza | 266 238 525,748 | 0,000 | 0,000 | 0,011 | 1110,548 | 0,000 | 0,000 |
| | Desviación específica | 16 316,817 | 0,000 | 0,000 | 0,106 | 33,325 | 0,000 | 0,000 |

embalse. Es evidente que no todo este material se quedará en su vaso, dado que se hacen purgas de fangos durante el otoño. Sin embargo, existe una reducción de volumen embalsable. La Confederación Hidrográfica del Ebro ofrece un valor de 2,7 hm³, mientras que el ya mencionado trabajo de GRASA (1997) registra un volumen menor.

Los resultados del análisis, agrupados según el tipo de suelo, se muestran en la tabla v.

Los datos obtenidos ofrecen una interpretación del uso del territorio realizado por los distintos gestores que han intervenido en esta zona. La figura 5 presenta la distribución espacial y los usos del suelo en la cuenca del embalse de Arguis.

Tabla v. Resultados de la RUSLE, agrupados según los tipos de suelo, en la cuenca de Arguis.

| | | Área (m ²) | C | P | K | LS | R | A (tm/ha/año) |
|-----------------|-----------------------|------------------------|-------|-------|-------|---------|---------|------------------|
| <i>Marga</i> | Suma | 628 027,088 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | Media | 157 006,772 | 0,130 | 1,000 | 0,280 | 70,781 | 150,000 | 386,464 |
| | Mínimo | 42 901,711 | 0,130 | 1,000 | 0,280 | 62,227 | 150,000 | 339,761 |
| | Máximo | 229 046,078 | 0,130 | 1,000 | 0,280 | 75,297 | 150,000 | 411,121 |
| | Varianza | 5 079 450 385,672 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 25,816 | 0,000 | 769,624 |
| | Desviación específica | 71 270,263 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 5,081 | 0,000 | 27,742 |
| <i>Caliza</i> | Suma | 5 539 792,572 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | Media | 60 215,137 | 0,112 | 1,000 | 0,050 | 52,744 | 150,000 | 44,735 |
| | Mínimo | 0,897 | 0,000 | 1,000 | 0,050 | 2,756 | 150,000 | 0,000 |
| | Máximo | 1 049 564,166 | 0,450 | 1,000 | 0,050 | 84,871 | 150,000 | 271,755 |
| | Varianza | 25 887 550 118,028 | 0,023 | 0,000 | 0,000 | 948,577 | 0,000 | 5053,706 |
| | Desviación específica | 160 896,085 | 0,152 | 0,000 | 0,000 | 30,799 | 0,000 | 71,089 |
| <i>Arenisca</i> | Suma | 10 158 224,807 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| | Media | 21 476,162 | 0,234 | 0,969 | 0,320 | 59,250 | 150,000 | 659,340 |
| | Mínimo | 0,001 | 0,000 | 0,300 | 0,320 | 2,756 | 150,000 | 0,000 |
| | Máximo | 799 281,071 | 0,460 | 1,000 | 0,320 | 84,871 | 150,000 | 1873,943 |
| | Varianza | 4 614 993 634,614 | 0,034 | 0,021 | 0,000 | 737,592 | 0,000 | 421 141,898 |
| | Desviación específica | 67 933,744 | 0,184 | 0,144 | 0,000 | 27,159 | 0,000 | 648,954 |

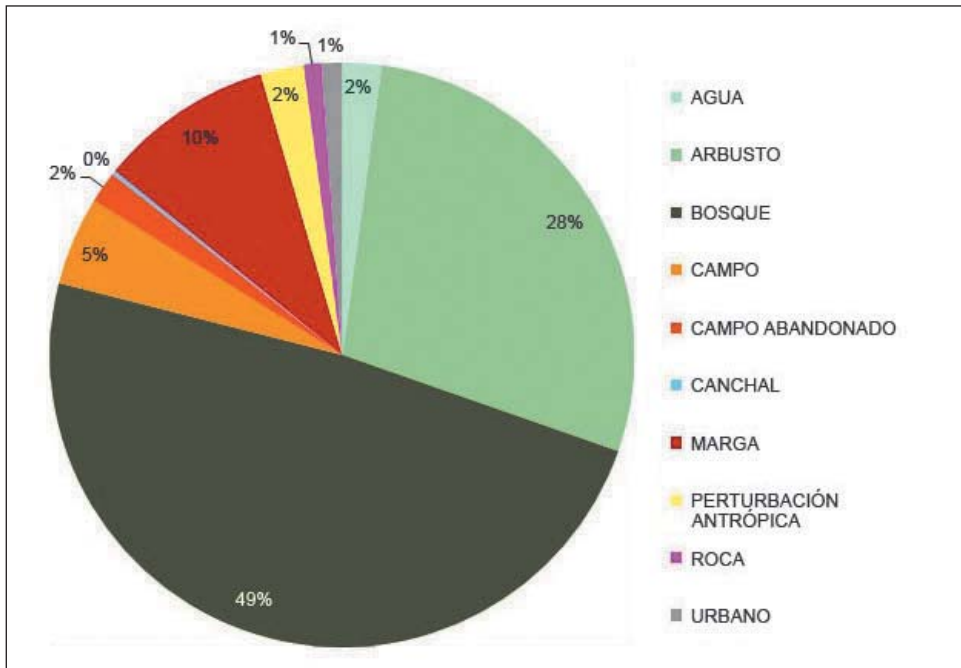


Fig. 5. Usos del suelo en la cuenca del embalse de Arguis.

En la actualidad el uso mayoritario es el forestal, y en segundo lugar está el arbustivo. Estos dos tipos suman el 77% de la superficie estudiada, frente a un escaso 5% de la superficie empleada para cultivos. La superficie cultivada, apreciable en las fotografías aéreas de 1956, se ha reducido al mínimo. De hecho, solo hay un habitante del municipio de Arguis afiliado a la Seguridad Social en actividad agrícola a fecha de 2013 (IAEST, 2014). Este escaso porcentaje de uso también podría ser consecuencia de la escasa calidad de los suelos y los problemas de erosión en las parcelas. Esto se apoya en el dato de que un 2% de la superficie total son campos abandonados, que se distribuyen a los pies de las laderas, o bien antiguos cultivos a media ladera, dispuestos en terrazas.

Destaca la gran representatividad en superficie que presentan las margas, con cerca de un 10% de la superficie. En la cartografía generada se observa que estas se distribuyen mayoritariamente a los pies de ladera, entre las zonas arbustivas e intercaladas en el fondo de valle, así como entre las zonas en cultivo.

Como se puede observar en la figura 6, los datos de erosionabilidad de los terrenos, obtenidos del modelo y agrupados por usos del suelo, indican que las zonas más erosionables son los campos, las margas y los afloramientos rocosos. Por el contrario, bosques y arbustos presentan los valores mínimos. Al combinar estos resultados con los porcentajes de usos del suelo, como se muestra en la figura 5, se observa que las zonas más exportadoras son las margas desnudas y los campos, pues estos dos usos del suelo presentan un alto grado de erosionabilidad y una gran representatividad en la zona de estudio.

Las margas, bien desnudas y con *badlands*, bien cultivadas, constituyen la litología más fácilmente erosionable, con independencia de los otros factores que les pueden afectar. Por otro lado, las zonas con suelos de arenisca presentan una mayor variabilidad. Esto se debe a que en los suelos sobre arenisca los factores determinantes están relacionados con la cobertura vegetal, con las medidas de control de la erosión y con el relieve (factores C, P y LS, respectivamente), y no exclusivamente con el tipo de suelo.

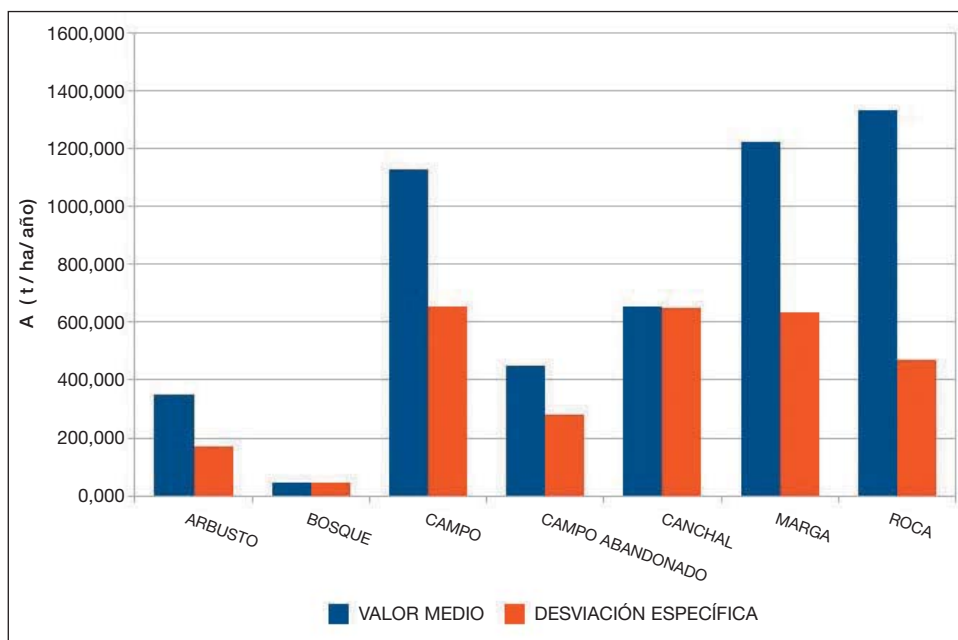


Fig. 6. Valores estimados de A según los usos del suelo para la cuenca del embalse de Arguis.

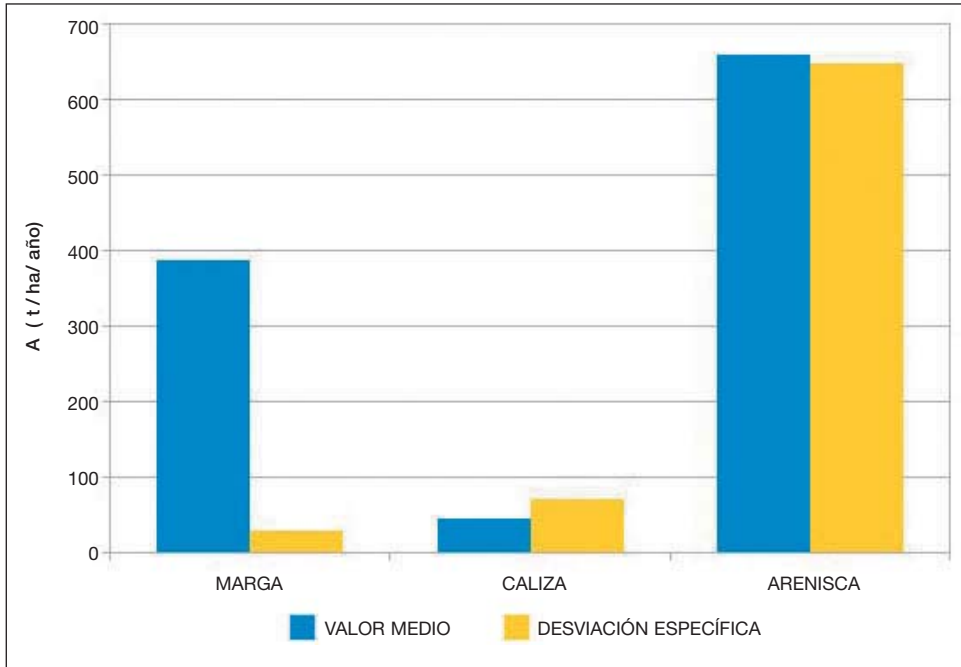


Fig. 7. Valores de A según los tipos de suelo para la cuenca del embalse de Arguis.

Por suelos, según el presente estudio, los más erosionables son los situados sobre areniscas, como muestra la figura 7. Así pues, en principio, es en las zonas con suelos sobre margas y en las zonas con suelo de arenisca y uso agrario donde se deberían centrar las posibles actuaciones y medidas de gestión a fin de reducir su erosionabilidad y, con ello, minimizar el aporte de materiales que colmata el embalse.

La combinación de los resultados de la RUSLE se presenta cartográficamente en la figura 8, donde se observa su distribución y las zonas definidas como sensibles (uso agrario o de marga, situadas encima de arenisca), localizadas en los pies de ladera y en el fondo de valle, orientadas hacia el sur. Esta distribución se ajusta a las zonas de mayor exposición solar, aprovechadas tradicionalmente para el uso agrario por su mayor productividad. Estas zonas son más fácilmente mecanizables para su explotación por su proximidad al pueblo, con buenos accesos y desniveles suaves. Sin embargo, se encuentran prácticamente abandonadas en su totalidad. Puede ser

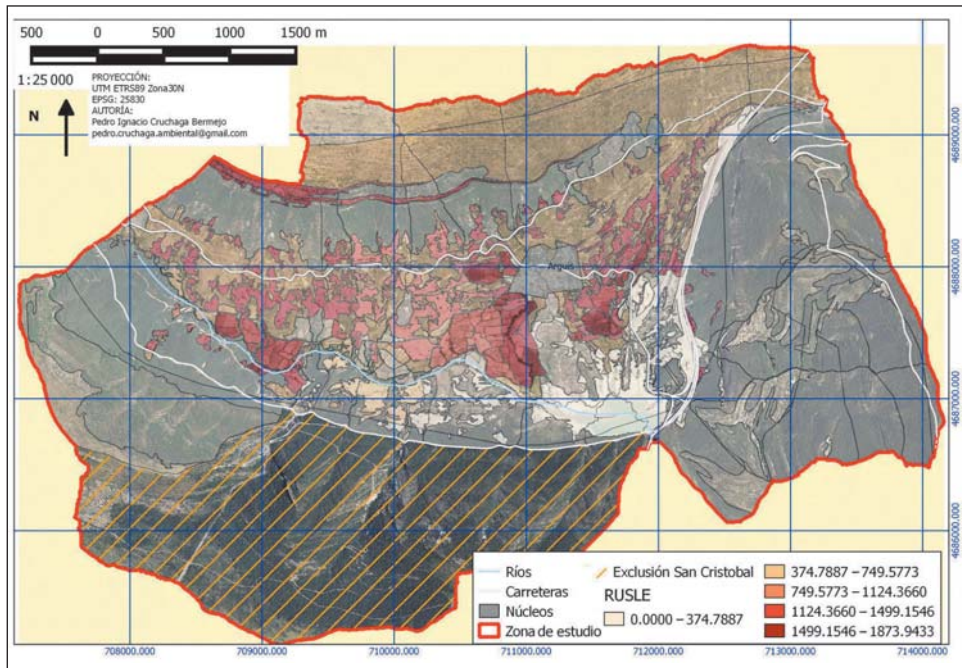


Fig. 8. Resultados del modelo RUSLE en la zona de estudio.

una cuestión de sequedad edáfica. Por el contrario, las zonas repobladas o con bosque natural presentan los menores valores de erosión.

A partir del análisis realizado, se observa que las áreas de alto riesgo de erosión carecen, además, de medidas de gestión para el control de la erosión. Por ello, sería recomendable acometer una mejora en la cubierta vegetal mediante técnicas de restauración ambiental e implementar medidas de control de la erosión.

CONCLUSIONES

La cuenca del embalse de Arguis es una interesante zona de estudio para evaluar la aplicación de modelos de erosión. Es necesario resaltar la ausencia de valores reales para las variables R (efecto de la pluviometría) y K (factores del suelo).

Este artículo es un trabajo preliminar y sus resultados son meramente estimativos. Las zonas con mayor índice de erosión en la cuenca de estudio

se corresponden con las margas y cultivos situados sobre suelo de tipo arenisca. Estas zonas se distribuyen en el fondo de valle y a los pies de ladera, zonas con una pendiente moderada. Las zonas de bosque sobre calizas son las áreas menos sensibles a la erosión.

Es evidente que sería necesario disponer de estudios climatológicos y edafológicos adecuados. Un estudio específico interesante sería la evaluación de la velocidad de alteración de la marga del propio vaso del embalse. Hay que señalar, también, la carencia de estudios de validación que permitan corroborar los valores obtenidos.

Por último, sería recomendable mejorar la cubierta vegetal y controlar la erosión.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la ayuda de José Antonio Cuchí, profesor de la Escuela Politécnica Superior de Huesca. Y, por otro lado, la colaboración de diversos amigos y familiares en la corrección de este texto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTEZANA, J. C. (2001). *Calibración de los factores de erosión utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo revisado RUSLE en sistemas de producción agrícola de la cuenca Taquiña*. Tesis de maestría profesional en Levantamiento de recursos hídricos (manejo y conservación de cuencas). Centro de Levantamientos Aeroespaciales y Aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos Naturales (CLAS).
- GIMENO, Y., y J. A. CUCHÍ (1996). El karst de la cuenca alta del río Isuela (Prepirineo, Huesca). En *Actas del Congreso sobre Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*: 145-156. Vitoria.
- GRASA, R. (1997). *Estudio hidrológico de la cuenca del embalse de Arguis*. Proyecto fin de carrera de ingeniero técnico en Explotaciones agropecuarias. EPS. Huesca.
- IAEST (2014). Ficha territorial por municipios: Arguis. Disponible en <http://www.aragon.es/DepartamentosOrganismosPublicos/Organismos/InstitutoAragonesEstadistica/AreasGenericas/ci.EstadisticaLocal.detalleDepartamento> [consulta: 21/4/2014].
- ICONA (1988). *Agresividad de la lluvia en España: valores del factor R de la ecuación universal de pérdida de suelos*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- PUIGDEFÁBREGAS, C. (1975). *La sedimentación molásica en la cuenca de Jaca*. IEP. Jaca. 118 pp.