

Universidad de Huelva

Departamento de Ciencias Agroforestales



Mejoras en la estimación de la textura del suelo y su aplicación al factor K de erosionabilidad: una aproximación cuantílica

Memoria para optar al grado de doctora
presentada por:

Eva María Corral Pazos de Provencs

Fecha de lectura: 9 de septiembre de 2021

Bajo la dirección de los doctores:

Juan M. Domingo Santos

Ígor Rapp Arrarás

Huelva, 2021

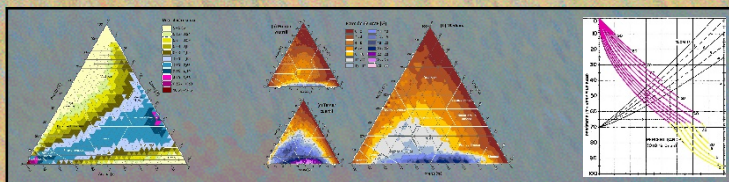




Universidad
de Huelva

Tesis Doctoral

**Mejoras en la estimación de la textura del suelo
y su aplicación al factor K de erosionabilidad:
una aproximación cuantílica**



Eva Corral Pazos de Provencs

Huelva, junio de 2021



**Programa de doctorado en
Ciencia y Tecnología Industrial y Ambiental**

TESIS DOCTORAL

**MEJORAS EN LA ESTIMACIÓN DE LA TEXTURA DEL SUELO Y SU
APLICACIÓN AL FACTOR K DE EROSIONABILIDAD: UNA
APROXIMACIÓN CUANTÍLICA**

Eva Corral Pazos de Provens

Directores: Juan M. Domingo Santos
Ígor Rapp Arrarás

Departamento de Ciencias Agroforestales

Huelva, junio de 2021

Dibujo portada: Irene Corral de Gaspar

A mi padre

A mi madre

AGRADECIMIENTOS

Bueno, pues parece que lo hemos conseguido. Por fin ha llegado el ansiado momento de escribir los agradecimientos. Y el motivo de alegría es doble, primero, porque supone el fin del largo proceso de elaboración de la tesis, pero, sobre todo, porque es una bonita oportunidad para dar las gracias a aquellas personas cuya ayuda ha sido imprescindible para poder realizar esta tesis.

Y me voy a permitir romper los protocolos y mencionar en primer lugar a mi padre, porque sé que le habría encantado ser parte de esta tesis doctoral. Informático de profesión, estadístico de formación y matemático de vocación, está claro que sus aportaciones habrían sido más que valiosas. Me crie jugando “a los números” con él, de mis mejores recuerdos, y fue uno de esos sabios a los que es imposible no respetar y admirar. Lo poco o mucho de bueno que haya en mí se lo tengo que agradecer a él.

Y ahora sí, la parte más formal, aunque no por ello menos personal. Quiero expresar mi agradecimiento a mis dos directores, profesores del Departamento de Ciencias Agroforestales de la Universidad de Huelva, por aceptar participar en este trabajo y compartir conmigo tantas sugerencias e ideas. Gracias a Juan M. Domingo Santos, por su apoyo incondicional, su paciencia infinita y por regalarme cada día el preciado lujo de disfrutar trabajando; no es nuestro primer proyecto juntos y, aunque suene como una amenaza, no será el último. Gracias a Ígor Rapp Arrarás, por todo el tiempo y energía que ha dedicado a este proyecto y por compartir conmigo su meticulosidad en el trabajo.

Sin duda, durante la elaboración de una tesis surgen muchos momentos complicados, pero, afortunadamente, también va acompañada de grandes satisfacciones. Entre los momentos más memorables quiero destacar las estancias de investigación que tuve la oportunidad de realizar en Chile y en Namibia. Quiero agradecer al Servicio de Relaciones Internacionales de la UHU por ofrecerme y facilitarme estas estancias, y a Miguel Vallejo Orti y a Kaleb Negussie, de la Namibia University of Science and Technology (NUST), por incorporarme tan generosamente a sus proyectos de investigación y, sobre todo, por abrirme las puertas de su casa y de su amistad.

Otra sorpresa agradable ha sido la disponibilidad y la amabilidad con que han contestado aquellos a los que hemos acudido con nuestras dudas. Quiero en particular agradecer a Ellis Benham, del USDA/NRCS Kellogg Soil Survey Laboratory, por el consejo brindado sobre el uso de la NCSS Soil Characterization Database; a Daniel C. Yoder, de la University of

Tennessee-Institute of Agriculture, por su ayuda para definir la autoría y cita de los documentos de la RUSLE2; a Budiman Minasny, de la Universidad de Sydney, por sus aclaraciones en algunas de las ecuaciones utilizadas; y a Stephan Peth, presidente de la comisión 1 (Soil physics) de la División 2 (Soil properties and processes) del IUSS, por sus indicaciones sobre el sistema de clasificación textural adoptado por el IUSS.

Este tipo de trabajos serían impensables sin un apoyo moral y emocional que te mantenga los pies sobre la tierra, aunque la cabeza ande por otros derroteros.

Quiero especialmente dar las gracias a mis chicas, a Anabel, Ascen, Gloria y Rosa, compañeras imprescindibles con las que empecé esta aventura de la vida forestal, allá por el Pleistoceno, creo recordar. Hace mucho que dejaron de ser mis amigas para convertirse en mi familia y aunque hace poco se nos ha roto el corazón, porque la vida tiene la maldita manía de llevarse siempre a los mejores, seguiremos compartiendo ilusiones, proyectos y apretando cada vez más fuerte esos lazos de amistad y confianza que le dan sentido a la vida.

Gracias también a mi familia, especialmente a mis sobrin@s, por hacerme unos dibujos tan maravillosos para la portada, por seguir queriendo viajar conmigo, por gruñirme cuando les quiero dar clases de matemáticas, por llamarme para contarme sus cosas y por preguntarme constantemente que cuándo acabo la tesis. Por si hay alguien que no lo sabe, estoy muy orgullosa de tod@s ell@s.

Y, por último, muchas gracias a todos mis amigos, que han soportado estoicamente sin una sola queja mi conversación monotemática sobre la tesis. Creo que les debo más de una cerveza.

A todos, muchas gracias.

RESUMEN

En este trabajo se realiza un análisis de los principales problemas que se padecen para el cálculo del factor K de la USLE y se presenta un conjunto de mejoras tanto para la automatización de su cálculo como para eliminar errores existentes.

Uno de los principales problemas es que los análisis de suelo ordinarios no facilitan un dato fundamental de entrada para calcular el factor K , como es el porcentaje de arena muy fina (AMF). Existen diversos modelos de estimación de la fracción de AMF, que son analizados en este trabajo frente a la mayor base de datos de suelos a escala mundial. Se comprueba que la aceptabilidad de estos modelos es muy baja y se plantea, como alternativa, el uso de la citada base de datos trasladada al triángulo de textura que ofrece intervalos cuartílicos de predicción.

Se aborda también el problema que plantea la disparidad de intervalos granulométricos según las distintas clasificaciones texturales existentes. La aplicación de fórmulas de edafotransferencia, como el cálculo del mismo factor K , se ve impedida cuando los datos texturales aparecen en un sistema distinto del original de la fórmula. El caso más frecuente ocurre con el límite granulométrico de la fracción de limo, el cual en el Sistema USDA abarca el rango de 0,002 a 0,05 mm, mientras que en el Sistema Internacional Simplificado va desde 0,002 hasta 0,02 mm. Con una metodología semejante a la de la AMF se analizan los modelos actuales de conversión entre estos límites texturales; se concluye que uno de estos modelos ofrece resultados aceptables y se indican las regiones del triángulo de textura en donde cada modelo tiene un mejor funcionamiento. También se propone una alternativa para la estimación de la fracción de limo USDA basada en una regresión cuantílica local.

El uso del nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) para el cálculo del factor K resultaba de gran utilidad cuando la disponibilidad de máquinas de cálculo era muy limitada; sin embargo, el cálculo masivo de este factor, para su cartografiado u otras aplicaciones, exige la generación de procedimientos de cálculo analítico. Se ha analizado el nomograma y su ecuación subyacente, así como la calidad del ajuste al nomograma de los modelos analíticos que tratan de abarcar aquellas regiones donde la ecuación original no era aplicable. Se ha comprobado que todos los modelos tienen zonas de ajuste deficiente o, incluso, inaceptable y que, por las evidencias analizadas, el dibujo de las curvas que ajustaban el factor K en función del contenido en materia orgánica es erróneo en el nomograma. Finalmente, se plantea un modelo de cálculo del factor K con un buen ajuste a las distintas

partes del nomograma y sin el citado error, que tampoco fue cometido por Wischmeier y Meyer (1973) en su planteamiento analítico. Se muestran también las regiones del triángulo de textura donde se encuentran los suelos observados por los creadores de la USLE, con vistas a dar una consideración predictiva menor a aquellas regiones en las que los cálculos del factor K estarían extrapolados.

Para cerrar el trabajo se ofrece una herramienta que facilita la obtención del factor K para diferentes situaciones de disponibilidad de datos.

SUMMARY

In this work we perform an analysis of the main problems suffered for the calculation of the K factor of the USLE and a set of improvements is presented, both for the automation of its calculation and to avoid existing errors.

One of the main problems is that ordinary soil tests do not provide a basic input to calculate the K factor, such as the percentage of very fine sand (VFS). There are several models for estimating the fraction of VFS, which are analyzed in this work against the largest soil database worldwide. The acceptability of these models is found to be very low, and we propose, as an alternative, the use of the aforementioned database transferred to texture triangles that offer quartile prediction intervals.

The problem posed by the disparity of particle size intervals according to the different existing textural classifications is also addressed. The application of pedotransfer formulas, such as calculating the K factor, is impeded when the textural data appears in a system other than the original of the formula. The most frequent case occurs with the particle size of the silt fraction, which in the USDA System covers the range of 0.002 to 0.05 mm, while in the Simplified International System it ranges from 0.002 to 0.02 mm. Applying a methodology similar to that of the VFS, we analyse the current models of conversion between these textural limits; one of these models offers broadly acceptable results; we also indicate the regions of the texture triangle where each model performs better. An alternative for estimating the USDA silt fraction based on a local quantile regression is also proposed.

The use of the nomograph of Wischmeier et al. (1971) for the calculation of the K factor was very useful when the access to calculation machines was very limited; However, the massive calculation of this factor, for its mapping or other applications, requires analytical calculation procedures. The nomograph and its underlying equation have been analyzed, as well as the quality of the fit to the nomogram of the analytical models that try to cover those regions where the original equation was not applicable. It has been found that all the models have areas of poor or even unacceptable fit and that, based on the evidence analyzed, the drawing of the curves that adjusted the K factor as a function of the organic matter content is erroneous in the nomograph. Finally, a calculation model for the K factor is proposed with a good fit to the different parts of the nomograph and without the aforementioned error, which we did not find either in the analytical approach by Wischmeier and Meyer (1973). We also make clear the regions of the texture triangle containing the

soils tested by the creators of the USLE in order to give a lower predictive consideration to those regions in which the K factor calculations would be extrapolated.

To round off this research, we propose a tool that facilitates obtaining the K factor for different situations of data availability.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1.	INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1	JUSTIFICACIÓN.....	1
1.1.1	La textura del suelo y su relación con la erosión.....	1
1.1.2	Problemática	3
1.2	OBJETIVOS DEL TRABAJO Y SU DESARROLLO EN EL DOCUMENTO	4
1.3	REFERENCIAS.....	5
CAPÍTULO 2.	ESTIMACIÓN DE LA FRACCIÓN DE ARENA MUY FINA PARA SU APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DEL FACTOR K DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO	9
2.1	INTRODUCCIÓN.....	9
2.2	MATERIALES.....	11
2.2.1	Datos de entrada	11
2.2.2	Modelos para la estimación de la fracción de arena muy fina.....	11
2.2.2.1	Fórmula RUSLE2.....	11
2.2.2.2	Método ESDAC	12
2.2.2.3	Teoría Shirazi-Boersma	13
2.3	METODOLOGÍA.....	13
2.3.1	Estadística descriptiva	13
2.3.1.1	Regresión polinómica mínimo-cuadrática	13
2.3.1.2	Subdivisión del triángulo de textura	13
2.3.1.3	Prueba de normalidad	15
2.3.1.4	Medidas estadísticas condicionales.....	15
2.3.2	Evaluación de los modelos	17
2.4	RESULTADOS	17
2.4.1	Estadística descriptiva	17
2.4.1.1	Regresión polinómica mínimo-cuadrática	17
2.4.1.2	Subdivisión del triángulo de textura.....	18
2.4.1.3	Prueba de normalidad	20
2.4.1.4	Medidas estadísticas condicionales.....	20
2.4.2	Evaluación de los modelos	22
2.5	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	24
2.6	REFERENCIAS.....	28
2.7	APÉNDICES.....	34

Apéndice 2A. Relación entre el método ESDAC y la interpolación logarítmico-lineal34

Apéndice 2B. Cálculo de la fracción de AMF a partir de la teoría de Shirazi35

**CAPÍTULO 3. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LAS FRACCIONES TEXTURALES USDA
CONOCIDAS LAS DEL SISTEMA INTERNACIONAL..... 37**

3.1 INTRODUCCIÓN 37

3.2 MATERIALES 39

3.2.1 Datos de entrada 39

3.2.2 Modelos evaluados 39

3.2.2.1 Método de interpolación logarítmico-lineal (LLI).....40

3.2.2.2 Fórmula de regresión de Minasny-McBratney-Bristow (MMB)41

3.2.2.3 Método de interpolación de Shirazi-Boersma-Johnson (SBJ)41

3.2.2.4 Fórmula de regresión de Minasny-McBratney (MM).....42

3.2.2.5 Fórmula de regresión de Padarian-Minasny-McBratney (PMM)43

3.3 METODOLOGÍA 44

3.3.1 Estadística descriptiva 44

3.3.2 Evaluación de los modelos..... 44

3.4 RESULTADOS..... 44

3.4.1 Estadística descriptiva 44

3.4.1.1 Regresión polinómica mínimo-cuadrática44

3.4.1.2 Subdivisión del triángulo de textura45

3.4.1.3 Prueba de normalidad47

3.4.1.4 Medidas estadísticas condicionales47

3.4.2 Evaluación de los modelos..... 49

3.5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES 51

3.6 APLICACIÓN..... 58

3.7 REFERENCIAS 58

3.8 APÉNDICES 63

Apéndice 3A. Deducción de la expresión de cálculo del modelo LLI63

Apéndice 3B. Deducción de la expresión de cálculo del modelo MMB.....63

Apéndice 3C. Deducción de la expresión de cálculo del modelo SBJ64

**CAPÍTULO 4. REVISIÓN DEL FACTOR K DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO DE LA USLE
..... 67**

4.1 INTRODUCCIÓN 67

4.2	DESCRIPCIÓN DEL NOMOGRAMA Y LA ECUACIÓN ORIGINAL DEL FACTOR K	71
4.2.1	Ecuación general	71
4.2.2	Primera aproximación de K	72
4.2.2.1	Parámetro M	72
4.2.2.2	Subfactor de la materia orgánica.....	74
4.2.3	Subfactor de la estructura.....	75
4.2.4	Subfactor de la permeabilidad	77
4.3	ADAPTACIONES DE LA ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR K	78
4.3.1	Adaptación propuesta por RUSLE2	78
4.3.1.1	Parámetro M	78
4.3.1.2	Subfactor de la estructura	79
4.3.2	Adaptación propuesta por Auerswald	80
4.3.2.1	Parámetro M	80
4.3.2.2	Subfactor de la materia orgánica.....	81
4.3.2.3	Subfactor de la estructura	82
4.3.2.4	Suelos con fragmentos rocosos	83
4.4	PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR K	83
4.4.1	Síntesis de la problemática que presenta el cálculo del factor K	83
4.4.2	Primera aproximación de K	84
4.4.2.1	Parámetro M	84
4.4.2.2	Subfactor de la materia orgánica.....	84
4.4.3	Subfactor de la estructura.....	85
4.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	86
4.5.1	Primera aproximación de K	86
4.5.1.1	Parámetro M	86
4.5.1.2	Subfactor de la materia orgánica.....	90
4.5.2	Subfactor de la estructura.....	91
4.5.3	Propuesta final para el cálculo del factor K	93
4.6	CONCLUSIONES.....	94
4.7	REFERENCIAS.....	95
4.8	APÉNDICES.....	101
	Apéndice 4A. Deducción de la expresión del parámetro M en las ampliaciones de RUSLE2 y Auerswald	101

CAPÍTULO 5.	CONCLUSIONES GENERALES Y APLICACIÓN	103
5.1	SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS ALCANZADOS.....	103
5.1.1	Estimación de la fracción de arena muy fina a partir de las fracciones texturales básicas	103
5.1.2	Estimación de las fracciones texturales básicas USDA a partir de las fracciones texturales básicas en el Sistema Internacional simplificado	104
5.1.3	El factor K de erosionabilidad del suelo de la USLE	104
5.1.4	Conclusión final.....	105
5.2	APLICACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DE LA FRACCIÓN DE AMF AL CÁLCULO DEL FACTOR K	105
5.3	PRESENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA PARA FACILITAR EL CÁLCULO DEL FACTOR K DE LA USLE	107
5.3.1	Formulario "01_FactorK"	107
5.3.2	Formulario "02_FactorK_AMF"	109
5.3.3	Formulario "03_LimoUSDA_FactorK"	111
5.4	REFERENCIAS	113
ANEJO	115
	Versión del Capítulo 2 para <i>Land Degradation & Development</i>	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Modelos para la estimación de la fracción de arena muy fina. ESDAC: <i>European Soil Data Centre</i> ; RUSLE2: <i>Revised Universal Soil Loss Equation</i> , versión 2.....	12
Figura 2.2. Densidad relativa de registros, expresada como la relación entre la densidad de los registros en cada tesela y la densidad de los registros en todo el triángulo de textura.....	19
Figura 2.3. Valores interpolados de las principales medidas condicionales de la fracción de arena muy fina.	21
Figura 2.4. Valores interpolados de los cuartiles condicionales de la fracción de arena muy fina.	22
Figura 2.5. Regiones de aceptación de los modelos para la estimación de la fracción de arena muy fina.	23
Figura 2.6. Regiones de preferencia de los modelos para la estimación de la fracción de arena muy fina.	23
Figura 2.7. Valores de los cuartiles condicionales de la fracción de arena muy fina obtenidos por regresión cuantílica.	28
Figura 3.1. Límites del tamaño de partículas utilizados en el esquema de clasificación USDA y en el Sistema Internacional para las distintas fracciones y subfracciones definidas en ellos.	39
Figura 3.2. Modelos para la estimación de la fracción de limo USDA: (a) interpolación logarítmico lineal, (b) regresión de Minasny-McBratney-Bristow, (c) interpolación de Shirazi-Boersma-Johnson, (d) regresión de Minasny-McBratney y (e) regresión de Padarian-Minasny-McBratney.	43
Figura 3.3. Densidad relativa de registros, expresada como la relación entre la densidad de los registros en cada tesela y la densidad de los registros en todo el triángulo de textura.....	46
Figura 3.4. Valores interpolados de las principales medidas condicionales de la fracción de limo USDA.	48
Figura 3.5. Valores interpolados de los cuartiles condicionales de la fracción de limo USDA.	49

Figura 3.6. Regiones de aceptación de los cinco modelos evaluados: (a) interpolación logarítmico lineal, (b) regresión de Minasny-McBratney-Bristow, (c) interpolación de Shirazi-Boersma-Johnson, (d) regresión de Minasny-McBratney y (e) regresión de Padarian-Minasny-McBratney. (f) Regiones de preferencia de los modelos; los colores utilizados son los mismos que se han tomado como leyenda para las regiones de aceptación en cada uno de los modelos. Se incluye también el área “no evaluable”, en la que no es posible el análisis al ser la interpolación IDW “no válida”	51
Figura 3.7. Valores de los cuartiles condicionales de la fracción de limo USDA obtenidos mediante un ajuste polinómico de regresión cuantílica.	57
Figura 3.8. (a) Clases texturales del USDA representadas sobre el triángulo de textura según el IS-S. Las regiones delimitadas con los colores azules se han obtenido con los valores de la fracción de limo USDA calculados con la ecuación de regresión cuantílica (3.9). Los límites marcados en negro proceden de la Figura 2.4b. (b) Clases texturales del USDA (en azul; su significado se puede consultar en la figura a) representadas sobre el triángulo de textura según el IS-S, donde se han superpuesto los límites de las clases texturales propuestas por Tommerup (en blanco).	58
Figura 4.1. Nomograma para el cálculo del factor K de erosionabilidad del suelo (Wischmeier <i>et al.</i> , 1971).	71
Figura 4.2. Representación sobre el nomograma de Wischmeier <i>et al.</i> (1971) de la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) para el cálculo del parámetro M , para varios valores de la fracción de arena no muy fina.....	74
Figura 4.3. Representación sobre el nomograma de Wischmeier <i>et al.</i> (1971) de la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) que relaciona el parámetro M con la primera aproximación de K , para cinco niveles de MO.....	75
Figura 4.4. Representación sobre el nomograma de Wischmeier <i>et al.</i> (1971) de la parte de la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) que incluye el efecto de la estructura del suelo sobre la erosionabilidad.	76
Figura 4.5. Representación sobre el nomograma de Wischmeier <i>et al.</i> (1971) de la ecuación para el cálculo del parámetro M . En fucsia la parte correspondiente a la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) y en verde la ampliación de la RUSLE2.	79
Figura 4.6. Representación sobre el nomograma de Wischmeier <i>et al.</i> (1971) de la ecuación que incluye el efecto de la estructura del suelo sobre la erosionabilidad. En fucsia la parte correspondiente a la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) y en verde la ampliación de RUSLE2.....	80
Figura 4.7. Representación sobre el nomograma de Wischmeier <i>et al.</i> (1971) de la ecuación para el cálculo del parámetro M . En fucsia la parte correspondiente a la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) y en azul la ampliación de Auerswald <i>et al.</i> (2014).....	81

Figura 4.8. Detalle de la representación sobre el nomograma de Wischmeier <i>et al.</i> (1971) de la ecuación que incluye el efecto de la estructura del suelo sobre la erosionabilidad. En fucsia la parte correspondiente a la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) y en azul la modificación de Auerswald <i>et al.</i> (2014).	82
Figura 4.9. Representación sobre el nomograma de Wischmeier <i>et al.</i> (1971) de la ecuación que calcula el parámetro <i>M</i> , para distintos valores de la fracción de ANMF. En fucsia la parte correspondiente a la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) y en amarillo nuestra propuesta.....	86
Figura 4.10. Detalle de la zona del nomograma de Wischmeier <i>et al.</i> (1971) donde las curvas que permiten el cálculo del parámetro <i>M</i> experimentan un cambio. En fucsia la representación de la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) para el cálculo del parámetro <i>M</i>	87
Figura 4.11. Localización en el triángulo de textura de las muestras utilizadas por Mannering (1967) y por Wischmeier y Mannering (1969), junto con la identificación de las clases texturales de las muestras de suelo utilizadas para elaborar el nomograma de Wischmeier <i>et al.</i> (1971).	89
Figura 4.12. Detalle de la representación sobre el nomograma de Wischmeier <i>et al.</i> (1971) de la ecuación que incluye el efecto de la estructura del suelo sobre la erosionabilidad. En fucsia la parte correspondiente a la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) y en amarillo la mejora propuesta en este trabajo.	92
Figura 5.1. Cuartiles condicionales del factor <i>K</i> para un contenido en materia orgánica del 2 %, código de la estructura <i>b</i> igual a 2 y clase de permeabilidad <i>c</i> igual 3. En unidades tradicionales de EE. UU. $[(0,01 \cdot \text{ton} \cdot \text{acre} \cdot \text{h})/(\text{acre} \cdot \text{ft-tonf} \cdot \text{in})]$. Se indican también las clases texturales que quedan fuera del campo de definición del factor <i>K</i>	106
Figura 5.2. Esquema de la estructura del formulario MS-Access que permite calcular el factor <i>K</i> cuando conocemos todos los datos de entrada.....	108
Figura 5.3. Esquema de la estructura del formulario MS-Access que permite calcular el factor <i>K</i> a partir de las fracciones texturales básicas según el esquema de clasificación del USDA.	110
Figura 5.4. Esquema de la estructura del formulario MS-Access que permite calcular el factor <i>K</i> a partir de las fracciones texturales básicas según el Sistema Internacional simplificado.....	111

Capítulo 1. Introducción general

1.1 JUSTIFICACIÓN

1.1.1 La textura del suelo y su relación con la erosión

El suelo es un recurso esencial para el ser humano, no sólo como componente clave en el funcionamiento de los ecosistemas terrestres (Adhikari y Hartemink, 2016), sino también como elemento determinante del estado económico de una nación, que debe ser incluido en las políticas y en la toma de decisiones que afecten al territorio (Daily *et al.*, 1997). Se trata de un recurso natural no renovable o muy difícil y costoso de renovar (Porta *et al.*, 2003), cuya degradación provoca consecuencias perjudiciales para la productividad agrícola y el suministro y la calidad del agua, un aumento de los gases de efecto invernadero o la pérdida de biodiversidad (Koch *et al.*, 2013). La preocupación por el mantenimiento y la mejora del recurso suelo se recoge en el concepto de *Soil Security*, término utilizado por McBratney *et al.* (2014), que hace referencia al papel integrador que desempeña el suelo en los desafíos de la sostenibilidad ambiental global.

Entre las amenazas a que se ve sometido el recurso suelo, la erosión se identifica como una de las principales, tanto la provocada por el agua como la de origen eólico (Amundson *et al.*, 2015; FAO, 2017), por lo que el desarrollo de modelos que permitan estimar la erosión se convierte en una necesidad. Estos modelos son herramientas útiles para simular los efectos que el desarrollo de políticas, cambios de uso y prácticas de gestión del territorio generan sobre las tasas de pérdidas de suelo (Panagos *et al.*, 2015; Alewell *et al.* 2019).

Los procesos erosivos son bastante complejos y en ellos intervienen múltiples factores. Un parámetro clave para modelizar la erosión es la erosionabilidad, entendida como la susceptibilidad de un suelo a la erosión (Porta *et al.*, 2003), concepto sobre el que versa parte de este trabajo. La mejor manera de estimar la erosionabilidad de un suelo es reali-

zando mediciones directas en parcelas sobre el terreno, bajo lluvia natural y durante largos periodos de tiempo; pero estos estudios son difíciles de realizar y costosos, inviabilizando a escala nacional o continental (Renard *et al.*, 1997; Kinell, 2010; Panagos *et al.*, 2014; Ostovari *et al.*, 2016). Por ello, se han propuesto diferentes índices que permiten estimar la erosionabilidad a partir de ciertas propiedades del suelo fácilmente disponibles (Ostovari *et al.*, 2016; Panagos *et al.*, 2014). Una de estas propiedades, fuertemente relacionada con la susceptibilidad del suelo a la erosión, es la distribución del tamaño de partículas o, más específicamente, la textura, que se convierte en un parámetro clave en cualquier modelo que pretenda predecir la erosión del suelo (Soil Survey Staff, 2011, cap. 3; Bayat *et al.*, 2015).

La textura es, quizá, la propiedad física más importante de un suelo. Se trata de una medida obtenida en el laboratorio de forma rutinaria y una de las primeras propiedades que se determinan en campo, imprescindible para poder caracterizar y clasificar los suelos, definir su comportamiento y comprender sus procesos de formación (Duchaufour, 1987; Skopp, 1999; Soil Survey Staff, 2014, cap. 3; Bayat *et al.*, 2015). El interés práctico de la textura, se debe, sobre todo, a que es una propiedad bastante estable que guarda una estrecha relación con muchas otras propiedades del suelo, tanto físicas como químicas (Duchaufour, 1987; Porta *et al.*, 2003, cap. 6; Soil Survey Staff, 2014, cap. 3). Así, es frecuente su uso para la estimación de las propiedades hídricas del suelo (capacidad de retención de agua, conductividad hidráulica saturada, etc.), su fertilidad (almacenamiento y disponibilidad de nutrientes, capacidad de intercambio catiónico), su capacidad de uso, su facilidad de laboreo o, por supuesto, el riesgo de erosión (Porta *et al.*, 2003, cap. 6; Soil Survey Staff, 2011, cap. 3; Bayat *et al.*, 2015).

En cuanto a los índices propuestos para el cálculo de la erosionabilidad del suelo, el más ampliamente utilizado y citado es el factor K propuesto por Wischmeier *et al.* (1971) para utilizar en la *Universal Soil Loss Equation* (USLE), adoptado, incluso, en otros modelos de erosión (Panagos *et al.*, 2012, 2014; Auerswald *et al.*, 2014). Este factor representa la respuesta media a largo plazo del suelo a la fuerza erosiva de las tormentas (Renard *et al.*, 2011). Un ejemplo de la importancia de este índice es la reciente elaboración, por parte del *European Soil Data Centre* (ESDAC), del mapa de erosionabilidad del suelo en la Unión Europea, en el que utilizaron el factor K de la USLE (Panagos *et al.*, 2012, 2014).

1.1.2 Problemática

El cálculo del factor K de la USLE para un suelo dado se puede realizar utilizando el nomograma desarrollado por Wischmeier *et al.* (1971) o la ecuación presentada por Wischmeier y Meyer (1973). En ambos casos, es necesario conocer varias propiedades del horizonte superior, a saber, la proporción de partículas con diámetro inferior a 0,002 mm (arcilla), la proporción de partículas con diámetro comprendido entre 0,002 y 0,1 mm (limo más arena muy fina [AMF]), el contenido de materia orgánica (MO) y la estructura, junto con la permeabilidad del perfil completo del suelo, todo de acuerdo con las descripciones del *United States Department of Agriculture (USDA) Soil Survey Manual* (Soil Survey Staff, 1951).

La aplicación práctica del factor K , bien utilizando el nomograma o bien calculándolo con la ecuación, presenta una serie de dificultades. Comentamos a continuación algunas de ellas, que constituirán las bases de trabajo de este documento.

En primer lugar, la limitación de los datos disponibles. Si bien el análisis de la textura es uno de los más solicitados para la caracterización de los suelos (Soil Survey Staff, 2014, cap. 3), desafortunadamente, la información que proporcionan los laboratorios, o la que contienen muchas bases de datos, se reduce con frecuencia a las tres fracciones texturales básicas, arena, limo y arcilla (Skaggs *et al.*, 2001), de modo que la información sobre la fracción de AMF no suele estar disponible. El desconocimiento de la fracción de AMF puede causar un gran error en el cálculo del factor K (Auerswald *et al.*, 2014), por lo que, como requisito previo para la aplicación correcta de este índice de erosionabilidad, será necesaria su estimación.

En segundo lugar, el problema generado por la existencia de diferentes esquemas de clasificación de la distribución del tamaño de las partículas del suelo. Esta diversidad de esquemas dificulta el intercambio y la utilización de la información textural, e impide el uso de las funciones de edafotransferencia a escala internacional. Un ejemplo de este tipo de funciones es el factor K , que utiliza entre sus variables de entrada las fracciones texturales según el esquema de clasificación textural del USDA. Cualquier país que utilice un esquema de clasificación textural diferente necesitará, para poder aplicar el factor K de la USLE en su territorio, alguna metodología que convierta sus fracciones texturales al esquema del USDA.

Por último, la falta de coincidencia de la ecuación del factor K con algunos sectores del nomograma. La ecuación presentada por Wischmeier y Meyer (1973) sólo se puede aplicar cuando la fracción de limo más AMF es inferior al 70 %; para suelos con un porcentaje mayor, la única opción posible para obtener el valor del factor K era recurrir al nomograma. Existen algunas propuestas para solventar esta situación y poder prescindir del nomograma, pero el ajuste de las nuevas ecuaciones es deficiente y su uso no está muy generalizado, como se pone de manifiesto en el ya comentado mapa de erosionabilidad del suelo en la Unión Europea (Panagos *et al.*, 2014). Estos autores, para adaptarse a esta restricción, excluyeron 212 muestras de sus cálculos por tener valores del limo superiores al 80 % y asignaron un valor límite de 70 % a otras 718 muestras con valores del limo comprendidos entre 70 % y 80 %. Se necesita, por tanto, una nueva ecuación que se ajuste perfectamente al nomograma del factor K y permita prescindir de la poco operativa interfaz gráfica. Esto facilitaría el uso de toda la información edáfica disponible, tan escasa y difícil de obtener, y evitaría situaciones tan poco deseables como prescindir de los suelos más erosionables en la confección de un mapa de erosión del suelo.

1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO Y SU DESARROLLO EN EL DOCUMENTO

A la vista de la problemática identificada, se establecen los siguientes objetivos:

Objetivo 1. Evaluación y comparación del rendimiento de los distintos modelos existentes en la literatura para la estimación de la fracción de AMF a partir de las fracciones texturales básicas del sistema de clasificación textural del USDA.

El trabajo desarrollado para alcanzar este primer objetivo se explica en el Capítulo 2 del documento. La creación de una nueva herramienta, basada en una regresión cuantílica local (segmentada), nos permite evaluar la precisión de los tres modelos encontrados en la literatura para la estimación de la fracción de AMF, indicando las zonas del triángulo de textura en las que cada modelo evaluado proporciona predicciones que consideramos aceptables. Esta herramienta también nos permite proporcionar una estimación de la fracción de AMF, a partir de las fracciones de arena, limo y arcilla USDA, acompañada de un intervalo de predicción. Los datos utilizados para este análisis proceden de la *National Cooperative Soil Survey (NCSS) Soil Characterization Database* (NCSS, 2017), con información de más de 300 000 horizontes de suelo.

Objetivo 2. Evaluación y comparación del rendimiento de los diferentes modelos publicados para estimar las fracciones texturales básicas USDA a partir de las fracciones texturales básicas en el Sistema Internacional simplificado.

El trabajo desarrollado para alcanzar este segundo objetivo se explica en el Capítulo 3 del documento, que sigue la misma estructura que el Capítulo 2. Utilizando la misma metodología, ponemos a prueba los procedimientos encontrados, especificando para qué combinaciones de valores de arena, limo y arcilla son válidos dichos modelos. Proporcionamos también estimaciones puntuales de la fracción de limo USDA, a partir de las fracciones de arena, limo y arcilla en el Sistema Internacional simplificado, acompañadas de un intervalo de predicción.

Objetivo 3. Desarrollo de una nueva ecuación que se ajuste al nomograma del factor K y permita prescindir completamente del uso del mismo.

El trabajo desarrollado para alcanzar el tercer objetivo se explica en el Capítulo 4 del documento. En este capítulo llevamos a cabo un análisis detallado del nomograma elaborado por Wischmeier *et al.* (1971) y de la ecuación presentada por Wischmeier y Meyer (1973), junto con una revisión de las ampliaciones y modificaciones de esta ecuación que han sido propuestas. Se finaliza con la generación de un nuevo conjunto de ecuaciones que reproducen fielmente el nomograma.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones generales del trabajo, incluida la aplicación al cálculo del factor K del análisis desarrollado en el Capítulo 2 para la estimación de la fracción de AMF. Además, como aplicación práctica de los resultados obtenidos, se ofrece una herramienta, en formato de base de datos, que facilita el cálculo del factor K de la USLE.

Los capítulos 2, 3 y 4 han sido escritos con la estructura de artículos de revista científica, con la perspectiva de su publicación. Actualmente, el Capítulo 2 ya ha sido publicado y los capítulos 3 y 4 están en fase de revisión. En los anejos incluimos la versión del Capítulo 2 para la revista *Land Degradation & Development*.

1.3 REFERENCIAS

Adhikari, K., & Hartemink, A. E. (2016). Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma*, 262, 101-111. doi:10.1016/j.geoderma.2015.08.009

- Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., & Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 203-225. doi:10.1016/j.iswcr.2019.05.004
- Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E., & Sparks, D. L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science*, 348(6235), 1261071-1-6. doi:10.1126/science.1261071
- Auerswald, K., Fiener, P., Martin, W., & Elhaus, D. (2014). Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: An alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. *Catena*, 118, 220-225. doi:10.1016/j.catena.2014.01.008
- Bayat, H., Rastgo, M., Mansouri Zadeh, M., & Vereecken, H. (2015). Particle size distribution models, their characteristics and fitting capability. *Journal of Hydrology*, 529, 872-889. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.08.067
- Daily, G. C., Matson, P. A., & Vitousek, P. M. (1997). Ecosystem services supplied by soil. In G. C. Daily (Ed.), *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems* (pp. 113-132). Washington DC: Island Press.
- Duchaufour, P. (1987). *Manual de edafología [Abrégé de pédologie]* (M^a Tarsy Carballas Fernández y Modesto Carballas Fernández Trans.). Barcelona: Masson, S.A.
- FAO. (2017). Voluntary Guidelines for sustainable soil management. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/a-bl813e.pdf> (Rome, Italy).
- Kinnell, P. I. A. (2010). Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review. *Journal of Hydrology*, 385(1-4), 384-397. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.01.024
- Koch, A., McBratney, A.B., Adams, M., Field, D.J., Hill, R., Lal, R., . . . Zimmermann, M. (2013). Soil security: solving the global soil crisis. *Global Policy*, 4, 434-441. doi:10.1111/1758-5899.12096.
- McBratney, A., Field, D. J., & Koch, A. (2014). The dimensions of Soil Security. *Geoderma*, 213, 203-213. doi:10.1016/j.geoderma.2013.08.013

- NCSS (2017). National Cooperative Soil Survey. National Cooperative Soil Survey Characterization Database. Accessed at <http://ncsslabsdatamart.sc.egov.usda.gov/>, September 25, 2017.
- Ostovari, Y., Ghorbani-Dashtaki, S., Bahrami, H. A., Naderi, M., Dematte, J. A. M., & Kerry, R. (2016). Modification of the USLE K factor for soil erodibility assessment on calcareous soils in Iran. *Geomorphology*, 273, 385-395. doi:10.1016/j.geomorph.2016.08.003
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., . . . Alewell, C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, 54(Supplement C), 438-447. doi:10.1016/j.envsci.2015.08.012
- Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., & Alewell, C. (2014). Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. *Science of the Total Environment*, 479-480(1), 189-200. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.02.010
- Panagos, P., Meusburger, K., Alewell, C., & Montanarella, L. (2012). Soil erodibility estimation using LUCAS point survey data of Europe. *Environmental Modelling and Software*, 30, 143-145. doi:10.1016/j.envsoft.2011.11.002
- Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerin, M., & Roquero de Laburu, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (3rd ed.). Madrid: Mundi-Prensa.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (Coordinators) (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)* Agriculture Handbook 703. Tucson, Arizona: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Renard, K. G., Yoder, D. C., Lightle, D. T., & Dabney, S. M. (2011). Universal soil loss equation and revised universal soil loss equation. In R. P. C. Morgan, & M. A. Nearing (Eds.), *Handbook of erosion modelling* (pp. 137–167). Chichester, UK: Wiley-Blackwell. doi.org/ 10.1002/ 9781444328455.ch8
- Skaggs, T. H., Arya, L. M., Shouse, P. J., & Mohanty, B. P. (2001). Estimating particle-size distribution from limited soil texture data. *Soil Science Society of America Journal*, 65(4), 1038-1044.

- Skopp, J. M. (1999). Physical properties of primary particles. In M E. Sumner, editor-in-Chief, *Handbook of Soil Science*, Section A. (pp. A3-A17). Boca Ratón: CRC Press.
- Soil Survey Staff. (1951). *Soil survey manual*. Agriculture Handbook 18. Washington, D.C.: USDA Agriculture Research Administration.
- Soil Survey Staff. (2011). Soil survey laboratory information manual. Soil Survey Investigations Report 45, Version 2.0. Lincoln, Nebraska: USDA Natural Resources Conservation Service.
- Soil Survey Staff. (2014). Soil survey field and laboratory methods manual. Soil Survey Investigations Report 51, Version 2.0. Lincoln, Nebraska: USDA Natural Resources Conservation Service.
- 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(5), 189-193.
- Wischmeier, W. H., & Meyer, L. D. (1973). Soil erodibility on construction areas. In *Proceedings of the Conference-Workshop Soil Erosion: Causes and Mechanisms; Prevention and Control, January 26, 1973, Special Report 135 (20 -29)*, Washington, D.C.: Highway Research Board, National Academy of Sciences.

Capítulo 2. Estimación de la fracción de arena muy fina para su aplicación en el cálculo del factor K de erosionabilidad del suelo

2.1 INTRODUCCIÓN

La relación entre la textura de un suelo y su erosionabilidad es conocida desde hace décadas (véase p. ej., Middleton, 1930; Bouyoucos, 1935), de ahí que las distintas fracciones texturales sean parámetros clave en cualquier modelo de predicción de la erosión del suelo (Soil Survey Staff, 2011, cap. 3). Entre los distintos índices propuestos para caracterizar la erosionabilidad de un suelo cabe destacar el factor K definido por Wischmeier y Smith (1965, 1978) para la *Universal Soil Loss Equation* (USLE). De hecho, tal y como muestran Auerswald *et al.* (2014), la USLE y sus sucesoras, la *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) versión 1 (RUSLE1; Renard *et al.*, 1997) y la RUSLE versión 2 (RUSLE2; USDA Agricultural Research Service, 2013), son, con mucho, los modelos más utilizados para la predicción de la erosión del suelo. Un ejemplo reciente de su aplicación lo tenemos en la confección del mapa de pérdidas de suelo por erosión hídrica en la Unión Europea por parte del *European Soil Data Centre* (ESDAC; Panagos *et al.*, 2015).

Además, tal y como señalan Auerswald *et al.* (2014), el factor K se ha incluido también en una serie de modificaciones y extensiones de la USLE, como la MUSLE (Williams, 1975), la dUSLE (Flacke *et al.*, 1990) y la USLE-M (Kinnell y Risse, 1998); y se ha integrado en modelos más complejos que usan la tecnología USLE/RUSLE para estimar la erosión, tales como los modelos EPIC (Williams *et al.*, 1983), SWAT (Arnold *et al.*, 1998), AGNPS (Cronshey y Theurer, 1998) y Watem/Sedem (Van Rompaey *et al.*, 2001).

Los modelos USLE, RUSLE1 y RUSLE2 fueron desarrollados por el USDA *Agricultural Research Service* (ARS) con un fuerte apoyo del USDA *Natural Resources Conservation Service* (NRCS) y otras agencias, así como por varias universidades y organizaciones sin ánimo de lucro. Aunque se desarrolló inicialmente sobre la base de datos procedentes de más de 10 000 parcelas-año en los EE. UU., esta familia de modelos ha sido ampliamente utilizada

en otras partes del mundo, tanto en el ámbito de la investigación como en el de la gestión (Renard *et al.*, 2011).

Para los suelos de EE. UU., el valor del factor K se puede obtener de la base de datos NRCS RUSLE2 o bien calcularse utilizando el nomograma desarrollado por Wischmeier *et al.* (1971) y, si es necesario, sus posteriores aproximaciones y extensiones algebraicas (Wischmeier y Smith, 1978; USDA Agricultural Research Service, 2013, cap. 4; Auerswald *et al.*, 2014). Para suelos no estadounidenses, aparte de varias ecuaciones desarrolladas recientemente para ciertas áreas de Irán (Vaezi *et al.*, 2008; Shabani *et al.*, 2014; Ostovari *et al.*, 2016, 2018), Italia (Bagarello *et al.*, 2012) y China (Wang *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2016), la mejor opción es recurrir al nomograma.

La utilización del nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) para un suelo dado requiere el conocimiento de varias propiedades del horizonte superior, a saber, la proporción de partículas con diámetro inferior a 0,002 mm (arcilla), la proporción de partículas con diámetro comprendido entre 0,002 y 0,1 mm (limo más arena muy fina [AMF]), el contenido de materia orgánica (MO) y la estructura, junto con la permeabilidad del perfil completo del suelo, todo de acuerdo con las descripciones del USDA *Soil Survey Manual* (Soil Survey Staff, 1951).

La inclusión de la fracción de AMF (0,05-0,1 mm) como variable explicativa fue una mejora significativa en el modelo del factor K , en términos tanto de precisión como de simplicidad (Wischmeier *et al.*, 1971). Sin embargo, debido a que la obtención y el análisis de muestras edáficas es un proceso laborioso que requiere mucho tiempo, el análisis del tamaño de partículas que proporcionan los laboratorios se limita con frecuencia a las tres fracciones texturales básicas: arena, limo y arcilla.

Como señalan Auerswald *et al.* (2014), el desconocimiento de la fracción de AMF puede causar un gran error en el cálculo del factor K , de modo que su estimación se convierte en una cuestión relevante. La literatura recoge varios procedimientos de estimación de la fracción de AMF a partir de las fracciones texturales básicas del sistema de clasificación del USDA, cuyos rendimientos, sin embargo, nunca han sido evaluados. Este trabajo pretende, precisamente, cubrir esa laguna, utilizando para ello datos procedentes de más de 300 000 horizontes de suelos.

2.2 MATERIALES

2.2.1 Datos de entrada

Los datos utilizados en este trabajo provienen de la *National Cooperative Soil Survey* (NCSS) *Soil Characterization Database* (NCSS, 2017). Hemos elegido esta base de datos por tres razones: (i) dispone de los datos de las fracciones texturales USDA que necesitamos, con la certeza de que se trata de valores medidos con precisión y no valores simplemente estimados, (ii) la NCSS es una institución que goza de gran prestigio a escala mundial y (iii) el número de registros es de un orden de magnitud superior al de otras bases de datos de suelos disponibles. Si bien la base de datos contiene registros procedentes de todo el mundo, más del 97 % de los perfiles levantados están localizados en EE. UU.

Tras una revisión preliminar de la base de datos y una vez seleccionados los registros que contaban con la información de la fracción de AMF, hemos decidido prescindir de aquellos registros que involucraban métodos no estándares de preparación de muestras (caso, por ejemplo, de suelos derivados de materiales volcánicos) y de aquellos que presentaban cualquier tipo de inconsistencia numérica (como, por ejemplo, que las tres fracciones texturales sumen 99,9 % o 100,1 % en lugar de 100,0 %). Una vez que los datos fueron filtrados, hemos dispuesto para los cálculos de un total de 307 705 registros.

2.2.2 Modelos para la estimación de la fracción de arena muy fina

Tras una revisión bibliográfica, hemos encontrado tres procedimientos para estimar la fracción de AMF a partir de la información textural básica: la fórmula de la RUSLE2 (USDA Agricultural Research Service, 2013, cap. 4), el método del ESDAC (Panagos *et al.*, 2014) y la teoría de Shirazi-Boersma (Shirazi *et al.* 1988, 2001). Se da la circunstancia de que, en los tres casos, la estimación se basa en una sola variable explicativa, a saber, la fracción de arena. Aclaremos en este punto que, salvo indicación expresa en otro sentido (p. ej., en las representaciones gráficas), se entenderá que las fracciones de arena d , limo t , arcilla y y arena muy fina v son números comprendidos entre 0 y 1 (ambos incluidos).

2.2.2.1 Fórmula RUSLE2

La RUSLE2 (USDA Agricultural Research Service, 2013, cap. 4) estima la fracción de AMF mediante la expresión

$$v = (0,74 - 0,62 \cdot d) \cdot d \quad (2.1)$$

Esta ecuación se derivó de un análisis de regresión a partir de datos del condado de Lancaster, Nebraska, procedentes de la base de datos NRCS RUSLE2 (USDA Agricultural Research Service, 2008, cap. 7). Su gráfico se muestra en la Figura 2.1.

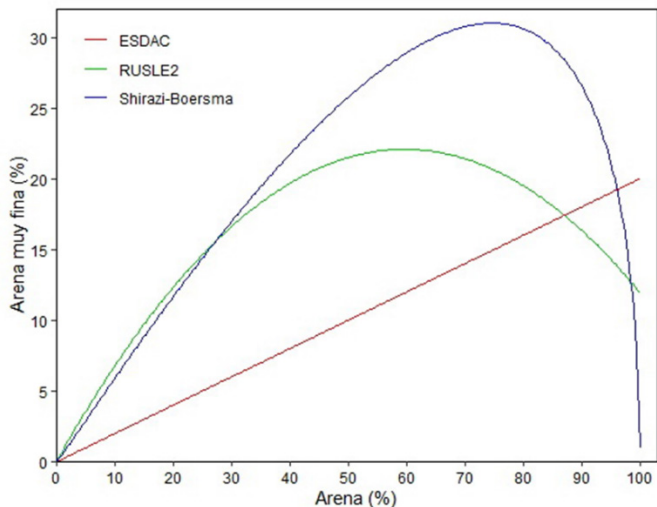


Figura 2.1. Modelos para la estimación de la fracción de arena muy fina. ESDAC: *European Soil Data Centre*; RUSLE2: *Revised Universal Soil Loss Equation, versión 2*.

2.2.2.2 Método ESDAC

Al confeccionar el mapa del factor K de la Unión Europea, Panagos *et al.* (2014) consideraron que la fracción de AMF representaba el 20 % de la fracción de arena, apoyándose en el hecho de que la AMF es una de las cinco subfracciones en que se divide la arena: muy gruesa, gruesa, media, fina y muy fina. Expresándolo en términos matemáticos formales, tenemos que

$$v = \frac{1}{5} \cdot d \quad (2.2)$$

cuyo gráfico se muestra en la Figura 2.1.

Tal y como se demuestra en el Apéndice 2A, este método equivale, en esencia, al empleo de una interpolación logarítmica-lineal, es decir, una interpolación lineal en términos del logaritmo del diámetro de las partículas.

2.2.2.3 Teoría Shirazi-Boersma

Shirazi *et al.* (1988, 2001) sostienen que la curva granulométrica de la tierra fina de una muestra de suelo puede ser aproximada mediante tres segmentos de función de distribución logarítmica normal: uno para la fracción de arena, otro para la fracción de limo y un tercero para la fracción de arcilla. De acuerdo con esta teoría, la fracción de AMF puede ser estimada mediante la siguiente función de interpolación:

$$v = \Phi[0,698810 + 0,812098 \cdot \Phi^{-1}(1 - d)] - 1 + d \quad (2.3)$$

donde Φ representa a la función de distribución normal tipificada y Φ^{-1} a su inversa (véase el Apéndice 2B). Su gráfico se muestra en la Figura 2.1.

2.3 METODOLOGÍA

2.3.1 Estadística descriptiva

2.3.1.1 Regresión polinómica mínimo-cuadrática

Al objeto de describir cómo varía la fracción de AMF en función de las fracciones texturales básicas (arena, limo y arcilla), hemos procedido, en primer lugar, a un ajuste mínimo-cuadrático de funciones polinómicas,

$$v = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} \cdot f_1^i \cdot f_2^j \quad (2.4)$$

donde n es el grado del polinomio; a_{ij} representa a los parámetros de ajuste y f_1 y f_2 representan a dos cualesquiera de las fracciones básicas (la inclusión de la tercera no aportaría nada, puesto que las fracciones de arena, limo y arcilla son linealmente dependientes). Repárese, finalmente, en que el número p de parámetros a_{ij} del polinomio anterior viene dado por la expresión $p = \frac{1}{2} \cdot (n+1) \cdot (n+2)$ (Venables y Ripley, 2002, cap. 15).

2.3.1.2 Subdivisión del triángulo de textura

La cantidad de datos disponibles en este estudio es tan grande y están tan ampliamente distribuidos por el triángulo de textura que decidimos realizar un análisis estadístico por segmentos, esto es, dividir el triángulo de textura en recintos más pequeños con el propósito de considerarlos de manera individual. Con este fin, hemos comenzado por dividirlo

en cuatro triángulos equiláteros de longitud de lado $l/2$, donde l es la longitud de lado del triángulo original, y hemos calculado el correspondiente coeficiente de determinación de la fracción de AMF, a saber,

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^{N_i} (v_{i,j} - m_i)^2}{\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^{N_i} (v_{i,j} - m_T)^2} \quad (2.5)$$

donde q es el número de triángulos no vacíos (tras esta primera división, $1 \leq q \leq 4$); N_i es el número de datos en el i -ésimo triángulo no vacío; v_{ij} es la j -ésima fracción de AMF en el i -ésimo triángulo no vacío; m_i es el valor medio de la fracción de AMF en el i -ésimo triángulo no vacío y m_T es el valor medio de la fracción de AMF en todo el triángulo de textura. Expresándolo en otros términos, hemos llevado a cabo una regresión mínimo-cuadrática segmentada en escalones (véase, p. ej., Dagnelie, 2006, cap. 15, y James *et al.*, 2013, cap. 7), si bien en un dominio de dos variables explicativas, donde los segmentos son los q triángulos no vacíos.

Acto seguido, hemos subdividido cada uno de los triángulos anteriores en 4 nuevos triángulos equiláteros, dando así curso a un proceso de carácter iterativo. De este modo, al cabo de r (sub)divisiones, hemos generado 4^r triángulos equiláteros de lado $l/2^r$. Como es lógico, el coeficiente de determinación crece a medida que aumentamos el número de subdivisiones, pero lo hace a expensas de un crecimiento (casi) exponencial del número q de parámetros m_i de la regresión. Así las cosas, a la hora de fijar el orden de magnitud del número de triángulos que serán objeto de los análisis descritos en las secciones 2.3.1.3. y 2.3.1.4, nos hemos basado en la minimización del criterio de información de Akaike (AIC; véase, p. ej., Burnham y Anderson, 2002, cap. 2). En nuestro caso, dicho criterio adquiere la forma

$$AIC = N \cdot \ln \left[\frac{\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^{N_i} (v_{i,j} - m_i)^2}{N} \right] + 2 \cdot q \quad (2.6)$$

donde N es el número total de datos, esto es,

$$N = \sum_{i=1}^q N_i \quad (2.7)$$

Cuando, como resultado de una subdivisión, alguno de los puntos se colocó sobre un lado o un vértice compartido por dos o más triángulos contiguos, el punto en cuestión fue asignado al triángulo cuyo centro estuviera más cerca del centro del triángulo de textura.

Por último, en vista de que uno de los métodos estadísticos contemplados más adelante, la prueba de Shapiro-Wilk, requiere un tamaño muestral igual o superior a 3, hemos procedido a fusionar algunos de los triángulos resultantes de la última subdivisión. Más concretamente, partiendo de los triángulos cuyo número de registros resultó inferior a 3, hemos revertido a escala local el proceso iterativo antes descrito hasta lograr que los triángulos así reconstituidos contaran con 3 o más registros. Al cabo de este proceso, se han generado q' teselas triangulares, no todas ellas del mismo tamaño.

2.3.1.3 Prueba de normalidad

Al objeto de dilucidar la conveniencia o no de utilizar los métodos clásicos de inferencia estadística, hemos aplicado la versión de Royston (1992) de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk a los valores de la fracción de AMF de cada una de las q' teselas generadas. Se ha demostrado que el procedimiento de Royston (1992) es muy potente para tamaños de muestra de hasta 500 (Hain, 2010) e incluso hasta 2000 (Razali y Wah, 2011). Todos los cálculos se realizaron utilizando el paquete "stats" del software R (R Core Team, 2020).

2.3.1.4 Medidas estadísticas condicionales

A partir de la información contenida en cada una de las teselas, hemos obtenido el valor condicional de varias medidas estadísticas relativas a la fracción de AMF para cada punto del triángulo de textura. Nos referimos, concretamente, a los valores condicionales de la media m , la desviación típica s , el coeficiente de asimetría de Fisher g , el primer cuartil Q_1 , la mediana o segundo cuartil Q_2 y el tercer cuartil Q_3 . Para lograrlo hemos seguido el procedimiento que se detalla a continuación.

1. Cálculo de las coordenadas d_i , t_i e y_i del centro de gravedad de los N_i puntos pertenecientes a la i -ésima tesela por mediación de las siguientes fórmulas:

$$d_i = \frac{1}{N_i} \cdot \sum_{j=1}^{N_i} d_{i,j} \quad t_i = \frac{1}{N_i} \cdot \sum_{j=1}^{N_i} t_{i,j} \quad \text{y} \quad y_i = \frac{1}{N_i} \cdot \sum_{j=1}^{N_i} y_{i,j} \quad (2.8)$$

donde $d_{i,j}$, $t_{i,j}$ e $y_{i,j}$ son, respectivamente, las fracciones de arena, limo y arcilla relativas al j -ésimo registro de la i -ésima tesela ($i = 1, 2, \dots, q'$). Dichos centros de gravedad constituirán los nodos de las funciones de interpolación definidas más abajo. Evidentemente, se cumple la condición de que $d_i + t_i + y_i = 1$.

2. Cálculo de la media m_i de los N_i valores de la fracción de AMF correspondientes a la i -ésima tesela, donde $i = 1, 2, \dots, q'$.
3. Localización de la media m_i en el i -ésimo centro de gravedad (nodo de interpolación) antes calculado ($i = 1, 2, \dots, q'$).
4. Generación de una función de interpolación de la media m , en términos de las coordenadas d , t e y de un punto arbitrario P del triángulo de textura, con arreglo a la expresión

$$m(d, t, y) = \frac{\sum_{i=1}^{q'} w_i(d, t, y) \cdot m_i}{\sum_{i=1}^{q'} w_i(d, t, y)} \quad (2.9)$$

donde el coeficiente de ponderación w_i relativo al i -ésimo nodo de interpolación viene dado por

$$w_i(d, t, y) = \frac{f(N_i)}{[D_i(d, t, y)]^u} \quad (2.10)$$

siendo $f(N_i)$ una función genérica del número de registros de la i -ésima tesela, D_i la distancia medida en el triángulo de textura que separa al punto P del i -ésimo nodo de interpolación y u un simple parámetro numérico. Tanto la función $f(N_i)$ como el valor de u han sido escogidos, mediante una aproximación mínimo-cuadrática, entre un conjunto de opciones preestablecidas, a saber, N_i , raíz cuadrada de N_i , $\log N_i$ y 1 para $f(N_i)$, y 1, 2, 3 y 4 para u . Obsérvese que, en el hipotético caso de que $f(N_i) = 1$ y $u = 2$, nos hallaríamos ante la función de interpolación canónica de Shepard (1968).

5. Repetición de los pasos 2-4 para cada una de las restantes medidas estadísticas contempladas, manteniendo, eso sí, la función $f(N_i)$ y el valor de u surgidos de los cálculos relativos a la media.

Al término del proceso descrito, hemos obtenido las funciones de interpolación de la media $m(d, t, y)$, la desviación típica $s(d, t, y)$, el coeficiente de asimetría $g(d, t, y)$, el primer cuartil $Q_1(d, t, y)$, la mediana $Q_2(d, t, y)$ y el tercer cuartil $Q_3(d, t, y)$. Dichas funciones constituyen, precisamente, las expresiones matemáticas de las medidas estadísticas condicionales que buscábamos.

Cabe señalar que la realización del paso 2 para cada cuartil consiste en una regresión cuantílica segmentada donde los segmentos son las q' teselas.

2.3.2 Evaluación de los modelos

Cálculos preliminares del rendimiento basados en el coeficiente R^2 han arrojado resultados muy deficientes para los tres modelos: -10,1 % con la fórmula RUSLE2, 3,8 % con el método ESDAC y -92,3 % con la teoría Shirazi-Boersma. Aun así, es muy posible que dichos modelos funcionen correctamente en áreas específicas del triángulo de textura. Partiendo de esta consideración, hemos decidido que un modelo será aceptable para estimar la fracción de AMF en un punto del triángulo de textura si proporciona, para dicho punto, un valor comprendido entre los determinados por la función de interpolación del primer cuartil $Q_1(d, t, y)$ y la función de interpolación del tercer cuartil $Q_3(d, t, y)$, ambos incluidos. Este procedimiento nos ha permitido establecer, para cada uno de los modelos estudiados, dos regiones dentro del triángulo de textura: la región donde el modelo en cuestión será aceptable y la región en la que no lo será.

2.4 RESULTADOS

2.4.1 Estadística descriptiva

2.4.1.1 Regresión polinómica mínimo-cuadrática

La Tabla 2.1 proporciona, para cada grado de polinomio considerado (primera columna), el número de parámetros ajustados (segunda columna) y el valor del coeficiente de determinación (tercera columna).

Tabla 2.1. Coeficientes de determinación para la regresión polinómica mínimo-cuadrática en función del grado del polinomio.

<i>n</i>	<i>p</i>	<i>R</i> ² (%)
1	3	16,8
2	6	32,0
3	10	32,3
4	15	32,5
5	21	32,7
6	28	32,8
7	36	32,9

Leyenda: *n* es el grado del polinomio; *p* es el número de parámetros del polinomio y *R*² es el coeficiente de determinación.

Como puede comprobarse, el valor del coeficiente de determinación comienza a estabilizarse a partir del polinomio de segundo grado. Hemos observado también que, una vez ajustado un polinomio de grado dado, algunos de sus términos apenas tienen relevancia, lo que nos ha llevado a repetir los ajustes disminuyendo *a priori* el número de parámetros considerados. Así, hemos obtenido un polinomio de segundo grado con un coeficiente de determinación de 32,0 % que sólo consta de 3 parámetros, a saber,

$$v = 0,219386 \cdot d - 0,151968 \cdot d^2 + 0,437529 \cdot d \cdot t \quad (2.11)$$

Esta ecuación cumple la lógica condición de que, si la fracción de arena es igual a cero, la fracción de AMF también será igual a cero.

2.4.1.2 Subdivisión del triángulo de textura

La Tabla 2.2 muestra, para cada nivel de subdivisión del triángulo de textura (primera columna), el número de triángulos generados (segunda columna), el número de triángulos no vacíos (tercera columna), el valor del coeficiente de determinación (cuarta columna) y el valor del criterio de información de Akaike (quinta columna).

Como se puede comprobar, el valor del criterio de información de Akaike alcanza su mínimo cuando *r* es igual a 5. Esto ha determinado que los cálculos posteriores hayan partido, precisamente, de ese grado de subdivisión, es decir, del establecimiento y consideración de 1024 triángulos equiláteros de igual tamaño. La fusión de algunos de estos triángulos para obtener teselas con, al menos, 3 registros cada una, ha dado lugar a 976 teselas, todas ellas triángulos equiláteros pero de diferentes tamaños, a saber, 964 de lado 3,125 %, 11 de lado 6,25 % y 1 de lado 12,5 % (ver Figura 2.2).

Tabla 2.2. Valores del criterio de información de Akaike para la regresión mínimo-cuadrática segmentada en función de los diferentes niveles de subdivisión del triángulo de textura.

r	4^r	q	R^2 (%)	$AIC \times 10^{-6}$
1	4	4	16,8	-1,57252
2	16	16	26,5	-1,61280
3	64	64	30,9	-1,63155
4	256	256	32,5	-1,63835
5	1024	1008	33,1	-1,63980
6	4096	3923	33,9	-1,63728
7	16384	14842	36,1	-1,62597

Leyenda: r es el nivel de subdivisión del triángulo de textura; 4^r es el número de triángulos generados; q es el número de parámetros ajustados (triángulos no vacíos); R^2 es el coeficiente de determinación y AIC es el valor del criterio de información de Akaike.

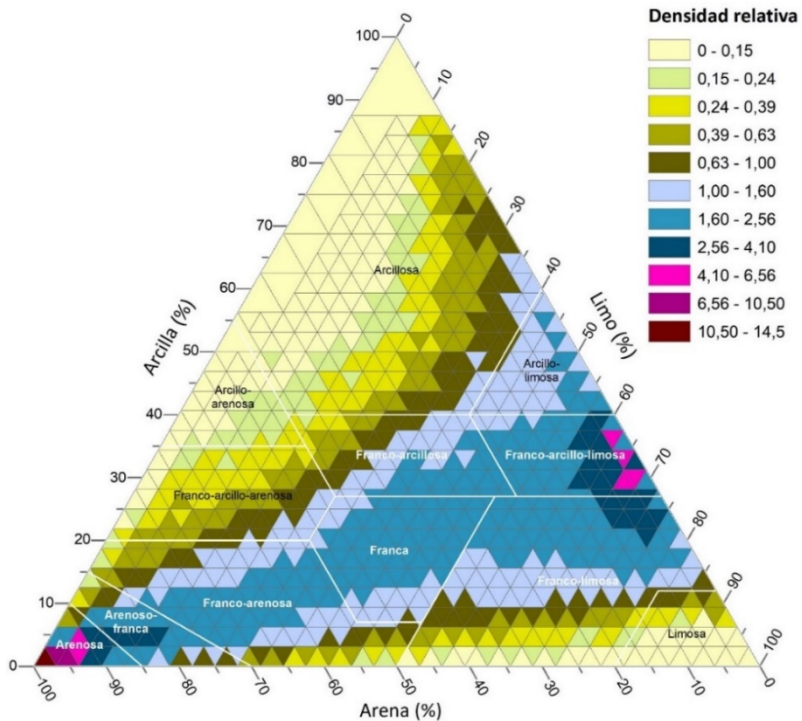


Figura 2.2. Densidad relativa de registros, expresada como la relación entre la densidad de los registros en cada tesela y la densidad de los registros en todo el triángulo de textura.

La Figura 2.2 muestra, así mismo, la densidad relativa de registros en dichas teselas, es decir, la razón de la densidad de registros en cada una de las teselas entre la densidad de registros en el conjunto del triángulo de textura. En aras de la claridad, se han superpuesto los límites de las clases texturales del sistema USDA. Así, los valores más altos de densidad relativa se encuentran en la clase arenosa, con un máximo absoluto de 14,4 en la tesela

cuyo centro tiene coordenadas 97,9 % de arena, 1,1 % de limo y 1,0 % de arcilla. Existe, además, un máximo relativo de 5,0 en la clase franco-arcillo-limosa, concretamente en la tesela cuyo centro tiene coordenadas 2,1 % de arena, 64,6 % de limo y 33,3 % de arcilla. También tienen densidades, en su mayor parte, superiores a la media las clases arenoso-franca, franco-arenosa, franca, franco-arcillosa y arcillo-limosa. Por el contrario, las clases texturales arcillosa, arcillo-arenosa, franco-arcillo-arenosa y limosa presentan densidades generalmente inferiores a la media. Por último, la clase franco-limosa tiene valores netamente superiores a la media en su parte más arcillosa y muy inferiores a ella en su parte menos arcillosa.

2.4.1.3 Prueba de normalidad

La aplicación de la prueba de Shapiro-Wilk a los datos de AMF de cada tesela llevó al rechazo de la hipótesis nula, con un nivel de significación del 0,05, en el 93,1 % de las teselas. En vista de esto, decidimos aplicar las transformaciones de variable más habituales en estos casos, a saber, la transformación logarítmica, la transformación raíz cuadrada y, previa división entre la fracción de arena, la transformación arcoseno. Lamentablemente, los resultados no mejoraron de forma sustancial y arrojaron un rechazo del 71,1 % para la transformación logarítmica, del 77,6 % para la transformación raíz cuadrada y del 85,8 % para la transformación arcoseno.

2.4.1.4 Medidas estadísticas condicionales

Entre las funciones $f(N_i)$ y los valores del parámetro u considerados (véase sección 2.3.1.4), aquellos que han dado mejor rendimiento en términos de mínimos cuadrados han sido $f(N_i) = \log N_i$ y $u = 3$. La Figura 2.3 y la Figura 2.4 muestran los valores interpolados de las medidas estadísticas objeto de interés.

En la Figura 2.3a se puede apreciar que, a excepción del intervalo comprendido entre, aproximadamente, el 0 y el 20 % de arena, la media condicional de la fracción de AMF depende de más de una fracción textural básica. Los valores más altos se localizan en las zonas menos arcillosas de las clases franco-arenosa y franco-limosa. Concretamente, el máximo se sitúa en el 52,1 % de arena, el 46,2 % de limo y el 1,7 % de arcilla (clase franco-arenosa), con un valor de 23,5 %.

En la Figura 2.3b se aprecia que la desviación típica condicional de la fracción de AMF es muy variable, es decir, estamos ante un caso claro de ausencia de homocedasticidad. Ello

implica que polinomios de regresión mínimo-cuadrática como el calculado en la sección 2.4.1.1 no puedan ser utilizados para proporcionar intervalos de predicción.

Según el criterio de Bulmer (1979), una distribución puede considerarse aproximadamente simétrica cuando el valor absoluto del coeficiente de asimetría de Fisher es inferior a 0,5, moderadamente asimétrica cuando está comprendido entre 0,5 y 1, y muy asimétrica cuando es superior a 1. Teniendo esto en cuenta, la Figura 2.3c nos permite concluir que la distribución condicional de la fracción de AMF es asimétrica en el 85 % del área del triángulo de textura, un área donde la mediana será, por tanto, preferible a la media como medida de tendencia central.

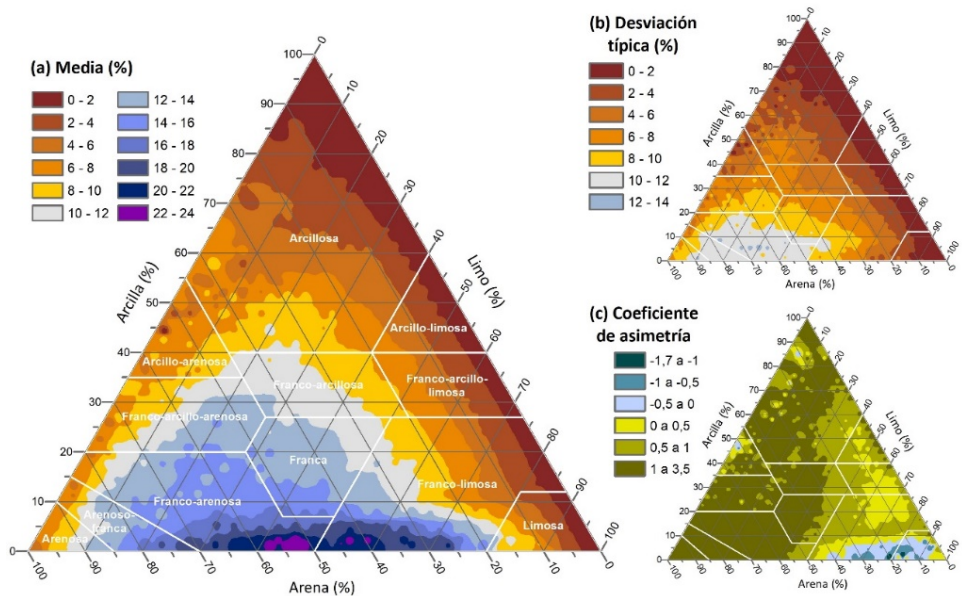


Figura 2.3. Valores interpolados de las principales medidas condicionales de la fracción de arena muy fina.

En la Figura 2.4 se observa que el primer cuartil, la mediana y el tercer cuartil condicionales de la fracción de AMF siguen un patrón similar al de la media condicional (Figura 2.3a). Así, a excepción del intervalo comprendido entre, aproximadamente, el 0 y el 20 % de arena, estas tres medidas no dependen únicamente de la fracción de arena. En los tres cuartiles, los valores más altos se localizan en las zonas menos arcillosas de las clases franco-arenosa y franco-limosa. Concretamente, el máximo del primer cuartil se encuentra en el 26,1 % de arena, el 73,0 % de limo y el 0,9 % de arcilla (clase franco-limosa), con un valor de 17,7 %; el de la mediana se sitúa en el 39,7 % de arena, el 58,7 % de limo y el

1,6 % de arcilla (clase franco-limosa), con un valor de 21,5 %; y el del tercer cuartil se localiza en el mismo punto que el máximo de la mediana, con un valor de 32,7 %.

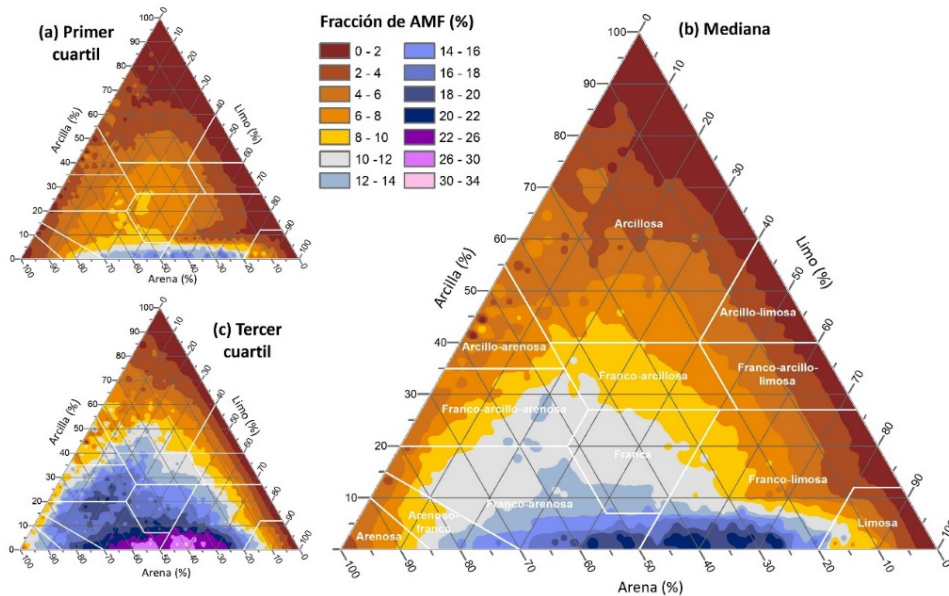


Figura 2.4. Valores interpolados de los cuartiles condicionales de la fracción de arena muy fina.

2.4.2 Evaluación de los modelos

Como se puede ver en la Figura 2.5a, la fórmula de la RUSLE2 sólo ha resultado aceptable en las clases limosa y franco-limosa, en la zona más limosa de la clase franco-arcillo-limosa y en la zona menos arcillosa de la clase franco-arenosa. En términos cuantitativos, la región de aceptación supone el 20,9 % del área del triángulo de textura, localizándose en ella el 24,4 % de los registros.

En lo tocante al método del ESDAC, la Figura 2.5b muestra que su región de aceptación abarca una buena porción del triángulo de textura, concretamente el 49,1 % de su área, si bien sólo se localizan en ella el 39,6 % de los registros. A grandes rasgos, el método ha resultado aceptable en la franja localizada entre el 10 y el 30 % de limo, así como en las partes de las clases franca y franco-limosa con arcilla comprendida entre el 8 y el 18 %, siempre que el limo no supere el 80 %.

Por su parte, la Figura 2.5c muestra que la teoría de Shirazi-Boersma ha resultado aceptable en las clases limosa, franco-limosa y franco-arcillo-limosa, así como en la parte menos

arenosa de la clase arcillo-limosa. Esta figura guarda, por consiguiente, una gran semejanza con la Figura 2.5a (fórmula de la RUSLE2). En términos cuantitativos, la región de aceptación supone el 23,5 % del área del triángulo de textura, si bien se localizan en ella el 32,6% de los registros.

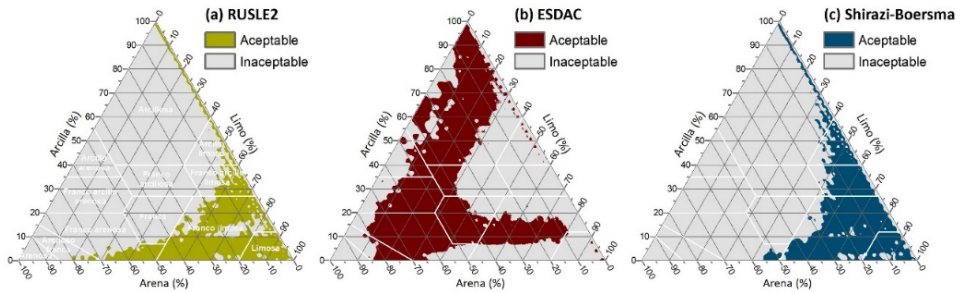


Figura 2.5. Regiones de aceptación de los modelos para la estimación de la fracción de arena muy fina.

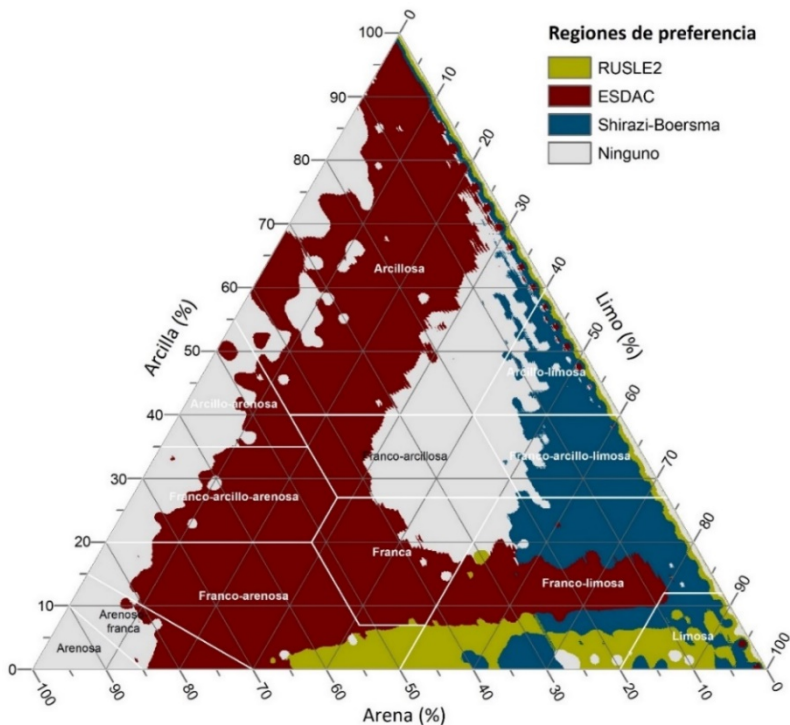


Figura 2.6. Regiones de preferencia de los modelos para la estimación de la fracción de arena muy fina.

Al superponer las regiones de aceptación de los tres modelos, se hizo evidente que hay zonas de solape entre ellas. En aquellos puntos en que más de un modelo resulta aceptable, hemos preferido aquel que proporciona el valor más cercano a la mediana. La Figura 2.6 muestra el resultado de la aplicación de este criterio. Así, el método del ESDAC sería el más adecuado en el 48,2 % del área del triángulo de textura, la teoría de Shirazi-Boersma lo sería en el 14,9 % y la fórmula de la RUSLE2 en el 7,5 %. Nos quedaría un 29,4 % del área triángulo de textura, con el 31,3 % de los registros, donde ninguno de los modelos proporciona una estimación aceptable. Adviértase que la clase textural arenosa, donde la densidad de registros es máxima, está incluida por completo en esta última área.

2.5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Como se indicó en la sección 2.1, no existen trabajos publicados en los que se evalúen procedimientos para estimar la fracción de AMF a partir de las fracciones texturales básicas de una muestra de suelo. Por otra parte, tampoco existen antecedentes de análisis estadísticos de datos de textura procedentes de varios cientos de miles de muestras de suelos. Así, en términos cuantitativos, los trabajos más destacables hasta la fecha eran los de Nemes *et al.* (1999), con 14 584 muestras, y Shangguan *et al.* (2014), con 16 349 muestras, ambos dedicados a evaluar el rendimiento de varios procedimientos y modelos para describir las distribuciones acumuladas del tamaño de partículas; los trabajos de Auerswald *et al.* (2014), con 19 055 muestras, y Panagos *et al.* (2014), 19 969 muestras, orientados al cálculo del factor K ; el de Levi (2017), con 75 736 muestras, que pone a prueba funciones de edafotransferencia; y el de Padarian *et al.* (2012), con 160 904 muestras, con el objetivo de convertir las fracciones texturales desde el sistema de clasificación de Australia al sistema del USDA.

Si bien los datos utilizados en este trabajo provienen sobre todo de suelos de Estados Unidos, los diagramas de dispersión en el triángulo de textura de datos procedentes de otros ámbitos geográficos son consistentes con la densidad de registros mostrada en la Figura 2.2. Sirvan de ejemplo los diagramas de Nemes *et al.* (1999, fig. 3 y 8), con datos del *Soil Information System* de los Países Bajos y de la base de datos *Hydraulic Properties of European Soils* (HYPRES); el diagrama de Minasny *et al.* (1999, fig. 1), relativo a suelos australianos, y el diagrama de Hwang *et al.* (2002, fig. 1), para suelos surcoreanos. Ello nos permite conjeturar que nuestras conclusiones son extrapolables, cuanto menos, a buena parte de los suelos de Europa, Australia y Extremo Oriente.

La pretensión de estimar la fracción de AMF a partir únicamente de la fracción de arena, como hacen los tres modelos evaluados, se ha revelado demasiado optimista a la luz de la información mostrada en la Figura 2.3 y en la Figura 2.4. Más aún, cualquier modelo concebible basado únicamente en las fracciones texturales básicas adolecería de gran incertidumbre, como se desprende de la estabilización del coeficiente de determinación de la Tabla 2.1 por debajo del 33 %. Por consiguiente, lograr un aumento sustancial del coeficiente de determinación pasa, inevitablemente, por contemplar nuevas variables explicativas. En este sentido, pensamos que sería interesante considerar la fracción de partículas con diámetro mayor que 2 mm (elementos gruesos) o el uso de información de carácter no granulométrico, como la discriminación por tipo de horizontes de suelo o por tipo de material parental.

En general, ninguno de los tres modelos evaluados ha ofrecido un rendimiento satisfactorio. Con todo, queremos destacar el hecho de que, pese a la modestia de su planteamiento, el método del ESDAC ha resultado ser el mejor de los tres. En cuanto a la teoría de Shirazi-Boersma, cabe argumentar en su descargo que no fue concebida específicamente para estimar la fracción de AMF, sino con el fin de describir la distribución acumulada del tamaño de partículas. Ahora bien, el hecho de que yerre en este caso particular de algún modo pone en entredicho su eficacia para su propósito original. El rendimiento más bajo ha correspondido a la fórmula de regresión de la RUSLE2, probablemente debido a que los datos en que se basó (condado de Lancaster, Nebraska) son poco representativos del conjunto de suelos de Estados Unidos.

Ilustremos las deficiencias de los tres modelos con el ejemplo de un punto localizado en la clase textural arenosa, donde, recordémoslo, la densidad de registros es máxima. Sea un horizonte con un 93,4 % de arena, un 3,9 % de limo y un 2,7 % de arcilla. La fracción de AMF de este horizonte sería del 15,0 % según la fórmula de la RUSLE2, del 18,7 % según el método del ESDAC y del 23,4 % según la teoría de Shirazi-Boersma. Si el valor de dicha fracción fuera el que nos indica la Figura 2.4b (mediana condicional), es decir, un 6,0 %, los errores relativos serían, respectivamente, de un 150,0 %, un 211,7 % y un 290,0 %. En el capítulo 4 de este trabajo revisaremos con detalle el factor K de erosionabilidad del suelo, pero adelantamos aquí la repercusión que estos errores en la estimación de la fracción de AMF tienen sobre su cálculo. Supongamos que el horizonte en cuestión tenga un 2 % de materia orgánica, una estructura granular fina y forme parte de un perfil de permeabilidad moderada. Así, tomando las fracciones de AMF anteriores, los valores del factor K calculados con el nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) serían 0,146 (RUSLE2),

0,179 (ESDAC) y $0,222 \text{ t h MJ}^{-1}\text{cm}^{-1}$ (Shirazi-Boersma). Si aceptamos el valor de 6,0 % de AMF proporcionado por la Figura 2.4b, el factor K tomaría el valor $0,106 \text{ t h MJ}^{-1}\text{cm}^{-1}$, por lo que estaríamos ante un error relativo de un 37,7 % (RUSLE2), un 68,9 % (ESDAC) y un 109,4 % (Shirazi-Boersma).

A la vista de lo dicho, resulta evidente que el desarrollo de modelos precisos para la estimación de la fracción de AMF es una tarea aún pendiente. Cada uno de los modelos evaluados puede ser utilizado para estimar la fracción de AMF en su correspondiente región de aceptación (Figura 2.5 y Figura 2.6), evidentemente, pero nos encontramos con que en casi un tercio del área del triángulo de textura ninguno de los tres modelos es aceptable.

La ecuación (2.11), obtenida a través de una regresión mínimo-cuadrática global (no segmentada), podría ser una alternativa. Sin embargo, el establecimiento de intervalos de predicción para este tipo de funciones de regresión requiere que la distribución condicional de la variable objetivo sea normal y homocedástica (Peña, 2008, cap. 8; Dagnelie, 2013, cap. 9; Meeker *et al.*, 2017, cap. 1), requisitos que, como se demostró, no se cumplen en el caso de la fracción de AMF. Además, las regresiones mínimo-cuadráticas están estrechamente vinculadas al concepto de la media, pero el carácter asimétrico y heterocedástico de la distribución condicional de la fracción de AMF aconseja el uso de la mediana como medida de la tendencia central de la distribución, mucho más adecuada que la media en dichas circunstancias (Hao y Naiman, 2007, cap. 3).

A diferencia de la ecuación (2.11), los nomogramas de la Figura 2.4 tienen su origen en una regresión cuantílica local (segmentada), un contexto en el que no es necesario satisfacer los requisitos de normalidad y homocedasticidad para establecer intervalos de predicción (Davino *et al.*, 2014, cap. 2). En consecuencia, cuando se trata de estimar la fracción de AMF, recomendamos la adopción del valor proporcionado por la Figura 2.4b (mediana condicional) junto con el intervalo de predicción del 50 % delimitado por los valores proporcionados por la Figura 2.4a (primer cuartil condicional) y la Figura 2.4c (tercer cuartil condicional). Así, para el ejemplo anterior, el valor pronosticado para la fracción de AMF sería 6,0% (Figura 2.4b) y su intervalo de predicción del 50% estaría delimitado por 2,6% (Figura 2.4a) y 12,1% (Figura 2.4c).

Si bien este sería el procedimiento recomendado, somos conscientes de la incomodidad que implica la lectura directa en la Figura 2.4. Por ello, hemos realizado una regresión polinómica cuantílica para obtener unas ecuaciones aproximadamente equivalentes a cada uno de los tres nomogramas. Los parámetros de los tres polinomios obtenidos han

sido ajustados en términos globales, con lo que se pierde parte de la precisión lograda con el ajuste local de los nomogramas, pero, a cambio, conseguimos una mayor facilidad de uso. Estos cálculos se han realizado utilizando el paquete "quantreg" del software R (Koenker, 2020).

Así, hemos obtenido el siguiente polinomio de segundo grado para ajustar la mediana condicional de la fracción de AMF:

$$v = 0,19580 \cdot d - 0,15876 \cdot d^2 + 0,38005 \cdot d \cdot t \quad (2.12)$$

El análisis del rendimiento de la ecuación (2.12) en términos del coeficiente R^2 arroja un valor de 27,4 %, cercano a la cota del 33 % que muestra la Tabla 2.1 y claramente superior a los valores de R^2 que calculamos en la sección 2.3.2 para cada uno de los modelos evaluados. En cuanto a su región de aceptación, abarca la casi totalidad del triángulo de textura, exactamente el 92,8 % de su área, e incluye el 97,0 % de los registros.

Para estimar los intervalos de predicción del 50 %, los polinomios ajustados son:

$$v_1 = 0,15927 \cdot d - 0,14902 \cdot d^2 + 0,22269 \cdot d \cdot t \quad (2.13)$$

$$v_3 = 0,28886 \cdot d - 0,21408 \cdot d^2 + 0,61030 \cdot d \cdot t \quad (2.14)$$

donde v_1 es el primer cuartil condicional de la fracción de AMF y v_3 el tercero. La Figura 2.7 muestra la representación de estas tres ecuaciones en el triángulo de textura.

Si continuamos con el ejemplo utilizado anteriormente, el de un horizonte con un 93,4 % de arena, un 3,9 % de limo y un 2,7 % de arcilla, sustituyendo en la ecuación (2.12) obtenemos un valor estimado para la fracción de AMF del 5,8 %, y las ecuaciones (2.13) y (2.14) proporcionan un intervalo de predicción del 50 % entre 2,7 % y 10,5 %, respectivamente, valores muy similares a los proporcionados por la Figura 2.4.

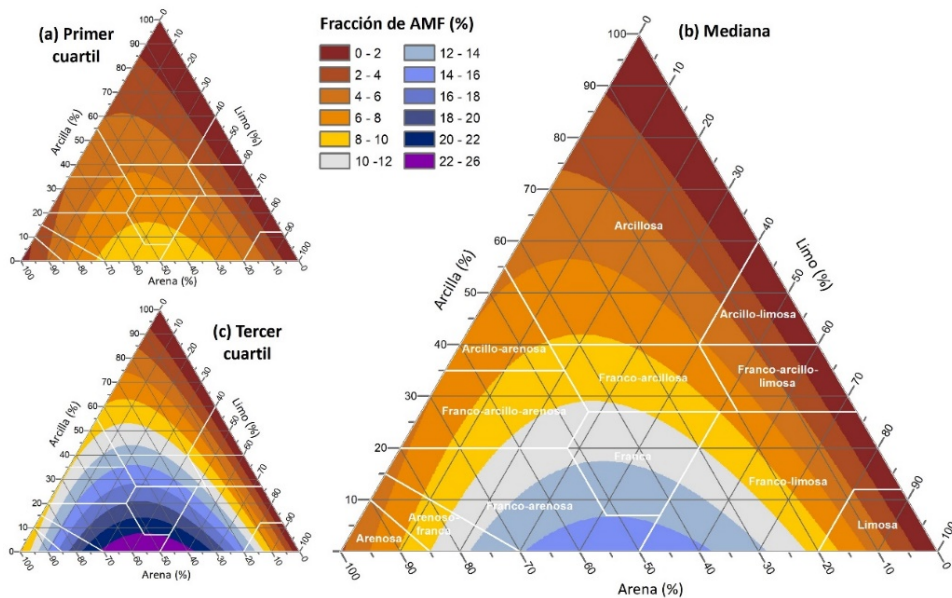


Figura 2.7. Valores de los cuartiles condicionales de la fracción de arena muy fina obtenidos por regresión cuantílica.

2.6 REFERENCIAS

- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment. part 1: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. doi:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x
- Auerswald, K., Fiener, P., Martin, W., & Elhaus, D. (2014). Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: An alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. *Catena*, 118, 220-225. doi:10.1016/j.catena.2014.01.008
- Bagarello, V., Di Stefano, V., Ferro, V., Giordano, G., Iovino, M., & Pampalone, V. (2012). Estimating the USLE soil erodibility factor in Sicily, South Italy. *Applied Engineering in Agriculture*, 28(2), 199-206. doi:10.13031/2013.41347
- Bouyoucos, G. J. (1935). The clay ratio as a criterion of susceptibility of soil to erosion. *Journal of the American Society of Agronomy*, 27(9), 738-741.
- Bulmer, M. G. (1979). *Principles of statistics*. New York: Dover.

- Burnham, K., & Anderson, D. (2002). *Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach* (2nd ed.). New York: Springer.
- Cronshey, R. G., & Theurer, F. D. (1998). AnnAGNPS: Non-point pollutant loading model. In *Proceedings of the First Interagency Hydrologic Modeling Conference, April 19-23, 1998, Las Vegas, Nevada: Vol. 1* (pp. 1.9 -1.16). Reston, Virginia: USGS Water Information Coordination Program.
- Dagnelie, P. (2013). *Statistique théorique et appliquée, tome 1: Statistique descriptive et bases de l'inférence statistique* (3rd ed.). Bruxelles: De Boeck Supérieur.
- Dagnelie, P. (2006). *Statistique théorique et appliquée, 2: Inférence statistique à une et à deux dimensions* (2nd ed.). Bruxelles: De Boeck.
- Davino, C., Furno, M., & Vistocco, D. (2014). *Quantile regression: Theory and applications. chapter 2. Quantile regression: Understanding how and why* (First ed.). John Wiley & Sons.
- Flacke, W., Auerswald, K., & Neufang, L. (1990). Combining a modified universal soil loss equation with a digital terrain model for computing high resolution maps of soil loss resulting from rain wash. *Catena*, 17(4), 383-397. doi:10.1016/0341-8162(90)90040-K
- Hain, J. (2010). *Comparison of common tests for normality*. Master thesis. Würzburg, Germany: University of Würzburg. Accessed at http://www.statistik-mathematik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/10040800/user_upload/hain/da_hain_final.pdf, April 27, 2018.
- Hao, L., & Naiman, D. Q. (2007). *Quantile regression*. United States of America: Sage Publications.
- Hwang, S. I., Lee, K. P., Lee, D. S., & Powers, S. (2002). Models for estimating soil particle-size distributions. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1143-1150. doi:10.2136/sssaj2002.1143
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning: With applications in R*. New York: Springer. doi:10.1007/978-1-4614-7138-7

- Kinnell, P. I. A., & Risse, L. M. (1998). USLE-M: Empirical modeling rainfall erosion through runoff and sediment concentration. *Soil Science Society of America Journal*, 62(6), 1667-1672. doi:10.2136/sssaj1998.03615995006200060026x
- Koenker, R. (2020). *quantreg: Quantile Regression*. R package version 5.67. <https://CRAN.R-project.org/package=quantreg>
- Levi, M. (2017). Modified centroid for estimating sand, silt, and clay from soil texture class. *Soil Science Society of America Journal*, 81(3), 578-588. doi:10.2136/sssaj2016.09.0301
- Meeker, W. Q., Hahn, G. J., & Escobar, L. A. (2017). *Statistical intervals: A guide for practitioners and researchers* (2nd ed.). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Middleton, H. E. (1930). The properties of soils which influence erosion. *US Department of Agriculture Technical Bulletin*, 178, 1-16. doi:10.2136/sssaj1930.036159950b1120010021x
- Minasny, B., McBratney, A. B., & Bristow, K. L. (1999). Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*, 93(3), 225-253. doi:10.1016/S0016-7061(99)00061-0
- NCSS (2017). National Cooperative Soil Survey. National Cooperative Soil Survey Characterization Database. Accessed at <http://ncsslabsdatamart.sc.egov.usda.gov/>, September 25, 2017.
- Nemes, A., Wösten, J. H. M., Lilly, A., & Oude Voshaar, J. H. (1999). Evaluation of different procedures to interpolate particle-size distributions to achieve compatibility within soil databases. *Geoderma*, 90(3), 187-202. doi:10.1016/S0016-7061(99)00014-2
- Ostovari, Y., Ghorbani-Dashtaki, S., Bahrami, H. A., Abbasi, M., Dematte, J. A. M., Arthur, E., & Panagos, P. (2018). Towards prediction of soil erodibility, SOM and CaCO₃ using laboratory Vis-NIR spectra: A case study in a semi-arid region of Iran. *Geoderma*, 314, 102-112. doi:10.1016/j.geoderma.2017.11.014
- Ostovari, Y., Ghorbani-Dashtaki, S., Bahrami, H. A., Naderi, M., Dematte, J. A. M., & Kerry, R. (2016). Modification of the USLE K factor for soil erodibility assessment on calcareous soils in Iran. *Geomorphology*, 273, 385-395. doi:10.1016/j.geomorph.2016.08.003

- Padarian, J., Minasny, B., & McBratney, A. (2012). Using genetic programming to transform from Australian to USDA/FAO soil particle - size classification system. *Soil Research*, 50(6), 443-446. doi:10.1071/SR12139
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., . . . Alewell, C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, 54(Supplement C), 438-447. doi:10.1016/j.envsci.2015.08.012
- Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., & Alewell, C. (2014). Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. *Science of the Total Environment*, 479-480(1), 189-200. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.02.010
- Peña, D. (2008). *Fundamentos de estadística* (2nd ed.). Madrid: Alianza Editorial.
- R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. URL <https://www.R-project.org/>.
- Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21-33. Accessed at <https://www.nrc.gov/docs/ML1714/ML17143A100.pdf>. April 27, 2018.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (Coordinators) (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Agriculture Handbook 703. Tucson, Arizona: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Renard, K. G., Yoder, D. C., Lightle, D. T., & Dabney, S. M. (2011). Universal soil loss equation and revised universal soil loss equation. In R. P. C. Morgan, & M. A. Nearing (Eds.), *Handbook of erosion modelling* (pp. 137-167). Chichester, UK: Wiley - Blackwell. doi.org/ 10.1002/ 9781444328455.ch8
- Royston, P. (1992). Approximating the Shapiro-Wilk W-test for non-normality. *Statistics and Computing*, 2, 117-119. doi:10.1007/BF01891203
- Shabani, F., Kumar, L., & Esmaili, A. (2014). Improvement to the prediction of the USLE K factor. *Geomorphology*, 204, 229-234. doi:10.1016/j.geomorph.2013.08.008

- Shangguan, W., Dai, Y., García-Gutiérrez, C., & Yuan. H. (2014). Particle-size distribution models for the conversion of Chinese data to FAO/USDA system. *The Scientific World Journal*, 2014 (Article ID 109310), 1-11. doi:10.1155/2014/109310
- Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference, August 27-29, 1968* (pp. 517-524). New York: Association for Computing Machinery. doi:10.1145/800186.810616
- Shirazi, M. A., Boersma, L., & Hart, J. W. (1988). A unifying quantitative analysis of soil texture: Improvement of precision and extension of scale. *Soil Science Society of America Journal*, 52(1), 181-190. doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200010032x
- Shirazi, M. A., Boersma, L., & Johnson, C. B. (2001). Particle-size distributions: Comparing texture systems, adding rock and predicting soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2), 300-310. doi:10.2136/sssaj2001.652300x
- Soil Survey Staff. (1951). *Soil survey manual*. Agriculture Handbook 18. Washington, D.C.: USDA Agriculture Research Administration.
- Soil Survey Staff. (2011). *Soil survey laboratory information manual*. Soil Survey Investigations Report 45, Version 2.0. Lincoln, Nebraska: USDA Natural Resources Conservation Service.
- USDA Agricultural Research Service. (2013). *Science Documentation: Revised universal soil loss equation, version 2 (RUSLE2)*. Washington, D.C.: USDA Agricultural Research Service. https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/60600505/RUSLE/RUSLE2_Science_Doc.pdf
- USDA Agricultural Research Service. (2008). *User's reference guide: Revised universal soil loss equation, version 2 (RUSLE2)*. Washington, D.C.: USDA Agricultural Research Service. https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/60600505/RUSLE/RUSLE2_User_Ref_Guide.pdf
- Vaezi, A. R., Sadeghi, S. H. R., Bahrami, H. A., & Mahdian, M. H. (2008). Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. *Geomorphology*, 97(3), 414-423. doi:10.1016/j.geomorph.2007.08.017

- Van Rompaey, A. J. J., Verstraeten, G., Van Oost, K., Govers, G., & Poesen, J. (2001). Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1221-1236. doi:10.1002/esp.275
- Venables, W. N., & Ripley, B. D. (2002). *Modern applied statistics with S* (4th ed.). New York: Springer. doi:10.1007/978-0-387-21706-2
- Wang, B., Zheng, F., & Guan, Y. (2016). Improved USLE-K factor prediction: A case study on water erosion areas in China. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(3), 168-176. doi:10.1016/j.iswcr.2016.08.003
- Wang, B., Zheng, F., & Römken, M. J. M. (2013). 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), 69-79. doi:10.1080/09064710.2012.718358
- Williams, J. R. (1975). Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources Publication, ARS-S-40*, (pp. 244-252). New Orleans: USDA Agricultural Research Service, Southern Region.
- Williams, J. R., Renard, K. G., & Dyke, P. T. (1983). EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 38(5), 381-383.
- 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(5), 189-193.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1965). *Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Guide for selection of practices for soil and water conservation*. Agriculture Handbook 282. Washington DC: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Agriculture Handbook 537. Washington DC: U.S. Department of Agriculture, Science and Education Administration.

2.7 APÉNDICES

Apéndice 2A. Relación entre el método ESDAC y la interpolación logarítmico-lineal

Sean F_1 y F_2 los valores que toma la distribución acumulada del tamaño de partículas de una muestra de suelo para los diámetros de partícula ϕ_1 y ϕ_2 , respectivamente. Supongamos que, en el intervalo definido por dichos diámetros, el valor F de la distribución acumulada de la muestra de suelo en cuestión puede estimarse como una función lineal del logaritmo del diámetro ϕ , esto es,

$$F(\phi) = \alpha + \beta \cdot \log \phi \quad (2A.1)$$

para $\phi_1 \leq \phi \leq \phi_2$. Si determinamos el valor de los parámetros α y β de modo que $F(\phi_1) = F_1$ y $F(\phi_2) = F_2$, es decir, si resolvemos para α y β el sistema formado por las ecuaciones $F_1 = \alpha + \beta \cdot \log \phi_1$ y $F_2 = \alpha + \beta \cdot \log \phi_2$, y sustituimos las correspondientes expresiones en la ecuación (2A.1), obtenemos la siguiente función de interpolación:

$$F(\phi) = F_1 + \frac{F_2 - F_1}{\log \phi_2 - \log \phi_1} \cdot (\log \phi - \log \phi_1) \quad (2A.2)$$

Realizando un par de operaciones algebraicas básicas, llegamos a la expresión:

$$F(\phi) - F_1 = \frac{\log(\phi/\phi_1)}{\log(\phi_2/\phi_1)} \cdot (F_2 - F_1) \quad (2A.3)$$

En el caso que nos ocupa, $\phi_1 = 0,05$ mm, $\phi_2 = 2$ mm y $\phi = 0,1$ mm, de modo que ϕ_2/ϕ_1 será igual a 40, ϕ/ϕ_1 será igual a 2, $F_2 - F_1$ será la fracción de arena d y $F(\phi) - F_1$ será la subfracción de arena muy fina v . En estas condiciones, podemos concluir que

$$v = \frac{\log 2}{\log 40} \cdot d \approx 0,188 \cdot d \approx \frac{1}{5} \cdot d \quad (2A.4)$$

tal y como queríamos demostrar. Adviértase que la conclusión anterior es independiente de la base logarítmica utilizada.

Apéndice 2B. Cálculo de la fracción de AMF a partir de la teoría de Shirazi

De acuerdo con la teoría de Shirazi (Shirazi *et al.*, 1988, 2001), el valor F de la distribución acumulada del tamaño de partículas de una muestra de suelo para diámetros ϕ comprendidos entre $\phi_1 = 0,05$ mm y $\phi_2 = 2$ mm vendría dado por una función de distribución logarítmico-normal de parámetros μ y σ , esto es,

$$F(\phi) = \Phi\left(\frac{\ln \phi - \mu}{\sigma}\right) \quad (2B.1)$$

tal que $F_2 = F(\phi_2) = 0,9999$ y $F_1 = F(\phi_1) = 1 - d$, siendo d la fracción de arena de la muestra y Φ la función de distribución normal tipificada. Esto nos permite plantear el sistema de ecuaciones

$$\begin{cases} F_1 = \Phi\left(\frac{\ln \phi_1 - \mu}{\sigma}\right) \\ F_2 = \Phi\left(\frac{\ln \phi_2 - \mu}{\sigma}\right) \end{cases} \quad (2B.2)$$

donde, aplicando la función inversa de Φ , simbolizada por Φ^{-1} , a cada miembro y operando, se obtiene un sistema lineal en μ y σ

$$\begin{cases} \sigma \cdot \Phi^{-1}(F_1) = \ln \phi_1 - \mu \\ \sigma \cdot \Phi^{-1}(F_2) = \ln \phi_2 - \mu \end{cases} \quad (2B.3)$$

Resolviendo y sustituyendo las expresiones resultantes en la ecuación (2B.1), llegamos a

$$F(\phi) = \Phi\left(\frac{\ln(\phi/\phi_1)}{\ln(\phi_2/\phi_1)} [\Phi^{-1}(F_2) - \Phi^{-1}(F_1)] + \Phi^{-1}(F_1)\right) \quad (2B.4)$$

y, tras restar F_1 a ambos miembros de esta ecuación, a

$$F(\phi) - F_1 = \Phi\left(\frac{\ln(\phi/\phi_1)}{\ln(\phi_2/\phi_1)} [\Phi^{-1}(F_2) - \Phi^{-1}(F_1)] + \Phi^{-1}(F_1)\right) - F_1 \quad (2B.5)$$

Sustituyendo las variables ϕ_1 , ϕ_2 , F_1 , F_2 por sus respectivos valores y expresiones, y considerando que, en el caso que nos ocupa, $\phi = 0,1$ mm, entonces $F(\phi) - F_1$ será la fracción de arena muy fina v , se deduce que

$$v = \Phi\left(\frac{\ln 2}{\ln 40}[\Phi^{-1}(0,9999) - \Phi^{-1}(1 - d)] + \Phi^{-1}(1 - d)\right) - 1 + d \quad (2B.6)$$

y, por tanto, que

$$v = \Phi(0,698810 + 0,812098 \cdot \Phi^{-1}(1 - d)) - 1 + d \quad (2B.7)$$

Capítulo 3. Modelos de estimación de las fracciones texturales USDA conocidas las del Sistema Internacional

3.1 INTRODUCCIÓN

La textura hace referencia a la proporción relativa en peso de las partículas minerales de una muestra de suelo agrupadas, tras la destrucción de sus agregados, por clases de tamaños en fracciones granulométricas. Si bien existe coincidencia general en la terminología utilizada para nombrar estas fracciones, a saber, arcilla, limo y arena, no ocurre lo mismo con los límites que las definen, variables según los objetivos perseguidos (Porta *et al.*, 2003, cap. 6). Las distintas disciplinas científicas y países han ido desarrollado diferentes esquemas de clasificación de la distribución del tamaño de las partículas del suelo, la mayoría de los cuales comparten los valores de diámetro de partícula de 0,002 mm y 2 mm como límites superiores para la fracción de arcilla y la fracción de arena, respectivamente. Es en el corte entre las fracciones de limo y arena donde hay una mayor diversidad de valores. Una excelente revisión de estos esquemas de clasificación se puede consultar en Blott y Pye (2012).

Los esquemas de clasificación textural utilizados en Edafología difieren de unos países a otros (Nemes y Rawls, 2006), aunque los más frecuentes son el conocido como Sistema Internacional (IS) y el establecido por el *United States Department of Agriculture* (USDA) (Porta *et al.*, 2003, cap. 6). Otro esquema relevante, utilizado en Rusia, en otros países del este de Europa o en China, es el sistema Kachinsky (1956), en el que las tres fracciones básicas son arcilla (<0,001 mm), limo (0,001-0,05 mm) y arena (0,05–1 mm).

El IS tiene su origen en los límites definidos por el químico sueco A.M. Atterberg, quien, a partir del límite superior de 2 mm, estableció longitudes iguales en una escala logarítmica decimal (Atterberg, 1905). La *International Society of Soil Science* (ISSS) adoptó oficialmente estos límites en su primer congreso, celebrado en Washington D.C. en 1927, y estableció cuatro clases fundamentales de tamaño de partículas: arcilla (0-0,002 mm), limo (0,002-0,02 mm), arena fina (0,02-0,2 mm) y arena gruesa (0,2-2 mm) (ISSS, 1929).

Posteriormente, autores de diferentes nacionalidades simplificaron dicho esquema, agrupando las dos fracciones de mayor tamaño, arena fina y arena gruesa, en una única clase, arena (0,02-2 mm). En este trabajo nos referiremos, a partir de ahora, al esquema completo como IS y a su simplificación como IS-S. En la actualidad, el Sistema Internacional es utilizado por los edafólogos en países como Australia, Japón, China o España (Nemes y Rawls, 2006; Richer de Forges *et al.*, 2008).

El esquema utilizado por el USDA tiene su origen en la división establecida por T.B. Osborne en 1887, quien utilizó unos límites de tamaños de partícula arbitrarios (Blott y Pye, 2012). Los responsables del USDA fueron modificando posteriormente los límites iniciales para hacer comparables sus datos texturales con los del IS. Así, en 1938, se cambió el límite entre la arcilla y el limo (de 0,005 a 0,002 mm) y se agregó en los informes un tamizado adicional a 0,2 mm y una medición con pipeta a 0,02 mm (Knight, 1938). En la misma línea, en 1947 se desplazó el límite superior de la arena de 1 mm a 2 mm (Soil Survey Staff, 1951). El esquema del USDA se usa actualmente de forma muy generalizada en muchos países fuera de EE. UU., con los valores de 0,002, 0,05 y 2 mm como límites superiores de las fracciones de arcilla, limo y arena, respectivamente.

La existencia de diferentes esquemas de clasificación dificulta considerablemente el intercambio y la utilización de la información edáfica, a lo que se une la confusión que supone el uso de un mismo término para referirse a rangos de tamaño de partículas diferentes. Se han realizado esfuerzos para solucionar este problema a través del desarrollo de metodologías que permiten la conversión de las fracciones texturales entre esquemas de clasificación. Gracias a estas metodologías se puede avanzar en aspectos tales como el uso de las funciones de edafotransferencia (PTF) a escala internacional, dado que las fracciones texturales suelen ser variables de entrada frecuentes en este tipo de funciones (Nemes y Rawls, 2006); la creación de bases de datos de suelos con información procedente de diferentes países (Nemes *et al.*, 1999); la comparación entre distintos sistemas de clasificación edáfica (Hughes *et al.*, 2017); o cualquier iniciativa global que proporcione información del suelo a nivel mundial.

La mayoría de las PTF publicadas utilizan, entre sus variables de entrada, las fracciones texturales USDA (Nemes y Rawls, 2006). Estas funciones no podrán ser aplicadas, por tanto, en el territorio de aquellos países que utilicen el IS como esquema de clasificación, a menos que dispongan de un modelo que permita la conversión de sus fracciones texturales al esquema del USDA. Por otro lado, a pesar de que la evaluación de la textura de

una muestra de suelo es un análisis que se realiza de forma rutinaria, los laboratorios suelen limitarse a proporcionar únicamente los porcentajes de arena, limo y arcilla. Si se pudiera contar con la información de un mayor número de clases de tamaños, obtener las equivalencias entre esquemas de clasificación sería más sencillo, incluso inmediato en ocasiones.

El objetivo de esta parte del trabajo es la evaluación y comparación del rendimiento de los diferentes modelos publicados para estimar las fracciones texturales USDA a partir de las tres fracciones texturales básicas en el IS-S. Para ello utilizaremos los datos procedentes de más de 270 000 horizontes de suelos, que contienen, además de las fracciones texturales básicas USDA, los valores de las dos subfracciones del limo: la fracción de limo fino (0,002-0,02 mm), coincidente con la fracción de limo en el IS, y la fracción de limo grueso (0,02-0,05 mm), incremento que experimenta la fracción de limo cuando se convierte del IS al esquema del USDA (véase la Figura 3.1).

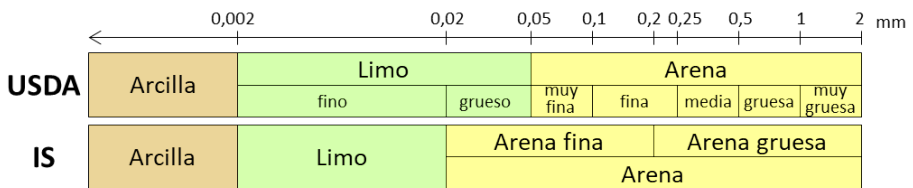


Figura 3.1. Límites del tamaño de partículas utilizados en el esquema de clasificación USDA y en el Sistema Internacional para las distintas fracciones y subfracciones definidas en ellos.

3.2 MATERIALES

3.2.1 Datos de entrada

Los datos utilizados en este trabajo provienen de la *NCSS Soil Characterization Database* (NCSS, 2017), la misma base de datos usada en el Capítulo 2. Tras realizar un proceso de filtrado similar al expuesto en la sección 2.2.1, hemos dispuesto para los cálculos de un total de 272 360 registros. Lógicamente, en este caso hemos prescindido de los registros que carecían de la información relativa a las fracciones de limo fino y de limo grueso.

3.2.2 Modelos evaluados

Hemos encontrado en la literatura cinco procedimientos para estimar la fracción de limo USDA (o la fracción de arena USDA) a partir de la información textural básica en el IS-S: el

método de interpolación logarítmico lineal, la fórmula de regresión de Minasny-McBratney-Bristow, el método de interpolación de Shirazi-Boersma-Johnson, la fórmula de regresión de Minasny-McBratney y la fórmula de regresión de Padarian-Minasny-McBratney.

Recordemos que, salvo indicación expresa en otro sentido (p. ej., en las representaciones gráficas), se entenderá que las fracciones de arena d , limo t y arcilla y son números comprendidos entre 0 y 1 (ambos incluidos). Ello nos ha obligado a transformar los valores numéricos de los parámetros de ajuste de las tres fórmulas de regresión citadas, pues sus autores las expresaron en términos de fracciones porcentuales.

Para diferenciar entre los dos esquemas de clasificación hemos añadido el subíndice l a las fracciones texturales en el IS-S. Así, t y d serán, respectivamente, las fracciones de limo y arena según el criterio USDA, y t_l y d_l los homónimos en el IS-S. La fracción de arcilla no precisa subíndice, pues coincide en ambos esquemas de clasificación.

En la Figura 3.2 hemos representado, en el triángulo de textura construido según los criterios del IS-S, las predicciones que proporcionan los cinco modelos evaluados. Hemos señalado en negro y etiquetado como “no válido” aquellas zonas del triángulo de textura donde los modelos proporcionan valores sin sentido físico, esto es, valores de la fracción de limo USDA inferiores a la fracción de limo en el IS o valores superiores a la suma de las fracciones de limo y arena en el IS-S (véase la Figura 3.1); es decir, proporcionan valores que no cumplen la siguiente condición:

$$t_l \leq t \leq t_l + d_l \quad (3.1)$$

3.2.2.1 Método de interpolación logarítmico-lineal (LLI)

La interpolación logarítmico-lineal, es decir, la interpolación lineal en términos del logaritmo del diámetro de las partículas, se ha utilizado con frecuencia para estimar las fracciones texturales desconocidas a partir de la distribución acumulada del tamaño de partículas (p. ej., Tietje y Hennings, 1996; Nemes *et al.*, 1999; Miao *et al.*, 2008; Shein, 2009; Padarian *et al.*, 2012; Shang, 2013). De hecho, es el procedimiento que utiliza el paquete de R “soiltexture” (Moeys, 2018) para adaptar los datos de textura de un sistema de clasificación a otro. Para el caso concreto que nos ocupa, el método ha sido utilizado por Minasny y McBratney (2001).

Como se muestra en el Apéndice 3A, la estimación de la fracción de limo USDA se puede obtener con la siguiente expresión:

$$t = t_I + 0,19897 \cdot d_I \quad (3.2)$$

La interpolación logarítmico-lineal es una interpolación de carácter monótono, de ahí que la fórmula anterior proporcione valores con sentido físico para todos los puntos del triángulo de textura (véase la Figura 3.2a). Nos referiremos a este modelo como LLI.

3.2.2.2 Fórmula de regresión de Minasny-McBratney-Bristow (MMB)

En su trabajo sobre PTF para curvas de retención de agua, Minasny *et al.* (1999) desarrollaron una ecuación polinómica para estimar la fracción de limo grueso USDA por medio de una regresión mínimo-cuadrática. El ajuste se realizó con la información granulométrica de 161 muestras de suelos australianos, 146 de ellas aportadas por Geeves *et al.* (1995) y 15 por Smettem y Gregory (1996).

Minasny *et al.* (1999) calcularon la fracción de limo USDA añadiendo a la fracción de limo en el IS el valor de la fracción de limo grueso USDA proporcionado por su ecuación. Como se muestra en el Apéndice 3B, su procedimiento de dos pasos se puede sintetizar con la siguiente fórmula:

$$t = -0,030607 + 1,3352 \cdot t_I + 0,1127 \cdot d_I + 0,18 \cdot t_I^2 + 0,36 \cdot t_I \cdot d_I - 0,11 \cdot d_I^2 \quad (3.3)$$

Nos referiremos a este modelo como MMB y, como puede apreciarse en la Figura 3.2b, proporciona valores sin sentido físico para un 34,9 % del área del triángulo de textura. Esta fórmula ha sido utilizada por Minasny y McBratney (2000).

3.2.2.3 Método de interpolación de Shirazi-Boersma-Johnson (SBJ)

Shirazi *et al.* (1988) postularon que la distribución acumulada del tamaño de partículas para la tierra fina de una muestra de suelo puede ser aproximada mediante tres segmentos de función de distribución logarítmico-normal: uno para la fracción de arena, otro para la fracción de limo y un tercero para la fracción de arcilla. Basándose en esta teoría, Shirazi *et al.* (2001) describieron un método para estimar la fracción de limo USDA, que se puede sintetizar mediante la siguiente función de interpolación:

$$t = t_l + \Phi[0,739973 + 0,801030 \cdot \Phi^{-1}(1 - d_l)] - 1 + d_l \quad (3.4)$$

donde Φ representa a la función de distribución normal tipificada y Φ^{-1} a su inversa (véase el Apéndice 3C).

Al igual que la interpolación logarítmico-lineal, este método de interpolación tiene carácter monótono, de modo que la fórmula anterior también proporciona valores con sentido físico para todos los puntos del triángulo de textura (véase la Figura 3.2c). Nos referiremos a este modelo como SBJ.

3.2.2.4 Fórmula de regresión de Minasny-McBratney (MM)

Para la estimación de la fracción de limo USDA, Minasny y McBratney (2001) presentaron un modelo polinómico segmentado derivado de un análisis de regresión mínimo-cuadrático. Para la calibración, los autores utilizaron 1210 registros procedentes de varias fuentes: los datos australianos aportados por Geeves *et al.* (1995) y Smettem y Gregory (1996) (véase la sección 3.2.2.2), la *Unaturated Soil Hydraulic Database* UNSODA (Leij *et al.*, 1996), el *Grenoble Catalogue of Soils* GRIZZLY (Haverkamp *et al.*, 1997) y los datos del USDA *Natural Resources Conservation Service* (NRCS) *Soil Survey Laboratory* (USDA-NRCS, 1997). La fórmula resultante se puede expresar como:

$$t = \begin{cases} t_0 & \text{si } t_0 \geq 0 \\ 0,8289 \cdot t_l + 0,0198 \cdot d_l & \text{si } t_0 < 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

donde t_0 viene dada por

$$t_0 = -0,183914 + 2,0971 \cdot t_l + 0,6726 \cdot d_l - 1,42 \cdot t_l^2 - 0,49 \cdot d_l^2 \quad (3.6)$$

Minasny y McBratney (2001) pusieron a prueba la expresión anterior con otros 400 registros de la misma procedencia (validación interna), obteniendo un error medio (ME) de 0,39 % y una raíz del error medio cuadrático (RMSE) de 8,01 %.

Nos referiremos a este modelo como MM y, como puede apreciarse en la Figura 3.2d, proporciona valores sin sentido físico para un 19,8 % del área del triángulo de textura. Obsérvese que la región del triángulo donde la ecuación (3.5) sí proporciona valores con sentido físico está constituida por dos zonas inconexas, correspondiendo la mayor a su segmento superior ($t_0 \geq 0$) y la menor a su segmento inferior ($t_0 < 0$). Este modelo ha sido utilizado por Minasny y McBratney (2007) y por Sakaguchi *et al.* (2014).

3.2.2.5 Fórmula de regresión de Padarian-Minasny-McBratney (PMM)

Para mejorar el rendimiento del modelo MM, Padarian *et al.* (2012) realizaron un análisis de regresión simbólica aplicando una técnica de programación genética. Para la calibración, los autores utilizaron 52 432 registros de la *National Soil Characterization Database* del USDA/NRCS (Soil Survey Staff, 1995) y la fórmula resultante fue

$$t = 2,26 \cdot t_1 + \frac{5,55 \cdot t_1 + 151,3 \cdot t_1^2}{0,9966 - 123,6 \cdot t_1 - 134,9 \cdot t_1^2} \quad (3.7)$$

Padarian *et al.* (2012) pusieron a prueba su fórmula con otros 52 432 registros de la misma base de datos (validación interna), obteniendo un coeficiente R^2 de 82 %.

Nos referiremos a este modelo como PMM y, como puede apreciarse en la Figura 3.2e, proporciona valores sin sentido físico para un 6,3 % del área del triángulo de textura. Se puede comprobar que esta Figura 3.2e es, en esencia, equivalente a la Figura 2a de Padarian *et al.* (2012). El modelo en cuestión ha sido utilizado por Hughes *et al.* (2017).

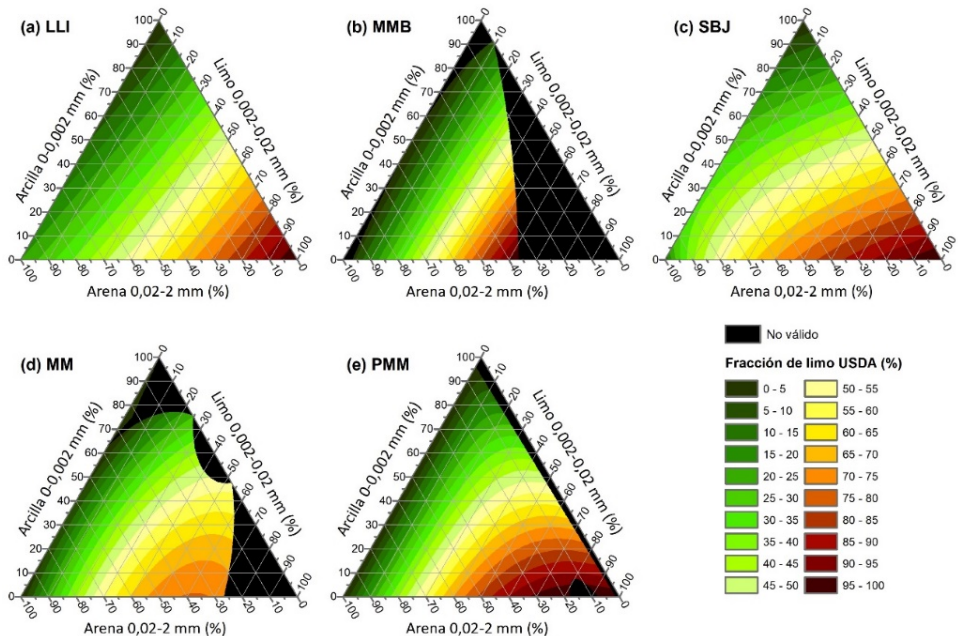


Figura 3.2. Modelos para la estimación de la fracción de limo USDA: (a) interpolación logarítmico lineal, (b) regresión de Minasny-McBratney-Bristow, (c) interpolación de Shirazi-Boersma-Johnson, (d) regresión de Minasny-McBratney y (e) regresión de Padarian-Minasny-McBratney.

3.3 METODOLOGÍA

3.3.1 Estadística descriptiva

Nos remitimos a la sección 2.3.1 para la descripción de la metodología aplicada en este capítulo, con las necesarias adaptaciones al nuevo objetivo. En primer lugar, el triángulo de textura se construye en esta ocasión según el esquema de clasificación del IS-S. En segundo lugar, la variable objetivo se modifica, de modo que toda referencia a la fracción de AMF se sustituye por la fracción de limo USDA. Por último, las variables explicativas también cambian, de modo que las referencias a la fracción de limo y a la fracción de arena en el esquema USDA se sustituyen por las fracciones homónimas según el IS-S.

3.3.2 Evaluación de los modelos

Un análisis preliminar de la eficiencia de los cinco modelos basado en el coeficiente R^2 arroja los siguientes resultados: 49,9 % con el método LLI, 69,9 % con la fórmula MMB, 52,6 % con el método SBJ, 80,8 % con la fórmula MM y 81,1 % con la fórmula PMM. Si bien es verdad que dichos guarismos sirven para hacernos una idea general del rendimiento de los distintos modelos, no es menos cierto que no nos permiten identificar las áreas del triángulo de textura en que cada modelo proporciona predicciones que puedan considerarse o no aceptables. Así, hemos aplicado a la fracción de limo USDA el procedimiento descrito en la sección 2.3.2, lo que nos permite establecer, para cada uno de los modelos objeto de estudio, una región dentro del triángulo de textura donde el modelo en cuestión será aceptable y otra región en la que no lo será.

3.4 RESULTADOS

3.4.1 Estadística descriptiva

3.4.1.1 Regresión polinómica mínimo-cuadrática

La Tabla 3.1 muestra cómo el valor del coeficiente de determinación, R^2 , aumenta con el grado del polinomio ajustado, n , aunque comienza a estabilizarse a partir del polinomio de segundo grado.

Tabla 3.1. Coeficientes de determinación para la regresión polinómica mínimo-cuadrática en función del grado del polinomio.

n	p	R^2 (%)
1	3	76,0
2	6	81,8
3	10	82,1
4	15	82,1

Leyenda: n es el grado del polinomio; p es el número de parámetros del polinomio y R^2 es el coeficiente de determinación.

Por otra parte, hemos constatado que, una vez ajustado un polinomio de grado dado, algunos de los términos que lo componen apenas tienen relevancia, un hecho que nos ha inducido a rehacer los ajustes disminuyendo *a priori* el número de parámetros considerados. Así, hemos obtenido un polinomio de segundo grado, con un coeficiente de determinación de 81,6 %, que sólo consta de 4 parámetros, a saber

$$t = t_l + 0,4095 \cdot d_l + 0,9843 \cdot d_l \cdot t_l - 0,4232 \cdot d_l^2 \quad (3.8)$$

Esta ecuación cumple la lógica condición de que, si la fracción de arena en el IS-S es igual a cero, la fracción de limo USDA será igual a la fracción de limo en el IS.

3.4.1.2 Subdivisión del triángulo de textura

La Tabla 3.2 muestra cómo, a medida que aumenta el número de parámetros q , el coeficiente de determinación lógicamente crece.

Tabla 3.2. Valores del criterio de información de Akaike para la regresión mínimo-cuadrática segmentada en función de los diferentes niveles de subdivisión del triángulo de textura.

r	4^r	q	R^2 (%)	$AIC \times 10^{-6}$
1	4	4		
2	16	16	68,3	-1,17146
3	64	64	78,1	-1,27249
4	256	255	81,2	-1,31269
5	1024	996	82,1	-1,32444
6	4096	3732	82,4	-1,32422

Leyenda: r es el nivel de subdivisión del triángulo de textura; 4^r es el número de triángulos generados; q es el número de parámetros ajustados (triángulos no vacíos); R^2 es el coeficiente de determinación y AIC es el valor del criterio de información de Akaike.

La minimización del criterio de información de Akaike nos permite fijar el grado de subdivisión del triángulo de textura que vamos a utilizar para los cálculos posteriores, en este caso r igual a 5, que equivale a establecer 1024 triángulos equiláteros del mismo tamaño. La fusión de algunos de estos triángulos, al objeto de lograr teselas con 3 o más registros

cada una, ha dado lugar, como se aprecia en la Figura 3.3, a 913 teselas, todas ellas triángulos equiláteros pero de diferentes tamaños, a saber, 892 de lado 3,125 %, 17 de lado 6,25 %, y 4 de lado 12,5 %.

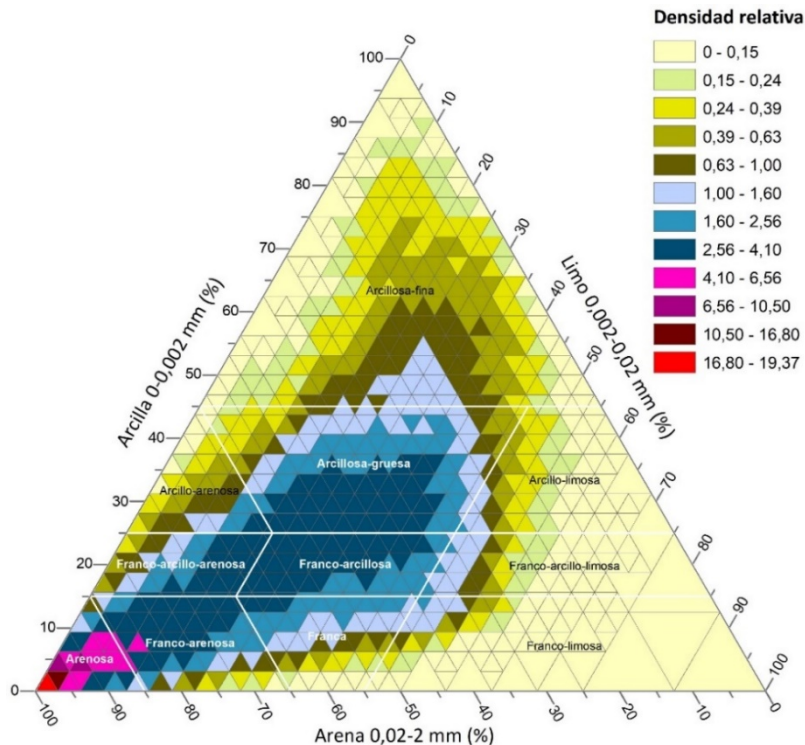


Figura 3.3. Densidad relativa de registros, expresada como la relación entre la densidad de los registros en cada tesela y la densidad de los registros en todo el triángulo de textura.

La Figura 3.3 muestra, así mismo, la densidad relativa de registros en dichas teselas, esto es, la razón de la densidad de registros en cada una de las teselas entre la densidad de registros en el conjunto del triángulo de textura. Para ayudar a la descripción, se han superpuesto los límites de las clases texturales propuestas por Tommerup (1934).

Así, los valores más altos de densidad relativa se encuentran todos dentro de la clase textural arenosa, con un máximo absoluto de 19,4 en la tesela de la esquina inferior izquierda del triángulo de textura, cuyo centro tiene por coordenadas 98,3 % de arena, 0,8 % de limo y 0,9 % de arcilla. A partir de este valor máximo, la densidad relativa disminuye a medida que aumentan los contenidos de arcilla y limo. Las tres clases limosas son las menos representadas, especialmente la clase franco-limosa, con la mayoría de sus teselas con una densidad muy por debajo de la media. De hecho, es notable la diferencia entre

estas clases limosas y la clase arenosa; las tres primeras representan casi el 30 % de la superficie del triángulo de textura y contienen el 5,8 % de los registros, mientras que la clase arenosa sólo ocupa el 2,2 % de la superficie del triángulo, pero contiene casi el doble de registros, 11,2 %. La clase textural más grande, la clase arcillosa-fina, ocupa el 30,3 % del triángulo de textura y presenta, en su mayoría, densidades por debajo de la media (contiene el 11,1 % de los registros). El resto de las clases texturales generalmente tienen densidades superiores a la media, siendo las texturas francas las más representadas.

Llama la atención la diferencia que existe entre la Figura 3.3 y la Figura 2.2, en ambos casos representación de la dispersión de los registros en el triángulo de textura. En la Figura 2.2, con el triángulo de textura construido según los criterios USDA, los registros tienden a estar más repartidos por todo el triángulo; mientras que, cuando se utilizan los criterios del IS-S, los registros se concentran en la clase arenosa. Esta diferencia es lógica y esperable, debido a que, para una misma muestra, el porcentaje de la fracción de arena en el IS-S siempre será mayor o igual que el porcentaje de la fracción de arena USDA.

3.4.1.3 Prueba de normalidad

La aplicación de la prueba de Shapiro-Wilk a los datos de limo USDA de cada tesela llevó al rechazo de la hipótesis nula, con un nivel de significación del 0,05, en el 72,6 % de las teselas. Tras aplicar las transformaciones de variable más habituales en estos casos (véase sección 2.4.1.3), los resultados no mejoraron de forma sustancial y arrojaron un rechazo del 71,1 % para la transformación logarítmica, del 72,1 % para la transformación raíz cuadrada y del 76,8 % para la transformación arcoseno.

3.4.1.4 Medidas estadísticas condicionales

La Figura 3.4 y la Figura 3.5 muestran los valores condicionales de las medidas estadísticas objeto de interés. Estos valores han sido generados mediante una interpolación ponderada con el inverso de la distancia (IDW), utilizando para el coeficiente de ponderación la función $f(N_i) = 1$ y el parámetro $u = 3$, seleccionados por su mejor rendimiento en términos mínimo-cuadráticos.

La Figura 3.4a muestra cómo la media condicional de la fracción de limo USDA presenta una lógica dependencia de la fracción de limo en el IS, especialmente para valores de esta última por debajo del 20 %. La influencia de las fracciones de arcilla y arena en el IS-S aumenta conforme nos acercamos a las clases limosas y el valor de la fracción de limo

USDA crece. Una vez que llegamos a las tres clases limosas, la dependencia de la fracción de arcilla es más evidente. La interpolación IDW ha proporcionado valores de la media condicional sin sentido físico para un 2,3 % del área del triángulo de textura, coincidiendo con zonas donde la densidad de registros es menor.

La desviación típica condicional de la fracción de limo USDA presenta una alta variabilidad, tal y como se puede observar en la Figura 3.4b, lo cual indica un claro caso de ausencia de homocedasticidad. Según el criterio de Bulmer (1979), en la Figura 3.4c se puede comprobar que la distribución condicional de la fracción de limo USDA es asimétrica en algo más de la mitad del área del triángulo de textura (sólo es aproximadamente simétrica en el 43,7 %). En estas circunstancias de heterocedasticidad y de asimetría, el uso de la mediana será, por tanto, más adecuado que el de la media para describir la tendencia central de la distribución (Hao y Naiman, 2007, cap. 3).

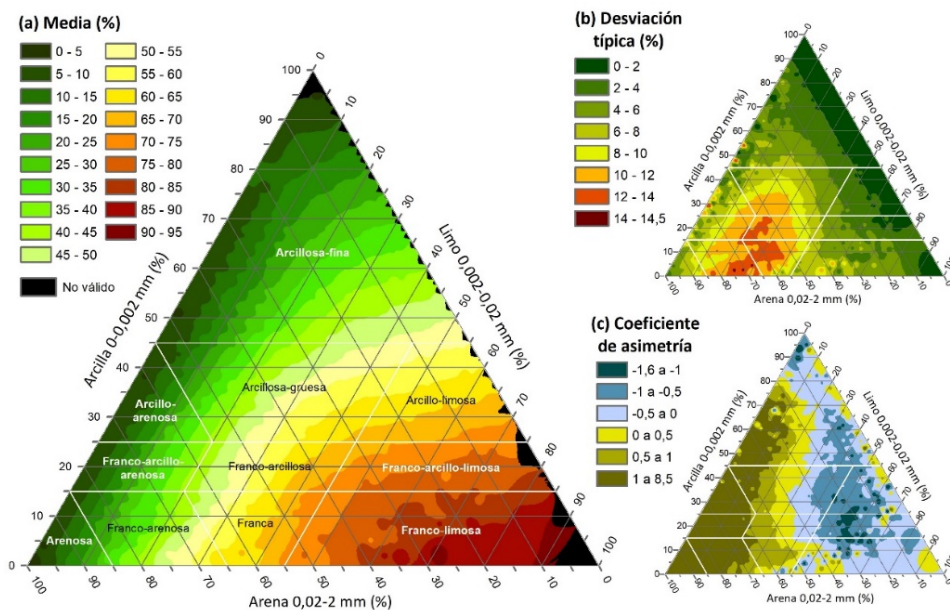


Figura 3.4. Valores interpolados de las principales medidas condicionales de la fracción de limo USDA.

El primer cuartil, la mediana y el tercer cuartil condicionales de la fracción de limo USDA (Figura 3.5) siguen una tendencia similar a la media condicional (véase la Figura 3.4a). Es decir, una dependencia casi lineal de la fracción de limo en el IS para valores de esta por debajo del 20 %, aumentando después, progresivamente, la influencia de la fracción de arcilla, siendo esta influencia mayor en las tres clases texturales limosas. En cada uno de

estos gráficos también se puede comprobar que las interpolaciones proporcionan valores sin sentido físico para un 3,6 %, un 2,3 % y un 3,8 % del área del triángulo de textura, respectivamente.

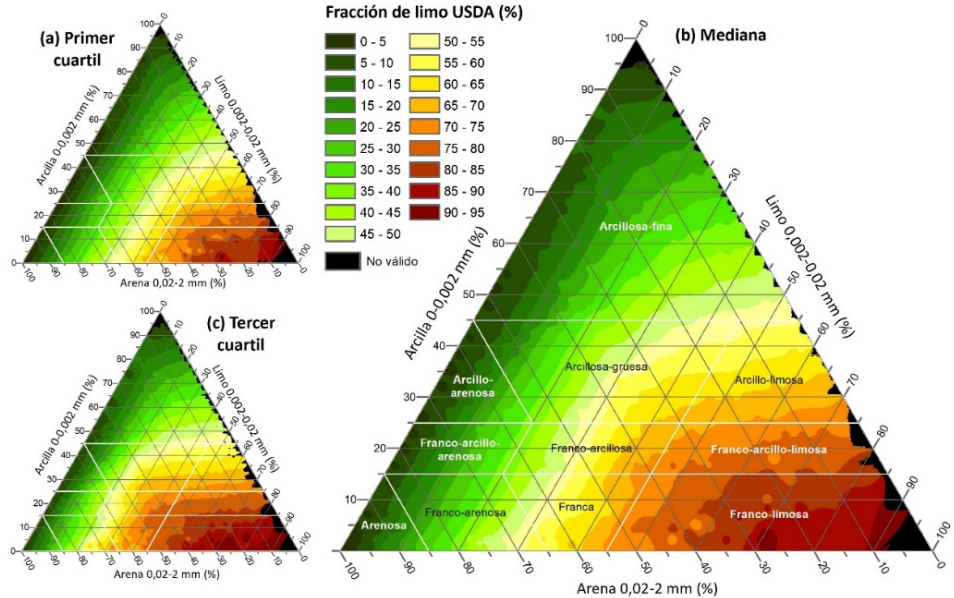


Figura 3.5. Valores interpolados de los cuartiles condicionales de la fracción de limo USDA.

3.4.2 Evaluación de los modelos

El modelo LLI ha resultado aceptable en el 15,5 % del área del triángulo de textura (Figura 3.6a), que contiene el 18,7 % de los registros. Esta región corresponde, a grandes rasgos, a valores de la fracción de limo en el IS entre el 10 % y el 20 %, con valores de la fracción de arena en el IS-S superiores al 25%.

El modelo MMB es aceptable en el 26,7 % del triángulo de textura (Figura 3.6b), principalmente en las clases texturales franca, franco-arcillosa y parte de las clases arcillosa-gruesa y arcillosa-fina. Esta región de aceptación incluye el 39,3 % de los registros.

Con respecto al modelo SBJ, la Figura 3.6c muestra que su región de aceptación ocupa un poco más de la mitad del triángulo de textura (52,6 %) y que se extiende hacia la parte más limosa del triángulo, donde el número de registros es bajo. La región donde el modelo no es aceptable corresponde a valores de la fracción de limo en el IS menores del 20 % y

valores de la fracción de arena en el IS-S mayores del 20 %, además de algunas áreas dispersas en las tres clases limosas. La región de aceptación incluye el 48,9 % de los registros.

La región de aceptación del modelo MM abarca el 54,3 % del área del triángulo de textura y contiene el 89,1 % de los registros (Figura 3.6d). Las clases en las que el modelo no funciona correctamente son las tres clases limosas, parte de la clase arcillosa-fina, cuando la fracción de arena en el IS-S es inferior al 10 % o la fracción de arcilla es superior al 70 %, y parte de las clases arcillosa-gruesa y arcillo-arenosa, cuando la fracción de limo en el IS es inferior al 10 %.

El modelo con una región de aceptación mayor es el PPM, que ocupa el 68,2 % del triángulo de textura e incluye el 95,1 % de los registros (Figura 3.6e). Las principales zonas en las que el modelo no es aceptable pertenecen a las tres clases limosas, cuando la fracción de arena en el IS-S es inferior al 20 % o la fracción de arcilla es inferior al 10 %, así como a una pequeña parte de la clase arcillosa-fina, cuando la fracción de arcilla es superior al 80 %.

Existen áreas en el triángulo de textura donde no ha sido posible realizar la evaluación de los modelos, etiquetadas en la Figura 3.6 como “no evaluable”. Se debe a que en esos puntos del triángulo los valores interpolados del primer cuartil y del tercer cuartil condicionales de la fracción de limo USDA no tienen sentido físico (áreas “no válido” de la Figura 3.5a y Figura 3.5c). Por otro lado, las zonas en las que el modelo evaluado proporciona valores sin sentido físico se han incluido, directamente, en la región en la que el modelo no es aceptable.

Hemos superpuesto las regiones de aceptación de los cinco modelos, produciéndose, obviamente, solapes entre ellas. En aquellos puntos del triángulo de textura en los que más de un modelo resulta aceptable, hemos dado preferencia al modelo que proporciona el valor más cercano a la mediana. La Figura 3.6f muestra el resultado de la aplicación de este criterio, donde se aprecia que las regiones de preferencia están muy entremezcladas. Así, el modelo con la región de preferencia mayor es PMM, un 40,3 % del triángulo de textura, con el 62,6 % de los registros ubicados en ella. El siguiente es el modelo MM, preferente en el 17,5 % del triángulo y con el 19% de los registros. La región de preferencia del modelo SBJ ocupa el 21,9 % del triángulo e incluye el 8,6 % de los registros. El modelo LLI es preferente en el 6,4 % del triángulo, donde se localiza el 4,7 % de los registros. El modelo con la menor región de preferencia es MMB, un 3,8 % del triángulo, que incluye el 3,4 % de los registros.

En el 4,9 % del triángulo de textura ninguno de los cinco modelos evaluados proporciona una estimación aceptable y el análisis no se puede realizar en el 5,2 % del triángulo (zona “no evaluable”). Estas dos áreas apenas contienen registros, entre las dos sólo incluyen el 1,7 %.

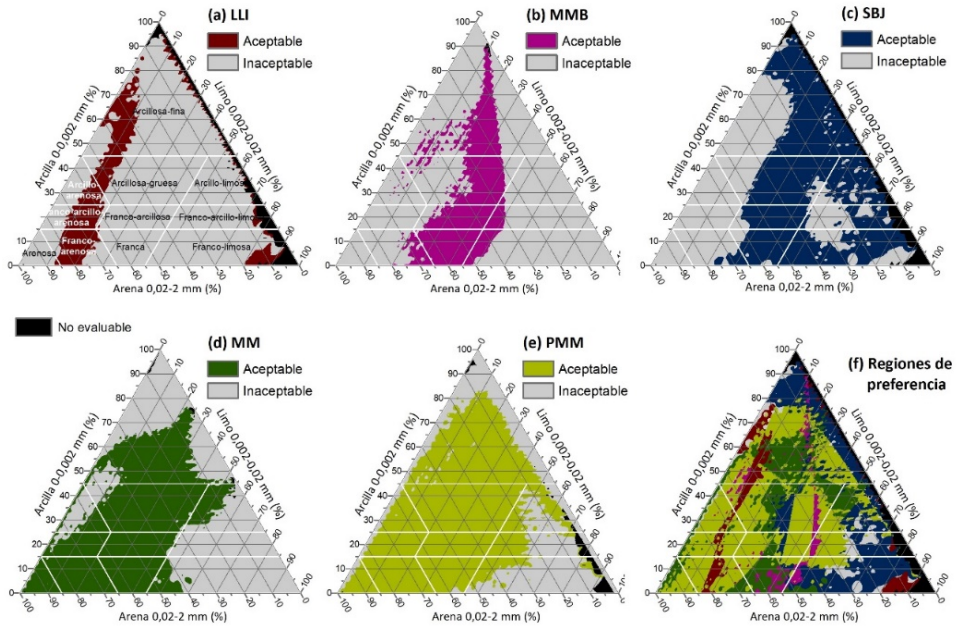


Figura 3.6. Regiones de aceptación de los cinco modelos evaluados: (a) interpolación logarítmico lineal, (b) regresión de Minasny-McBratney-Bristow, (c) interpolación de Shirazi-Boersma-Johnson, (d) regresión de Minasny-McBratney y (e) regresión de Padarian-Minasny-McBratney. (f) Regiones de preferencia de los modelos; los colores utilizados son los mismos que se han tomado como leyenda para las regiones de aceptación en cada uno de los modelos. Se incluye también el área “no evaluable”, en la que no es posible el análisis al ser la interpolación IDW “no válida”.

3.5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Hasta donde sabemos, solamente se han publicado dos trabajos que incluyan comparaciones del rendimiento de distintos procedimientos de paso del Sistema Internacional simplificado de clasificación textural al sistema de clasificación textural del USDA: Minasny y McBratney (2001) y Padarian *et al.* (2012).

Así, Minasny y McBratney (2001) compararon las estimaciones de su modelo MM con el modelo LLI en términos del ME y de la RMSE. Para ello se apoyaron, primero, en los 1210 registros utilizados en la calibración del modelo MM y, después, en otros 400 registros de

la misma procedencia. Minasny y McBratney (2001) concluyeron que el modelo MM proporciona estimaciones claramente mejores que el modelo LLI, coincidiendo, por tanto, con lo que se desprende de nuestros resultados.

Por su parte, Padarian *et al.* (2012) desarrollaron el modelo PMM con el propósito de mejorar las estimaciones proporcionadas por el modelo MM. A tal fin, los mencionados autores introdujeron dos mejoras, en principio significativas, en la fase de calibración de su modelo. Por un lado, utilizaron un número muchísimo mayor de registros, 52 432 frente a 1210; por otro, emplearon una técnica de ajuste mucho más versátil, regresión simbólica vía programación genética frente a regresión polinómica mínimo-cuadrática. La comparación, realizada en términos del coeficiente R^2 y del RMSE, se basó, en primer lugar, en un conjunto de 758 registros procedentes de Australia y, en segundo lugar, en un conjunto de 55 282 registros del *International Geosphere-Biosphere Program Data and Information System* (IGBP-DIS) (Tempel *et al.*, 1996). Sin embargo, los resultados no fueron los esperados, pues los rendimientos de ambos modelos resultaron ser prácticamente idénticos.

Nuestro análisis preliminar (sección 3.3.2), llevado a cabo en términos del coeficiente R^2 , situó a los modelos MM y PMM prácticamente empatados en cabeza, a los modelos LLI y SBJ en la cola y al modelo MMB en una posición intermedia. Aunque de carácter más general, por haber comparado no dos, sino cinco modelos a un tiempo, con datos procedentes de 272 360 registros, estos resultados son consistentes con los de la comparación de Padarian *et al.* (2012) recién aludida.

Ahora bien, corresponde al grueso de nuestra comparación, basada en el valor alcanzado por los cuartiles condicionales, el haber enriquecido y matizado en gran medida los resultados del análisis preliminar. Por un lado, nos ha permitido determinar las regiones de aceptación, esto es, las áreas del triángulo de textura en las que cada modelo proporciona predicciones que consideramos aceptables. Por otro, ha posibilitado la delimitación de las regiones de preferencia, esto es, las áreas del triángulo de textura en las que las predicciones aceptables proporcionadas por un modelo en concreto serían más precisas que las del resto de modelos. Así, por ejemplo, es gracias a los cuartiles condicionales que podemos concluir que el modelo PMM es claramente superior al modelo MM.

Los modelos LLI y MMB son, por este orden, los modelos que han ofrecido los resultados más pobres. Si bien no tenemos constancia de la publicación de trabajos que hayan comparado el rendimiento del modelo MMB con el de otros modelos, lo cierto es que Minasny

y McBratney (2001) desarrollaron el modelo MM con el objetivo declarado de superar la precisión del modelo MMB. A la vista está lo acertado de su propósito, aunque solo sea por el hecho de que este último modelo proporciona valores de limo USDA sin sentido físico en más de un tercio de la superficie del triángulo de textura.

La interpolación logarítmico-lineal segmentada ha sido empleada con cierta frecuencia como método general de interpolación en la distribución acumulada del tamaño de partículas de las muestras de suelo. Sin embargo, tras comparar la precisión de dicho método de interpolación con la de otros métodos generales de estimación, Nemes *et al.* (1999) y Shang (2013) desaconsejaron su utilización. Eso mismo cabe concluir, a la vista de los resultados de nuestro análisis, en el caso que nos ocupa: el modelo LLI ha demostrado ser poco preciso a la hora de estimar la fracción de limo USDA cuando sólo se dispone de las fracciones de arcilla, limo y arena en el IS-S. Con todo, esta circunstancia no tiene por qué darse en los demás casos. Como afirma Moeys (2018), la interpolación logarítmico-lineal es el procedimiento de interpolación más sencillo que existe y su precisión aumenta a medida que disminuye la distancia entre los nodos implicados, esto es, conforme se reduce la diferencia entre los logaritmos de los dos diámetros en que se apoya cada interpolación. Así, Miao *et al.* (2008) consiguieron resultados satisfactorios al estimar la fracción de limo grueso USDA (0,02-0,05 mm) a partir de la fracción de arena fina en el IS (0,02-0,2 mm), mientras que Shein (2009) obtuvo resultados aceptables al estimar la fracción de partículas comprendida entre los diámetros de 0,001 y 0,002 mm a partir de la fracción de limo fino de la clasificación de Kachinsky (0,001-0,005 mm). Es más, Tietje y Hennings (1996) estimaron la fracción de limo grueso USDA (0,02-0,05 mm) a partir de la fracción de limo grueso de la clasificación utilizada en Alemania (0,02-0,063 mm) sin cuestionamiento alguno, mientras que Padarian *et al.* (2012) hicieron otro tanto para estimar la fracción comprendida entre los diámetros de 0,1 y 0,2 mm a partir de la fracción de arena fina USDA (0,1-0,25 mm). En definitiva, el mal desempeño del modelo LLI se debe, fundamentalmente, al hecho de que la diferencia entre los logaritmos de los diámetros que definen la fracción de arena en el IS-S (0,02-2 mm) es demasiado amplia en comparación, por ejemplo, con la diferencia entre los logaritmos de los diámetros que definen la mencionada fracción de arena fina USDA (0,1-0,25 mm).

Tampoco tenemos constancia de que la precisión del modelo SBJ haya sido anteriormente comparada con la de otros modelos. Nuestro análisis basado en los cuartiles ha permitido sacar a la luz dos virtudes de este modelo. Como se puede apreciar en la Figura 3.6, su región de aceptación y la región de aceptación del modelo PMM se complementan muy

bien, hasta el punto de que, si se superpusieran ambas regiones, solo quedaría por cubrir un 14,2 % de la superficie del triángulo de textura, incluido el 5,2 % “no evaluable”. Por otro lado, sucede que su región de preferencia cubre una parte nada desdeñable del triángulo de textura, a saber, el 21,9 % de su área, aunque esta solo represente al 8,6 % de los registros. Sin embargo, el modelo en cuestión también presenta dos inconvenientes que lo convierten, a nuestro juicio, en poco recomendable más allá de su región de preferencia. Primero, la teoría de Shirazi *et al.* (1988) en que se fundamenta el modelo SBJ fue severamente cuestionada desde un punto de vista conceptual por Buchan (1989) y por Yaalon (1989). Segundo, su formulación matemática resulta incómoda de usar, dado que la función de distribución normal tipificada y su inversa no forman parte de las denominadas funciones matemáticas elementales; de hecho, Shirazi *et al.* (1988) plasmaron su método de interpolación en un nomograma.

Al comparar el rendimiento de los modelos MM y PMM con registros del IGBP-DIS, Padarian *et al.* (2012) no hallaron diferencias en el valor de sus respectivos coeficientes R^2 , a saber, un 81 %, en ambos casos. Nuestros cálculos, basados en los registros de la NCSS *Soil Characterization Database*, han proporcionado un valor del coeficiente R^2 de 80,8 % para el modelo MM y de 81,1 % para el modelo PMM. Esta notable coincidencia entre nuestros resultados y los de Padarian *et al.* (2012) tiene una sencilla explicación: la mayoría de los registros del IGBP-DIS proceden de la NCSS *Soil Characterization Database*.

El análisis basado en los cuartiles condicionales ha evidenciado que el modelo PMM es claramente preferible al modelo MM, tanto en términos de región de aceptación como, sobre todo, en términos de región de preferencia. Así, nos encontramos con que la región de preferencia del modelo PMM duplica holgadamente en extensión a la del modelo MM: el 40,3 % de la superficie del triángulo de textura, representando al 62,6 % de los registros, frente al 17,5 % de la superficie del triángulo de textura, representando al 19 % de los registros. Advuértase que la región de preferencia del modelo PMM representa a más de la mitad de los registros, es decir, más registros que el resto de modelos considerados en conjunto.

La estabilización del valor del coeficiente R^2 (Tabla 3.1), por mucho que aumentemos el número de parámetros de ajuste, es señal de que cualquier modelo razonable para estimar la fracción de limo USDA a partir de las fracciones texturales básicas del IS-S se topará con una cota infranqueable, a saber, el 82,1 %. El hecho de que el valor del coeficiente R^2 del modelo MM, 80,8 % según nuestros cálculos, se acerque mucho a esa cota implica que

las mejoras de ajuste que pudieran proporcionar otros modelos serían prácticamente indetectables en términos de R^2 y, por consiguiente, también en términos de RMSE. Esta es la razón de que Padarian *et al.* (2012) no se percataran de la superioridad de su modelo PMM al compararlo con el modelo MM. Lo antedicho significa que cualquier mejora de ajuste medido en términos de R^2 y RMSE pasaría por incorporar nuevas variables explicativas a la modelización, siempre que se disponga de ellas, claro está. Padarian *et al.* (2012, ec. [4]) lo consiguieron añadiendo una tercera variable explicativa: la fracción de arena fina en el IS. Otras posibles opciones serían utilizar el porcentaje de fragmentos gruesos (diámetro mayor que 2 mm) o considerar el tipo de material parental.

Cualquiera de los cinco modelos evaluados podría utilizarse en sus respectivas regiones de aceptación para estimar la fracción de limo USDA, pero nada más. La estadística inferencial nos enseña que las estimaciones puntuales tienen mucho más valor cuando vienen acompañadas de alguna medida de su incertidumbre (Peña, 2008, cap. 8; Dagnelie, 2013, cap. 9; Meeker *et al.*, 2017, cap. 1). En este sentido, si la distribución condicional del limo USDA fuera normal y homocedástica, los modelos obtenidos por regresión lineal mínimo-cuadrática, tal que la ecuación (3.8), podrían proporcionarnos intervalos de predicción condicional por mediación de la distribución t de Student. Por otra parte, si la distribución condicional del limo USDA fuera normal, aun sin llegar a ser homocedástica, estaríamos en condiciones de generar intervalos de predicción condicionales combinando la información contenida en la Figura 3.4a y la Figura 3.4b con los cuantiles de la distribución t de Student. El problema estriba en que, como se aprecia en la Figura 3.4b, la distribución condicional del limo USDA no es homocedástica ni, como se evidencia en la sección 3.4.1.3, se aproxima a una distribución normal.

A diferencia de la regresión estándar mínimo-cuadrática, la regresión cuantílica ofrece la posibilidad de obtener intervalos de predicción para la distribución condicional de la variable objetivo en caso de desviación de los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Cada uno de esos intervalos de predicción vendrían proporcionados por dos estimaciones cuantílicas diferentes (Davino *et al.*, 2014, cap. 2).

Los nomogramas de la Figura 3.5, esto es, nuestras herramientas de medición del rendimiento de los modelos, tienen su origen en una regresión cuantílica local (segmentada), de modo que pueden ser empleados para proporcionar estimaciones puntuales e intervalos de predicción. En consecuencia, cuando se trata de estimar la fracción de limo USDA,

recomendamos la adopción del valor proporcionado por la Figura 3.5b (mediana condicional) junto con el intervalo de predicción del 50 % delimitado por los valores proporcionados por la Figura 3.5a (primer cuartil condicional) y la Figura 3.5c (tercer cuartil condicional). Así, por ejemplo, si un horizonte contiene 90 % de arena, 5 % de limo y 5 % de arcilla, todos ellos en el IS-S, el valor pronosticado para la fracción de limo USDA sería 11,1 % (Figura 3.5b) y su intervalo de predicción del 50 % estaría comprendido entre 8,9 % (Figura 3.5a) y 14,7 % (Figura 3.5c).

Con todo, somos conscientes de que la utilización de los nomogramas de la Figura 3.5 puede resultar tediosa en determinadas circunstancias. Por ello, hemos desarrollado unas ecuaciones aproximadamente equivalentes a ellos recurriendo a los procedimientos de regresión cuantílica convencional, es decir, al ajuste de los parámetros de tres expresiones polinómicas, una por cada cuartil. Con ello se sacrifica parte de la precisión lograda con el ajuste local, implícito en los nomogramas, en aras de la facilidad de uso de unas ecuaciones cuyos parámetros han sido ajustados en términos globales. Estos cálculos se han realizado utilizando el paquete "quantreg" del software R (Koenker, 2020).

Así, la expresión obtenida para estimar la mediana condicional de la fracción de limo USDA es

$$t = \begin{cases} t_I + t_c & \text{si } t_c \leq d_I \\ t_I + d_I & \text{si } t_c > d_I \end{cases} \quad (3.9)$$

donde t_c es la mediana condicional de la fracción de limo grueso USDA, dada por el siguiente polinomio

$$t_c = 3,47841 \cdot d_I \cdot t_I - 2,5232 \cdot d_I \cdot t_I^2 - 2,37415 \cdot d_I^2 \cdot t_I \quad (3.10)$$

El análisis de la eficiencia de la ecuación (3.9) en términos del coeficiente R^2 arroja un valor de 81,1 %, exactamente el mismo valor que el obtenido con el modelo PMM. Pero si analizamos las regiones de preferencia de los modelos, incluyendo en esta ocasión a la ecuación (3.9), nos encontramos con que la región que le corresponde a esta ecuación es la más amplia, ocupa el 30,6 % del triángulo de textura e incluye el 45,5 % de los registros, mientras que el modelo PMM es preferente en el 20,4 % del triángulo, con el 26,2 % de los registros.

Para estimar los intervalos de predicción del 50 %, el polinomio ajustado para el caso del primer cuartil condicional de la fracción de limo USDA es

$$t_1 = t_l + 2,33797 \cdot d_l \cdot t_l - 1,32056 \cdot d_l \cdot t_l^2 - 1,64250 \cdot d_l^2 \cdot t_l \quad (3.11)$$

y la expresión para estimar el tercer cuartil condicional es

$$t_3 = \begin{cases} t_l + t_{c,3} & \text{si } t_{c,3} \leq d_l \\ t_l + d_l & \text{si } t_{c,3} > d_l \end{cases} \quad (3.12)$$

donde $t_{c,3}$, el tercer cuartil condicional de la fracción de limo grueso USDA, viene dado por

$$t_{c,3} = -0,09271 \cdot d_l^2 + 4,28579 \cdot t_l \cdot d_l - 3,72765 \cdot d_l \cdot t_l^2 - 2,49493 \cdot d_l^2 \cdot t_l + 0,10154 \cdot d_l \quad (3.13)$$

En la Figura 3.7 hemos representado los valores del primer cuartil, la mediana y el tercer cuartil condicionales de la fracción de limo USDA en cada punto del triángulo de textura obtenidos con estas ecuaciones de regresión cuantílica. Estas tres ecuaciones han sido diseñadas para que proporcionen siempre valores con sentido físico, sin embargo, nótese que, en la Figura 3.7c, hay una zona calificada como “no válida”. En esta ocasión se debe a que los valores obtenidos del tercer cuartil han resultado ser menores que los valores de la mediana. Como consecuencia, en esta zona “no válida” sólo se podrán obtener las estimaciones puntuales de la fracción de limo USDA, zona que corresponde a la parte más limosa del triángulo de textura, donde la densidad de registros disponibles es muy baja, afectando sólo a un 0,02 % de ellos.

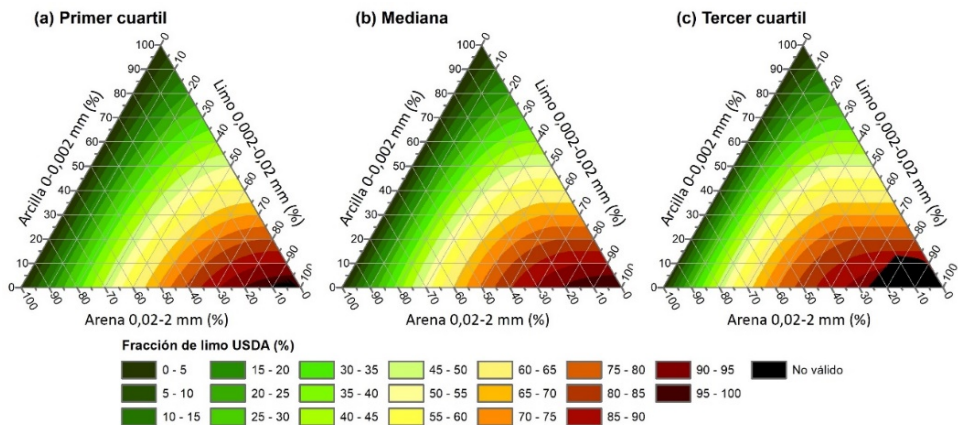


Figura 3.7. Valores de los cuartiles condicionales de la fracción de limo USDA obtenidos mediante un ajuste polinómico de regresión cuantílica.

Retomando los valores del ejemplo anterior, el valor de la fracción de limo USDA que proporciona la ecuación (3.9) es de 10,5 % y su intervalo de predicción del 50 %, proporcionado por la ecuación (3.11) y la ecuación (3.12), está comprendido entre 8,6 % y 15,0 %. Como se puede apreciar, estos valores son muy similares a los obtenidos con la Figura 3.5.

3.6 APLICACIÓN

Una aplicación interesante de la Figura 3.5b es la estimación de los límites de las clases texturales según el sistema de clasificación del USDA sobre el triángulo de textura en el IS-S. La Figura 3.8a muestra esta estimación, en la que hemos añadido también los valores que proporciona la ecuación (3.9), con la idea de simplificar los límites entre las clases. La Figura 3.8b muestra las clases texturales del USDA obtenidas a partir únicamente de la ecuación de regresión cuantílica, sobre las que se han superpuesto los límites de las clases texturales propuestas por Tommerup (1934).

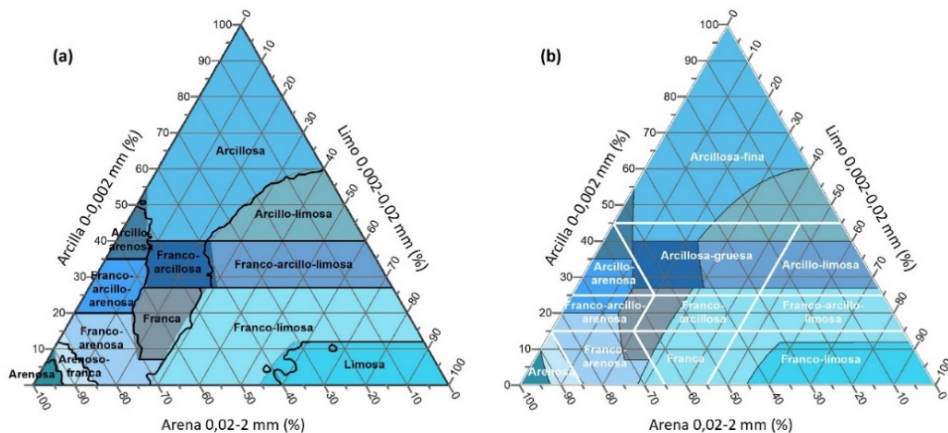


Figura 3.8. (a) Clases texturales del USDA representadas sobre el triángulo de textura según el IS-S. Las regiones delimitadas con los colores azules se han obtenido con los valores de la fracción de limo USDA calculados con la ecuación de regresión cuantílica (3.9). Los límites marcados en negro proceden de la Figura 2.4b. (b) Clases texturales del USDA (en azul; su significado se puede consultar en la figura a) representadas sobre el triángulo de textura según el IS-S, donde se han superpuesto los límites de las clases texturales propuestas por Tommerup (en blanco).

3.7 REFERENCIAS

Atterberg, A. (1905). Die rationelle klassifikation der sande und kiese. *Chemiker Zeitung*, 29, 195-198.

- Blott, S. J., & Pye, K. (2012). Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: Review and recommended procedures. *Sedimentology*, 59(7), 2071-2096. doi:10.1111/j.1365-3091.2012.01335.x
- Bucham, G. D. (1989). Comments on 'A unifying quantitative analysis of soil texture: Improvement of precision and extension of scale'. *Soil Science Society of America Journal*, 53, 594.
- Bulmer, M. G. (1979). *Principles of statistics*. New York: Dover.
- Dagnelie, P. (2013). *Statistique théorique et appliquée, tome 1: Statistique descriptive et bases de l'inférence statistique* (3rd ed.). Bruxelles: De Boeck Supérieur.
- Davino, C., Furno, M., & Vistocco, D. (2014). *Quantile regression: Theory and applications. chapter 2. Quantile regression: Understanding how and why* (First ed.) John Wiley & Sons.
- Geeves, G. W., Cresswell, H. P., Murphy, B. W., Gessler, P. E., Chartres, C. J., & Little, I. P. (1995). *The physical, chemical and morphological properties of soils in the wheat-belt of Southern NSW and Northern Victoria*. CSIRO, Australia: N.S.W. Department of Conservation and Land Management and CSIRO Division of Soils.
- Hao, L., & Naiman, D. Q. (2007). *Quantile regression*. United States of America: Sage Publications.
- Haverkamp, R., Zammit, C., Bouraoui, F., Rajkai, K., Arrue, J. L., & Heckman, N. (1997). *GRIZZLY, grenoble soil catalogue. soil survey of field data and description of particle size, soil water retention and hydraulic conductivity functions*. LTHE: Grenoble Cédex 09, France: Laboratoire d'Étude des Transfers en Hydrologie et Environnement.
- Hughes, P., McBratney, A. B., Huang, J., Minasny, B., Micheli, E., & Hempel, J. (2017). Comparisons between USDA soil taxonomy and the Australian soil classification system I: Data harmonization, calculation of taxonomic distance and inter-taxa variation. *Geoderma*, 307, 198-209. doi:10.1016/j.geoderma.2017.08.009
- ISSS. (1929). The minutes of the First Commission Meetings of the International Congress of Soil Science. In *Proceedings of the International Society of Soil Science*, 4 215-222. Washington 1927

- Kachinsky, N. A. (1956). Die mechanische bodenanalyse und die klassifikation der böden nach ihrer mechanischen zusammensetzung. *Rapports Au Sixie'me Congre's De La Science Du Sol Paris*, 321-327.
- Knight, H. G. (1938). New size limits for silt and clay. In *Minutes of the 1937 Annual Meeting of the Soil Science Society of America* 592.
- Koenker, R. (2020). *quantreg: Quantile Regression*. R package version 5.67. <https://CRAN.R-project.org/package=quantreg>
- Leij, F. J., Alves, W. J., van Genuchten, M. T., & Williams, J. R. (1996). In Williams J. R. (Ed.), *The UNSODA unsaturated soil hydraulic database. User's manual version 1.0* (EPA/600/R-96/095 ed.). Cincinnati, Ohio, U. S.: National Risk Management Research Laboratory. Office of Research and Development. U. S. Environmental Protection Agency.
- Meeker, W. Q., Hahn, G. J., & Escobar, L. A. (2017). *Statistical intervals: A guide for practitioners and researchers* (2nd ed.). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Miao, C., Liu, B., Gao, Y., & Zhang, T. (2008). Evaluation of different procedures to interpolate particle size distribution in black soils. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 15, 56-62. doi:10.3843/SusDev.15.4:8
- Minasny, B., & Mcbratney, A. (2001). The Australian soil texture boomerang: A comparison of the Australian and USDA/FAO soil particle-size classification systems. *Australian Journal of Soil Research*, 39, 1443-1451. doi:10.1071/SR00065
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2000). Evaluation and development of hydraulic conductivity pedotransfer functions for Australian soil. *Australian Journal of Soil Research*, 38(4), 905-926. doi:10.1071/SR99110
- Minasny, B., McBratney, A. B., & Bristow, K. L. (1999). Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*, 93(3), 225-253. doi:10.1016/S0016-7061(99)00061-0
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2007). Estimating the water retention shape parameter from sand and clay content. *Soil Science Society of America Journal*, 71(4), 1105-1110. doi:10.2136/sssaj2006.0298N

- Moeys, J. (2018). The soil texture wizard: R functions for plotting, classifying, transforming and exploring soil texture data. http://cran.ms.unimelb.edu.au/web/packages/soiltexture/vignettes/soiltexture_vignette.pdf
- NCSS (2017). National Cooperative Soil Survey. National Cooperative Soil Survey Characterization Database. Accessed at <http://ncsslabsdatamart.sc.egov.usda.gov/>, September 25, 2017.
- Nemes, A., & Rawls, W. J. (2006). Evaluation of different representations of the particle-size distribution to predict soil water retention. *Geoderma*, 132(1-2), 47-58. doi:10.1016/j.geoderma.2005.04.018
- Nemes, A., Wösten, J. H. M., Lilly, A., & Oude Voshaar, J. H. (1999). Evaluation of different procedures to interpolate particle-size distributions to achieve compatibility within soil databases. *Geoderma*, 90(3), 187-202. doi:10.1016/S0016-7061(99)00014-2
- Osborne, T. B. (1887). The methods of mechanical analysis. *Connecticut Agricultural Experiment Station Annual Report 1886*, 141-158.
- Padarian, J., Minasny, B., & McBratney, A. (2012). Using genetic programming to transform from Australian to USDA/FAO soil particle-size classification system. *Soil Research*, 50(6), 443-446. doi:10.1071/SR12139
- Peña, D. (2008). *Fundamentos de estadística* (2nd ed.). Madrid: Alianza Editorial.
- Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerin, M., & Roquero de Laburu, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (3rd ed.). Madrid: Mundi-Prensa.
- Richer de Forges, A., Feller, C., Jamagne, M., & Arrouays, D. (2008). Perdus dans le triangle des textures. *Etude Et Gestion Des Sols*, 15(2), 97-111.
- Sakaguchi, A., Eguchi, S., & Kasuya, M. (2014). Examination of the water balance of irrigated paddy fields in SWAT 2009 using the curve number procedure and the pothole module. *Soil Science and Plant Nutrition*, 60(4), 551-564. doi:10.1080/00380768.2014.919834
- Shang, S. (2013). Log-cubic method for generation of soil particle size distribution curve. *Scientific World Journal*, , 579460. doi:10.1155/2013/579460

- Shein, E. V. (2009). The particle-size distribution in soils: Problems of the methods of study, interpretation of the results, and classification. *Eurasian Soil Science*, 42(3), 284-291. doi:10.1134/S1064229309030053
- Shirazi, M. A., Boersma, L., & Hart, J. W. (1988). A unifying quantitative analysis of soil texture: Improvement of precision and extension of scale. *Soil Science Society of America Journal*, 52(1), 181-190. doi:10.2136/sssaj1988.03615995005200010032x
- Shirazi, M. A., Boersma, L., & Johnson, C. B. (2001). Particle-size distributions: Comparing texture systems, adding rock and predicting soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2), 300-310. doi:10.2136/sssaj2001.652300x
- Smettem, K. R. J., & Gregory, P. J. (1996). The relation between soil water retention and particle size distribution parameters for some predominantly sandy western Australian soils. *Australian Journal of Soil Research*, 34(5), 695-708. doi:10.1071/SR9960695
- Soil Survey Staff. (1951). Soil survey manual. Agriculture Handbook 18. Washington, DC: USDA Agricultural Research Administration.
- Soil Survey Staff (1995) Soil characterization and profile description data. Lincoln, NE: Soil Survey Laboratory, Natural Resources Conservation Service, USDA
- Tempel, P., Batjes, N. H., & van Engelen, V. W. P. (1996). *IGBP-DIS soil data set for pedotransfer function development*. Wageningen, The Netherlands: Working paper and Preprint 96/05, International Soil Reference and Information Centre (ISRIC).
- Tietje, O., & Hennings, V. (1996). Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma*, 69(1-2), 71-84. doi:10.1016/0016-7061(95)00050-X
- Tommerup, E. C. (1934). The field description of the physical properties of soils. In *Comptes Rendus De La Conférence De La Première Commission*, Centre National de Recherches Agronomiques de Versailles. 155-158.
- USDA-NRCS (1997) National Soil Characterization Database. USDA-NRCS Soil Survey Division. http://www.statlab.iastate.edu/soils/ssl/natch_data.html.

Yaalon, D. H. (1989). Comments on 'A unifying quantitative analysis of soil texture'. *Soil Science Society of America Journal*, 53, 595.

3.8 APÉNDICES

Apéndice 3A. Deducción de la expresión de cálculo del modelo LLI

Sea F la distribución acumulada del tamaño de partículas de una muestra de suelo, función del diámetro de partícula ϕ . Y sean F_1 y F_2 , respectivamente, los valores que toma dicha función de distribución para los diámetros de partícula ϕ_1 y ϕ_2 , para $\phi_1 \leq \phi \leq \phi_2$. En el Apéndice 2A demostramos que

$$F(\phi) - F_1 = \frac{\log(\phi/\phi_1)}{\log(\phi_2/\phi_1)} \cdot (F_2 - F_1) \quad (3A.1)$$

En el caso que nos ocupa $\phi_1 = 0,02$ mm, $\phi_2 = 2$ mm y $\phi = 0,05$ mm, de modo que ϕ_2/ϕ_1 será igual a 100, ϕ/ϕ_1 será igual a 2,5, $F_2 - F_1$ será la fracción de arena en el IS-S, d_I , y $F(\phi) - F_1$ será la fracción de limo grueso USDA, t_c . En estas condiciones, podemos concluir que

$$t_c = \frac{\log 2,5}{\log 100} \cdot d_I = 0,19897 \cdot d_I \quad (3A.2)$$

Añadiendo a la fracción de limo en el IS la fracción de limo grueso USDA, la expresión para calcular la fracción de limo USDA es la siguiente

$$t = t_I + 0,19897 \cdot d_I \quad (3A.3)$$

tal y como queríamos demostrar. Adviértase que el resultado obtenido es independiente de la base logarítmica utilizada.

Apéndice 3B. Deducción de la expresión de cálculo del modelo MMB

La ecuación de Minasny *et al.* (1999) con los valores de sus parámetros de ajuste transformados para adaptarse a la escala utilizada en este trabajo es la siguiente:

$$t_c = 0,484593 - 0,2225 \cdot d_I - 0,29 \cdot d_I^2 - 0,6952 \cdot y + 0,18 \cdot y^2 \quad (3B.1)$$

siendo t_c la fracción de limo grueso USDA.

Recordando que la suma de las tres fracciones texturales básicas es igual a 1, podemos despejar el valor de la arcilla en función de las otras dos fracciones texturales

$$y = 1 - d_I - t_I \quad (3B.2)$$

Sustituyendo el valor de la arcilla en la ecuación (3B.1) y teniendo en cuenta que la fracción de limo USDA se obtiene al añadir a la fracción de limo en el IS el valor de la fracción de limo grueso USDA

$$t = t_I + t_c \quad (3B.3)$$

la ecuación para obtener la fracción de limo USDA queda finalmente como

$$t = -0,030607 + 1,3352 \cdot t_I + 0,1127 \cdot d_I + 0,18 \cdot t_I^2 + 0,36 \cdot t_I \cdot d_I - 0,11 \cdot d_I^2 \quad (3B.4)$$

Apéndice 3C. Deducción de la expresión de cálculo del modelo SBJ

Sea F la distribución acumulada del tamaño de partículas de una muestra de suelo para diámetros ϕ comprendidos entre $\phi_1 = 0,02$ mm y $\phi_2 = 2$ mm, tal que $F_2 = F(\phi_2) = 0,9999$ y $F_1 = F(\phi_1) = 1 - d_I$, siendo d_I la fracción de arena de la muestra en el IS-S. En el Apéndice 2B demostramos que

$$F(\phi) - F_1 = \Phi \left(\frac{\ln(\phi/\phi_1)}{\ln(\phi_2/\phi_1)} [\Phi^{-1}(F_2) - \Phi^{-1}(F_1)] + \Phi^{-1}(F_1) \right) - F_1 \quad (3C.1)$$

donde Φ es la función de distribución normal tipificada y Φ^{-1} es la función inversa de Φ .

Sustituyendo las variables ϕ_1 , ϕ_2 , F_1 , F_2 por sus respectivos valores y expresiones, y considerando que, en el caso que nos ocupa, $\phi = 0,05$ mm, de modo que $F(\phi) - F_1$ será la fracción de limo grueso USDA, t_c , se deduce que

$$t_c = \Phi \left(\frac{\ln 2,5}{\ln 100} \cdot [\Phi^{-1}(0,9999) - \Phi^{-1}(1 - d_I)] + \Phi^{-1}(1 - d_I) \right) - 1 + d_I \quad (3C.2)$$

Finalmente, resolviendo la ecuación (3C.2) y añadiendo la fracción de limo grueso USDA a la fracción de limo en el IS, la expresión para calcular la fracción de limo USDA es la siguiente:

$$t = t_l + \Phi[0,739973 + 0,801030 \cdot \Phi^{-1}(1 - d_l)] - 1 + d_l \quad (3C.3)$$

Capítulo 4. Revisión del factor *K* de erosionabilidad del suelo de la USLE

4.1 INTRODUCCIÓN

Mucho ha llovido desde que, en la década de 1920, Hugh Hammond Bennett, considerado por muchos como el padre de la conservación del suelo, sentara las bases para la investigación de los procesos erosivos. Él fue el artífice del compromiso político y del apoyo económico que el gobierno de los EE. UU. adoptó en la lucha contra la erosión, materializado a través de instituciones como el USDA *Soil Conservation Service* o el *National Runoff and Soil Loss Data Center* (Meyer, 1984; Laflen y Moldenhauer, 2003). El resultado, tras varias décadas de investigación, fue el desarrollo de la *Universal Soil Loss Equation* (USLE) que, junto con sus sucesoras, la *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) versión 1 (RUSLE1; Renard *et al.*, 1997) y la RUSLE versión 2 (RUSLE2; USDA Agricultural Research Service, 2013), son actualmente las herramientas más utilizadas a escala mundial para la estimación de las pérdidas de suelo (Laflen y Moldenhauer, 2003; Kinnell, 2010; Auerswald *et al.*, 2014; Bagarello *et al.*, 2015; Alewell *et al.*, 2019).

El éxito de la USLE se debe, entre otras razones, a que es un modelo conceptualmente simple y fácil de usar (Bagarello *et al.*, 2008; Ostovari *et al.*, 2016), y al buen compromiso entre su aplicabilidad, en términos de datos de entrada requeridos, y la confiabilidad de sus estimaciones (Risse *et al.*, 1993). Aunque se trata de un modelo empírico desarrollado a partir de datos de EE. UU. (Wischmeier y Smith, 1978), no existen restricciones geográficas para su aplicación, eso sí, siempre que se cuente con la información necesaria para evaluar sus factores (Meyer, 1984). Todo esto ha convertido a la USLE y sus revisiones en unos modelos muy atractivos desde un punto de vista práctico, muy útiles para evaluaciones a escala continental o de países (Teng *et al.*, 2016), existiendo en la actualidad constancia de su uso en un total de 109 países (Alewell *et al.*, 2019). Son también los modelos de predicción de la erosión citados con mayor frecuencia en revistas científicas (Auerswald *et al.*, 2014; Alewell *et al.*, 2019; Bezak, *et al.*, 2021).

Entre los factores que componen la USLE, el factor K es el que mide la susceptibilidad del suelo a la erosión y, en consonancia con el uso del modelo USLE, es la herramienta de predicción más comúnmente utilizada y citada para la estimación de la erosionabilidad del suelo (Auerswald *et al.*, 2014; Panagos *et al.*, 2014), aplicada tanto a escala regional como nacional o continental (Ostovari *et al.*, 2018). Algunos ejemplos recientes de esta aplicación son la confección del mapa de estimación del factor K en la Unión Europea por parte del *European Soil Data Centre* (Panagos *et al.* 2012, 2014), completado con el mapa de erosionabilidad de Suiza (Schmidt *et al.*, 2018); el elaborado en Australia por Teng *et al.* (2016) o el mapa del factor K de la región de África oriental (Fenta *et al.*, 2020).

Además, el factor K se ha incluido también en una serie de modificaciones o extensiones de la USLE (Auerswald *et al.*, 2014), tales como la MUSLE (Williams, 1975), la dUSLE (Flacke *et al.*, 1990), la USLE-M (Kinnell y Risse, 1998; Kinnell, 2007) o la USLE-MM (Bagarello *et al.*, 2008, 2010); y se ha integrado en otros modelos de predicción de la erosión más complejos basados en la tecnología USLE/RUSLE (Lafren y Flanagan, 2013; Auerswald *et al.*, 2014), como, por ejemplo, los modelos EPIC (Williams *et al.*, 1983), SWAT (Arnold *et al.*, 1998), AGNPS (Young *et al.*, 1989; Cronshey y Theurer, 1998), Watem/Sedem (Van Rompaey *et al.*, 2001) o CSLE (Liu *et al.*, 2002), entre otros. El uso de estos modelos es también frecuente, como lo pone de manifiesto su mayor número de citas en revistas científicas frente a otro tipo de modelos independientes de la tecnología USLE/RUSLE (Auerswald *et al.*, 2014; Alewell *et al.*, 2019).

La versión completa de la USLE se publicó por primera vez en un manual del USDA en 1965 (Wischmeier y Smith, 1965), aunque previamente ya se había anunciado en un informe especial del *Agricultural Research Service* (Wischmeier y Smith, 1961). En estos inicios, los valores del factor K se obtenían a través de tablas, en las que había que identificar el suelo o suelos similares al estudiado entre los 23 valores disponibles (Wischmeier y Smith, 1965). La primera ecuación que permitía estimar el valor del factor K para cualquier suelo se desarrolló en 1969 (Wischmeier y Mannering, 1969). Se trataba de una ecuación con 24 términos, obtenidos a partir de 15 propiedades del suelo y sus interacciones (Wischmeier *et al.*, 1971), muy poco práctica como herramienta de trabajo en campo, lógicamente, pero sí interesante, pues supuso una primera selección de las propiedades del suelo con mayor capacidad predictiva de la erosionabilidad (Wischmeier y Meyer, 1973). Wischmeier *et al.* (1971) redujeron esta ecuación a una expresión de cinco parámetros, que fue presentada inicialmente en forma de un nomograma. La ecuación que subyace a este nomograma sería revelada dos años más tarde (Wischmeier y Meyer, 1973). En 1978

se realizó una actualización de la USLE, publicada en un nuevo manual del USDA que reemplazaba al de 1965, en el que incorporaron, para el cálculo del factor K , tanto el nomograma como la ecuación (Wischmeier y Smith, 1978).

Los continuos avances en la investigación de la erosión y las críticas recibidas por sus limitaciones hicieron necesaria una nueva actualización de la USLE, que se inició en 1985 y acabó convirtiéndose en una revisión más profunda, dando lugar a la conocida como RUSLE1 (Renard *et al.*, 1997). Una de las incorporaciones más destacable fue el desarrollo de un programa informático para implementarla. Entre las mejoras introducidas en la estimación del factor K se encuentra la posibilidad de considerar su variabilidad estacional, nuevas ecuaciones para su cálculo en situaciones muy concretas (por ejemplo, para suelos volcánicos tropicales) o una corrección en función de los fragmentos de roca presentes en el perfil del suelo.

En 2003 apareció la RUSLE2, versión más reciente, que incorpora nuevas y más complejas ecuaciones matemáticas, amplía la base de datos asociada y mejora la interfaz gráfica del programa informático. A diferencia de sus predecesoras, RUSLE2 también puede estimar el depósito de sedimentos y la capacidad de transporte, pero continúa utilizando la estructura básica de la USLE para la estimación de las pérdidas de suelo (USDA Agricultural Research Service, 2008). Respecto a las mejoras introducidas en la estimación del factor K , destaca el desarrollo de una ecuación para la estimación de la fracción de arena muy fina (AMF), ya comentada en detalle en el Capítulo 2 de este trabajo, y la desestimación de las ecuaciones para situaciones específicas que incluía RUSLE1 (USDA Agricultural Research Service, 2013). Otras incorporaciones interesantes se comentarán en las siguientes secciones.

Actualmente, en el marco de la RUSLE2, los valores del factor K se deben seleccionar directamente de la base de datos del USDA-NRCS, donde estos valores están disponibles para la mayoría de los suelos en los EE. UU. (USDA Agricultural Research Service, 2008). Cuando los datos no están disponibles, ya sea por condiciones específicas o por localizaciones fuera de EE.UU., el factor K se puede obtener a partir de los dos conjuntos de ecuaciones que incluye la RUSLE2, a los que se refiere como el nomograma estándar, para el caso de tierras de cultivo y suelos similares, y el nomograma modificado, en el caso de que el perfil del suelo haya sido alterado y el suelo mezclado (USDA Agricultural Research Service, 2008; USDA Agricultural Research Service, 2013). El nomograma estándar, ele-

mento básico para la estimación del factor K , sigue siendo el mismo que propuso Wischmeier *et al.* (1971) para utilizar en la USLE (USDA Agricultural Research Service, 2013). Nos referiremos, a partir de ahora, a este nomograma estándar propuesto por Wischmeier *et al.* (1971) simplemente como nomograma.

El uso correcto del nomograma pasa por conocer sus limitaciones, derivadas, en su mayoría, de su origen empírico-estadístico. Así, no es posible su aplicación a todo tipo de suelos; por ejemplo, puede proporcionar estimaciones inexactas si se utiliza en suelos de origen volcánico (USDA Agricultural Research Service, 2008) o cuando se aplica a suelos calcáreos en regiones áridas y semiáridas (Vaezi *et al.*, 2008). De hecho, existen algunos trabajos que han desarrollado nuevas ecuaciones para poder estimar el factor K en situaciones y escenarios diferentes a los del nomograma original. Este tipo de estudios se suelen realizar en áreas pequeñas, pues la recopilación de datos experimentales requiere mucho tiempo y es muy costosa. En concreto, existen ecuaciones específicas del factor K para ciertas áreas de Irán (Vaezi *et al.*, 2008; Shabani *et al.*, 2014; Ostovari *et al.*, 2016, 2018), Italia (Bagarello *et al.*, 2012), China (Wang *et al.*, 2016) o Uruguay (Beretta-Blanco y Carrasco-Letelier, 2017).

La USLE, o cualquiera de sus factores, no deberían utilizarse para propósitos para los que no fueron concebidos o en condiciones diferentes a las de su creación. Aun así, existen referencias de su uso inadecuado en ciertas ocasiones (Wischmeier, 1976; Kinnell, 2010). Auerswald *et al.* (2014) reflejaron esta situación comprobando que, de los artículos que hacían referencia al factor K publicados entre 2003 y 2012, sólo en el 10 % se citaba el artículo original de Wischmeier *et al.* (1971).

Esto nos conduce al objetivo planteado en esta parte del trabajo, la realización de un análisis detallado del nomograma desarrollado por Wischmeier *et al.* (1971) y de la ecuación propuesta por Wischmeier y Meyer (1973), con el fin de establecer sus limitaciones de aplicación y facilitar su correcta utilización. Así mismo, se revisarán las extensiones y modificaciones de la ecuación que han sido propuestas para resolver sus limitaciones y se desarrollará un nuevo conjunto de ecuaciones que se ajusten al nomograma y que permitan prescindir completamente del uso del mismo.

En su versión original, la que vamos a analizar, tanto la ecuación como el nomograma proporcionan valores del factor K en términos de las unidades tradicionales de EE. UU., concretamente en $(0,01 \cdot \text{ton} \cdot \text{acre} \cdot \text{h})/(\text{acre} \cdot \text{ft-tonf} \cdot \text{in})$. Para su conversión a las unidades del Sistema Internacional, por ejemplo en $(\text{t} \cdot \text{ha} \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{ha} \cdot \text{mm})$, hay que multiplicar el valor del factor K obtenido por 0,1317 (Foster *et al.*, 1981).

Aunque es obvio, pues nos movemos en el ámbito de trabajo del USDA, no está de más recordar que todas las referencias que hagamos en este capítulo a la textura se refieren al esquema de clasificación textural del USDA.

4.2.2 Primera aproximación de K

El valor que toma el factor K cuando los subfactores K_s y K_p se anulan se conoce como la primera aproximación de K , K_1 . Este valor se puede obtener bien gráficamente, a partir de las dos familias de curvas representadas en el bloque izquierdo del nomograma, o bien como producto de dos subfactores, que vienen dados por:

$$K_1 = k_t \cdot k_o \quad (4.2)$$

$$k_t = 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot M^{1,14} \quad (4.3)$$

$$k_o = (12 - a) \cdot 10^{-1} \quad (4.4)$$

donde k_t es el subfactor correspondiente a la textura, k_o el subfactor función de la materia orgánica (MO), M el parámetro relativo al tamaño de las partículas y a el contenido en MO expresado en porcentaje. Más concretamente, k_t es el valor que toma K_1 cuando a es igual al 2 %, de manera que el subfactor k_o se puede considerar como un modificador de k_t .

4.2.2.1 Parámetro M

Diferentes trabajos ya habían puesto de manifiesto que, desde el punto de vista de la erosionabilidad, la fracción de AMF tenía un comportamiento más similar al de la fracción de limo que al del resto de la fracción de arena (Wischmeier y Mannering, 1969). Este fue el motivo por el que Wischmeier *et al.* (1971) optaron por recombinar las fracciones texturales y definir un nuevo parámetro, designado como M , para hacer referencia a la distribución del tamaño de las partículas del suelo. La expresión matemática del parámetro M es la siguiente (Wischmeier y Meyer, 1973):

$$M = (t + v) \cdot (100 - y) \quad (4.5)$$

donde t es la fracción de limo, v la fracción de AMF e y la fracción de arcilla, todas ellas expresadas en porcentaje.

Las nuevas fracciones texturales fueron, por un lado, la fracción con diámetros de partícula comprendidos entre 0,002 y 0,1 mm, es decir, la suma de las fracciones de limo más AMF, y, por otro lado, la subfracción de la arena con diámetros superiores a 0,1 mm, que a partir de ahora denominaremos como arena no muy fina (ANMF). Con esta distribución se consiguió mejorar la capacidad predictiva de los datos texturales para estimar la erosionabilidad (Wischmeier *et al.*, 1971).

Existe cierta confusión a la hora de nombrar estas dos nuevas fracciones, pues Wischmeier *et al.* (1971) se refieren a ellas utilizando los términos de limo (0,002-0,1 mm) y arena (0,1-2 mm), redefiniendo estas fracciones al modificar los rangos que establece el esquema de clasificación textural del USDA. Además, ocurre que, en el mismo documento, coexisten los dos esquemas de clasificación. Así, por ejemplo, el término limo que indican en el nomograma se refiere a la fracción de limo USDA (0,002-0,5 mm), mientras que en la explicación para la obtención del parámetro M el porcentaje de limo hace referencia a la fracción de 0,002 a 0,1 mm. Esta confusión la mantienen tanto Wischmeier y Meyer (1973) como Wischmeier y Smith (1978). Por otro lado, Römken *et al.* (1997), en la RUSLE1, se refieren a estas dos nuevas fracciones como *modified silt* y *modified sand*, mientras que en el manual de la RUSLE2 (USDA Agricultural Research Service, 2013, cap. 4) se utilizan sólo los términos según los define el sistema de clasificación del USDA, mismo criterio que seguimos en este trabajo.

Dado que 100 menos el porcentaje de arcilla y es igual a la suma de las fracciones de limo t y arena d , esto es, $100 - y = t + d$, la ecuación (4.5) se puede expresar como

$$M = t' \cdot (t + d) = t' \cdot (t' + d') \quad (4.6)$$

donde t' es la fracción de limo más AMF y d' la fracción de ANMF, expresadas ambas en porcentaje. De esta forma es sencillo dibujar sobre el nomograma las parábolas que representan a la ecuación (4.6), para distintos valores de la fracción de ANMF (véase la Figura 4.2). En este caso, el eje vertical corresponde a la variable de entrada, la fracción de limo más AMF, y el eje horizontal a la variable de salida, el parámetro M , que toma valores

de 0 a 8000. Nótese que los autores no identificaron expresamente este parámetro M en el gráfico, en aras de la simplificación (Wischmeier *et al.*, 1971).

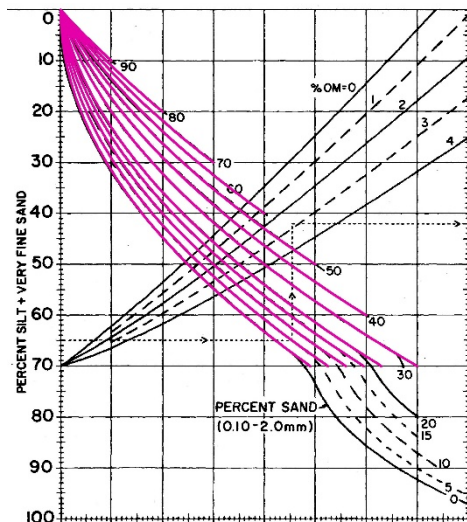


Figura 4.2. Representación sobre el nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) de la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) para el cálculo del parámetro M , para varios valores de la fracción de arena no muy fina.

Se han dibujado estas parábolas sólo para valores de la fracción de limo más AMF inferiores al 70 %, límite de aplicación que Wischmeier y Meyer (1973) marcaron para su ecuación (Figura 4.2). A partir de ese límite la relación entre el parámetro M y la erosionabilidad es diferente, como pusieron de manifiesto los autores a través de un cambio en la curvatura de las líneas del nomograma. Según se afirma en el manual de la RUSLE2, Wischmeier *et al.* (1971) dibujaron esta prolongación de las curvas basándose en su juicio experto (USDA Agricultural Research Service, 2013, cap. 4). Las nuevas curvas no fueron descritas por ninguna ecuación, de manera que la única opción posible para obtener el valor del parámetro M en suelos con un contenido en limo más AMF superior al 70 % era recurrir al nomograma.

4.2.2.2 Subfactor de la materia orgánica

Una vez que se conoce el valor del parámetro M , el siguiente paso es estimar la primera aproximación de K , bien aplicando directamente la ecuación (4.2) o bien a través de la siguiente familia de curvas del nomograma. Es en este momento cuando se incluye en el cálculo del factor K el efecto que la MO tiene en la reducción de la erosionabilidad. La

presencia de MO favorece la formación de agregados, que disminuyen la susceptibilidad del suelo al impacto de las gotas de lluvia y favorecen la infiltración (USDA Agricultural Research Service, 2008, cap. 7).

En la Figura 4.3 hemos dibujado sobre el nomograma las curvas que proporciona la ecuación (4.2) para cinco niveles de MO (líneas en fucsia). El eje de abscisas corresponde a la variable de entrada, el parámetro M , y el de ordenadas a la variable de salida, la primera aproximación de K . Wischmeier *et al.* (1971) indicaron que esta relación entre el valor de K_1 y M no se había determinado para valores de la MO superiores al 4 %. Como se puede apreciar, existe una sorprendente discrepancia entre esta representación y las curvas del nomograma, cuestión que abordaremos en profundidad en las secciones 4.4 y 4.5.

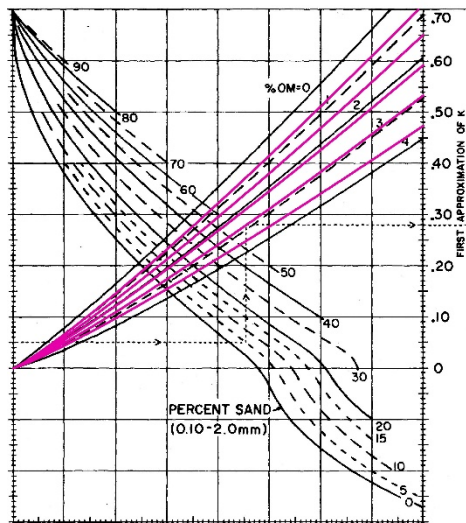


Figura 4.3. Representación sobre el nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) de la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) que relaciona el parámetro M con la primera aproximación de K , para cinco niveles de MO.

4.2.3 Subfactor de la estructura

El segundo sumando de la ecuación (4.1), K_s , contempla la influencia de la estructura del suelo sobre su erosionabilidad. Su expresión matemática es la siguiente (Wischmeier y Meyer, 1973):

$$K_s = 3,25 \cdot 10^{-2} \cdot (b - 2) \quad (4.7)$$

donde b es el código que se asigna a la estructura del suelo.

La estructura hace referencia a la agregación de las partículas elementales del suelo, que influye sobre la posibilidad de arranque de estas partículas y sobre la capacidad de infiltración del perfil (USDA Agricultural Research Service, 2008, cap. 7). Se describe a través de tres cualidades: el tipo, que considera la forma y disposición de los agregados; la clase, que indica su tamaño, y el grado, que se refiere a la diferenciación de las unidades (Soil Science Division Staff, 2017, cap. 3). Wischmeier *et al.* (1971) concluyeron que el grado no tenía un efecto significativo sobre la erosionabilidad, de manera que sólo tuvieron en cuenta el tipo y la clase para el establecimiento de las 4 categorías del código de la estructura que se indican en el nomograma, definidas de acuerdo con las descripciones del *Soil Survey Manual* del USDA (Soil Survey Staff, 1951).

La familia de rectas de la parte superior del bloque derecho del nomograma refleja estas relaciones basadas en el código de la estructura, cuya ecuación es:

$$K_{1s} = K_1 + 3,25 \cdot 10^{-2} \cdot (b - 2) \tag{4.8}$$

donde hemos denominado K_{1s} al valor obtenido tras aplicar la información de la estructura a la primera aproximación de K .

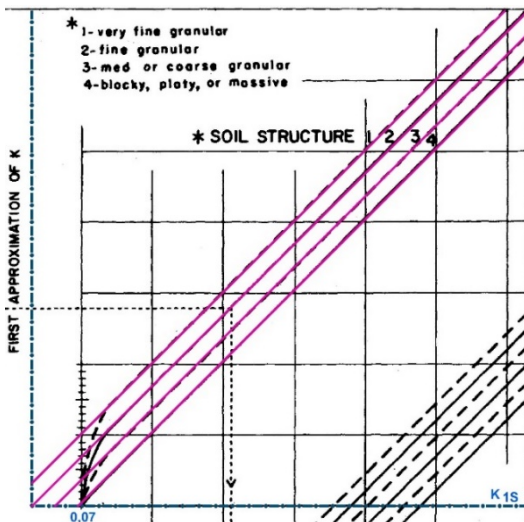


Figura 4.4. Representación sobre el nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) de la parte de la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) que incluye el efecto de la estructura del suelo sobre la erosionabilidad.

En la Figura 4.4 hemos representado las rectas que la ecuación (4.8) proporciona para los 4 valores posibles del código de estructura. Hemos añadido también, en aras de la claridad, los ejes coordenados que pasan por el origen (0,0). Como se puede ver, el eje de abscisas, correspondiente a la variable de salida K_{1s} , coincide con el dibujado en el nomograma; pero el eje de ordenadas, el de la variable de entrada K_1 , queda desplazado 0,07 unidades a la izquierda del eje vertical del nomograma. Es decir, que el punto desde el que parten las cuatro líneas de la estructura dibujadas en el nomograma tiene por coordenadas (0,07, 0). En la zona próxima al origen, correspondiente a valores bajos de la primera aproximación de K , los valores que proporciona la ecuación (4.8) no coinciden con lo representado en el nomograma, defecto de la ecuación nunca mencionado por Wischmeier y Meyer (1973).

4.2.4 Subfactor de la permeabilidad

El último sumando de la ecuación (4.1) corresponde a la permeabilidad del perfil. Su expresión matemática es la siguiente (Wischmeier y Meyer, 1973):

$$K_p = 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot (c - 3) \quad (4.9)$$

donde c es la clase de permeabilidad del perfil.

En este caso se utilizan 6 clases para describir la permeabilidad, que pretenden reflejar la capacidad del perfil del suelo para infiltrar la precipitación y reducir la escorrentía superficial, siempre en condiciones estándar (USDA Agricultural Research Service, 2013, cap. 4). Esta clasificación es la que se propone en el USDA *Soil Survey Manual* (Soil Survey Staff, 1951), aunque se añaden algunas indicaciones para los códigos 4, 5 y 6 (Wischmeier *et al.*, 1971). En la estimación de la permeabilidad hay que considerar la totalidad del perfil del suelo, a diferencia de lo que sucede en el resto de subfactores, que consideran sólo el horizonte superior. De hecho, cuando aparece algún tipo de capa restrictiva, el código de permeabilidad se debe ajustar a esas circunstancias (USDA Agricultural Research Service, 2013, cap. 4).

La familia de rectas de la parte inferior derecha del nomograma representa el efecto del subfactor de la permeabilidad, K_p . La ecuación de estas rectas es la siguiente:

$$K = K_{1s} + 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot (c - 3) \quad (4.10)$$

En esta ocasión no hemos representado la ecuación anterior sobre el nomograma, debido a su perfecta coincidencia. Recuérdese que el eje vertical que pasa por el origen (0,0), en este caso el correspondiente a la variable de salida K , está desplazado 0,07 unidades a la izquierda del eje vertical del nomograma. Esto explica que, por ejemplo, la recta correspondiente a un valor de c igual a 3 corte al eje vertical representado en el nomograma en el punto 0,07.

4.3 ADAPTACIONES DE LA ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR K

Hemos encontrado en la literatura dos adaptaciones de la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) para el cálculo del factor K , que se realizaron con el objeto de solucionar algunas de sus limitaciones e imprecisiones. Una de ellas corresponde a la segunda revisión de la USLE, RUSLE2, y la otra fue desarrollada por Auerswald *et al.* (2014).

4.3.1 Adaptación propuesta por RUSLE2

Se comentan, a continuación, las innovaciones que incluye la RUSLE2 para el cálculo del factor K , a excepción de la ecuación para estimar la fracción de AMF, ya analizada en detalle en el Capítulo 2.

4.3.1.1 Parámetro M

La RUSLE2 ofrece una nueva ecuación para estimar el subfactor correspondiente a la textura, válida para todo el rango posible de valores de la fracción de limo más AMF (USDA Agricultural Research Service, 2013, cap. 4):

$$k_t = \begin{cases} 10^{-1} \cdot k_{tb} & \text{si } t' \leq 68\% \\ 10^{-1} \cdot [k_{tb} - 0,67 \cdot (k_{tb} - k_{t68})^{0,82}] & \text{si } t' > 68\% \end{cases} \quad (4.11)$$

donde k_{tb} es equivalente al subfactor de textura de Wischmeier y Meyer (1973)

$$k_{tb} = 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot M^{1,14} \quad (4.12)$$

y k_{t68} es el valor de k_{tb} cuando la fracción de limo más AMF es igual a 68 %

$$k_{t68} = 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot [68 \cdot (100 - y)]^{1,14} \quad (4.13)$$

En el nomograma está representada la ecuación que calcula el parámetro M , no la del subfactor k_t . Por ello, para comprobar cómo la ampliación propuesta por la RUSLE2 se

ajusta a esta familia de curvas del nomograma, hemos deducido, a partir de la ecuación (4.11), la expresión correspondiente del parámetro M (véase Apéndice 4A). Su representación gráfica se muestra en la Figura 4.5, para distintos valores de la fracción de ANMF. Hemos mantenido el color fucsia para la parte correspondiente al primer segmento de la ecuación (4.11), coincidente con la ecuación original de Wischmeier y Meyer (1973), aunque en esta ocasión es válida sólo hasta un valor de la fracción de limo más AMF del 68 %; y hemos representado en verde la ecuación del parámetro M correspondiente al segundo segmento de la ecuación (4.11), aportación de la RUSLE2.

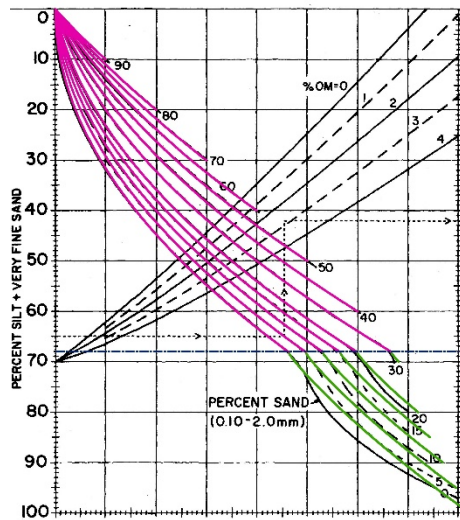


Figura 4.5. Representación sobre el nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) de la ecuación para el cálculo del parámetro M . En fucsia la parte correspondiente a la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) y en verde la ampliación de la RUSLE2.

4.3.1.2 Subfactor de la estructura

La RUSLE2 sí considera la curvatura que, en el nomograma de Wischmeier *et al.* (1971), presentan las líneas correspondientes al subfactor de la estructura cerca del origen y proponen una ecuación para adaptarse a esta desviación (USDA Agricultural Research Service, 2013, cap. 4):

$$K_{1S} = \begin{cases} K_1 + K_S & \text{si } K_1 + K_S \geq 7 \cdot 10^{-2} \\ 7 \cdot 10^{-2} & \text{si } K_1 + K_S < 7 \cdot 10^{-2} \end{cases} \quad (4.14)$$

La Figura 4.6 muestra la representación, sobre el nomograma, de la ecuación (4.14) para los cuatro valores posibles del código de la estructura. Se ha mantenido en fucsia el primer segmento, coincidente con la ecuación original de Wischmeier y Meyer (1973), y en verde el segundo segmento, aportación de RUSLE2.

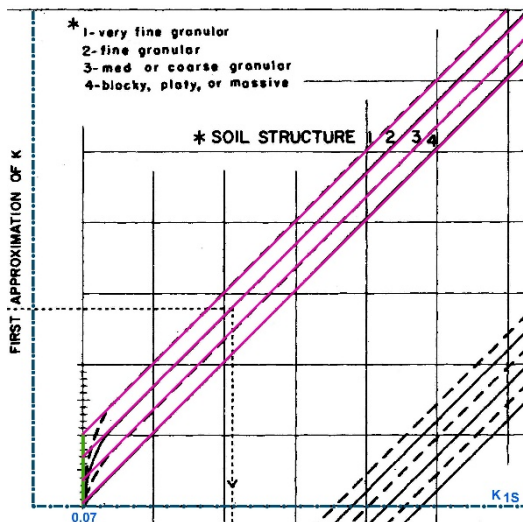


Figura 4.6. Representación sobre el nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) de la ecuación que incluye el efecto de la estructura del suelo sobre la erosionabilidad. En fucsia la parte correspondiente a la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) y en verde la ampliación de RUSLE2.

4.3.2 Adaptación propuesta por Auerswald

Se exponen, a continuación, las extensiones que proponen Auerswald *et al.* (2014) para tratar de imitar exactamente el nomograma de Wischmeier *et al.* (1971). Las ecuaciones que presentan proporcionan los valores del factor K en unidades del Sistema Internacional, por lo que, para poder compararlas con los trabajos previos, las hemos convertido a las unidades tradicionales de EE. UU.

4.3.2.1 Parámetro M

A partir de lecturas tomadas sobre el nomograma para valores de limo más AMF superiores al 70 %, Auerswald *et al.* (2014) ajustaron la siguiente ecuación para estimar el subfactor correspondiente a la textura, válida para cualquier valor que pueda tomar la suma de las fracciones de limo más AMF

$$k_t = \begin{cases} 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot M^{1,14} & \text{si } t' < 70\% \\ 1,3272 \cdot 10^{-5} \cdot M^{1,14} + 0,0018 \cdot t' + 0,122 & \text{si } t' \geq 70\% \end{cases} \quad (4.15)$$

La Figura 4.7 muestra la representación sobre el nomograma de la ecuación que calcula el parámetro M , para distintos valores de la fracción de ANMF, expresión deducida a partir de la ecuación (4.15). Seguimos manteniendo el color fucsia para la parte correspondiente al primer segmento de la ecuación (4.15), coincidente con la ecuación original de Wischmeier y Meyer (1973), y hemos añadido en azul la extensión de Auerswald *et al.* (2014). En el Apéndice 4A se puede consultar el procedimiento seguido para deducir la ecuación del parámetro M correspondiente a la extensión de Auerswald *et al.* (2014).

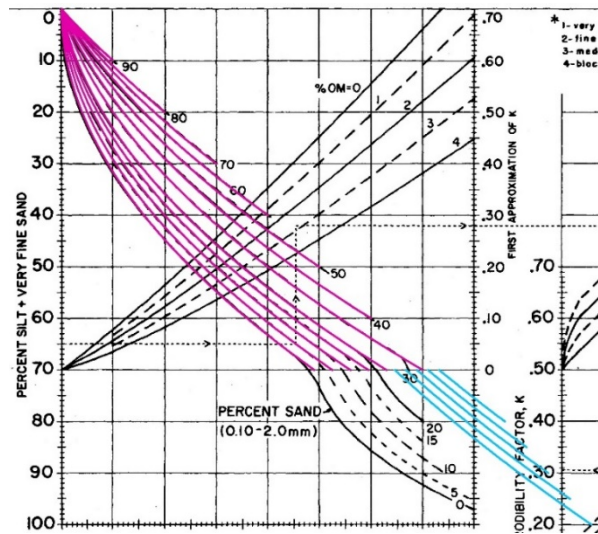


Figura 4.7. Representación sobre el nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) de la ecuación para el cálculo del parámetro M . En fucsia la parte correspondiente a la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) y en azul la ampliación de Auerswald *et al.* (2014).

4.3.2.2 Subfactor de la materia orgánica

La propuesta de mejora de este subfactor la plantean los autores en los siguientes términos:

$$k_o = \begin{cases} (12 - a) \cdot 10^{-1} & \text{si } a < 4\% \\ 0,8 & \text{si } a > 4\% \end{cases} \quad (4.16)$$

Es decir, extienden el subfactor de la MO más allá del límite del 4 % establecido por Wischmeier *et al.* (1971) y le asignan, para suelos con un contenido en MO superior al 4 %, el mismo valor que si tuvieran un 4 %.

4.3.2.3 Subfactor de la estructura

La propuesta de Auerswald *et al.* (2014), ajustada partir de lecturas tomadas sobre el nomograma, una vez convertida a las unidades tradicionales de EE.UU., es la siguiente:

$$K_{1S} = \begin{cases} K_1 + K_S & \text{si } K_1 > 0,152 \\ 2,357 \cdot K_1^2 + (0,24 \cdot b - 0,34) \cdot K_1 + 0,07 & \text{si } K_1 < 0,152 \end{cases} \quad (4.17)$$

Estos autores establecen el momento en que se inicia la curvatura de las rectas en un valor de la primera aproximación de K de 0,152 (0,2 en unidades del Sistema Internacional), independientemente del valor que tome el código de estructura b .

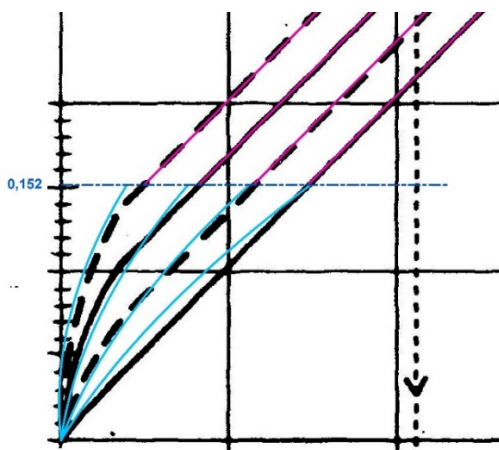


Figura 4.8. Detalle de la representación sobre el nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) de la ecuación que incluye el efecto de la estructura del suelo sobre la erosionabilidad. En fucsia la parte correspondiente a la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) y en azul la modificación de Auerswald *et al.* (2014).

La Figura 4.8 es un detalle de la representación de la ecuación (4.17) sobre el nomograma, para los cuatro posibles valores del código de la estructura. Se ha mantenido en fucsia el primer segmento, coincidente con la ecuación original de Wischmeier y Meyer (1973), y se ha dibujado en azul el segundo segmento, la modificación de Auerswald *et al.* (2014).

4.3.2.4 Suelos con fragmentos rocosos

La propuesta de Auerswald *et al.* (2014) para intentar mejorar el cálculo del factor K incluye el uso de un factor de reducción que incorpora el efecto de la cobertura superficial de los fragmentos rocosos. Otros autores también han trabajado en esta misma línea, como es el caso de Panagos *et al.* (2014) durante la confección del mapa del factor K en la Unión Europea. Junto a este mapa, estos autores elaboraron el que denominaron mapa del valor actualizado de la erosionabilidad del suelo (factor K_{st}), en el que incorporaron el efecto de la pedregosidad superficial también a través de un factor de reducción del valor del factor K .

Sin embargo, tanto Wischmeier y Smith (1978) como la RUSLE2 indican que la pedregosidad superficial debe considerarse en la estimación del factor C de cobertura del suelo, nunca para la estimación del factor K . La RUSLE2 es, incluso, más concreta y establece claramente que los efectos de los fragmentos de roca en superficie no deben tenerse en cuenta al estimar el factor de erosionabilidad y que sólo hay que considerar los fragmentos de roca en el interior del perfil, a través del ajuste de la clase de permeabilidad (USDA Agricultural Research Service, 2013, cap. 4).

4.4 PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR K

4.4.1 Síntesis de la problemática que presenta el cálculo del factor K

En las secciones anteriores hemos ido viendo cómo la formulación analítica de la obtención del factor K , tanto en su versión original (Wischmeier y Meyer, 1973) como en sus revisiones, presenta situaciones en las cuales los resultados se separan netamente de los que proporciona el nomograma. Aunque el análisis realizado se expondrá ampliamente en la sección 4.5, para el planteamiento metodológico de las correcciones necesarias exponemos, a continuación, las desviaciones detectadas:

- Obtención del parámetro M para suelos con un contenido superior al 70 % en limo más AMF: en la formulación original no se le daba solución; el modelo RUSLE2 plantea ecuaciones de ajuste deficiente; la extensión de Auerswald *et al.* (2014) plantea ecuaciones con mal ajuste que presentan un salto brusco respecto al primer segmento de la función.
- Corrección de la primera aproximación de K según el contenido en MO: se han detectado discrepancias entre la parte analítica y la gráfica cuando se incluye la MO.

- Adición del subfactor de la estructura K_s cuando $K_1 + K_s$ se aproxima al valor límite de 0,07: en la formulación original no se le daba solución; el modelo RUSLE2 plantea ecuaciones de ajuste deficiente; la extensión de Auerwald *et al.* (2014) plantea ecuaciones con un ajuste relativamente preciso, sin la adecuada continuidad con el primer segmento de la función.

A la vista de esta problemática se plantea, a continuación, una metodología analítica para la minimización de errores en el cálculo del factor K .

4.4.2 Primera aproximación de K

4.4.2.1 Parámetro M

Wischmeier y Meyer (1973) establecieron que su ecuación sólo se podía aplicar cuando la fracción de limo más AMF era menor del 70 %. Sin embargo, Wischmeier *et al.* (1971) no fueron tan concretos, indicando que la relación entre el factor K y el parámetro M cambiaba cuando el contenido en limo más AMF se acercaba al 70 %. Teniendo esto en cuenta, hemos decidido revisar este límite, con la idea de mejorar el ajuste de la ecuación.

La metodología seguida para definir una nueva ecuación que se ajuste a la familia de curvas que permite el cálculo del parámetro M , en la zona no descrita por la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973), ha consistido en: (i) un análisis visual para definir con más precisión el límite de la transición; (ii) digitalización de las curvas del nomograma a partir de ese nuevo límite para obtener las coordenadas de sus puntos; (iii) regresión mínimo cuadrática a partir de esos puntos, forzando a que la ecuación resultante conecte con el valor que la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) proporciona para el límite.

4.4.2.2 Subfactor de la materia orgánica

Hemos detectado una discrepancia, nunca antes comentada, entre las curvas correspondientes a la ecuación (4.2) y la familia de curvas del nomograma (véase Figura 4.3), en ambos casos representación de la relación entre M y K_1 para distintos valores de la MO. Si bien la diferencia entre ellas es obvia, no es fácil dilucidar dónde se encuentra el error.

La USLE fue concebida como una herramienta de planificación de la conservación a nivel de campo, no como una herramienta de investigación. Por eso se diseñó como un modelo fácil de usar, en el que los factores se encontraban en tablas y gráficos impresos, y los

cálculos se hacían manualmente (Renard *et al.*, 2011). Así, Wischmeier *et al.* (1971) presentaron inicialmente sólo el nomograma del factor K , de manejo más sencillo que una ecuación y útil tanto para técnicos como para profanos.

Aunque Wischmeier *et al.* (1971) no incluyeron ninguna ecuación en su trabajo, sí que mencionaron su existencia y especificaron que el nomograma que presentaban proporcionaba soluciones inmediatas a dicha ecuación. En los mismos términos se expresaron tanto Wischmeier y Meyer (1973) como Wischmeier y Smith (1978), indicando explícitamente que el nomograma resolvía la ecuación elaborada para estimar el valor del factor K . Recordemos, además, que Wischmeier y Mannering (1969) ya habían desarrollado una ecuación para estimar el valor del factor K , en esta ocasión con 24 términos. Parece evidente, por tanto, que la ecuación de 5 parámetros ya existía en 1971 y que la resolvieron gráficamente en el nomograma para evitar el cálculo manual.

Apoyándonos en esta idea, se debe aceptar como válida la ecuación (4.2) y asumir que se cometió un error al representarla en el nomograma. Así, toda estimación del factor K que se haga utilizando el nomograma, para cualquier rango de texturas, estará sometida a un error.

4.4.3 Subfactor de la estructura

Para determinar una nueva ecuación que se ajuste a la curvatura que se aprecia en esta sección del nomograma, correspondiente a valores bajos de la primera aproximación de K , se han seguido los siguientes pasos: (i) estimación por observación visual del inicio de la curvatura; (ii) digitalización de las curvas para obtener las coordenadas de sus puntos; (iii) regresión mínimo cuadrática a partir de esos puntos, asumiendo que se trata de parábolas e imponiendo la condición de que pasen por el origen y el inicio de la recta correspondiente.

Cuando el código de la estructura, b , es igual a 4, el procedimiento aplicado ha sido algo diferente, debido a la dificultad que supone digitalizar los puntos en esta zona. En este caso no hemos realizado el paso (ii) y en el paso (iii) hemos añadido la condición de que la parábola sea tangente a la recta en el punto de unión.

4.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.5.1 Primera aproximación de K

4.5.1.1 Parámetro M

La propuesta que presentamos en este trabajo para calcular el parámetro relativo al tamaño de las partículas, M , es la siguiente:

$$M = \begin{cases} t' \cdot (t' + d') & \text{si } t' \leq 67\% \\ M_1 & \text{si } t' > 67\% \text{ y } M_1 \leq 8000 \end{cases} \quad (4.18)$$

donde M_1 viene dado por

$$M_1 = 67 \cdot (67 + d') + (t' - 67) \cdot (-2,416 \cdot d' - 17,03 \cdot t' + 0,02491 \cdot d'^2 + 0,1103 \cdot t'^2 + 0,03238 \cdot t' \cdot d' + 730,8) \quad (4.19)$$

La representación de la ecuación (4.18) sobre el nomograma, para distintos valores de la fracción de ANMF, se puede ver en la Figura 4.9. El primer segmento, coincidente con la ecuación original de Wischmeier y Meyer (1973), lo seguimos dibujando en fucsia y la ampliación propuesta la hemos dibujado en amarillo.

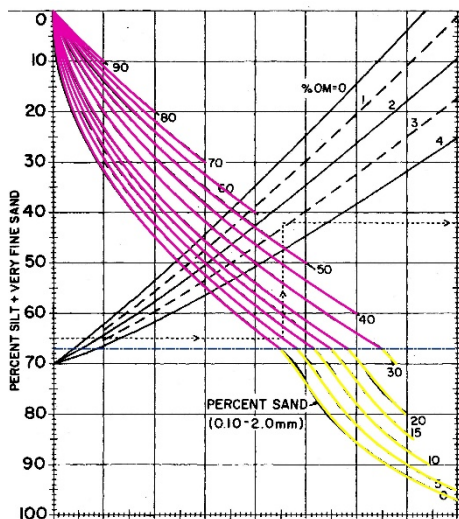


Figura 4.9. Representación sobre el nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) de la ecuación que calcula el parámetro M , para distintos valores de la fracción de ANMF. En fucsia la parte correspondiente a la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) y en amarillo nuestra propuesta.

Las parábolas que representan la ecuación (4.5) coinciden casi exactamente con las curvas del nomograma, tal y como se ha podido comprobar desde la Figura 4.2. Aparte de pequeñas imprecisiones en su trazado, la zona donde peor se ajustan es al acercarse al límite de aplicación de la ecuación, para valores de la fracción de limo más AMF próximos al 70 % (véase detalle en la Figura 4.10). A la vista de esta Figura 4.10, hemos decidido reducir el límite de aplicación de la ecuación (4.5) a un valor de 67 %. Modificar este límite no supone ninguna complicación de cálculo ni cambios conceptuales, pero sí nos ha permitido reproducir con más fidelidad la información del nomograma. En la revisión que realizaron en la RUSLE2 ya optaron por reducir este límite a un valor de 68 %, de forma acertada a la vista de la Figura 4.10. Auerswald *et al.* (2014), sin embargo, decidieron mantener el límite original de 70 %, debido, probablemente, a que su trabajo se centraba en la ecuación de Wischmeier y Smith (1978).

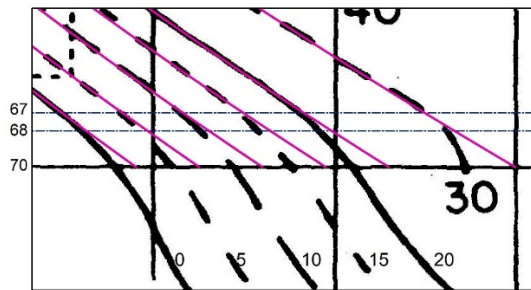


Figura 4.10. Detalle de la zona del nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) donde las curvas que permiten el cálculo del parámetro M experimentan un cambio. En fucsia la representación de la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) para el cálculo del parámetro M .

Por otro lado, en el nomograma no se representan valores del parámetro M por encima de 8000, lo cual afecta a suelos con un porcentaje de limo más AMF muy alto, variable según el contenido en ANMF. La consecuencia es que la ecuación (4.18) tiene un límite superior de aplicación, no siendo válidos los valores de M_1 superiores a 8000. La trascendencia de esta limitación es mínima; si consideramos los 307 705 registros de la base de datos del USDA-NCSS utilizados en el Capítulo 2, sólo 71 de ellos tienen un valor de M_1 superior a 8000, es decir, apenas un 0,02 %.

Tanto la ampliación propuesta en este trabajo como la de la RUSLE2 cumplen la deseable condición de continuidad entre los dos segmentos de la ecuación. La mejora que aportamos frente a la RUSLE2 es el mejor ajuste a las curvas del nomograma, como se puede comprobar al comparar la Figura 4.9. con la Figura 4.5. Las curvas que representan nuestra

ecuación coinciden casi exactamente con las dibujadas en el nomograma, mientras que, en el caso de la ampliación de la RUSLE2, las curvas están desplazadas hacia la derecha. Así, mientras que nuestra propuesta proporciona valores del factor K iguales a los obtenidos utilizando esta parte del nomograma, la ampliación de la RUSLE2 sobreestima los valores del factor K .

Respecto a la extensión de Auerswald *et al.* (2014), su representación sobre el nomograma ha mostrado un ajuste muy deficiente (véase la Figura 4.7), presentando discontinuidad con el primer segmento de la ecuación y un excesivo desplazamiento de las curvas obtenidas hacia la derecha. Esto explica por qué los valores del factor K que se obtienen con su extensión son siempre mayores a los que proporciona el nomograma, pudiendo superar, incluso, el valor máximo que se establece en el mismo; así como el salto brusco que se produce en los valores del factor K cuando la fracción de limo más AMF sobrepasa el 70 %.

Ilustremos las deficiencias de las dos ampliaciones analizadas a través de un ejemplo, en el que calcularemos el valor del subfactor correspondiente a la textura, k_t , que, recordemos, es el valor que toma K_1 cuando el contenido en MO es igual al 2 %. Supongamos un horizonte superior con un 10 % de arena, un 85 % de limo, un 5 % de arcilla y un 5 % de AMF. Si entramos con estos datos en el nomograma, el valor del parámetro M que le corresponde al horizonte es 7000, básicamente igual al que obtenemos con la ecuación (4.18), nuestra propuesta, que arroja un valor de 7000,7. Si introducimos estos valores de M en la ecuación (4.3), obtenemos un valor de k_t de 0,508 en ambos casos. La ecuación (4.11), la aportación de RUSLE2, arroja un valor de k_t para este horizonte de 0,532 y la ecuación (4.15), la extensión de Auerswald *et al.* (2014), un valor de 0,689. Es decir, que estaríamos ante un error relativo de un 4,7 % en el caso de la propuesta de RUSLE2 y de un 35,6 % en la de Auerswald *et al.* (2014).

La principal limitación del nomograma deriva del hecho de que se trata de una medida empírica y, como tal, no se debe extrapolar más allá de los datos que se utilizaron para su elaboración. En el caso concreto de la textura, el 81 % de las muestras utilizadas para obtener el nomograma correspondían a suelos de textura media (Renard *et al.*, 1997), de ahí que tenga un mejor ajuste para suelos con este tipo de texturas (USDA Agricultural Research Service, 2013, cap. 4). De hecho, los valores del factor K que proporciona el nomograma son demasiados altos cuando se trata de suelos muy arcillosos y demasiado bajos

en suelos muy limosos (USDA Agricultural Research Service, 2008, cap. 7). Sería conveniente, para precisar dónde se ajusta mejor el nomograma, concretar cuáles son esas texturas medias.

Wischmeier *et al.* (1971) sólo indican que utilizaron 55 muestras de suelo para la elaboración del nomograma, las mismas con las que Wischmeier y Mannering (1969) desarrollaron su ecuación de 24 términos, aunque con cuatro excepciones: descartaron cuatro muestras cuyos análisis estaban incompletos y añadieron cuatro muestras arenosas. La información sobre las clases texturales de esas 55 muestras y el rango de los valores de algunas de sus propiedades (Wischmeier y Mannering, 1969, tabla 1) nos ha permitido deducir que 53 de ellas proceden de las 57 muestras utilizadas por Mannering (1967). La Figura 4.11 muestra la localización de estas muestras sobre el triángulo de textura, así como las clases texturales de los suelos utilizados por Wischmeier y Mannering (1969). La Figura 4.11 también nos permite identificar claramente las 4 muestras arenosas que añadieron Wischmeier *et al.* (1971), pero desconocemos qué muestras fueron desechadas.

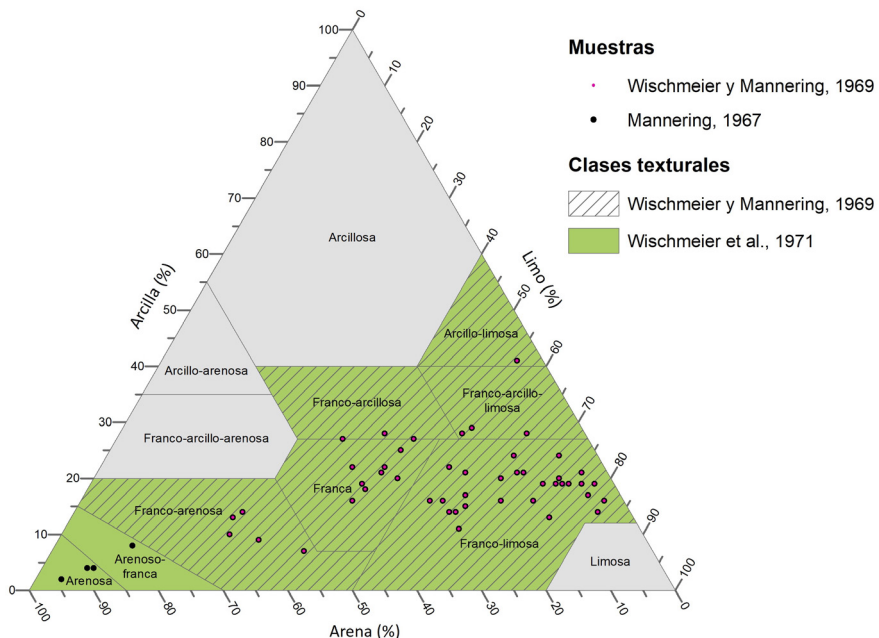


Figura 4.11. Localización en el triángulo de textura de las muestras utilizados por Mannering (1967) y por Wischmeier y Mannering (1969), junto con la identificación de las clases texturales de las muestras de suelo utilizadas para elaborar el nomograma de Wischmeier *et al.* (1971).

A partir de esta información podemos identificar las clases texturales de las muestras de suelo que fueron utilizadas para elaborar el nomograma, indicadas en verde en la Figura 4.11, clases en las que el ajuste del nomograma será mejor. Así, el cálculo del factor K para suelos con clase textural diferente, concretamente suelos de la clase arcillosa, arcillo-arenosa, franco-arcillo-arenosa o limosa, implica que se está realizando una extrapolación. Podríamos acotar gráficamente algo más este rango de texturas, mediante la envolvente de los puntos representados, pero la falta de certeza de cuáles fueron exactamente las muestras utilizados por Wischmeier *et al.* (1971) no lo aconseja.

4.5.1.2 Subfactor de la materia orgánica

La única modificación que se ha propuesto hasta el momento para el subfactor k_o es la planteada por Auerswald *et al.* (2014), que lo extienden más allá del límite del 4 % de MO. Estos autores se basaron en los estudios de Trott y Singer (1983) y en que los suelos que utilizaron Wischmeier y Mannering (1969) tenían un contenido en MO de hasta un 5,5 %. Ahora bien, insistimos en el hecho de que el nomograma es una medida empírica, que no debería extrapolarse más allá del rango de valores que se muestran en él. Wischmeier *et al.* (1971) no determinaron si el factor K disminuía, o cuánto disminuía, cuando la MO era mayor de 4 %, y en la guía del usuario de la RUSLE2 ni recomiendan ni permiten valores de MO superiores al 4 % (Foster *et al.*, 2003). Además, según hemos comentado en la sección anterior, no tenemos la certeza de cuáles fueron las 55 muestras que utilizaron Wischmeier *et al.* (1971) para la elaboración del nomograma, pues no coinciden totalmente con las empleadas por Wischmeier y Mannering (1969), pudiendo ser la muestra con un 5,5 % de MO una de las cuatro que fueron descartadas.

Respecto a la discrepancia observada entre la ecuación (4.2) y la familia de curvas del nomograma (Figura 4.3), las diferencias varían según el contenido en MO. Para valores de la MO del 3 % y del 2 % estas diferencias son pequeñas, pero cuando el porcentaje de la MO disminuye o cuando aumenta, las diferencias son mayores, produciendo el nomograma una sobreestimación o una subestimación, respectivamente, de los valores del factor K . Así, por ejemplo, cuando la MO es 0 %, el error absoluto medio cometido en la estimación de la primera aproximación de K es de 0,03, alcanzando un máximo de 0,054, y cuando la MO es 4 %, se produce un error absoluto medio en la estimación de la primera aproximación de K de -0,018, con un máximo de -0,023.

El uso de la ecuación (4.2) permite calcular K_1 a partir del parámetro M y de la MO de forma correcta, independientemente de si M se ha obtenido a través de la ecuación (4.5) o de las curvas del nomograma. De hecho, es la ecuación (4.5) la que es sólo válida para suelos que contienen menos de un 70 % de limo más AMF, no la ecuación (4.2). Pero el uso del nomograma para estimar K_1 está sometido siempre a un error.

Desde que fue creado en 1971, se ha fomentado el uso del nomograma frente al de la ecuación, al menos hasta que aparecieron RUSLE1 y RUSLE2. Esto se aprecia en el ejemplo que Wischmeier y Meyer (1973, tabla 1) muestran para explicar el procedimiento de uso del nomograma, en el que los valores del factor K que aparecen en la tabla, procedentes de la lectura sobre el nomograma, no coinciden con los valores que obtendríamos al aplicar la ecuación a los mismos datos del ejemplo. Recordemos que es en este trabajo donde Wischmeier y Meyer (1973) revelaron esta ecuación que subyace al nomograma.

Por otro lado, cuando los suelos tienen más del 70 % de limo más AMF, la práctica habitual era recurrir al nomograma, necesario, al menos, para obtener el valor del parámetro M . Si consideramos los 307 705 registros de la base de datos del USDA-NCSS que hemos utilizado en el Capítulo 2, el 16,5 % de ellos tienen más del 70 % de limo más AMF. Este porcentaje nos permite hacernos una idea del alcance del error que se ha estado cometiendo.

Con la nueva ecuación que presentamos en este trabajo para calcular el valor del parámetro M , la ecuación (4.18), es posible prescindir por completo del nomograma para calcular K_1 , por lo que esta fuente de error queda eliminada de forma definitiva.

4.5.2 Subfactor de la estructura

La ecuación propuesta en este trabajo para remplazar la familia de líneas del nomograma que incorporan el efecto de la estructura es:

$$K_{1S} = \begin{cases} K_1 + K_S & \text{si } K_1 + K_S \geq 0,106 \\ K'_{1S} & \text{si } K_1 + K_S < 0,106 \end{cases} \quad (4.20)$$

donde K'_{1S} viene dado por:

$$K'_{1S} = (0,8726 + 1,3913 \cdot b - 0,3117 \cdot b^2 + 0,0238 \cdot b^3) \cdot K_1^2 + (-0,0843 + 0,1099 \cdot b - 0,0608 \cdot b^2 + 0,0215 \cdot b^3) \cdot K_1 + 0,07 \quad (4.21)$$

Un detalle de la representación de esta ecuación sobre el nomograma, para los 4 valores que puede tomar el código de estructura, b , se muestra en la Figura 4.12. En fucsia el

primer segmento, coincidente con la ecuación original de Wischmeier y Meyer (1973), y en amarillo el segundo segmento.

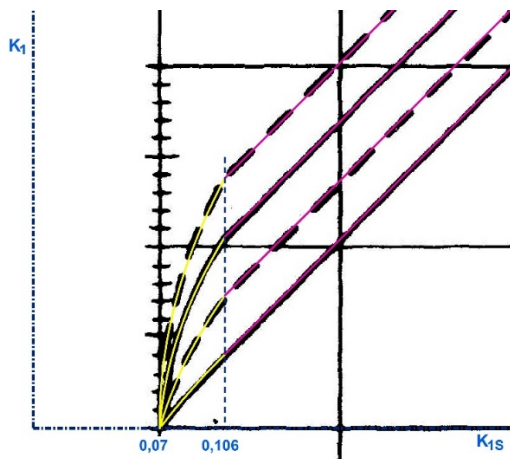


Figura 4.12. Detalle de la representación sobre el nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) de la ecuación que incluye el efecto de la estructura del suelo sobre la erosionabilidad. En fucsia la parte correspondiente a la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) y en amarillo la mejora propuesta en este trabajo.

Con la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) las 4 rectas de la estructura se prolongan más allá del eje vertical representado en el nomograma (véase Figura 4.4). Como consecuencia de este defecto, cuando los valores de K_1 son bajos, valor variable según el código de la estructura, la ecuación arroja valores del factor K por debajo del mínimo que establece el nomograma para cada clase de permeabilidad. Es más, existe incluso la posibilidad de obtener valores negativos del factor K .

La manera en que la RUSLE2 abordó este problema fue asignando a K_{1S} un valor constante de 0,07 cuando los valores que proporciona la ecuación (4.8) quedan a la izquierda del eje vertical del nomograma. Esto equivale a asignarles directamente a estos suelos un factor K de erosionabilidad mínimo, que variará según la clase de permeabilidad. Con esta aproximación se consiguen valores del factor K dentro del rango admisible, pero sigue sin adaptarse a las curvas del nomograma.

La extensión de Auerswald *et al.* (2014) se ajusta mejor a estas curvas, pero su aportación presenta dos inconvenientes (véase Figura 4.8). En primer lugar, prolonga el segundo segmento de la ecuación más de lo necesario, pues tomaron un valor fijo de la primera aproximación de K como límite para la transición a la zona curva. En segundo lugar, la falta de continuidad entre los dos segmentos de la ecuación.

La ecuación propuesta en este trabajo proporciona valores que coinciden exactamente con las curvas del nomograma, además de presentar continuidad entre los dos segmentos (véase la Figura 4.12), mejorando de esta forma la modificación de la RUSLE2 y la de Auerswald *et al.* (2014). Los puntos donde se inicia la curvatura de cada una de las 4 rectas tienen un valor de K_1 diferente, pero sí tienen en común el valor de la coordenada K_{1S} . Tras una estimación visual, se asignó a esta coordenada el valor de 0,106. En la RUSLE2 se procedió de forma similar, pero ellos asignaron a K_{1S} un valor de 0,07.

4.5.3 Propuesta final para el cálculo del factor K

Recopilamos, a continuación, el conjunto de ecuaciones propuestas en este trabajo para el cálculo del factor K de erosionabilidad de la USLE:

$$K = K_{1S} + K_P$$

$$K_{1S} = \begin{cases} K_1 + K_S & \text{si } K_1 + K_S \geq 0,106 \\ K'_{1S} & \text{si } K_1 + K_S < 0,106 \end{cases}$$

$$K_1 = k_t \cdot k_o$$

$$k_t = 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot M^{1,14}$$

$$M = \begin{cases} t' \cdot (t' + d') & \text{si } t' \leq 67\% \\ M_1 & \text{si } t' > 67\% \text{ y } M_1 \leq 8000 \end{cases}$$

$$M_1 = 67 \cdot (67 + d') + (t' - 67) \cdot (-2,416 \cdot d' - 17,03 \cdot t' + 0,02491 \cdot d'^2 + 0,1103 \cdot t'^2 + 0,03238 \cdot t' \cdot d' + 730,8)$$

$$k_o = (12 - a) \cdot 10^{-1} \quad \text{para } a \leq 4\%$$

$$K_S = 3,25 \cdot 10^{-2} \cdot (b - 2)$$

$$K'_{1S} = (0,8726 + 1,3913 \cdot b - 0,3117 \cdot b^2 + 0,0238 \cdot b^3) \cdot K_1^2 + (-0,0843 + 0,1099 \cdot b - 0,0608 \cdot b^2 + 0,0215 \cdot b^3) \cdot K_1 + 0,07$$

$$K_P = 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot (c - 3)$$

donde: K_{1S} es el valor obtenido tras aplicar la información de la estructura a la primera aproximación de K

K_P es el subfactor de la permeabilidad

K_1 es la primera aproximación de K

K_S es el subfactor correspondiente a la estructura

k_t es el subfactor correspondiente a la textura

k_o es el subfactor función de la MO

M es el parámetro relativo al tamaño de las partículas

t' es la fracción de limo más AMF, en porcentaje

d' es la fracción de ANMF, en porcentaje

a es el contenido en MO, en porcentaje

b es el código que se asigna a la estructura del suelo

c es la clase de permeabilidad del perfil

Los valores del parámetro M superiores a 8000 y de la MO mayores del 4 % no se contemplan en el nomograma, por lo que la ecuación no será aplicable en esos casos.

Recordamos que los valores del factor K que proporciona esta ecuación vienen expresados en $(0,01 \cdot \text{ton} \cdot \text{acre} \cdot \text{h})/(\text{acre} \cdot \text{ft-tonf} \cdot \text{in})$. Para su conversión a las unidades del Sistema Internacional, por ejemplo en $(\text{t} \cdot \text{ha} \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{ha} \cdot \text{mm})$, hay que multiplicar el valor del factor K obtenido por 0,1317.

4.6 CONCLUSIONES

Dada la importancia del factor K de la USLE como herramienta para estimar la erosionabilidad del suelo, hemos realizado una revisión en profundidad tanto del nomograma como de las ecuaciones que se utilizan para su cálculo.

En relación al nomograma, hemos identificado deficiencias en su representación, concretamente en la familia de curvas que incorpora la MO para obtener la primera aproximación de K . Estas curvas no se corresponden con la función matemática que supuestamente les da origen, sino que están desplazadas, en especial las correspondientes al 0 %, 1 % y 4 % de MO. Como consecuencia, la utilización del nomograma para calcular el factor K proporciona lecturas erróneas.

Hemos especificado las clases texturales de las muestras de suelo utilizadas para la elaboración del nomograma, concluyendo que los puntos del triángulo de textura localizados en las clases texturales arcillosa, arcillo-arenosa, franco-arcillo-arenosa y limosa no pertenecen al campo de definición del factor K . Por tanto, si se calcula el factor K para suelos con estas texturas, debemos ser conscientes de que estamos realizando una extrapolación.

El conjunto de ecuaciones que presentamos en este trabajo permiten prescindir totalmente del nomograma para la obtención del factor K . Lo reproducen fielmente en aquellas zonas donde la ecuación original no era aplicable o era imprecisa, mejor que cualquiera de las propuestas anteriores, y presentan continuidad en las zonas de cambio de curvatura, sin producir saltos bruscos en la estimación de los valores. Con estas ecuaciones es posible recurrir a la potente capacidad actual de cálculo informatizado, evitando la engorrosa y bastante imprecisa tarea de realizar las lecturas sobre el nomograma. Se evitan también los errores comentados sobre la representación de las curvas de la MO.

4.7 REFERENCIAS

- Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., & Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 203-225. doi:10.1016/j.iswcr.2019.05.004
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment. part 1: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. doi:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x
- Auerswald, K., Fiener, P., Martin, W., & Elhaus, D. (2014). Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: An alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. *Catena*, 118, 220-225. doi:10.1016/j.catena.2014.01.008
- Bagarello, V., Di Piazza, G. V., Ferro, V., & Giordano, G. (2008). Predicting unit plot soil loss in Sicily, South Italy. *Hydrological Processes*, 22(5), 586-595. doi:10.1002/hyp.6621

- Bagarello, V., Di Stefano, V., Ferro, V., Giordano, G., Iovino, M., & Pampalone, V. (2012). Estimating the USLE soil erodibility factor in Sicily, South Italy. *Applied Engineering in Agriculture*, 28(2), 199-206. doi:10.13031/2013.41347
- Bagarello, V., Ferro, V., & Giordano, G. (2010). Testing alternative erosivity indices to predict event soil loss from bare plots in Southern Italy. *Hydrological Processes*, 24(6), 789-797. doi:10.1002/hyp.7538
- Bagarello, V., Ferro, V., & Pampalone, V. (2015). A new version of the USLE-MM for predicting bare plot soil loss at the Sparacia (South Italy) experimental site. *Hydrological Processes*, 29(19), 4210-4219. doi:10.1002/hyp.10486
- Beretta-Blanco, A., & Carrasco-Letelier, L. (2017). USLE/RUSLE K-factors allocated through a linear mixed model for Uruguayan soils. *Ciencia e Investigacion Agraria*, 44(1), 100-112. doi:10.7764/rcia.v44i1.1622
- Bezák, N., Mikoš, M., Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., . . . Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: A bibliometric analysis. *Environmental Research*, 197, 111087. doi:10.1016/j.envres.2021.111087
- Cronshey, R. G., & Theurer, F. D. (1998). AnnAGNPS: Non-point pollutant loading model. In *Proceedings of the First Interagency Hydrologic Modeling Conference, April 19-23, 1998, Las Vegas, Nevada: Vol. 1 (pp. 1.9 -1.16)*, Reston, Virginia: USGS Water Information Coordination Program.
- Fenta, A. A., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Poesen, J., Tsubo, M., Borrelli, P., . . . Kurosaki, Y. (2020). Land susceptibility to water and wind erosion risks in the East Africa region. *Science of the Total Environment*, 703, 135016. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135016
- Flacke, W., Auerswald, K., & Neufang, L. (1990). Combining a modified universal soil loss equation with a digital terrain model for computing high resolution maps of soil loss resulting from rain wash. *Catena*, 17(4), 383-397. doi:10.1016/0341-8162(90)90040-K
- Foster, G. R., McCool, D. K., Renard, K. G., & Moldenhauer, W. C. (1981). Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 36(6), 355-359.

- Foster, G. R., Yoder, D.C., Weesies, G.A., McCool, D.K., McGregor, K.C., & Bingner, R.L. (Coordinators) (2003). *Revised universal soil loss equation, version 2 (RUSLE2): User's Guide, Draft*. Washington, D.C.: USDA-Agricultural Research Service.
- Kinnell, P. I. A. (2007). Runoff dependent erosivity and slope length factors suitable for modelling annual erosion using the Universal Soil Loss Equation. *Hydrological Processes*, 21(20), 2681-2689. doi:10.1002/hyp.6493
- Kinnell, P. I. A. (2010). Event soil loss, runoff and the universal soil loss equation family of models: A review. *Journal of Hydrology*, 385(1-4), 384-397. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.01.024
- Kinnell, P. I. A., & Risse, L. M. (1998). USLE-M: Empirical modeling rainfall erosion through runoff and sediment concentration. *Soil Science Society of America Journal*, 62(6), 1667-1672. doi:10.2136/sssaj1998.03615995006200060026x
- Lafren, J. M., & Flanagan, D. C. (2013). The development of U. S. soil erosion prediction and modeling. *International Soil and Water Conservation Research*, 34(2), 1-11. doi:10.1016/S2095-6339(15)30034-4
- Lafren, J. M., & Moldenhauer, W. C. (2003). *Pioneering soil erosion prediction-the USLE story* (Special Publication ed.) Beijing, China: World Association of Soil and Water Conservation.
- Liu, B., Zhang, K., & Xie, Y. (2002). An empirical soil loss equation. In *Proceedings of 12th ISCO Conference*. Beijing: Tsinghua Press.
- Mannering, J. V. (1967). The relationships of some physical and chemical properties of soils to surface sealing. Ph.D Thesis Purdue University
- Meyer, L. (1984). Evolution of the universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 39(2), 99-104.
- Ostovari, Y., Ghorbani-Dashtaki, S., Bahrami, H. A., Abbasi, M., Dematte, J. A. M., Arthur, E., & Panagos, P. (2018). Towards prediction of soil erodibility, SOM and CaCO₃ using laboratory Vis-NIR spectra: A case study in a semi-arid region of Iran. *Geoderma*, 314, 102-112. doi:10.1016/j.geoderma.2017.11.014
- Ostovari, Y., Ghorbani-Dashtaki, S., Bahrami, H. A., Naderi, M., Dematte, J. A. M., & Kerry, R. (2016). Modification of the USLE K factor for soil erodibility assessment on

- calcareous soils in Iran. *Geomorphology*, 273, 385-395. doi:10.1016/j.geomorph.2016.08.003
- Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., & Alewell, C. (2014). Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. *Science of the Total Environment*, 479-480(1), 189-200. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.02.010
- Panagos, P., Meusburger, K., Alewell, C., & Montanarella, L. (2012). Soil erodibility estimation using LUCAS point survey data of Europe. *Environmental Modelling and Software*, 30, 143-145. doi:10.1016/j.envsoft.2011.11.002
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (Coordinators) (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Agriculture Handbook 703. Tucson, Arizona: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Renard, K. G., Yoder, D. C., Lightle, D. T., & Dabney, S. M. (2011). Universal soil loss equation and revised universal soil loss equation. In R.P.C. Morgan and M.A. Nearing (Eds.), *Handbook of erosion modelling* (pp. 137-167). Chichester, UK: Wiley-Blackwell doi:10.1002/9781444328455.ch8
- Risse, L. M., Nearing, M. A., Nicks, A. D., & Laflen, J. M. (1993). Error assessment in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 57(3), 825-833. doi:10.2136/sssaj1993.03615995005700030032x
- Römkens, M. J. M., Young, R. A., Poesen, J. W. A., McCool, D. K., El-Swaify, S. A., & Bradford, J. M. (1997). Soil erodibility factor (K). In K. G. Renard, G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool & D. C. Yoder (Eds.), *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)* (Agriculture Handbook 703, pp. 65-99). Tucson, Arizona: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Schmidt, S., Ballabio, C., Alewell, C., Panagos, P., & Meusburger, K. (2018). Filling the European blank spot-Swiss soil erodibility assessment with topsoil samples. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(5), 737-748. doi:10.1002/jpln.201800128
- Shabani, F., Kumar, L., & Esmaeili, A. (2014). Improvement to the prediction of the USLE K factor. *Geomorphology*, 204, 229-234. doi:10.1016/j.geomorph.2013.08.008

- Soil Science Division Staff. (2017). *Soil Survey Manual*. C. Ditzler, K. Scheffe, and H.C. Monger (eds.). USDA Handbook 18. Washington, D.C.: Government Printing Office.
- Soil Survey Staff. (1951). *Soil survey manual*. Agriculture Handbook 18. Washington, D.C.: USDA Agricultural Research Administration.
- Teng, H., Rossel, R. A. V., Shi, Z., Behrens, T., Chappell, A., & Bui, E. (2016). Assimilating satellite imagery and visible-near infrared spectroscopy to model and map soil loss by water erosion in Australia. *Environmental Modelling & Software*, 77, 156-167. doi:10.1016/j.envsoft.2015.11.024
- Trott, K. E., & Singer, M. J. (1983). Relative erodibility of 20 California range and forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 47(4), 753-759. doi:10.2136/sssaj1983.03615995004700040029x
- USDA Agricultural Research Service. (2013). *Science Documentation: Revised universal soil loss equation, version 2 (RUSLE2)*. Washington, D.C.: USDA Agricultural Research Service. https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/60600505/RUSLE/RUSLE2_Science_Doc.pdf
- USDA Agricultural Research Service. (2008). *User's reference guide: Revised universal soil loss equation, version 2 (RUSLE2)*. Washington, D.C.: USDA Agricultural Research Service. https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/60600505/RUSLE/RUSLE2_User_Ref_Guide.pdf
- Vaezi, A. R., Sadeghi, S. H. R., Bahrami, H. A., & Mahdian, M. H. (2008). Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. *Geomorphology*, 97(3), 414-423. doi:10.1016/j.geomorph.2007.08.017
- Van Rompaey, A. J. J., Verstraeten, G., Van Oost, K., Govers, G., & Poesen, J. (2001). Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1221-1236. doi:10.1002/esp.275
- Wang, B., Zheng, F., & Guan, Y. (2016). Improved USLE-K factor prediction: A case study on water erosion areas in China. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(3), 168-176. doi:10.1016/j.iswcr.2016.08.003
- Williams, J. R. (1975). Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment*

Yield and Sources, ARS-S-40 (pp. 244-252). New Orleans: USDA Agricultural Research Service, Southern Region.

Williams, J. R., Renard, K. G., & Dyke, P. T. (1983). EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 38(5), 381-383.

Wischmeier, W. H. (1976). Use and misuse of the universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 3, 5-9.

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(5), 189-193.

Wischmeier, W. H., & Mannering, J. V. (1969). Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Science Society of American Proceedings*, 33, 131-137.

Wischmeier, W. H., & Meyer, L. D. (1973). Soil erodibility on construction areas. In *Proceedings of the Conference-Workshop Soil Erosion: Causes and Mechanisms; Prevention and Control, January 26, 1973, Special Report 135 (20 -29)*, Washington, D.C.: Highway Research Board, National Academy of Sciences.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1965). *Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Guide for selection of practices for soil and water conservation*. Agriculture Handbook 282. Washington DC: USDA Agricultural Research Service.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Agriculture Handbook 537. Washington DC: USDA, Science and Education Administration.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1961). A universal equation for predicting rainfall-erosion losses – An aid to conservation farming in humid regions. *ARS Special Report 22-66 (11 pp)*. Washington DC: USDA Agricultural Research Service

Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D. D., & Anderson, W. P. (1989). AGNPS – A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, 44(2), 168-173.

4.8 APÉNDICES

Apéndice 4A. Dedución de la expresión del parámetro M en las ampliaciones de RUSLE2 y Auerswald

El procedimiento seguido para deducir la expresión del parámetro M que complementa a la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) ha sido el mismo tanto en la ampliación presentada en la RUSLE2 como en la propuesta por Auerswald *et al.* (2014).

La ecuación desarrollada por Wischmeier y Meyer (1973) para calcular la primera aproximación de K , la ecuación (4A.1), es una función de la MO y del parámetro M , para todo valor de M , independientemente de cómo haya sido obtenido, bien a través de la ecuación (4.5), mediante lectura directa sobre el nomograma o con una nueva ecuación que se ajuste a la familia de curvas del nomograma.

$$K_1 = k_t \cdot k_o \quad (4A.1)$$

El subfactor correspondiente a la MO, k_o , no ha sido modificado en ninguna de las dos propuestas, por lo que consideramos únicamente el subfactor de la estructura:

$$k_t = 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot M^{1,14} \quad (4A.2)$$

Designemos como M_A al valor que toma el parámetro M cuando los valores de la fracción de limo más AMF son superiores al límite de aplicación de la ecuación (4.5), a saber, 68 % en el caso de RUSLE2 o 70 % para la extensión de Auerswald *et al.* (2014). Podemos expresar entonces la ecuación (4A.2), para la ampliación, en función del nuevo valor M_A :

$$k_t = 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot M_A^{1,14} \quad (4A.3)$$

Aplicando logaritmos a ambos lados de la igualdad, se deduce la siguiente expresión:

$$\log M_A = \frac{\log k_t - \log(2,1 \cdot 10^{-5})}{1,14} \quad (4A.4)$$

La ecuación para calcular los valores de M_A , para la sección del nomograma con valores de la fracción de limo más AMF superiores al 68 % o al 70 %, según el caso, quedaría de la siguiente forma:

$$M_A = 10^{\frac{\log k_t - \log(2,1 \cdot 10^{-5})}{1,14}} \quad (4A.5)$$

donde k_t es el subfactor correspondiente a la textura propuesto en cada una de las dos ampliaciones.

Capítulo 5. Conclusiones generales y aplicación

5.1 SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS ALCANZADOS

En el capítulo introductorio de este documento hicimos referencia a tres problemas concretos relacionados con la aplicación práctica del factor K de la USLE. Estos problemas definieron los tres objetivos planteados en este trabajo, que han sido desarrollados en los capítulos 2, 3 y 4. Presentamos, a continuación, un compendio de las conclusiones alcanzadas en cada uno de estos capítulos.

5.1.1 Estimación de la fracción de arena muy fina a partir de las fracciones texturales básicas

De los tres modelos evaluados, ninguno ha ofrecido un rendimiento satisfactorio. La estimación de la fracción de arena muy fina (AMF) a partir únicamente de la fracción de arena USDA, como hacen los tres modelos, es muy imprecisa.

Todo modelo razonable para estimar la fracción de AMF que se base únicamente en las fracciones texturales básicas según el esquema de clasificación del USDA presentará una gran incertidumbre. Es necesario, por tanto, incorporar nuevas variables explicativas para mejorar la estimación.

La herramienta desarrollada en este trabajo, basada en una regresión cuantílica local (segmentada), permite medir el rendimiento de cualquier modelo que estime la fracción de AMF a partir de las fracciones texturales básicas USDA.

Así mismo, esta herramienta permite realizar estimaciones puntuales de la fracción de AMF a partir de las fracciones texturales básicas USDA, además de proporcionar un intervalo de predicción del 50 % para las mismas. La estimación puntual se obtendría a través del gráfico de la mediana condicional y los límites del intervalo de predicción estarían definidos por los valores proporcionados por el primer cuartil condicional y por el tercer cuartil condicional.

5.1.2 Estimación de las fracciones texturales básicas USDA a partir de las fracciones texturales básicas en el Sistema Internacional simplificado

Para cada uno de los cinco modelos evaluados se muestran, sobre el triángulo de textura, tanto sus regiones de aceptación, donde cada modelo proporciona predicciones que consideramos aceptables, como sus regiones de preferencia, zonas en las que las predicciones aceptables proporcionadas por un modelo en concreto son más precisas que las del resto de modelos. Cada uno de los modelos podría utilizarse en su respectiva región de aceptación.

Lo anterior nos permite concluir que la fórmula de regresión de Padarian-Minasny-McBratney (PMM) es, claramente, el mejor de los modelos evaluados, siendo aceptable en más de las dos terceras partes del triángulo de textura.

El rendimiento del modelo PMM medido en términos de R^2 alcanza un valor próximo a la cota máxima de 82,1 %. Esto implica que cualquier mejora medida en estos términos requiere la incorporación de nuevas variables explicativas a la modelización.

La herramienta desarrollada en este trabajo, basada en una regresión cuantílica local (segmentada), permite medir el rendimiento de cualquier modelo que estime la fracción de limo USDA a partir de las fracciones texturales básicas en el Sistema Internacional simplificado.

Así mismo, esta herramienta permite realizar estimaciones puntuales de la fracción de limo USDA a partir de las fracciones texturales básicas del Sistema Internacional simplificado, además de proporcionar un intervalo de predicción del 50 % para las mismas. La estimación puntual se obtendría a través del gráfico de la mediana condicional y los límites del intervalo de predicción estarían definidos por los valores proporcionados por el primer cuartil condicional y por el tercer cuartil condicional. Si bien esta herramienta no mejora el ajuste en términos de R^2 , sí permite ampliar la región de aceptación en el triángulo de textura.

5.1.3 El factor K de erosionabilidad del suelo de la USLE

La familia de curvas del nomograma de Wischmeier *et al.* (1971) para los distintos valores de la MO no se corresponde con la función matemática que supuestamente le da origen. Como consecuencia, toda estimación del factor K que se haga utilizando el nomograma está sometida a un error.

Los puntos de las clases texturales arcillosa, arcillo-arenosa, franco-arcillo-arenosa y limosa no pertenecen al campo de definición del factor K . Por consiguiente, si se calcula el factor K para suelos con estas texturas, debemos ser conscientes de que estamos realizando una extrapolación.

Respecto a las dos adaptaciones de la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) analizadas, la utilizada por la RUSLE2, sin ser un ajuste muy fino, proporciona valores aceptables, mientras que la propuesta de Auerswald *et al.* (2014) proporciona valores del todo inaceptables.

El conjunto de ecuaciones propuesto en este trabajo reproduce fielmente el nomograma en aquellas zonas donde la ecuación de Wischmeier y Meyer (1973) no se puede aplicar. Con ello nos referimos, por un lado, a la parte de la familia de curvas que permite el cálculo del factor M cuando los valores de la fracción de limo más AMF son superiores al 67 %; por otro, a los segmentos curvos de la familia de líneas que representan las distintas estructuras. Estas nuevas ecuaciones nos permiten prescindir totalmente del nomograma para el cálculo del factor K .

5.1.4 Conclusión final

Las mejoras aportadas en este trabajo suponen una revitalización del cálculo del factor K de la USLE/RUSLE, el modelo más utilizado a escala mundial para la estimación de la erosión del suelo, dado que proporcionan un dato con el que no se cuenta habitualmente, una estimación de la fracción de AMF, y facilitan el cálculo automático y sin error de dicho factor.

La posibilidad de estimar las fracciones texturales USDA a partir de las del Sistema Internacional simplificado, además de facilitar el cálculo del factor K , habilita la utilización de todo un conjunto de funciones de edafotransferencia de amplia aceptación en las ciencias del suelo.

5.2 APLICACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DE LA FRACCIÓN DE AMF AL CÁLCULO DEL FACTOR K

En esta última parte del trabajo mostramos un ejemplo de cómo la información textural que hemos obtenido en el Capítulo 2 se puede aplicar al cálculo del factor K de erosionabilidad de la USLE.

El análisis realizado en dicho Capítulo 2 nos permite estimar la fracción de AMF en el caso frecuente de que esta información no esté disponible. Para ello, recordemos, utilizamos el valor proporcionado por la Figura 2.4b (mediana condicional de la fracción de AMF) junto con el intervalo de predicción del 50 % delimitado por los valores proporcionados por la Figura 2.4a (primer cuartil condicional de la fracción de AMF) y la Figura 2.4c (tercer cuartil condicional de la fracción de AMF).

A partir de estos gráficos, aprovechando la circunstancia de que el factor K es una función monótona creciente de la fracción de AMF, hemos generado los gráficos de los cuartiles condicionales del factor K . Para ello, hemos utilizado el conjunto de ecuaciones desarrollado en este trabajo (véase la sección 4.5.3) y las hemos aplicado al caso concreto en que el horizonte superficial tenga un 2 % de MO, una estructura granular fina (código de la estructura b igual a 2) y forme parte de un perfil de permeabilidad moderada (clase de permeabilidad c igual 3). El resultado son los tres gráficos de la Figura 5.1.



Figura 5.1. Cuartiles condicionales del factor K para un contenido en materia orgánica del 2 %, código de la estructura b igual a 2 y clase de permeabilidad c igual 3. En unidades tradicionales de EE. UU. $[(0,01 \cdot \text{ton} \cdot \text{acre} \cdot \text{h})/(\text{acre} \cdot \text{ft} \cdot \text{tonf} \cdot \text{in})]$. Se indican también las clases texturales que quedan fuera del campo de definición del factor K .

Hemos etiquetado como “no aplicable” las zonas del triángulo de textura en las que se obtienen valores del parámetro M superiores a 8000, valores no contemplados en el nomograma. También hemos señalado, mediante un rayado, las clases texturales que quedan fuera del campo de definición del factor K , según ha quedado descrito en la sección 4.5.1.1.

Para ilustrar el funcionamiento de estos gráficos, continuamos con el ejemplo que se presentó en la sección 2.5, caso de un horizonte con un 93,4 % de arena, un 3,9 % de limo y un 2,7 % de arcilla. El valor estimado del factor K para un suelo de estas características sería 0,081 (Figura 5.1b), con un intervalo de predicción del 50 % entre 0,075 (Figura 5.1a) y 0,098 (Figura 5.1c), todos expresados en $(0,01 \cdot \text{ton} \cdot \text{acre} \cdot \text{h})/(\text{acre} \cdot \text{ft} \cdot \text{tonf} \cdot \text{in})$. Estos valores del factor K son los mismos que se obtienen aplicando la ecuación presentada en este trabajo (sección 4.5.3) a los valores de la fracción de AMF estimados con la Figura 2.4.

5.3 PRESENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA PARA FACILITAR EL CÁLCULO DEL FACTOR K DE LA USLE

Adjuntamos junto a este documento una aplicación, en formato MS-Access, que contiene los resultados obtenidos en este trabajo. Esta aplicación nos permite obtener fácilmente el valor del factor K de erosionabilidad de la USLE para un suelo dado en tres situaciones diferentes:

- Cuando conocemos todas las variables de entrada.
- Cuando conocemos todas las variables de entrada, excepto la fracción de AMF.
- Cuando la información textural que se conoce son las tres fracciones texturales básicas en el Sistema Internacional simplificado.

Cada una de estas opciones se presenta en formularios diferentes de Access, a los que hemos nombrado como “01_FactorK”, “02_FactorK_AMF” y “03_LimoUSDA_FactorK”. Explicamos a continuación la estructura y el funcionamiento de estos tres formularios.

5.3.1 Formulario “01_FactorK”

Este formulario calcula el valor del factor K de un suelo cuando conocemos las fracciones de arena, limo, arcilla y AMF según el esquema de clasificación del USDA, así como el resto

de parámetros necesarios. La Figura 5.2 muestra el esquema con la estructura de este formulario.

Los primeros datos que hay que introducir son las fracciones de arena, arcilla y AMF USDA, todas en porcentaje (se admite un decimal). La aplicación proporciona inmediatamente la siguiente información:

- Las tres fracciones texturales básicas USDA: se añade el porcentaje de la fracción de limo USDA, ya conocido, pues las tres fracciones deben sumar 100.
- Parámetro relativo al tamaño de las partículas, M : calculado con la ecuación (4.18), propuesta en este trabajo.
- Subfactor correspondiente a la textura k_t : valor que toma la primera aproximación de K cuando el valor de la materia orgánica (MO) es 2 %. Obtenido a partir de la ecuación (4.3), de Wischmeier y Meyer (1973).

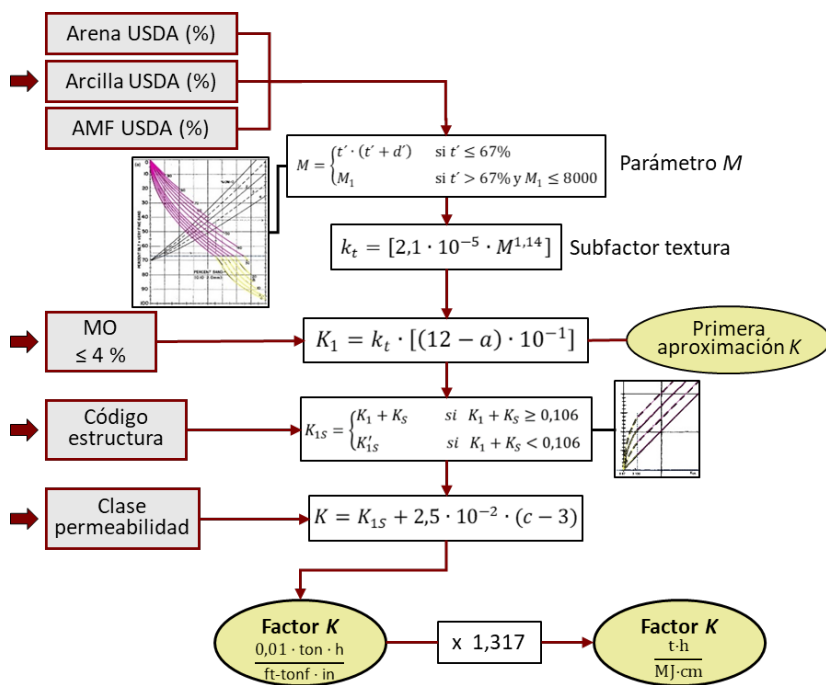


Figura 5.2. Esquema de la estructura del formulario MS-Access que permite calcular el factor K cuando conocemos todos los datos de entrada.

El siguiente dato que hay que introducir es el porcentaje de MO (admite un decimal), que nunca debe ser superior a 4 %. La aplicación proporciona entonces la primera aproximación de K , en $(0,01 \cdot \text{ton} \cdot \text{acre} \cdot \text{h})/(\text{acre} \cdot \text{ft} \cdot \text{tonf} \cdot \text{in})$, obtenida a partir de la ecuación (4.2).

Los dos últimos datos que se necesitan son el código que se asigna a la estructura del suelo y la clase de permeabilidad del perfil. En ambos casos el formulario facilita su selección mediante un desplegable con los valores posibles. Tras aplicar la ecuación (4.20), propuesta en este trabajo, y la ecuación (4.10), se obtiene el valor del factor K para el suelo analizado. Estos valores vienen expresados tanto en unidades tradicionales de EE. UU. como en unidades del Sistema Internacional $[(\text{t} \cdot \text{ha} \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{ha} \cdot \text{cm})]$.

5.3.2 Formulario “02_FactorK_AMF”

Este formulario calcula el valor del factor K de un suelo cuando conocemos las fracciones de arena, limo y arcilla USDA, además del resto de parámetros necesarios, pero desconocemos la fracción de AMF. La Figura 5.3 muestra el esquema con la estructura de este formulario.

El primer dato que hay que introducir son las fracciones de arena y arcilla USDA, ambas en porcentaje (se admite un decimal) y separadas por la barra “/”. La aplicación proporciona inmediatamente la siguiente información:

- Las tres fracciones texturales básicas USDA: se añade el porcentaje de la fracción de limo USDA, ya conocido, pues las tres fracciones deben sumar 100.
- El valor estimado de la fracción de AMF: proporcionado por la Figura 2.4b (mediana condicional).
- Intervalo de predicción del 50 % de la fracción de AMF: delimitado por los valores proporcionados por la Figura 2.4a (primer cuartil condicional) y la Figura 2.4c (tercer cuartil condicional).
- Parámetro relativo al tamaño de las partículas, M : calculado con la ecuación (4.18), propuesta en este trabajo.
- Subfactor correspondiente a la textura k_t : valor que toma la primera aproximación de K cuando el valor de la MO es 2 %. Obtenido a partir de la ecuación (4.3), de Wischmeier y Meyer (1973).

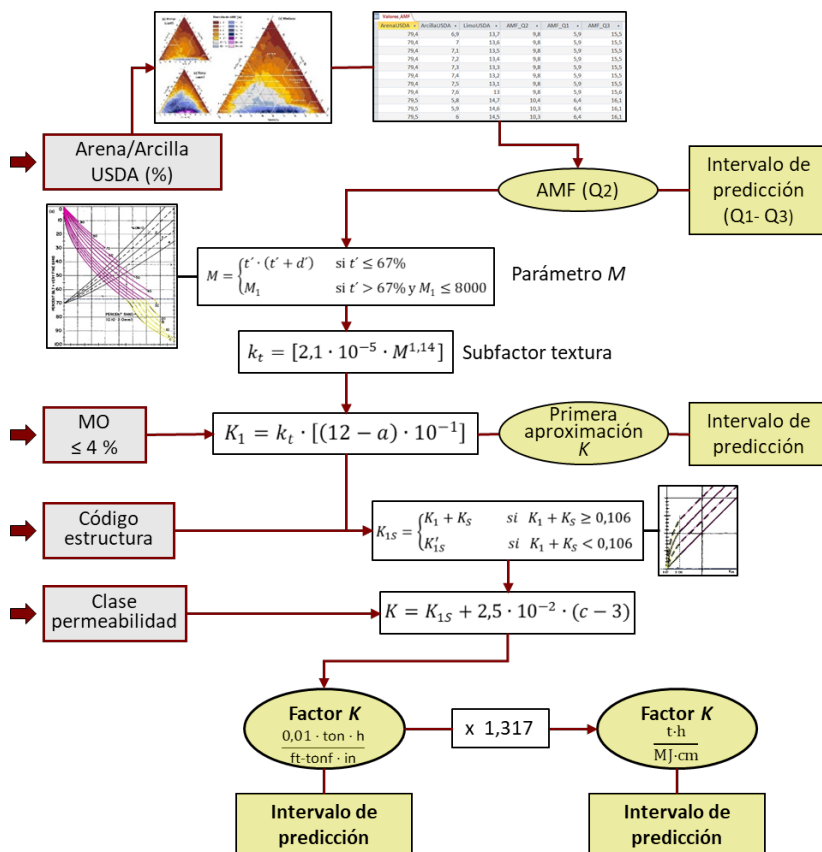


Figura 5.3. Esquema de la estructura del formulario MS-Access que permite calcular el factor K a partir de las fracciones texturales básicas según el esquema de clasificación del USDA.

El siguiente dato que hay que introducir es el porcentaje de MO (admite un decimal), que nunca debe ser superior a 4 %. La aplicación proporciona la primera aproximación de K , junto con un intervalo de predicción, a partir de la ecuación (4.2). Estos valores vienen expresados en unidades tradicionales de EE. UU. $[(0,01 \cdot \text{ton} \cdot \text{acre} \cdot \text{h})/(\text{acre} \cdot \text{ft-tonf} \cdot \text{in})]$.

Los dos últimos datos que se necesitan son el código que se asigna a la estructura del suelo y la clase de permeabilidad del perfil. En ambos casos el formulario facilita su selección mediante un desplegable con los valores posibles. Tras aplicar la ecuación (4.20), propuesta en este trabajo, y la ecuación (4.10), se obtiene el valor del factor K para el suelo analizado, junto con un intervalo de predicción. Estos valores vienen expresados tanto en $(0,01 \cdot \text{ton} \cdot \text{acre} \cdot \text{h})/(\text{acre} \cdot \text{ft-tonf} \cdot \text{in})$ como en unidades del Sistema Internacional $[(\text{t} \cdot \text{ha} \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{ha} \cdot \text{cm})]$.

5.3.3 Formulario "03_LimoUSDA_FactorK"

Este formulario calcula el valor del factor K de un suelo cuando conocemos las fracciones de arena, limo y arcilla en el Sistema Internacional simplificado, además del resto de parámetros no texturales necesarios. La Figura 5.4 muestra el esquema con la estructura de este formulario.

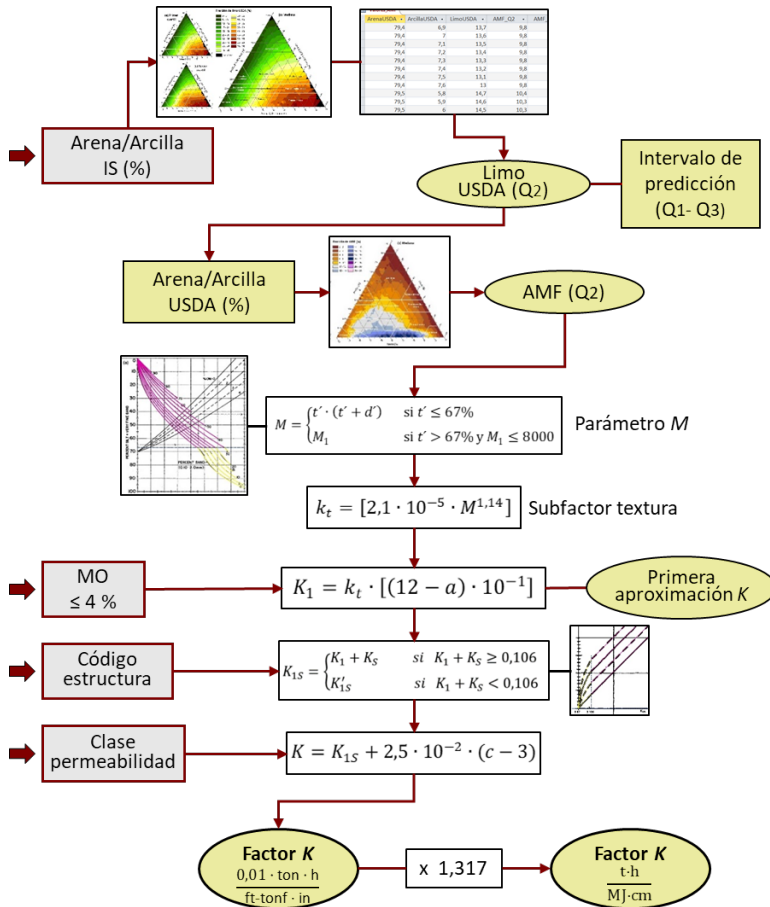


Figura 5.4. Esquema de la estructura del formulario MS-Access que permite calcular el factor K a partir de las fracciones texturales básicas según el Sistema Internacional simplificado.

El primer dato que hay que introducir son las fracciones de arena y arcilla en el Sistema Internacional simplificado, ambas en porcentaje (se admite un decimal) y separadas por la barra "/". La aplicación proporciona inmediatamente la siguiente información:

- Las tres fracciones texturales básicas en el Sistema Internacional simplificado: se añade el porcentaje de la fracción de limo, ya conocido, pues las tres fracciones deben sumar 100.
- El valor estimado de la fracción de limo USDA: proporcionado por la Figura 3.5b. (mediana condicional).
- Intervalo de predicción del 50 % de la fracción de limo USDA: delimitado por los valores proporcionados por la Figura 3.5a (primer cuartil condicional) y la Figura 3.5c (tercer cuartil condicional).

A partir de este valor estimado de la fracción de limo USDA, hemos calculado una estimación puntual del factor K . La estimación de los intervalos de predicción requiere de nuevos análisis no abordados en este trabajo. La aplicación proporciona entonces:

- Las tres fracciones texturales básicas USDA: se añaden el porcentaje de la fracción de arcilla USDA, coincidente con la fracción de arcilla en el Sistema Internacional, y el porcentaje de la fracción de arena USDA, a partir de la condición de que las tres fracciones deben sumar 100.
- El valor estimado de la fracción de AMF: proporcionado por la Figura 2.4b (mediana condicional).
- Parámetro relativo al tamaño de las partículas, M : calculado con la ecuación (4.18), propuesta en este trabajo.
- Subfactor correspondiente a la textura k_t : valor que toma la primera aproximación de K cuando el valor de la MO es 2 %. Obtenido a partir de la ecuación (4.3), de Wischmeier y Meyer (1973).

El siguiente dato que hay que introducir es el porcentaje de MO (admite un decimal), que nunca debe ser superior a 4 %. La aplicación proporciona entonces la primera aproximación de K , en $(0,01 \cdot \text{ton} \cdot \text{acre} \cdot \text{h})/(\text{acre} \cdot \text{ft-tonf} \cdot \text{in})$, obtenida a partir de la ecuación (4.2).

Los dos últimos datos que se necesitan son el código que se asigna a la estructura del suelo y la clase de permeabilidad del perfil. En ambos casos el formulario facilita su selección mediante un desplegable con los valores posibles. Tras aplicar la ecuación (4.20), propuesta en este trabajo, y la ecuación (4.10), se obtiene el valor del factor K para el suelo

analizado. Estos valores vienen expresados tanto en unidades tradicionales de EE. UU. como en unidades del Sistema Internacional $[(t \cdot ha \cdot h)/(MJ \cdot ha \cdot cm)]$.

5.4 REFERENCIAS

- Auerswald, K., Fiener, P., Martin, W., & Elhaus, D. (2014). Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: An alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. *Catena*, *118*, 220-225. doi:10.1016/j.catena.2014.01.008
- 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*(5), 189-193.
- Wischmeier, W. H., & Meyer, L. D. (1973). Soil erodibility on construction areas. *In Proceedings of the Conference-Workshop Soil Erosion: Causes and Mechanisms; Prevention and Control, January 26, 1973, Special Report 135 (20 -29)*, Washington, D.C.: Highway Research Board, National Academy of Sciences.

Anejo

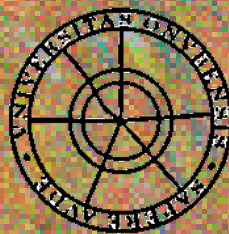
Versión del Capítulo 2 para *Land Degradation & Development*

El artículo “**Estimating the very fine sand fraction for calculating the soil erodibility K-factor**”, debido a restricciones relativas a derechos de autor, ha sido retirado de la tesis.

RESUMEN:

The K-factor of the universal soil loss equation is a core component in many erosion models, as a measure of soil erodibility. It can be estimated by a nomograph, where the summed fractions of silt and very fine sand (VFS) are basic inputs. Frequently, only the three broad particle-size classes of sand, silt, and clay are measured in laboratories; thus, the VFS fraction must be estimated. Three models are currently available for this estimation, namely, (a) the Revised Universal Soil Loss Equation formula, (b) the European Soil Data Centre method, and (c) the Shirazi–Boersma theory, all three use just the sand fraction as explanatory variable. Nevertheless, their accuracy has never been assessed, and this is the main purpose of this study. The data used to test the VFS estimation methods were drawn from the National Cooperative Soil Survey Soil Characterization Database, incorporating data from more than 300,000 soil horizon samples. The test results show a poor performance of the models, all of which were found to be unsuitable for 31.1% of the textural triangle, accounting for 32.3% of the soil samples. Moreover, it is demonstrated that any conceivable model based solely on the broad particle-size classes would suffer from a high degree of uncertainty. Consequently, the number of explanatory variables should be increased in order to improve the performance of models. An alternative prediction chart is provided for the first approximation of K-factor, based on the textural triangle.

Enlace al texto completo del artículo: <https://doi.org/10.1002/ldr.3121>



Universidad
de Huelva

Grupo de investigación
RNM 301
Gestión de recursos forestales