



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica
Superior de Jaén

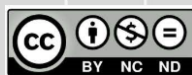
ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA DE SUELO VEGETAL MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (CAMPIÑA SUR DE JAÉN)

Autor: Juan Antonio Alarcón Torres

Grado: Ingeniería Geomática y Topográfica

Fecha: XX/06/2024

Licencia CC





Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Informática

Don José Luis Mesa Mingorance y Don Antonio Garrido Almonacid, tutores del Proyecto Fin de Carrera titulado: Análisis de la pérdida de suelo vegetal mediante Sistemas de Información Geográfica. (Campaña Sur de Jaén), que presenta Juan Antonio Alarcón Torres, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Junio de 2024

El alumno:

Los tutores:

JUAN ANTONIO ALARCÓN TORRES

JOSÉ LUIS MESA MINGORANCE

ANTONIO GARRIDO ALMONACID

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1. El suelo y la erosión.....	4
1.2. Escorrentía superficial y precipitación.....	6
1.3. Erosión y olivar en la provincia de Jaén.....	7
2. OBJETIVOS	11
3. ANTECEDENTES	11
3.1. Modelos para la estimación de la pérdida de suelo y la erosión.....	11
3.1.1. Modelos empíricos.....	12
3.1.2. Modelos conceptuales.....	14
3.1.3. Modelos de base física.....	15
3.2. La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo USLE.....	16
3.3. Estudio de la erosión mediante Sistemas de Información Geográfica.....	22
4. ZONA DE ESTUDIO	23
4.1. Localización.....	23
4.2. Superficie y demografía.....	25
4.3. Geología.....	25
4.4. Edafología.....	26
4.5. Climatología.....	26
4.6. Características agrarias y de la cobertura superficial de la comarca.....	27
5. METODOLOGÍA	27
5.1. Software.....	27
5.2. Materiales utilizados.....	28
5.3. Sistema de Referencia.....	29
5.4. Cálculo de los factores USLE.....	29
5.4.1. Factor R. Erosividad de la Lluvia.....	31
5.4.2. Factor K: Erosionabilidad del suelo.....	38
5.4.3. Factor LS: Factor topográfico.....	43
5.4.4. Factor C: Cubierta del suelo.....	51
5.4.5. Factor P: Prácticas de manejo o conservación.....	54
6. RESULTADOS	56

6.1.	Erosión potencial.	56
6.2.	Erosión hídrica real anual con USLE.	57
6.2.1.	Pérdidas de suelo USLE con MDT25.	58
6.2.2.	Pérdidas de suelo USLE con MDT05.	60
6.2.3.	Pérdidas de suelo USLE con ASTER Global DEM.	62
6.2.4.	Pérdidas de suelo USLE para EuroDEM.	64
7.	ANÁLISIS	66
7.1.	Análisis general de la pérdida de suelo en la Campiña Sur.	66
7.2.	Análisis del uso de los distintos MDE en los cálculos	68
8.	CONCLUSIONES	76
9.	Bibliografía.....	80

RESUMEN

La erosión y degradación del suelo son desafíos a los que la civilización se ha enfrentado desde tiempos inmemoriales. La pérdida del suelo mina gradualmente la fertilidad del mismo y la falta de vegetación permite que las precipitaciones generen escorrentías, las cuales contribuyen a la formación de una capa superficial impermeable, inhibiendo la infiltración de agua y limitando la capacidad del suelo para mantener nutrientes.

Los suelos de la provincia de Jaén están generalmente muy afectados por este fenómeno, debido sobre todo a la climatología, el relieve, la composición geológica, entre otras características intrínsecas.

El presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) se centra en integrar en un Sistema de Información Geográfica toda la información necesaria para obtener modelos empíricos de pérdida de suelo debido a la erosión hídrica. Concretamente se utiliza la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE o Universal Soil Loss Equation en inglés) para calcular las pérdidas de suelo localizadas en la comarca agraria de la Campiña sur, dentro de la provincia de Jaén. También se realizará un análisis de la influencia del uso de diferentes Modelos Digitales de Elevaciones con distintos niveles de resolución para obtener los modelos de pérdida de suelo resultantes.

Palabras clave: Erosión, SIG, Sistemas de Información Geográfica, USLE, pérdida de suelo.

ABSTRACT

Soil erosion and degradation are challenges that civilization has faced since time immemorial. Soil loss gradually undermines its fertility and the lack of vegetation allows rainfall to generate runoff, which contributes to the formation of an almost impermeable surface layer, inhibiting water infiltration and limiting the soil's capacity to hold nutrients.

The soils of the province of Jaén are generally quite affected by this phenomenon, mainly due to climatology, topography, geological composition, among other inherent characteristics.

The main focus of this Final Project is to use a Geographic Information System to integrate all the necessary data in order to obtain empirical models of soil loss due to water erosion. Specifically, the Universal Soil Loss Equation (USLE) is used to calculate soil losses located in the región of Campiña Sur, within the province of Jaén. An analysis of the influence of the use of different Digital Elevation Models with different levels of resolution to obtain the soil loss models will also be carried out.

Key words: Erosion, GIS, Geographic Information Systems, USLE, soil loss.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El suelo y la erosión.

El concepto de suelo puede definirse como la capa más externa de la corteza terrestre, la cual se compone de una combinación de minerales, líquidos, materia orgánica, gases y organismos que en conjunto sustentan la vida de las plantas y otros seres vivos que viven en esa superficie. Los suelos se componen de varias capas o fases: la capa base se denomina matriz, es sólida y la forman minerales y materia orgánica. También está compuesto por una capa de tipo poroso que contiene agua, la denominada solución del suelo y gases (atmósfera del suelo). Esto hace que el suelo sea un sistema de tres estados: gaseoso, sólido y líquido. Son diversos los agentes que forman el suelo al interactuar a lo largo del tiempo: la topografía (pendiente, elevación y orientación del terreno), los factores climatológicos, los organismos y los materiales que dieron origen al suelo (minerales). El suelo es un elemento que está en continuo (aunque lento) desarrollo mediante múltiples procesos biológicos, físicos, geológicos y químicos, en los cuales se incluye la degradación asociada a la erosión. Científicamente se trata de un ecosistema, debido a su tremenda complejidad e interconexión con el entorno. Es importante ya que además de ser el principal sustrato para la vida en la tierra, también es un medio para la filtración y purificación del agua, almacenaje de nutrientes, disolución de desechos nocivos y forma parte del ciclo del carbono y otros elementos químicos a nivel global.

La erosión es el proceso mediante el cual los suelos y las rocas de la superficie de la Tierra se van desgastando debido a la acción de múltiples fenómenos de tipo meteorológico, hidrológico, antropogénico, entre otros, y el material retirado se va trasladando hacia otras partes de la corteza de la Tierra, donde se deposita. Hay diversos tipos de erosión, tales como erosión eólica, gravitatoria e hídrica. Este Trabajo se centra en algunos aspectos particulares de la erosión hídrica. Aunque la erosión es un proceso que ocurre de forma natural, la actividad humana ha aumentado de 10 a 40 veces el ritmo al que la pérdida de suelo se produce a nivel global (Dotterweich, 2013). Según un informe de las Naciones Unidas de 2019, cada año se pierden unos 24000 millones de toneladas de suelo vegetal fértil a nivel mundial, y

estas cifras se incrementan año tras año (Dickinson, 2019). Las prácticas de labranza intensivas, la construcción de carreteras, la deforestación, la lluvia ácida, la expansión urbana y el cambio climático generado por el hombre son algunas de las actividades humanas que aceleran la pérdida de suelo vegetal.

Los principales factores que intervienen en la erosión hídrica de los suelos son los siguientes:

- Topografía: La longitud y la inclinación de las pendientes del terreno son especialmente relevantes en este fenómeno. En general, cuanto mayor sean la longitud y la pendiente mayor será la erosión. Además, el caudal de escorrentía se incrementa cuanto mayor sea la distancia a la cumbre.
- Las precipitaciones: En la erosión hídrica, el impacto y las salpicaduras de las gotas de lluvia arrancan partículas de la superficie, y los flujos laminares superficiales transportan estas partículas desprendidas.
- Los suelos: Los tipos de materiales que lo componen, la profundidad, permeabilidad, textura, cantidad de materia orgánica, rugosidad, pedregosidad, estructura, prácticas de cultivo, etcétera, determinan la erosionabilidad del suelo.
- La cubierta vegetal: Ayuda a proteger el suelo y disminuye los efectos de la erosión. También disminuye los efectos de la escorrentía y ayuda a sedimentar las partículas transportadas.
- Los usos del suelo: Cada uno de los usos que se le da al suelo lo condiciona para aumentar o disminuir los efectos de la erosión. El tipo de cultivo o las prácticas de manejo crearán una erosión mayor o menor.

Se puede decir que el suelo es un recurso natural que tiene unos procesos de formación y regeneración muy lentos, y un ritmo de degradación muy rápido (Almorox Alonso, et al., 2010). Se considera un recurso no renovable porque regeneración es extremadamente lenta, no reversible en el curso de una vida humana. Tarda cientos, e incluso miles de años en regenerarse.

1.2. Escorrentía superficial y precipitación.

La escorrentía es un proceso físico que describe el flujo del agua procedente de precipitaciones sobre la superficie terrestre, y es uno de los elementos principales del ciclo del agua. El agua discurre por las redes de drenaje hasta llegar a la red fluvial. La escorrentía y las precipitaciones inducen cuatro tipos de erosión del suelo: erosión por cárcavas, erosión por regueros, erosión laminar y erosión pluvial (ordenadas de mayor a menor poder erosivo):

- Erosión por cárcavas: Es la más severa. Se produce cuando el agua procedente de la escorrentía se acumula y fluye de forma rápida y repentina por canales estrechos que se forman durante o después de lluvias muy intensas o nieve en proceso de fundición. Estos caudales de agua desprenden el suelo y se forman zanjas de profundidad considerable. También se producen cárcavas en zonas de pastoreo o de labranza intensa y continua (como en muchos olivares de la provincia de Jaén): la pérdida de la cubierta vegetal conlleva a la compactación del suelo y como el sustrato está expuesto, pierde su capacidad de absorber el exceso de agua, y se vuelve susceptible a la erosión.
- Erosión por regueros: Se trata de la formación de pequeños surcos de flujo superficiales, o arroyos, que mueven partículas sueltas y también transportan sedimentos en la erosión de laderas. Estos canales de flujo suelen tener una profundidad de hasta unos 30 centímetros. Suelen producirse en colinas y laderas con pendiente muy elevada. Esto significa que la erosión por regueros presenta unas cualidades de física hidráulica muy diferentes al agua que fluye, por ejemplo, a través de ríos o canales (Nearing, et al., 1997). Esta particularidad da a este tipo de erosión su peligrosidad.
- Erosión laminar: Se produce por el transporte de partículas sueltas del suelo debido a flujos superficiales. Estas corrientes superficiales se

generan cuando el ritmo al que se producen las precipitaciones es considerablemente mayor que la velocidad con la que el agua puede infiltrarse en el suelo. Entonces el suelo se satura y se produce escorrentía superficial, la cual puede llevar cierta energía, esto induce a la erosión.

- Erosión pluvial: Es la menos severa de estas cuatro, pero aun así es especialmente relevante para este Trabajo. Se produce cuando el impacto de las gotas de lluvia o precipitaciones generan minúsculos cráteres en el suelo, lo cual hace que las partículas que forman la superficie del suelo salgan propulsadas a cierta distancia vertical y horizontal.

1.3. Erosión y olivar en la provincia de Jaén.

La erosión, degradación y pérdida del suelo vegetal es un problema de especial gravedad y relevancia en la provincia de Jaén, donde se encuentra la zona de estudio de este Trabajo. El cultivo del olivar es la principal actividad económica de la provincia. Según el informe de la Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE) con su análisis de las plantaciones de olivar en España en 2019 (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España, 2019), el cultivo de olivar ocupa un 49.93% de la superficie total de la provincia de Jaén.



8

En los últimos años, las temporadas de sequía, los veranos extremadamente calurosos y secos, y las precipitaciones cortas pero muy intensas han contribuido a empeorar los efectos de la erosión hídrica de la provincia.

Algunas de las actividades causantes de la erosión en la provincia de Jaén (y también en la zona de la cuenca mediterránea) se engloban dentro del conjunto de técnicas dedicadas a la explotación agrícola. El empleo de fertilizantes, herbicidas y otras sustancias químicas en los cultivos tiene la capacidad de causar deterioros a largo plazo en la estructura y en la composición de los suelos (Costa Comelles & Manzano, 1992). Pero son las prácticas de laboreo las que causan las pérdidas de suelo vegetal más graves, debido a que estas alteran las partículas agregadas que componen los suelos, haciéndolos más susceptibles a los impactos de las precipitaciones y por consiguiente facilitando la erosión.



Figura 2: Enormes cárcavas con desprendimiento de suelo fértil en un olivar cercano a Jaén capital. Fuente: Fotografía propia. 2018

Las técnicas de labranza y laboreo continuas también disminuyen y hacen desaparecer la cubierta vegetal al alterar la formación de raíces de las plantas y de esta forma decrece la infiltración de agua en el terreno (De Alba, et al., 2011).

Numerosas fincas de olivar se localizan en zonas con elevadas pendientes, y como se ha comentado anteriormente, este es uno de los factores que contribuyen a la erosión. Si estos terrenos en pendiente no se manejan de manera adecuada, ya sea manteniendo algo de cubierta vegetal, o cultivando a lo largo de la línea de contorno (curva de nivel) las pérdidas de suelo por erosión hídrica pueden llegar a ser muy graves. Si no se utilizan técnicas de manejo sostenibles como el esparcimiento de restos de poda, cultivos en barbecho o fajas, o el mantenimiento de la cubierta vegetal, y se siguen usando técnicas de labranza intensiva convencionales que dejan el suelo desnudo, el contenido de carbono orgánico en los suelos disminuye considerablemente, y en combinación con las condiciones climáticas de los últimos años, caracterizadas por largas temporadas de temperaturas extremadamente altas y sequía, se fomenta la mineralización de los suelos. Esto hace que la generación de nuevos suelos sea muy lenta (García-Ruiz, et al., 2013). Estos factores, uso de herbicidas y eliminación de la cubierta vegetal debido al laboreo intenso, impiden la regeneración natural del suelo, creando una capa dura e impermeable en la superficie que dificulta la infiltración hídrica y fomentan el fenómeno de la escorrentía (Gómez, 2015). Uno de los efectos finales más graves causados por la erosión hídrica es la aparición de cárcavas de gran tamaño en el terreno (Calero, et al., 2019), que en determinados casos pueden llegar a destruir los cultivos de forma permanente, con las consecuentes pérdidas económicas para la provincia y el negativo impacto ambiental en la zona.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente Trabajo de Fin de Grado es recopilar e integrar en un Sistema de Información Geográfica toda la información necesaria para estimar la pérdida de suelo en la superficie de la comarca de la Campiña Sur de Jaén, utilizando para ello el modelo empírico de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo o USLE (por sus siglas en inglés Universal Soil Loss Equation). Estas pérdidas de suelo se producen principalmente por erosión hídrica.

Además, se realizará un análisis del uso de distintos Modelos Digitales de Elevaciones con distintos niveles de detalles, utilizados para calcular las pérdidas de suelo con el modelo empírico elegido.

Posteriormente se realizará un estudio y valoración de los distintos resultados.

3. ANTECEDENTES

3.1. Modelos para la estimación de la pérdida de suelo y la erosión.

Han sido numerosos los modelos de simulación numérica por ordenador que han aparecido en los últimos años para llevar a cabo investigaciones aplicadas sobre la erosión, los cuales han aportado avances significativos. Dichos modelos posibilitan la evaluación espacial de los procesos erosivos, el análisis de su evolución temporal y la simulación de los posibles efectos resultantes de cambios en las variables paisajísticas y climáticas, como, por ejemplo, los usos de los suelos (Alatorre & Beguerría, 2009). Múltiples organismos gubernamentales han mostrado interés por el desarrollo y aplicación de los modelos de erosión, por ejemplo, en la Unión europea se han utilizado los modelos WATEM/SEDEM (Van Oost, et al., 2000), EUROSEM (Morgan, et al., 1998), PESERA (Kirkby, et al., 2000) o RHINE-FLOW (Asselman, et al., 2003) y en los Estados Unidos, el Departamento de Agricultura (USDA) y la Agencia de Protección Ambiental (USEPA) han trabajado con los modelos USLE y RUSLE, entre otros. Aunque ha habido avances significativos en la creación de

herramientas de modelización, la diversidad de enfoques propuestos supone un desafío para la aplicación de los modelos de erosión. Son múltiples las diferencias existentes entre los diversos modelos que dificultan su aplicación general, ya que algunos modelos se centran en procesos físicos, otros en aspectos matemáticos, otros en la representación temporal y espacial, y cada uno tiene unos requisitos específicos de información y tiempo de computación, etcétera. Además, varían en su audiencia objetivo: algunos son para expertos, mientras que otros son más accesibles para el público en general (Alatorre & Beguerría, 2009).

Según Merrit et al., (2003), los modelos de erosión se pueden clasificar en tres categorías en función de la forma matemática que tome la descripción de los procesos físicos que se simulan: Empíricos, conceptuales y de base física (Merrit, et al., 2003). Se describen a continuación:

3.1.1. Modelos empíricos.

En general, se trata de los modelos más sencillos. Se basan en el análisis estadístico de un conjunto de observaciones. La formulación de los modelos empíricos se construye empleando procedimientos de inferencia estadística, principalmente basados en regresión. Estos modelos se apoyan en datos cuantitativos recopilados de instalaciones experimentales y monitoreo en campo. Su enfoque principal es la predicción, y generalmente proporcionan una visión métrica y estática del proceso, es decir, no consideran sus aspectos dinámicos, sino que se orientan a la predicción de valores promedio a medio y largo plazo.

Los modelos empíricos se caracterizan por emplear ecuaciones paramétricas que involucran sumas y multiplicaciones de factores, las cuales demuestran la simplicidad matemática de los modelos, basándose generalmente en técnicas de regresión. Aunque la formulación inicial de un modelo empírico requiere una gran cantidad de datos, su aplicación posterior suele necesitar menos información y recursos computacionales en comparación con los modelos conceptuales y físicos. Por estas razones, los modelos empíricos son los más ampliamente utilizados en la práctica, especialmente como herramientas de planificación.

Los estudios de los modelos empíricos que tratan de relacionar las pérdidas de suelo con diversos factores como las precipitaciones o las prácticas de manejo se remontan a los años 30 del siglo XX. La mayoría de los modelos de erosión empíricos se basan en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Universal Soil Loss Equation, USLE) (Wischmeier & Smith, 1978). USLE contiene seis factores que son: Erosividad de la lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), factor topográfico (L y S), factor de cubierta del suelo (C) y factor de medidas de protección (P). Se usa para estimar la pérdida de suelo promedio ocasionada en un año por la erosión hídrica. Su fórmula multiplicativa es: $A = R * K * LS * C * P$. Para su formulación original se emplearon datos procedentes de parcelas de erosión pertenecientes al Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USDA). USLE es la ecuación elegida para llevar a cabo el presente trabajo y se describirá de manera más detallada más adelante.

Aunque los modelos empíricos son los más utilizados, estos no están exentos de crítica. Uno de los puntos negativos de los modelos empíricos es que su extrapolación a otras áreas de estudio o condiciones diferentes se hace difícil de justificar porque se basan casi exclusivamente en relaciones estadísticas originadas a partir de una base de datos concreta. La aplicación de los estudios empíricos a zonas o casos de estudio con condiciones distintas necesita una revisión de los mismos basada en datos empíricos característicos de esa zona, y es por esto que la mayor parte de los artículos y trabajos especializados en modelos empíricos se centran en su adaptación a determinadas áreas geográficas. Otro punto negativo es que no tienen en cuenta los procesos no lineales dentro del sistema. Aun así, aunque estos puntos son válidos, la no disponibilidad de una completa y detallada base de datos dificulta en la mayoría de los casos el uso de modelos más complejos.

Otros modelos de erosión empíricos incluyen modificaciones de la USLE, como la MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) (Williams, 1975), RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) (Renard, et al., 1991), RUSLE-3D (Mitasova, et al., 1996). Como su nombre indica, la RUSLE es una revisión y actualización de USLE. Los cambios más relevantes en comparación a USLE están en los valores obtenidos para la erosión influenciados por la cubierta vegetal y mejores, aunque más complejos, cálculos para el factor topográfico LS. RUSLE tiene más en cuenta la capacidad de

los materiales de la superficie para reducir la erosión. Mientras USLE asume que la escorrentía es uniforme sobre toda la cuenca de captación, RUSLE tiene más en cuenta que parte de la escorrentía se canaliza en regueros y cárcavas. (FAO, 2021)

3.1.2. Modelos conceptuales.

Están fundamentados en la representación del sistema de erosión como una serie interna de almacenamientos entre los que se establecen relaciones matemáticas simplificadas. Describir los procesos físicos principales que intervienen en la erosión es la meta de estos modelos. Como su nombre indica, se fundamentan en una conceptualización de los mecanismos subyacentes de arranque y transporte de partículas, y representan el sistema de erosión como una serie de almacenamientos temporales de materia que funcionan interconectados (Alatorre & Beguerría, 2009). Las relaciones de transferencia de masa entre estos almacenamientos se expresan mediante ecuaciones matemáticas genéricas, como las exponenciales, lineales o cuadráticas. Estas ecuaciones están controladas por parámetros que se calibran utilizando datos observados, como la concentración de sedimento o la escorrentía. En resumen, los modelos conceptuales se encuentran a medio camino entre los puramente empíricos y los de base física. Estos modelos no detallan las particularidades que ocurren en las interacciones complejas dentro del proceso de erosión.

Un ejemplo de modelo conceptual es el MMF o Morgan-Morgan-Finney Model (Morgan, et al., 1984). Se trata de un modelo agregado en el espacio (trabaja con la parcela como si fuese una unidad) y en el tiempo (estima tasas de erosión anuales). Realiza una simulación de la erosión provocada por el impacto de las gotas de lluvia y a la tensión de cizalla de la escorrentía superficial. La capacidad de transporte y la erosión causada por el flujo superficial van en función de la pendiente y del caudal.

Otro ejemplo es el LASCAM (Large Scale Catchment Model) (Viney & Sivapalan, 1999). Este modelo incorpora los procesos de transporte y arranque de partículas de una cuenca subdividida en una tipología de laderas y cauces interconectados entre sí. Usa la fórmula USLE para predecir la pérdida de suelo puntual y después asume que

el transporte del sedimento generado se produce en unas determinadas condiciones constreñidas por la capacidad de transporte de la escorrentía.

3.1.3. Modelos de base física.

Estos modelos están basados en las leyes físicas que administran las relaciones entre los diferentes parámetros y procesos que se observan. Los modelos físicos se describen matemáticamente mediante ecuaciones que rigen la transferencia de masa, energía y momento. Estos modelos se empezaron a desarrollar en los años 70 del siglo XX. Los mecanismos que forman los modelos de base física incluyen la tensión de cizalla ejercida por la escorrentía superficial, el arranque y desprendimiento de partículas por las gotas de lluvia, y el transporte y sedimentación de la escorrentía laminar y de regueros (Alatorre & Beguerría, 2009). Estos modelos pueden, en teoría, aplicarse a partir de medidas directas de los valores de los parámetros, sin la necesidad de emplear la calibración a partir de registros empíricos. Se basan en una representación espacial, ya sea en forma de rejilla regular (grid) o irregular (*tesseled irregular network* o TIN). Uno de los puntos negativos de estos modelos es que requieren la introducción de una gran cantidad de parámetros, también espacialmente distribuidos, y la incertidumbre en la distribución espacial se propaga al modelo, en general amplificando la incertidumbre final de los resultados.

Un ejemplo de modelo de base física es ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulator) (Beasley, et al., 1980). Se trata de uno de los primeros modelos espacialmente distribuidos a escala de cuenca. Su principal particularidad es que contiene en su estructura la ecuación de continuidad de sedimento de Foster y Meyer (1977), y los principios conceptuales para el modelo de enrutamiento de agua desde la ladera de Nearing et al. (1994). Este modelo perseguía convertirse en una herramienta de gestión, potencialmente predecir los efectos de diversos escenarios de usos de los suelos y de prácticas agrícolas, usando para ello una descripción de la erosión basada en procesos (Alatorre & Beguerría, 2009).

Otro ejemplo es el modelo EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) (Williams, et al., 1983). Este modelo persigue cuantificar la productividad del suelo. Estima los efectos de diversas formas de manejo de las dinámicas del agua, los nutrientes, los sedimentos y los pesticidas en una cuenca determinada. EPIC simula la escorrentía superficial, la percolación, el flujo de retorno, la evapotranspiración, funcionando con intervalo temporal de simulación diario y abarcando periodos de entre 1 y 4000 años.

Hay muchos otros modelos, tanto empíricos, como conceptuales o de base física, pero en este trabajo solo se mencionarán algunos de los más relevantes.

3.2. La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo USLE.

El modelo elegido para el presente trabajo es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo o USLE (Universal Soil Loss Equation). Se trata de un modelo empírico paramétrico dedicado a estimar las pérdidas de suelo causadas por erosión hídrica laminar y en regueros. Es uno de los modelos más utilizados en España, en Europa y en todo el mundo para determinar las tasas de erosión.

La creación de USLE se remonta a 1954, cuando Dwight Smith y Walter H. Wischmeier comenzaron a desarrollar el modelo en el Centro Nacional de Datos de Escorrentía y Pérdida de Suelo (National Runoff and Soil Loss Data Center) en cooperación con la Universidad de Purdue. Smith y Wischmeier eran empleados del Servicio de Conservación de Suelos (SCS: Soil Conservation Service), una agencia del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA: United States Department of Agriculture). Una serie de proyectos de investigación cooperativa entre el gobierno federal y los estados en 49 ubicaciones contribuyeron con datos básicos de escorrentía y pérdida de suelo procedentes de 10000 parcelas al centro de datos para sintetizar y realizar análisis estadísticos generales (Wischmeier & Smith, 1978). Se utilizaron simuladores de lluvia en parcelas de campo para deducir el factor inicial de erosividad de la lluvia. En 1965 ya habían evaluado y desarrollado cada uno de los factores de la ecuación USLE. El modelo completo y detallado se publicó en 1978 en

el Manual de Agricultura (Agriculture Handbook, Number 537) del Departamento de Agricultura de EE UU.

La expresión general de USLE es la siguiente:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

A continuación se describen cada uno de los factores:

- **A:** Es la pérdida de suelo anual. Se mide en toneladas por hectárea por año o $T \cdot Ha^{-1} \cdot año^{-1}$.
- **R:** Erosividad de la lluvia ($hJ \cdot cm/m^2 \cdot h \cdot año$) o también ($MJ \text{ mm } ha^{-1} \text{ año}^{-1}$)
- **K:** Erosionabilidad del suelo ($Ton \cdot h \cdot m^2 / Ha \cdot hJ \cdot cm$) o también ($Ton \text{ Ha } h \text{ Ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)
- **L:** Longitud de la pendiente (m)
- **S:** Factor de inclinación de la pendiente. Adimensional.
- **C:** Factor de cubierta y manejo. Adimensional.
- **P:** Factor de prácticas de conservación o protección del suelo. Adimensional.

Factor R: Erosividad de la lluvia.

Este factor describe la energía de las precipitaciones para erosionar la superficie del suelo. Se refiere a la capacidad de las gotas de lluvia de caer con cierta intensidad para desagregar las partículas superficiales del suelo y convertirlas en partículas transportables. Originalmente se definió como el producto de la energía cinética de una tormenta por su máxima intensidad en 30 minutos, dividido por 100. La energía de la tormenta, en unidades internacionales J/m^2 , se expresa con la fórmula (Riesco García, 2015):

$$E = (210.2 + 89 \log_{10} I) (IT)$$

Donde: $(210 + 89 \cdot \log I)$ es la energía cinética de la tormenta de intensidad I , por centímetro de lluvia y metro cuadrado de superficie ($J/cm \cdot m^2$) donde T es la

duración de la tormenta en horas. Por tanto, la expresión del valor del índice de erosividad de la lluvia es:

$$R = \sum_{j=1}^n (210.2 + 89 \log_{10} I_j) (I_j T_j) I_{30}$$

Donde:

- R = índice de erosividad de la lluvia en (hJ·cm)/(m²h)
- T_j = periodo de tiempo en horas, para intervalos homogéneos de lluvia durante la tormenta.
- I_j = intensidad de la tormenta en los intervalos mencionados en cm/h.
- I₃₀ = máxima intensidad de la lluvia en 30 minutos, durante la tormenta, en cm/h.
- j = intervalos homogéneos de la tormenta.
- n = número de intervalos.

El cálculo de este factor ha sufrido numerosas modificaciones desde su desarrollo original. Generalmente se utilizan unas fórmulas más o menos específicas para cada área geográfica en la que se desempeñan los estudios. Para el cálculo del factor R en el presente Trabajo se ha utilizado una fórmula un poco más simple y mejor adaptada para la zona geográfica de estudio, que será explicada de forma más detallada en el capítulo de Metodología.

Factor K: erosionabilidad del suelo.

La erosionabilidad o erodabilidad del suelo representa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado debido a los materiales que lo forman. Describe la pérdida de suelo por unidad de erosividad en una parcela, por lo que está relacionado con el factor R. Mediante datos obtenidos por simuladores de lluvia, Wischmeier (1971) describe la ecuación de regresión siguiente:

$$100 \cdot K = 0.000271 \cdot M^{1,14} (12 - a) + 4.20(b - 2) + 3.23(c - 3)$$

Donde:

- M = producto del porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0.002 y 0.1mm de diámetro, expresado en %, por el porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0.002 y 2mm de diámetro, expresado en %, o la diferencia entre el 100% y el porcentaje de arcilla de la muestra de suelo.
- a = porcentaje de materia orgánica.
- b = número correspondiente a la estructura del suelo (USDA- Soil Survey manual).
- c = clase de permeabilidad del perfil del suelo (USDA – Soil Survey manual).

El factor K también se puede obtener mediante el conocido monograma de Wischmeier, que es la representación gráfica de la expresión del factor:

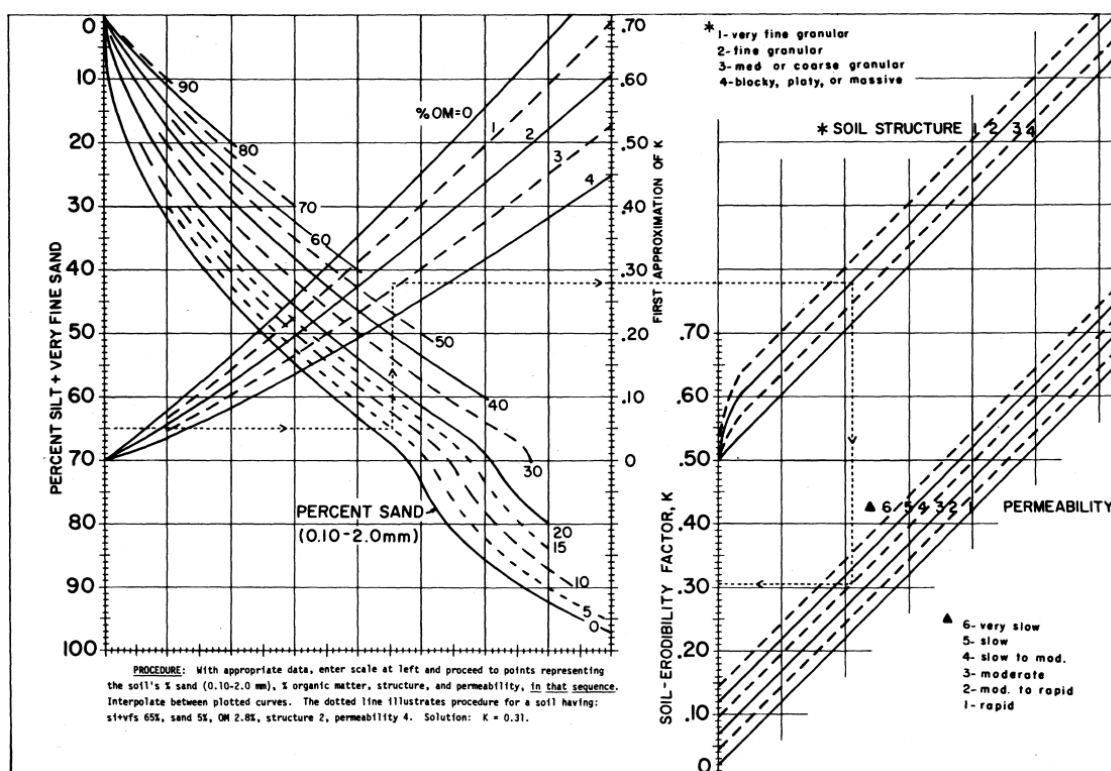


Figura 3. Monograma de erosionabilidad del suelo K. Fuente: Wischmeier & Smith (1971).

En este monograma se relacionan gráficamente los valores de K con las características de arcilla, materia orgánica y estructura de los suelos.

Factor Topográfico: LS.

En este factor se calculan de forma combinada el factor L, longitud de pendiente, y el factor S, pendiente del suelo. Las fórmulas de este factor han cambiado múltiples veces desde su creación y se han establecido métodos específicos dependiendo de si la ladera es homogénea o heterogénea. Las ecuaciones más recientes de Wischmeier (1982) para obtener este factor son:

- Para pendientes menores del 9%:

$$LS = \left[\frac{\lambda}{22.1} \right]^{0.3} \left[\frac{0.43 + 0.30s + 0.043s^2}{6.613} \right]$$

- Para pendientes iguales o mayores del 9%:

$$LS = \left[\frac{\lambda}{22.1} \right]^{0.3} \left[\frac{s}{9} \right]^{1.3}$$

λ = longitud de ladera (m). Se describe como la distancia desde el origen de la escorrentía superficial hasta que se produce un cambio brusco de pendiente, como por ejemplo, el comienzo de un depósito de sedimentos, o la escorrentía desemboca en un cauce.

S es la pendiente, en este caso en porcentaje.

El objetivo de estas fórmulas es la aplicación a laderas de cuencas vertientes en proyectos en los que se persigue estimar las tasas cuantitativas de erosión.

Para el presente TFG se han utilizado diversas herramientas disponibles en el software QGIS para hallar el factor topográfico LS.

Factor C: Cobertura del suelo.

Este factor describe el grado de protección que un específico tipo de cobertura vegetal otorga a los suelos. Las cubiertas vegetales ayudan a aminorar los efectos de

la erosión del suelo. Wischmeier y Smith (1975) determinan el valor del factor C como el producto de tres subfactores:

- La protección aérea que la vegetación proporciona al suelo.
- La protección proporcionada por la vegetación que está en contacto con la superficie del terreno.
- Los efectos de los residuos de la vegetación en la protección del suelo, ya sea como cubierta o como modificadores de las propiedades físicas del suelo.

Este factor toma valores entre 0 y 1 (cuando hay protección alta, los valores son cercanos al 0, cuando hay poca protección los valores se acercan a 1). Es un factor clave en USLE, ya que aunque la topografía sea abrupta, si la cubierta vegetal es abundante la erosión y la consecuente pérdida de suelo será más leve.

Hay numerosos métodos para hallar este factor. En general, la mayor parte de los artículos, trabajos, estudios, etc., se apoyan en tabulaciones y estudios realizados in situ con anterioridad para determinar el tipo de cobertura del suelo y asignar un valor determinado del factor C a cada cobertura, ya sea de los calculados por Wischmeier y Smith o por otros autores que hayan realizado estudios más adecuados para la zona geográfica específica.

Factor P: Prácticas de conservación del suelo.

Este factor se considera una variable independiente. Se describe como la relación entre el valor medio de las pérdidas de suelo producidas en un terreno donde se llevan a cabo prácticas de manejo o conservación de suelo, y las pérdidas que se producirían en el mismo terreno sin prácticas de conservación. Las prácticas de conservación son: cultivos a nivel (contouring), cultivos en fajas (strip cropping) y cultivos en terrazas (terracing). Al igual que el factor C, este factor toma valores entre 0 y 1 (0 supone más conservación, 1 supone no existencia de prácticas de manejo).

Para este factor, en general se necesita hacer un estudio de campo en el que se describe el tipo de práctica, su perímetro y la pendiente media donde se desarrollan.

Estos datos se incluirían en la cartografía de usos del suelo. En ocasiones este factor no se tiene en cuenta, o se toma como 1 para todo el territorio, cuando no se dispone de la información pertinente o por no haber prácticas de manejo.

Usualmente se usan tablas de valores de P como esta (Shin, 1999):

Pendiente (%)	Cultivos a nivel	Cultivos en fajas	Cultivos en terrazas
0.0 - 7.0	0.55	0.27	0.10
7.0 - 11.3	0.60	0.30	0.12
11.3 - 17.6	0.80	0.40	0.16
17.6 - 26.8	0.90	0.45	0.18
26.8>	1.00	0.50	0.20

Tabla 1. Valores del factor P. Fuente: Shin, 1999.

3.3. Estudio de la erosión mediante Sistemas de Información Geográfica.

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) se puede definir como un conjunto de herramientas computerizadas que permiten recopilar, analizar, transformar, gestionar, cartografiar y en general trabajar con datos espaciales georreferenciados procedentes del mundo real con la misión de cumplir un conjunto de objetivos determinados o para resolver algún problema. La incorporación de los SIG ha servido de gran ayuda para los estudios y la modelización de la erosión. La mayoría de los artículos y estudios sobre erosión que hay disponibles en la literatura científica y técnica de las últimas décadas se han apoyado en herramientas SIG (y también de teledetección) para llevar a cabo su trabajo.

En el caso de los estudios que usan la USLE, los SIG son de gran ayuda para hallar el factor topográfico LS, ya que permiten obtener mapas de pendientes de manera relativamente sencilla a partir de Modelos Digitales de Elevaciones. Además de esto, los SIG asisten con el análisis espacial de los datos de tipo cuantitativo de los otros factores, como la meteorología para el factor de erosividad R o los datos temáticos de coberturas del suelo, litología o prácticas de manejo para los factores C, K y P, respectivamente.

En general, para la modelización de la erosión y la pérdida de suelo, los SIG son de gran ayuda en los siguientes aspectos:

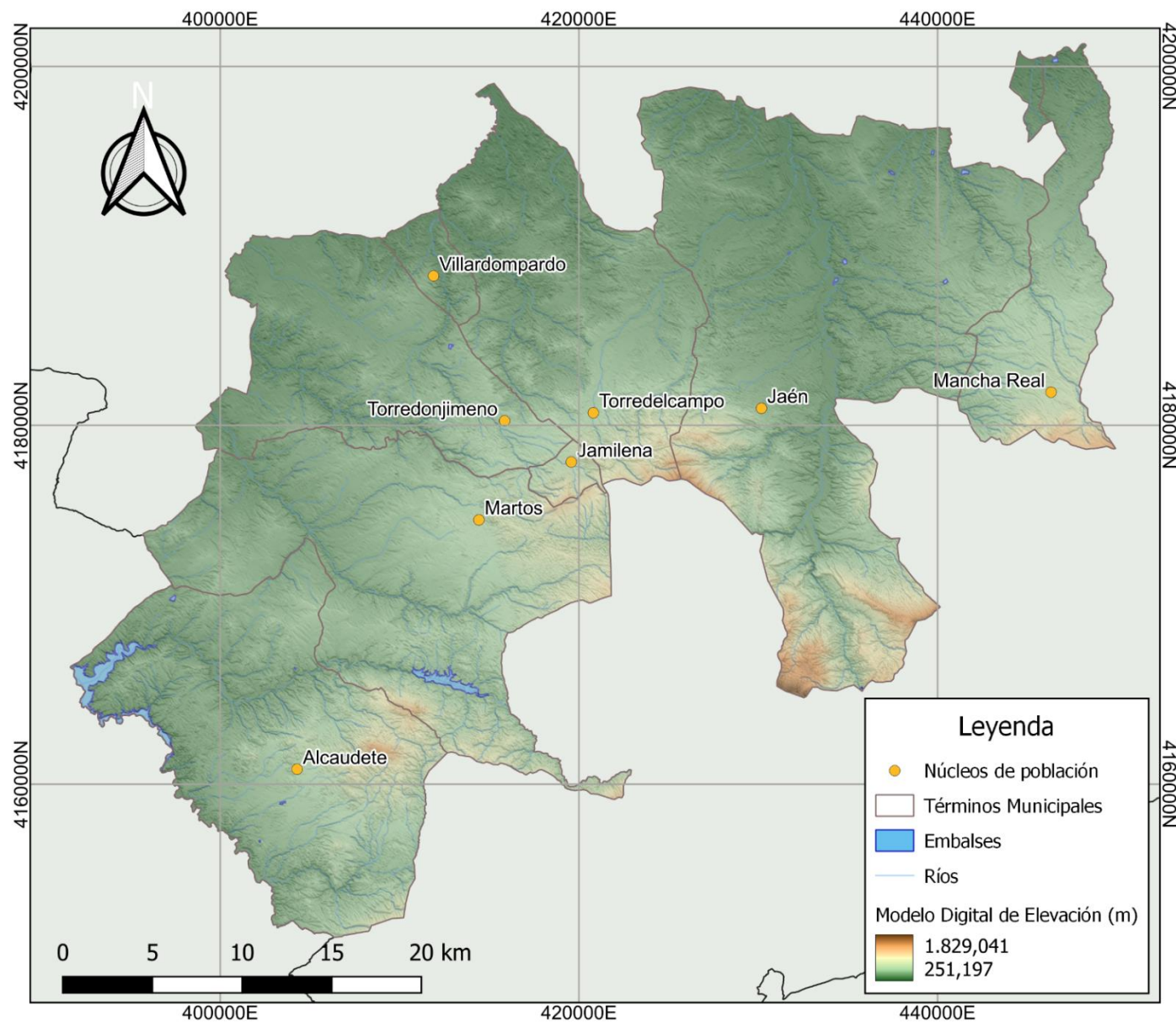
- Creación de modelos y procesado de bases de datos: Los SIG permiten manejar volúmenes significativos de información espacialmente referenciada y simular posibles escenarios de erosión en el paisaje.
- Poder visualizar los resultados: Los SIG muestran de forma gráfica cómo se distribuye espacialmente la información obtenida.
- Visualización dinámica de los resultados a lo largo del tiempo: Los SIG nos dan la posibilidad de mostrar cómo cambian los patrones de erosión a lo largo del tiempo, tanto para toda la extensión del área de estudio como para ubicaciones específicas en el paisaje. También nos dan la posibilidad de crear una cartografía para cada etapa del modelo.
- Realizar múltiples análisis y cálculos con capas de datos geográficos.

4. ZONA DE ESTUDIO

4.1. Localización.

El área propuesta para la realización del trabajo se trata de la comarca agraria de la Campiña del Sur, ubicada en la provincia de Jaén (España). Se localiza en la parte suroeste de la provincia. Tiene una extensión de 138 623 hectáreas y ocupa un 10.28% de la superficie total de la provincia (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013).

Mapa de localización: Comarca agraria Campiña Sur de Jaén



EPSG:25830
ETRS89 / UTM zone 30N
Universal Transverse Mercator (UTM)
Escala: 1/300000

Autor: Juan Antonio Alarcón Torres
Grado de Ingeniería Geomática y Topográfica
Fecha de creación: Mayo 2024

Fuente: elaboración propia con datos extraídos del CNIG y la REDIAM.

UJa.
Universidad de Jaén

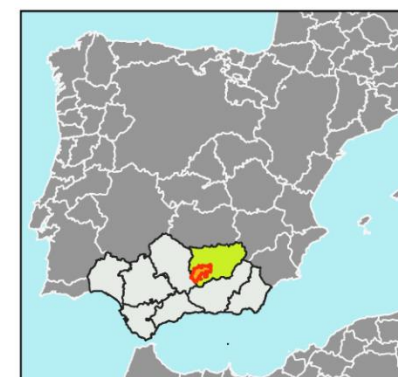


Figura 4. Mapa de localización de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

Esta comarca contiene a la capital de la provincia. Limita al oeste con la provincia de Córdoba y presenta una topografía variada. En la vertiente meridional se encuentran zonas montañosas como las Sierras de la Caracolera y de la Grana, así como la Serrezuela de Pegalajar. Por otro lado, en la mitad septentrional predominan las llanuras, donde se hallan las cuencas de los ríos Guadalbullón, Salado de los Villares, Víboras y San Juan. La altitud media de la Campiña el sur ronda entre los 315 y 901 metros, y en algunos puntos se alcanzan pendientes de hasta el 11%.

4.2. Superficie y demografía.

Se compone de ocho municipios: Alcaudete, Jaén, Jamilena, Mancha Real, Martos, Torredelcampo, Torredonjimeno y Villardompardo. Tienen las siguientes características demográficas y de superficie en 2023:

Municipio	Población 2023 (hab)	Superficie (Km ²)	Densidad (hab/Km ²)
Alcaudete	10310	236.81	43.54
Jaén	111767	424.30	263.42
Jamilena	3322	8.99	369.52
Mancha Real	11376	97.70	116.44
Martos	24173	261.10	92.58
Torredelcampo	13871	182.08	76.18
Torredonjimeno	13297	157.78	84.28
Villardompardo	919	17.47	52.60
Total Comarca:	189035	1386.23	136.37

Tabla 2: Datos demográficos de la Campiña del Sur. Fuente: Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía

4.3. Geología.

Desde el punto de vista geológico, los sustratos están compuestos principalmente por estos materiales originarios:

- Triásico: Margas abigarradas, yesos, calizas y carmiolas.
- Jurásico: Dolomías y calizas oolíticas.
- Cretácico: margas y margocalizas.
- Paleógeno: Margas y areniscas.
- Neógeno: Indiferenciado, areniscas, margas y calizas molásicas.

4.4. Edafología.

El grupo de suelos predominante en la comarca es el Xerochrept, el cual ocupa un 97% de la superficie total. Se trata de suelos profundos (100 a 150 cm). Tienen un pH ligeramente ácido, poseen un bajo contenido en materia orgánica y la textura es franco-arenosa. El resto de suelos se compone de una combinación de Xerorthent y Xerofluvent.

4.5. Climatología.

El tipo climático predominante en la Campiña del Sur es el *Mediterráneo subtropical*, aunque en las zonas de mayor altitud se dan los climas de tipo *Mediterráneo continental* y *Mediterráneo templado* (este en las zonas con mayor elevación). La comarca presenta un periodo frío (temperaturas medias mínimas inferiores a 7°C) de unos 4 meses en la capital, y de 5 a 6 meses en el resto, aumentando en la dirección noroeste- sudeste. El periodo cálido, es decir, los meses con una temperatura máxima media de más de 30°C es de más de 3 meses en la zona norte, variando de 2 a 3 meses en el centro y sur de la comarca. El periodo árido o seco, es decir, los meses que presentan déficit hídrico, que se caracteriza por tener valores negativos en la diferencia entre la evapotranspiración potencial y la real, se extiende por 5 meses, exceptuando algunos puntos de los municipios de Alcaudete, Martos y Jamlena, donde es de 4 meses. Se ha comprobado que el periodo cálido va aumentando paulatinamente cada año. En la siguiente tabla se puede ver un resumen de los datos climatológicos anuales de los municipios de la comarca:

Municipio	Altitud (m)	Precipitación anual (mm)	Temp. Min. (°C)	Temp. Med. (°C)	Temp. Max. (°C)	ETP anual (mm)
Alcaudete	572	514	1.9	15.3	35.2	819
Jaén	544	525	2.8	16.6	35.2	882
Jamlena	749	588	-1	16.5	34	812
Mancha Real	617	486	2.8	15.8	34.5	841
Martos	612	578	2	15.4	35.1	823
Torredelcampo	501	536	2.6	16.6	35.4	886
Torredonjimeno	457	544	2.5	16.3	35.6	864
Villardompardo	442	522	2	16.7	36	881

Tabla 3. Fuente: www.magrama.gob.es (Temperatura media mínima del mes más frío y temperatura media máxima del mes más cálido).

4.6. Características agrarias y de la cobertura superficial de la comarca.

Las tierras de cultivo ocupan el 84.2% del territorio total de la comarca. El principal cultivo de la Campiña del Sur es el olivar y este supone un 75% del total. El 80% de las tierras de cultivo son de secano, el 20% de regadío. El 21% de las tierras de regadío se dedica al olivar y el resto al cultivo de hortalizas. Los municipios con más extensión de tierras dedicadas a cultivos son: Jaén (32 228 Ha), Martos (23 912 Ha) y Alcaudete (18 657 Ha) (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013).

El terreno forestal representa un 7% de la superficie de la comarca. Las zonas forestales se agrupan donde la topografía es más abrupta, en la zona meridional de la Campiña del Sur: Sierras de la Pandera y de la Grana. Estas zonas contienen vegetación de matorrales esclerófilos, matorrales boscosos de transición, bosques de coníferas, bosques de frondosas y bosques mixtos. Las coberturas de menor extensión son los pastos y prados, que ocupan un 2.8% y 6% respectivamente.

5. METODOLOGÍA

5.1. Software.

El software empleado es QGIS en sus versiones 3.4.11 y 3.26.0. Se trata de una aplicación profesional de Sistemas de Información Geográfica (SIG) de software libre y de código abierto licenciado bajo GNU, General Public License. Es un proyecto oficial de la Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Permite visualizar, editar, analizar y trabajar con datos ráster, vectoriales y bases de datos. También nos permite diseñar cartografía a partir de los datos tratados. Dentro de QGIS también se han utilizado las herramientas del conjunto SAGA, System for Automated Geoscientific Analyses.

5.2. Materiales utilizados.

Se han empleado las siguientes capas de datos georreferenciados:

- Modelo Digital del Terreno MDT25 con paso de malla de 25 m. Sistema geodésico de referencia ETRS89, proyección UTM, huso 30. Descargado del CNIG. Misma distribución de hojas que el MTN50. Hojas utilizadas: 0925, 0926, 0946, 0947, 0967, 0968 y 0969, correspondientes a los municipios de la zona de estudio.
- Modelo Digital del Terreno MDT05 con paso de malla de 5 m. Sistema geodésico de referencia ETRS89, proyección UTM, huso 30. Descargado del CNIG. Misma distribución de hojas que el MTN50. Hojas utilizadas: 0925, 0926, 0946, 0947, 0967, 0968 y 0969, correspondientes a los municipios de la zona de estudio.
- Modelo Digital de Elevación ASTER Global DEM. 30 metros de resolución. Sistema WGS84. Descargado de la página web del ASTER Global Digital Elevation Model. Teselas usadas: N37W004 y N37W005.
- Modelo Digital de Elevación EuroDEM del continente europeo. Escala 1:100000. Resolución de 2 segundos de arco, aproximadamente 60 metros. Producido por la Federal Agency for Cartography and Geodesy (Alemania) junto con EuroGraphics AISBL. Descargado de la página web de Open Maps for Europe.
- Capas vectoriales de límites administrativos de delimitación del territorio nacional, comunidades autónomas y provincias. Descargadas del DERA.
- Capa vectorial de límites administrativos de los términos municipales de Andalucía. Descargada del DERA.
- Capa vectorial de delimitación de las comarcas agrarias de Andalucía. Descargada del DERA.
- Capas vectoriales que incluyen los ríos, masas de agua, cuencas fluviales, etcétera, de Andalucía. Descargada del DERA.
- Capas vectoriales correspondientes al sistema urbano de Andalucía. Incluye ciudades, edificaciones, nombres, manzanas, etcétera. Descargadas del DERA.

- Capa vectorial de unidades litológicas de Andalucía. Descargada de la REDIAM.
- Capa vectorial de usos y coberturas del suelo de Andalucía a escala 1:100000 elaborada con datos del Corine Land Cover 2012. Descargada del DERA.
- Capa vectorial de unidades edáficas de Andalucía a escala 1:400000. Descargada de la REDIAM.

5.3. Sistema de Referencia.

Para trabajar con la información espacial georreferenciada se ha empleado el Sistema de Referencia Terrestre Europeo 1989, ETRS89, huso 30, con el código EPSG: 25830. Todas las capas de datos georreferenciados se han reproyectado a este sistema (en el caso de que no lo estuvieran por defecto).

5.4. Cálculo de los factores USLE.

El primer paso para comenzar este trabajo es preparar la zona de estudio con nuestras capas de información georreferenciada en QGIS. Creamos un proyecto nuevo y añadimos las capas vectoriales y rásters. Cogemos la capa vectorial de comarcas agrarias, extraemos la correspondiente a la Campiña del Sur de Jaén y la guardamos como una capa vectorial *shape* nueva. Añadimos todas las hojas de los MDT de nuestra zona y combinamos los rásters. A continuación usamos la capa *shape* de la Campiña del Sur anteriormente creada como capa de máscara para extraer de cada MDT la parte correspondiente a nuestra zona de estudio. También usamos la capa vectorial de la comarca para recortar el resto de capas vectoriales. Ahora podemos empezar con el cálculo de los factores.

Se procede a hallar cada uno de los factores de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) mediante el software QGIS. Para cada factor se obtiene una capa ráster que posteriormente se utilizará para operar en la ecuación USLE y así obtener el mapa de pérdidas de suelo. El esquema conceptual simplificado de USLE sería el siguiente:

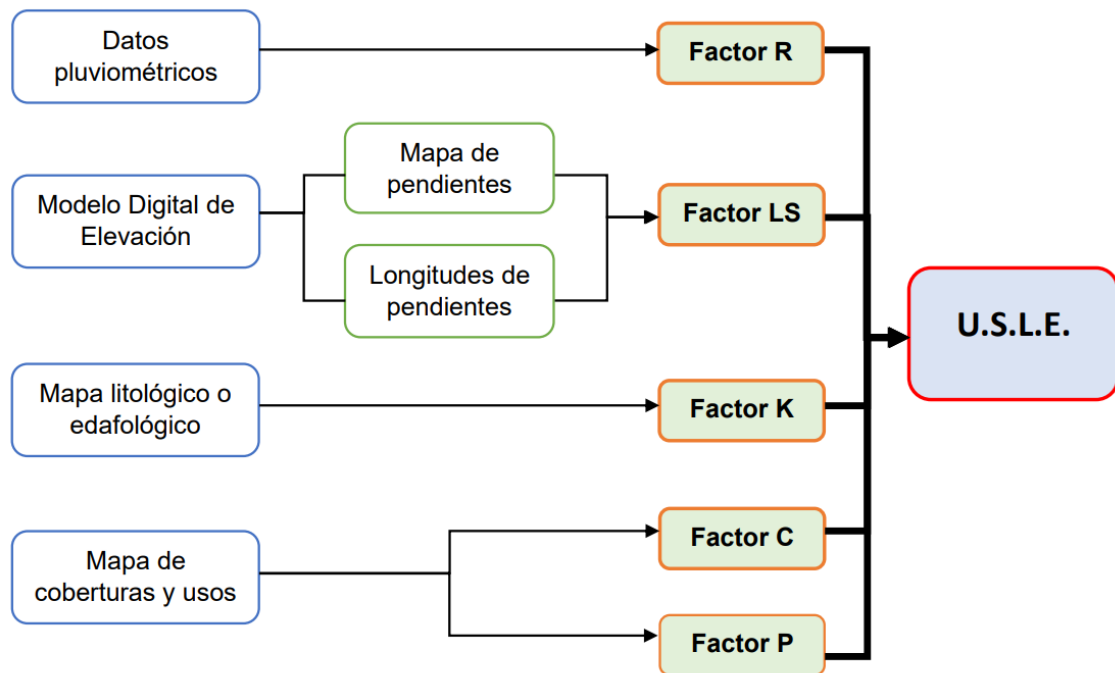


Figura 5. Esquema conceptual simplificado USLE. Fuente: Creación propia

5.4.1. Factor R. Erosividad de la Lluvia.

Como ya se ha comentado anteriormente, la erosividad de la lluvia es función de la energía cinética e intensidad de las precipitaciones. Se ha calculado la erosividad para el año 2021. El primer paso es descargar la capa de datos puntuales de las estaciones meteorológicas y pluviométricas de la Red de Información Ambiental de Andalucía REDIAM y añadirla a nuestro proyecto. Se trata de las estaciones integradas en el Subsistema de Información de Climatología Ambiental de Andalucía (CLIMA). Con la capa vectorial Shape de nuestra zona de trabajo, la Campiña Sur de Jaén, procedemos a recortar la capa puntual de estaciones meteorológicas y vemos que hay 48 estaciones dentro de la Campiña Sur.

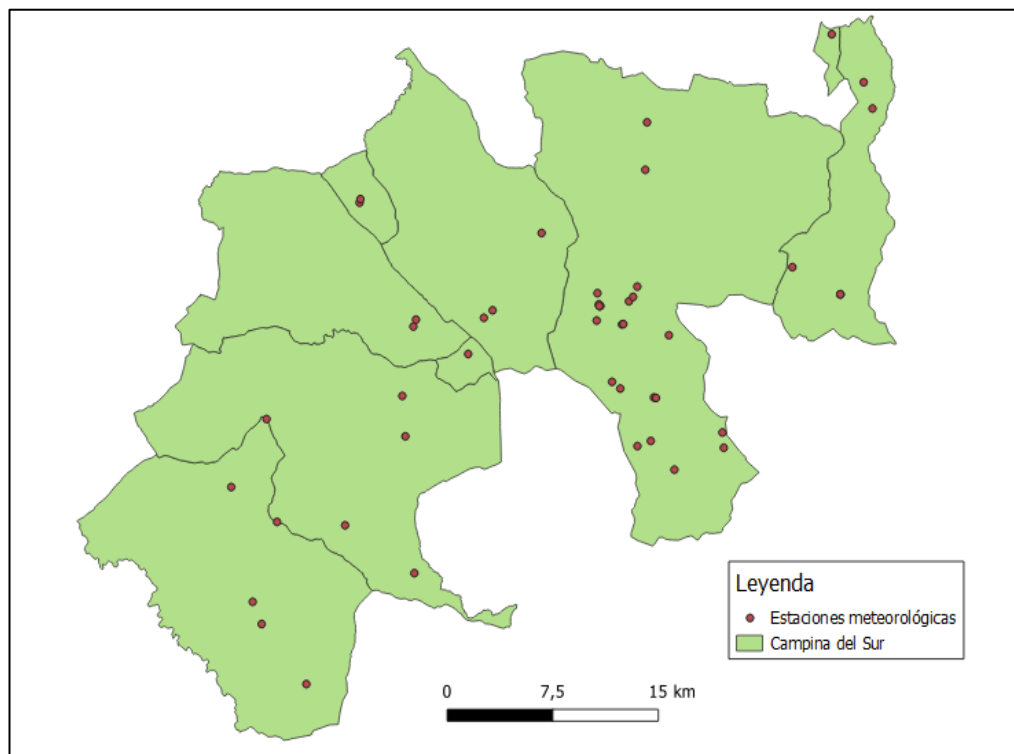


Figura 6. Estaciones meteorológicas en la Campiña Sur. Fuente: Elaboración propia.

Tras esto, buscamos y descargamos los datos de precipitaciones medias mensuales para cada mes del año 2021 de las 48 estaciones meteorológicas de la zona (de la REDIAM, de la red de Información Agroclimática de Andalucía RIA, de la Agencia Estatal de Meteorología AEMET), los recopilamos en una hoja de cálculo y

añadimos estos datos a la tabla de atributos de la capa de puntos de nuestras estaciones:

fid	ALTITUD	DENOMINACIÓN	X_ETRS89	Y_ETRS89	ENERO_2021	FEBRERO_2021	MARZO_2021	ABRIL_2021	MAYO_2021	JUNIO_2021	JULIO_2021	AGOSTO_2021	SEPTIEMBRE_2021	OCTUBRE_2021	NOVIEMBRE_2021	DICIEMBRE_2021
1	495	VIBORAS PANT G	406873.254	4166484.048	75	54	16.2	55.6	13.3	53.9	0	0	13.2	18.5	50	49.7
2	577	Alcaudete, Los Peñones	402615.301	4168881.106	73.4	53.7	17.1	57.7	11.2	52.5	0	0	14	18.6	45.3	48
3	656	Alcaudete	404140.096	4160988.935	76.4	56.2	15.3	45.5	20.5	55.5	0	0	10.8	15.1	49.7	56.3
4	400	Martos	405124.423	4173553.185	78.1	49.5	13.8	52.2	11.8	57.4	0	0	11.5	22.3	44.4	46.9
5	637	Alcaudete	404779.054	4159460.898	76.3	56	15.3	43	20.7	52.6	0.1	0	10.8	15.1	50.2	55.2
6	567	SAN JUAN G	407957.973	4155333.873	83.1	62.7	10.1	49.7	22.8	43.4	0.1	0	11.5	19.1	59.7	50.2
7	507	VIBORAS	410708.243	4166251.044	82.9	59	15	52.2	18.2	53.4	0	0.2	14.5	20	59	51.9
8	402	JONTOYA G	433723.325	4179314.105	74.7	39.7	9.6	36.6	14.8	26.1	0	0	19.3	10.8	45.5	28.8
9	753	Mancha Real, C. de A.	445917.377	4182124.119	82.7	34	4.1	71	17.8	13.1	0	0.2	22.1	18	67	25.7
10	754	COP Jaén	428592.333	4180325.077	71	42.7	14	49	17.6	27.2	0	0	17	14.8	51.7	28.5
11	458	Torre del Campo, El Térmico	424677.370	4186343.001	86.8	64.1	7.3	31.5	19.2	43	0	0	19.8	25.7	46.5	35
12	795	Mancha Real, Viveros	445917.377	4182124.119	82.7	34	4.1	71	17.8	13.1	0	0.2	22.1	18	67	25.7
13	765	Mancha Real, SEA	445917.377	4182124.119	82.7	34	4.1	71	17.8	13.1	0	0.2	22.1	18	67	25.7
14	720	Jaén, Cortinas	437528.543	4172628.721	83.5	45.5	9.6	45.2	21	20.7	0	0	48.7	9.3	55.2	28.1
15	840	Jaén, El Portichuelo	430271.822	4175648.876	102.3	61.2	10	35.8	16.2	28.4	0	0	24.7	14.5	47.9	43.7
16	510	Jaén	428860.471	4181328.818	70.9	42.2	14.3	50.2	17.8	27.3	0	0	17	14.8	52	28.2
17	360	Jaén, Centro Penitenciario	432048.032	4190687.027	59.4	28.7	8.1	38	19.6	33	0	0.1	7.8	15.1	43.2	35.5
18	520	Hosp. CIUDAD JAEN	430387.329	4180057.083	70.3	40.7	12.3	45.2	16.6	26.7	0	0	17.3	13.5	49.5	28
19	299	Jaén	432173.434	4193953.878	64.5	36.9	8	41.4	9.5	12.4	0	0.1	12.9	12.1	38.3	35.9
20	780	Los Villares	429684.296	4176112.119	100.3	61.7	10	35.4	16.2	27.3	0	0	22.7	14.5	47.9	42.7
21	580	Jaén	428774.831	4181329.617	70.9	42.2	14.3	50.2	17.8	27.3	0	0	17	14.8	52	28.2
22	530	Avda. DE MADRID	430885.343	4181649.068	64.5	30.1	8.8	38.5	14.1	26.2	0	0.1	19.3	10	45	24.7
23	576	Jaén, Cerro de los Lirios	428748.342	4181440.066	70.9	42.2	14.3	50.2	17.8	27.3	0	0	17	14.8	52	28.2
24	580	Jaén, Cerro de los Lirios	428774.831	4181329.617	70.9	42.2	14.3	50.2	17.8	27.3	0	0	17	14.8	52	28.2
25	603	Mancha Real, El Casarejo	442505.807	4183996.572	81.8	34.5	4.4	67.7	18.1	13.5	0	0.2	23.7	17.1	58.5	26.2
26	460	RONDA DEL VALLE	431182.345	4181952.065	62.7	26.7	7.5	35.5	13.3	26	0	0.1	20.1	8.6	43.2	23.6
27	260	Jaén, Los Racioneros	445302.604	4200004.679	71	29.3	8.8	41.7	9.6	26.3	0	2.6	9.9	11.8	37.2	44.2
28	570	Jaén, C. de A.	430489.079	4180082.084	70.3	40.7	12.3	45.2	16.6	26.7	0	0	17.3	13.5	49.5	28
29	520	LAS FUENTEZUELAS	428647.347	4182208.056	70.8	41.8	14.1	50.2	17.8	27.3	0	0	17	14.8	52	28.1
30	433	Universidad de Jaén	431479.351	4182660.057	61.9	24.8	6.6	34.4	12.6	25.8	0	0.1	20.3	8	42.4	23.3
31	438	SIERRA, ELICHE G	432658.287	4175039.146	98.5	57.5	11.5	37.1	16.8	28	0	0	25.6	13	47	40.7
32	439	SIERRA QBRJANO G	432808.287	4175004.147	98.5	57.5	11.5	37.1	16.8	28	0	0	25.6	13	47	40.7
33	614	QUEBRAJANO G	434118.255	4170073.213	96.2	52.6	14.8	43.2	20.6	32.7	0	0	34.7	11.3	53.2	40.4
34	755	NARANJOS G	437628.287	4171579.236	84	45.7	9.8	46.2	21.2	20.6	0	0	48.9	9.1	55.7	28.5
35	618	PARRILLA G	432438.266	4172049.176	102.5	55.1	16.2	42.4	20.2	37.9	0	0	32.2	13.3	50.6	45.5
36	706	MINGO	431488.261	4171694.171	104.6	55.2	18.6	43.9	21.5	41.2	0	0	33.4	14.3	52	47.3
37	591	Torredonjimeno, Escuela	415561.104	4179913.097	99.9	72	20.3	48.2	15	19.5	0	0.8	16.2	35.5	41.5	56.9
38	594	Torredonjimeno, Instituto	415748.384	4180390.093	99.9	71.9	20.2	48.2	15	19.1	0	0.8	16.2	35.7	39.5	56.7
39	420	Villardompardo	411737.022	4188429.761	74	43	3.8	44.7	11.5	25.2	0	0.1	14.8	42.7	24.7	49.2
40	754	Jamila	419457.909	4178024.841	108.5	79.8	24.7	48.7	15.1	12.8	0	1	16.7	36.7	50.4	61
41	432	Villardompardo, I.N.M.	411796.360	4188673.006	74	43	3.8	44.7	11.5	25.2	0	0.1	14.8	42.5	24.7	49.2
42	642	Torre del Campo	421194.358	4181028.069	112	83.5	27	50.2	14.3	8.6	0	1.2	16.1	39	46.9	64.6
43	640	Torre del Campo, Ayuntamiento	420575.267	4180613.823	112.1	83.5	27	50.2	14.3	8.6	0	1.2	16.1	39	46.6	64.5
44	660	Martos, Almeida	414994.022	4172367.108	90.4	66.3	17.7	51.9	20	45.7	0	0.8	19.6	24.3	66.3	52.9
45	753	Martos	414777.753	4175143.625	92.6	65	18.6	52.5	16.8	36.9	0	0.7	18	30	56.5	53
46	765	Martos, Sierra Grande	415632.886	4162959.280	98.9	73.1	13.8	51.4	26.6	49	0	0.6	18.2	21.6	70	53.5
47	420	Mancha Real, Banderas	448199.366	4194900.330	70.6	23.5	9.6	44.9	8.8	27.7	0	3.9	9.1	11.5	36.5	40.7
48	436	Mancha Real	447574.461	4196706.780	70.3	21.7	9.8	43.5	8.5	27.7	0	3.9	9.1	11.1	36	40.5

Figura 7. Datos de precipitación.

El índice de erosividad de la lluvia es un parámetro complicado de hallar, ya que intervienen múltiples propiedades interrelacionadas. La ecuación original de Wischmeier y Smith para calcular el factor R es muy compleja (ya que se requieren datos de precipitación muy específicos) y además está adaptada para una determinada área geográfica de los Estados Unidos. Desde su creación, numerosos autores han desarrollado expresiones matemáticas algo más simples y mejores adaptadas para diferentes zonas climáticas. Para el cálculo, usamos la fórmula del Índice Modificado de Fourier IMF, desarrollada por Arnoldus (1977), que se trata de una modificación del índice de agresividad climática o Índice de Fournier (IF) de 1960, en la que se tiene en cuenta no sólo las precipitaciones del mes más lluvioso, sino también las del resto de los meses del año:

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P_t}$$

En la que p_i es la precipitación de cada mes (en mm) y P_t es la precipitación media anual (también en mm).

Realizando un ajuste de regresión, Arnoldus (1977) halló la correlación entre el factor R y el Índice Modificado de Fournier para un estudio de los índices de erosividad de Marruecos, obteniendo la expresión (Arnoldus, 1977):

$$R = 0.264 * IMF^{1.50}$$

El Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) realizó ajustes de estas fórmulas para adaptarlas al territorio español, y subsecuentemente Rodríguez et al., (2004) la ajustaron para adaptarla a la zona de Badajoz, cuyas características climáticas son similares a nuestra zona de estudio. Esta es la fórmula que se ha usado para calcular el factor R en este Trabajo:

$$R = 2.56 * IMF^{1.065}$$

Ahora se procede a calcular el IMF en QGIS. Necesitamos crear un ráster de precipitación para cada mes del año 2021, y para ello hay que hacer interpolaciones. Usamos la herramienta de QGIS Interpolación IDW (Inverse Distance Weighted) que nos permite crear una interpolación de Distancia Inversa Ponderada desde una capa vectorial de puntos.

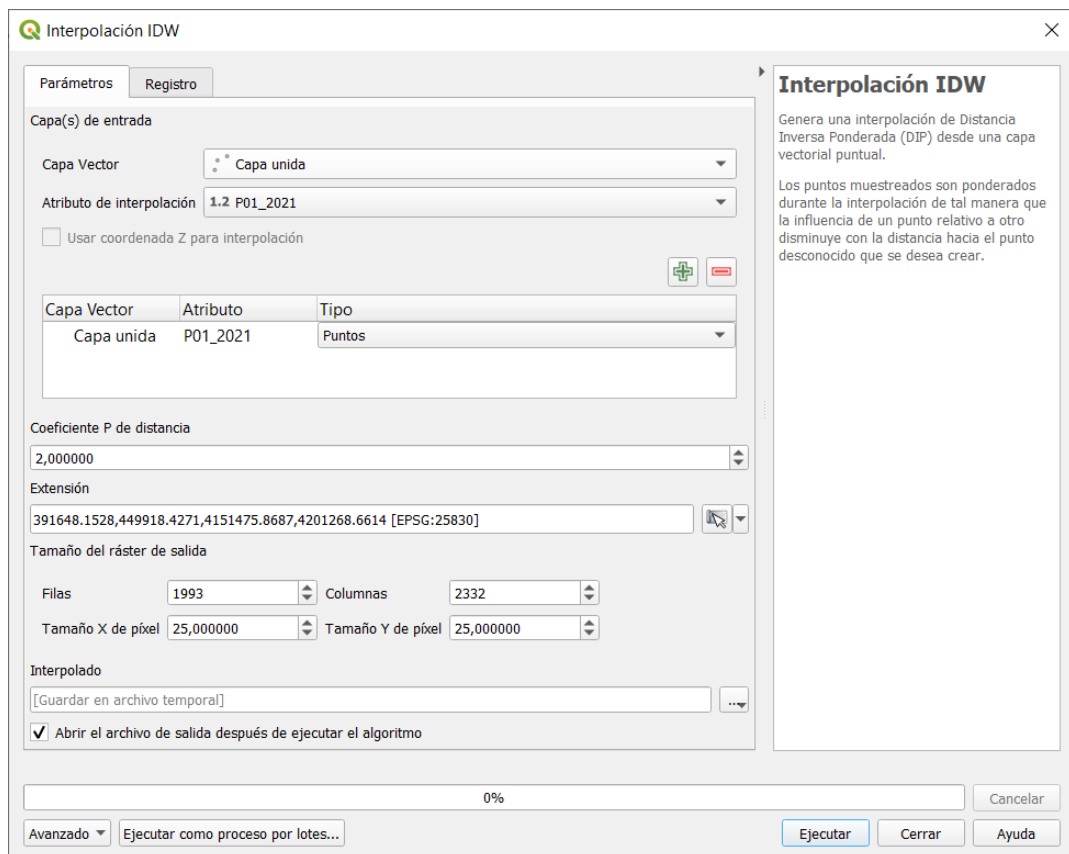


Figura 8. Interpolación IDW para crear los ráster de precipitación de cada mes. Fuente: Elaboración propia.

Le indicamos al programa que la *Capa Vector* es nuestra capa de puntos con los valores de precipitación y el *Atributo de interpolación* es la precipitación de cada uno de los meses. También indicamos que la extensión sea la de nuestra capa *Shape* de la Campiña Sur. Guardamos el ráster resultante. Hay que repetir esta operación 12 veces en total. Obtendremos 12 rásters como estos:

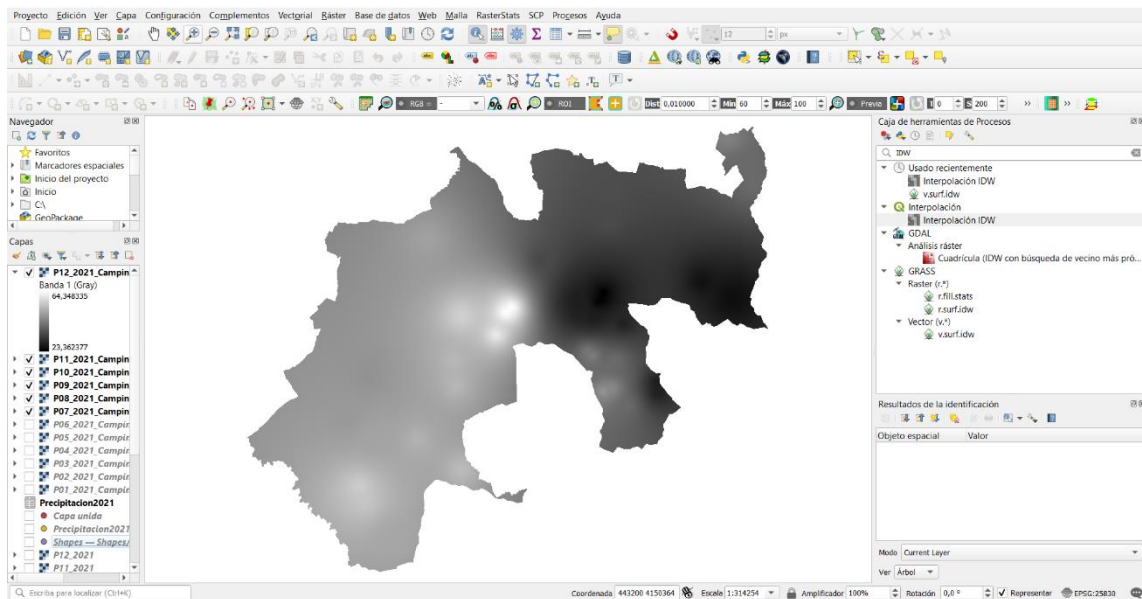
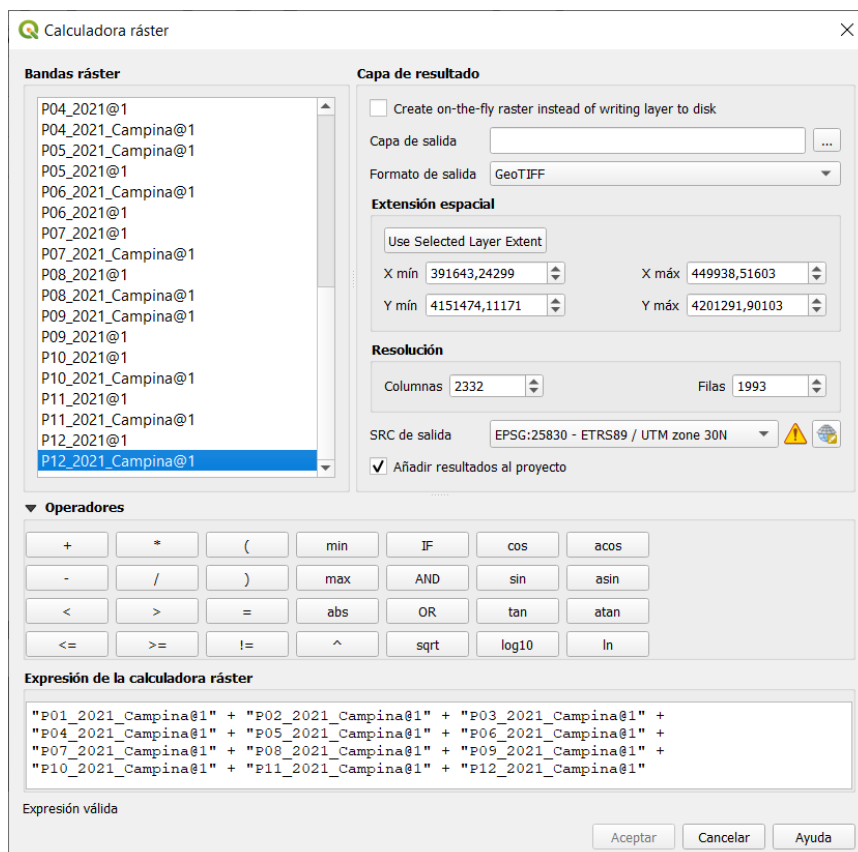


Figura 9. Obteniendo los rásters de precipitación de cada mes en QGIS. Fuente: Elaboración propia.

Ahora se procede a calcular el Índice Modificado de Fournier utilizando la Calculadora Ráster de QGIS. Primero calculamos la precipitación total anual P_t sumando los 12 ráster que hemos creado:



Guardamos este ráster resultante. Hecho esto, calculamos el IMF en sí, también con la Calculadora Ráster (hacemos la suma de las precipitaciones mensuales al cuadrado y las dividimos entre la precipitación total anual):

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P_t}$$

Obtenemos el ráster del IMF de nuestra zona y lo guardamos. Ahora calculamos el factor R, también con la Calculadora Ráster ($R=2.56*IMF^{1.065}$):

Se puede apreciar que las zonas con mayor erosividad se encuentran en la zona central y sur, en torno a Torredelcampo:

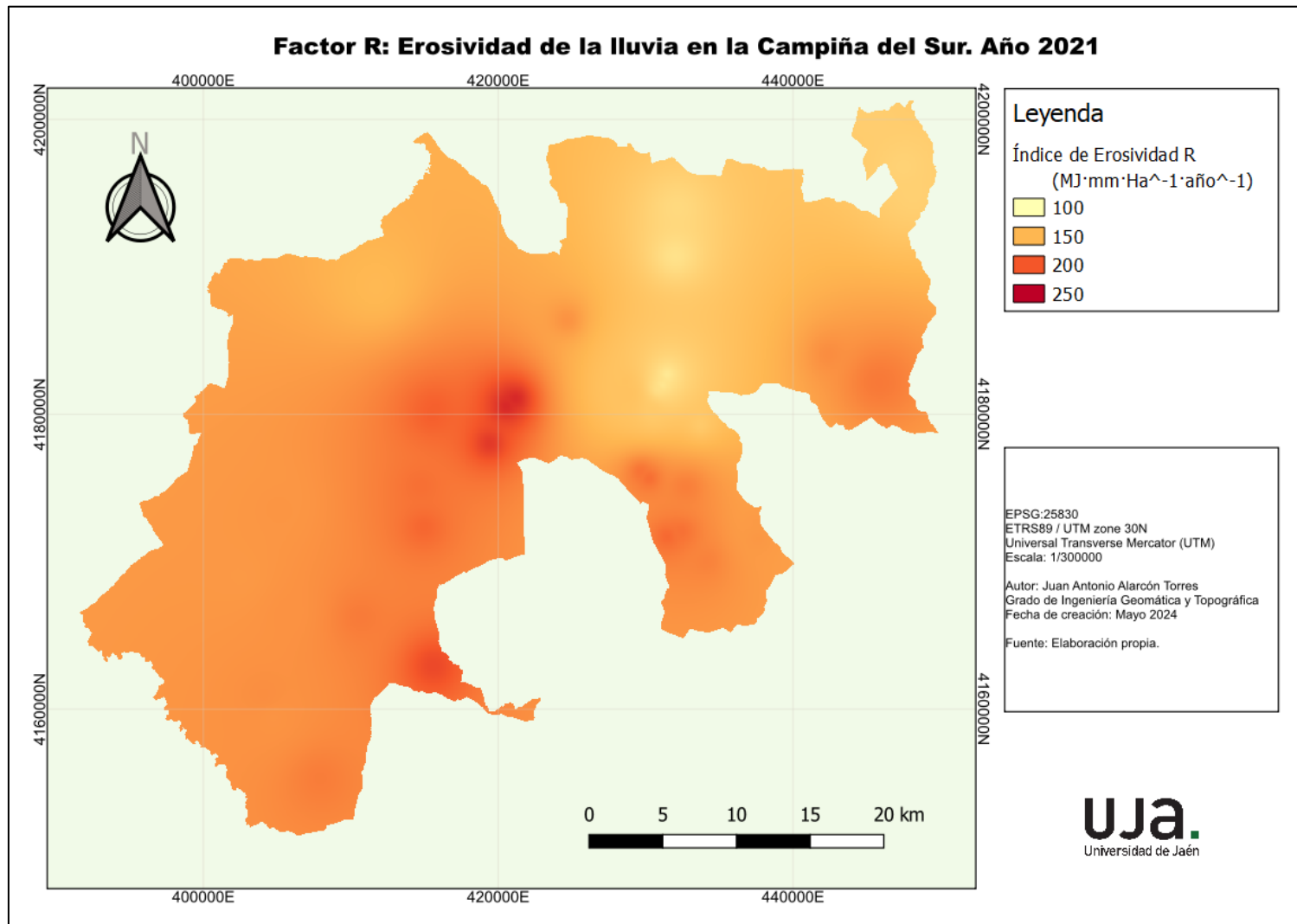


Figura 10. Mapa del Factor R. Fuente: elaboración propia.

5.4.2. *Factor K: Erosionabilidad del suelo.*

La erosionabilidad, también conocida como erodabilidad, se refiere a la susceptibilidad del suelo a ser erosionado debido a las características edáficas (estructura, textura, pedregosidad, estabilidad de agregados, etc.) o litológicas que lo componen. Representa la pérdida de suelo por unidad de erosividad del terreno, por lo que está relacionado con el factor anterior ($K=A/R$).

El valor de este factor suele determinarse experimentalmente mediante muestras de suelo en campo durante un año. Después en gabinete, suele determinarse a partir del monograma de Wischmeier y Smith mencionado anteriormente o aplicando su ecuación de regresión. Cuando no se dispone de información tan específica y detallada, otra opción es recurrir a la bibliografía científica y técnica de este tema sobre estudios realizados en zonas geográficas similares. Para este Trabajo, como no se dispone de información exacta sobre textura, materia orgánica, permeabilidad, estructura, etc., de los suelos de la Campiña del Sur y además es una zona considerablemente extensa (y no se han podido realizar muestras de campo o análisis de laboratorio durante todo un año de una zona tan grande), se ha recurrido al mapa vectorial de unidades litológicas de la REDIAM a escala 1:400000 y se han utilizado los valores del factor K hallados por Gisbert e Ibáñez en 2003 para las litologías de la provincia de Alicante (Gisbert & Ibáñez, 2003):

FACTOR K	LITOLOGÍA
0.2	"SC 1 Conglomerados"
0.2	"SC 1-2 Conglomerados y areniscas"
0.2	"SC 1-2-4 Conglomerados, areniscas y arcillas"
0.2	"SC 1-4 Conglomerados y arcillas"
0.2	"SC 1-10 Conglomerados y margas"
0.3	"SC 2 Areniscas"
0.3	"SC 2-4 Areniscas y arcillas"
0.3	"SC 2-10 Areniscas y margas"
0.4	"SC 4 Arcillas"
0.4	"SC 4-2 Arcillas y areniscas"
0.4	"SC 4-10 Arcillas y margas"
0.3	"SC 5 Calcáreas"
0.3	"SC 5-2 Calcáreas y areniscas"
0.3	"SC 5-6 Calcáreas y calcarenitas"
0.3	"SC 5-7 Calcáreas y calcáreas margosas"

0.3	"SC 5-9 Calcáreas y dolomías"
0.3	"SC 5-10 Calcáreas y margas"
0.3	"SC 6 Calcarenitas"
0.3	"SC 6-10 Calcarenitas y margas"
0.3	"SC 7 Calcáreas margosas"
0.3	"SC 7-10 Calcáreas margosas y margas"
0.3	"SC 8 Calcáreas tovacias"
0.3	"SC 9 Dolomías"
0.3	"SC 9-5 Colomías y calcáreas"
0.3	"SC 9-10 Dolomías y margas"
0.5	"SC 10 Margas"
0.5	"SC 10-2 Margas y areniscas"
0.6	"SC 12 Arcillas, margas y yesos"
0.2	"SI 2 Cantos y gravas"
0.2	"SI 2-3 Cantos, gravas y arenas"
0.2	"SI 2-3-4 Cantos, gravas, arenas y limos"
0.2	"SI 2-3-5 Cantos, gravas, arenas y arcillas"
0.2	"SI 2-4 cantos, gravas y limos"
0.2	"SI 2-5 Cantos, gravas y arcillas"
0.2	"SI 3 Arenas"
0.2	"SI 3-2 Arenas, gravas y cantos"
0.2	"SI 3-4 Arenas y limos"
0.2	"SI 3-5 Arenas y arcillas"
0.5	"SI 4 Limos"
0.5	"SI 4-2 Limos, gravas y cantos"
0.5	"SI 4-3 Limos y arenas"
0.5	"SI 4-5 Limos y arcillas"
0.4	"SI 5 Arcillas"
0.4	"M-1 Pizarras y cuarcitas"
0.4	"M-2 Rocas carbonatadas y filitas"
0.4	"M-3 Metabasitas"
0.2	"V-1 Basaltos"
0.2	"V-2 Ofitas"
0.2	"V-3 Brechas y tovas volcánicas"

Tabla 4. Valores del factor K para la litología de la zona. Fuente: Gisbert e Ibáñez, 2003.

En QGIS, insertamos la capa vectorial de litologías y la recortamos usando como capa de superposición nuestro Shape de la Campiña Sur (algo que se repetirá para cada uno de los factores). Cambiamos la simbolización y damos un color diferente a cada tipo de litología:

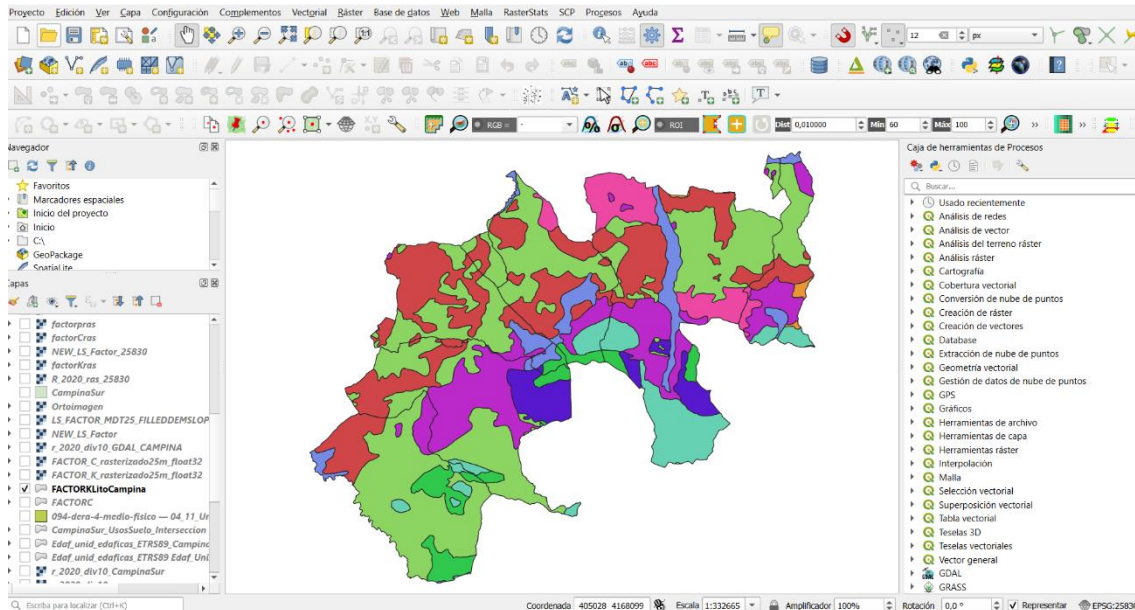


Figura 11. Shape de litologías de la Campiña del Sur. Fuente: Elaboración propia.

Tras esto, abrimos su tabla de atributos, conmutamos edición y añadimos un nuevo campo, Factor K, en el que vamos añadiendo los valores de K antes mencionados para cada una de las unidades litológicas.

	id_dera	unidad	fid	codigo	nombre	id_dera_2	cod_mun	nombre_2	provincia	ID	FactorK
1	10403500000001	Margas, areniscas y lutitas o silexitas	1	2306,...	Campiña del Sur	1131640...	23003	Alcaudete	Jaén	23003	0,4
2	10403500000408	Calcarenitias, arenas, margas y calizas	1	2306,...	Campiña del Sur	1131640...	23003	Alcaudete	Jaén	23003	0,3
3	10403500000048	Margas yesíferas, areniscas y calizas	3	2306,...	Campiña del Sur	1131640...	23087	Torredonjimeno	Jaén	23087	0,5
4	10403500001241	Arenas, limos, arcillas, gravas y cantos	5	2306,...	Campiña del Sur	1131640...	23060	Martos	Jaén	23060	0,2
5	10403500000357	Calizas y dolomías	1	2306,...	Campiña del Sur	1131640...	23003	Alcaudete	Jaén	23003	0,3
6	10403500001317	Margas, margocalizas, calizas (localmente c...	2	2306,...	Campiña del Sur	1131640...	23050	Jaén	Jaén	23050	0,3
7	10403500002752	Margas y brechas (olistostroma)	2	2306,...	Campiña del Sur	1131640...	23050	Jaén	Jaén	23050	0,2
8	10403500001731	Margas y calizas (localmente areniscas o re...	1	2306,...	Campiña del Sur	1131640...	23003	Alcaudete	Jaén	23003	0,3
9	10403500003104	Rocas volcánicas y subvolcánicas básicas e ...	1	2306,...	Campiña del Sur	1131640...	23003	Alcaudete	Jaén	23003	0,2
10	10403500000903	Conglomerados, arenas, lutitas y calizas	2	2306,...	Campiña del Sur	1131640...	23050	Jaén	Jaén	23050	0,2

Figura 12. Valores del Factor K en la tabla de atributos. Fuente: elaboración propia.

Guardamos los cambios hechos en la tabla de atributos. Tras esto procedemos a convertir esta capa vectorial en ráster con la herramienta *Rasterizar (vectorial a ráster)*. En la opción *campo a usar para un valor de marcado* tomamos el valor del atributo FactorK para rasterizar. Generamos dos ráster, uno con un tamaño de celda de 25m (para posteriormente operar mejor con el MDT25) y otro de tamaño de 5m

(para luego operar con el MDT05). Las unidades del factor K son $\text{Ton Ha h Ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

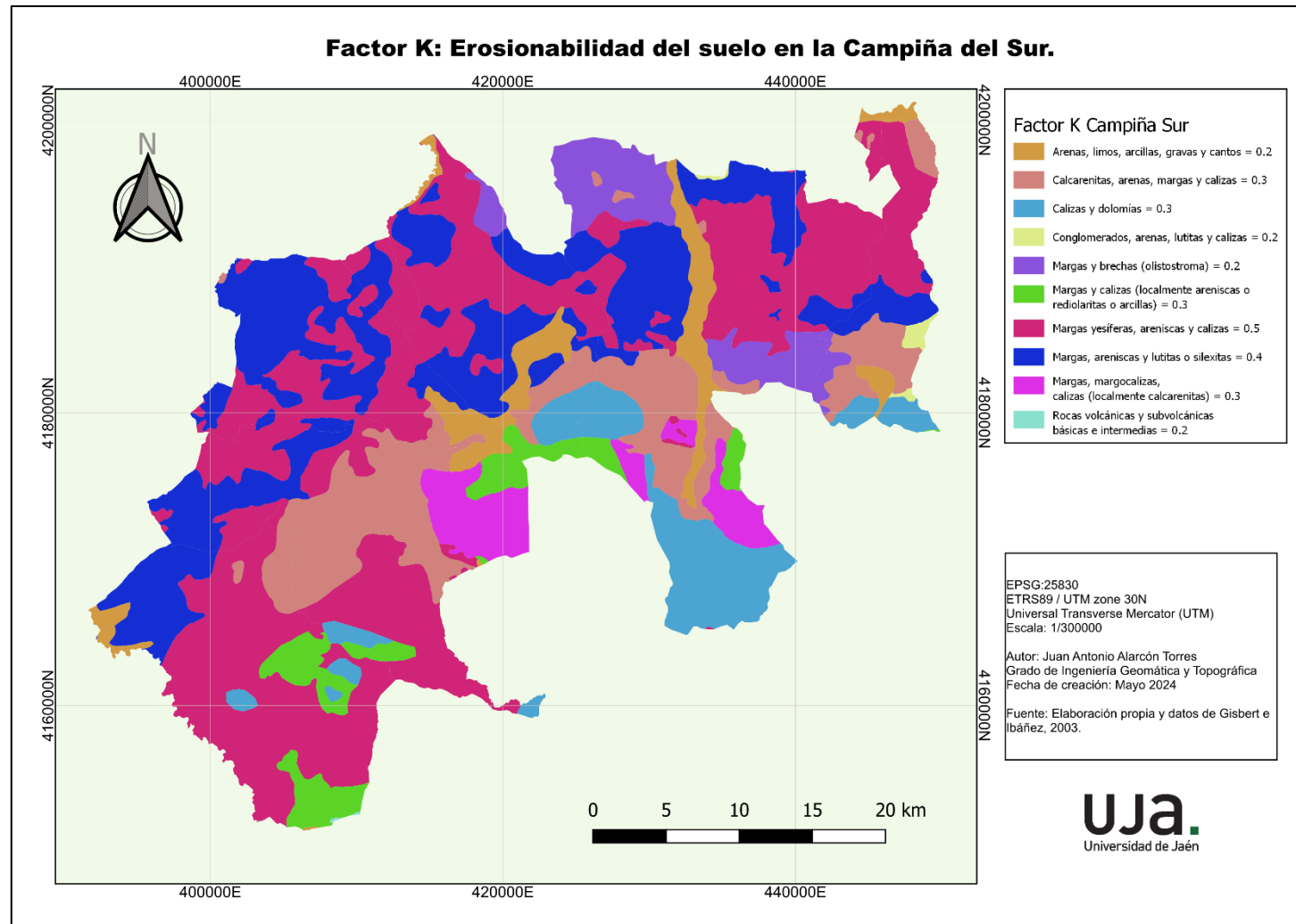


Figura 13. Mapa del Factor K. fuente: Elaboración propia

5.4.3. Factor LS: Factor topográfico.

Se compone de dos subfactores: factor L de la longitud de las pendientes y factor S, grado de inclinación de las pendientes. Para el factor topográfico necesitamos usar los Modelos Digitales de Elevación, y en este Trabajo se han usado cuatro: MDT25, MDT05, ASTER y EuroDEM. Por lo que las operaciones para obtener este factor se han repetido cuatro veces, una para cada MDT.

Primero debemos tener los MDT recortados de acuerdo con nuestra zona de trabajo, para ello utilizamos la herramienta de extracción ráster *Cortar ráster por capa de máscara*, usando nuestro Shape de la Campiña Sur como máscara de corte. A continuación, debemos rellenar los sumideros y las posibles irregularidades de los MDT utilizando la herramienta de la librería SAGA *Fill sinks (Wang & Liu)*. En la opción DEM seleccionamos nuestro MDT y pulsamos Ejecutar. Guardamos el archivo resultante con el que vamos a trabajar.

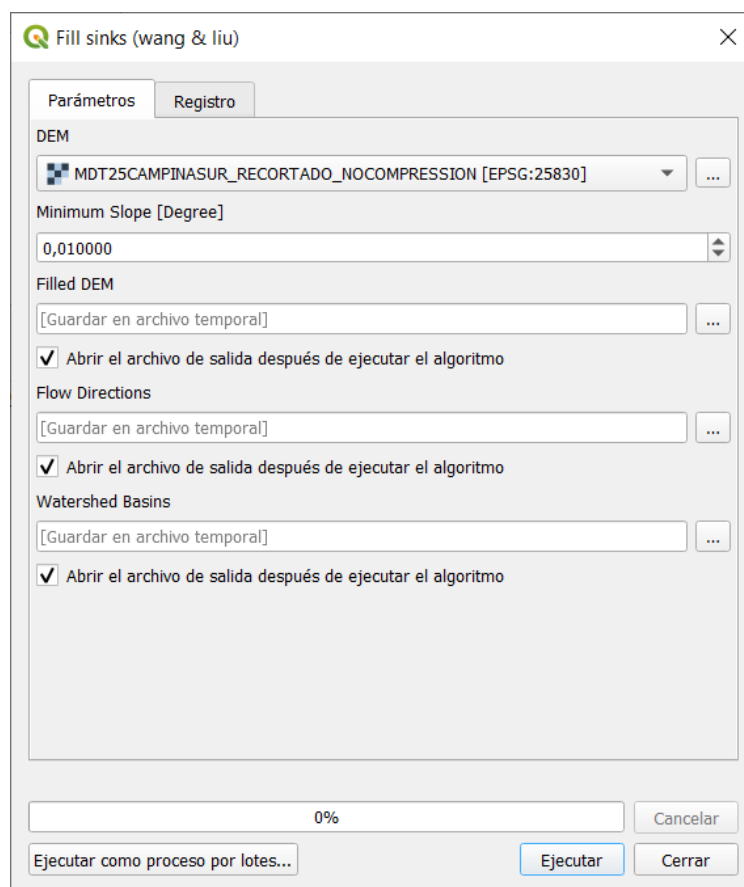


Figura 14. Rellenar sumideros con Fill sinks (Wang & Liu).

A continuación creamos el mapa de pendientes con otra herramienta de SAGA, dentro de las herramientas de Terrain Analysis - Morphometry: *Slope*, *aspect*, *curvature*. Introducimos nuestro MDT rellenado y en las unidades de la pendiente seleccionamos Radianes porque la herramienta de cálculo del factor LS de QGIS opera con esta unidad. Dejamos el método por defecto. Guardamos el archivo *Slope*.

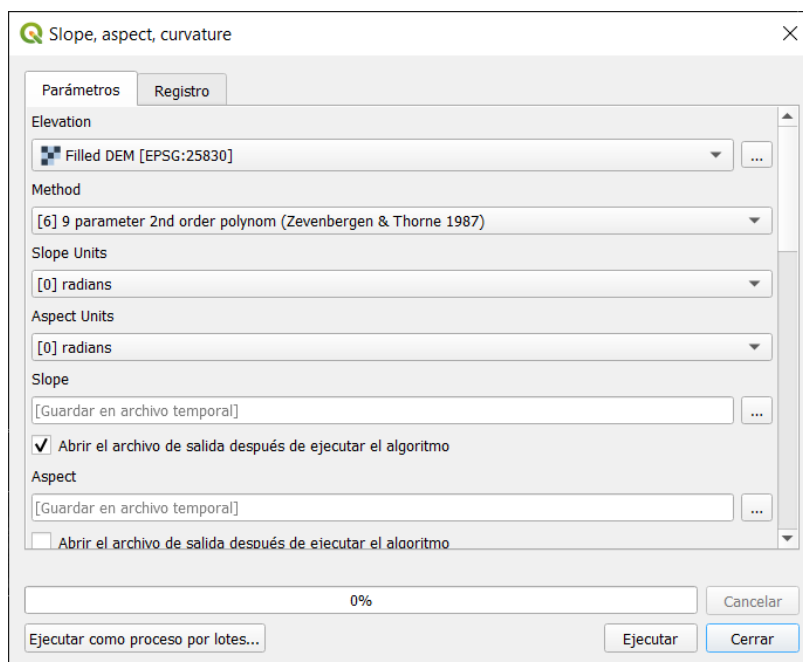


Figura 15. Herramienta *Slope, aspect, curvature*.

Archivo de pendientes en radianes:

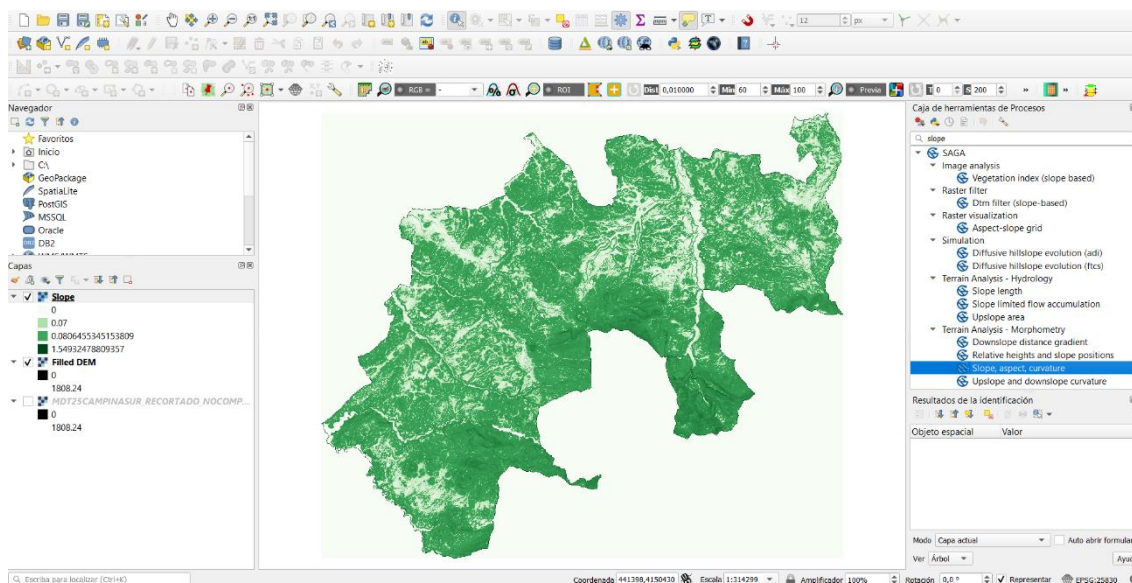


Figura 16. Pendientes en radianes en QGIS.

Ahora debemos obtener las cuencas de captación o cuencas hidrográficas totales (Total Catchment Area). Usamos otra herramienta de SAGA, dentro de Terrain Analysis – Hydrology: *Catchment Area*. Seleccionamos nuestro MDT rellenado en la opción *Elevation*, dejamos el método por defecto (*deterministic 8*). Guardamos el archivo de cuencas de captación totales.

Tras esto, debemos obtener las cuencas de captación específicas (*Specific Catchment Area*), que son las que se usan en el paso siguiente para obtener el factor LS. Abrimos la herramienta *Flow width and specific catchment area*, también dentro de SAGA.

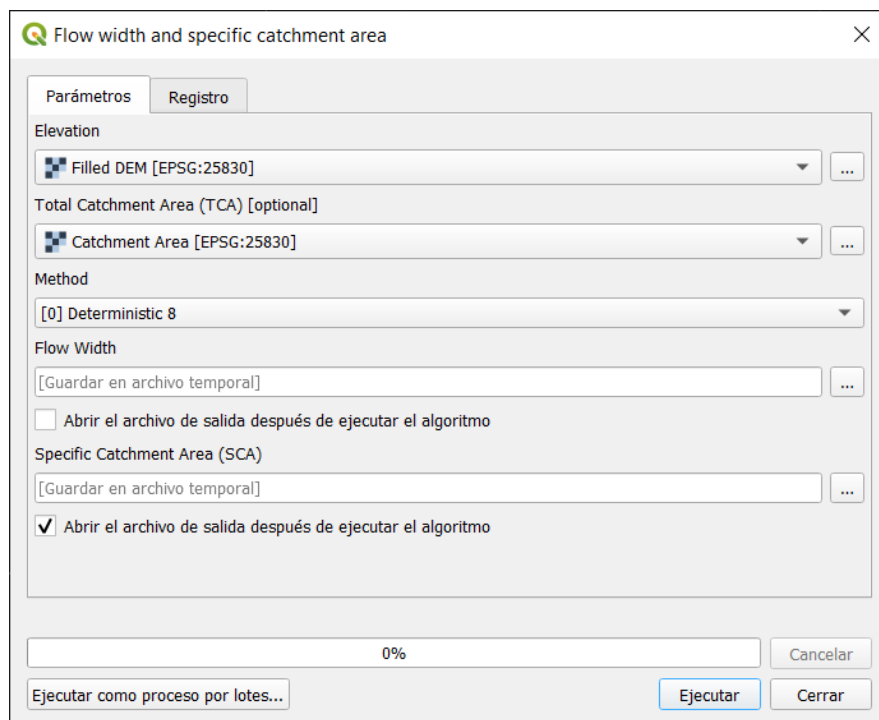


Figura 17. *Specific Catchment Area*.

En *Elevation* seleccionamos nuestro MDT rellenado, en *Total Catchment Area* seleccionamos el archivo obtenido en el paso anterior. Dejamos el método por defecto. Guardamos el archivo de *Specific Catchment Area (SCA)* o cuenca de captación específica.

Finalmente procedemos a hallar el factor topográfico LS de nuestra zona con la herramienta *LS Factor* dentro de Terrain Analysis – Hydrology. En *Slope* seleccionamos nuestra pendiente (en radianes) y en *Catchment Area* seleccionamos

la *Specific Catchment Area* del paso anterior. *Area to Length Conversion* se deja igual y en método seleccionamos *Desmet & Govers 1996* (se ha comprobado que este método funciona mejor con zonas de topografía compleja como la zona de estudio).

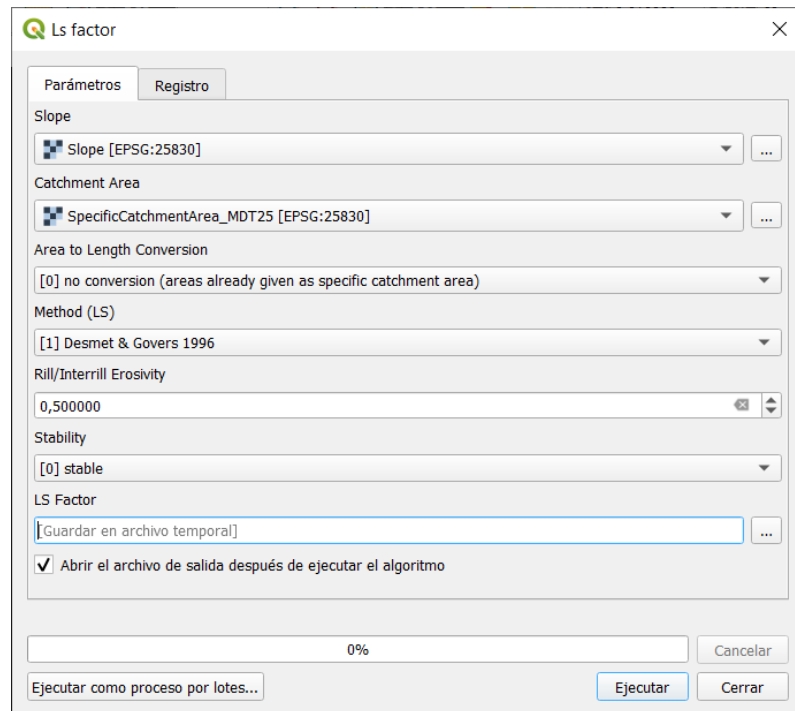


Figura 18. Opciones de la herramienta LS factor de SAGA en QGIS

Debemos hacer estas operaciones con cada uno de los Modelos Digitales de Elevación. Los resultados se pueden ver a continuación. Se aprecia que el valor del factor LS es mayor en las zonas con topografía abrupta, en las zonas de sierra del sur y sureste de la comarca.

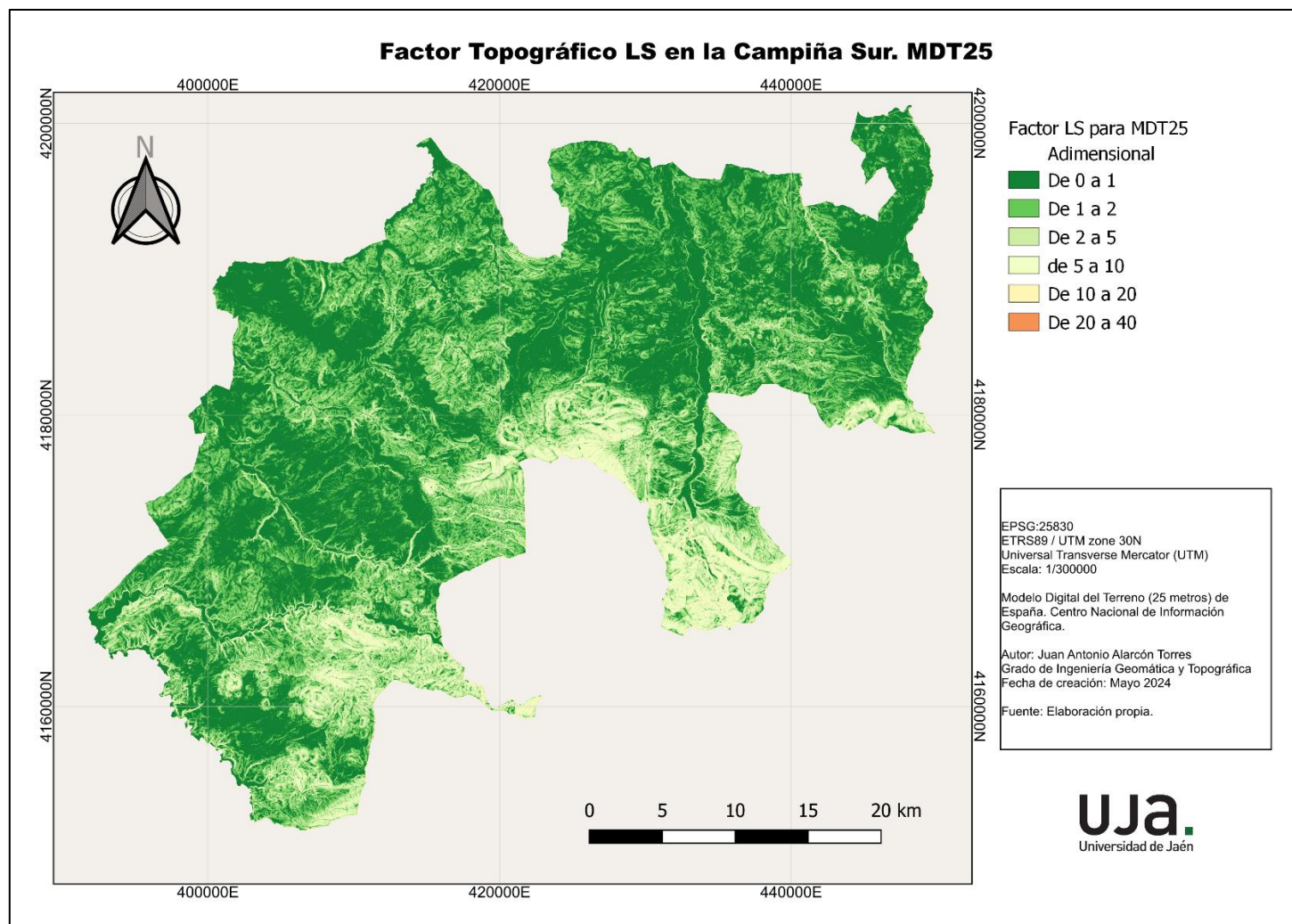


Figura 19. Factor LS para MDT25

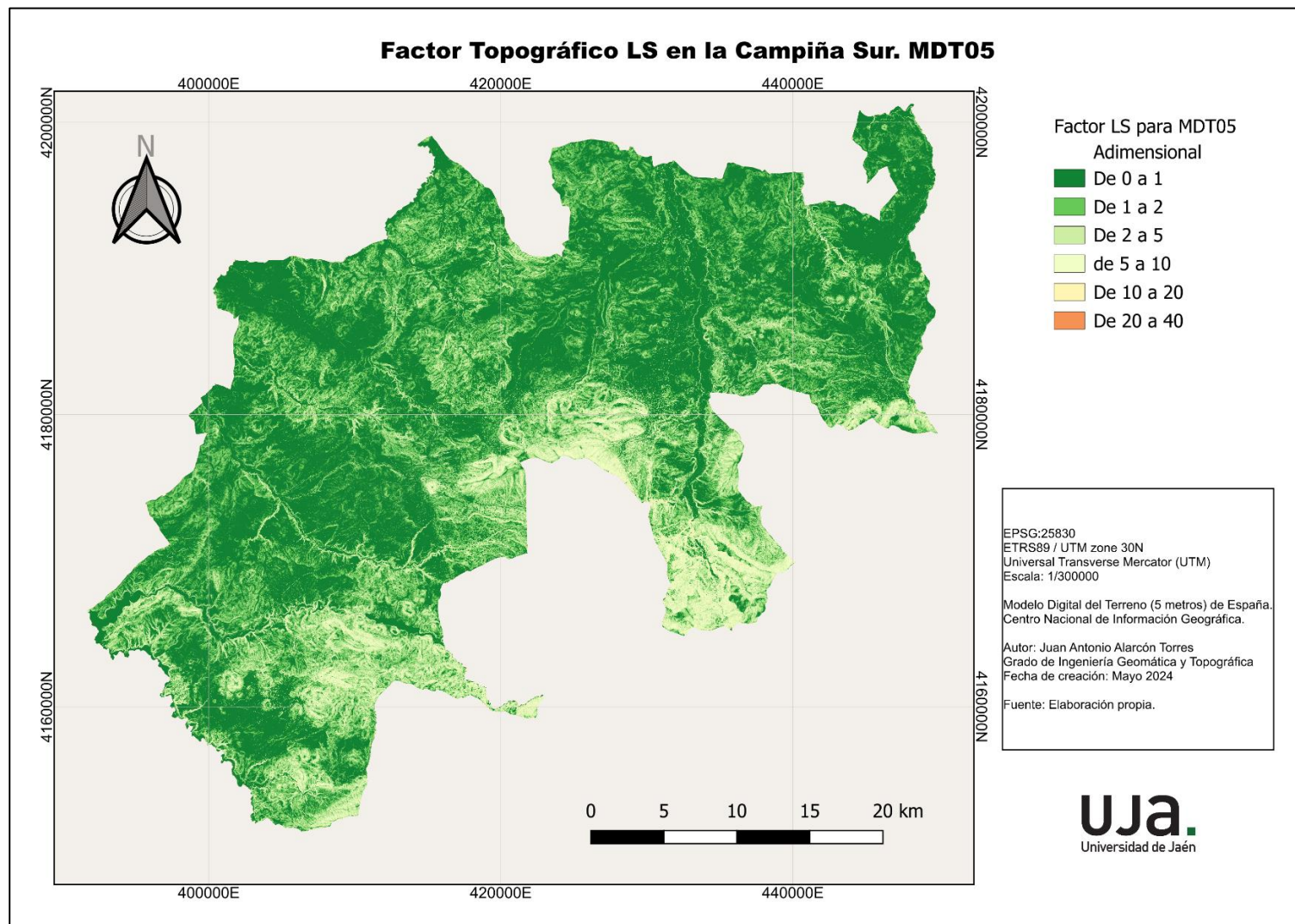


Figura 20. Factor LS para MDT05.

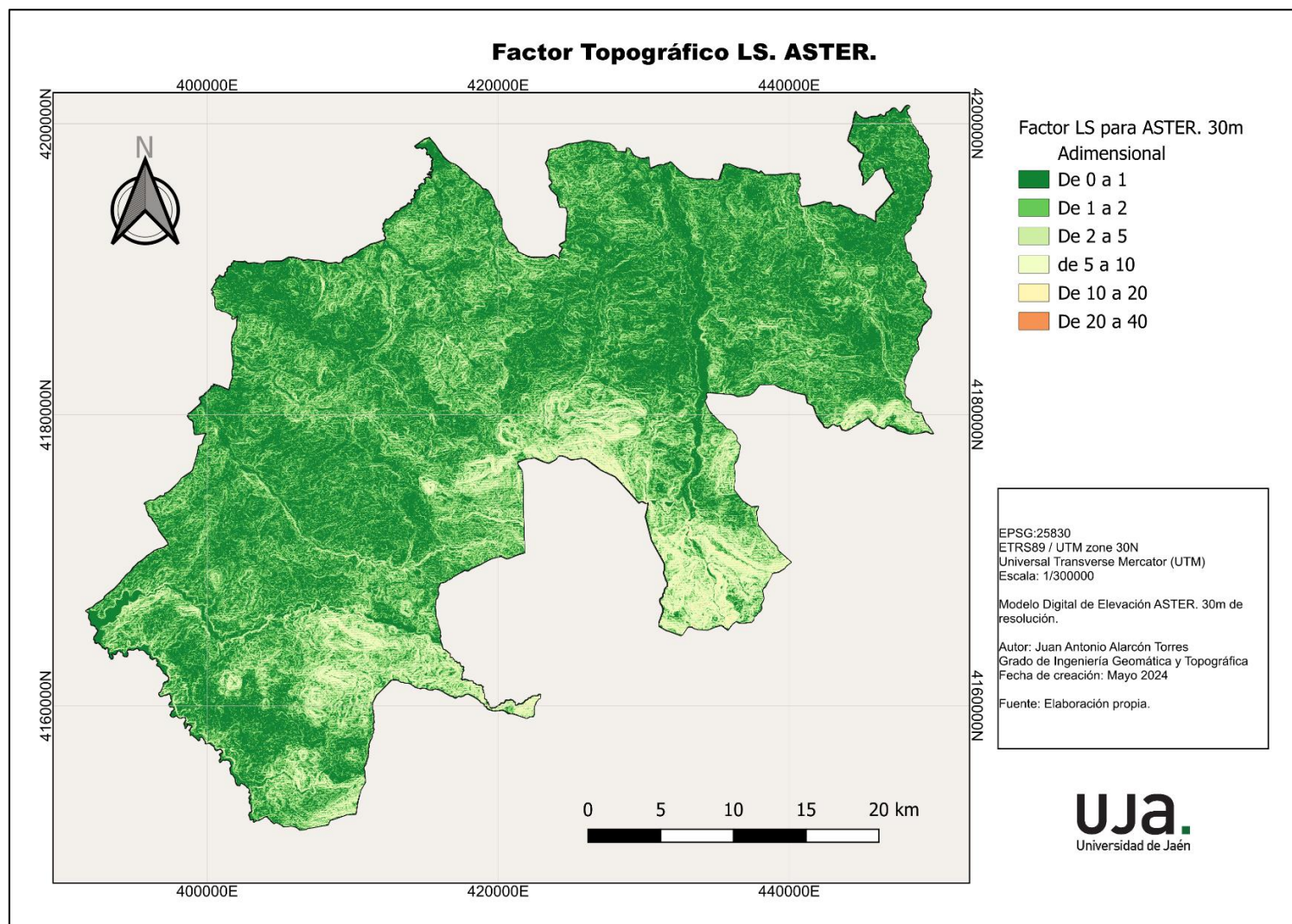


Figura 21. Factor LS para ASTER

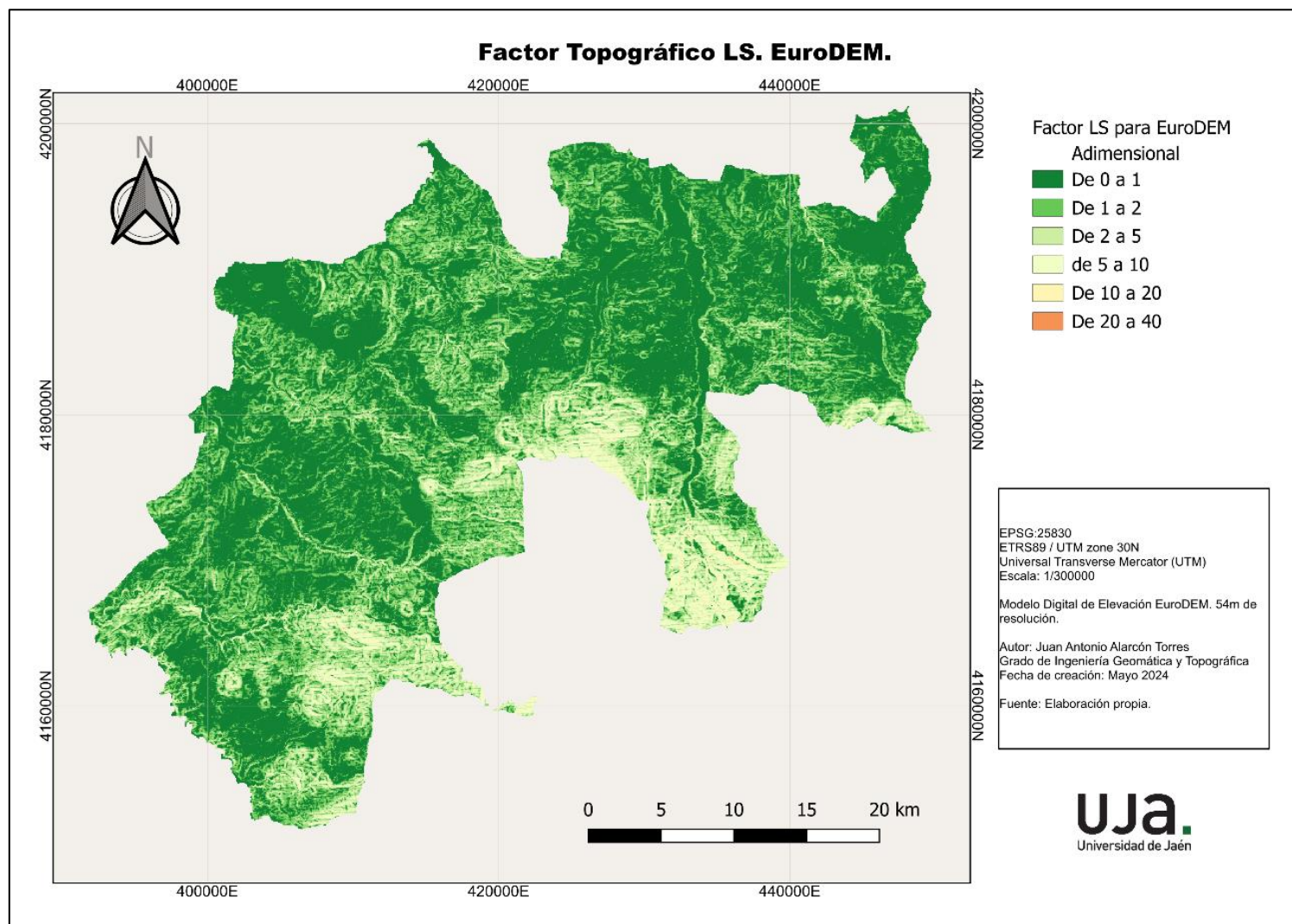


Figura 22. Factor LS para EuroDEM

5.4.4. *Factor C: Cubierta del suelo.*

Se trata del grado de protección que un determinado tipo de cobertura vegetal otorga a los suelos. Las cubiertas vegetales ayudan a aminorar los efectos de la erosión hídrica laminar y en regueros en los suelos. Este factor representa la efectividad de la cobertura vegetal como protección del suelo ante la energía de impacto de las gotas de precipitaciones y la fuerza de la escorrentía superficial. El valor de este factor varía entre 0 y 1, 0 cuando la protección del suelo vegetal es alta (vegetación frondosa, cubierta vegetal abundante, etc.) los valores se acercan al 0, y cuando la cobertura es escasa (roquedo, suelo desnudo, etc.) los valores se acercan al 1. Es un factor adimensional.

Hay múltiples formas de hallar este factor. Para el presente trabajo se ha descargado el mapa de coberturas y usos del suelo del portal de Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA), cuyos datos provienen del proyecto europeo Corine Land Cover de 2012. El mapa tiene una escala de 1:100000 y la unidad mínima cartografiada es de 25 Has. Y para los valores del factor C se ha recurrido a las publicaciones del Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) del mapa de estados erosivos para la cuenca del Sur de España de 1989:

Uso del suelo	Factor C
Bosques de frondosas	0.086
Tierras de labor en secano	0.435
Roquedo	1
Pastizales naturales	0.13
Frutales	0.525
Tejido urbano discontinuo	1
Tejido urbano continuo	1
Terrenos regados permanentemente	0.507
Matorral boscoso de transición	0.153
Láminas de agua	0
Espacios con vegetación escasa	0.9
Olivares	0.525
Matorrales esclerófilos	0.153
Mosaico de cultivos	0.435
Bosque mixto	0.086
Zonas en construcción	1
Zonas industriales o comerciales	1
Prados y Praderas	0.13

Sistemas agroforestales	0.08
Bosques de coníferas	0.086
Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural	0.435
Redes viarias, ferroviarias y terrenos asociados	1
Zonas de extracción minera	1
Instalaciones deportivas y recreativas	1
Viñedo	0.525
Cursos de agua	0

Tabla 5. Valores del Factor C. Fuente: ICONA 1989

El proceso ha sido similar al del factor K. En QGIS, abrimos el mapa vectorial de coberturas y usos del suelo mencionado anteriormente. Lo recortamos de acuerdo a nuestra zona de estudio. Abrimos la tabla de atributos, creamos un nuevo campo llamado Factor C, vamos añadiendo cada uno de los valores para cada uno de los usos y guardamos los cambios. A continuación rasterizamos esta capa usando el campo Factor C como atributo a rasterizar. Creamos dos rásters, uno con un tamaño de celda de 25 metros y otro con tamaño de celda de 5 metros. En el mapa se puede comprobar que la mayor parte del territorio está cubierta por olivares.

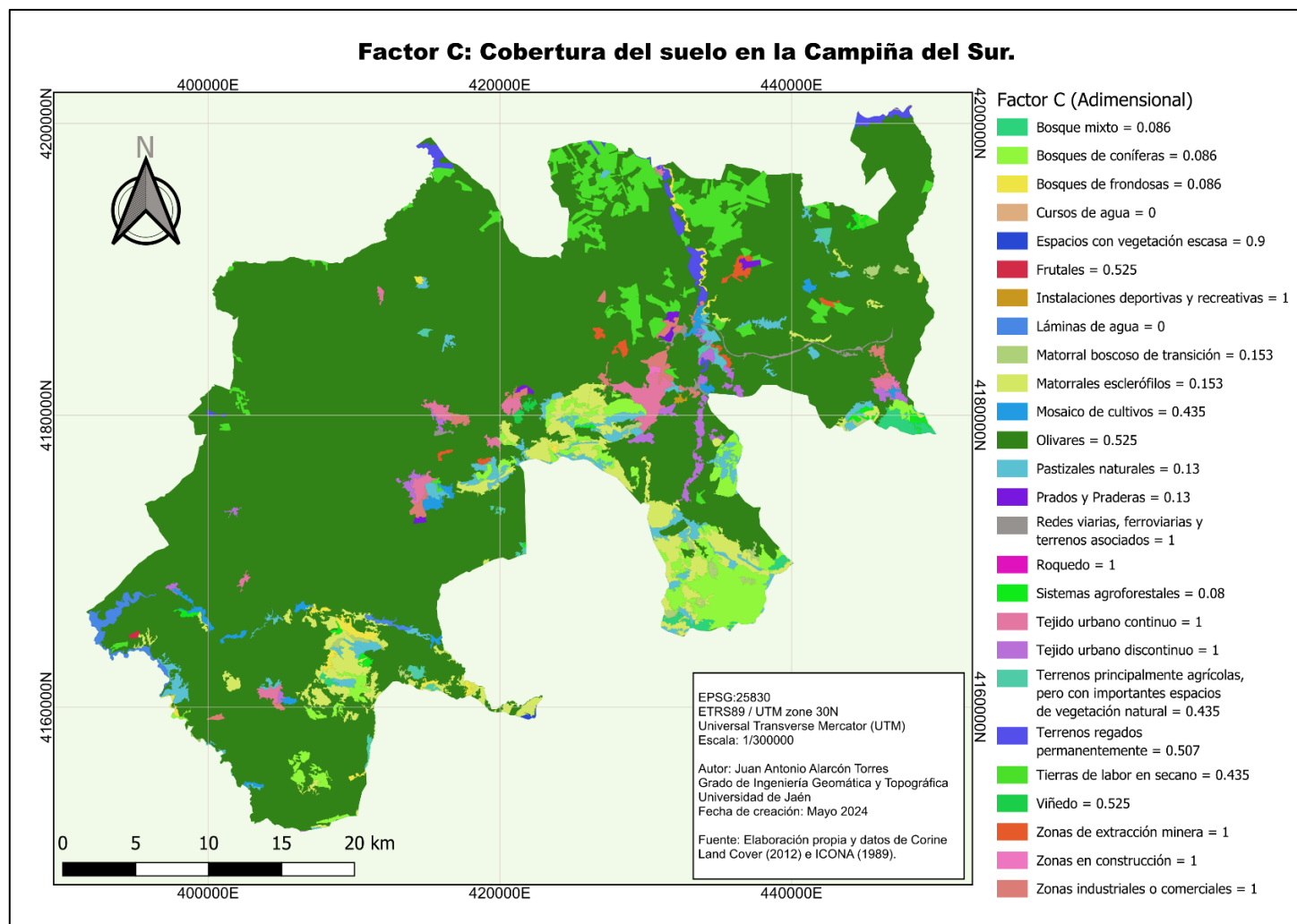


Figura 23. Mapa del factor C. Fuente: Elaboración propia

5.4.5. Factor P: Prácticas de manejo o conservación.

Con este factor se evalúa la efectividad del control de la erosión lograda tras emplear medidas de conservación o manejo. Las prácticas de conservación son los cultivos a nivel (o contouring), los cultivos en fajas alternantes (strip cropping) y los cultivos en terraza (o terracing). Del mismo modo que el factor C, este factor es adimensional y toma valores entre 0 y 1 (0 supone más conservación y 1 supone la no existencia de prácticas de manejo). La pendiente del terreno en el que se encuentran los cultivos también influye en este factor. Para obtener el factor P de manera precisa, es habitual hacer un estudio de campo en el que se detalla el tipo de práctica, su perímetro y la pendiente media donde se desarrollan.

Como la zona de este TFG es tan extensa, con tantos tipos de parcelas diferentes, con diferentes cultivos, zonas boscosas, zonas urbanizadas, zonas de sierra, etcétera, y no se conocen con exactitud las posibles prácticas de conservación de cada una de las parcelas, se ha decidido tomar un valor de 1 para toda la comarca.

Sin embargo, este factor no es difícil de calcular. El proceso sería el siguiente: Por ejemplo, tenemos una parcela de olivar en la que los olivos están plantados a nivel (las hileras se alinean con las curvas de nivel del terreno), como esta:



Figura 24. Ejemplo de olivos a nivel.

Teniendo nuestro MDT de la zona, en QGIS podemos obtener su mapa de pendientes en porcentajes (con la herramienta de Análisis ráster *Pendiente*, de GDAL). A continuación, realizamos una reclasificación por tabla del ráster de pendientes en la que asignamos un valor de factor P a cada tipo de pendiente, como los de esta tabla (Shin, 1999), tomamos los valores de los cultivos a nivel:

Pendiente (%)	Cultivos a nivel	Cultivos en fajas	Cultivos en terrazas
0.0 - 7.0	0.55	0.27	0.10
7.0 - 11.3	0.60	0.30	0.12
11.3 - 17.6	0.80	0.40	0.16
17.6 - 26.8	0.90	0.45	0.18
26.8>	1.00	0.50	0.20

Tabla 6. Valores de P según la pendiente y la práctica de manejo. Fuente: Shin, 1999.

Entonces obtenemos un fichero ráster con los valores del factor P para nuestra parcela, que posteriormente podemos multiplicar con el resto de factores en la ecuación de USLE.

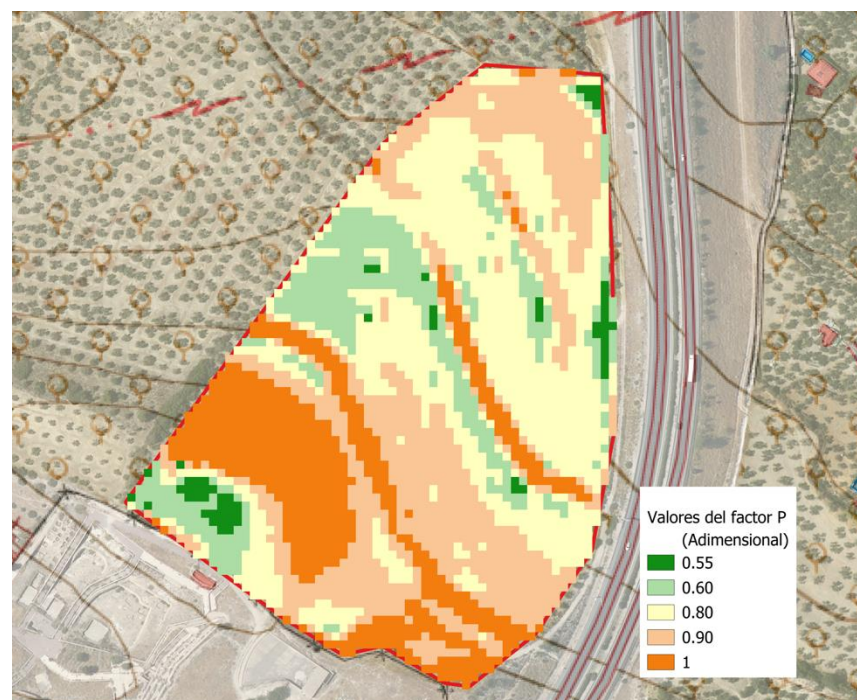


Figura 25. Valores de P para una parcela con posibles cultivos a nivel. Fuente: Elaboración propia.

6. RESULTADOS

6.1. Erosión potencial.

Es el tipo de erosión que teóricamente ocurriría considerando únicamente las características climáticas, geológicas y topográficas, es decir, los factores R, K y LS, respectivamente, y sin considerar la cubierta vegetal ni las modificaciones de la misma realizadas por actividades humanas (es decir, sin los factores C y P). Por tanto, la erosión potencial es orientativa. Nos da una aproximación de lo que podría ocurrir en una determinada área si la cubierta vegetal desapareciera completamente. El mapa de erosión potencial nos indica qué zonas sufrirían especialmente los efectos de la erosión hídrica en regueros y laminar:

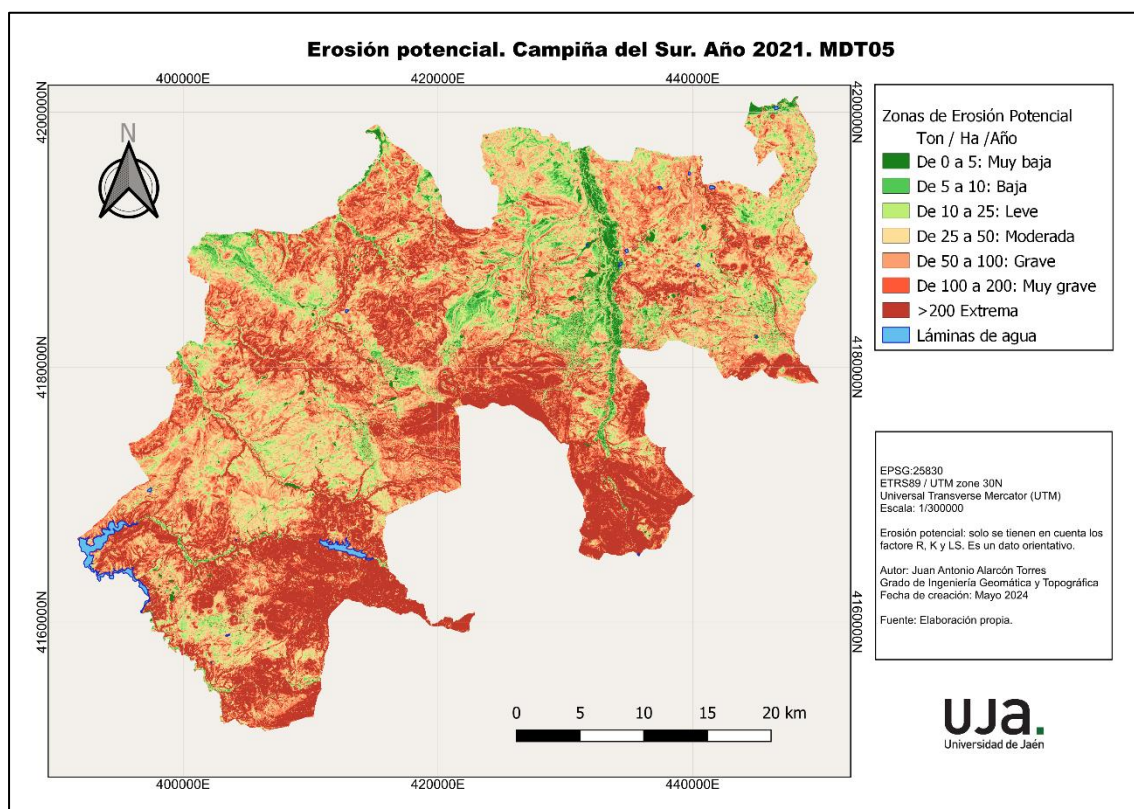


Figura 26. Mapa de erosión potencial. Fuente: elaboración propia.

Para obtener estos valores hemos multiplicado los rásters de los factores R, K y LS en la calculadora ráster de QGIS. Las zonas en rojo oscuro nos indican los lugares que sufrirían especialmente la erosión en caso de la desaparición de la cubierta vegetal. Son las zonas de especial consideración en las que deberían emplearse

prácticas de conservación de los suelos, mejores prácticas de manejo e implantarse planes de reforestación. Como ya se ha mencionado, estos datos son orientativos.

6.2. Erosión hídrica real anual con USLE.

Mediante la calculadora ráster de QGIS se realiza la multiplicación de todos los factores y obtenemos el factor A de pérdidas de suelo para el año 2021, en Toneladas / Hectárea / año. $A = R * K * LS * C * P$

El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y algunos gobiernos autonómicos realizan la clasificación de las pérdidas de suelo por erosión laminar y regueros en siete intervalos, también conocidos como niveles erosivos. En este Trabajo se ha seguido esa misma clasificación:

- De 0 a 5 T/Ha·año: Nivel de erosión muy bajo. Las pérdidas de suelo pueden ser tolerables. No hay erosión neta apreciable.
- De 5 a 10 T/Ha·año: Nivel de erosión bajo. Hay pérdidas de suelo que aún podrían ser calificadas como tolerables. Es posible que no haya erosión neta.
- De 10 a 25 T/Ha·año: Nivel de erosión leve. Aunque no se aprecia a simple vista, hay erosión presente.
- De 25 a 50 T/Ha·año: Nivel de erosión moderado. Hay erosión. Puede ser poco perceptible al ojo humano.
- De 50 a 100 T/Ha·año: Nivel de erosión grave. Existe erosión y se puede observar en el terreno.
- De 100 a 200 T/Ha·año: Nivel de erosión muy grave. Existe erosión y es claramente visible.
- Más de 200 T/Ha·año: Casos extremos. Zonas donde la erosión se manifiesta claramente y es observable a simple vista.

6.2.1. Pérdidas de suelo USLE con MDT25.

Pérdida de suelo USLE en la Campiña Sur usando el MDT25 de 25 metros de resolución:

Pérdida de suelo (T/Ha/año)	Hectáreas	Porcentaje de superficie %
De 0 a 5	4110.625	3
De 5 a 10	6595.188	5
De 10 a 25	27851.375	20
De 25 a 50	39522.750	29
De 50 a 100	35672.000	26
De 100 a 200	19174.750	14
Más de 200	4924.250	3

Tabla 7. Pérdida de suelo USLE para MDT25. Fuente: elaboración propia

Gráfico con los porcentajes de la superficie de la comarca que ocupa cada intervalo erosivo:

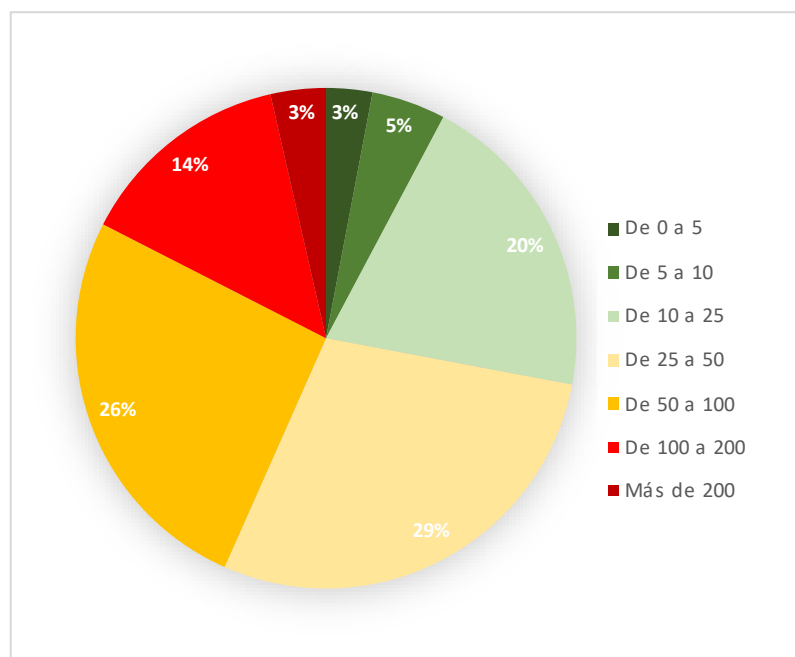


Figura 27. Porcentajes de la superficie que ocupa cada intervalo erosivo. MDT25. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se puede ver el mapa de pérdida de suelo de la comarca.

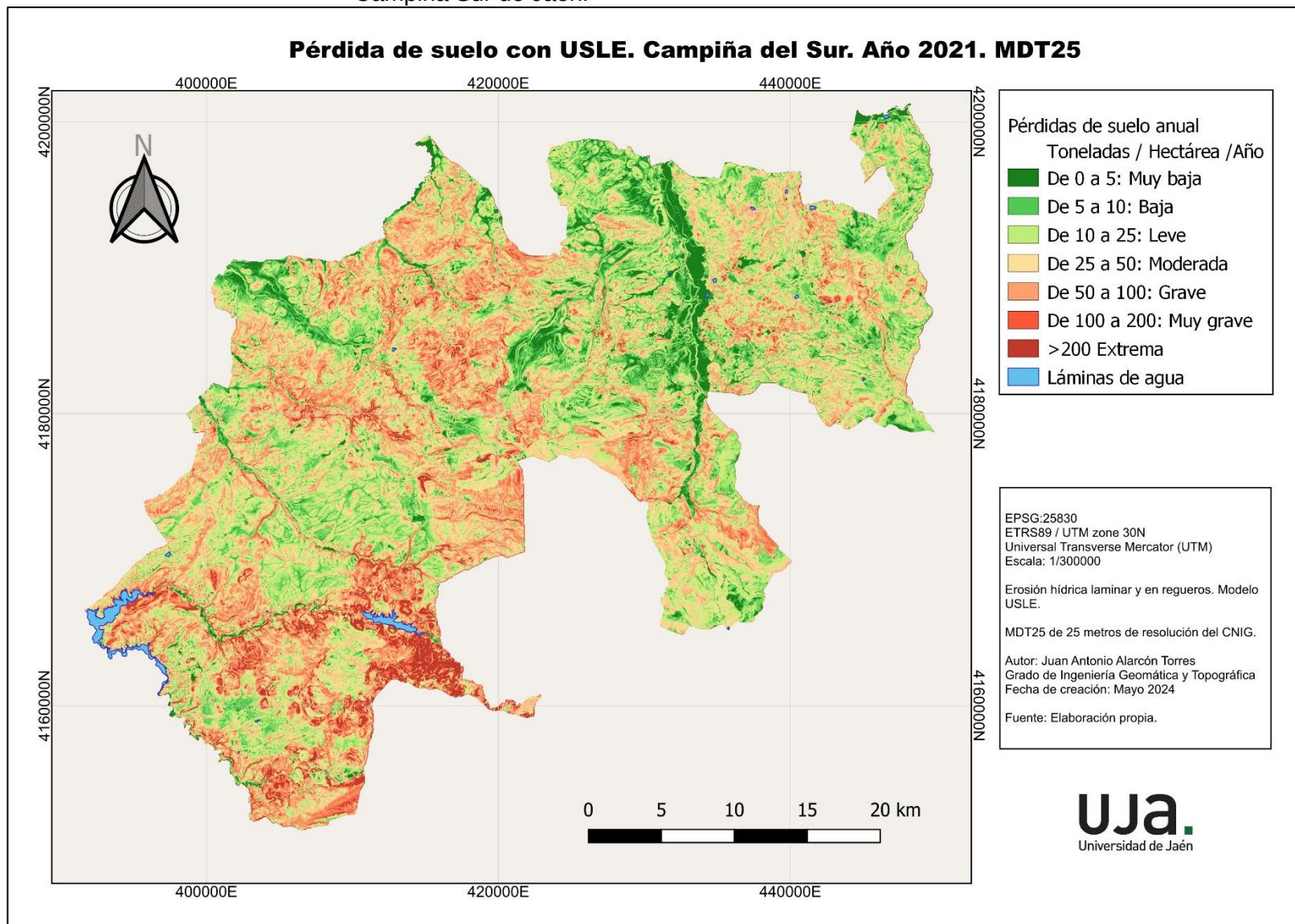


Figura 28. Pérdida de suelo USLE con MDT25 en la Campiña del Sur. Fuente: Elaboración propia.

6.2.2. Pérdidas de suelo USLE con MDT05.

Pérdida de suelo USLE en la Campiña Sur usando el MDT05 de 5 metros de resolución:

Pérdida de suelo (T/Ha/año)	Hectáreas	Porcentaje de superficie %
De 0 a 5	4599.383	3
De 5 a 10	6275.005	5
De 10 a 25	25872.945	19
De 25 a 50	37637.315	27
De 50 a 100	35551.878	26
De 100 a 200	21051.785	15
Más de 200	6837.733	5

Tabla 8. Pérdida de suelo USLE para MDT05. Fuente: elaboración propia

Gráfico con los porcentajes de la superficie de la comarca que ocupa cada intervalo erosivo:

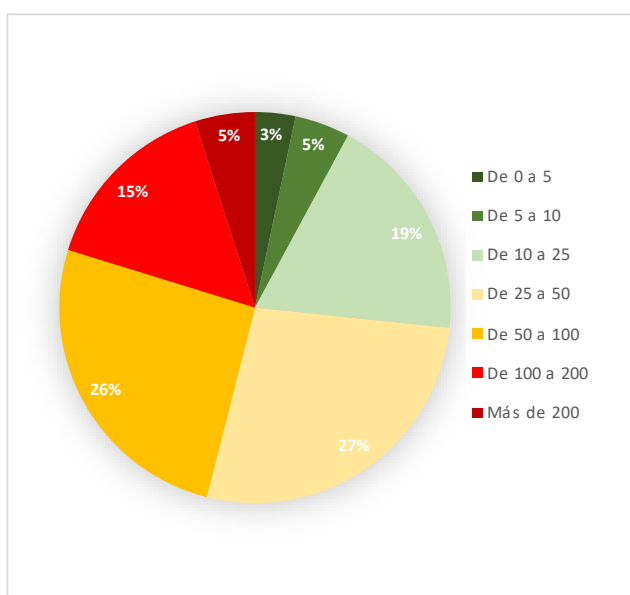


Figura 29. Porcentajes de la superficie que ocupa cada intervalo erosivo. MDT05. Fuente: Elaboración propia.

Mapa USLE para el MDT05:

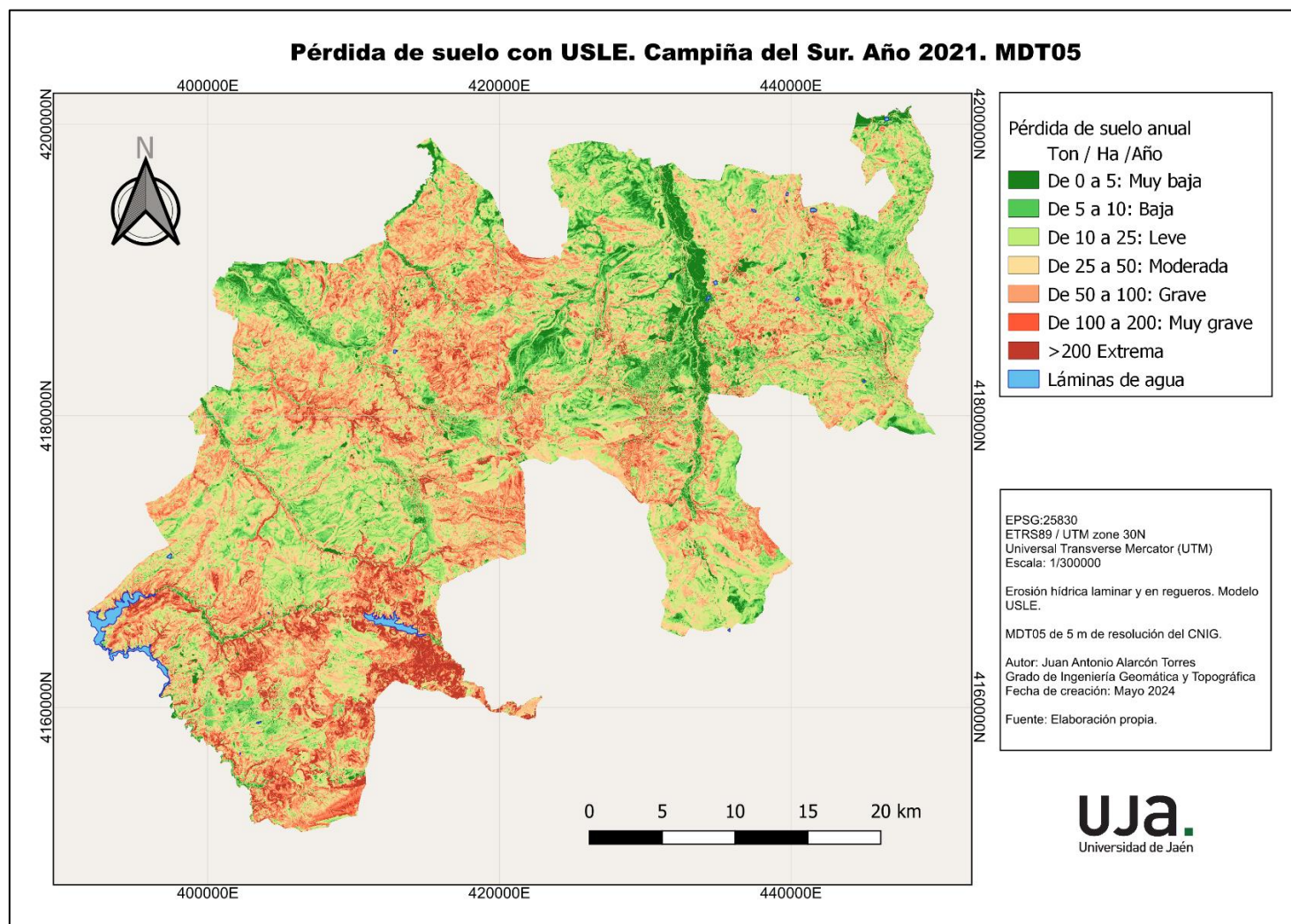


Figura 30. Pérdida de suelo USLE con MDT05 en la Campiña del Sur. Fuente: Elaboración propia.

6.2.3. Pérdidas de suelo USLE con ASTER Global DEM.

Pérdida de suelo USLE en la Campiña Sur usando el Modelo Digital de Elevación
ASTER Global DEM de 30 metros de resolución:

Pérdida de suelo (T/Ha/año)	Hectáreas	Porcentaje de superficie %
De 0 a 5	4941.960	4
De 5 a 10	6276.235	5
De 10 a 25	26097.999	19
De 25 a 50	37009.402	27
De 50 a 100	37598.916	27
De 100 a 200	20958.368	15
Más de 200	4102.399	3

Tabla 9. Porcentajes de la superficie que ocupa cada intervalo erosivo. ASTER Global DEM. Fuente: Elaboración propia.

Gráfico con los porcentajes de la superficie de la comarca que ocupa cada intervalo erosivo:

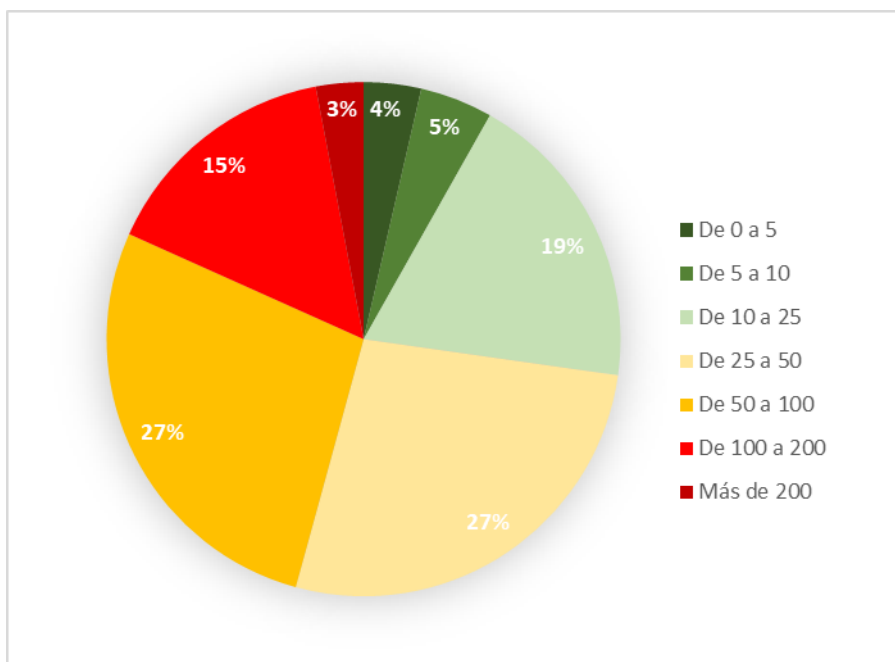


Figura 31. Porcentajes de la superficie que ocupa cada intervalo erosivo. ASTER. Fuente: Elaboración propia.

Mapa USLE para ASTER Global DEM:

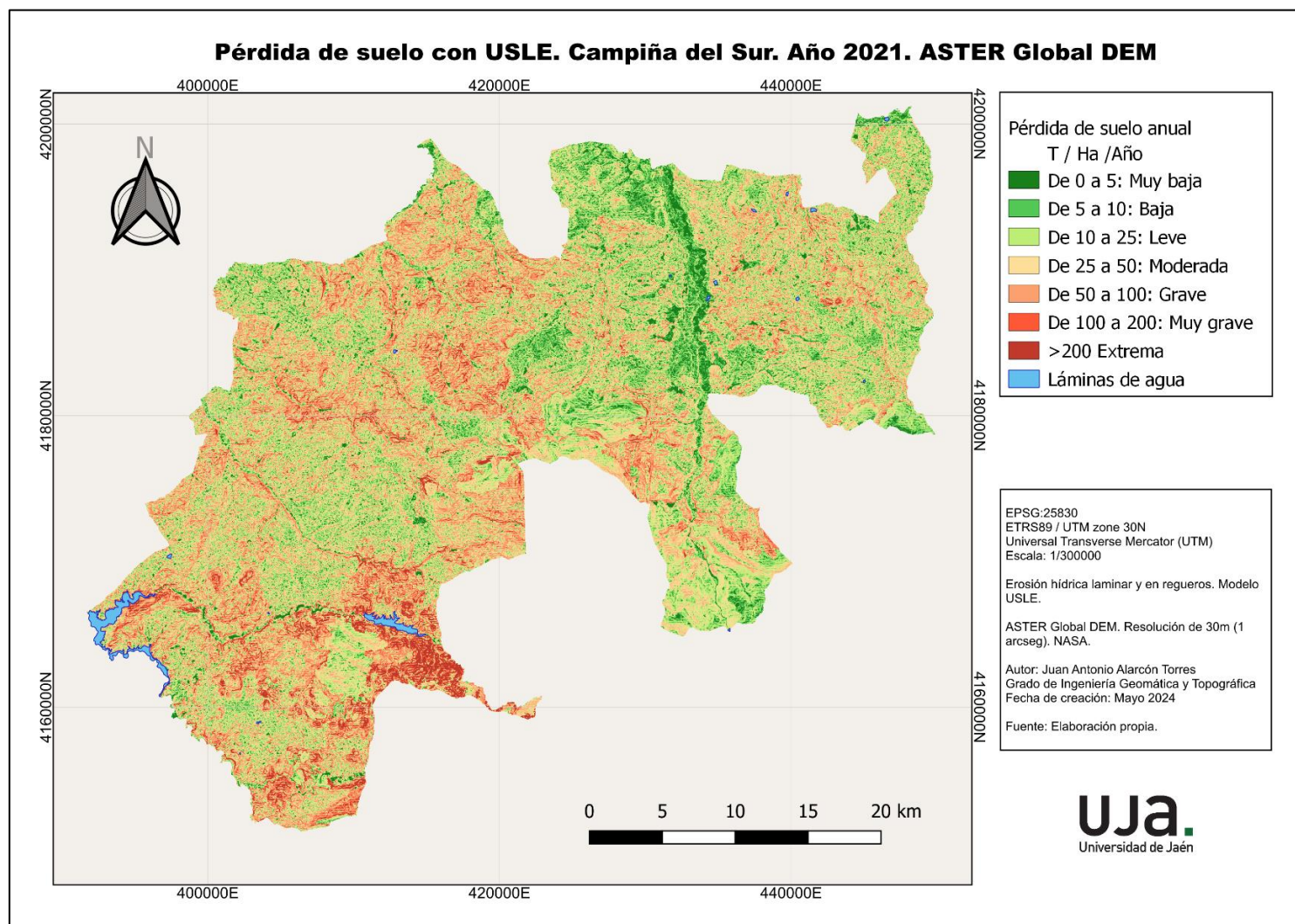


Figura 32. Pérdida de suelo USLE con ASTER en la Campiña del Sur. Fuente: Elaboración propia.

6.2.4. Pérdidas de suelo USLE para EuroDEM.

Pérdida de suelo USLE en la Campiña Sur usando el EuroDEM de aproximadamente 60 metros de resolución:

Pérdida de suelo (T/Ha/año)	Hectáreas	Porcentaje de superficie %
De 0 a 5	5997.760	4
De 5 a 10	9286.341	7
De 10 a 25	33788.769	25
De 25 a 50	39348.564	29
De 50 a 100	31051.985	23
De 100 a 200	13965.083	10
Más de 200	2550.670	2

Figura 33. Porcentajes de la superficie que ocupa cada intervalo erosivo. EuroDEM. Fuente: Elaboración propia.

Gráfico con los porcentajes de la superficie de la comarca que ocupa cada intervalo erosivo:

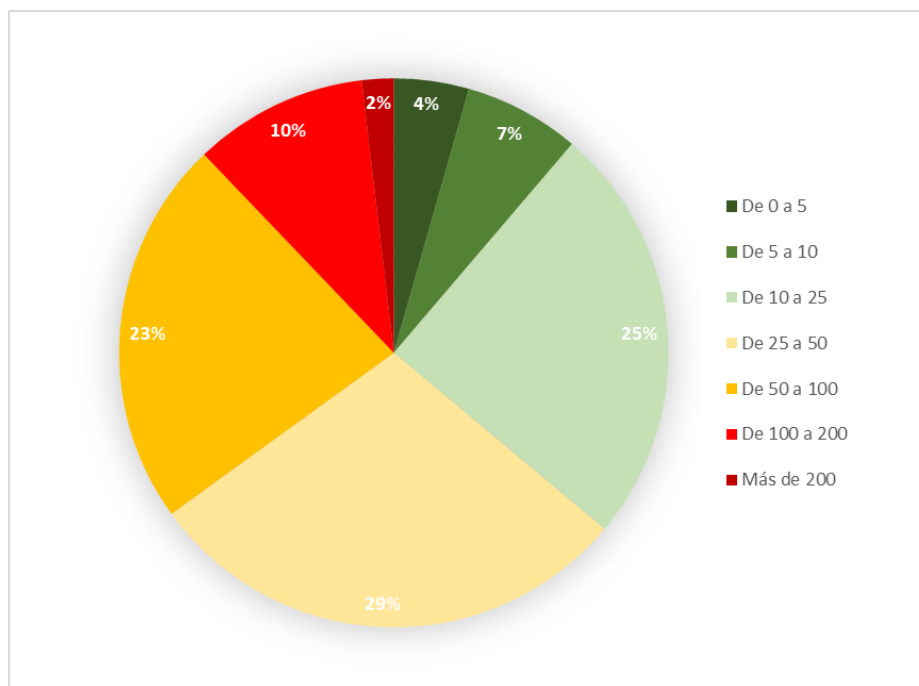


Figura 34. Porcentajes de la superficie que ocupa cada intervalo erosivo. EURODEM. Fuente: Elaboración propia.

Mapa USLE para EuroDEM:

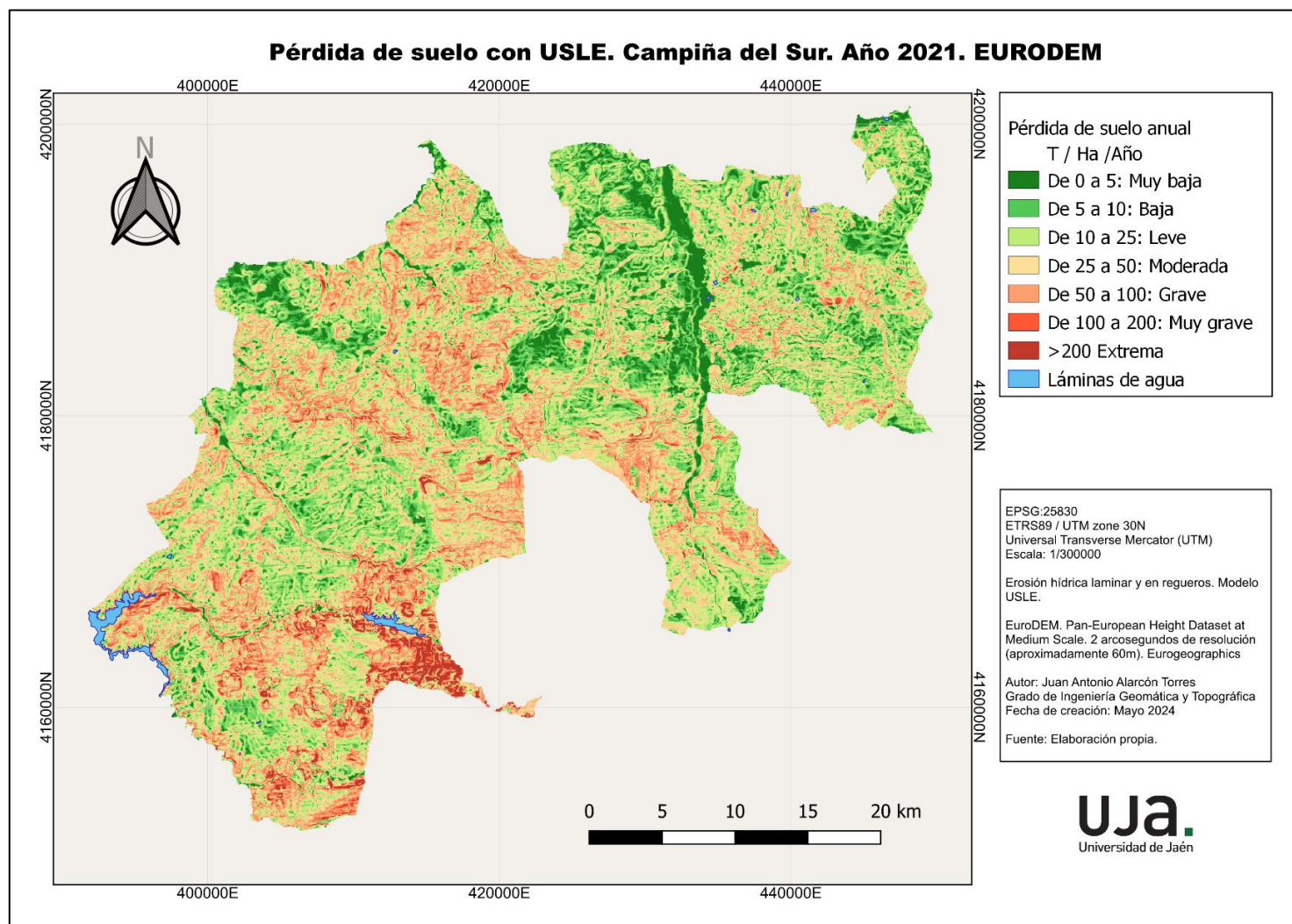


Figura 35. Pérdida de suelo USLE con EuroDEM en la Campiña del Sur. Fuente: Elaboración propia.

7. ANÁLISIS

7.1. Análisis general de la pérdida de suelo en la Campiña Sur.

Tras realizar los cálculos y obtener la cartografía de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la comarca, se puede comprobar que hay una gran cantidad de zonas afectadas por la erosión. Mirando a los resultados obtenidos con cada uno de los Modelos Digitales de elevaciones se puede ver que en torno a la mitad de la comarca tiene unos niveles de pérdidas de suelo que van de moderadas a graves, es decir de 25 a 100 toneladas por hectárea y año. Los niveles de erosión leve se sitúan en torno a un 20 por ciento de la comarca. En la siguiente tabla se pueden ver los datos en conjunto:

	MDT25	MDT05	ASTER	EURODEM	
Pérdida de suelo (T/Ha/año)	Hectáreas	Hectáreas	Hectáreas	Hectáreas	Promedio
De 0 a 5	4110.625	4599.383	4941.960	5997.760	4912.432
De 5 a 10	6595.188	6275.005	6276.235	9286.341	7108.192
De 10 a 25	27851.375	25872.945	26097.999	33788.769	28402.772
De 25 a 50	39522.750	37637.315	37009.402	39348.564	38379.508
De 50 a 100	35672.000	35551.878	37598.916	31051.985	34968.695
De 100 a 200	19174.750	21051.785	20958.368	13965.083	18787.497
Más de 200	4924.250	6837.733	4102.399	2550.670	4603.763
Total	137850.9375	137826.0425	136985.2795	135989.1724	137162.858
Pérdida de suelo (T/Ha/año)	Porcentaje de superficie %	Porcentaje de superficie %	Porcentaje de superficie %	Porcentaje de superficie %	Promedio
De 0 a 5	3	3	4	4	3.5
De 5 a 10	5	5	5	7	5.5
De 10 a 25	20	19	19	25	20.75
De 25 a 50	29	27	27	29	28
De 50 a 100	26	26	27	23	25.5
De 100 a 200	14	15	15	10	13.5
Más de 200	3	5	3	2	3.25
Total	100	100	100	100	100

Tabla 10. Datos de erosión en conjunto.

Menos del 10 por ciento de la comarca tiene unos niveles saludables y tolerables de erosión. Las tasas de erosión más bajas se dan en las inmediaciones del río Guadalbullón (en toda su longitud), también al oeste de la comarca, concretamente al noroeste del término municipal de Torredonjimeno y también en la zona centro-este del término municipal de Torredelcampo. Estas zonas tienen en común un factor topográfico LS bajo, caracterizado por bajas pendientes y zonas de llanura.

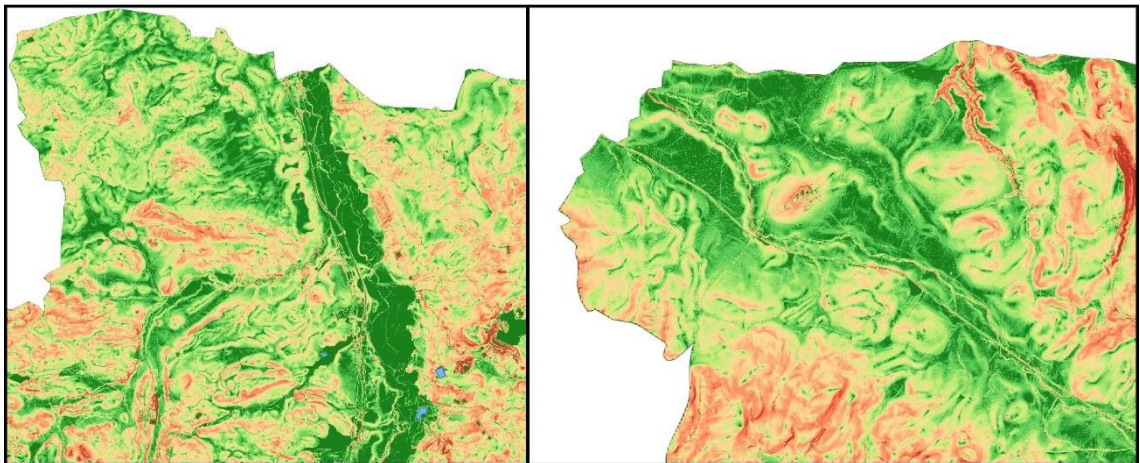


Figura 36. Zonas con erosión baja. Vega del río Guadalbullón (izquierda) y noroeste del término municipal de Torredonjimeno (derecha). Fuente: Elaboración propia.

Por el lado contrario, las zonas con la erosión hídrica laminar y en regueros más alta se encuentran en zonas de topografía abrupta y elevadas pendientes. Se trata de la Sierra de la Grana, al este de Martos, la Sierra de la Caracolera, al sur de Martos. Son especialmente graves en la zona al sur del río Víboras, donde se dan las pérdidas de suelo más altas de toda la comarca.

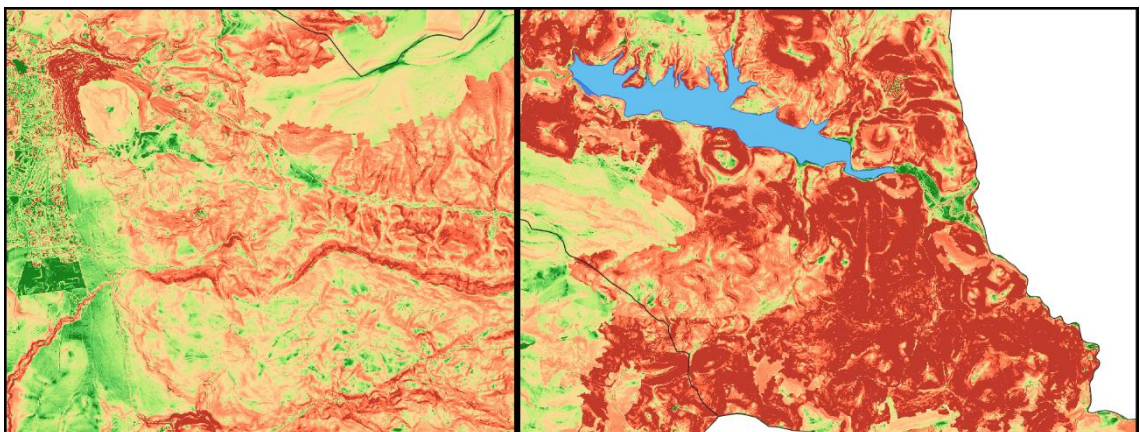


Figura 37. Zonas con pérdidas de suelo altas. Sierras al este de Martos (derecha) y zonas al sur del río Víboras (izquierda). Fuente: Elaboración propia.

Las coberturas del suelo en las áreas con altas pérdidas de suelo son cultivos de olivar y matorrales esclerófilos. En su composición litológica se encuentran margas, margocalizas, calizas, margas yesíferas y areniscas. El factor de erosividad R también es más alto en estas áreas durante el año 2021.

Cabe destacar que en toda la comarca las pérdidas de suelo son más bajas en zonas donde la cubierta vegetal de suelo es abundante. Como ya hemos sabido el abundante suelo vegetal frena la escorrentía y en consecuencia disminuye los efectos de la erosión hídrica laminar y en regueros.

7.2. Análisis del uso de los distintos MDE en los cálculos

En el cálculo de la USLE mediante SIG, los MDE intervienen principalmente en la obtención del factor topográfico LS. En general, cuanto mayor es la resolución del MDE más precisos serán los datos del factor LS de la zona y más parecidos a la realidad. Gráficamente, a simple vista se puede comprobar que el empleo del Modelo Digital de Elevación con mayor resolución nos puede dar unos resultados más detallados. Si observamos la cartografía de pérdida de suelo obtenida al usar el MDT05 para calcular el factor LS, podemos ver detalles considerablemente definidos de la orografía y las características de la zona de la zona. Por ejemplo, si miramos de cerca podemos ver calles, zonas de cultivos diferenciadas, detalles de la topografía, etcétera.



Figura 38. La ciudad de Jaén en el mapa USLE del MDT05. Fuente: Elaboración propia.

Estos detalles no se aprecian tanto en los MDE de menor resolución. Esto nos puede dar una idea de que podríamos utilizar MDE de alta resolución para estimar con alta precisión la erosión en zonas específicas de gran importancia, ya sea para agricultura de precisión, seguimiento y conservación de espacios protegidos, etcétera. Para terminar de comentar el aspecto gráfico, se destaca que al hacer los cálculos con los MDE de más baja resolución (EuroDEM) se produce un desagradable efecto de bandeo:

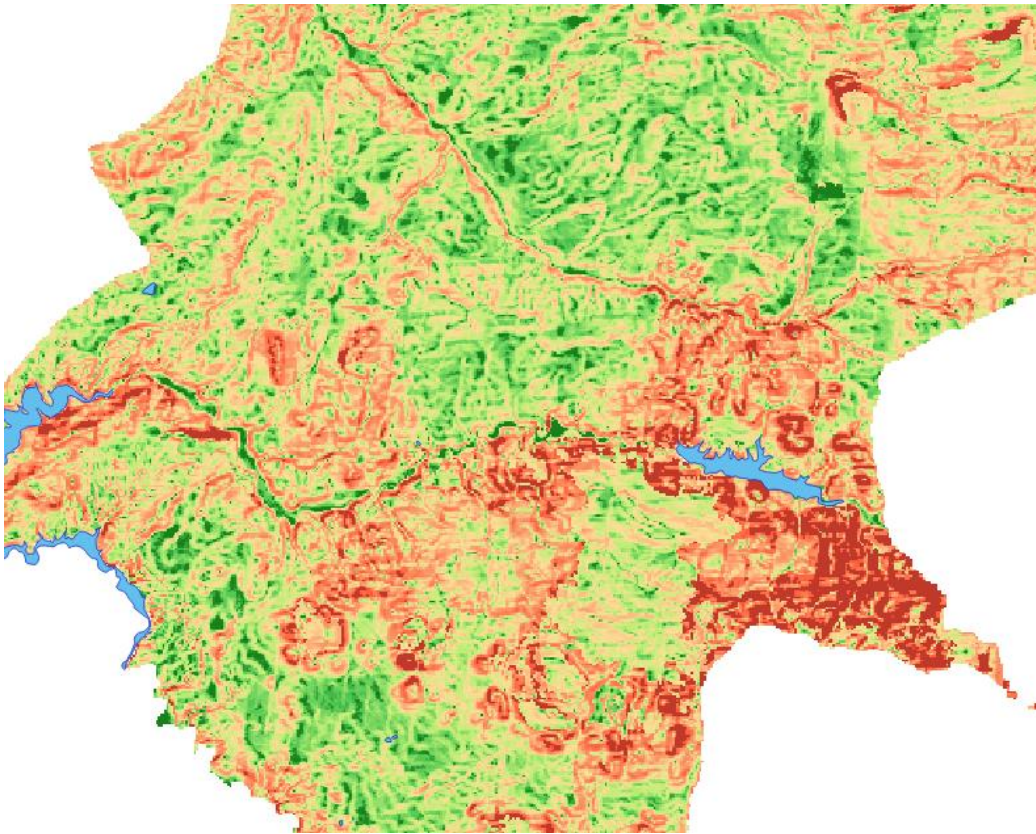


Figura 39. Efecto de bandeado en el mapa USLE del EuroDEM. Fuente: Elaboración propia.

Los valores aparentan agruparse como en líneas en el EuroDEM, formando este bandeado, dando a pensar que estos MDE de tan baja resolución puede que no sean idóneos para este tipo de tareas.

Desde el punto de vista numérico, se ha visto que los porcentajes de niveles erosivos varían de un MDE a otro. En algunos casos varían en un 1 o 2%. El que más varía respecto al resto es, una vez más, el EuroDEM, esto puede ser porque con sus 60 metros de resolución es posible que no se recojan todos los detalles de la superficie, especialmente las pendientes, esenciales para calcular el factor topográfico LS y por eso sus resultados son más dispares.

Información estadística sobre los rásters de pérdida de suelo:

Valor del píxel	MDT25	MDT05	ASTER	EURODEM
Máximo	832.933228	986.095337	786.894653	409.134796
Promedio	60.383378	66.862687	62.298624	49.256538
Mínimo	0.086565	0.069654	0.070197	0.071676
Desviación estándar	60.690475	66.902905	57.568411	47.433783

Tabla 11. Información estadística de los valores de los mapas rásters de pérdida de suelo. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se puede ver el histograma de cada ráster de pérdida de suelo USLE de cada MDE:

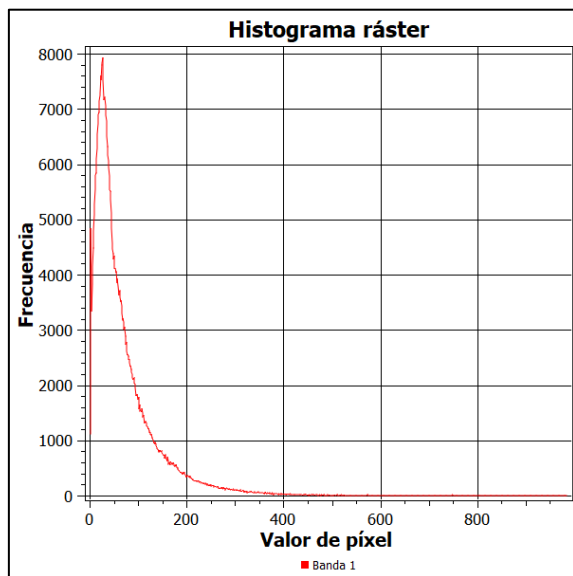


Figura 40. Histograma del mapa ráster USLE con MDT05.

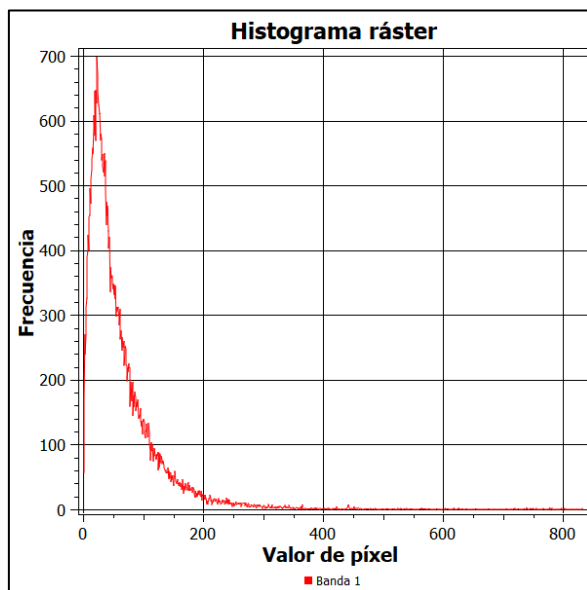


Figura 41. Histograma del mapa ráster USLE con MDT25.

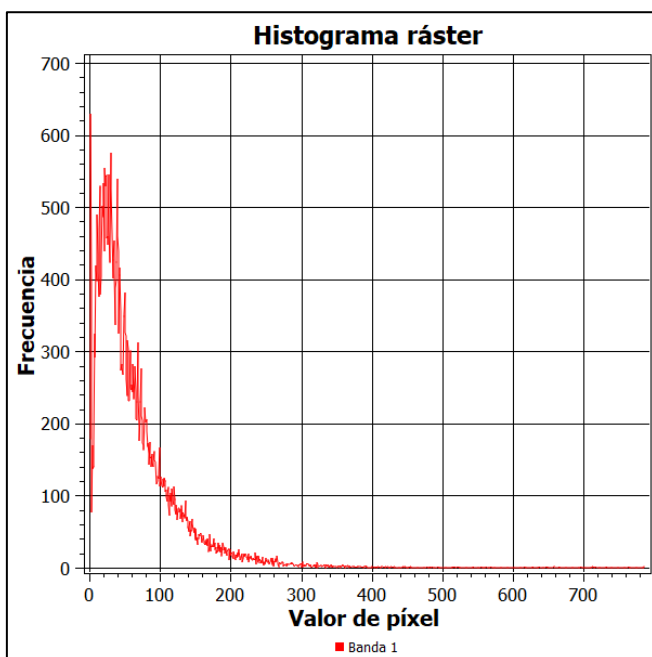


Figura 42. Histograma del mapa ráster USLE con ASTER global DEM

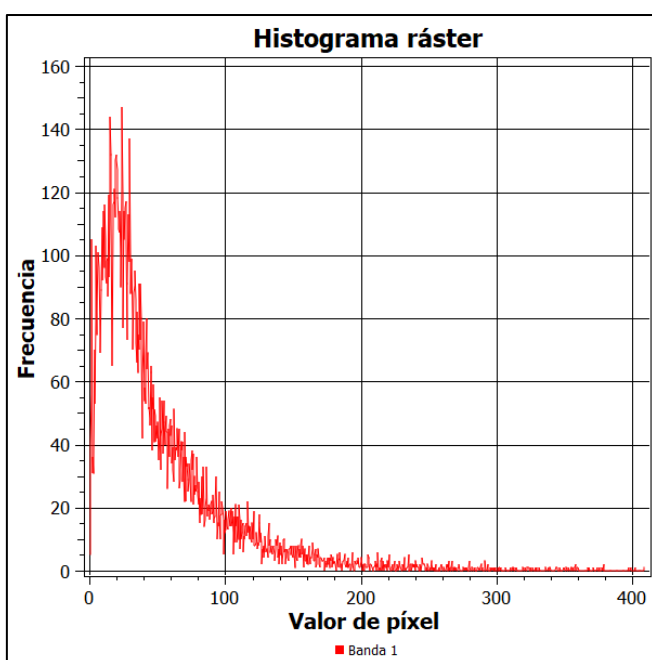


Figura 43. Histograma del mapa ráster con EuroDEM.

Tomando como referencia el mapa ráster de USLE hecho con MDT05, se procede a hallar la cartografía de la diferencia de los rásters USLE de MDT25 y ASTER respecto a MDT05.

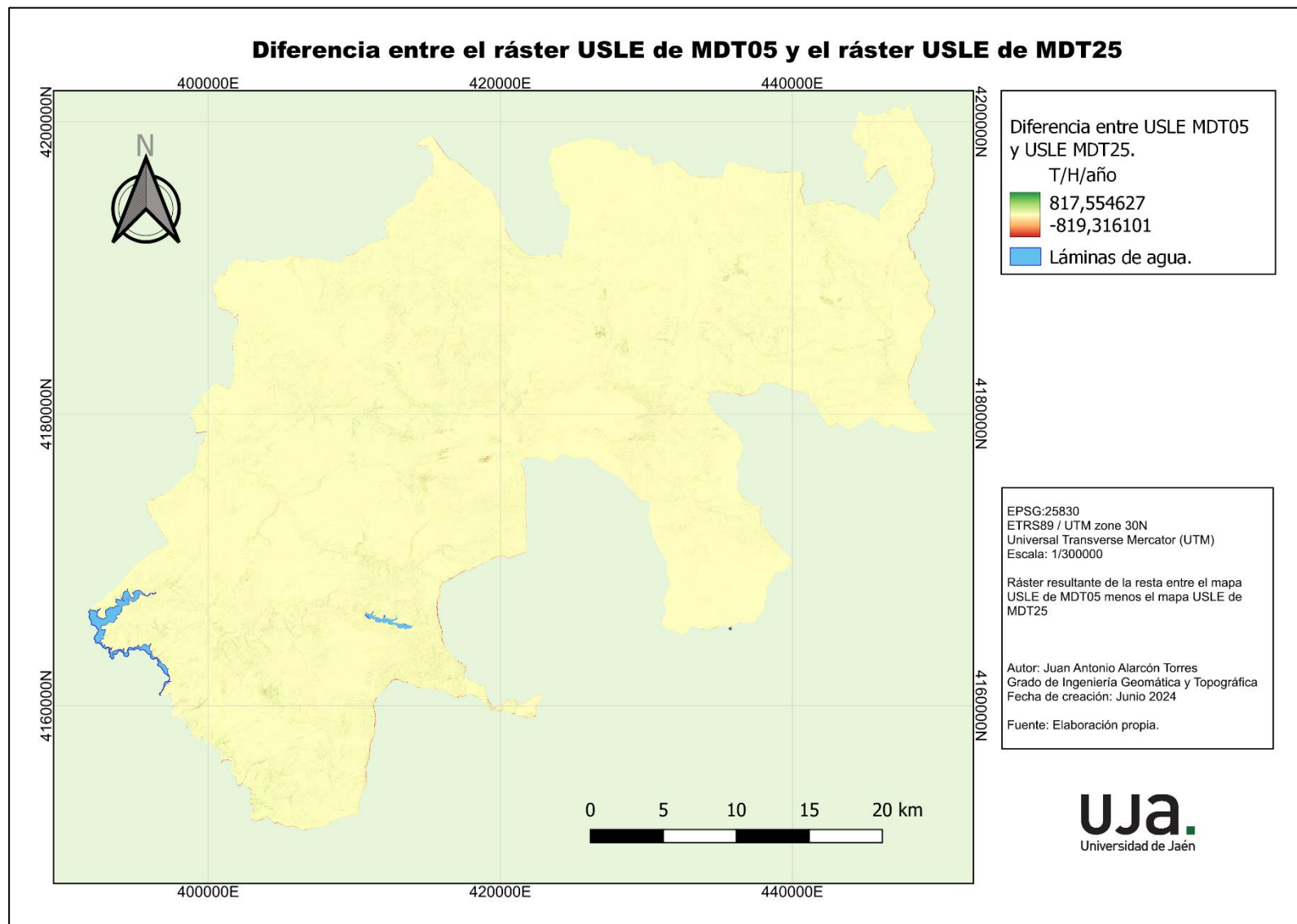


Figura 44. Mapa de diferencia entre el ráster USLE de MDT05 y el de MDT25. Fuente: Elaboración propia.

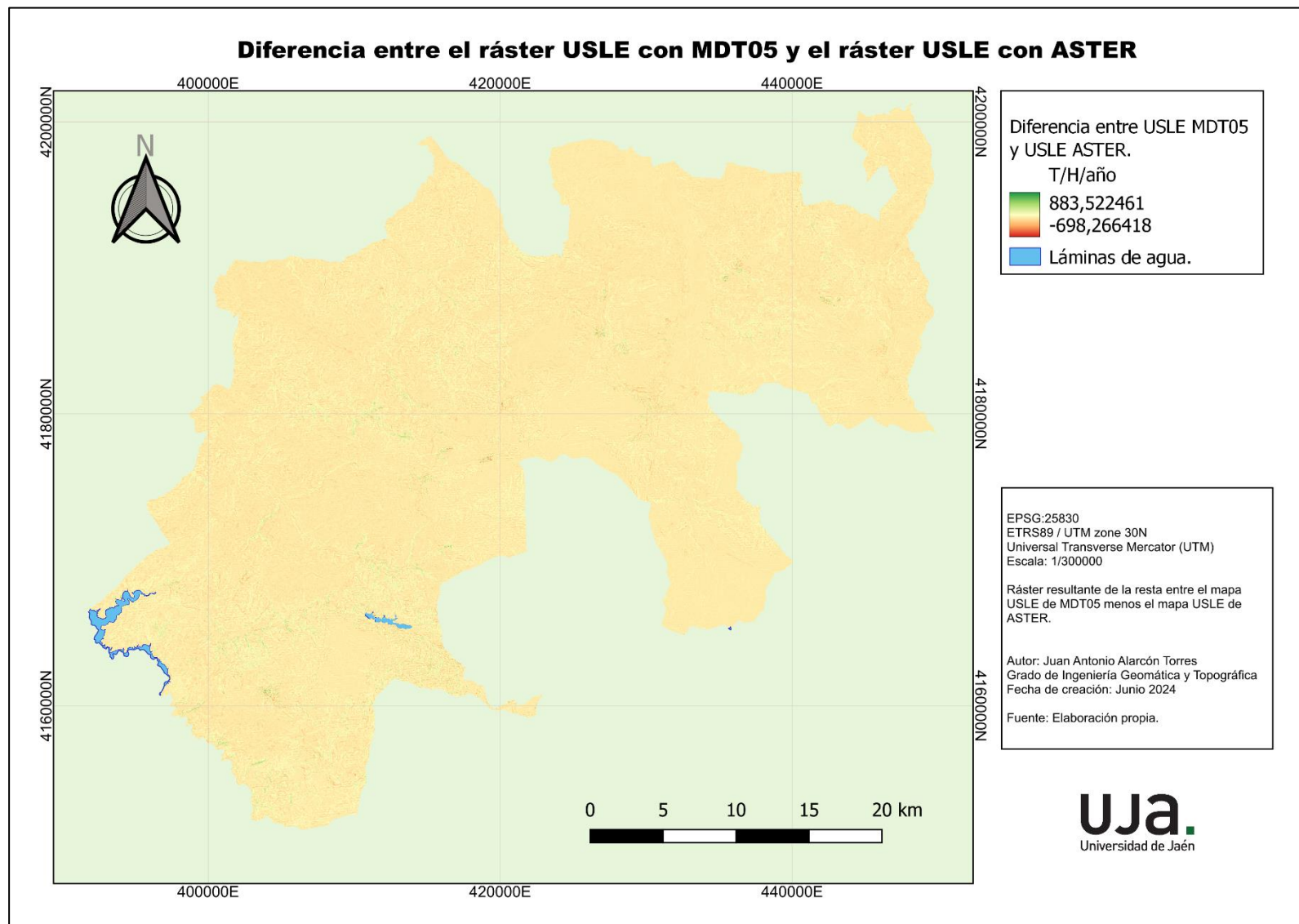


Figura 45. Mapa de diferencia entre el ráster USLE de MDT05 y el de ASTER. Fuente: Elaboración propia.

Se puede ver que las zonas en las que hay mayor diferencia son en las que la topografía cambia de forma abrupta. Como estas:

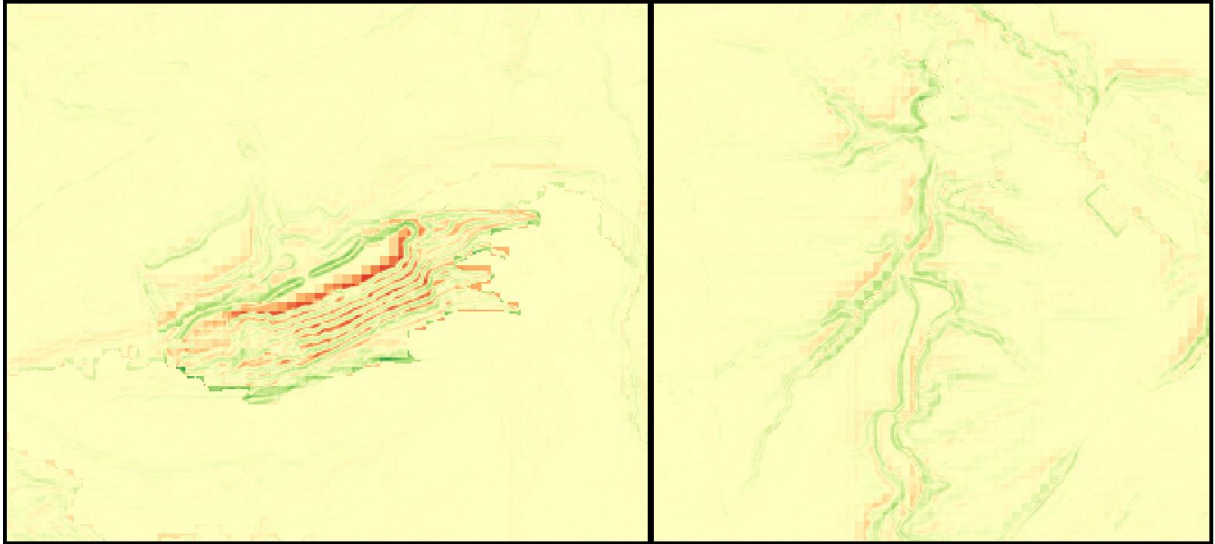


Figura 46. Detalles de algunas diferencias entre USLE con MDT05 y USLE con MDT25. Fuente: Elaboración propia.

En general, cuanto mayor sea la resolución del MDE mejor representada estará la erosión y pérdida de suelo en el mapa final.

8. CONCLUSIONES

La pérdida de suelo vegetal causada por erosión hídrica laminar y de regueros es un problema de clara evidencia en la comarca de la Campiña del Sur y en la provincia de Jaén en general. El modelo empírico USLE es muy útil para estimar las pérdidas de suelo causadas por este tipo de erosión, y si se utiliza mediante un Sistema de Información Geográfica además nos da la posibilidad de visualizar cómo se distribuye este fenómeno en por toda la extensión de una determinada zona geográfica. Adicionalmente, si se toman datos de varios años, el SIG nos ofrece posibilidad de realizar un estudio multitemporal para poder ver el progreso de la erosión a lo largo del tiempo.

Aun así, el modelo USLE no es perfecto, ya que sólo se enfoca en la evaluación y estimación de la erosión hídrica en regueros y de tipo laminar. No se puede emplear para cuantificar la pérdida de suelos dentro de los cauces de los ríos, en barrancos, movimientos en masa o para erosión causada por el viento. Además, las fórmulas para calcular los distintos parámetros de USLE cambian según la zona geográfica donde se aplique, lo que puede complicar su implementación.

Los resultados obtenidos en este Trabajo podrían haber sido más precisos y detallados si se hubieran realizado estudios de campo para obtener información precisa sobre los factores R, K, C y P para incorporar al modelo, aunque esto podría haber llevado una considerable cantidad de tiempo ya que la comarca es un territorio bastante extenso para este tipo de estudios. Pero aun así los resultados obtenidos pueden considerarse como correctos y sirven para localizar las áreas que son especialmente susceptibles a sufrir los efectos de la erosión hídrica. Además, los resultados obtenidos se han comparado con los resultados de erosión laminar y en regueros publicados por el gobierno en su Inventario Nacional de Erosión de Suelos (2022) y se puede ver que en mayor o menor medida son relativamente similares.

Como se ha mencionado y como se ha podido comprobar en este Trabajo y como se puede corroborar en el Inventario Nacional de Erosión de Suelos del Ministerio para la transición Ecológica y el Reto Demográfico, la comarca de la zona de estudio y la provincia de Jaén en general son zonas especialmente castigadas por

la erosión y tienen altos niveles de pérdida de suelo. Son unas de las zonas con los niveles erosivos más altos de toda España y también de todo el continente europeo. Décadas de prácticas agrícolas intensivas relacionadas con el cultivo del olivar combinadas con los efectos del cambio climático (caracterizado por largos periodos de sequía y altas temperaturas seguidos por temporadas de precipitación cortas pero muy intensas), han dejado los suelos de la zona maltrechos y propensos a la desertificación. Gran parte de la zona de estudio está ocupada por cultivo de olivar, y por lo tanto sería de gran ayuda si se implementaran prácticas de manejo y conservación en todos los cultivos de la zona, tales como cultivos a nivel, cultivos en fajas, barbechos o cultivos en terrazas. A modo de simulación, se ha calculado en QGIS el factor P (de prácticas de conservación) suponiendo que todos los cultivos de la zona se realizaran a nivel. Los resultados se pueden apreciar:

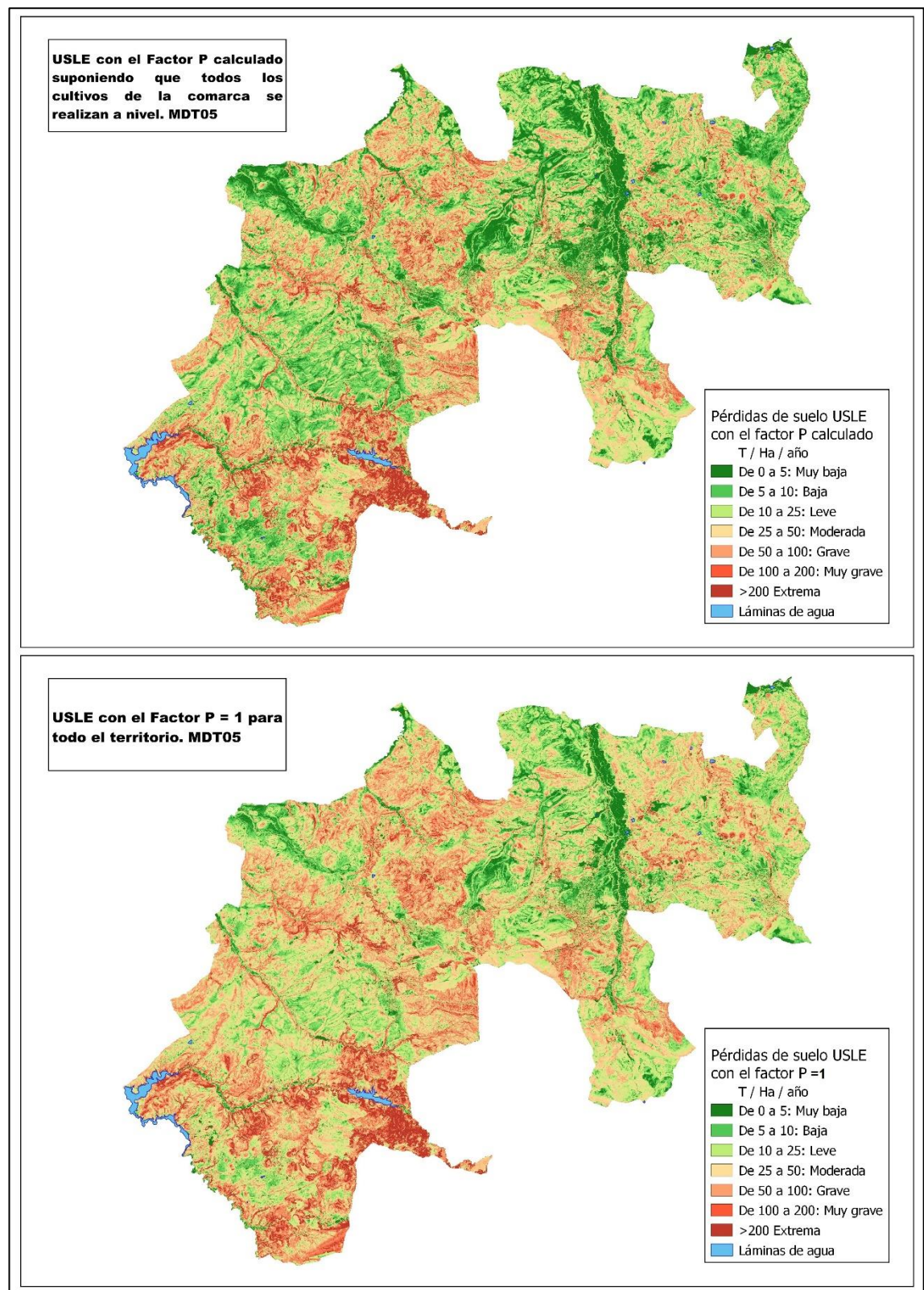


Figura 47. Comparación del mapa de pérdida de suelos. Con prácticas de manejo (arriba) y sin prácticas de manejo (abajo). Fuente: Elaboración propia.

Se puede comprobar que las pérdidas de suelo son visiblemente menores por toda la extensión del territorio cuando existen prácticas de conservación y manejo en las zonas de cultivo. Sería recomendable implementar un plan de mejora de las prácticas agrícolas de la zona, así como un plan de reforestación y conservación de la cubierta vegetal de toda la provincia, para así aminorar los efectos de la erosión en el futuro. Estos planes se podrían apoyar en cartografía de estudios de pérdida de suelo como los del presente Trabajo.

9. Bibliografía

Alatorre, L. & Beguerría, S., 2009. Los Modelos de Erosión: Una Revisión.. *Revista Cuaternario y Geomorfología*, pp. 43-62.

Almorox Alonso, J., López Bermúdez, F. & Rafaelli, S., 2010. *La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación..* s.l.:Universidad de Murcia.

Arnoldus, H., 1977. Methodology Used to Determine the Maximum Potential Range Average Annual Soil Loss to Sheet and Rill Erosion in Morocco. Assessing Soil Degradation. *FAO Soils Bulletin (FAO)*, Volumen 34, pp. 39-48.

Asselman, N., Middelkoop, H. & Van Dijk, P., 2003. The impact of change in climate and land use on soil erosion, transport and deposition of suspended sediment in the River Rhine. *Hydrological Processes*, Volumen 13, pp. 3225-3244.

Beasley, D., Huggins, L. & Monke, E., 1980. ANSWERS: a model for watershed planning. *Transactions of ASAE*, Volumen 23, pp. 938-944.

Calero, J., Aranda, V., Montejo-Ráez, A. & J.M., M.-G., 2018. A new soil quality index based on morpho-pedological indicators as a sitespecific web service applied to olive groves in the Province of Jaen (South Spain).. *Computers and Electronics in Agriculture*, Issue 146, pp. 66-76.

Calero, J. y otros, 2019. Panorama de la erosión del olivar de Jaén: procesos, metodologías y. *Grandes Cultivos*, Volumen 23, pp. 10-14.

Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural de Andalucía, 2024. *Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIA)*. [En línea]
Available at: <https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/riaweb/web/>
[Último acceso: 2024].

Consejería de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul de Andalucía, 2024. *Red de Información Ambiental de Andalucía*. [En línea]
Available at: <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/acceso-rediam>
[Último acceso: 2024].

Costa Comelles, J. & Manzano, J., 1992. Impacto ambiental de herbicidas en vid y olivo. *Boletín de Sanidad Vegetal - Plagas*, Volumen 18, pp. 621-624.

De Alba, S., Alcázar, M., Cermeño, F. & Barbero, F., 2011. Erosión y manejo del suelo. Importancia del laboreo ante los procesos erosivos naturales y antrópicos. *Agricultura ecológica en secano: soluciones sostenibles en ambientes mediterráneos*, pp. 13-38.

Departamento de Desarrollo Económico, Sostenibilidad y Medio Ambiente del Gobierno Vasco, 2017. *Mapa del grado de erosión hídrica de los suelos*, s.l.: s.n.

Desmet, P. & Govers, G., 1996. A GIS Procedure for Automatically Calculating the USLE LS Factor on Topographically Complex Landscape Units.. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5), pp. 427-433.

Dickinson, D., 2019. *Noticias Organización Naciones Unidas*. [En línea]
Available at: <https://news.un.org/es/story/2019/06/1457861>

Dirección General para la Biodiversidad, 2006. Erosión Potencial (laminar y regueros). En: *Inventario Nacional de erosión de suelos. Jaén 2006*. s.l.:Ministerio de Medio Ambiente, pp. 38-39.

Dotterweich, M., 2013. The history of human-induced soil erosion: Geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation—A global synopsis.. *Geomorphology. Volume 201.*, pp. 1-34.

FAO, 2021. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. [En línea]
Available at: <https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1236444/>

FAO, 2022. *FAOstat: Datos sobre alimentación y agricultura*. [En línea]
Available at: <http://www.fao.org/faostat>

Federal Agency for Cartography and Geodesy (Germany), 2022. *EuroDEM Pan-European Height Dataset at Medium Scale*. [En línea]
Available at: <https://www.mapsforeurope.org/datasets/euro-dem>
[Último acceso: 2024].

Foster, G. & Meyer, L., 1977. Soil erosion and sedimentation by wter: an overview.. *Proceedings of the National Symposium on Soil Erosion and Sedimentation by Water*, pp. 1-13.

García-Ruiz, J., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N. & Beguería, S., 2013. Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges. *Geomorphology*, Volumen 198, pp. 20-36.

Gisbert, J. & Ibáñez, S., 2003. *Procesos erosivos en la provincia de Alicante*. s.l.:Generalitat Valenciana, Consellería de Medio Ambiente.

Gómez, J., 2015. *Procesos erosivos en olivar en Andalucía a diferentes escalas: entendimiento, magnitud, implicaciones e intentos de control*. s.l., s.n., pp. 145-154.

Gómez, J., Battany, M., Renschler, C. & Fereres, E., 2003. Evaluating the impact of soil management on soil loss in olive orchards.. *Soil Use Management*, 19(2), pp. 127-134.

ICONA, 1988. *Mapa de estados erosivos. Cuenca hidrográfica del Segura*.. Madrid: Servicio de publicaciones M.A.P.A..

ICONA, 1989. *Mapa de Estados Erosivos. Cuenca hidrográfica del Sur de España*. Madrid: Servicio de publicaciones M.A.P.A..

Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, 2024. *Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA)*. [En línea]
Available at: <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/dega/datos->

[espaciales-de-referencia-de-andalucia-dera/descarga-de-informacion](#)

[Último acceso: 2024].

Instituto Geográfico Nacional, 2020. *Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica..* [En línea]

Available at: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

[Último acceso: 2021].

Kirkby, M. y otros, 2000. The development of Land Quality Indicators for Soil Degradation by Water Erosion. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Volumen 81, pp. 125-136.

Merrit, W., Letcher, R. & Jakeman, A., 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, Volumen 18, pp. 761-799.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013. Caracterización de las comarcas agrarias de España. En: Tomo 26. *Provincia de Jaén*. s.l.:Gobierno de España, pp. 39-52.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España, 2019. *Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE)*. [En línea]

Available at: https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/olivar2019_tcm30-122331.pdf

Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI) of Japan and the United States National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2019. *ASTER Global Digital Elevation Map*. [En línea]

Available at: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>

[Último acceso: 2023].

Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M. & Iverson, L., 1996. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, pp. 629-641.

MITECO, 2022. *Inventario Nacional de Erosión de Suelos*. [En línea]

Available at: <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/inventario-nacional-erosion-suelos.html>

[Último acceso: Mayo 2024].

Moore, I., Grayson, R. & Ladson, A., 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), pp. 3-30.

Morgan, R., Morgan, D. & Finney, H., 1984. A predictive model for the assessment of erosion risk.. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 30., pp. 245-253.

Morgan, R. y otros, 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, Volumen 23, pp. 527-544.

NASA, 2019. *ASTER Global Digital Elevation Model download page*. [En línea]
Available at: <https://gdemdl.aster.jspacesystems.or.jp>
[Último acceso: 2023].

Nearing, M., Lane, L. & Lopez, J., 1994. Modelling soil erosion.. *In: Soil Erosion: Research Methods*. CRC Press, New York (USA). , pp. 127-156.

Nearing, M. y otros, 1997. Hydraulics and erosion in eroding rills.. *Water Resources Research*. Volume 33. Issue 4, pp. 865-876.

Open Source Geospatial Foundation (OSGeo), 2024. *QGIS, Sistema de Información Geográfica libre y de Código Abierto*. [En línea]
Available at: <https://www.qgis.org/es/site/about/index.html>
[Último acceso: 2024].

Panagos, P. y otros, 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Env Sci Policy.. Environmental Science & Policy*, Volumen 54, pp. 438-447.

Panagos, P., Borrelli, P. & Meusburger, K., 2015. A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. *Geosciences*, 5(2), pp. 117-126.

Renard, K., Foster, G., Weesies, G. & Porter, J., 1991. RUSLE: revised universal soil loss equation.. *Journal of Soil and Water Conservation*, pp. 30-33.

Renard, K., Foster, G., Yoder, D. & McCool, D., 1994. RUSLE revisited: status, questions, answers, and the future.. *Journal of Soil and Water Conservation.*, pp. 213-220.

Riesco García, J., 2015. *Análisis comparativo de la estimación de la erosión hídrica con la metodología USLE y las técnicas SIG. Aplicación al entorno del tramo medio de la cuenca del río Jarama. Tesis Doctoral. Universidad politécnica de Madrid*. s.l.:s.n.

Rodríguez, M., Florentino, A., Gallardo, J. & De Antonio, R., 2004. Sistemas de Información Geográfica en la evaluación de la erosión hídrica en Badajoz-España aplicando la metodología USLE. *Agronomía Tropical*, Volumen 54, pp. 391-410.

Shin, G., 1999. The analysis of soil erosion analysis in watershed using GIS. Ph.D. Dissertation. *Department of Civil Engineering, Gang-won National University*.

Van Oost, K., Govers, G. & Desmet, P., 2000. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology*, pp. 579-591.

Viney, N. & Sivapalan, M., 1999. A conceptual model of sediment transport: application to the Avon river basin in Western Australia.. *Hydrological Processes*, 13, pp. 727-743.

Williams, J., 1975. *Sediment Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor*. s.l.:U.S. Department of Agriculture. Agricultural Research Service (A.R.S.).

Williams, J., Dyke, P. & Jones, C., 1983. EPIC: a model for assessing the effects of erosion on soil productivity. En: e. W.K. Laurenroth, ed. *Analysis of Ecological Systems: state-of-the-art*. Amsterdam: Elsevier, pp. 552-572.

Wischmeier, W. & Smith, D., 1978. *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture Handbook*. Washington D.C.: Department of Agriculture.