

EVALUACIÓN DE LA EROSIONABILIDAD (FACTOR K) Y SU VARIABILIDAD ESPACIAL EN RELACIÓN CON LOS USOS DEL SUELO

PEDRO PÉREZ CUTILLAS¹, GONZALO GONZÁLEZ BARBERÁ², CARMELO CONESA GARCÍA³

Departamento de Geografía. Universidad de Murcia.

Avda. Teniente Flomesta, 5 - 30003 – Murcia. España

¹pedrope@um.es y ³cconesa@um.es

Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CSIC).

Campus Universitario de Espinardo. Espinardo. Murcia. E-30100. España

²gbarbera@cebas.csic.es

RESUMEN

En este trabajo se han determinado las diferencias entre los valores de la estimación de datos texturales y materia orgánica elaborados mediante dos métodos clásicos, el primero mediante modelización de variables ambientales, y el segundo a través de la asignación cartográfica de valores empíricos de erosionabilidad del suelo. También se han explorado las estimaciones de erosionabilidad de ambos métodos en base a su efecto sobre diferentes coberturas y usos del suelo, aplicando tres métodos de estimación del Factor K. Estos cálculos muestran que los índices de Römken *at al.*, 1986 y Wang *at al.*, 2012 son más sensibles a la variabilidad del territorio, mientras que el índice de Torri *at al.*, 1997 muestra una mayor estabilidad a las zonas de coberturas heterogéneas.

Palabras clave: Erosión, Análisis espacial, Materia orgánica, Texturas.

EVALUATION OF ERODIBILITY (K FACTOR) AND SPATIAL VARIABILITY IN RELATION TO LAND USE

ABSTRACT

This study analyzes differences between the values of the textural and organic matter data elaborated by two classical methods. The first method has been based on the modeling of environmental variables, and in the second method the values obtained through the mapping of empirical values of soil erodibility have been applied. Erodibility estimates of both methods have also been explored based on their effect on different land coverages and land uses, applying three

Recibido: 16/11/2017

Aceptada versión definitiva: 23/04/2019

Editor al cargo: Dra. Anna Badia Perpinyà

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

© El autor
www.geofocus.org

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

methods of estimation of K Factor. These results show that Römken and Wang indices are more sensitive to the variability of the territory, while Torri index shows greater stability to heterogeneous coverage areas.

Keywords: Erosion, Spatial analysis, Organic matter, Textures.

1. Introducción

La erosión geológica como parte del ciclo geográfico es un fenómeno natural que abarca los cambios que sufre el relieve por la acción de distintos agentes. El suelo se presenta como un soporte de numerosas actividades productivas esenciales para el ser humano, produciendo un fuerte vínculo de dependencia entre ambos. Pero como consecuencia de la acción del hombre se ha producido una erosión acelerada, convirtiendo a los procesos de desertificación en unos de los principales problemas ambientales a nivel mundial (Pimentel *et al.* 1995). Los procesos de degradación del suelo generan la pérdida de volumen de éstos y la escasez de nutrientes, provocando que las tierras agrícolas se vuelvan gradualmente menos productivas y los costes económicos asociados a estas causas sean muy importantes (Schuler y Sattler, 2010), presentando enormes problemas sobre todo en ambientes mediterráneos.

La complejidad y la interrelación de geosistemas que condicionan a los procesos de degradación del suelo, desde el punto de vista de la erosión hídrica, han generado desde los inicios del siglo pasado numerosos estudios para intentar definir paramétricamente las propiedades físicas y químicas del suelo dando a conocer su relación con la erosión de manera empírica, estableciendo índices de erosión dependientes de distintas propiedades como la textura o densidad aparente (Middleton y Byers, 1934) o profundizando en el comportamiento de los suelos con distintas texturas para establecer índices de resistencia a la erosión (Bouyoucos, 1935). También se iniciaron técnicas de medición de la estabilidad de los agregados basados en análisis mecánicos (Voznesensky y Artsruui, 1940), o en trabajos como los de Bryan (1968) que establece la fracción arcilla como determinante en los procesos erosivos. Estos antecedentes son los que permiten a Wischmeier y Mannering (1969) presentar con ecuaciones de regresión múltiple, una buena correlación entre la vulnerabilidad a la erosión y un índice que englobaba 15 propiedades físicas del suelo, definiendo por primera vez el Factor K como elemento de erosionabilidad del suelo para la ecuación USLE, y que en futuros trabajos (Wischmeier *et al.*, 1971) se terminó por simplificar en solo 5 parámetros físicos del suelo.

Desde la publicación completa de la ecuación Universal Soil Loss Equation (USLE) (Wischmeier y Smith, 1978) por la Soil Conservation Service (en este momento, Natural Resources Conservation Service) de la USDA hasta la actualidad, no han parado de surgir modelos de la erosión hídrica, y trabajos que permiten evaluar espacialmente la ocurrencia de los procesos de erosión (de Vente *et al.*, 2008), analizar su evolución temporal y simular los efectos de cambios en las variables climáticas y paisajísticas (Poesen *et al.*, 2003; de Vente, 2009). En general, la modelización de estos procesos se basa en la comprensión de las leyes físicas que controlan los procesos de arranque y transporte de partículas del suelo.

Se conoce como Factor K a la respuesta de un suelo al poder erosivo en episodios de lluvia, definiéndose como la agrupación de una serie de parámetros que representan la respuesta total del suelo a un gran número de procesos de erosión hidrológica (Römken, 1985). Todos estos procesos

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

son complejos y dinámicos en la naturaleza, estando muy influenciados por las propiedades del suelo y las características de sus perfiles. Muchas de estas propiedades son intrínsecas y supone que invariables a escala humana, tales como la textura y mineralogía de las arcillas. Pero no hay que obviar otras propiedades más dinámicas y transitorias a un nivel espacio-temporal, como el contenido de agua del suelo, el porcentaje de materia orgánica (Martínez-Mena *et al.*, 2012; Boix-Fayos *et al.*, 2017) o los procesos de formación y estabilización de los agregados (Hontoria *et al.*, 2009), sin olvidar los inducidos por el hombre, por ejemplo, los cambios en la rugosidad superficial provocada por la transformación de los usos del suelo (Torri *et al.*, 2013), o por los procesos de interceptación (Kozak *et al.*, 2007; Blonska *et al.*, 2016), donde la vegetación actúa modificando la dinámica de la lluvia y protegiendo los suelos frente a la acción erosiva del agua. Esta variabilidad, a los efectos de la erosividad de un suelo están contemplados por el factor C o factor cubierta vegetal de la USLE, que están determinados por los distintos sistemas de uso y gestión que se dan en el territorio, y se van a presentar como determinantes en la modificación de los niveles erosionabilidad de un suelo.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que son varios los mecanismos de erosión que están actuando al mismo tiempo, cada uno de manera diferente en relación a una propiedad específica del suelo. Aunque no es probable que sean pocas las características de un suelo que describan con precisión los valores de K (Torri *et al.*, 1997), han sido muchos los trabajos realizados para relacionar valores medidos en campo del Factor K a ciertas propiedades físico - químicas del suelo, en un intento de minimizar los rangos de incertidumbre existentes en la estimación de este factor. Römken es uno de los primeros autores que aborda la determinación del Factor K con datos empíricos a escala mundial (Römken *et al.*, 1986; Römken *et al.*, 1988) y revisado por Renard *et al.* (1997), ofreciendo una ecuación ampliamente utilizada. También Torri *et al.* (1997), corregida por Torri *et al.* (2002), estiman el factor K para la RUSLE utilizando una base de datos a nivel global, introduciendo en la ecuación, a diferencia de la de Römken, valores de MO. Otros trabajos se centran en la erosionabilidad como una propiedad dinámica, considerando la variabilidad temporal del Factor K como un elemento esencial (Young *et al.*, 1990). A pesar de que estas variaciones temporales están ampliamente reconocidas (Mutchler and Carter, 1983; Liu and Liu, 2007), las causas subyacentes y los factores que las originan no están lo suficientemente investigadas (Wang *et al.*, 2013). Ensayos recientes ponen en evidencia las estimaciones de los valores del Factor K por la falta de calibraciones de los modelos utilizados, en la mayor parte de los casos por falta de disponibilidad de datos empíricos debido a la dificultad y el coste de estos experimentos (Wang *et al.*, 2012). La tendencia actual en la modelización de la erosión parece ir encaminada hacia el desarrollo de modelos físicos de gran complejidad, que necesitan de bases de datos más amplias y complejas para poder resolver los problemas de calibración que estos modelos plantean. Pero paradójicamente, en este sentido poco ha evolucionado la situación desde los primeros trabajos que intentaban modelizar los procesos de degradación del suelo, lo que induce a pensar si esta evolución no requiere un cambio de rumbo en los diseños de los proyectos para estudiar la predicción de los procesos erosivos, con planteamientos del tipo "hasta dónde podemos llegar con el modelo" en favor de otros del tipo "qué es realmente lo que necesitamos" (Alatorre y Beguería, 2009).

Son numerosas las interrelaciones entre las variables que intervienen en los procesos físicos del suelo, y son también muchas las dificultades causadas por el origen y estado de las propias fuentes de información, así como por las distintas herramientas y metodologías existentes para el tratamiento de los datos, lo que repercute de manera sustancial en la estimación y precisión de los

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

valores examinados. La variabilidad de los resultados por esta dependencia a la que están sujetos los cálculos de la erosionabilidad hace interesante conocer que influencia tiene el origen de los datos necesarios para su cómputo, y cómo es de determinante la elección del algoritmo para la estimación del Factor K.

Por ello, uno de los objetivos principales de este trabajo es determinar las diferencias entre los valores de la estimación del Factor K elaborado mediante dos métodos clásicos, el primero mediante modelización de variables ambientales y los valores del Factor K obtenidos a través de la asignación cartográfica de valores empíricos de suelo. A su vez, resulta interesante explorar las estimaciones de erosionabilidad de ambos métodos en base a su efecto sobre diferentes coberturas y usos del suelo.

2. Material y métodos

2.1. Area de estudio

El área de estudio es la Cuenca del Río Segura, situada al SE de la Península Ibérica (Figura 1). Se localiza entre las coordenadas UTM del Huso 30 N: X min: 509000; Y max: 4318500; X max: 715500; Y min: 4122000, relativos al Sistema de Referencia Espacial Europeo 1989 (ETRS89). El área ocupada es de 1.820.800 has y 1.131.310 has para la Cuenca del Segura y la Región de Murcia, respectivamente (CHS, 2017). En conjunto, se trata de una superficie bastante accidentada, con la presencia de numerosas sierras alineadas en dirección ENE-WSW y asociadas a la dirección general de las Cordilleras Béticas, que con frecuencia superan los 1.000 m de altitud. Junto a estos relieves aparecen una serie de valles, cubetas, llanuras y altiplanos, que en conjunto configuran una topografía contrastada y diversas unidades de paisaje que hacen de la Cuenca un territorio singular de gran variedad paisajística.

La desertificación y la perdida pérdida de suelo por erosión se presentan como unas de las causas más importantes de la degradación de este territorio, ya que implica una pérdida de los principales componentes físicos, químicos y biológicos del suelo (Boix-Fayos *et al.*, 2005). El Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 2002-2012), en la elaboración del Inventario Nacional de Erosión de Suelos y utilizando el modelo RUSLE, ha estimado los promedios anuales de pérdida de suelo. Según dicho estudio, la Cuenca del Río Segura registra una erosión del suelo situada en el umbral de la media española, 24,53 Mg/ha/año, equivalentes a un rebajamiento de casi 2 mm al año. En esta cuenca existe una gran diversidad de suelos originados por la acción de diferentes procesos dinámicos, inducidos a su vez por la actividad de numerosos factores ambientales. Entre ellos, las condiciones climáticas, la litología y el relieve, que condicionan en gran medida la erosión y los procesos edáficos, influyen de forma acusada en la citada tipología de suelos (Álvarez Rogel, J. *et al.*, 2001).

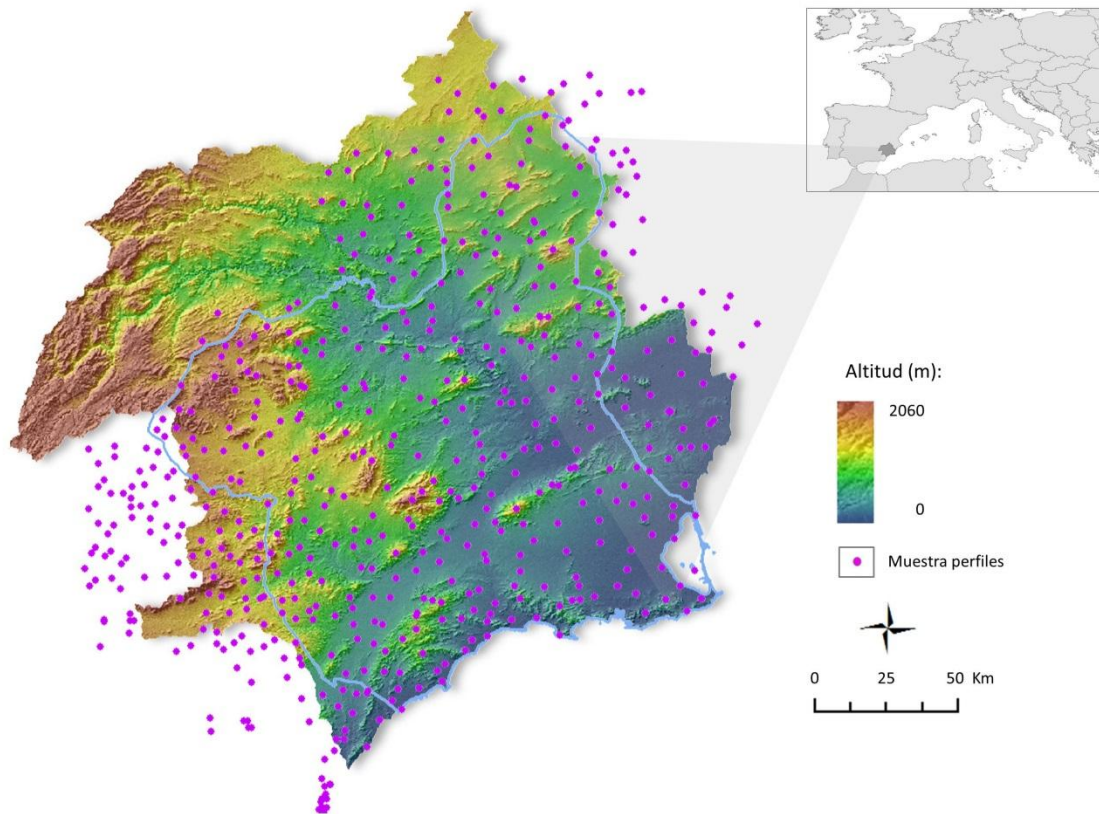


Figura 1. Área de estudio. Cuenca del Río Segura, en el SE de la Península Ibérica. En contorno, límite de la Región de Murcia. Distribución espacial de los muestreos de campo (puntos magenta) del proyecto LUCDEME para las determinaciones de los perfiles

2.2. Estimación de valores granulométricos y MO

La erosionabilidad expresada como la vulnerabilidad de un suelo a la erosión está condicionada directamente por la disminución de la materia orgánica y la degradación de la estructura del suelo (Wischmeier, *et al.* 1971), disposición que resulta de la granulometría de los elementos que lo componen y del modo como se hallan éstos dispuestos. De esta manera, los valores de textura y MO son la información esencial en este trabajo, en el que se aplica una metodología basada en el análisis comparativo de los valores del Factor K obtenidos mediante dos procedimientos de análisis espacial elaborados en un Sistema de Información Geográfica (SIG). El primero de ellos consiste en atribuir a cada tipo de suelo un valor de K (conforme a una fórmula determinada) en función de los valores promedio de textura y/o MO, extraídos de la base de datos empíricos del proyecto LUCDEME (ICONA, 1986). El segundo método se centrará en la estimación de un cálculo del Factor K obtenido mediante el uso de las texturas y MO modelizadas con variables ambientales. La comparación de los resultados para ambos métodos, que serán testeados y evaluados por tres algoritmos de cálculo del Factor K, nos permitirá obtener

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

información para valorar cuál es la influencia según el origen de los datos de entrada, y cuál es la importancia en la elección del algoritmo a utilizar.

2.2.1. Método de asignación de valores empíricos

La estimación de los valores de textura se ha extraído de las determinaciones analíticas de los perfiles del proyecto LUCDEME. La obtención cartográfica de los datos texturales se ha elaborado mediante la adopción de los valores medios de textura obtenidos en estos perfiles por unidad taxonómica, asignando dicho valor medio a todas las entidades espaciales que corresponden a esa unidad en el mapa de suelos del proyecto (1:100.000). De esta manera, cada polígono expone un grado de textura asociada al tipo de clasificación taxonómica del que procede el perfil. Hay que tener en cuenta, no obstante, que existe una gran variabilidad de textura dentro de cada polígono, aceptando en este tipo de estimaciones la existencia de un alto grado de incertidumbre en la composición textural dentro de las áreas marcadas por cada recinto (Heuvelink y Huisman, 2000).

En la cartografía edafológica del proyecto LUCDEME se ha intentado delimitar unidades cartográficas individuales que correspondan a una sola unidad taxonómica, pero esto no siempre ha sido posible. En el mapa de suelos nos encontramos, de manera muy general, unidades cartográficas que representan la asociación de dos o más unidades de suelos, donde aquellas que ocupan más del 20 % de la superficie están catalogadas como asociación de suelos, mientras que las de menor representación, superando el 5 %, figuran como inclusiones, obteniéndose 63 combinaciones de unidades taxonómicas, y 293 combinaciones diferentes si tenemos en cuenta las inclusiones. Esta particularidad, nos obliga a modificar los valores promedio de textura iniciales dependiendo de las diferentes asociaciones mostradas por unidad cartográfica. Como el porcentaje de participación en estas agrupaciones de suelo nos es desconocido, se ha estimado un 50 % en los casos de la existencia de dos suelos y el 33,3 % en los que nos encontremos tres suelos por recinto. Finalmente, debido a su escaso impacto porcentual, las inclusiones no se han tenido en cuenta para la modificación final de las texturas. De manera similar, han sido estimados los valores de MO, que también se han extraído de la base de datos de los suelos en los perfiles del proyecto LUCDEME.

2.2.2. Método de modelización de variables ambientales

Para la elaboración de las capas modelizadas se han utilizado los valores obtenidos por medios empíricos, proporcionados por los datos analíticos de fracciones de textura y materia orgánica de las bases de datos de la capa arable del proyecto LUCDEME. Los modelos estadísticos se han construido mediante regresiones lineales construidas 'paso a paso' con el Criterio de Información de Akaike (AIC) (1974). El método ofrece una medida relativa de la pérdida de información cuando un determinado modelo es utilizado para describir la realidad. Los datos utilizados para los procesos de modelización se agrupan en una serie de capas de información SIG. Estas variables se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Descripción de la representatividad de los valores de las variables ambientales y su estadístico descriptivo con el cálculo del Rango, Media y Desviación Estándar.

Descripción de las variables	Rango	Media	Desv. Estándar
Altitud sobre nivel del mar	0 – 2057 (m)	612	±407
Pendientes	0 – 79 (°)	7,5	±7,7
Curvatura Perfil	-18 - 18	0,008	±0,27
Curvatura Perpendicular	-20 - 22	0,008	±0,41
Acumulación de flujo	0 – 17 (pixel) *	1,6 *	±1,8
Precipitación	250 – 771 (mm)	390	±84
Temperatura	8,2 - 18,4 (°C)	15,1	±2,07
Radiación directa	0,001 - 2,258 **	1,36 **	±0,12
Radiación difusa	0,083 - 0,514 **	0,28 **	±0,01
Duración de radiación	40 – 4360 (h)	4,03	±0,27
Índice de Vegetación Normalizado - Invierno	-1 - 1	0,05	±0,19
Índice de Vegetación Normalizado - Verano	-1 - 1	0,03	±0,13
Alteración minerales CMI – Inverno	0 - 3,5	1,21	±0,97
Alteración minerales FMI –	0 - 3	0,83	±0,75
Alteración minerales IOI – Inverno	0 - 1,5	0,31	±0,28
Alteración minerales CMI – Verano	0 - 3,5	1,21	±0,92
Alteración minerales FMI – Verano	0 - 3	0,95	±0,76
Alteración minerales IOI - Verano	0 - 1,5	0,39	±0,34

Fte. Elaboración propia. *Acumulación de flujo está reescalado a valores logarítmicos (Ln) ** Radiación directa y difusa están escalados a 1/1000000 respecto a los valores originales. En la tabla están expresados en MWh/m². CMI: Índice de Composición Mineral, Clay Minerals; FMI: Índice de Composición Mineral, Ferrous Minerals; IOI: Índice de Composición Mineral, Iron Oxide. (Sabins, 1999). Imágenes de satélite Landsat captadas el 14/02/2009 (invierno) y 24/07/2009 (verano).

2.3. Cálculo del índice de erosionabilidad

El valor K de la RUSLE hace referencia al factor de erosionabilidad del suelo, representando la susceptibilidad del suelo a la erosión. Está definido como la cantidad promedio de suelo perdido por unidad del factor de erosividad de la lluvia (Factor R), en una parcela estándar mantenida con suelo desnudo o en barbecho, en una longitud de 22,1 m (72,6 pies) y pendiente media del 9 % (NCRS, 2000). Los factores L, S, C y P, que componen la ecuación, se presentan como adimensionales permitiendo adaptar las estimaciones a condiciones distintas de la parcela de prueba en que fue desarrollado el método, mientras que los factores R y K son los únicos que aportan el orden de magnitud y las unidades respectivas. Las unidades con las que se han trabajado los índices de erosionabilidad en este trabajo se han ajustado al Sistema Internacional (SI) expresado en Mg*ha*h / ha*MJ*mm (Foster *et al.*, 1981).

De los diferentes métodos de cálculo del Factor K encontrados en la literatura, se han seleccionado los siguientes índices para ser evaluados en este trabajo, Römken *et al.* (1986), Torri *et al.* (1997) y Wang *et al.* (2012). En todos los casos se tratan de métodos reducidos del propuesto por Wischmeier y Smith (1978), basados en el modelo simplificado de Shirazi y Boersma (1984).

A modo de resumen, se presenta la figura X, en el que se describe la comparación de los resultados obtenidos mediante dos métodos de estimación de la textura y OM, que permiten cuantificar la variabilidad en la estimación de los valores de erosionabilidad para ambas metodologías.

2.3.1. Factor K de Römken

Se ha seleccionado el método de Römken *et al.* (1986) por tratarse de un método sencillo y que solo requiere de clasificaciones texturales, a diferencia del método de origen de cálculo de K para USLE de Wischmeier y Smith (1978), que necesita datos de estructura y permeabilidad del suelo, además de valores de MO.

$$D_g = \exp(0,01 \sum_{i=1}^n f_i \ln M_i)$$

$$K = 0,0034 + 0,0405 \exp \left[-0,5 \left(\frac{\log D_g + 1,659}{0,7101} \right)^2 \right]$$

siendo,

D_g , es la media geométrica del diámetro de las partículas del suelo (mm)

f_i , es la proporción de las partículas de suelo en la fracción i (%)

M_i , es la media del tamaño de las partículas del suelo en la fracción i (mm)

2.3.2. Factor K de Wang

Este factor se basa en los algoritmos del método anterior, pero aumentando el número de variables en cálculo (Wang *et al.*, 2012). La erosionabilidad está estrechamente relacionada con los parámetros de textura del suelo, MO, la estructura del suelo y la capacidad de infiltración (Wischmeier *et al.*, 1971; Römken, 1985; Renard *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 2008). Además, las texturas del suelo se encuentran clasificadas comúnmente en diversos sistemas de clasificación, por lo que el método de Wang *et al.* 2012 trata de vincular también los valores la MO y D_g (igual al utilizado por Römken), que es una medida de fácil deducción y actúa como un parámetro textural uniforme (Shirazi y Boersma, 1984; Römken *et al.*, 1988).

$$D_g = \exp(0,01 \sum_{i=1}^n f_i \ln M_i)$$

$$K = 0,0364 - 0,0013 \left[\ln \left(\frac{OM}{D_g} \right) - 5,6706 \right]^2 - 0,015 * \exp \left[-28,9589 (\log(D_g) + 1,827)^2 \right]$$

siendo,

D_g , es la media geométrica del diámetro de las partículas del suelo (mm)

f_i , es la proporción de las partículas de suelo en la fracción i (%)

M_i , es la media del tamaño de las partículas del suelo en la fracción i (mm)

OM, es el contenido de materia orgánica (%)

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

2.3.3. Factor K de Torri

El tercer método (Torri *et al.*, 1997), revisado por Torri *et al.* (2002) se encuentra en la línea del anterior caso, utilizando DG como parámetro para unificar cuantitativamente la textura del suelo parecido al expuesto por Shirazi et al (1988), además del contenido de MO y Arcilla.

$$D_G = \sum_i f_i \log_{10}(\sqrt{d_i d_{i-1}})$$

$$K = 0,0293 (0,65 - D_G + 0,24D_G^2) * \exp \left\{ -0,0021 \frac{OM}{C} - 0,00037 \left(\frac{OM}{C} \right)^2 - 4,02C + 1,72C^2 \right\}$$

siendo,

OM, es Materia Orgánica (%)

C, es el contenido de arcilla (%)

D_G , es la media geométrica del diámetro de las partículas del suelo (mm)

f_i , es la proporción de las partículas de suelo en la fracción i (%)

d_i , tamaño máximo de la fracción i de textura

d_{i-1} , tamaño mínimo de la fracción i de textura

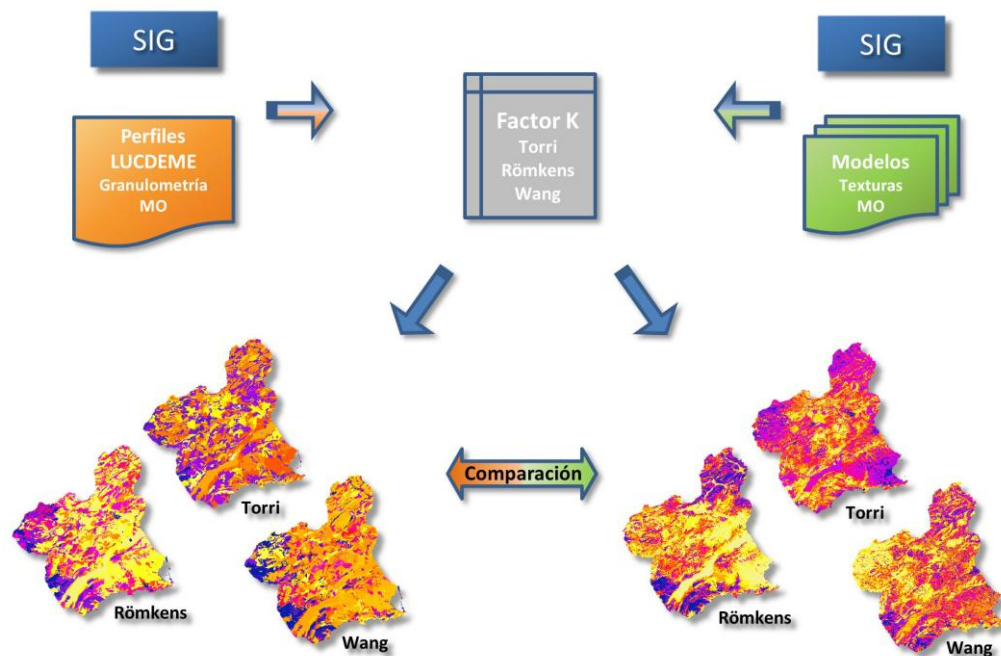


Figura 2. Esquema resumen de la metodología aplicada en la estimación del Factor K.

2.4. Análisis de la variabilidad espacial de la erosionabilidad en relación con los usos del suelo

La susceptibilidad de un suelo a la erosión va a depender de manera directa del tipo de cobertura que presente, siendo la cubierta vegetal uno de los principales factores que determinan la respuesta del terreno frente a los procesos de degradación (Cerdà y Doerr, 2007). De igual forma, la variabilidad a los efectos de la erosividad de un suelo está determinada por los distintos sistemas de uso y gestión que se dan en el territorio, pudiendo modificar de manera importante la

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

erosionabilidad del suelo. El factor K, como índice de estimación de la vulnerabilidad de cualquier suelo, es uno de los factores más importantes en los modelos de erosión. El efecto directo de la erosionabilidad sobre modelos que utilizan ecuaciones como USLE (Wischmeier y Smith, 1978), RUSLE (Renard, *et al.*, 1997) o MUSLE (Arnold *et al.*, 1994; Neitsch *et al.*, 2011), nos permite evaluar de manera explícita los efectos de este factor sobre el valor final de erosión en los modelos. Con el fin de profundizar más en la implicación de las diferencias en la estimación de K por diferentes métodos se ha procedido a calcular el impacto de las diferencias entre distintos tipos de cobertura del suelo.

Las coberturas del suelo se han extraído del proyecto CORINE Land Cover, el mapa de Ocupación del Suelo actualizado para el año 2006, dirigido por Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA) y coordinado por el IGN-CNIG. De las 31 clases de ocupación del CORINE Land Cover (CLC) para el año 2006 en la zona de estudio se han obtenido 6 clases mediante la reclasificación de las nomenclaturas originales, teniendo como objetivo que la agrupación de estas categorías represente unas coberturas análogas a similares procesos de erosionabilidad.

La categoría Urbano, se ha generado con todas las áreas de origen antrópico, y junto a la categoría Láminas de agua han servido como área máscara para excluir los valores de erosionabilidad de estas superficies, pero no han entrado en los análisis estadísticos posteriores. En el caso de la clase Agrícola, y ante la imposibilidad de discriminar correctamente todas las superficies en cultivos de regadío y seco, se han agrupado en una sola categoría algo heterogénea. Para la vegetación natural, se ha podido obtener la clase Forestal para la vegetación natural con una cobertura de vegetación densa, y por otra parte Vegetación natural de bajo porte, aglutinando coberturas forestales menos densas. Finalmente se ha obtenido una categoría caracterizada por representar las áreas de escasa vegetación o Suelo desnudo, teóricamente más sensibles a los efectos erosivos.

Para evaluar de manera comparativa los dos métodos utilizados en el cálculo del Factor K respecto a las coberturas del suelo se ha aplicado el estimador del Error Absoluto Medio (EAM), con el que podemos obtener unos valores globales del error entre los resultados de ambos métodos, en los que utilizaremos los datos de erosionabilidad obtenidos en el método de modelización (como valor observado) y en el de asignación de valores empíricos (como valor estimado).

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_i - y_i|$$

También se ha calculado el Error Relativo Medio (ERM), permitiéndonos representar la fracción de variación cometida en el cálculo de las diferencias, lo que resulta útil para comparar ambos métodos. La ventaja de emplear este procedimiento estadístico es la posibilidad de conservar los signos en el valor final, lo cual en nuestro caso es importante para poder estimar la dirección de las variaciones y de esta manera conocer las variaciones de erosionabilidad dependiendo del método empleado en cada uno de los factores calculados.

$$ERM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{f_i - y_i}{f_i}$$

siendo,

f_i , es el valor observado

y_i , es el valor estimado

3. Resultados

3.1. Estimación de texturas y MO a partir de la cartografía edafológica del proyecto LUCDEME

La primera fase para la elaboración de los tres mapas de fracciones de texturas se ha desarrollado utilizando los valores de los 307 perfiles del proyecto LUCDEME (Figura 1). La información granulométrica obtenida en las determinaciones analíticas de los perfiles, que están relacionados con las distintas unidades taxonómicas del Sistema de FAO-UNESCO (1998), han sido utilizadas para la obtención de los valores promedio.

En una segunda parte, se ha realizado la adaptación de la cartografía de los suelos 1:100.000 y el estudio de sus características físicas del proyecto LUCDEME, que clasifica las unidades taxonómicas del mapa siguiendo el sistema FAO-UNESCO (1974). Se han delimitado 2589 recintos que expresan las características edáficas de la superficie terrestre apoyada por los datos analíticos de las muestras de capa arable. Esta información nos ayuda a elaborar una cartografía de las tres fracciones de textura utilizando los valores granulométricos de los perfiles de muestreo del Proyecto. Pero para la realización de esta fase del trabajo se deben reclasificar las clases taxonómicas del mapa de suelos del sistema FAO-UNESCO 1974, por el World Reference Base for Soil Resources (FAO, WRB Soil Maps, 1998) que es el utilizado en la clasificación taxonómica de las muestras de suelo de los perfiles. Con esta acción se genera una relación entre ambas a modo de pasarela para las nomenclaturas de ambas fuentes. En la siguiente tabla (Tabla 2) se muestra la traslación de clases para ambas fuentes de datos y el cálculo de las texturas definidas por la reclasificación del mapa de suelos LUCDEME.

Tabla 2. Traslación de los valores promedio de las texturas (%) en las unidades de la clasificación taxonómica del suelo de los perfiles del proyecto LUCDEME (Sistema FAO 1998) al Mapa de Suelos LUCDEME (Sistema FAO 1974)

Suelo Perfiles (FAO 1998)	Mapa Suelo LUCDEME (FAO 1974)	Texturas (% Promedio)		
		Arcilla	Limo	Arena
Arenosol calcárico	Arenosoles álbicos	1,30	0,90	97,80
Cambisol eútrico	Cambisoles eútricos	15,25	31,97	52,78
	Cambisoles calcícos	15,25	31,97	52,78
	Cambisoles petrocálicos	15,25	31,97	52,78
Fluvisol calcárico	Fluvisoles calcáricos	23,50	48,32	28,18
Gleysol calcárico	Gleysoles calcáricos	23,50	32,50	44,00
Kastanozem cálcico	Kastanosems calcícos	22,92	40,26	36,82
	Rendsinas arídicas	22,92	40,26	36,82
	Rendsinas órticas	22,92	40,26	36,82
Leptosol eútrico	Litosoles	16,63	38,28	45,09
Leptosol lítico				
Leptosol réndrico				
Regosol calcárico	Regosoles calcáricos	21,65	48,81	29,55
Regosol eútrico	Regosoles eútricos	4,59	24,66	70,75
Regosol léptico	Regosoles litorródicos	12,47	36,23	51,28
	Regosoles litosólicos	12,47	36,23	51,28
Solonchak gléyico	Solonchaks gléyicos	21,47	62,60	15,93

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

Suelo Perfiles (FAO 1998)	Mapa Suelo LUCDEME (FAO 1974)	Texturas (% Promedio)		
		Limo	Arena	Arena
Solonchak háplico	Solonchaks órticos	18,35	57,28	24,38
Solonchak móllico				
Calcisol háplico	Xerosoles cálcicos	21,91	42,05	36,05
Gipsisol háplico	Xerosoles gípsicos	13,08	54,25	32,67
Calcisol lúvico	Xerosoles lúvicos	24,43	29,63	45,95
Calcisol hipercálcico	Xerosoles petrocálcicos	22,22	44,65	33,13
Calcisol pétrico				

Fte. Elaboración propia sobre datos del Proyecto LUCDEME.

Finalmente, se han ajustado estos valores texturales en los recintos del mapa de suelos 1:100.000 que muestran la representación de los suelos en el territorio, respecto a las 63 combinaciones posibles de los tres tipos de suelos principales de la clasificación taxonómica.

Al igual que en los análisis de las texturas, los valores de MO se han calculado a partir de los valores promedio de los 307 perfiles en estudio. Utilizando la reclasificación entre las clases taxonómicas de los suelos de los perfiles y del mapa de suelos utilizadas en los mapas de texturas anteriores se obtienen los valores de MO finales (Tabla 3).

Tabla 3. Translación de los valores promedio porcentuales de materia orgánica (MO) en las unidades de la clasificación taxonómica del suelo de los perfiles del proyecto LUCDEME (Sistema FAO 1998) al Mapa de Suelos LUCDEME (Sistema FAO 1974)

Suelo Perfiles (FAO 1998)	Mapa Suelo LUCDEME (FAO 1974)	MO (%)
Arenosol calcárico	Arenosoles álbricos	0,08
Cambisol eútrico	Cambisoles eútricos	0,85
	Cambisoles cálcicos	0,85
	Cambisoles petrocálcicos	0,85
Fluvisol calcárico	Fluvisoles calcáricos	1,78
Gleysol calcárico	Gleysoles calcáricos	1,67
Kastanozem cálcico	Kastanosems cálcicos	3,54
	Rendsinas arídicas	3,54
	Rendsinas órticas	3,54
Leptosol eútrico	Litosoles	5,09
Leptosol lítico		
Leptosol réndsico		
Regosol calcárico	Regosoles calcáricos	1,82
Regosol eútrico	Regosoles eútricos	0,65
Regosol léptico	Regosoles litorródicos	2,06
	Regosoles litosólicos	2,06
Solonchak gléyico	Solonchaks gléyicos	1,43
Solonchak háplico	Solonchaks órticos	3,00
Solonchak móllico		

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

Suelo Perfiles (FAO 1998)	Mapa Suelo LUCDEME (FAO 1974)	MO (%)
Calcisol háplico	Xerosoles cálcicos	2,43
Gipsisol háplico	Xerosoles gípsicos	1,56
Calcisol lúvico	Xerosoles lúvicos	2,48
Calcisol hipercálcico	Xerosoles petrocálcicos	2,11
Calcisol pétrico		

Fte. Elaboración propia sobre datos del Proyecto LUCDEME.

3.2. Modelización de los valores texturales y MO

El proceso de modelización expuesto en la metodología, ha proporcionado 4 modelos para la estimación de las fracciones estándar de textura y MO, en el que intervienen las variables ambientales expresadas en la tabla 4.

Tabla 4. Variables que forman parte de los modelos predictivos para las clases texturales (Arcilla, Limo y Arena) y MO.

Modelo Arcilla	Modelo Limo	Modelo Arena	Modelo MO
Pendiente	Pendiente	Pendiente	Pendiente
Curvatura	Curvatura	Curvatura	Curvatura
Acumulación de flujo	Acumulación de flujo	Acumulación de flujo	Acumulación de flujo
Temperatura	Temperatura	Temperatura	Temperatura
Precipitación	Precipitación	Precipitación	Radiación difusa
Duración Radiación	Radiación difusa	Radiación difusa	IOI invierno
CMI verano	Radiación directa	Radiación directa	CMI verano
NDVI verano	Duración Radiación	Duración Radiación	FMI verano
Datos Geología	FMI verano	CMI verano	IOI verano
Fase salina suelos	IOI verano	FMI verano	NDVI verano
	NDVI verano	IOI verano	Datos suelos
	Datos Geología	NDVI verano	Fase salina suelos
	Datos suelos	Datos Geología	
	Fase salina suelos	Datos suelos	
		Fase salina suelos	

Fte. Elaboración propia. NDVI: Índice de Vegetación Normalizado.

CMI: Índice de Composición Mineral, Clay Minerals; FMI: Índice de Composición Mineral, Ferrous Minerals; IOI: Índice de Composición Mineral, Iron Oxide. (Sabins, 1999).

Imágenes de satélite Landsat 5 captadas el 14/02/2009 (invierno) y 24/07/2009 (verano).

Sustentados sobre estos modelos, se han realizado una serie de cálculos mediante la traslación de los coeficientes y las formulaciones de las variables obtenidas en el proceso de modelización para obtener las capas de variables ambientales georreferenciadas en el SIG (Figura 3).

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

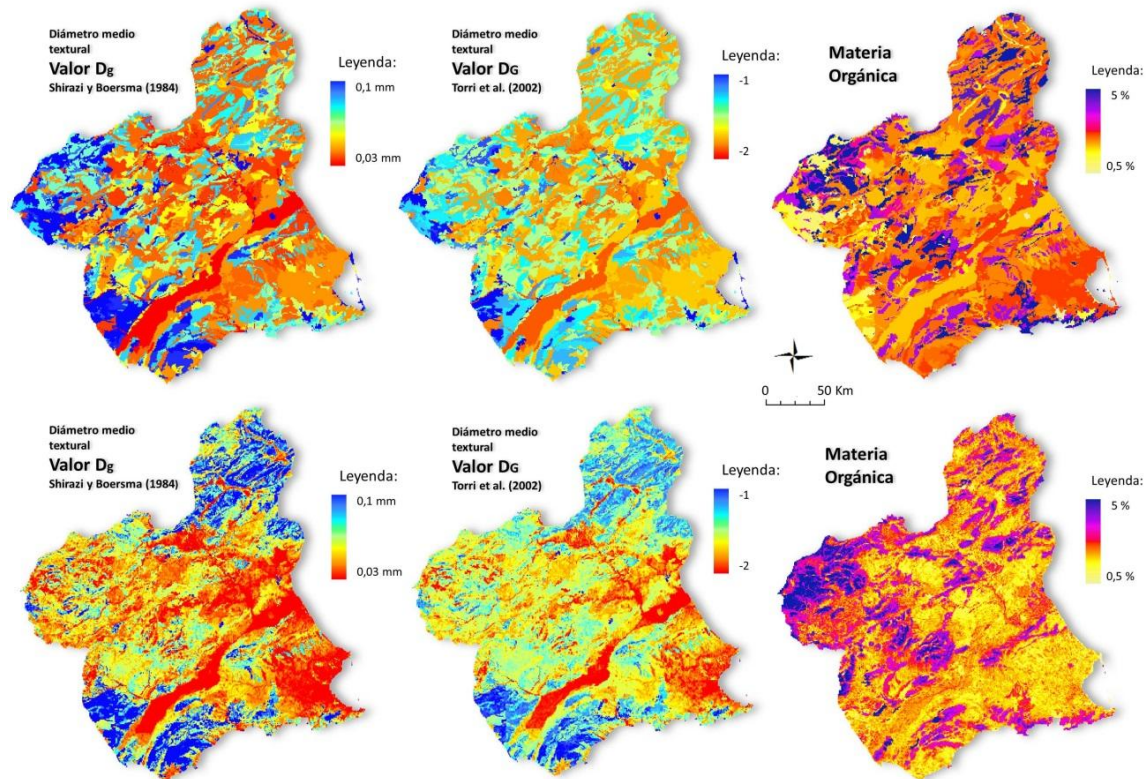


Figura 3. Capas ráster de la media geométrica del diámetro de las partículas del suelo (D_g y D_G) y Materia Orgánica. Fila superior: Capas elaboradas mediante interpretación de los valores texturales y de MO de las clases taxonómicas en las determinaciones analíticas de los perfiles del proyecto LUCDEME. Fila Inferior: Capas elaboradas mediante modelización de los valores texturales y de MO.

D_g: Valores expresados en mm, en azul los valores más altos y en rojo los más bajos. D_G: Valores expresados en unidades logarítmicas del tamaño medio de las partículas (mm), en azul los valores más altos y en rojo los más bajos MO: Valores expresados en % de contenido de material, en violeta los valores más altos y en amarillo los más bajos.

3.3. Cálculo del Factor K

Para la deducción de los valores de erosionabilidad en el área de estudio se han analizado a partir de los dos métodos de estimación propuestos en la metodología. Los datos de estos dos métodos han sido calculados por los tres algoritmos de cálculo del Factor K, expuestos anteriormente, de Römken *et al.* (1986), Torri *et al.* (1997) y Wang *et al.* (2012).

La obtención de los diámetros medios de granulometría del suelo (D_g y D_G), necesarios para la obtención del Factor K, se han calculado a partir de los valores texturales generados. A continuación, se muestran en los resultados cartográficos de la pérdida de suelo cuantificados por unidad de erosividad en la parcela estándar, expresadas en Mg*ha*h / ha*MJ*mm. En la siguiente

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

figura (Figura 4) se muestra la representación de los cálculos de los índices de erosionabilidad elaborados a partir de las capas ráster de texturas obtenidas de las de los datos de las determinaciones analíticas de los perfiles del proyecto LUCDEME, y los elaborados a partir de las capas ráster de texturas y MO obtenidas de las modelizaciones de las variables ambientales.

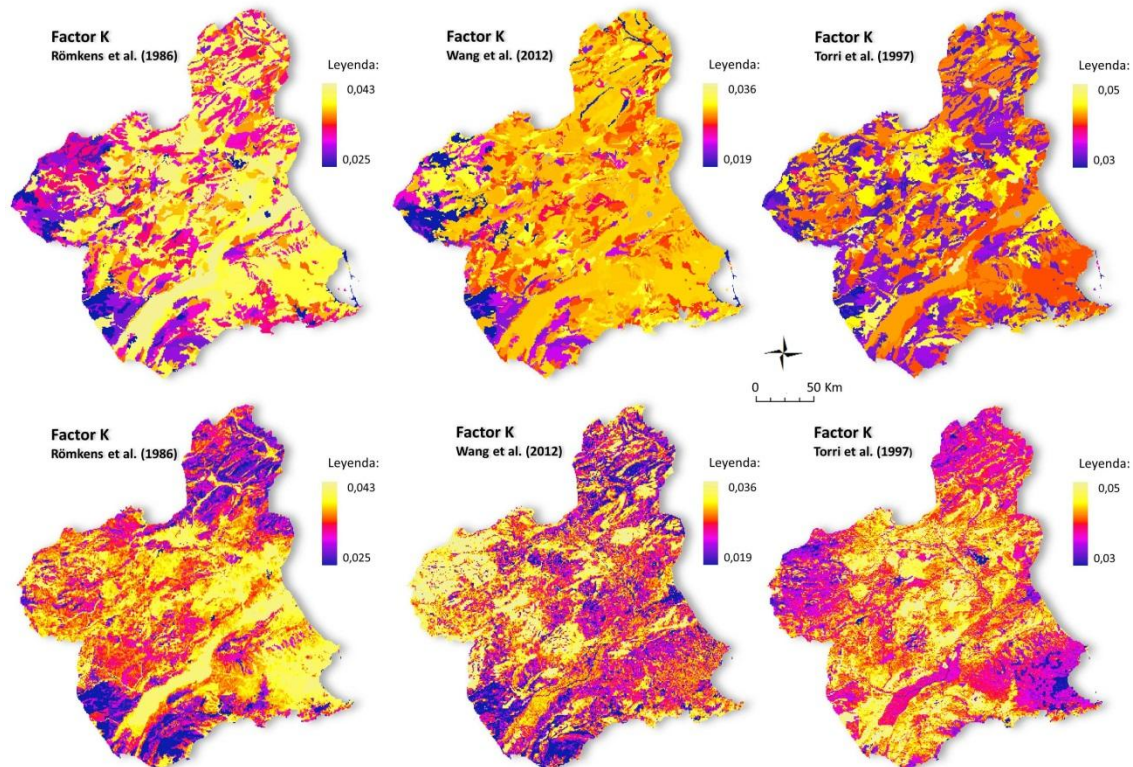


Figura 4. Capas ráster de la estimación del índice de erosionabilidad (Factor K).

Fila superior, valores del Factor K (Römken *et al.* (1986); Wang *et al.* (2012); Torri *et al.* (1997)) elaboradas a partir de las capas ráster de texturas obtenidas de las bases de los datos de las determinaciones analíticas de los perfiles del proyecto LUCDEME. Fila inferior, valores del Factor K (Römken *et al.* (1986); Wang *et al.* (2012); Torri *et al.* (1997)) elaboradas a partir de las capas ráster de texturas y MO obtenidas de las modelizaciones de las variables ambientales. Valores expresados en $\text{Mg} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} / \text{ha} \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}$, en amarillo los valores más altos y en violeta los más bajos

3.4. Comparación de los dos métodos en el cálculo de la erosionabilidad

3.4.1 Factor K (Römken *et al.*, 1986)

Los valores mostrados en las diferencias entre los dos métodos que utilizan el índice de erosionabilidad de Römken *et al.* (1986) (Figura 5 - izquierda) se puede observar como las áreas representadas en tonos claros corresponden a valores 0 o próximos a 0, lo cual nos están indicando una alta similitud entre ambos métodos. Especialmente estos valores se dan en las grandes áreas de

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

depósitos aluviales del Guadalentín y Segura, así como a zonas de baja pendiente relacionadas con superficies agrícolas.

La representación de colores rojos, nos muestran las áreas con valores en los que el método de estimación de las texturas y MO por modelización proporciona un factor K más alto que por el método convencional. Estas zonas se distribuyen de manera más notable en zonas del centro y noroeste de la Región, asociadas a leptosoles y cambisoles cálcicos. Por su parte, la representación de tonos azules, nos muestran áreas donde los valores K son más altos en el método convencional. Espacialmente se muestran de manera importante en la comarca del Altiplano (norte de la Región de Murcia) sobre suelos localizados en depósitos aluviales o coluviales de origen calizo.

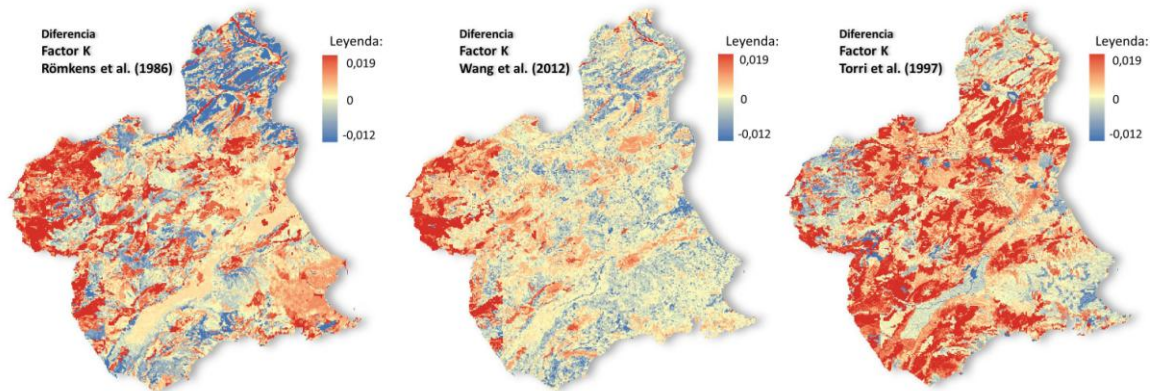


Figura 5. Capas ráster de los valores diferencia de los dos métodos empleados. Datos obtenidos al restar el índice de erosionabilidad (Factor K) expuesto por Römkens *et al.* (1986); Wang *et al.* (2012); y Torri *et al.* (1997) elaborados mediante modelización de las variables ambientales y los datos de las determinaciones analíticas de los perfiles del proyecto LUCDEME.

Valores expresados en $Mg*ha*h / ha*MJ*mm$, en rojo los valores positivos que establecen una sobrestimación del Factor K con variables modelizadas sobre el Factor K obtenido directamente del LUCDEME, en azul valores negativos indicando el caso contrario, y en amarillo valores cercanos a 0 que muestran las áreas con valores similares entre ambos métodos

3.4.2 Factor K (Wang *et al.*, 2012)

Los índices de erosionabilidad mostrados por el cálculo realizado con el algoritmo de Wang *et al.* 2012, nos muestra una menor polarización de los valores extremos, obteniéndose mayores áreas donde se dan similitudes entre los dos métodos (Figura 5 - centro). A grandes rasgos, podemos afirmar que estos valores cercanos a 0 están asociados, aunque no tan definidos como el caso anterior, a zonas de depósitos fluviales y aluviales del Guadalentín, Segura y Campo de Cartagena, así como importantes extensiones de suelo agrícola en el centro de la Región. Los valores de K más altos para el método que utiliza la modelización se localizan casi exclusivamente en el área del Noroeste de la Región, asociándose a suelos de tipo cambisol de origen calcáreo. Respecto a los datos del Factor K que muestran mayor erosionabilidad con el método convencional (tonos azules), observamos como los valores absolutos llegan a ser similares que en el caso anterior (Römkens *et al.*, 1986), obtienen en algunos puntos hasta un $0,012 Mg*ha*h / ha*MJ*mm$, pero su influencia relativa a nivel espacial es menor, situándose en áreas de cultivos de secano y superficies de pastizal del Altiplano, centro de la Región y áreas de Águilas y Mazarrón (costa suroccidental).

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

3.4.3. Factor K (Torri *et al.*, 1997)

Los valores obtenidos en las diferencias de los métodos en análisis para el Factor K de Torri *et al.* (1997), a rasgos generales presenta unos valores de erosionabilidad más elevados en el método de modelización (Figura 5 - derecha). Las áreas de mayor similitud entre ambos métodos se presentan, al igual que en los dos casos anteriores, en las zonas de depósitos fluviales y aluviales del Guadalentín, Segura y Campo de Cartagena. Las mayores tasas de erosionabilidad a nivel espacial se dan con el uso de los datos modelizados, distribuyéndose de manera importante por casi toda el área regional, con unos valores medios de $0,011 \text{ Mg*ha*h} / \text{ha*MJ*mm}$, pero pudiendo llegar en algunos casos al 0,019. Respecto a los valores que hacen referencia a los mayores índices de erosionabilidad para los datos obtenidos del método convencional se puede advertir que su representación espacial es menor, localizados en gran parte del Altiplano y Noroeste y con un nivel más bajo que en los casos anteriores.

3.5. Evaluación de los dos métodos en el cálculo de la erosionabilidad en relación con las coberturas de suelo

Siguiendo la argumentación metodológica con los estimadores de error propuestos, se han analizado los datos de los niveles digitales (ND) de los píxeles para los dos métodos y para cada uno de las fórmulas utilizadas por tipos de cobertura del suelo. Para la interpretación de los valores de las diferencias entre métodos, se puede utilizar la referencia al valor 0 como las áreas similares para ambos métodos. Los valores que sean superiores a 0, presentan valores de K más elevados en el método de modelización, y los valores que sean menores a 0, nos describen las áreas donde los valores de erosionabilidad son mayores cuando se ha utilizado los datos obtenidos por el otro método.

La estimación del error entre ambos métodos presenta unos resultados bastante heterogéneos por usos del suelo (Tabla 5). Si nos centramos en el Error Absoluto Medio (EAM) para toda el área de estudio, observábamos unos valores de error muy bajos en los tres índices examinados, que en el mayor de los casos no llega a $0,005 \text{ Mg*ha*h} / \text{ha*MJ*mm}$. Analizando los valores del Error Relativo Medio (ERM), y de manera más interesante observamos que los datos obtenidos en los porcentajes nos muestran cambios elevados respecto al factor de erosionabilidad dependiendo del índice utilizado. Si se aplica el índice de Torri *et al.*, podemos llegar a estimar más de un 8 % de erosionabilidad con la utilización de los valores obtenidos por el método de modelización respecto al método comparado. El índice de Römken para este caso es el más estable entre los dos con algo más de un 1 % de diferencia en las tasas de erosionabilidad. Y por su parte, el índice de Wang *et al.* presenta un cambio de tendencia, produciéndose mayores niveles de erosionabilidad con casi un 5 % más si se utiliza este algoritmo con los datos calculados a partir de la cartografía edafológica del proyecto LUCDEME.

Segmentando esta información desde el punto de vista de las diferentes coberturas del terreno, podemos observar de manera más detallada cuales son las variaciones en las tasas de erosionabilidad mostrados por los diferentes índices. La cobertura *Agrícola* presenta unos valores de EAM muy similares en los tres algoritmos utilizados. Respecto al %ERM, destaca el cambio que se produce con el índice de Römken *et al.*, 1986 produciendo mayores tasas de erosionabilidad en las áreas agrícolas con los datos del método convencional.

Tabla 5. Evaluación del error en los métodos de estimación del Factor K. Los algoritmos utilizados para la cuantificación del error son el Error Absoluto Medio (EAM) expresados en valores absolutos, el Error Relativo Medio (ERM) expresados en porcentajes, y el Porcentaje de Desviación Media (PDM) expresados en porcentajes. Los cálculos se han realizado sobre los índices de erosionabilidad de Römken *et al.*, 1986, Wang *et al.*, 2012 y, Torri *et al.* 1997, para el Total de la superficie de estudio, y de manera particular para las superficies con coberturas Agrícola, Forestal, Vegetación natural y Suelo Desnudo

	Cobertura	EAM	%ERM
Römken <i>et al.</i>, 1986	Total	0,00416	1,30
Wang <i>et al.</i>, 2012		0,00332	-4,88
Torri <i>et al.</i>, 1997		0,00455	8,14
Römken <i>et al.</i>, 1986	Agrícola	0,00379	-1,51
Wang <i>et al.</i>, 2012		0,00375	-8,26
Torri <i>et al.</i>, 1997		0,00375	6,51
Römken <i>et al.</i>, 1986	Forestal	0,00568	11,71
Wang <i>et al.</i>, 2012		0,00295	5,87
Torri <i>et al.</i>, 1997		0,00614	11,80
Römken <i>et al.</i>, 1986	Vegetación natural de bajo porte	0,00458	4,50
Wang <i>et al.</i>, 2012		0,00264	-0,19
Torri <i>et al.</i>, 1997		0,00571	10,28
Römken <i>et al.</i>, 1986	Suelo Desnudo	0,00412	-0,44
Wang <i>et al.</i>, 2012		0,00250	-5,28
Torri <i>et al.</i>, 1997		0,00564	10,45

Fuente. Elaboración propia

Para las áreas forestales, se observan valores más altos en EAM para los índices de Römken *et al.*, 1986 y Torri *et al.*, 1997, pero es en los %ERM donde se marcan las diferencias con tasas de erosionabilidad muy altas de estos dos índices. Cuando se utilizan los datos modelizados, al igual que Wang *et al.*, 2012 con tasas casi del 6%, siendo la única vez que este índice muestra mayores valores del factor K si se aplica con valores de variables modelizadas. Las coberturas de vegetación natural de bajo porte nos muestran valores muy dispersos para los tres índices en los valores de EAM. Respecto a los porcentajes de ERM, destacar que el índice de Torri *et al.*, 1997 sigue presentado los valores más elevados de erosionabilidad con los datos modelizados, para este estimador el índice de Wang *et al.*, 2012 muestra unos valores muy similares independientemente del método utilizado para la elaboración de los datos de entrada.

Finalmente, para las superficies con escasa o nula cobertura vegetal se observan valores de EAM similares al forestal, siendo de nuevo los más bajos para el índice de Wang *et al.*, 2012. En la estimación del % ERM Römken *et al.*, 1986 muestra unas tasas de erosionabilidad muy similares para ambos métodos, siendo de nuevo los más altos para Torri *et al.*, 1997 con 10,45% y más bajos para Wang *et al.*, 2012 (-5,28%) si se calculasen con datos modelizados.

Desde el punto de vista espacial se puede cuantificar los porcentajes de píxeles con sus correspondientes ND, expresando de manera gráfica la evolución de sobrevaloración o subvaloración de los valores de erosionabilidad dependiendo del método utilizado para el cálculo de las variables de texturas y MO que sirven de entrada a los algoritmos de estimación del Factor K

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

propuestos. Para analizar estos gráficos nos referiremos en adelante a sobrevaloración cuando los valores obtenidos en las diferencias de los métodos sean mayores para los datos obtenidos por el método de modelización frente al convencional y subvaloración al proceso inverso como ya se ha argumentado en la metodología.

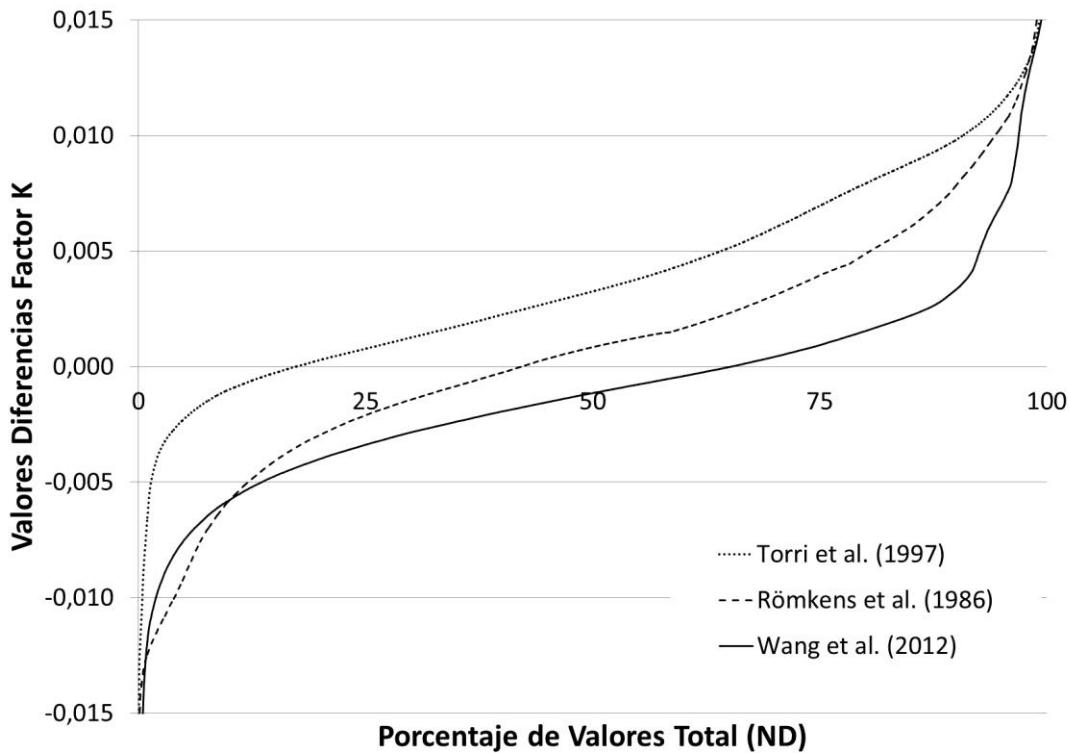


Figura 6. Diagrama de frecuencias ordenadas por porcentaje de los niveles digitales de los píxeles (ND) del Total de la superficie en estudio para los valores de diferencias de los dos métodos de estimación del Factor K. Por encima del valor 0 se expresa una sobrevaloración, y por debajo una subvaloración de los índices de erosionabilidad por el método de modelización. La gráfica se ha representado para los tres algoritmos de cálculo del Factor K (Torri *et al.*, 1997, Römken *et al.*, 1986 y Wang *et al.*, 2012)

En un análisis inicial para toda la zona de estudio (Figura 6), se puede mostrar que para los valores obtenidos por el índice de Torri *et al.*, 1997 calculado por modelización, casi el 80% de la superficie sobreestima los niveles de erosionabilidad respecto al método convencional, teniendo más del 35% de los casos con valores superiores a 0,005 Mg*ha*h / ha*MJ*mm. En el caso de Römken *et al.*, 1986 se puede ver que algo más de la mitad de los valores se posicionan en sobrevaloración del Factor K, y la mayor parte de sus ND están entre los valores $\pm 0,005$ Mg*ha*h / ha*MJ*mm, lo cual nos indica unos valores muy próximos entre ambos métodos. Para el índice de Wang *et al.*, 2012 los resultados son muy similares al caso anterior, pero con un nivel algo superior en subvaloración.

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

En el análisis de las superficies de cultivos agrícolas observamos como los índices de Torri *et al.*, 1997 y Römken *et al.*, 1986 muestran unos porcentajes muy parecidos a los mostrados para el conjunto del área de estudio (Figura 7). Solo el índice de Wang *et al.*, 2012 aumenta para esta cobertura del suelo sus valores de subvaloración, modificándose de manera brusca a valores muy altos de sobrevaloración en un 15% de sus píxeles, lo cual se debe a áreas espacialmente concretas que no se están estimando de manera correcta.

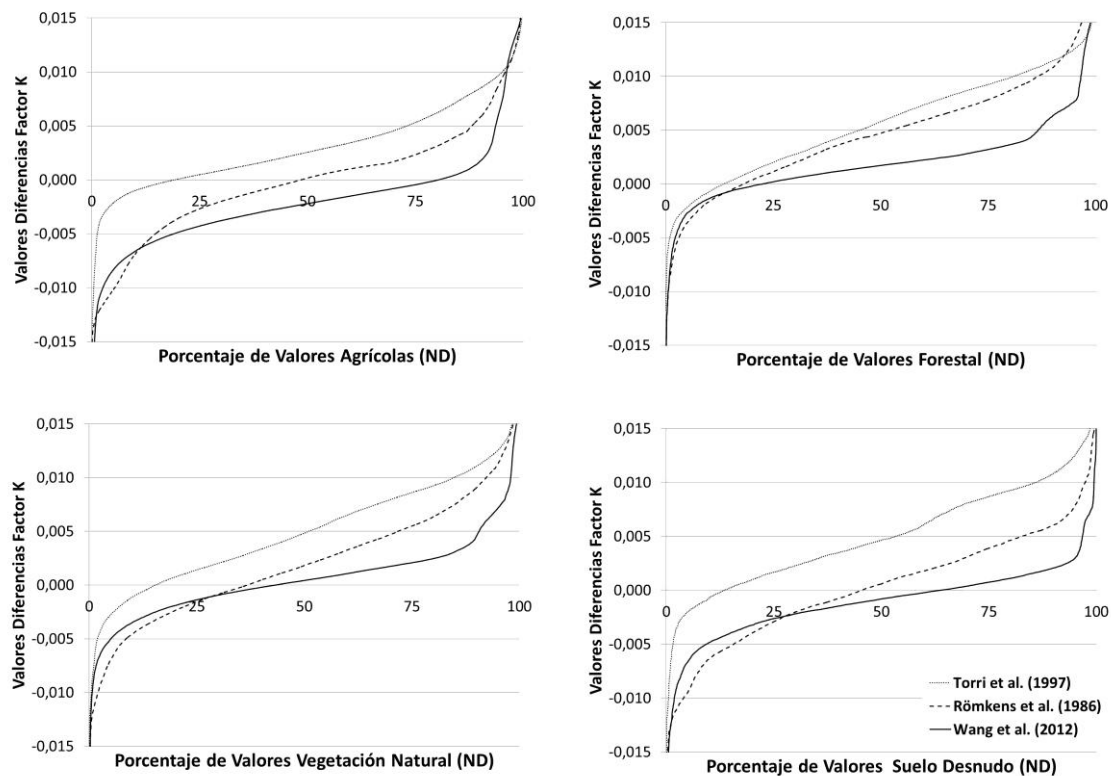


Figura 7. Diagrama de frecuencias ordenadas por porcentaje de los niveles digitales de los píxeles (ND) del área de cobertura Agrícola para los valores de diferencias de los dos métodos de estimación del Factor K. Por encima del valor 0 se expresa una sobrevaloración, y por debajo una subvaloración de los índices de erosionabilidad por el método de modelización. La gráfica se ha representado para los tres algoritmos de cálculo del Factor K (Torri *et al.*, 1997, Römken *et al.*, 1986 y Wang *et al.*, 2012)

Para áreas de densa cobertura forestal se observa que más del 75% de la superficie para los tres índices esta sobreestimada (Figura 7), siendo el de Wang *et al.*, 2012 el que más similitud presenta entre ambos métodos para esta cobertura, ya que el prácticamente el 80% de los valores están entre $\pm 0,005 \text{ Mg*ha*h} / \text{ha*MJ*mm}$. A diferencia de los otros dos índices que sobrevaloran más del 50% de sus valores por encima de $0,005 \text{ Mg*ha*h} / \text{ha*MJ*mm}$. Si observamos lo que sucede con las coberturas de vegetación natural de bajo porte, vemos que se repite un patrón similar al caso de las coberturas forestales, pero con unos índices de sobrevaloración menor para Römken *et al.*, 1986 y Wang *et al.*, 2012, manteniéndose para el caso de Torri *et al.*, 1997.

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

En las coberturas asociadas a zonas de suelo desnudo (Figura 7) se observa que para Torri *et al.*, 1997 los niveles de sobrevaloración son muy elevados tanto en porcentaje como en intensidad, ya que prácticamente el 50% de sus datos están por encima de los $0,005 \text{ Mg} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} / \text{ha} \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}$. Por su parte Römken *et al.*, 1986 y Wang *et al.*, 2012 se reparten la superficie entre sobre y subvaloración de los valores de erosionabilidad, presentando este último unos índices de subvaloración mayor, pero con valores de las diferencias entre métodos muy similares con más del 75% de los ND entre los valores $\pm 0,0025 \text{ Mg} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} / \text{ha} \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}$.

4. Discusión y conclusiones

Una parte importante de los resultados de este trabajo tienen una finalidad aplicada, con el empleo de los datos obtenidos de textura y MO nos permiten elaborar una predicción de los valores de erosionabilidad a escala regional, y con ello, la posibilidad de evaluar la variabilidad de los resultados establecidos por estimaciones regionales de variables del suelo por dos métodos distintos y tres algoritmos de cálculo del Factor K. El análisis de toda esta información nos facilita conocer el peso que ejerce el origen de la información de entrada a los modelos en el cómputo de erosionabilidad y cuál será la importancia en la elección del algoritmo de estimación del Factor K en los resultados finales.

La estimación a través de la modelización estadística de estas propiedades del suelo no se encuentra exentas de un cierto grado de error, ya que están en relación con algunos fenómenos naturales que se pueden generar a diversas escalas (Turner *et al.*, 1989), como así sucede con los procesos de degradación del suelo (Poesen *et al.*, 1994; Wei *et al.*, 2012; Cerdà *et al.*, 2013). Por lo que la agregación de información en un SIG a diferentes resoluciones espaciales en el análisis regional con variables ambientales es un elemento crítico a tener en cuenta, ya que repercute en los errores de precisión de los modelos de predicción (Paustian *et al.*, 1997). No obstante, en relación al cálculo del Factor K, parece obvio que es preferible el uso de las texturas y MO obtenidas mediante modelización por disponer de una distribución espacial más detallada, ya que la homogeneidad de los recintos de las capas del método LUCDEME no tiene en cuenta la variabilidad y diversidad del territorio. Trabajos como los de Bonilla y Johnson (2012), muestran en sus resultados una gran dispersión en los valores del factor K dentro de cada categoría del mapa de suelos, debido a que no es posible estimar la erosividad de un determinado suelo con base únicamente en su orden taxonómico.

La siguiente parte de la discusión se centra en evaluar cuál es el grado de cambio que genera el empleo de diferentes algoritmos para la estimación de la erosionabilidad, aunque hay que recordar que las tasas de cambio son muy reducidas, ya que para el 95% de los valores no se sobrepasa los $\pm 0,015 \text{ Mg} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} / \text{ha} \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}$. Atendiendo a los valores acumulados de las *Diferencias* entre métodos respecto a los tres índices utilizados en este capítulo, se puede decir que el índice de Wang *et al.*, 2012 es el que muestra menos diferencias en los cálculos, independientemente del tipo de valores de textura y MO utilizados en su cómputo, donde la divergencia entre métodos nos muestra que la mayor parte de sus píxeles (ND) se encuentran en un rango de $\pm 0,005 \text{ Mg} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} / \text{ha} \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}$. Por su parte, el índice de Römken *et al.*, 1986 tiene unos valores parecidos al índice anterior, pero mostrando una parte de sus valores más extremos en ambos métodos. Esto nos sugiere que para estimaciones de erosionabilidad a escala regional este índice puede ocasionar sobrevaloraciones en los cálculos del Factor K, que están asociados (en nuestro caso particular) a un aumento de la estimación de erosionabilidad en áreas relacionadas con

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

leptosoles y cambisoles cálcicos, cuando utiliza las texturas y MO modelizadas, y cuando estas propiedades se han obtenido directamente de la cartografía LUCDEME, sobreestima la erosionabilidad en suelos localizados en la comarca del Altiplano de depósitos aluviales o coluviales de origen calizo. Finalmente, el índice de Torri *et al.*, 1997 presenta unos valores de erosionabilidad más altos para el método de datos modelizados, con más de un 35% de sus ND con diferencias mayores a $0,005 \text{ Mg*ha*h} / \text{ha*MJ*mm}$, lo que indica una sobrestimación del Factor K con estas propiedades del suelo. Es evidente que los efectos de la erosionabilidad en el suelo no solo van a depender de los factores ambientales como los litológicos, topográficos o climatológicos, sino que va a estar influenciado de manera directa por las diferentes coberturas existentes en el territorio (Kosmas *et al.*, 1997; García-Ruiz, 2010), y el estado de estas dependerán de la gestión y el manejo a la que se verán sometidos los usos del suelo que las compongan (Cerdà, 1997; Kairis *et al.*, 2013). Esto nos ha llevado a enfocar el análisis anterior hacia una segmentación del área de estudio en diferentes coberturas que participen de unas características comunes, y nos ofrezca una perspectiva más homogénea con la que poder evaluar los índices del Factor K.

Analizando el estimador del error absoluto medio (EAM) observamos que los valores son muy bajos entre los tres algoritmos empleados, y en algunos casos como en la cobertura agrícola se presentan muy similares, lo que nos indica a priori que la selección del estimador de cálculo de la erosionabilidad será independiente del tipo de datos de entrada que se tengan para el estudio. Pero si valoramos los datos de los porcentajes obtenidos para el error relativo medio (%ERM) vemos que las diferencias se acentúan, marcándose las tendencias respecto a los índices utilizados. En un primer análisis para toda el área de estudio, el índice de Römken *et al.*, 1986 nos indica que es el índice con menor influencia respecto al origen de los datos al mostrar un porcentaje de 1,3. En cambio, los índices de Wang *et al.*, 2012 y Torri *et al.*, 1997 ofrecen una mayor divergencia en los valores de las *Diferencias*, en las que el primero con -4,88% muestra una menor erosionabilidad y el segundo una mayor (8,14%) siempre que se utilice como valores de entrada las texturas y MO elaboradas por el método de asignación de valores empíricos. Pero si en el análisis se utiliza la segmentación del territorio en coberturas análogas, vemos como Torri *et al.*, 1997 aunque infravalora el Factor K con este último método, es el más estable en todos los casos. Mientras que Römken *et al.*, 1986 y Wang *et al.*, 2012 tienen una tendencia similar, ofreciendo valores distintos para las coberturas *Agrícola y Suelo Desnudo*, respecto a las de *Forestal y Vegetación Natural* (Figura 8).

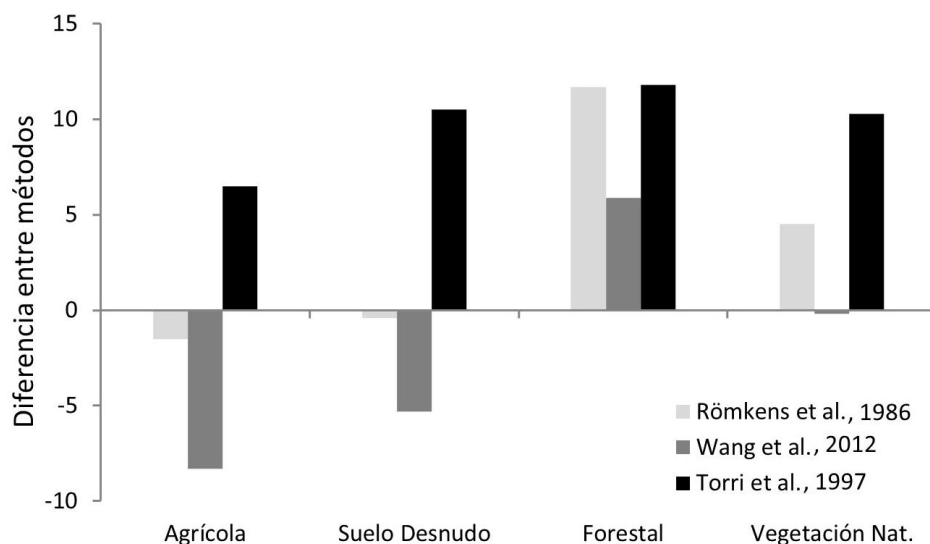


Figura 8. Estimación de la erosionabilidad analizada por distintas coberturas del terreno. En valores positivos, sobreestimación del Facto K en el método de *Modelización*; en valores negativos, sobreestimación del Facto K en el método de asignación de valores empíricos

Estos resultados nos sugieren que los índices de Römken *et al.*, 1986 y Wang *et al.*, 2012 en el cálculo de la erosionabilidad son más sensibles al método con el que representemos la variabilidad del territorio. Por su parte, el índice de Torri *et al.*, 1997 nos muestra una mayor estabilidad a las zonas de coberturas heterogéneas.

Referencias bibliográficas

- Akaike, H. (1974). "A new look at the statistical model identification", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19, pp. 716-723.
- Alatorre, L.C., Beguería, S. (2009). "Los modelos de erosión: una revisión", *Rev. C. & G.*, 23, pp. 29-48.
- Alvarez Rogel, J., Ortiz Silla, R., Alcaraz Ariza, F. (2001). "Edaphic characterization and soil ionic composition influencing plant zonation in a semiarid Mediterranean saltmarsh", *Geoderma*, 99, pp. 81-98.
- Arnold J.G., Williams J.R., Srinivasan R., King K.W., Griggs R.H. (1994). "SWAT, *Soil and Water Assessment Tool*". USDA-ARS, 808 East Blackland road, Temple, Texas 76502.
- Blonska, E., Lasota, J., Zwydak, M., Klamerus-Iwan, A., Golab, J. (2016). "Restoration of forest soil and vegetation 15 years after landslides in a lower zone of mountains in temperate", *Ecological Engineering*, 97, pp. 503-515.

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

Boix-Fayos, C., Martínez-Mena, M., Calvo-Cases, A., Castillo, V., Albaladejo, J. (2005). "Concise review of interrill erosion studies in SE Spain (Alicante and Murcia): Erosion rates and progress of knowledge from the 1980's", *Land Degradation and Development*, 16, pp. 517-528.

Boix-Fayos, C., Martínez-Mena, M., Pérez Cutillas, P., de Vente, J., Barberá, G.G., Mosch, W., Navarro Cano, J.A., Gaspar, L., Navas, A. (2017). "Carbon redistribution by erosion processes in an intensively disturbed catchment", *Catena*, 149, pp. 799-809.

Bonilla, C.A., Johnson, O.I. (2012). "Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile". *Geoderma*, 189-190, pp. 116-123.

Bouyoucos, G.J. (1935). "The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion", *J. Amer. Soc. Agron.* 27, pp. 738-41.

Bryan, R.B. (1968). "The development, use and efficiency of indices of soil erodibility", *Geoderma*, 2, pp. 5-26.

Cerdà, A. (1997). "Soil erosion after land abandonment in a semiarid environment of southeastern Spain", *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 11, pp. 163-176.

Cerdà, A., Doerr, S.H. (2007): "Soil wettability, runoff and erodibility of major dry-Mediterranean land use types on calcareous soils", *Hydrological Processes*, 21, pp. 2325-2336.

Cerdà, A., Brazier, R., Nearing, M., de Vente, J. (2013): Scales and erosion. *Catena*, 102, pp. 1-2.

Confederación Hidrográfica del Segura (CHS). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2017): Consulta: 20-01-2017]. Disponible en <http://www.chsegura.es/chs/cuenca/resumendedatosbasicos/marcoadministrativo/>

de Vente, J., Poesen, J., Govers, G., Boix-Fayos, C. (2009): "The implications of data selection for regional erosion and sediment yield modelling", *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, pp. 1994-2007.

de Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Van Rompaey, A., Govers, G. (2008): "Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain", *Global and Planetary Change* 60, pp. 393-415.

FAO-UNESCO. 1974. *Soil Map of the World*. Vol I.

FAO. 1998. *World Reference Base for Soil Resources*. Roma.

Foster, G.R., McCool, D.K., Renard, K.G., Modenhauer, W.C. (1981): "Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units", *Journal of Soil & Water Conservation* 36 (6), pp. 355-359.

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

Heuvelink, G.B.M., J.A. Huisman. (2000): "Choosing between abrupt and gradual spatial variation". In: H.T. Mowrer and R.G. Congalton, editors, *Quantifying spatial uncertainty in natural resources*. Ann Arbor Press, Chelsea, MI. p. 111-117.

Hontoria, C., Velásquez, R., Benito, M., Almorox, J., Moliner, A. (2009): "Bradford-reactive soil proteins and aggregate stability under abandoned versus tilled olive groves in a semi-arid calcisol", *Soil Biology and Biochemistry* 41 (7), pp. 1583-1585.

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

ICONA. (1986): *Proyecto LUCDEME* (Lucha contra la Desertificación del Mediterráneo): Mapa de suelos, escala 1:100.000. ICONA - Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Kairis, O., Karavitis, C., Kounalaki, A., Salvati, L., Kosmas, C. (2013): "The effect of land management practices on soil erosion and land desertification in an olive grove", *Soil Use and Management*, 29, pp. 597-606.

Kosmas, C., Danalatos, N., Cammeraat, L.H., Chabart, M., Diamantopoulos, J., Farand, R., Gutierrez, L., Jacob, A., Marques, H., Martinez-Fernandez, J., Mizara, A., Moustakas, N., Nicolau, J.M., Oliveros, C., Pinna, G., Puddu, R., Puigdefabregas, J., Roxo, M., Simao, A., Stamou, G., Tomasi, N., Usai, D., Vacca, A. (1997): "The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions", *Catena* 29 (1), pp. 45-59.

Kozak, J.A., Ahuja, L.R., Green, T.R., Ma, L. (2007): "Modelling crop canopy and residue rainfall interception effects on soil hydrological components for semi-arid agriculture", *Hydrological Processes*, 21 (2), pp. 229-241.

Liu, X.Y., Liu, Y.J., (2007): "Effect of forest fire on soil anti-corrosion and permeability in *phyllostachyr pubescens*", *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)* 32 (6), pp. 114-118.

Martínez-Mena, M., López, J., Almagro, M., Albaladejo, J., Castillo, V., Ortiz, R., Boix-Fayos, C. (2012): "Organic carbon enrichment in sediments: Effects of rainfall characteristics under different land uses in a Mediterranean area". *Catena*, 94, pp. 36-42.

Middleton, H. E. and Byers, H. G. 1934. The Settling Volume of Soils. Soil Science. Volume 37 - Issue 1 - ppg 15-28

Mutchler, C.K., Carter, C.E., (1983): "Soil erodibility variation during the year". Transactions of ASAE 26, 1102-1104.

NCRS. (2000): "Technical Guide RUSLE". Section I-C. Part 1. Minnesota.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. (2011): "Soil Water Assesment Tool. v.9." Temple, Texas: Blackland Research Center – Texas Agricultural Experiment Station.

Paustian, K., Levine, E., Post, W.M., Ryzhova, I.M. (1997): "The use of models to integrate information and understanding of soil C at the regional scale". *Geoderma*, 79 (1-4), pp. 227-260.

Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., Blair, R. (1995): "Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits", *Science*. 267, pp. 1117-1123.

Poesen, J.W., Torri, D., Bunte, K. (1994): "Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review", *Catena* 23 (1-2), pp. 141-166.

Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., Valentin, C. (2003): "Gully erosion and environmental change: Importance and research needs", *Catena*, 50 (2-4), pp. 91-133.

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K. & Yoder, D. C. (1997): "Prediction rainfall erosion by water, a guild to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)". USDA Agricultural Handbook No. 703. Washington, DC: U.S. Government Printing Office.

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

Römkens, M. J. M. (1985): "The soil erodibility factor: A perspective". In S. A. El-Swaify, W. C. Moldenhauer and A. Lo (eds.) *Soil Erosion and Conservation* (Ankeny, IA: Soil Conservation Society of America), pp. 445-461.

Römkens, M.J.M, Prasad, S.N. & Poesen, J.W.A. (1986): "Soil erodibility and properties". Trans. 13th congress of the Int. Soc. Of Soil Sci., Hamburg, Germany 5, p. 492-504.

Römkens, M. J. M., Poesen, J. W. A. & Wang, J. Y. (1988): "Relationship between the USLE soil erodibility factor and soil properties". In: S. Rimwanichland (ed.) *Conservation for Future Generations* (Bangkok: Department of Land Development), pp. 371-385.

Sabins Jr, F.F. (1999): "Remote sensing for mineral exploration". *Ore Geology Reviews*.

Schuler, J., Sattler, C. (2010): "The estimation of agricultural policy effects on soil erosion-An application for the bio-economic model MODAM". *Land Use Policy* 27 (1) , pp. 61-69.

Shirazi, M. A., Boersma, L. (1984): "A unifying quantitative analysis of soil texture", *Soil Science Society of America Journal*, 48, pp. 142-147.

Shirazi, M.A., Boersma, L., Hart, W. (1988): "A unifying analysis of soil texture: improvement of precision and extension of scale", *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, pp. 181-190.

Torri, D., Poesen, J., Borselli, L. (1997): "Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset". *Catena*, 31 (1-2), pp. 1-22.

Torri, D., Poesen, J., Borselli, L. (2002): "Erratum: Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset". *Catena* 46 (4), pp. 309-310.

Torri, D., Santi, E., Marignani, M., Rossi, M., Borselli, L., MacCherini, S. (2013): "The recurring cycles of biancana badlands: Erosion, vegetation and human impact", *Catena*, 106, pp. 22-30.

Turner, M.G., O'Neill, R.V., Gardner, R.H., Milne, B.T. (1989): "Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern". *Landscape Ecology*, 3, pp. 153-162.

Voznesensky, A.S., Artsruui, A.B. (1940): "A laboratory method for determining the antierosion resistance of soils", *Soils and Fertilizers*, 10, pp. 289.

Wang, B., Zheng, F., Römkens, M.J.M. (2012): "Comparison of soil erodibility factors in USLE, RUSLE2, EPIC and Dg models based on a Chinese soil erodibility database", *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science* 63 (1), pp. 69-79.

Wang, B., Zheng, F., Römkens, M.J.M., Darboux, F. (2013): "Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences", *Geomorphology*, 187, pp. 1-10.

Wei, W., Chen, L., Yang, L., Fu, B., Sun, R. (2012): "Spatial scale effects of water erosion dynamics: Complexities, variabilities, and uncertainties", *Chinese Geographical Science* 22 (2), pp. 127-143.

Wischmeier, W.H., Mannering, J.V. (1969): "Relation of soil properties to its erodibility", *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33, pp. 131-137.

Wischmeier, W. H., Johnson, C. B., Cross, B. V. (1971): "A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites", *Journal of Soil and Water Conservation*, 26, pp. 189-193.

Pérez Cutillas, P., González Barberá, G., Conesa García, C. (2019): "Evaluación de la erosionabilidad (Factor K) y su variabilidad espacial en relación con los usos del suelo", *GeoFocus (Artículos)*, nº 23, p. 71-96. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.593>

Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978): "Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning". Agriculture Handbook. U.S. Department of Agriculture, Washington D.C. (USA), 537 pp.

Young, R.A., Romkens, M.J.M., McCool, D.K. (1990): "Temporal variations in soil erodibility", *Catena* 17, pp. 41-53.

Zhang, K. L., Shu, A. P., Xu, X. L., Yang, Q. K., Yu, B. (2008): "Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in China", *Journal of Arid Environments*, 72, pp. 1002-1011.