

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y Biociencias

Doctorado en Ciencias y Tecnologías Industriales

AVANCES EN EL CONOCIMIENTO DE LA EROSIÓN POR FLUJOS CONCENTRADOS Y SU ÓPTIMA EVALUACIÓN EN CAMPO: UN ENFOQUE EXPERIMENTAL



Directores:

Dr. Rafael Giménez Díaz

Dr. Javier Casalí Sarasibar

Doctoranda:

Elena Zubieta Laseca

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

AGRADECIMIENTOS

A D. Rafael Giménez Díaz y a D. Javier Casalí Sarasibar, directores de esta Tesis, por su confianza, apoyo y sabiduría. Gracias por estar siempre acompañándome en este proceso de crecimiento, tanto intelectual como personal.

A D. Luciano Mateos y al equipo del Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, de Córdoba. Por su acogida y su disposición a ayudarme en todo momento.

A D. Julian Algarra, vecino de Olite, por dejarme usar sus campos para las experimentaciones, y por su ayuda e interés en todo momento.

A Youssef y Alaitz, por su ayuda con los trabajos de campo, por esos ratos de frío, calor y sobre todo buen humor. Y a todos mis compañeros del grupo de investigación THERRAE.

Quiero agradecer especialmente a mis padres, por su apoyo y ánimos. A mi hermano Iñigo, por su ayuda desinteresada y su interés.

A Juanma, por su paciencia y ayuda estos años, y a Anne, por hacerme ver lo que es realmente importante.

Me gustaría, también, mostrar mi agradecimiento a la Universidad Pública de Navarra por facilitar mi trabajo con sus medios materiales y humanos. Así como por la concesión de la beca, gracias a la cual ha sido posible mi total dedicación a este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

1- INTRODUCCIÓN

1.1-. La erosión del suelo en contexto	12
1.2-. Tipos de erosión hídrica.....	13
1.3-. Erosión por flujos concentrados	14
1.3.1-. Importancia y consecuencias.....	14
1.3.2-. Clasificación	15
1.3.4-. Factores controladores. Modelos matemáticos.....	17
1.4-. Necesidades de investigación	20
1.5-. Objetivos.....	25

2- EVALUACIÓN *IN SITU* DE LA DISPOSICIÓN ESPACIAL DE UNIDADES *STEP-POOL* EN SURCOS DE EROSIÓN

2.1-. Introducción.....	27
2.2-. Materiales y métodos	29
2.2.1-. Parcelas experimentales.....	29
2.2.2-. Protocolo experimental.....	30
2.2.3-. Identificación de unidades <i>step-pool</i>	32
2.2.3.1-. Uso de marcadores.....	32
2.2.3.2-. Uso de los perfiles longitudinales de elevación	32
2.3-. Resultados.....	37
2.3.1-. Evaluación de las técnicas de identificación de <i>pools</i>	38
2.3.2-. Identificación y disposición espacial de las unidades <i>step-pool</i>	39
2.3.3-. Frecuencia de unidades <i>step-pool</i>	42
2.4-. Discusión.....	45
2.5-. Conclusiones	48

3- HACIA UNA MEJOR EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE SURCOS Y CÁRCAVAS

3.1-. Introducción.....	50
3.2-. Materiales y métodos	52
3.3-. Resultados y discusión	57
3.4-. Conclusiones	61

4- EVALUACIÓN DE LA MAGNETITA COMO TRAZADOR MAGNÉTICO DE SEDIMENTOS EN EL ESTUDIO DE LA EROSIÓN POR CÁRCAVAS EFÍMERAS: FACTORES CONDICIONANTES DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA.

4.1-. Introducción.....	63
4.2-. Materiales y métodos	65
4.2.1-. Elección del trazador magnético y tipo de suelo.....	65
4.2.2-. Equipamiento	66
4.2.3-. Diseño experimental.....	67
4.2.4-. Protocolo experimental.....	69
4.2.5-. Análisis de datos	70
4.3-. Resultados y discusión	70
4.3.1-. Concentración y profundidad del trazador	70
4.3.2-. Contenido de humedad del suelo	74
4.3.3-. Densidad aparente	75
4.4-. Conclusiones	75

5-. EVALUACIÓN DE LA MAGNETITA COMO TRAZADOR MAGNÉTICO DE SEDIMENTOS EN EL ESTUDIO DE LA EROSIÓN POR CÁRCAVAS EFÍMERAS: APLICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN EN EL PERFIL DEL SUELO

5.1-. Introducción.....	78
5.2-. Materiales y métodos.....	80
5.2.1-. Diseño experimental.....	80
5.2.2-. Análisis de datos.....	82
5.2.3-. Efecto de las diferentes labores en el suelo.....	82
5.2.4-. Sensor de laboratorio MS2B. Descripción y utilización.....	83
5.3-. Resultados y discusión.....	83
5.3.1-. Evaluación de las técnicas de aplicación.....	84
5.3.2-. Distribución del trazador por el laboreo.....	85
5.4-. Conclusiones.....	91

6-. CONCLUSIONES GENERALES

6.1-. Evaluación y análisis de las macroformas típicas de surcos de erosión.....	93
6.2-. Caracterización morfológica de canales de erosión: discrepancia de criterios entre investigadores.....	94
6.3-. Evaluación de la magnetita como trazador magnético: factores condicionantes de la señal magnética.....	95
6.4-. Evaluación de la magnetita como trazador magnético: técnicas de aplicación y distribución.....	96
6.4.1-. Pautas para futura experimentación en campo.....	97

REFERENCIAS.....	99
------------------	----

ANEXOS

ANEXO I: Publicaciones y congresos.....	116
ANEXO II: Html para la introducción de los parámetros y visualización de los resultados y Script del algoritmo modificado de Zimmermann.....	118
ANEXO III: Script Douglas y Peucker y Html para la introducción de los parámetros y obtención de resultados.....	145
ANEXO IV: Datos obtenidos por los expertos. Anchura de los canales de erosión y superficie erosionada estimada.....	151

RESUMEN

La presente tesis tiene como propósito (i) ampliar el conocimiento sobre la interrelación entre la hidráulica y la morfología de canales de erosión a través de una detallada caracterización y análisis de la macro-rugosidad en surcos de erosión desarrollados en campo; con el fin último de contribuir a un mejor entendimiento de la erosión por flujos concentrados y consecuentemente a su correcta modelización. (ii) Se busca, además, mejorar las técnicas de monitoreo de canales de erosión en campo, surcos y cárcavas (efímeras), mediante el análisis y estimación del error que inadvertidamente (y de forma sistemática) estarían cometiendo los investigadores al caracterizar la geometría de canales de erosión a partir de datos de campo. (iii) Y desarrollar y evaluar una innovadora metodología experimental para la detección de sedimentos generados por erosión por flujo concentrado, a partir de trazadores magnéticos, para su posterior uso en experimentos en campo. Esto incluye el análisis de los principales factores que afectan la señal magnética como así también técnicas de aplicación y distribución del trazador en la zona de estudio.

La alta interacción entre el lecho de los surcos y el flujo, hace que se dé una rápida remodelación de éste, creando una serie de macroformas que constan de una zona plana (*step*) seguido de una hondonada (*pool*). A partir del estudio de perfiles longitudinales de surcos de erosión creados en condiciones controladas de pendiente y caudal, se ha evaluado la geometría de los surcos de erosión con la intención de determinar la disposición espacial en la macro-rugosidad del lecho (unidades *step-pool*) y analizar el papel de la pendiente y el caudal como factores asociados al desarrollo de estas macroformas. Se ha podido ver que su formación es debido a un ajuste de energía entre la morfología del lecho y el flujo, aunque la aparición de unidades *step-pool* estaría condicionada a una pendiente mínima que se encontraría entre el 5 y 15%, y que, debido principalmente a la presencia de gravas en el lecho de los surcos, no se ha podido concluir que exista una distancia constante entre estas unidades.

Una óptima caracterización de la geometría de canales de erosión se basa en la obtención de valores fiables de anchura y profundidad de secciones transversales representativas. Aunque existen definiciones objetivas para ello, la visión del observador a la hora de delimitar el parámetro anchura de un canal de erosión resulta más o menos subjetiva y por tanto arbitraria. A partir de la comparación de una colección de valores de referencia de anchura y superficie erosionada, obtenidos de la substracción de secciones transversales de DEMs del terreno pre y post erosión y de la interacción entre ambas secciones, con valores de los mismos parámetros obtenidos por un gabinete de expertos, a los cuales se les dio únicamente los perfiles post-

erosión, se ha visto que el observador tiende a sobreestimar la anchura de los canales de erosión en aproximadamente un 40%, repercutiendo en un 75% de sobreestimación en la superficie erosionada. Además, la elevada variabilidad entre resultados (CV=64%) plantea graves problemas en cuanto a la repetibilidad de las mediciones y genera incertidumbres cuando se comparan los resultados experimentales sobre erosión por flujos concentrados obtenidos por diferentes expertos. Es por ello que se cree necesario el uso de herramientas matemáticas que permitan solventar estos inconvenientes.

En general, se presta un mayor interés a las consecuencias *on site* de los sedimentos erosionados, que a las *off site*, esto generalmente es debido a que, aunque se asume que los sedimentos se transfieren desde las laderas hacia la red de drenaje de la cuenca, se desconoce los patrones espaciales y temporales con los que se mueven estos sedimentos. El uso de trazadores de sedimentos y técnicas de selección de partículas ha permitido conocer algunas complejidades del almacenamiento y transporte de sedimentos. A partir de la selección de un trazador magnético (magnetita) y del estudio de la variación de susceptibilidad magnética (característica propia de los minerales magnéticos, obtenida por un susceptómetro), se han evaluado diferentes factores condicionantes de esta propiedad como la profundidad de enterramiento del trazador, el valor de susceptibilidad magnética de referencia de la zona de trabajo y la distribución del trazador en el perfil del suelo. Viéndose que recoge las características necesarias para su uso como trazador de sedimentos generados por flujos concentrados. Siempre y cuando la concentración del trazador sea igual o mayor del 0,5% su profundidad de detección podría alcanzar 14 cm, profundidad efectiva del susceptómetro, aunque el trazador quedase depositado bajo suelo sin trazador. A pesar de ello, este valor de profundidad de detección está muy condicionado por la susceptibilidad magnética propia del suelo. La susceptibilidad magnética decae drásticamente en profundidad, por lo que cuando su valor es próximo al valor propio del suelo bajo estudio, es muy difícil diferenciar la fuente de la señal.

Ante la engorrosa metodología, tanto en tiempo como en recursos, para la realización de la mezcla del suelo con el trazador, se ha propuesto una nueva metodología de aplicación del trazador, suspendido en agua, con la ayuda de una mochila sulfatadora. La aplicación de esta nueva técnica, a una concentración de 300gr/m², ha ido acompañada de diferentes labores agrícolas (vertedera, vertedera más rastra más molón, chisel y rotavator). Todas ellas aseguran una buena distribución del trazador en los primeros 9 cm del perfil del suelo, siendo el rotavator el que ha obtenido una mayor homogenización del trazador, aunque se ha visto que, en

consecuencia, la concentración disminuye. Por ello, en experimentos en campo, la dosis de magnetita debería ser al menos 2-3 veces superior a la usada en esta investigación.

1-. INTRODUCCIÓN

1.1-. La erosión del suelo en contexto

La degradación del suelo es la reducción o el desgaste de sus cualidades inherentes, y abarca el deterioro físico, químico y biológico, causado por su uso inadecuado, generalmente para fines agrícolas, ganaderos o urbanos (Khaledian et al., 2016). Ésta, depende no sólo de la interacción de los diferentes factores físicos, químicos y biológicos del suelo, incluidas las propiedades del suelo, la topografía y las características climáticas (Brevik et al., 2015; Taguas et al., 2015), sino también del uso de la tierra, las actividades antropogénicas y la gestión (Camprubi et al., 2015; Cerdà et al., 2016; Costa et al., 2015; Khaledian et al., 2013; Parras-Alcántara et al., 2015(a),2015(b)). Entre todos los procesos de degradación del suelo, la erosión ha sido identificada como la amenaza más grave en el “Primer informe sobre el estado de los recursos del suelo en el mundo” por el Grupo Técnico Intergubernamental sobre los Suelos (Montanarella et al., 2016).

El DRAE (Diccionario de la Real Academia Española) define el término *suelo* como “superficie terrestre” y más explícitamente en agronomía como el “conjunto de materias orgánicas e inorgánicas de la superficie terrestre, capaz de sostener vida vegetal”. El segundo gran concepto a definir dentro de esta tesis sería *erosión*. El DRAE define *erosión* como el “desgaste de la superficie terrestre por agentes externos, como el agua o el viento”. A pesar de su simplicidad, estas expresiones dan una pequeña idea de la importancia de estos dos conceptos al mencionar la capacidad del suelo de mantener vida vegetal, y de la erosión, al hablar del desgaste (por agentes externos) del mencionado sustento de vida. Claro, que en la bibliografía podemos encontrar definiciones con un mayor detalle y contenido técnico. Por ejemplo, Ellison (1947) define la erosión del suelo como “un proceso de arranque y transporte de materiales del suelo por agentes erosivos”. Estos materiales desprendidos son transportados por el agua (Walling, 1988), y cuando la carga de sedimentos excede la capacidad de transporte de los mismos, se produce la deposición (Polyakov y Nearing, 2003). El transporte y la deposición (sedimentación), son conceptos importantes como veremos más adelante.

Se distinguen tres agentes causantes de la erosión del suelo: la acción antropogénica, el viento y el agua.

La *erosión por agentes antropogénicos* se define como la segregación, transporte y sedimentación de las partículas del suelo debida a actividades (generalmente, no malintencionadas o malignas) inducidas por el hombre. Como casos importantes nos encontramos con la erosión debida a prácticas agrícolas como laboreo, nivelación del terreno y erosión durante la cosecha de los cultivos, entre otras (Poesen, 2018).

La *erosión eólica* es la segregación, transporte y sedimentación de las partículas del suelo por parte del viento. El efecto de las partículas liberadas en el medio ambiente depende de la composición y el tamaño de las mismas, así como de la duración de su trayectoria aérea (Goosens y Riksen, 2004).

La erosión eólica está controlada por un conjunto de factores como son la velocidad del viento, la humedad del suelo, la rugosidad de la superficie, la textura y agregación del suelo, el contenido en materia orgánica del suelo, el uso y manejo del suelo, la cubierta vegetal y la superficie afectada (Bagnold, 1943, Chepil, 1945a, Chepil y Woodruff, 1963).

La *erosión hídrica*, en la que centraremos esta tesis, es la segregación, transporte y sedimentación de las partículas del suelo por los eventos de lluvia, y puede llegar a causar una degradación muy severa del suelo, e incluso su desaparición (Sonneveld et al., 2016). La humectación de la superficie del suelo por las gotas de lluvia o por la escorrentía superficial causa una dispersión del suelo que puede resultar en arranque de partículas y transporte de éstas (FAO, 2019). Una vez el flujo de agua pierde la energía necesaria para transportarlas, estas partículas de suelo se depositan.

1.2-. Tipos de erosión hídrica

El arranque y transporte de suelo son procesos desarrollados por el agua de escorrentía (originando erosión laminar difusa y erosión por flujos concentrados), y por el impacto de las gotas de lluvia en el suelo (erosión por salpicadura). En ambos, el arranque de partículas de suelo sucede al exceder la acción del agua el umbral de resistencia del suelo (Dong et al., 2015). Sin embargo, los mecanismos de acción de cada uno son muy diferentes (Wirtz et al., 2012).

La erosión por salpicadura es el desprendimiento del suelo por el impacto de las gotas de lluvia, y depende principalmente de la intensidad de la lluvia (Bryan 2000), tamaño de gota, energía, y su distribución espacial (Pérez-Latorre et al., 2010). En la erosión laminar difusa el desprendimiento del suelo es debido a la erosión por salpicadura y a la acción de la escorrentía superficial, siendo el flujo terrestre el principal agente de transporte (Govers et al., 2007).

En los denominados flujos concentrados, en cambio, la principal causa de erosión es el propio flujo concentrado. La concentración de la escorrentía superficial por efectos topográficos o microtopográficos, hace que se dé la aparición de canales de erosión, mientras que el impacto de las gotas de lluvia en el desprendimiento no es significativo (por ejemplo, Owoputi y Stolte, 1995). Estos canales de erosión pueden clasificarse como surcos y cárcavas.

Los puntos de inicio y las dimensiones de los surcos y cárcavas están claramente controlados por la resistencia a la erosión de la capa superior del suelo (erosionabilidad del suelo y estrés cortante aplicado por el flujo) (Knapen y Poesen 2010), aunque en el caso de cárcavas efímeras, su inicio también se encuentra relacionado con la erosión subsuperficial y piping (Wilson 2011). Una vez que se han formado los canales de erosión, su migración pendiente arriba tiene lugar por el retroceso de las cabeceras sobre las pendientes hacia la parte alta de la ladera o vaguada. La velocidad de retroceso está controlada por la cohesión del terreno, la altura y el ángulo de pendiente de la cabecera, y la descarga y velocidad del flujo (De Ploey, 1989).

La presente tesis se centrará en los tipos de erosión producidos por flujos concentrados con especial atención a surcos, y cárcavas efímeras.

1.3-. Erosión por flujos concentrados

1.3.1-. Importancia y consecuencias.

Las cuencas agrícolas de todo el mundo son particularmente sensibles a la erosión del suelo que puede conducir a una grave degradación del recurso, con considerables repercusiones financieras y de seguridad alimentaria (Hoover et al., 2017).

Los canales de erosión formados por flujos concentrados se consideran los principales productores de sedimentos, y, por tanto, los principales causantes de pérdida de suelo (Cerdan et al., 2002). Montgomery (2007) cifró la tasa de erosión global debida a la agricultura convencional en $49 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, y en un estudio de revisión, Poesen et al. (2003) demostraron que la contribución de las cárcavas efímeras puede variar entre el 10% y el 94% de toda la pérdida de suelo dentro de las cuencas, y entre el 50 y el 80% en los ambientes semiáridos.

Una cuestión importante en la investigación de la erosión del suelo es que las tasas de erosión medidas en diferentes estudios son dependientes de la escala del estudio. Se ha podido ver que las mediciones experimentales realizadas a nivel de parcela, tanto las debidas a la erosión por flujo laminar como por flujo concentrado, no indican de manera realista la tasa de erosión

(Poesen et al., 2003). Cerdan et al. (2010), tras analizar datos de 81 parcelas experimentales en 19 países, destacaron que las tasas de erosión de las parcelas no podían ser directamente extrapoladas a áreas de mayor superficie, ya que la dimensión de una parcela experimental no capta completamente la variabilidad espacial de los procesos y tasas de erosión. Por ejemplo, la aparición de cárcavas (efímeras) juega un papel determinante en cuanto al volumen de suelo erosionado y a su redistribución y transporte hacia cursos de agua (Evans, 1993b), de manera que la extrapolación directa de las mediciones de las parcelas al paisaje puede conducir a una sobre o subestimación de las tasas de erosión.

La pérdida de suelo más allá de lo tolerable conlleva la disminución de la fertilidad del suelo, relacionado con los impactos *on-site* (como, por ejemplo, la disminución de materia orgánica y nutrientes en el suelo), así como efectos hidrológicos, al disminuir la capacidad de retención de agua del suelo y por tanto aumentar la generación de escorrentía (Chambers et al., 2000; Hou et al., 2020; Liu et al., 2012). Además, el transporte de sedimentos a cursos de agua cercanos genera también un impacto *off-site* debido a la acumulación de sedimentos (colmatación de embalses y depósitos de agua o aumento de turbidez) e incorporación de agroquímicos (deterioro de la calidad fisicoquímica de las aguas superficiales) (Hou et al., 2020; Pacheco et al., 2018).

Las prácticas agrícolas actuales y la gestión del suelo en la agricultura convencional, mecanizada, con menor cobertura vegetal permanente en época de lluvias y menor rotación de cultivos, son responsables del aumento de las tasas de erosión del suelo (Ryken et al., 2018).

1.3.2-. Clasificación

La erosión por surcos se produce en forma de numerosos canales de pocos centímetros de profundidad, distribuidos uniformemente y al azar sobre terrenos en pendiente (Soil Science Society of America, 2001) y que pueden ser fácilmente obliterados por el laboreo convencional (Hutchinson y Pritchard, 1976). La erosión por surcos se da principalmente en suelos agrícolas, de ahí que también es frecuente que, en lugar de desarrollarse siguiendo un patrón dendrítico y aleatorio, lo hagan en cambio siguiendo las marcas en el terreno dejadas por el laboreo. En este último caso, los surcos se desarrollan en forma más o menos paralela, uniformemente espaciados y desconectados entre sí (Foster, 1986). Este espaciado regular ocurre principalmente en surcos formados sobre materiales homogéneos (ej., Schumm, 1956). Los surcos de erosión pueden, al incrementar su tamaño, dar lugar eventualmente, a la formación de cárcavas (permanentes).

Las cárcavas permanentes son canales de erosión demasiado grandes (de entre 0,5 a 25-30 m de profundidad) para ser eliminados por el laboreo convencional (Soil Science Society of America, 2001), de ahí su carácter permanente. Las cárcavas permanentes suelen desarrollarse siguiendo un diseño dendriforme a lo largo de cursos naturales de agua (Foster, 1986). Con respecto a las cárcavas efímeras, generalmente intermedias en tamaño entre un surco y una cárcava permanente, comienzan a reconocerse como una clase particular de erosión por flujo concentrado a partir de la década del 80, del pasado siglo. En esa época, científicos norteamericanos advierten que, al considerarse sólo la erosión por surcos y cárcavas permanentes, un importante proceso y fuente de sedimento estaba siendo obviado (Foster, 1986, Gordon et al., 2007). Las cárcavas efímeras, generalmente también de trazado dendrítico, son, al igual que los surcos, lo suficientemente pequeñas como para poder ser eliminadas por el laboreo convencional (Soil Science Society of America, 2001), de aquí viene su calificación de efímeras. Pero, al volver a formarse, y contrariamente a lo observado en surcos, lo hacen siempre en el mismo lugar. Sin embargo, Poesen et al. (2003), observaron cárcavas efímeras siguiendo marcas lineales del terreno, tal como suele ocurrir en surcos (ver arriba). Hasta aquí, la diferencia entre cárcava efímera y surco es poco precisa. La principal diferencia entre ambos tipos de canales suele establecerse a través del menor tamaño de los surcos. Es así que, basándose en trabajos de Hauge (1977), Poesen et al. (1993) establecen como umbral de separación una sección transversal crítica de 929 cm². Otros proponen como umbrales críticos un ancho y profundidad mínimos de 0,3 m y 0,6 m, respectivamente (Brice, 1966); o bien sólo una profundidad mínima de 0,5 m (Imenson y Kwaad, 1980). Una distinción más precisa entre surco y cárcava efímera que prescinde del uso de valores morfológicos arbitrarios, establece que las cárcavas efímeras se forman en la vaguada que configura la confluencia de dos laderas opuestas, mientras que los surcos ocurren enteramente sobre una única ladera (Casalí et al., 1999). Esto condice con el carácter aleatorio y variable, de un episodio de lluvia a otro, con que los surcos se localizan en una misma ladera pues su formación va a estar supeditada a la alta variabilidad espacial de factores intrínsecos del suelo (estabilidad estructural, conductividad hidráulica, etc.) como del laboreo. Por otro lado, y, por el contrario, la ubicación sobre el terreno de una cárcava efímera va a depender principalmente de factores topográficos que dirigen la trayectoria de la escorrentía, dando lugar a la formación de este tipo de cárcava en los lugares previstos.

No obstante, la distinción entre surcos y cárcavas efímeras sería todavía imprecisa frente a la ya mencionada situación en que ambos tipos de canales de erosión se formaran siguiendo marcas en el terreno de carácter antrópico. En este caso hipotético, la diferenciación tendría que

hacerse por tamaño a través del uso de umbrales morfológicos arbitrarios (ver arriba). Sin embargo, algunos estudios hacen pensar que podría existir una diferencia funcional entre surco y cárcava efímera (Giménez y Govers, 2001, Giménez et al., 2004, Govers et al., 2007). En un surco, se produce una gran interacción entre la corriente y la (macro)-rugosidad de su cauce. Esta interacción, en definitiva, sería la responsable de que el comportamiento hidráulico de un surco de erosión difiera notablemente del observado en un río o un canal de grandes dimensiones. En un surco, por ejemplo, la velocidad promedio del flujo se puede estimar independientemente del grado de la pendiente (Govers, 1992; Takken et al., 1998; Giménez y Govers, 2001). Se plantea entonces el siguiente interrogante: ¿Sería posible establecer un umbral hidráulico en lugar de morfológico para separar surcos de cárcavas (efímeras)? Creemos que sí. Pero la implementación de dicho umbral es todavía incierta.

Cabe destacar que no todos los surcos y cárcavas se forman por escorrentía superficial. La erosión por *piping* da lugar a la formación de galerías subterráneas por la concentración de un flujo de agua subsuperficial (Jones, 2004b). Esta forma de erosión interacciona con las formas de erosión superficial (como erosión por surcos y erosión por cárcavas) (Bernatek-Jakiel y Poesen, 2018). Los derrumbes de las galerías subsuperficiales formadas por el flujo concentrado pueden actuar como depresiones, en las que el flujo superficial se desvía hacia las vías de flujo subterráneas superficial (Zhang y Wilson, 2013). Sin embargo, los colapsos de los techos pueden favorecer la aparición de surcos o cárcavas. Govers (1987) ya mostró que el agua infiltrada por macroporos, como las galerías excavadas por animales en el horizonte de labor, podía conducir a un importante flujo subsuperficial dando lugar a erosión subsuperficial o *piping*, y que, finalmente, al desplomarse el techo de la galería se formaría el surco o la cárcava efímera.

La masa caída de las paredes laterales puede representar más de la mitad de los sedimentos removidos en los canales de erosión, especialmente cuando a fuertes lluvias le siguen largos períodos secos durante los cuales se desarrollan grietas en el suelo (Govers y Poesen, 1988).

1.3.4-. Factores controladores. Modelos matemáticos.

La intensidad de la erosión hídrica está condicionada por un conjunto de factores que son la erosividad de la lluvia, erosionabilidad del suelo, vegetación, la longitud de la ladera (en surcos) y tamaño de la cuenca vertiente (en cárcavas), la pendiente del terreno y el uso y la gestión del suelo.

La erosividad de la lluvia se refiere a la energía con que las gotas de lluvia impactan sobre el suelo, a veces suficiente como para romper los agregados superficiales en partículas de tamaño

transportable (Colotti, 1999). Para determinar la erosividad de las precipitaciones se utilizan relaciones empíricas entre la intensidad de la lluvia y la energía cinética (por ejemplo, Diodato et al., 2013; Vrieling et al., 2010). Estas relaciones se determinan a partir de información recogida en estaciones meteorológicas situadas cerca de la zona de estudio. Nearing et al., (2004), en un estudio sobre el impacto del cambio climático sobre las tasas de erosión de suelo en EEUU, demostraron que cuando la cantidad de precipitación aumenta, la erosión del suelo y la escorrentía aumentarán a una tasa aún mayor siendo la relación entre el aumento de la erosión y las precipitaciones anuales del orden de 1,7.

La «erosionabilidad», es la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, siendo una característica propia del suelo ligada a su textura, contenido de materia orgánica y permeabilidad (Renard et al., 1997, Ollobarren et al., 2018), así como a su manejo (Piscitelli et al., 2010), de modo que la vulnerabilidad del suelo a ser erosionado no es una característica constante.

La cubierta vegetal es el elemento habitual de protección del suelo, controlando no sólo la energía con la que llegan las gotas de lluvia a la superficie del suelo, sino la velocidad de la escorrentía superficial (Renard et al., 1997). El efecto de la vegetación en las tasas de erosión hídrica se estima principalmente utilizando las características de la cubierta vegetal superficial, mientras que los efectos de las raíces a menudo reciben menos atención (Gyssels y Poesen, 2003). La presencia de las raíces de las plantas en los suelos afecta a la erosionabilidad de éstos mediante la exudación de las raíces, la estabilización de los agregados del suelo y el aumento de la resistencia a la tracción (cohesión) y tienen un papel muy importante cuando los procesos de erosión son incisivos, como son los flujos concentrados (Poesen 2018). La presencia de residuos (semi)incorporados al suelo condicionan igualmente tanto la erosionabilidad del suelo como la hidráulica del flujo concentrado (Giménez y Govers, 2008).

Por otra parte, la pendiente, la longitud de las laderas y el área vertiente de cuencas afectadas por cárcavas efímeras ejercen un fuerte control sobre las tasas de pérdida de suelo. Conforme aumenta la longitud de la ladera, aumenta la superficie de captación de escorrentía, y por tanto los caudales de agua que pueden llegar a generarse.

Generalmente, la erosión del suelo se ve acelerada por actividades agrícolas como la reducción de la cubierta vegetal o de residuos, la labranza y otras operaciones de campo. Es por ello que la ejecución de medidas de protección contra la erosión del suelo con el fin de mantenerla dentro de un rango tolerable, es un componente esencial de la gestión sostenible del suelo (FAO, 2017). Estas medidas se basan en asegurar una adecuada cobertura del suelo para protegerlo

frente al impacto de las gotas de lluvia, aumentar la capacidad de infiltración del suelo para disminuir la escorrentía superficial, en la mejora de las condiciones físicas del suelo en lo que respecta a la resistencia de los agregados contra el impacto de las gotas de lluvia u otras acciones mecánicas destructivas y, en el aumento de la rugosidad de la superficie del suelo para disminuir la velocidad de escorrentía. Así, fundamentadas en estas medidas, existen diferentes técnicas de conservación del suelo como son las basadas en la gestión de los cultivos y la vegetación (ej. cultivos de cobertura (Novara et al. 2011); y aquellas fundamentadas en métodos mecánicos (ej. terrazas de infiltración (Chen et al.,2017)).

Existen modelos numéricos para simular las tasas de erosión del suelo causadas por cárcavas efímeras (Bingner et al., 2015; 2002; Merkel et al., 1988; Woodward, 1999) y para evaluar los efectos de las prácticas de conservación (Taguas et al., 2012). Estos modelos difieren en su estructura, en sus supuestos y en los datos de entrada necesarios para la calibración y aplicación del modelo (Merritt et al., 2003). Bull y Kirkby (1997) examinaron las condiciones para la formación de cárcavas y señalaron que la modelización de cárcavas debe basarse en la relación entre la hidráulica de flujo y las propiedades del suelo. De esta forma, se podrían reconocer dos grandes grupos en la modelización de la erosión por cárcavas efímeras:

i) Modelos que consideran que la erosión se produce al superar el flujo superficial el esfuerzo cortante crítico del suelo y tienen en cuenta las situaciones cambiantes de las dimensiones de las cárcavas efímeras: CREAMS (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System*, Foster and Lane, 1983; Knisel, 1980), EGEE (*Ephemeral Gully Erosion Estimator*, Watson et al.1986), EGEM (*Ephemeral Gully Erosion Model*, Merkel et al., 1988), WEPP (*Water Erosion Prediction Project*, Flanagan y Nearing, 1995) y EphGEE (*Ephemeral Gully Erosion Estimator*, Dabney et al., 2015)

ii) Modelos que consideran la erosión por cárcavas efímeras como una erosión remontante cuyo inicio es una cabecera que emigra aguas arriba: REGEM (*Revised Ephemeral Gully Erosion Model*, Gordon et al., 2007) y su adaptación TIEGEM (*Tillage Induced Ephemeral Gully Erosion Model*, Bingner et al., 2018). Este último añadido al modelo AnnAGNPS (*Annualized Agricultural Non-Point Source Pollution model*), desarrollado, entre otras funciones, para simular la erosión laminar y por flujo concentrado en entornos agrícolas (Bingner et al., 2018, 2002). Ambos modelos, REGEM y TIEGEM, se basan en el modelo propuesto por Alonso et al. (2002).

1.4-. Necesidades de investigación

A pesar del avance ocurrido en las últimas décadas, el conocimiento de los procesos de erosión por flujos concentrados, y de los factores que los controlan dista de ser completo.

El reconocimiento de que la presencia de macroformas dada por la alternancia de *step* y *pool* (Giménez y Govers, 2001) son una característica distintiva de los surcos de erosión, llevaría a importantes replanteos en la interpretación de los procesos erosivos por flujos concentrados. Esto es así puesto que la gran mayoría de los modelos de erosión se basan en formulaciones que asumen que un surco posee cauce plano, sólo afectado por micro-rugosidad. Por un lado, tendría que reconocerse que la rugosidad, y por ende la fricción, estaría siendo subestimada en el actual marco teórico concerniente al fenómeno de la erosión. Pero, además, habría que contemplar la hasta ahora prácticamente inadvertida y no menos relevante presencia de los *pools* en la hidráulica y erosividad del flujo concentrado. Cabe destacar que algunos pocos modelos de erosión (por ej., Alonso et al., 2002; Gordon et al., 2007) reconocen la presencia de grandes disipadores de energía en la cabecera (*headcut*) de cada canal (generalmente cárcavas efímeras); sin embargo, no consideran que acciones similares de pérdida de energía (aunque generalmente menos intensa que la acaecida en la cabecera) se estarían produciendo reiteradamente aguas abajo, es decir, en cada una de las depresiones del canal (*knickpoints*). Este supuesto erróneo (puesto que no contemplan la presencia y acción de las unidades *step-pool*) del marco teórico de los modelos de erosión explicaría, al menos en parte, las imprecisiones de los modelos actuales. Por otro lado, si esta presumible periodicidad pudiera ser explicada a través de funciones matemáticas (probablemente trigonométricas), supondría un avance importante hacia la modelización con base matemática o física de los procesos erosivos. Es evidente que los modelos físicos tienen un carácter más universal que los puramente empíricos. Sin embargo, la identificación objetiva de estas unidades *step-pool* en canales de erosión no es sencilla (Church y Zimmermann, 2007).

Por otro lado, una buena caracterización morfológica de los canales de erosión resulta esencial para una óptima cuantificación de las pérdidas de suelo derivadas del flujo concentrado, así como para comprender su compleja dinámica (Castillo et al., 2018). La manera más común de realizar esta caracterización es a través del estudio de la sección transversal del canal de erosión. La evaluación de secciones transversales ofrece una valiosa información relacionada con su etapa evolutiva (Heede 1970), las intensidades de las precipitaciones (Poesen y Govers, 1990), la pendiente y la descarga (Wells et al., 2013), la resistencia de los materiales del suelo (Poesen y Govers, 1990), el predominio de ciertos tipos de procesos erosivos (Blong et al., 1982) y la

presencia de vegetación (Deng et al., 2015). Pero a la hora de delimitar una sección transversal, generalmente nos encontramos con cierta incertidumbre a la hora de definir la anchura y la profundidad del canal de erosión a partir de perfiles transversales de elevación (Casalí et al., 2015). Estas mediciones suelen realizarse directamente en campo con cinta métrica (Bennett et al., 2000; Casalí et al. 1999; Di Stefano et al., 2013; Ludwig et al., 1995; Nachtergaele et al., 2001b, 2001a), perfilómetros (Casalí et al., 2006) o GPS de alta precisión (Cheng et al., 2007; Zhang et al., 2008). O bien a partir de fotogrametría estereoscópica (Xu y Zhou, 1988), foto-reconstrucción (Gómez et al., 2014), o a partir de DEMs de secciones transversales obtenidas por láser escáner (Ollobarren et al., 2018). Pero la citada incertidumbre en la determinación de la geometría de la sección transversal de un canal de erosión (sobre todo su anchura) no radica en el grado de precisión de los instrumentos de medición, sino en el hecho de no contar (como suele ser el caso) con perfiles de elevación del terreno *anterior* al proceso erosivo. Resulta que tal vez la única manera inequívoca de definir la geometría de un canal de erosión sea a través de la superposición de los perfiles de elevación del terreno anterior y posterior a la formación de dicho canal (Casalí et al., 2015).

Se asume que la anchura de una determinada sección transversal viene definida por una línea imaginaria cuyos extremos están situados en los puntos de los dos márgenes del canal de erosión en los que se manifiesta un cambio abrupto de pendiente. Mientras que la profundidad máxima se identifica como la línea imaginaria que une el punto de menor cota de la sección transversal con la línea imaginaria que define la anchura (Casalí et al., 2015). La identificación de la anchura y la profundidad de un canal de erosión, aunque parezca sencillo, resulta una tarea compleja y sujeta a una importante incertidumbre, de modo que hacerlo de forma incorrecta puede dar lugar a importantes errores de cálculos, por ejemplo en algo tan trascendente como las tasas de erosión, así como a grandes discrepancias en los valores en función del experto implicado, de modo que dichos valores resultan difícilmente comparables (Casalí *et al.* 2015; Castillo et al. 2014).

A la hora de determinar la anchura, puede darse la situación de encontrar más de un cambio abrupto de pendiente en uno o ambos márgenes de la cárcava. Por tanto, la elección de un punto u otro sería totalmente subjetiva. Por ello, sería interesante conocer cómo influye la subjetividad del investigador a la hora de delimitar los parámetros anchura y profundidad de una sección transversal de un canal de erosión, evaluar sus errores con respecto a valores ciertos de origen experimental y evaluar el impacto de esa subjetividad en las tasas de erosión estimadas.

Es de gran importancia estimar las tasas de erosión producidas por los flujos concentrados, pero tradicionalmente se ha observado una mayor atención a las consecuencias *on site* generadas por los diferentes procesos de erosión que a las consecuencias *off site*. Cabe destacar que las formas de erosión por flujo concentrado, al ser canales efectivos de transferencia de escorrentía, sedimentos y otros materiales desde la fuente hasta el sumidero (Casalí et al., 2009), agravan los efectos de la erosión hídrica *off-site*. En este contexto, puede decirse que la formación de cárcavas efímeras reviste un particular interés, dada la importancia en cuanto a pérdidas de suelo que se recoge en la literatura y su posición en el paisaje, apareciendo en las vaguadas.

De esta forma, aunque se asume que los sedimentos se transfieren desde las laderas hacia la red de drenaje de la cuenca, se desconoce los patrones espaciales y temporales con los que se mueven estos sedimentos (Bracken, L. J. y Crocke 2007). En este sentido, Casalí et al. (2008) observaron una estacionalidad en la producción de sedimentos a escala de pequeña cuenca agrícola, viéndose una mayor tasa de exportación de sedimentos a la salida de la cuenca en invierno y principio de primavera, a pesar de que la erosividad de las lluvias es menor en dichos periodos. Durante el invierno, las precipitaciones, aunque menos intensas, son importantes en su cuantía, y el suelo se encuentra con un mayor contenido de humedad, favoreciendo la escorrentía superficial, y por lo tanto el arrastre del material erosionado. Mientras que en épocas en las que se dan precipitaciones con un mayor poder erosivo, la transferencia del sedimento erosionado sería menor, quedando éste acumulado en zonas de sedimentación dentro de la cuenca de estudio.

De cara al estudio de los efectos *off-site*, lo que implica conocer los patrones espaciales y temporales con los que se mueven estos sedimentos, el uso de trazadores de sedimentos y de técnicas de selección de partículas resulta de gran interés, pues ha permitido conocer algunas complejidades del almacenamiento y transporte de sedimentos. Estos estudios sugieren que la transferencia de sedimentos es llevada a cabo por procesos en los que interaccionan un gran número de factores. Estos factores pueden ser cambios en la vegetación (Abrahams et al. 1995; Mueller et al., 2008; Parsons et al., 1996a), factores edafológicos (por ej. textura, estructura y humedad del suelo) (Ali et al., 2014), factores topográficos (por ej. laderas, vaguadas, zonas llanas) (Masselink et al., 2016) y la aparición de canales de erosión (surcos, cárcavas y cárcavas efímeras) (Goulsbra et al., 2014).

Los principales trazadores de sedimentos que podemos encontrar en la bibliografía son radionúclidos (Estrany et al., 2010), *fingerprinting* (Chen et al., 2016), óxidos de tierras raras

(Masselink et al. 2017), y óxidos magnéticos (Guzmán et al. 2013; Ventura et al. 2002), estos dos últimos aplicados o añadidos artificialmente a los suelos.

Los radionúclidos (*Fallout radionuclides* (FRN)), son nucleidos radioactivos (naturales o artificiales) con una semivida suficientemente larga como para que sean observables, a partir, por ejemplo, de una espectrometría gamma. Ejemplos de los radionúclidos más utilizados para determinar tasas de erosión y sedimentación en estudios de redistribución de suelos son el ^{137}Cs , ^7Be y ^{210}Pb (Walling, 2003; Mabit et al. 2008a). El ^{137}Cs es un radionúclido artificial cuya deposición sobre la superficie de la tierra se debe a los ensayos de armas nucleares atmosféricas y al accidente nuclear de Chernóbil. Con una semivida ($t_{1/2}$) de 30,17 años, ha sido utilizado para estudios temporales de decenas de años y en gran variedad de escalas de estudio, desde ladera (Wallbrink y Murray 1993) hasta cuencas (>100 Ha) (de Roo 1991). El ^7Be y el ^{210}Pb , en cambio, son radionúclidos naturales. La producción de ^7Be se debe a la espalación de rayos cósmicos en la atmósfera (Arnold y Al-Salih, 1955). Tiene una semivida de 53,12 días y se ha utilizado para estimar tasas de erosión y sedimentación a corto plazo (Walling et al., 1999). El ^{210}Pb , con una semivida de 22,26 años, ha sido utilizado para realizar estimaciones de aproximadamente 100 años de redistribución de suelo (Walling y He 1999b). La determinación de las tasas de erosión o sedimentación se basa en la comparación de valores (disminución o incremento) de la concentración del radionúclido en la zona de estudio, frente a los valores de referencia de zonas estables y no perturbadas (pastizales permanentes llanos o bosques que reflejan el aporte de lluvia radiactiva original, sin procesos de erosión y/o deposición).

Los trazadores *fingerprinting* se basan en el estudio de las propiedades inherentes del material erosionado y de la fuente (Collins y Walling, 2004). El rastreo de dichas propiedades es una técnica apropiada en los casos en que es necesario definir las fuentes y el transporte de los sedimentos con una alta resolución espacial y temporal. La información espacial indica la ubicación de la fuente o fuentes de sedimentos dentro de una cuenca de captación o una cuenca fluvial y, por lo tanto, podría considerar diferentes subcuencas o zonas debido a la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, caracterizadas, por ejemplo, por diferentes tipos de minerales (Walling, 2013). Estos trazadores han permitido desarrollar técnicas alternativas como instrumento de gestión eficaz en las cuencas fluviales (Lambaet al., 2015; Thompson et al., 2013). Los trazadores de sedimentos que se emplean habitualmente incluyen geoquímicos, minerales magnéticos y radionúclidos naturales. Debido a la disponibilidad de equipos analíticos modernos se pueden distinguir gran variedad de estos trazadores (Pulley y Rowntree, 2016). En todo caso, los trazadores seleccionados deben ser resistentes a la transformación química y su

importancia debe justificarse en función de su capacidad para discriminarlos entre las fuentes (Koiter et al., 2013). Además, el efecto de los procesos físicos (erosión, transporte, sedimentación y reconcentración) en la concentración del trazador debido a la selectividad del tamaño de las partículas y la variación de la materia orgánica, debe poder corregirse numéricamente. Para ello, generalmente se utilizan factores de corrección sencillos (Collins et al., 2001), aunque hay técnicas más actuales que determinan la contribución de sedimento de cada fuente utilizando algoritmos de desmezcla de base estadística, frecuentemente acompañados de estimaciones de incertidumbre (Sherriff et al., 2018).

Los óxidos de tierras raras (REO, *Rare Earth Oxides*) son elementos que se encuentran en el suelo de forma natural en pequeñas concentraciones, pero que para su uso como trazadores son aplicados en concentraciones 10-100 veces superiores a la concentración natural (Deasy y Quinton, 2010; Polyakov y Nearing, 2004). Tras la incorporación de los REOs en el suelo antes del experimento, la técnica se basa en la determinación de la concentración en el suelo y el sedimento tras un período de tiempo. Hay muchos estudios y en diferentes escalas que utilizan REOs como trazadores, desde escala de canal (Michaelides et al., 2010) hasta escala de pequeña cuenca (<100 Ha) (Polyakov et al., 2004, 2009). Los REOs pueden detectarse en concentraciones muy bajas mediante la espectrometría de masa y plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) después de la extracción de ácidos (Zhang et al., 2001).

Las propiedades magnéticas de los óxidos magnéticos presentes en el suelo se han utilizado ampliamente, tanto de forma aislada como en combinación con otras propiedades del suelo, para, por ejemplo, el estudio de la evolución paleoambiental de los suelos (Chen et al., 2019). Generalmente los óxidos magnéticos han sido utilizados como trazadores *fingerprinting* de los sedimentos de las cuencas (Owens et al., 2000; Royall, 2001) a partir de la diferencia de propiedades magnéticas de los minerales que se desarrollan en suelos de diferente origen (o evolución) dentro del área de estudio. Un enfoque diferente en el empleo de estos óxidos magnéticos como trazadores, es su incorporación al suelo de estudio, para luego medir sus propiedades y comparar su distribución en el suelo y en los sedimentos antes y después de un experimento (Guzmán et al., 2013). La propiedad de estos trazadores más utilizada en la bibliografía es la susceptibilidad magnética. Esta indica el grado de magnetización de un material en respuesta a un campo magnético, y está directamente relacionada con la composición de dicho material (Dearing, 1999). La susceptibilidad magnética puede conocerse directamente en campo a partir de su medición con un susceptómetro de campo, por lo que es posible obtener una medida fiable de manera fácil y rápida. Además, cabría destacar que los óxidos magnéticos

son ampliamente utilizados como pigmentos naturales en la industria de construcción (Guzmán et al., 2010), por lo que su adquisición es sencilla y económica.

Como se ha visto anteriormente, las tasas de erosión estudiadas a nivel de parcela experimental, no son extrapolables a superficies mayores, ya que, entre otras causas, pueden aparecer formas de erosión por flujo concentrado, agravando el efecto *off site* de la erosión de suelo en tierras de cultivo (Casalí et al., 2009). Además, se desconoce la distancia real de movimiento de los sedimentos erosionados. Poesen (2018) sugiere distancias menores de 1 km para sedimentos generados en cárcavas efímeras y distancias mayores a 1 km para la exportación de sedimentos de las cuencas (Poesen, 2018). De acuerdo con lo anteriormente expuesto, el uso de trazadores, incorporándolos en aquellas zonas candidatas a erosionarse para poder conocer su comportamiento, podría resultar de gran interés.

Tanto los óxidos de tierras raras como los óxidos magnéticos son trazadores que han sido utilizados en el estudio del transporte de sedimentos por erosión laminar (Guzmán et al., 2013; Masselink et al., 2016b), pero ninguno de los trazadores descritos anteriormente ha sido utilizado para el estudio del movimiento (transporte y/o deposición) de los sedimentos generados por flujos concentrados.

El económico precio de los óxidos magnéticos, así como la facilidad y rapidez con la que es posible detectar su presencia en campo mediante un susceptómetro, hace de ellos buenos candidatos para llevar a cabo esta nueva vía de conocimiento. Un inconveniente del uso de este trazador, al igual que ocurre con el uso de óxidos de tierras raras, es la dificultad que supone su adecuada incorporación al suelo. La metodología más utilizada es la descrita por Zhang et al. (2001) basada en una dilución gradual de la masa total del trazador en el suelo al que se desea adherir. Al ser esta metodología engorrosa y requerir mucho tiempo para su implementación por tener que manejar grandes cantidades de suelo, su uso a una escala de estudio mayor que la parcela experimental es poco viable. Es por ello que se hace necesaria una alternativa a dicha metodología para el uso de este trazador.

1.5-. Objetivos

Tras estas reflexiones, y respondiendo a una clara necesidad de aumentar el conocimiento sobre diferentes procesos relacionados con la erosión del suelo por flujos concentrados, se plantean los siguientes objetivos de esta tesis:

- i. Ampliar el conocimiento sobre la interrelación entre la hidráulica y la geometría de pequeños canales de erosión a través de una exhaustiva caracterización de la macro-rugosidad observada en surcos de erosión en campo.
 - a. Evaluar *in situ* las macroformas generadas en surcos de erosión a través de innovadoras técnicas ad hoc.
 - b. Analizar el papel de la pendiente y el caudal como factores asociados al desarrollo de estas macroformas.
- ii. Analizar y ponderar el error normalmente cometido por los investigadores en la caracterización de la geometría de canales de erosión a partir de datos de campo.
 - a. Realizar una caracterización morfológica unívoca de canales de erosión con metodología ad hoc.
 - b. Cuantificar el error experimental cometido por diferentes investigadores en la determinación de la anchura y profundidad de secciones transversales típicas.
- iii. Proponer y poner a punto una nueva metodología experimental para la detección de sedimentos generados por erosión por flujo concentrado, a partir de trazadores magnéticos, para su posterior uso en experimentos en campo.
 - a. Evaluar las variaciones en la señal magnética de la magnetita obtenida por un susceptómetro según (i) profundidad de enterramiento del trazador, (ii) la susceptibilidad magnética natural del suelo sobreyacente (iii) grado de humedad del suelo sobreyacente.
 - b. Evaluar una innovadora técnica de aplicación y distribución de magnetita en el perfil del suelo, para su uso en campo como trazador magnético de sedimentos erosionados por la acción de cárcavas (efímeras)

CAPÍTULO 2: EVALUACIÓN *IN SITU* DE LA DISPOSICIÓN ESPACIAL DE UNIDADES *STEP-POOL* EN SURCOS DE EROSIÓN*

2.1- Introducción

Los surcos son pequeños canales (generalmente desarrollados en una pendiente relativamente elevada) que evolucionan rápidamente debido a la erosión activa del lecho por la escorrentía superficial. La poca profundidad de los surcos y la naturaleza erosiva del flujo llevan a una fuerte interacción entre el flujo y el lecho del canal. Esta interacción remodela la geometría del lecho. Las experimentaciones llevadas a cabo por Giménez y Govers (2001) y Giménez et al. (2004) sugieren el perfil longitudinal de los surcos de erosión, en condiciones de equilibrio, se caracteriza por una alternancia entre concavidades (*pools*) y tramos planos (*steps*). Los *pools* actuarían como disipadores de energía, lo que provoca una socavación puntual y por lo tanto un aumento del volumen del *pool* hasta que las tasas de erosión en *pools* y *steps* vuelvan a ser iguales (Giménez et al., 2004). Por lo tanto, el papel de los *step-pools* puede considerarse análogo a la disipación de energía asociada a un ajuste lateral/horizontal en ríos de baja pendiente con meandros; o a un ajuste vertical como ocurre en ciertos ríos de montaña (Chin, 1989; Giménez et al., 2016a, 2016b). En los ríos de montaña, cada unidad *step-pool* constituiría un importante factor de resistencia hidráulica (Abrahams et al., 1995; Chin, 2003; Curran y Wohl, 2003). De acuerdo con Abrahams et al. (1995), las unidades *step-pool* de los ríos de montaña evolucionan hacia una condición de máxima resistencia al flujo, que se alcanza cuando las unidades *step-pool* están espaciadas aproximadamente de forma equidistante.

La remodelación del lecho del surco (es decir, con la alternancia de unidades *step-pools*) afecta al comportamiento del flujo (Di Stefano et al., 2017). Por ejemplo, Govers (1992) observó que la velocidad promedio del flujo en los surcos, a diferencia de los grandes canales, podía predecirse sólo en base al caudal, ya que el efecto de la pendiente era insignificante. Este hallazgo fue corroborado por otros autores (por ejemplo, Nearing et al., 1997, 1999; Takken et al., 1998; Giménez y Govers, 2001; Di Stefano et al., 2018, 2019). Giménez y Govers (2001) concluyeron que ecuaciones como la de Manning (ampliamente usada en la hidráulica de ríos y grandes canales, en la cual se asume una rugosidad constante) no serían adecuadas para los surcos ya

*Capítulo basado en: Giménez, R., Zubieta, E., Govers, G., and Campo-Bescos, M.A. 2019. In-situ assessment of the spatial arrangement of step-pool units on eroded rills. *Earth Surf. Process. Landforms* 44, 2731–2740. DOI: 10.1002/esp.4700

que, como se mencionó anteriormente, la rugosidad es dependiente de la pendiente: la independencia de la velocidad media del flujo de la pendiente implica que la rugosidad del lecho (expresada como n de Manning o f de Darcy-Weisbach) aumenta con la pendiente. Los experimentos de Giménez y Govers (2001) sugieren en cambio que la independencia de la pendiente de la velocidad de flujo en los surcos, recientemente confirmada por Di Stefano et al. (2018, 2019), se debe a la retroalimentación entre la erosión del canal y la geometría del mismo. El flujo en los surcos fue, en promedio, casi crítico con un número de Froude cercano a 1 debido a la alternancia de secciones con flujo subcrítico (*pools*) y flujo supercrítico (*steps*). Como el número de Froude no está controlado por la pendiente del talud, se deduce que la velocidad promedio del flujo tampoco está controlada por la pendiente.

Por lo tanto, la suposición de que la hidráulica de los pequeños canales de erosión puede ser descrita usando fórmulas/ecuaciones desarrolladas a partir de trabajos en ríos aluviales relativamente grandes, es errónea. El primer paso para una mejor descripción de la hidráulica de los surcos es llevar a cabo una caracterización completa de la geometría del lecho bajo varias condiciones e identificar los factores de control. Para llevar a cabo este objetivo, se requieren experimentos de campo y de laboratorio. En los últimos años se han llevado a cabo varios estudios centrados en la hidráulica y la geometría de los surcos, aunque mayormente en el laboratorio (por ejemplo, Peng et al., 2015; Di Stefano et al., 2018). La mayor parte de estos trabajos, sin embargo, se centran en la caracterización de la resistencia general y promedio del flujo en los surcos, mientras que se presta menos atención a los mecanismos que controlan esta resistencia y a la descripción de la geometría del surco. Esto último es importante ya que comprender la conexión entre los procesos de erosión y la hidráulica en surcos depende fundamentalmente de entender cómo la erosión del surco moldea la geometría del lecho.

Como se ha indicado anteriormente, un posible mecanismo que controla la resistencia general del flujo en los surcos de erosión, es la formación de secuencias de unidades *step-pool*. Sin embargo, la identificación de estas unidades *step-pool* en canales de erosión no es sencilla, incluso en canales de gran longitud como, por ejemplo, los ríos de montaña (Church y Zimmermann, 2007). La dificultad de distinguir los *step-pool* resulta del desafío asociado a su identificación objetiva (Church y Zimmermann, 2007). En los surcos, puede que la única manera inequívoca de identificar objetivamente las unidades *step-pool* sea analizar los patrones de velocidad a lo largo del propio surco. Giménez et al. (2004) trabajaron, en laboratorio, con una reproducción detallada y no erosionable de un tramo de surco en el que la velocidad fue medida con un velocímetro Doppler acústico miniaturizado. Se observó un flujo unidireccional y

acelerado en los *steps* y un flujo multidireccional y altamente turbulento en los *pools*. Sin embargo, la obtención de este tipo de datos es muy difícil y requiere mucho tiempo, debido al bajo calado y a las velocidades de flujo relativamente altas. Además, la relativamente corta longitud del surco impidió un análisis de la disposición espacial de las unidades *step-pool*. Por lo que para una completa caracterización de la geometría del surco *in situ*, se requieren enfoques más simples que puedan ser aplicados en el campo.

Los objetivos del trabajo que aquí se presenta son (i) evaluar diferentes (e innovadoras) técnicas para la evaluación *in situ* de la geometría del lecho de los surcos, (ii) utilizar estas técnicas para evaluar *in situ* la geometría de surcos con el fin de determinar la disposición espacial de la macro rugosidad del lecho y (iii) finalmente analizar el papel de la pendiente y de los factores asociados al desarrollo de estas macroformas.

Los experimentos de campo se llevaron a cabo en laderas, donde se formaron surcos bajo diferentes combinaciones de pendiente y caudal. A partir de los perfiles longitudinales de elevación obtenidos en cada situación, se identificaron unidades *step-pool* y se analizó el patrón de distribución espacial de estas macroformas.

2.2-. Materiales y métodos

2.2.1-. Parcelas experimentales

La experimentación se llevó a cabo *in situ* en un campo de cultivo en Olite (Navarra, España). La textura del suelo era limosa con moderada pedregosidad (Tabla 2.1).

Dentro del campo se seleccionaron tres laderas regulares de aproximadamente 20 × 5m, de pendientes diferentes: 3, 5 y 15%.

Tabla 2.1: Características físico-químicas del suelo experimental

Granulometría %	Valores
< 2 μm	19,40
> 50 μm	27,80
2 – 50 μm	52 ,80
Materia orgánica, %	0 ,98
Carbonatos, %	45 ,10
Caliza activa, %	9 ,18
Conductividad eléctrica, dS m^{-1}	0 ,18

Cada parcela fue labrada (con chisel y rotavador) hasta obtener una superficie de trabajo similar a una cama de siembra. A continuación, con un rastrillo se creó una suave depresión a lo largo del centro de la parcela, de aproximadamente 5 cm de profundidad y 50 cm de ancho, con un fondo llano. Esta formación evitó que el agua aplicada durante la experimentación inundase la parcela, y ayudó a que el canal erosionado resultante fuera lo más recto posible. A continuación, se humedeció el suelo hasta su saturación y se dejó drenar hasta alcanzar la capacidad de campo.

A lo largo de la parcela se distribuyeron homogéneamente cuarenta clavos metálicos, actuando como puntos de control en el suelo. Las coordenadas (xyz) de cada clavo fueron determinadas con una estación total.

2.2.2-. Protocolo experimental

Se tomaron cientos de fotografías desde diferentes ángulos cubriendo toda el área de experimentación (las fotos se superpusieron aproximadamente en un 60%). Estas imágenes fueron utilizadas para crear un modelo digital de elevación (DEM) de alta resolución utilizando Agisoft® PhotoScan Professional v1.0. (2013). A continuación, se aplicó un determinado caudal (contralado con un caudalímetro) en el extremo superior de la ladera utilizando una manguera conectada a una boca de riego cercana.

La aplicación del flujo superficial condujo en la mayoría de los experimentos a la formación de un surco claramente distinguible (Tabla 2.2). Sin embargo, aquellos formados en menores pendientes, fueron más o menos incipientes. Durante la experimentación, la velocidad del flujo se determinó con un colorante agregado al agua (Giménez y Govers, 2001) a lo largo de una distancia de 1m y en tres lugares diferentes a lo largo del surco. Para evitar la sobreestimación de la velocidad se utilizó un factor de corrección de 0,94 (Govers, 1992). Se asumió que la velocidad promedio medida en los tres lugares era representativa de las condiciones hidráulicas promedio en el surco (Tabla 2.2).

Tabla 2.2: Características del flujo de agua.

Pendiente (%)	Anchura media (m)	Q (m ³ h ⁻¹)	Velocidad media estable (ms ⁻¹)	Profundidad de calado (mm)
3	0,180	1,60	0,45	6
3	0,200	5,00	0,48	6
5	0,160	2,50	0,44	30
5	0,140	5,00	0,51	11
15	0,060	0,16	0,20	2
15	0,090	0,36	0,25	17
15	0,107	0,78	0,30	7
15	0,098	0,90	0,35	9

La experimentación continuó hasta que se alcanzaron condiciones de equilibrio (es decir, hasta que la velocidad promedio del flujo no cambió significativamente con el tiempo) (Giménez y Govers, 2001). Esto ocurrió aproximadamente 30-45 minutos tras el comienzo del experimento.

Una vez que el surco se estabilizó, se determinó la profundidad del agua aproximadamente en los mismos tres lugares en los que se había medido previamente la velocidad del flujo (Tabla 2.2). Para este propósito, se emplearon sensores *ad hoc*. Estos sensores midieron la distancia vertical desde el sensor hasta la superficie del agua y luego, una vez terminado el experimento, se midió la misma distancia hasta el lecho seco. La diferencia entre ambas mediciones permitió calcular la profundidad del agua. Los sensores fueron previamente calibrados en el laboratorio. La profundidad del agua se midió en tres puntos diferentes, con 10 repeticiones; encontrándose un error experimental de aproximadamente ± 1 mm. Además, se midió el ancho del surco en diferentes puntos a lo largo del mismo y se calculó un valor promedio.

Al final de cada experimento, se tomó otra serie de fotografías para poder construir un DEM del surco erosionado.

Los experimentos se realizaron utilizando siete caudales y tres pendientes diferentes, las cuales se recogen en la Tabla 2.2. Siendo los caudales utilizados en las experimentaciones representativos de los flujos en surcos de erosión (Bennett et al., 2000).

2.2.3-. Identificación de unidades *step-pool*

La identificación de *pools* (como sistemas hidráulicos) a través del lecho de los surcos es subjetivo (Zimmermann et al., 2008). El problema radica en el hecho de que estas depresiones no siempre están bien definidas y, por lo tanto, no siempre son evidentes a partir de las observaciones visuales del lecho. Se aplicaron dos procedimientos para identificar los *pools*. En primer lugar, se identificaron utilizando marcadores *ad hoc*. En segundo lugar, se identificaron las unidades *step-pool* a partir del perfil longitudinal de elevación del surco utilizando el algoritmo de identificación propuesto por Zimmermann et al. (2008). Ambos procedimientos se describen a continuación.

2.2.3.1-. Uso de marcadores

Giménez et al. (2004) observaron que el flujo concentrado en un surco tenía la capacidad de transportar sedimentos, incluyendo agregados del suelo. Al reducir el caudal en un 70% aproximadamente, la capacidad de transporte del flujo de agua disminuyó significativamente, dándose una importante deposición de agregados a lo largo del canal. Este proceso ocurrió principalmente dentro de los *pools*, cerca de su pared aguas arriba. A partir de esta observación se realizó una primera identificación de *pools*. Una vez que se alcanzaron las condiciones de equilibrio y formado un surco con un caudal específico, éste se redujo en un 70% del valor original de formación. Tras haber alcanzado el equilibrio el caudal reducido, se introdujeron sustitutos de agregados de suelo a lo largo del surco (aproximadamente 50 pseudo-agregados por metro lineal de canal). Posteriormente se interrumpió el flujo de agua y se llevó a cabo un estudio de los grupos de pseudo-agregados depositados a lo largo del surco. Se utilizaron semillas de *Cicer arietinum* como sustitutos de agregados de suelo. Determinándose en laboratorio que la forma, el tamaño y la densidad de estas semillas eran muy similares a las de los agregados de suelo: cada semilla pesaba en promedio 0,38 g y tenía un diámetro promedio de alrededor de 6-7 mm, mientras que un agregado de suelo de tamaño similar pesaba en promedio 0,41 g.

2.2.3.2-. Uso de los perfiles longitudinales de elevación

Las unidades *step-pool* fueron identificadas a partir de perfiles longitudinales de elevación digitalizados a lo largo del eje central del canal, a partir del DEM correspondiente. En estos perfiles, las unidades de *step-pool* se identificaron de acuerdo a las reglas geométricas propuestas por Zimmermann et al. (2008). Para ello, era necesario conocer diferentes parámetros morfológicos: (i) longitud máxima y mínima del *step*; (ii) longitud mínima del *pool*; (iii) profundidad residual mínima del *pool*; (iv) altura mínima de caída del *pool*; y (v) pendiente

mínima del *step* (Figura 2.1). Todos estos parámetros, excepto la pendiente, son normalizados por el ancho del surco para asegurar la comparación con otros canales de erosión independientemente de su tamaño (Zimmermann et al., 2008). El algoritmo de clasificación busca primero un *pool* (desde el extremo del perfil longitudinal aguas abajo) y luego determina si hay un *step* aguas arriba. Los *pools* y *steps* son considerados como tales sólo si cada uno de los parámetros morfológicos anteriormente mencionados se encuentran dentro de los valores de umbral máximo y mínimo, tal como lo proponen Zimmermann et al. (2008) (Tabla 2.3).

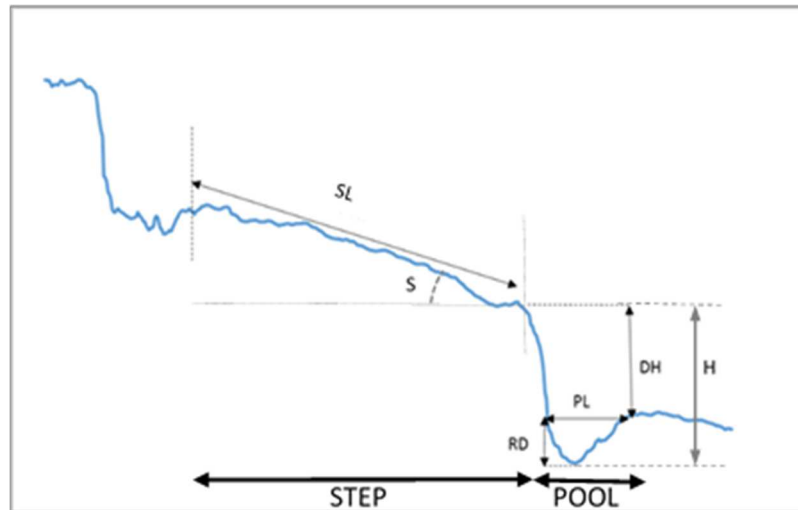


Figura 2.1: Perfil de elevación de un surco donde se muestran los parámetros utilizados en el algoritmo basado en reglas para caracterizar los *steps* y *pools* (según Zimmermann et al., 2008). DH: Altura mínima de caída del *pool*; PL: Longitud del *pool*; RD: Profundidad residual mínima del *pool*; SL: Longitud mínima del *step*; H: Altura mínima del *pool*; S: Pendiente mínima del *step*

Tabla 2.3: Valores críticos de los parámetros utilizados en el algoritmo de clasificación propuesto por Zimmermann et al. (2008). Los valores se normalizan por el valor medio del ancho del surco (W) (véase tabla 2.2). Original: valores críticos propuestos originalmente por Zimmermann et al. (2008); Este trabajo: Los valores críticos definidos *ad hoc* por Zimmermann et al. (2008) para este trabajo.

	Original	Este trabajo
Longitud máxima del <i>step</i>	$2 W$	– ⁽¹⁾
Longitud mínima del <i>step</i>	$0,0225 W$	$1 W$
Longitud mínima del <i>pool</i>	$0,10 W$	$0,16 W$
Profundidad residual mínima del <i>pool</i>	$0,0023W$	$0,066 W$
Altura mínima de caída del <i>pool</i>	$0,033 W$	$0,058 W$
Pendiente mínima del <i>step</i>	pendiente media $>10^\circ$	0°

(1) No se fijó una longitud máxima de *step*

Como los valores críticos propuestos por Zimmermann et al. (Tabla 2.3) son empíricos y se basan principalmente en la geometría de los ríos, se determinaron nuevos valores para ser aplicados a

surcos a partir del conjunto de datos de Giménez et al. (2004) (Tabla 2.3). Estos autores crearon, bajo condiciones de laboratorio, un surco de erosión (textura del suelo = franco limoso, caudal = $0.001\text{m}^3\text{s}^{-1}$, pendiente = 5°) que era comparable en dimensiones a los surcos aquí estudiados. Dentro de ese surco, los autores identificaron unidades *step-pool* basándose en el análisis de los perfiles longitudinales de velocidad. Además, la morfología del surco, y por lo tanto de las unidades *step-pool*, se caracterizó detalladamente a partir de un DEM de alta resolución. Utilizando esta información, se determinó un nuevo conjunto de valores críticos a aplicar en los surcos mediante la medición de los valores de longitud del *pool* (PL), profundidad residual mínima del *pool* (RD), altura mínima de caída del *pool* (DH) y longitud mínima del *step* (SL) en cada unidad *step-pool* a lo largo del perfil longitudinal del surco experimental. Finalmente se calcularon los valores medios de cada parámetro (Figura 2.1, Tabla 2.3).

A continuación, se comparó el nuevo conjunto de valores morfológicos críticos con los datos del presente estudio. Dentro de los diferentes surcos obtenidos *in situ* en los experimentos del estudio, se seleccionaron por inspección visual 10 tramos diferentes que presentaban al menos tres o cuatro unidades *step-pools* bien definidas (Figura 2.2).

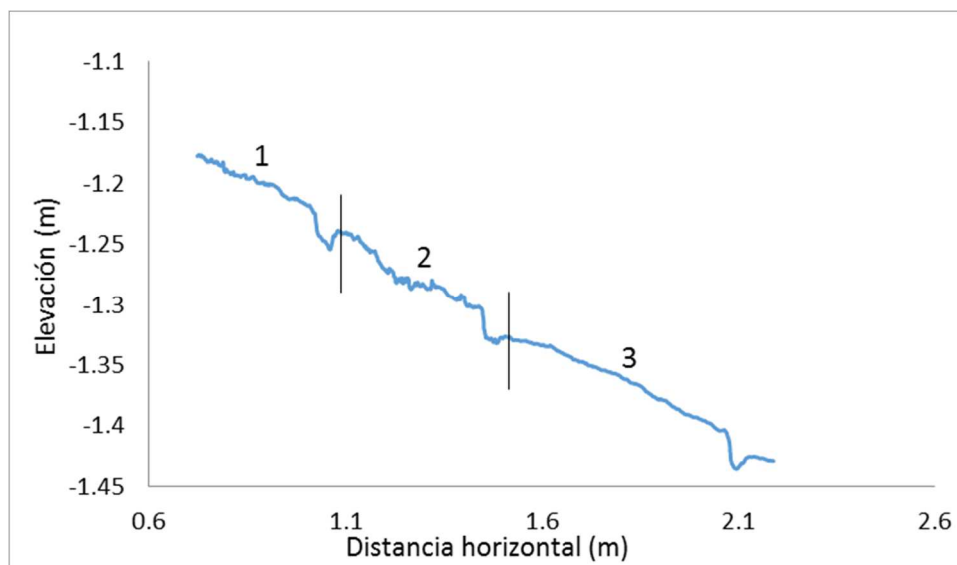


Figura 2.2: Parte del perfil longitudinal del surco desarrollado en pendiente=15% y $Q=0,16\text{m}^3\text{h}^{-1}$ (ver el perfil longitudinal completo en la figura 2.3). Se observan claramente tres unidades *step-pool*. Este es un ejemplo de un tramo de surco utilizado para evaluar el nuevo conjunto de valores críticos del algoritmo de Zimmermann et al. (2008) obtenido del conjunto de datos de Giménez et al. (2004). (Ver Tabla 2.3, "Este trabajo").

A continuación, a partir de los perfiles longitudinales de dichos tramos, se determinaron nuevamente los valores críticos de los parámetros (es decir, PL, RD, DH y SL) y se obtuvieron los valores medios. Estos valores críticos fueron muy similares a los obtenidos con el conjunto de

datos de Giménez et al. (2004). El ajuste al algoritmo de Zimmermann et al. (2008) se programó en Java (Anexo II).

Además, se obtuvo un perfil de elevación inicial (antes de la formación del surco) en correspondencia con los puntos del eje central del surco desarrollado posteriormente (Figura 2.3, línea gris).

Después de cada experimento se realizó un estudio visual del surco y se intentó identificar unidades step-pool. Se utilizó esta información para tener por adelantado, como referencia, una estimación aproximada del número total de unidades step-pool.

El algoritmo de Zimmermann et al. (2008) sólo detecta la presencia de unidades step-pool, pero no analiza si estas características muestran o no periodicidad. Por lo tanto, se aplicó un análisis espectral (transformación rápida de Fourier, FFT) y un diagnóstico de datos basado en métodos de series temporales no lineales (Huffaker et al., 2016) para detectar la posible periodicidad en las macroformas a lo largo del perfil longitudinal de los surcos. Los valores de altura (eje Y) se corrigieron previamente para la pendiente general del surco mediante un análisis de regresión, de modo que se obtuvo una serie de valores de altura corregidos (Z_c). La técnica de series temporales no lineales permite básicamente la extracción de posibles componentes periódicos de diferentes intensidades a partir de un conjunto de datos sin tratamiento previo.

Finalmente, para obtener información cuantitativa sobre la macro-rugosidad del lecho del surco, cada conjunto de valores de altura corregidos Z_c se suavizó primero utilizando la herramienta de reducción de datos de Douglas y Peucker (1973) (programada en Java (Anexo III)) con una banda de tolerancia de 20 mm. Y luego, a partir de este perfil con menos valores de Z_c , se determinó el índice de frecuencia pico de 20 mm f_{20} (Giménez y Govers, 2001) como:

$$f_{20} = N_p/2 \quad (2.1)$$

donde N_p es el número de picos por unidad de longitud en el perfil longitudinal del surco.

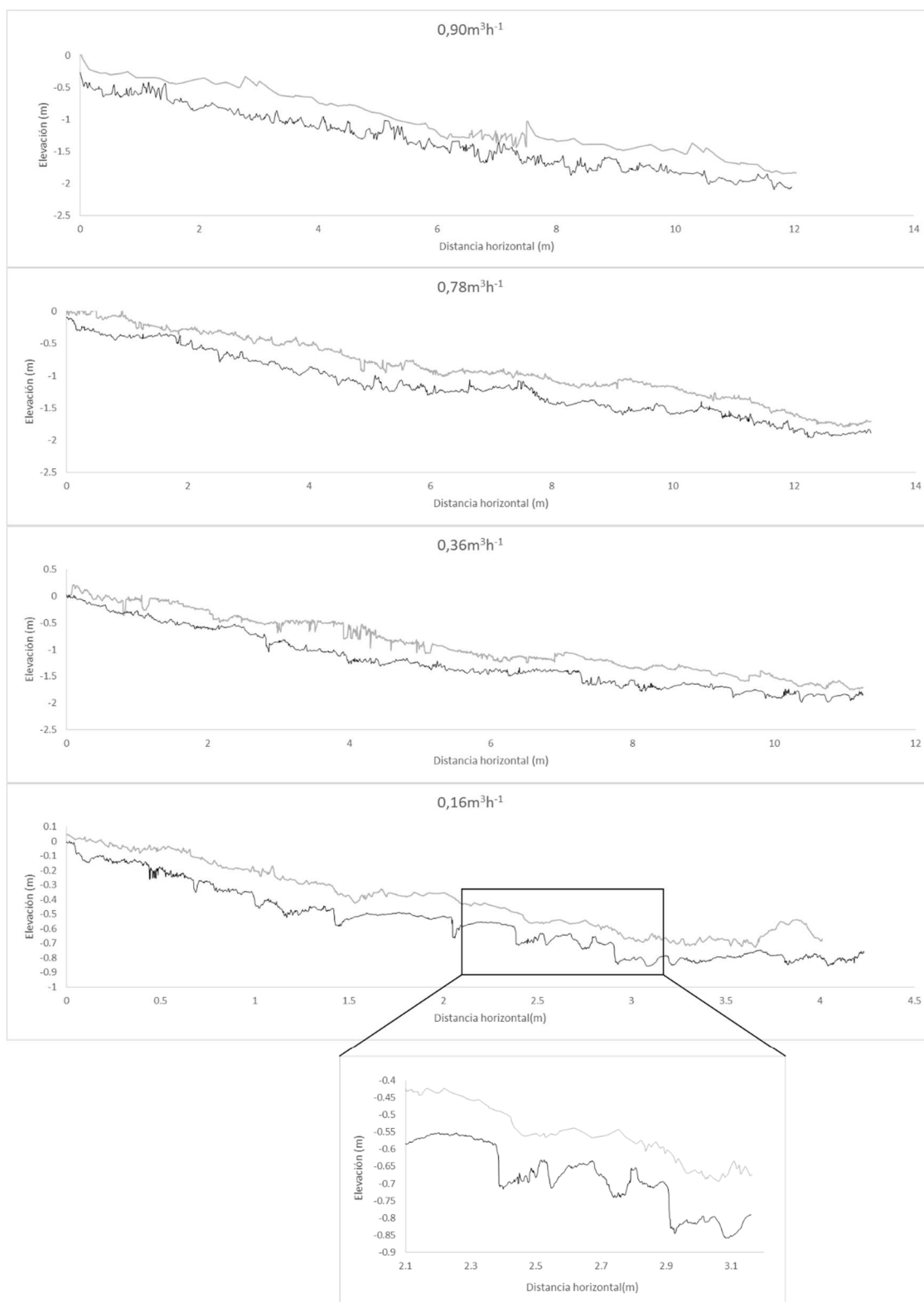


Figura 2.3: Perfiles longitudinales antes (gris) y después (negro) de los experimentos correspondientes a la pendiente del 15% y a los caudales (a) $0,9\text{m}^3\text{h}^{-1}$, (b) $0,78\text{m}^3\text{h}^{-1}$, (c) $0,36\text{m}^3\text{h}^{-1}$ y (d) $0,16\text{m}^3\text{h}^{-1}$

2.3- Resultados

2.3.1- Evaluación de las técnicas de identificación de *pools*

La inspección visual de los perfiles longitudinales antes y después de cada experimento mostró un claro aumento de las macroformas para los diferentes surcos, especialmente en aquellos de mayor pendiente debido a la erosión del lecho (Figura 2.3). De hecho, los valores de f_{20} sólo se encontraba relacionados significativamente con la pendiente y no con el caudal (Tabla 2.4). Sin embargo, las macroformas por sí mismas no indican necesariamente presencia de unidades *step-pool*.

Tabla 2.4: Análisis de regresión múltiple de los surcos^a

	Coefficiente	Error estandar	t	p
Intercept	-0.153	0.65	-0.236	0.82
S	0.123	0.042	2.88	0.03
Q	1.27 E-4	1.29 E-4	0.98	0.37

(a) La variable dependiente es la banda de tolerancia de 20 mm (f_{20}); las variables independientes son la pendiente (S) y el caudal (Q). Aquí, t es el valor t de Student y p es la probabilidad de que el coeficiente sea cero. $R^2 = 0,61$, error estándar de estimación = 0,411, $F = 6,37$, $p = 0,042$, $n = 8$.

El número de *pools* detectados utilizando marcadores (es decir, sustitutos de agregados de suelo) fue alrededor de lo esperado según la inspección visual de los surcos. No obstante, estos resultados deben ser interpretados con precaución. Por ejemplo, se observó que la presencia de grava (con un diámetro equivalente de entre 15-20mm) en el lecho, a veces resultaba en la acumulación de agregados. De forma similar, la acumulación de agregados también se produjo en algunas salientes en los laterales del canal (Figura 2.4).

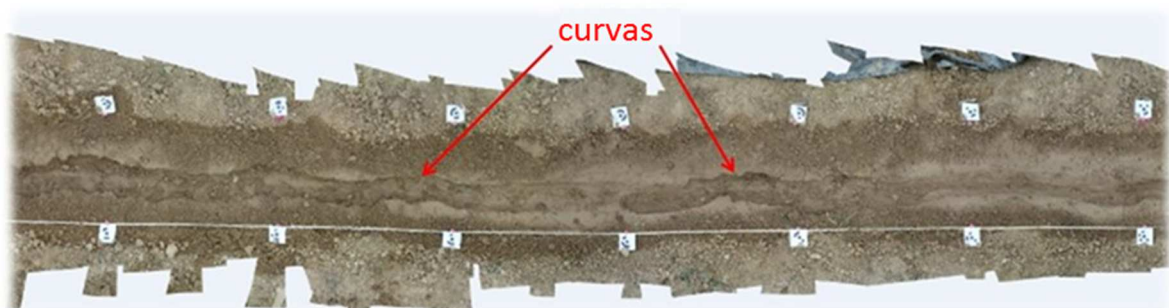


Figura 2.4: Vista en planta de parte de un surco desarrollado en pendiente=5% y $Q = 5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Los surcos de baja pendiente, normalmente, no fueron tan rectilíneos como se pretendía. Ver curvas a lo largo del canal.

La aplicación del procedimiento de reconocimiento automático de las unidades *step-pool*, con valores críticos originalmente propuestos por Zimmermann et al. (2008) (Tabla 2.3) produjo, en general, una sobreestimación significativa del número total de unidades *step-pool* (ver Figura 2.5, Zimmermann). Cuando estos valores críticos fueron sustituidos por los definidos ad hoc para nuestros experimentos, la identificación de las secuencias de unidades *step-pool* fue mucho más realista (ver Figura 2.5, Zimmermann mod.).

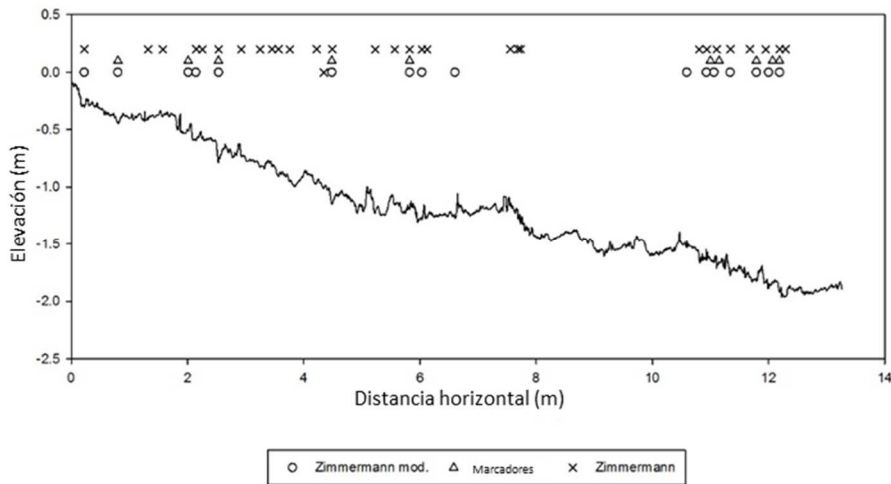


Figura 2.5: Ejemplo de un conjunto de pools identificadas en un perfil longitudinal de elevación de surcos (pendiente: 15%, caudal: $0,78 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) i) siguiendo el procedimiento de Zimmermann et al. (2008) con valores críticos originales (Zimmermann), ii) siguiendo el procedimiento de Zimmermann et al. (2008) con valores críticos ajustados (Zimmermann mod) y iii) utilizando marcadores.

Aproximadamente el 70% de los pools identificados por el algoritmo de Zimmermann et al. (2008) fueron también detectados por los marcadores de *pools* (ver Figura 2.5, marcadores de *pools*). Sin embargo, dado que la técnica basada en el uso de marcadores fue más sensible a los errores experimentales que el algoritmo de Zimmerman, a partir de ahora sólo utilizaremos los resultados obtenidos mediante el algoritmo de Zimmerman con valores críticos ajustados ver Tabla 2.3, columna "Este trabajo").

2.3.2-. Identificación y disposición espacial de las unidades *step-pool*

El número de unidades *step-pool* por unidad de longitud detectados en los perfiles longitudinales de los surcos formados en la pendiente del 15%, aumentó significativamente en comparación con los perfiles longitudinales iniciales (anteriores a los experimentos) (Tabla 2.5). Los surcos formados en pendientes bajas (3-5%), aunque mostraron un incremento en la macro-rugosidad (especialmente en la frecuencia de rugosidad (ver arriba) (Tabla 2.4)) esto no resultó

en una reconfiguración del lecho del surco en unidades *step-pool* (Tabla 2.5). Nótese que, como se mencionó anteriormente, en los experimentos realizados en las pendientes más bajas el flujo erosivo no siempre dio lugar a canales bien desarrollados (Figura 2.6), originando tramos con secciones transversales escasamente definidas.

Tabla 2.5: Número de unidades *step-pool* por unidad de longitud del surco identificadas por el algoritmo modificado de Zimmermann et al. (2008) antes (situación inicial) y después (tras formación del surco) de los experimentos.

Pendiente (%)	Q (m ³ h ⁻¹)	Nº unidades <i>step-pool</i> / m	
		Antes	Después
3	1,60	-	0,00
3	5,00	0,00	0,00
5	2,50	0,00	0,00
5	5,00	0,08	0,08
15	0,16	0,50	2,75
15	0,36	0,09	1,24
15	0,78	0,27	0,62
15	0,90	0,00	1,13

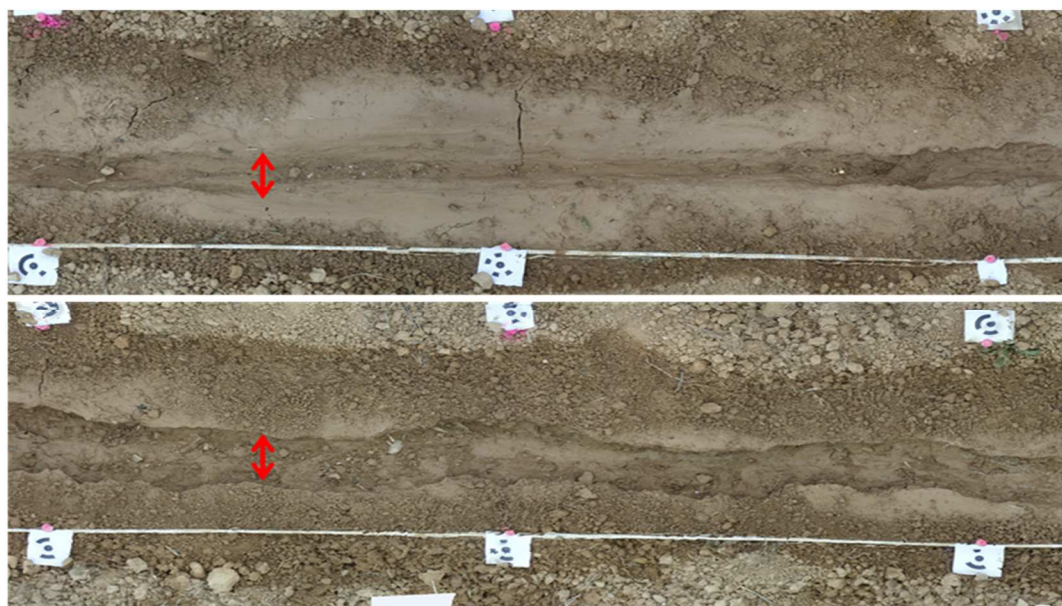


Figura 2.6: Imágenes de un tramo bien definido (abajo) e incipiente (arriba) del mismo surco desarrollado en pendiente=5% y Q=2,5 m³ h⁻¹. Las flechas rojas indican aproximadamente el ancho medio del surco (0,15 m).

El número de unidades *step-pool* en surcos formados en la ladera de 15% de pendiente, no parecía estar relacionado o controlado por el caudal (Tabla 2.5). En cambio, el tamaño de los *pools* sí parecía estar controlado por este: con una pendiente constante (15%), las alturas de los *pools* (H) mostraron una clara tendencia creciente con el caudal ($p < 0,05$) (Figura 2.7). Sin embargo, el aumento en la altura de los *pools* (H , Figura 2.1) fue acompañado por un aumento más o menos proporcional en la longitud de estos (PL , Figura 2.1), resultando un valor aproximadamente constante en la pendiente de los *pools* (H/PL), independientemente del caudal aportado (Figura 2.8).

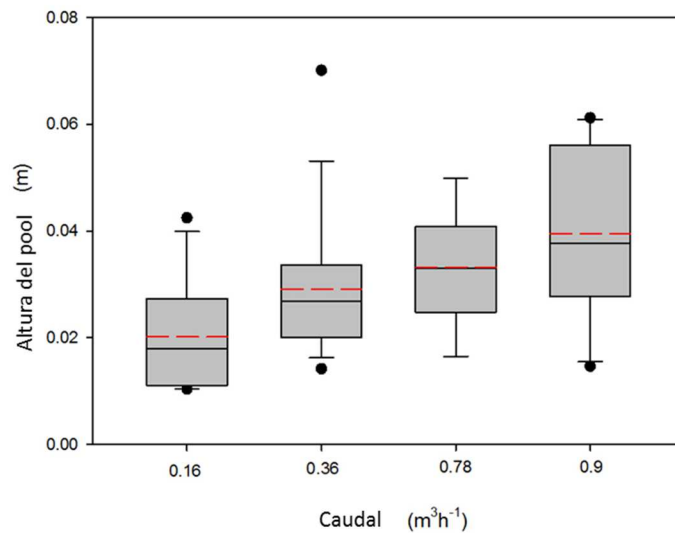


Figura 2.7: Alturas de *pools* desarrollados con 4 caudales diferentes y una única pendiente (15%). Las líneas discontinuas negras y rojas dentro de las cajas son la mediana y el promedio, respectivamente,

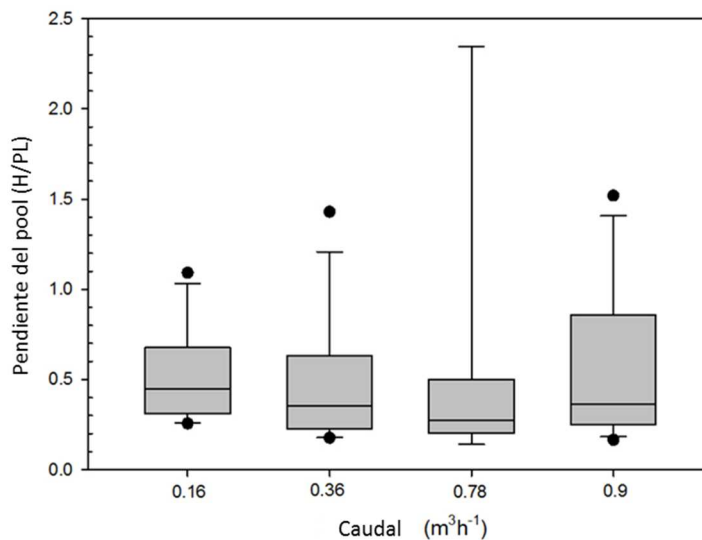


Figura 2.8: Pendiente de los *pools* (es decir, la altura del *pool* H (ver Figura 2.7) sobre la longitud de este PL) en diferentes caudales y una sola pendiente (15%). El valor medio de H/PL es aproximadamente 0,35.

2.3.3-. Frecuencia de unidades *step-pool*

En los cuatro surcos formados en la mayor pendiente (15%), la distancia media entre dos unidades *step-pool* sucesivas (SL, Figura 2.1) para todos los caudales fue de 38 cm, o 4,3 veces la anchura media de los surcos. Sin embargo, estos datos presentaron una alta variabilidad (coeficiente de variación del SL = 130%). Cabe destacar que en cada surco se observaron largos tramos donde los valores de SL se acercaron al valor promedio, pero con una variación considerablemente menor (coeficiente de variación de SL ~ 50%) (ver zoom en la Figura 2.9).

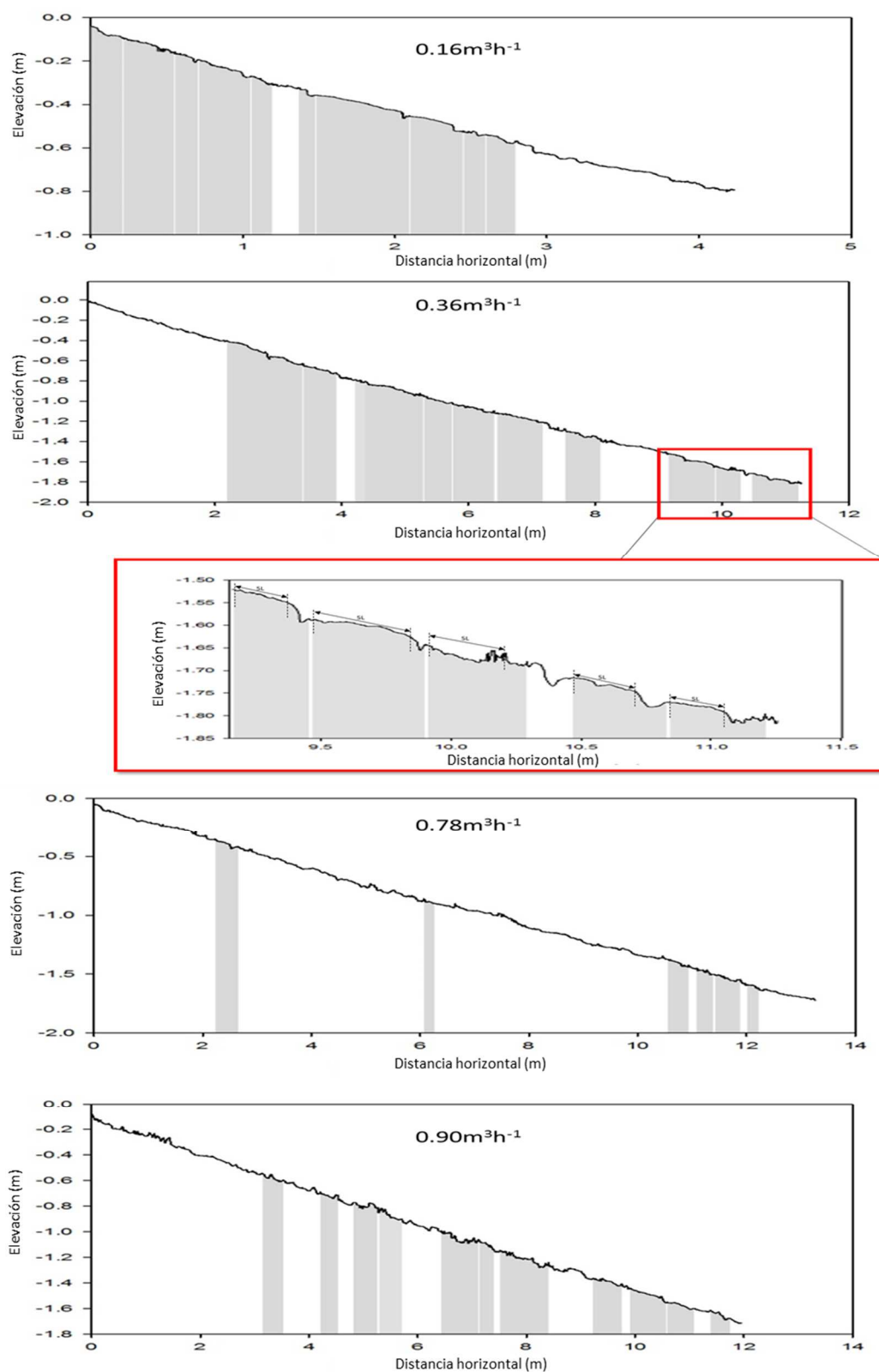


Figura 2.9: Perfiles longitudinales de los surcos (exageración vertical=4) desarrollados a la pendiente del 15% y con un caudal de (a) $0,16 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, (b) $0,36 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, (c) $0,78 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ y (d) $0,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Las bandas grises indican los tramos identificados como unidades *step-pool* de acuerdo con el algoritmo de clasificación (Tabla 2.3, "Este trabajo").

El análisis de FFT no reveló periodicidad en las macroformas para ninguno de los cuatro surcos en la pendiente de 15%. Sin embargo, la aplicación de la técnica presentada por Huffaker et al. (2016) mostró un comportamiento similar a una función senoidal, pero esto sólo explicó un máximo de 15% de la forma general de los perfiles longitudinales. La periodicidad de esta señal fue diferente en cada uno de los surcos analizados y varió entre aproximadamente 0,6 y 1,0 m (ver Figura 2.10). Este rango de valores es cercano a lo que se observó experimentalmente, pero la baja "intensidad" de la señal impide ser concluyente al respecto. Sin embargo, este valor de señal explicada de 15% estaría realmente indicando la existencia de periodicidad en el fenómeno (Ray Huffaker, comunicación personal).

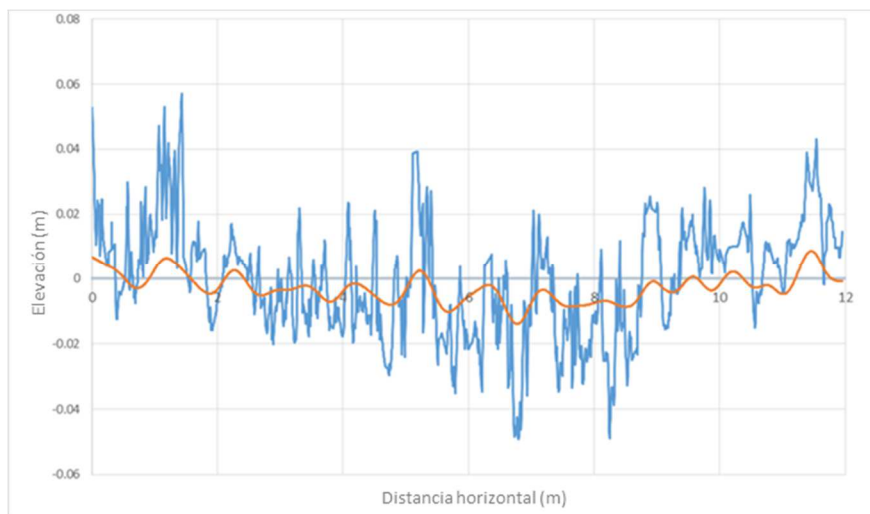


Figura 2.10: Ejemplo del análisis de espectro de Huffaker et al. (2016) aplicado sobre el perfil longitudinal de elevación (línea azul) correspondiente al surco formado en S:15% y Q: 0,9 m³ h⁻¹. La técnica separó las series en valores de elevación (línea marrón) y ruido (no se muestra). La señal explica sólo el 15% de la forma general del perfil longitudinal. La periodicidad de la señal está entre 0,6 y 1 m.

Finalmente, y como era de esperar, la velocidad media del flujo para todos los surcos no fue afectada significativamente por la pendiente, sino que fue dependiente del caudal (Tabla 2.6).

Tabla 2.6: Análisis de regresión múltiple para los surcos^a

	Coeficiente	Error estándar	t	p
Intercepto	0,295	0,073	4,06	0,01
S	-0,00284	0,005	-0,59	0,58
Q	162,902	51,7	3,14	0,02

(^a)La variable dependiente es la velocidad; las variables independientes son la pendiente (S) y el caudal (Q). "t" es el valor t de Student, y "p" es la probabilidad de que el coeficiente sea cero. R² = 0,82, el error estándar de estimación es 0,046, F= 17,5, p= 0,005, y n=8.

2.4-. Discusión

En los ríos de montaña, las unidades *step-pool* se forman por la acumulación progresiva de material arrastrado (por ejemplo, piedras y troncos) que a su vez forma pequeñas presas a lo largo del canal, generando un *pool* aguas abajo de cada presa. El proceso de formación de los *pools* en los surcos de erosión se produce en cambio por la erosión del suelo (material cohesivo) y no por el arrastre y la acumulación de material justo antes de los *pools*. Los *pools* que se forman por la erosión de los materiales, se mueven aguas arriba debido a la erosión en su cabecera (erosión remontante) y esto puede llevar a alguna deposición en su parte inferior. Sin embargo, nunca hemos observado que a lo largo del lecho de los surcos los agregados del suelo se bloqueen acumulándose partículas más pequeñas a su alrededor y, creando de esta forma, una especie de presa como ocurre en los ríos de montaña. Además, en un surco, un caudal más potente y erosivo que el originario no causaría una eliminación de los *pools* existentes, sino más bien una ampliación de los mismos, como se deduce de Giménez et al. (2007). Un *pool* de mayor tamaño disiparía más energía, compensando así la energía extra proporcionada por el aumento de caudal.

A pesar de estas diferencias en los mecanismos de formación de *steps* y *pools* en surcos y ríos de montaña, las unidades *step-pool* podrían considerarse como formaciones periódicas del lecho que reflejan un ajuste mutuo entre el flujo y la morfología del lecho para ambos canales.

El algoritmo propuesto por Zimmermann et al. (2008) es una técnica empírica para la identificación de *steps* y *pools* en perfiles longitudinales de elevación, basada en umbrales geométricos arbitrarios. Por lo tanto, puede clasificar erróneamente algunas unidades *step-pool*. Además, no debe descartarse la posibilidad de que la presencia de grava en el lecho de los surcos haya alterado los perfiles longitudinales de estos (y haya afectado de alguna manera los resultados obtenidos por este algoritmo). Por ejemplo, en los ríos de montaña, la distribución espacial de los *pools* podría verse significativamente afectada por la presencia de, por ejemplo, troncos y rocas cuyos diámetros estuviesen en la misma escala que la profundidad del agua (Grant et al., 1990). Este podría ser nuestro caso con el tamaño de la grava presente en el lecho del surco, de 15-20 mm, que es aproximadamente la profundidad promedio del agua en los surcos (Tabla 2.2).

Además, durante la validación de su algoritmo, Zimmermann et al. (2008) advirtieron que, en unos pocos casos, las unidades *step-pool* identificadas *in situ* de forma visual en su respectivo perfil longitudinal no eran, sin embargo, reconocidas por el algoritmo debido a su pequeño

tamaño. En un solo surco, pueden coexistir tanto *pools* pequeños como grandes (Giménez y Govers, 2001). En esta experimentación, se observaron *in situ* algunas depresiones similares a los *pools* bien desarrollados, pero de menor tamaño (y no muy profundas) a lo largo de algunos tramos en diferentes surcos. Por lo tanto, no se descarta la posibilidad de que algunos *pools* pequeños no hayan sido detectados por el procedimiento de Zimmermann et al. (2008).

Como ya hemos explicado, los resultados obtenidos por el algoritmo de Zimmerman et al. (2008) deben ser interpretados con cautela. Sin embargo, su aplicación asegura una clasificación objetiva de los *steps* y *pools*, facilitando así la comparación entre distintos trabajos, tal y como se presenta en este documento. Mientras que los cálculos para los surcos individuales son inciertos, sí se ha visto que no todos los surcos se caracterizan por una sucesión de unidades *step-pool* y que dichos sistemas sólo se desarrollaron en una pendiente lo suficientemente pronunciada (en este caso superior al 5%). Según los experimentos realizados en este trabajo, la pendiente mínima necesaria para el desarrollo de unidades de *step-pool* en surcos parece estar comprendida entre el 5 y el 15%.

También en los ríos de montaña, la formación de unidades *step-pool* fue evidente sólo en aquellos ríos con una pendiente pronunciada de más del 3-5% (por ejemplo, Montgomery y Buffington, 1997; Billi et al., 1998; Wohl y Thompson, 2000), o incluso superior al 17% (Zimmermann e Church, 2001). En cambio, es más probable que las pendientes más bajas den lugar a las denominadas unidades solitarias (*lonely step-pool*) (Church, 2002). En los ríos de montaña, se observó un aumento notable en el número unidades *step-pool* por unidad de longitud del canal al incrementar la pendiente media (por ejemplo, Heede, 1981; Chin, 1989; Wohl y Grodek, 1994; Duckson y Duckson, 2001).

De acuerdo con Judd (1964), la relación entre la separación de los *pools* (SL, Figura 2.1) y la pendiente del canal (S) puede ser expresada como:

$$SL = H / (CS^2) \quad (2.2)$$

donde H es la altura del *pool* (Figura 2.1), y C y Z son constantes. La ecuación (2.2) confirma la relación directa entre el número de *pool* por unidad de longitud de canal y la pendiente.

Basándose en experimentos de laboratorio y en observaciones de ríos de montaña, Abrahams et al. (1995) concluyeron que las unidades *step-pool* (formadas por acumulaciones de cantos rodados y rocas transversales a la dirección del flujo) ajustaban su forma de tal manera que maximizaban la resistencia del flujo. Esto ocurrió cuando

$$1 \leq (H/PL)/S \leq 2 \quad (2.3)$$

donde H y PL son la altura y la longitud del pool (Figura 2.1) y S la pendiente media del río. Esto significa que la caída en la altura de elevación en el *pool* (y, por lo tanto, disminución de energía) es mayor a la disminución de la altura de elevación a lo largo del canal debida a la pendiente general del canal.

En nuestros surcos de 15% de pendiente el valor promedio de la relación (H/PL)/S fue de 2,3, lo que concuerda aproximadamente con las observaciones de Abrahams et al. (1995).

Nuestros hallazgos sugieren que el caudal afecta principalmente al tamaño de los *pools* (altura y longitud) (Figuras 7 y 8)). Esta reconfiguración en la geometría del pool está de acuerdo con los hallazgos de Bennett et al. (2000). Ellos realizaron experimentos en un canal de laboratorio, aportando diferentes caudales y con una pendiente constante, con el objetivo de estudiar el desarrollo de cabeceras por flujos concentrados. Observaron que el potencial erosivo del flujo sobre la cabecera aumentaba a medida que aumentaba el caudal, lo que producía un incremento proporcional tanto de la profundidad máxima de socavación de la cabecera ($\sim H$) como de la distancia horizontal desde la pared aguas arriba de la cabecera hasta la profundidad máxima ($\sim PL$). Por lo tanto, el tamaño de la cabecera aumentó, pero su proporción se mantuvo constante. Es decir, un incremento en el caudal parece inducir un incremento en la altura de la rugosidad (tamaño del *pool*) más que en la frecuencia de ocurrencia de las unidades *step-pool*.

Hasta donde saben los autores, no se han realizado estudios enfocados al análisis de la posible periodicidad en la aparición *step-pools* en los surcos de erosión. Sin embargo, se ha informado de espaciamientos sistemáticos y regulares de estas unidades hidráulicas en ríos de montaña con una frecuencia que varía de menos de uno a cuatro veces el ancho de canal (Marston, 1982; Chin, 1989; Grant et al., 1990). A pesar de ello, ningún estudio mostró una periodicidad clara en el desarrollo de las unidades *step-pool* (Heede, 1981; Duckson y Duckson, 2001; Zimmermann e Church, 2001). Esta falta de periodicidad podría explicarse por la interacción de varios factores, como la presencia de vegetación, afloramientos rocosos en el lecho, o también por las repentinas curvas o cambios de dirección del eje del río que de alguna manera afectaron el desarrollo de una secuencia morfológica (más) regular (Wertz, 1966). Asimismo, no se ha encontrado una periodicidad clara en nuestros surcos de erosión. Pero, como ocurre a veces en los ríos de montaña, la ubicación exacta de los pools en los surcos podría ser también afectada por las variaciones puntuales (por ejemplo, en la resistencia del lecho a la erosión y/o la presencia de fragmentos de roca que inicien la erosión).

Nuestros experimentos confirman la independencia de la velocidad media del flujo con la pendiente general del surco (Govers, 1992; Nearing et al., 1997, 1999; y Di Stefano et al., 2018) (Tabla 2.6). Las condiciones hidráulicas en el surco resultan entonces de un equilibrio entre el agente erosivo (flujo concentrado) y la resistencia ofrecida por el suelo (Giménez y Govers, 2001).

2.5- Conclusiones

En los surcos de erosión existe un ajuste mutuo entre el flujo y la morfología del canal. La remodelación del lecho del surco se da a partir de la generación de unidades *step-pool*. Sin embargo, aunque la formación de unidades *step-pool* puede ocurrir en los surcos, no es el único mecanismo a través del cual se manifiesta la interacción erosión-hidráulica. En bajas pendientes, la erosión lleva a un incremento de la rugosidad del lecho del surco (es decir, las zonas más débiles se erosionan más rápido que las zonas más resistentes). Sin embargo, la fuerza erosiva del flujo no es lo suficientemente grande como para remodelar el lecho en un claro sistema de unidades *step-pool*. Esto es debido, probablemente, al hecho de que la erosión local es limitada. Dado que no se aprecia formación de *pools* claros y profundos en pendientes bajas, tampoco se ven *steps* claramente distinguibles. Sin embargo, en pendientes bajas, la interacción morfología del canal-hidráulica es lo suficientemente intensa como para tener un efecto notable en la hidráulica, como por ejemplo que la velocidad media del flujo, en equilibrio, es independiente de la pendiente.

La pendiente mínima necesaria para el desarrollo de unidades *step-pool* estaría entre el 5 y el 15%. Además, el caudal parece afectar al tamaño del *pool* (es decir, a la amplitud de la rugosidad).

Sin embargo, no está claro que exista una distancia aproximadamente constante entre las unidades *step-pool*. Pero existen factores externos como la presencia de grava en el lecho del surco que podrían haber afectado de alguna manera el crecimiento normal y la frecuencia de estas características morfológicas. Es por ello que se deben realizar más experimentos en laboratorio utilizando suelos homogéneos y combinando diferentes caudales y pendientes.

La identificación de *step-pool* como unidades hidráulicas es una tarea difícil de lograr sin información detallada sobre las características del flujo que las formó, como por ejemplo la velocidad. En este trabajo se han evaluado dos técnicas innovadoras, una de ellas utilizando marcadores de *pools in situ* y la otra, a partir del uso de reglas geométricas aplicadas en los

perfiles longitudinales de elevación obtenidos del eje central del surco. La identificación de *steps* y *pools* a partir de los perfiles longitudinales de elevación puede llevarse a cabo de manera objetiva utilizando una serie de reglas geométricas propuestas por Zimmermann et al. (2008). En este trabajo se propone un nuevo conjunto de valores umbrales, más apropiados para pequeños canales de erosión, como los surcos.

CAPÍTULO 3: HACIA UNA MEJOR EVALUACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE SURCOS Y CÁRCAVAS*

3.1- Introducción

Como se ha podido ver en el capítulo 2, los canales de erosión, en especial surcos y cárcavas efímeras, pueden evolucionar rápidamente, remodelando la geometría del lecho y generando, por tanto, gran volumen de sedimento. Por ejemplo, Poesen et al. (2003) estimaron que la contribución de las cárcavas efímeras puede variar entre el 10% y el 94% de toda la pérdida de suelo dentro de las cuencas, y entre el 50 y el 80% en los ambientes semiáridos. La importancia de este fenómeno aumenta la urgencia de investigación sobre estas formas de erosión y su modelización y gestión de los procesos de pérdida y degradación de suelo (Poesen 2018).

La caracterización morfológica de los canales de erosión es esencial para cuantificar las pérdidas de suelo y analizar su dinámica cuando se estudian los procesos de erosión por flujo concentrado.

La cuestión principal de esta caracterización morfológica está asociada con la obtención de valores exactos de anchura y profundidad de las distintas secciones transversales del canal erosionado. El ancho de cada una de dichas secciones se suele definir como la línea imaginaria cuyos extremos están situados en los puntos de los dos márgenes en los que se manifiesta un cambio abrupto de pendiente (Casalí et al., 2015). Este criterio se aplica a las mediciones directas de campo, y también cuando se emplean en la caracterización modelos digitales de elevación (DEM) y algoritmos matemáticos *ad hoc* (Por ejemplo, Castillo et al., 2014; Evans y Lindsay, 2010; Parker et al., 2012). Pero la ubicación de estos extremos no siempre es clara o evidente, especialmente en las secciones transversales con formas irregulares y límites difusos.

Al delimitar la profundidad, definida como la distancia vertical entre el punto más bajo del perfil y la línea imaginaria que representa la anchura, no siempre es evidente cuál es el punto más bajo del perfil, en especial en aquellas secciones transversales de lechos irregulares. Al igual que con la anchura, este criterio se aplica tanto en mediciones directas en campo como en la caracterización modelos digitales de elevación (DEM) y algoritmos matemáticos *ad hoc*.

* Capítulo basado en: Zubieta, E., Giménez, R., Campo-Bescós, M.A., Casalí, J. 2020. Towards a better assessment of the geometry of rills and gullies. *Earth Surface Processes and Landforms. Volumen Especial. En revisión.*

Así pues, la caracterización de la sección transversal de un canal erosionado, especialmente la determinación de su anchura, está condicionada por la percepción particular del experto. Ello plantea graves problemas en cuanto a la repetibilidad de las mediciones y genera incertidumbres cuando se comparan los resultados experimentales sobre erosión por flujos concentrados obtenidos por diferentes expertos (Casalí et al., 2015). Pueden obtenerse por tanto diferencias significativas al calcular el volumen de suelo desprendido y, por consiguiente, en los valores de la tasa de erosión.

No obstante, incluso en el caso de un canal con una anchura claramente definida, se plantea una cuestión: ¿los límites del canal, definidos como se ha explicado anteriormente, corresponden realmente a los límites transversales del proceso erosivo que causó la cárcava? (Casalí et al., 2015).

La única forma objetiva e inequívoca de determinar la morfología de un canal erosionado es mediante la substracción a lo largo del canal de los perfiles de elevación obtenidos antes y después de que se formara el canal (Casalí et al., 2015). La anchura cierta de una sección transversal (a la que en adelante denominaremos “anchura de referencia”) estará determinada por los dos puntos de intersección de los perfiles transversales “antes y después” en esa sección. Por otro lado, el área de la sección transversal será el área comprendida entre ambos perfiles transversales. Sin embargo, rara vez se dispone de información topográfica anterior al proceso erosivo (Figura 3.1).

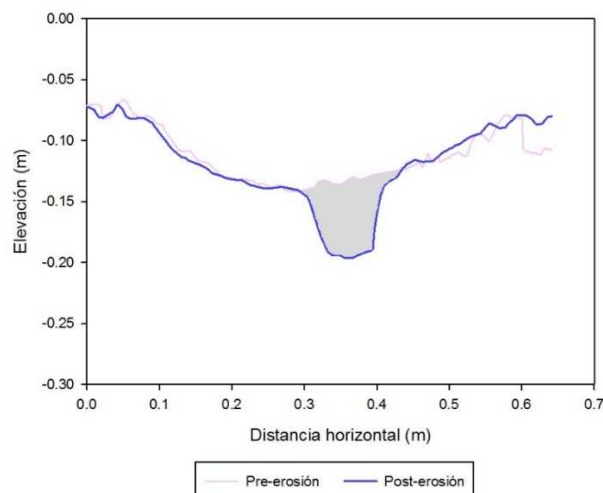


Figura 3.1: Definición gráfica del área erosionada. En gris la superficie comprendida entre los puntos de intersección de las secciones transversales anterior y posterior a la formación del canal de erosión.

El principal objetivo de este trabajo es estimar el error asociado a la delimitación de la anchura y del área de secciones transversales de pequeños canales de erosión. Para ello se comparará la anchura de referencia (y el área transversal dependiente de ésta) de secciones transversales obtenidas experimentalmente siguiendo una caracterización realista tal y como proponen Casalí et al. (2015), con las anchuras determinadas por una serie de expertos, considerando una amplia variedad de formas de sección transversal. Se aspira en último término a proporcionar información que posibilite proponer reglas que permitan una identificación realista de la anchura de cauces cuando la información sobre la forma original del cauce no esté disponible, lo que ocurre en la inmensa mayoría de los casos. De todos modos, serán necesarios múltiples estudios de esta índole para estar en disposición de proponer con criterio suficiente dichas reglas.

Nos parece interesante hacer constar que creemos que es la primera vez que la geometría de los pequeños canales erosionados se determina de manera inequívoca a partir de datos de campo, según un procedimiento previamente publicado por Casalí et al. (2015).

3.2.- Materiales y métodos

Para este trabajo se ha realizado una caracterización detallada de la geometría de pequeños canales de erosión (surcos) a partir de un conjunto de datos experimentales obtenidos previamente (ver capítulo 2, apartado 2.2.2-. *Protocolo experimental*). De ellos, se ha seleccionado una colección de seis surcos formados a partir de diferentes combinaciones de pendiente (S) y caudal (Q): S= 5% y 15%; Q= 5,00 m³ h⁻¹, 2,50 m³ h⁻¹, 0,16 m³ h⁻¹, 0,36 m³ h⁻¹, 0,78 m³ h⁻¹ y 0,9 m³ h⁻¹.

Recordando el protocolo experimental del capítulo 2, para la creación de los DEMs de alta resolución, primeramente, se tomaron varios cientos de fotografías superpuestas desde diferentes ángulos, cubriendo toda el área experimental. A partir de estas fotografías y utilizando un software profesional (Agisoft® PhotoScan Professional edition v1.0, 2013) se obtuvieron los DEMs, tanto de la superficie previa a la aplicación de caudales (y por tanto aún sin surcos) como de la superficie asurcada. De ellos se han extraído los perfiles de veinte secciones transversales contrastantes (Figura 3.2), tanto de la situación anterior a la formación de los surcos como tras el proceso erosivo.

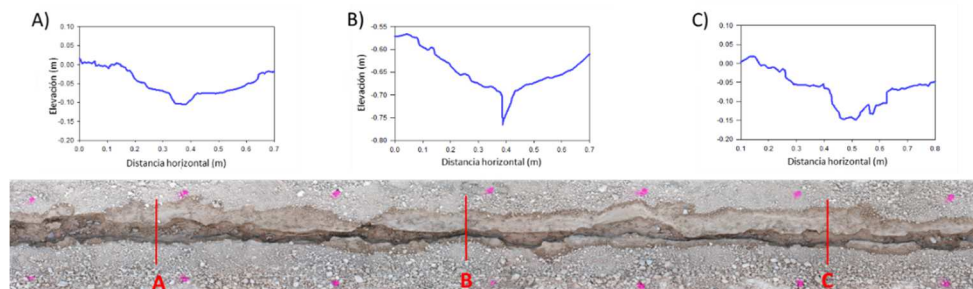


Figura 3.2: Ejemplo de tres secciones transversales seleccionadas (A, B, C) en uno de los surcos experimentales; el flujo corre desde la izquierda (tomado del capítulo 2). Para cada sección transversal la intersección entre los ejes de distancia vertical y horizontal se corresponde con el margen izquierdo del surco.

Para cada sección transversal seleccionada, el ancho se determinó por superposición de los perfiles de elevación antes y después de que se produjeran los procesos de erosión (Figura 3.2). El ancho se ha definido como la línea imaginaria que conecta los puntos de intersección de ambos perfiles, y la longitud del ancho se ha definido como la proyección horizontal de la línea imaginaria (Figura 3.3). El área de la sección transversal ha sido delimitada por los perfiles de elevación post erosión y la línea imaginaria del ancho (Figura 3.4). Estos parámetros geométricos se han considerado como valores de referencia y se han comparado con los obtenidos por 13 expertos, que trabajaron de manera independiente.

Los expertos fueron seleccionados por sus conocimientos y trabajos en erosión por flujo concentrado y forman parte del grupo de investigación THERRAE de la Universidad Pública de Navarra y del Departamento de Ingeniería Rural de la Universidad de Córdoba.

Los expertos únicamente han tenido acceso a los perfiles de elevación de la sección transversal (obtenidos a partir del DEM) después de la formación del surco. Para cada sección transversal, los expertos determinaron el ancho como la línea imaginaria cuyos extremos conectan los cambios abruptos de pendiente identificados en la sección transversal (basándose sólo en su juicio). La longitud del ancho, el área de la sección transversal y la profundidad máxima se definieron como se ha mencionado anteriormente. Se informó a los expertos de que cada surco era el resultado de un único pulso erosivo, pero no se proporcionaron datos sobre la combinación de descarga y pendiente.

En cuanto a la forma general, las secciones transversales seleccionadas se clasificaron como (i) triangulares; (ii) rectangulares, e (iii) irregulares (aquéllas que no encajan con ninguna forma

geométrica regular). Los expertos no tuvieron acceso a esta clasificación. Tras la obtención de los datos (Anexo IV) se realizó un análisis estadístico descriptivo de los resultados.

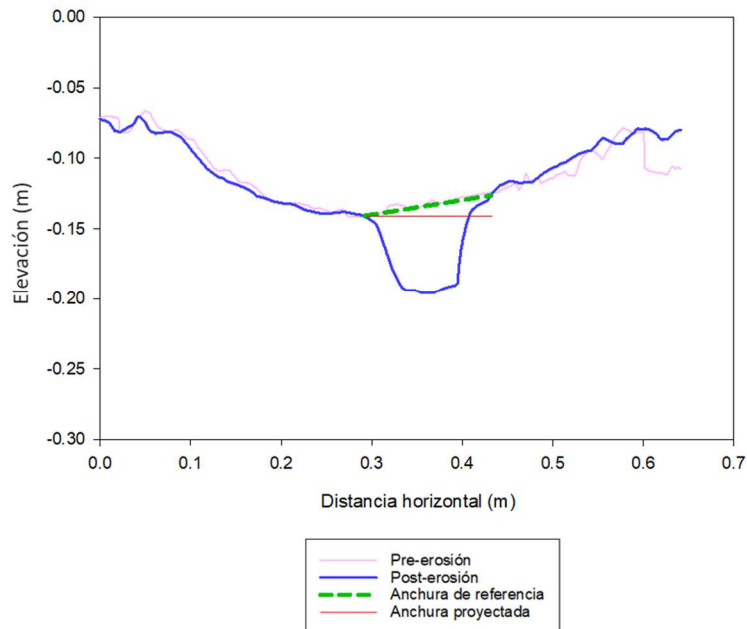
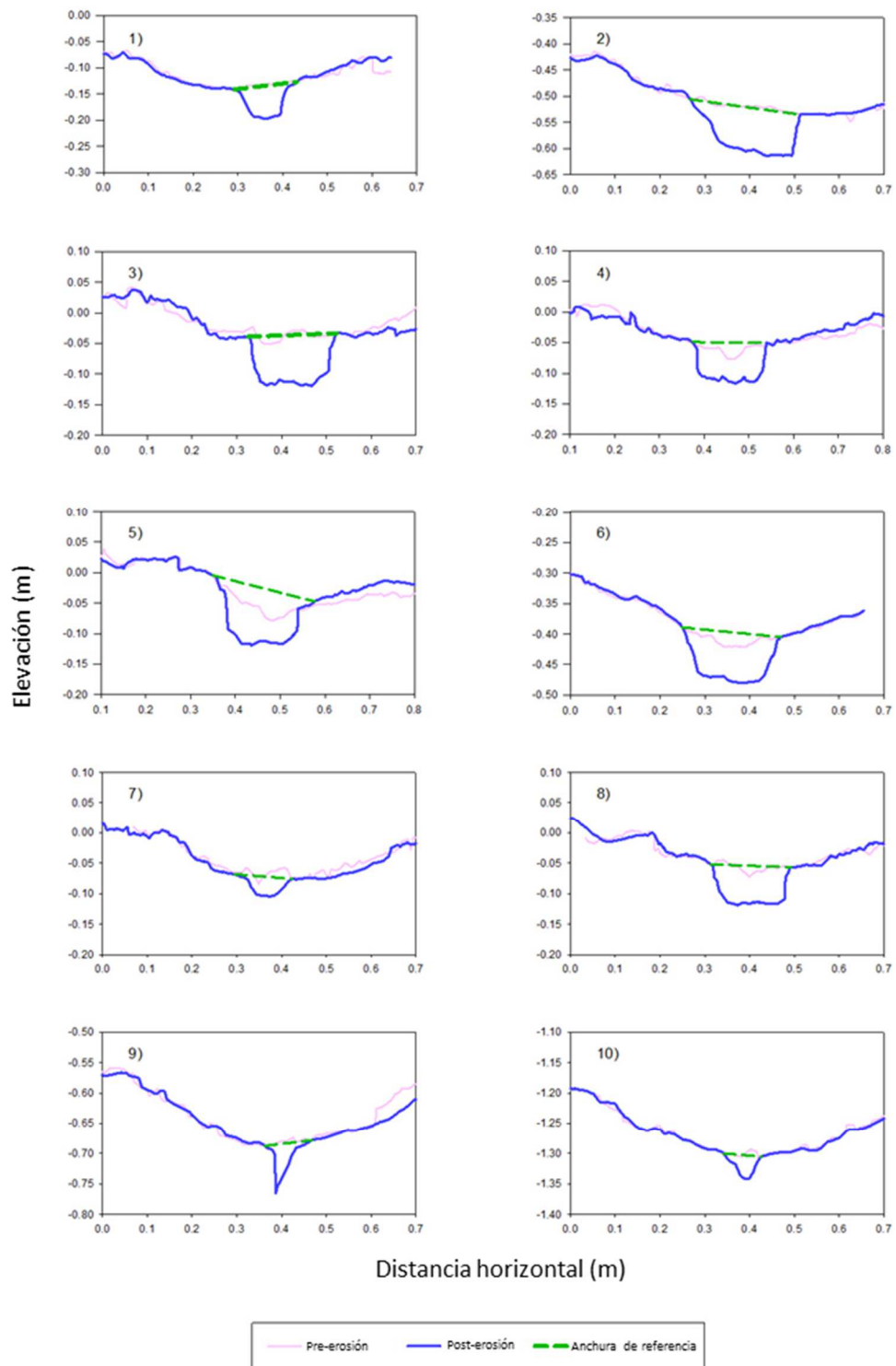


Figura 3.3: Definición gráfica de los perfiles de elevación y determinación de la anchura de la sección: perfil pre-erosión (línea color rosa), perfil post-erosión (línea color azul), anchura de referencia (línea color verde) y anchura proyectada (línea color rojo).



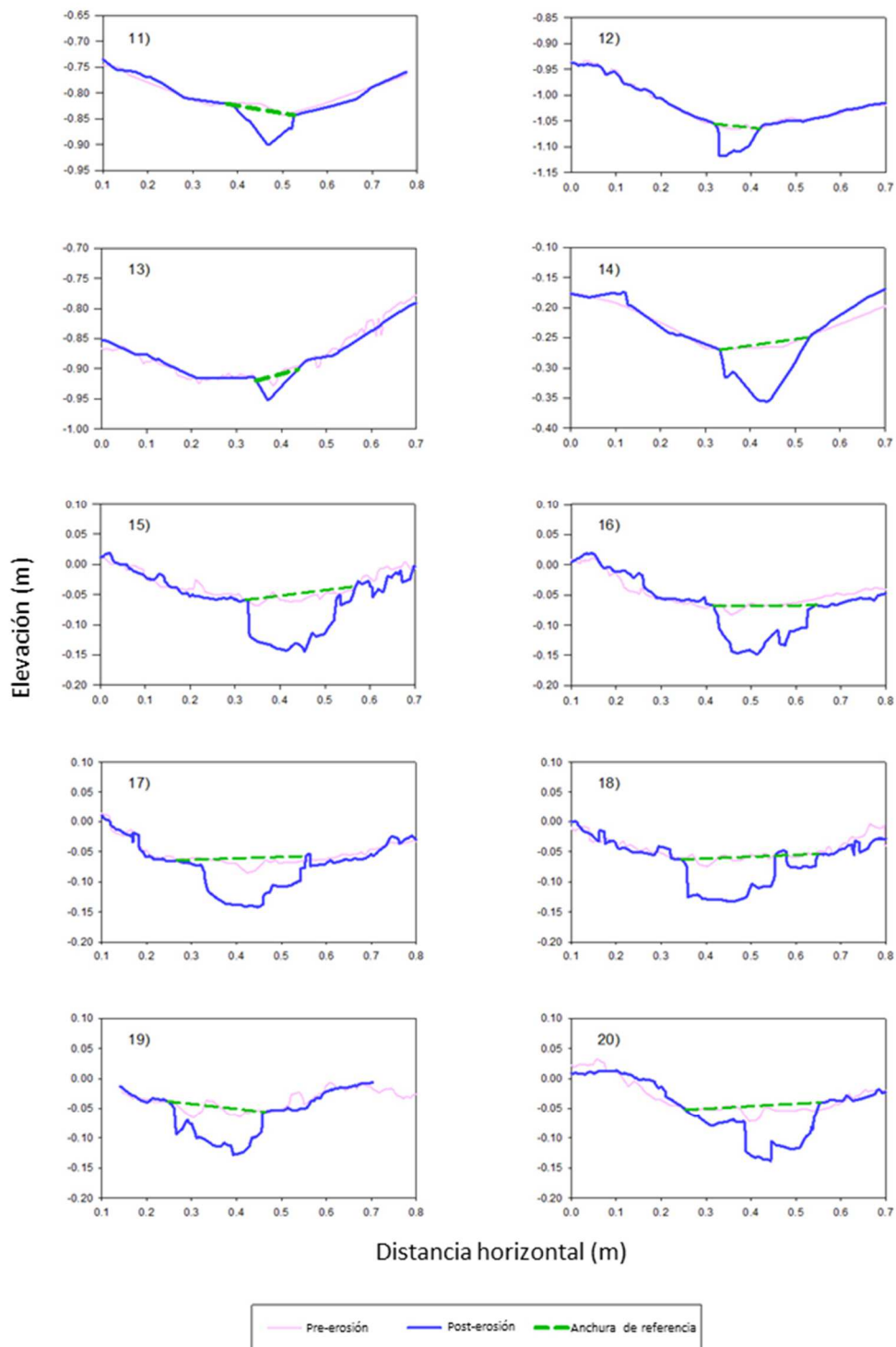


Figura 3.4: Perfiles de elevación antes y después de la erosión del surco para cada una de las 20 secciones transversales y ancho de referencia (línea discontinua verde) que conecta los puntos de intersección de ambos perfiles, de acuerdo con el método propuesto por Casalí et al. (2015).

3.3- Resultados y discusión

Se ha observado una importante disparidad de criterios entre los expertos a la hora de delimitar las anchuras de las secciones transversales (coeficiente de variación, $CV= 64\%$) y, en consecuencia, su área ($CV= 75\%$) (Figura 3.5). La mayor variabilidad se ha dado en las secciones transversales triangulares, con $CV= 86\%$ y $CV= 113\%$ para la anchura y el área, respectivamente. Mientras que la menor variabilidad se ha observado en las secciones transversales irregulares, con CV alrededor del 50% tanto para la anchura como para el área. En los párrafos siguientes se examinan algunas razones que ayudan a explicar esta variabilidad.

Los canales con paredes de pendiente suave, sin cambios bruscos de inclinación, dificultan la identificación de los extremos que delimitan la anchura del canal, lo que da lugar a una tarea subjetiva y arbitraria.

Aunque los expertos conocían que se había producido un único evento erosivo en cada surco, no había información sobre la descarga originaria y la pendiente del terreno y, por consiguiente, sobre la magnitud del pulso erosivo. Esta falta de "perspectiva", o referencia, sobre el poder erosivo del flujo incrementa las especulaciones sobre el área de la sección transversal esperada. Por ejemplo, un flujo altamente erosivo da lugar a la formación de un área de sección transversal relativamente grande. Entonces, la línea imaginaria que delimita el ancho del canal se situaría en niveles relativamente altos del perfil de elevación, aumentando, a su vez, la profundidad máxima supuesta para el canal erosionado.

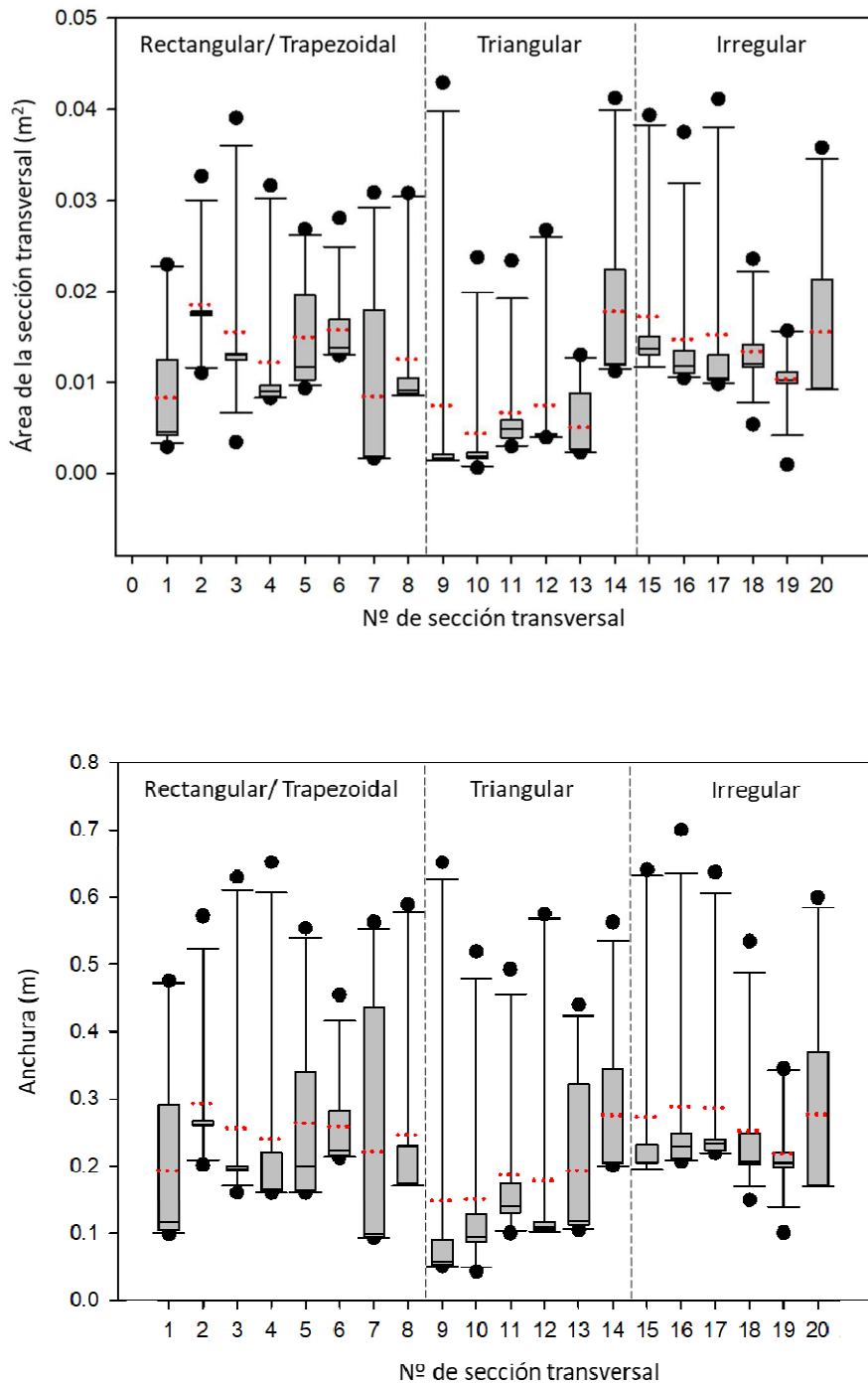


Figura 3.5: Representación en forma de diagrama de cajas de las mediciones de la longitud del ancho (abajo) y del área de la sección transversal (arriba) realizadas por los expertos en cada una de las secciones transversales, clasificadas de acuerdo con su forma general (rectangular/trapezoidal, triangular e irregular). Las líneas negras y las líneas punteadas rojas en los diagramas de cajas son la mediana y la media aritmética, respectivamente.

Parece ser que los expertos se inclinan más a asociar la forma de una sección transversal con una figura geométrica regular y simétrica, como un rectángulo o un trapecio. Estas figuras presentan un ancho superior (el ancho del canal que el experto trata de definir) y un ancho inferior (el lecho del canal) (Figura 3.4, secciones 1-8). El lecho del canal suele ser más fácilmente reconocible, ya que el conjunto de puntos de definición está casi nivelado. Una vez que se ha definido el lecho del canal, parece resultar más sencillo visualizar el ancho superior. Esto puede explicar que la variabilidad entre los expertos haya sido relativamente menor en las secciones transversales rectangulares/trapezoidales ($CV= 59\%$ y $CV= 64\%$ para la anchura y el área) (Figura 3.5). Sin embargo, en las secciones transversales de tipo triangular, el lecho del canal está delimitado prácticamente por un solo punto (Figura 3.4, secciones 9-14). Todo indica que en estos casos el procedimiento no es tan directo, de modo que la definición de los límites superiores (anchura) resulta menos evidente, dando lugar a una elevada variabilidad entre los expertos ($CV= 86\%$ y $CV= 113\%$ para la anchura y el área).

En cambio, en las secciones transversales irregulares, parece que al no estar éstas asociadas a figuras geométricas y no tener el experto una figura de referencia, los expertos son más conservadores a la hora de delimitar la anchura ($CV:47\%$ y 51% para la anchura y el área).

Se han visto grandes diferencias en las anchuras de las secciones transversales determinadas por los expertos. Además, la mayoría sobreestimó las anchuras colocando la línea de definición imaginaria en niveles más altos que los valores de referencia. Esto condujo a una consiguiente sobreestimación de las profundidades máximas y de las áreas de la sección transversal (Figura 3.6) (Tabla 3.1). En promedio, el 90% de los anchos de las secciones transversales se sobrestimaron en un 39%, lo que dio lugar a una sobreestimación media del 75% del área de la sección transversal. La sobreestimación fue más notable en las secciones transversales de tipo triangular, y mayor porcentualmente en el área de la sección transversal que en la anchura (Tabla 3.1).

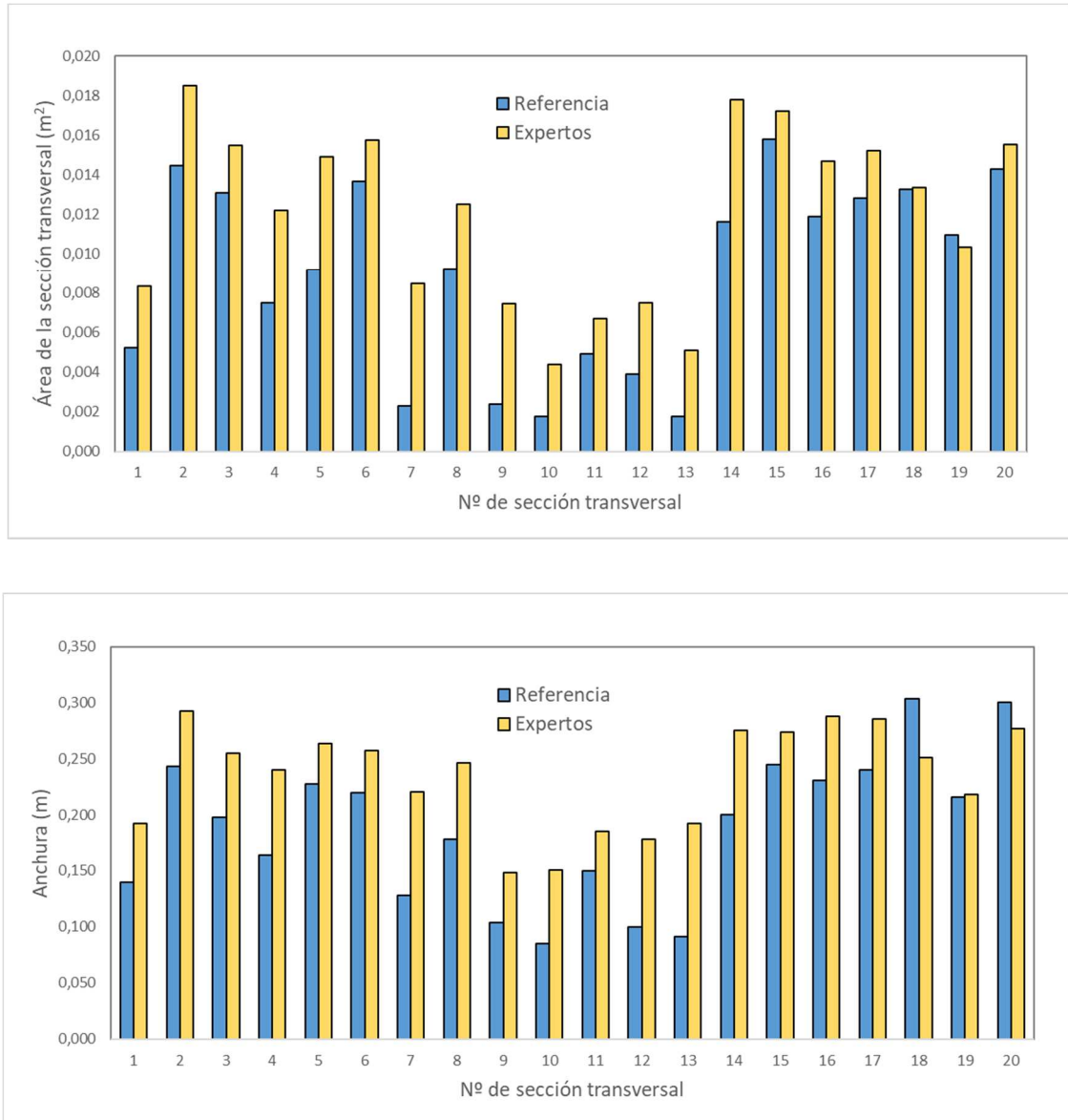


Figura 3.6: Comparación entre los valores medios de las mediciones de la anchura (abajo) y del área de la sección transversal (arriba) realizadas por los expertos en cada una de las secciones transversales (barras amarillas) y los valores de referencia (barras azules).

En cuanto a las secciones ambiguas (anidadas o irregulares), puede interpretarse que los expertos suponían que un flujo relativamente fuerte fue el responsable de la formación de los canales, llevándolos a una sobreestimación. Esto podría deberse a un "sesgo profesional", de modo que, cuando no estaban seguros, los expertos se inclinaban más a sobrestimar la magnitud del fenómeno de erosión, y por lo tanto del impacto ambiental. Podría aventurarse que, por razones de seguridad, se prefiere la sobreestimación para que no quede sin vigilancia ninguna zona propensa a la erosión (lo que podría ser el caso cuando se subestima).

Tabla 3.1. En 18 de las 20 secciones transversales, los expertos sobrestimaron, en promedio, la anchura y la superficie. El cuadro muestra el porcentaje de sobreestimación con respecto al valor de referencia para las diferentes formas generales de las secciones transversales (rectangular/trapezoidal, triangular e irregular, y para el total). Entre paréntesis figura el coeficiente de variación (%).

	Total	Triangular	Rectangular/trapezoidal	Irregular
Anchura	39,1 (73,5)	62,2 (52,9)	34,0 (59,7)	13,6 (62,5)
Área	74,7 (104,3)	120,0 (59,9)	68,8 (120)	14,0 (49,6)

Si esta caracterización se desarrollara directamente in situ, frente a un surco o una cárcava efímera, la delimitación de la sección transversal sería más fácil. Por un lado, las "cicatrices" del desprendimiento del suelo pueden apreciarse fácilmente. Por otra parte, el experto no suele saber qué causó el proceso de erosión (por ejemplo, si el canal erosionado fue producto de uno o varios eventos o pulsos erosivos). En el caso de varios pulsos, la sección transversal podría presentar diferentes "terrazas" o niveles de erosión, generando secciones transversales anidadas. La determinación de los niveles que marcan el límite superior de la sección transversal erosionada es incierta y subjetiva. Es por ello que se cree que el experto sobrestimaría la anchura y, por lo tanto, el área de la sección transversal, especialmente si no hay información sobre la formación del canal erosionado.

3.4-. Conclusiones

Por primera vez, la geometría de la sección transversal de los canales erosionados (surcos) se ha determinado de manera inequívoca (siguiendo a Casalí et al., 2015) y se ha utilizado como referencia para estimar el error incorporado en la caracterización realizada por los expertos.

Como se sospechaba, se da una importante discrepancia entre los expertos al realizar la caracterización geométrica de los canales erosionados, y que además varía con la forma de la sección transversal del canal. En general, los expertos han sobrestimado grandemente los anchos y las áreas de la sección transversal (aproximadamente un 40 y 75% de media, respectivamente), sobrestimándose también en consecuencia las tasas de erosión. Si aceptamos que el comportamiento de los expertos considerados en este estudio es extrapolable a un comportamiento general de los expertos que en el mundo se dedican a la cubicación de canales de erosión, resulta evidente que las tasas reportadas estarían sobredimensionadas. En

todo caso, sería necesario realizar un mayor número de estudios para poder sostener esta afirmación.

Los resultados de este estudio pueden en principio extrapolarse directamente a cárcavas efímeras. Sin embargo, como éstas suelen ser canales de mayores dimensiones que los surcos, son más susceptibles de sufrir con el tiempo cambios en parte de la sección transversal o en toda ella, debidos, por ejemplo, al posible derrumbe de las paredes. Además, como las secciones transversales de las cárcavas son relativamente profundas, pueden verse afectados varios estratos del suelo, cada uno de los cuales presenta una respuesta mecánica diferente al agente erosivo.

Todavía se necesitan criterios claros para definir y determinar las características morfológicas críticas de los surcos y cárcavas. Este trabajo pretende ser un primer paso hacia ese objetivo. Por otro lado, se cree necesario el uso de herramientas matemáticas que permitan una caracterización objetiva y comparable, evitando la subjetividad inherente al ser humano a la hora de caracterizar la geometría de los canales de erosión.

1 **CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DE LA MAGNETITA COMO TRAZADOR**
 2 **MAGNÉTICO DE SEDIMENTOS EN EL ESTUDIO DE LA EROSIÓN POR**
 3 **CÁRCAVAS EFÍMERAS: FACTORES CONDICIONANTES DE LA**
 4 **SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA*.**

5 **4.1- Introducción**

6 La erosión por cárcavas efímeras genera importantes pérdidas y translocación de suelos (Cerdan
 7 et al, 2002), pudiendo contribuir, en ambientes secos, hasta en un 80% a la producción de
 8 sedimentos a nivel de cuenca (Poesen et al., 2003). En general, los flujos concentrados pueden
 9 incrementar notablemente la transferencia de escorrentía, sedimentos y otros materiales desde
 10 su fuente (ej. cárcava efímera) hasta el sumidero, incrementando de esta forma la conectividad
 11 en el paisaje (Casalí et al. 2009). En la erosión por cárcava efímera los sedimentos son generados,
 12 normalmente, de forma intermitente por distintos eventos de precipitación y escorrentía, y son
 13 paulatinamente transportados grandes distancias a lo largo de la red de drenaje del terreno. En
 14 este recorrido el material erosionado puede ir redistribuyéndose y/o depositándose sobre la
 15 superficie y, eventualmente, quedar enterrado posteriormente por material erosionado
 16 procedente de la misma fuente. Por otro lado, las características y condiciones del suelo (por ej.
 17 textura y contenido de humedad) sobre el cual va transitando este material, pueden ser muy
 18 variadas. Pero poco se sabe sobre la compleja distribución espacial de estos sedimentos y de su
 19 evolución en el tiempo (Bracken et al., 2007).

20 Para estudiar el movimiento de sedimentos erosionados se utilizan trazadores y técnicas de
 21 identificación de partículas (ver abajo). Zhang et al. (2001) definieron las características que
 22 debía poseer un trazador ideal, siendo éstas: que se adhiriera fuertemente a las partículas del
 23 suelo; que sea sensible al análisis; que sea fácil de medir; que no suponga gran coste económico;
 24 que se encuentre en baja concentración en el suelo de forma natural; que no interfiera en el
 25 transporte de sedimentos; que tenga baja asimilación por parte de los cultivos; y que sea
 26 benigno para el medio ambiente.

27

28 * Capítulo basado en: Zubieta, E., Larrasoña, J., Aldaz, A., Casalí, J., and Giménez, R. 2020. Assessment of magnetite as a magnetic
 29 tracer for sediments in the study of ephemeral gully erosion: conditioning factors of magnetic susceptibility. *Earth Surface Processes
 30 and Landforms. En revisión.*

31 Los diferentes trazadores de sedimentos utilizados han sido radionucleidos (Estrany et al. 2010),
32 tierras raras (Masselink et al.2017), *fingerprinting* (Chen et al., 2016) y óxidos magnéticos
33 (Guzmán et al., 2013; Ventura et al., 2002). El uso de estos últimos está basado en su detección
34 a partir de la susceptibilidad magnética, propiedad que relaciona la magnetización inducida en
35 un material cuando éste es expuesto a un campo magnético en función de la intensidad de dicho
36 campo. El uso de esta técnica en erosión de suelos se ha vuelto popular debido a su bajo coste
37 económico, rapidez de medición en campo (Jordanova et al. 2014; Royall, 2001) y alta
38 sensibilidad. La metodología utilizada para identificar áreas de erosión y sedimentación, así
39 como para cuantificar la erosión, a partir de la medida de la susceptibilidad magnética de
40 trazadores magnéticos, se basa en la diferencia de valores de susceptibilidad magnética del
41 suelo mezclado con el trazador y la propia del suelo (Hu et al. 2011, Guzmán et al. 2013).

42 Guzmán et al. (2010) desarrollaron y validaron en laboratorio una metodología basada en el uso
43 de óxidos magnéticos como trazadores para el estudio del movimiento de los sedimentos
44 generados por erosión hídrica *laminar* (Guzmán et al. 2015) y para el cálculo de tasas de erosión
45 a partir de valores de susceptibilidad magnética (Guzmán et al. 2013). Pero el uso de trazadores
46 para el seguimiento de sedimentos erosionados por *flujos concentrados* implica complicaciones
47 experimentales diferentes a las propias de la erosión laminar. Por ejemplo, el suelo erosionado
48 no necesariamente se limitaría a la capa superficial del mismo sino también a estratos
49 subsuperficiales. Por tanto, el trazador mezclado con el suelo superficial de una vaguada (antes
50 de la formación de una cárcava) podría, eventualmente, llegar a quedar sepultado (a cierta
51 distancia de la cárcava) por material erosionado de los estratos inferiores (y, por tanto, sin
52 trazador) de dicha cárcava.

53 Por otro lado, el recorrido de los sedimentos erosionados de una cárcava a lo largo de la red
54 natural de drenaje, puede ser considerable (cientos de metros), por lo que los sedimentos
55 podrían ir depositándose y a continuación recirculando a lo largo de suelos de diferente
56 naturaleza (por ejemplo, de diferente mineralogía y susceptibilidad magnética asociada a la
57 misma (Sarmast et al., 2017). Asimismo, el contenido de humedad del suelo, sobre todo de los
58 estratos superiores, es muy variable a lo largo del tiempo, aún en cortos períodos.

59 Por tanto, surgen algunos interrogantes. ¿A qué profundidad el trazador dejaría de ser
60 detectado desde la superficie? ¿En qué medida influyen las características del suelo que cubre
61 el trazador? ¿El grado de humedad del suelo, afectaría su detección?

62 El objetivo de este trabajo es evaluar las variaciones en la señal magnética de la magnetita según
63 (i) su profundidad de enterramiento, (ii) la susceptibilidad magnética del suelo trazado y (iii)
64 grado de humedad del suelo sobreyacente.

65 4.2-. Materiales y métodos

66 4.2.1-. Elección del trazador magnético y tipo de suelo

67 En primer lugar, cabe destacar que los materiales con propiedades magnéticas se agrupan en
68 tres categorías: ferromagnéticos (sensu lato), paramagnéticos y diamagnéticos (McBride, 1986;
69 Dunlop y Özdemir, 1997; Liu et al., 2012). Los materiales paramagnéticos son aquellos que,
70 sometidos a un campo magnético externo, adquieren una magnetización (ej., momento
71 magnético de un material normalizado por su volumen) inducida que es débil y paralela a la
72 orientación de dicho campo. Un material diamagnético adquiere una magnetización inducida
73 igualmente débil en presencia de un campo magnético, pero, a diferencia de los materiales
74 paramagnéticos, dicha magnetización de produce en la dirección opuesta a la del campo
75 externo. Tanto en el caso del paramagnetismo como en el del diamagnetismo, la magnetización
76 inducida en el material desaparece al eliminarse el campo externo. En el caso de los materiales
77 ferromagnéticos, la magnetización adquirida es paralela a la del campo externo y de una
78 intensidad muchísimo mayor que en el caso de los materiales paramagnéticos y diamagnéticos
79 (entre 3 y 11 órdenes de magnitud, Escobar et al. 2005). Parte de dicha magnetización es
80 irreversible, es decir, permanece en forma de magnetización remanente cuando el campo
81 externo es eliminado. La constante que relaciona la magnetización inducida en un material por
82 un campo magnético externo en función de la intensidad de dicho campo se denomina
83 susceptibilidad magnética. La intensidad del campo magnético se expresa en A/m, mientras que
84 la de la magnetización se expresa en términos de cantidad de momento magnético (Am^2) por
85 unidad de volumen (m^3), es decir, en A/m. Como las unidades de campo magnético y
86 magnetización en el sistema internacional son las mismas (A/m), y puesto que la magnetización
87 va referida a un volumen dado de material, la susceptibilidad magnética se expresa
88 volumétricamente y resulta ser una constante adimensional (κ , que va acompañada del
89 acrónimo de Sistema Internacional, SI). Como calcular con precisión el volumen de las muestras
90 suele ser inviable (ej., en el caso de suelos o material no rígido susceptible de ser compactado),
91 la susceptibilidad se puede expresar también respecto a la masa del material objeto de estudio
92 (mucho más fácil de determinar); esta susceptibilidad se denomina másica, y se representa
93 como χ . Ésta última resulta de dividir la susceptibilidad volumétrica (κ) por la densidad del

94 material en el sistema internacional (kg/m^3), y da como resultado a una susceptibilidad que se
95 expresa en m^3/kg .

96 La susceptibilidad de los materiales diamagnéticos es muy pequeña y negativa mientras que la
97 de los materiales paramagnéticos es pequeña y de signo positivo. Los materiales
98 ferromagnéticos tienen una susceptibilidad magnética positiva muy alta. Buenos ejemplos de
99 materiales diamagnéticos son el agua ($\kappa = -0.9 \cdot 10^{-5}$ SI) y dos de los minerales más comunes, el
100 cuarzo ($\kappa = -15.4 \cdot 10^{-6}$ SI) y la calcita ($\kappa = -13.8 \cdot 10^{-6}$ SI). El resto de los principales minerales que
101 constituyen las rocas, como la mayoría de los silicatos y óxidos (excluyendo los de hierro), tiene
102 un comportamiento paramagnético ($\kappa = 300-3000 \cdot 10^{-6}$ SI). Entre los principales minerales
103 ferromagnéticos que encontramos en la naturaleza se encuentran los óxidos y oxihidróxidos de
104 hierro como la magnetita ($\kappa = 2$ SI), la hematites ($\kappa = 1.3 \cdot 10^{-3}$ SI) y la goethita ($\kappa = 1.3 \cdot 10^{-3}$ SI) (ver
105 Dunlop y Özdemir, 1997).

106 En la presente experimentación se usó como trazador magnético la magnetita (Fe_3O_4), ya que
107 es el mineral con la susceptibilidad magnética más alta y es el que puede ofrecer un contraste
108 mayor con suelos naturales cuya susceptibilidad magnética resulta de la adición, ponderada por
109 su concentración, de la susceptibilidad magnética de sus distintos componentes. Entre ellos
110 encontraríamos, en proporciones apreciables (típicamente 5-30 %), minerales como calcita,
111 cuarzo y arcilla, así como materia orgánica y agua, y en concentraciones que no suelen llegar al
112 0.01 % en peso, óxidos de hierro como magnetita, hematites y goethita. En este trabajo hemos
113 utilizado magnetita producida como pigmento industrial por Bayferrox (Bayferrox 318M®); dicha
114 magnetita tiene una pureza del 96.8 % y un tamaño de partícula predominante de 0.2 μm .
115 Aunque la susceptibilidad magnética de la magnetita varía con el tamaño y la forma del grano,
116 presenta valores medios de $\kappa = 2$ SI ($\chi = 4.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$) (ver Dunlop y Özdemir, 1997).

117 Por otro lado, se experimentó con dos suelos de texturas y susceptibilidad magnética natural
118 contrastantes (Tabla 4.1). Las muestras de suelos se secaron al aire y se tamizaron con tamiz de
119 luz de 6 mm.

120 4.2.2-. Equipamiento

121 Las medidas de susceptibilidad magnética se hicieron con un susceptómetro MS3 de Bartington
122 Instruments (www.bartington.com), equipado con el sensor de campo MS2D (Figura 4.1a). Este
123 sensor consiste en una bobina de 18.5 cm de diámetro, emplazada en un armazón de resina
124 plástica Epoxi (diámetro interno y externo de 16 y 20.2 cm), por la que circula una corriente

125 eléctrica con una frecuencia de 0,958 kHz. Dicha corriente genera un campo magnético, de
126 geometría cilíndrica perpendicular a la bobina, que decrece exponencialmente con la distancia
127 a la misma. La magnetización inducida por dicho campo en el material que se sitúa bajo su
128 influencia altera la corriente eléctrica que circula por la bobina; la susceptibilidad magnética del
129 material objeto de medida es función de la diferencia que existe entre la corriente inicial que
130 circula por la bobina y la corriente final. La sensibilidad del sensor disminuye con la distancia a
131 la bobina de la misma manera que el campo magnético ejercido por la misma, es decir, de forma
132 exponencial. Así, las especificaciones técnicas del sensor y datos empíricos obtenidos por
133 Lecoanet et al. (1999) coinciden en determinar que el 10 %, 25 %, 50 %, 75 % y 90 % de la señal
134 medida por el sensor proviene, respectivamente, de los primeros 0,2, 0,5, 1,5, 3,5 y 6,0 cm de
135 material situado en contacto con la bobina, con una profundidad efectiva de penetración de 14
136 cm([https://www.bartington.com/wpcontent/uploads/pdfs/operation_manuals/MS2_OM0408](https://www.bartington.com/wpcontent/uploads/pdfs/operation_manuals/MS2_OM0408.pdf)
137 .pdf)

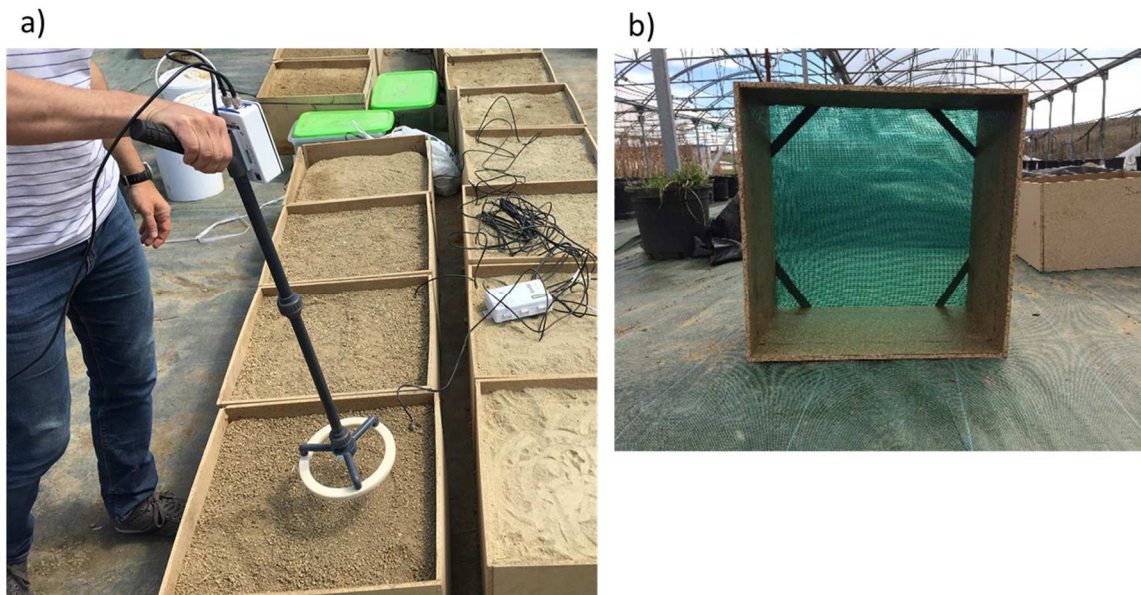
138 Esta circunstancia limita, como se puede deducir fácilmente, la capacidad del sensor de detectar
139 el trazador magnético cuando este queda enterrado por suelo no marcado depositado con
140 posterioridad.

141 Cabe destacar, por último, que el sensor MS2D recibe la señal de un total de unos 10800 cm³ de
142 volumen de material (Lecoanet et al., 1999), por lo que nos proporciona un valor de
143 susceptibilidad normalizada por dicho volumen, es decir, κ .

144 4.2.3-. Diseño experimental

145 Los experimentos se llevaron a cabo en cajas (0,5 x 0,5 x 0,3 m) construidas ad hoc, con paredes
146 de madera impermeabilizadas y con una malla plástica como fondo, para facilitar el drenaje (ver
147 figura 4.1b). En cada caja se colocó primero una capa de arena y grava de 5 cm. Por encima de
148 esta última se fueron superponiendo capas de un mismo suelo, de pocos centímetros de
149 espesor, hasta alcanzar la superficie de la caja (30 cm). Cada capa se compactaba ligeramente
150 antes de colocar la siguiente. En el proceso de relleno de la caja, se intercalaba -a una
151 profundidad prefijada- una capa de 0,5 cm de una mezcla suelo-magnetita de una determinada
152 concentración de ésta última. La superficie se dejaba nivelada y alisada, sólo manteniendo la
153 rugosidad propia de los microagregados y pequeños terrones del suelo ($\leq 6\text{mm}$).

154 Finalmente se colocó una sonda de humedad ECH₂O® EC-5
155 (www.metergroup.com/environment) que registraría el contenido humedad de los primeros 15
156 cm del suelo (ver figura 4.1a).



157

158 Figura 4.1: a) Vista de algunas cajas con suelo y magnetita (enterrada) y del sensor de campo MS2D; se
159 observa, además, en un ángulo de cada caja, el cable que se conecta a la sonda de humedad. b) Caja
160 experimental sin suelo, destacándose la malla que servía de fondo.

161 Concretamente, se experimentó con: a) 3 mezclas suelo: trazador, a saber: 1000:1, 200:1 y 100:1
162 (concentraciones de magnetita de 0,1%, 0,5% y 1,0%, respectivamente); b) 4 profundidades de
163 colocación del trazador (0 cm, 3 cm, 5 cm y 10 cm); y c) 2 suelos con distintas características
164 (Tabla 4.1). Teniendo en cuenta que el trazador puede mezclarse con suelo no marcado durante
165 los procesos de transporte y acumulación que operan en las cárcavas, se ha creído conveniente
166 utilizar distintas concentraciones del mismo para evaluar su detectabilidad en posibles
167 situaciones reales de campo. Se ha iniciado el experimento con una concentración (1 %) que
168 asegura la detectabilidad del trazador, y se han usado dos concentraciones que representan una
169 dilución al 0,5 % (valor utilizado por Guzmán et al. (2013) en estudios de erosión por salpicadura
170 y flujo laminar en parcelas experimentales) y una dilución todavía mayor, pero plausible, de un
171 orden de magnitud (0,1 %).

172

173

174 Tabla 4.1: Propiedades físico-químicas de los suelos usados en la experimentación

			Suelo 1	Suelo 2
Tamaño de partícula (%)				
Arena	Gruesa	2,00-0,50mm	4,4	21,2
Arena	Fina	0,50-0,05mm	7,4	26,7
Limos	Gruesos	0,05-0,02mm	17,0	7,4
Limos	Finos	0,02-0,002mm	29,7	14,6
Arena		2,00-0,05mm	11,8	47,9
Limo		0,05-0,002mm	46,7	22,0
Arcillas		<0,002mm	41,5	30,1
CLASIFICACIÓN TEXTURAL			Arcillo Limosa	Franco Arcillo Arenosa
pH agua			8,2	8,2
Materia Orgánica (%)			3,87	2,81
Carbonatos Totales (%)			35,23	28,41
Caliza activa (%)			10,15	7,26
Conductividad eléctrica (dSm-1)			0,75	0,5
Capacidad Intercambio Catiónico (Cmol·kg-1)			20,39	15,04
Susceptibilidad Magnética κ (Smref) (SI)			$2,35 \cdot 10^{-4}$	$2,98 \cdot 10^{-4}$

175 Se definieron, así, un total de 26 tratamientos resultantes de la combinación de 2 suelos, 3
176 concentraciones del trazador (0,1%, 0,5% y 1,0%), 4 profundidades (0, 3, 5 y 10 cm) de
177 colocación del mismo, y un testigo (sin trazador) para cada suelo. Los 26 tratamientos se
178 mantuvieron bajo invernadero durante el desarrollo de los experimentos.

179 4.2.4-. Protocolo experimental

180 De los tratamientos testigo se tomaron sendas muestras de suelo para la determinación de su
181 densidad aparente. Se asumió que los valores de este parámetro serían similares en los
182 restantes tratamientos. Las muestras de suelo fueron tomadas tratando de no afectar
183 significativamente los registros de susceptibilidad magnética que se harían a partir de ese
184 momento (ver abajo).

185 El suelo de los diferentes tratamientos fue humedecido hasta saturación y dejado secar al aire
186 durante las 8 semanas que duró la experimentación. Desde ese momento se hicieron lecturas
187 semanales con el susceptómetro, llevando a cabo 3 repeticiones en distintos puntos de la
188 superficie del suelo. El susceptómetro se calibraba previamente en aire, de tal manera de que
189 la susceptibilidad magnética en el aire se fijaba en cero ($S_{Maire}=0$). A continuación, se anotaba
190 el contenido de humedad del suelo en el momento de las lecturas con el susceptómetro. Cabe

191 aclarar que hubo una experimentación adicional llevada a cabo antes de proceder a la saturación
192 del suelo, es decir, con el mismo seco al aire.

193 Al finalizar toda la experimentación se tomaron muestras de suelos para una nueva
194 determinación de la densidad aparente.

195 4.2.5-. Análisis de datos

196 Siendo que cada suelo posee una cierta cantidad de elementos magnéticos y por tanto una
197 susceptibilidad magnética natural (SM_{ref}), las mediciones en los diferentes tratamientos fueron
198 normalizadas (SM_r) (ec. 4.1) dividiendo cada lectura realizada (SM_i) por el valor de
199 susceptibilidad magnética del correspondiente suelo testigo sin trazador (SM_{ref}). Valores de
200 SM_r mayores que la unidad indicarían, a priori, presencia del trazador.

$$201 \qquad \qquad \qquad SM_r = SM_i / SM_{ref} \qquad \qquad \qquad (4.1)$$

202 La variación de SM_{ref} en las parcelas testigo fue aproximadamente del 6 %, por lo que este valor
203 se tomó como umbral de mínima para determinar si la señal obtenida en superficie se debía a
204 la presencia del trazador o no. Por tanto, valores de $SM_r \geq 1,06$ estarían evidenciando presencia
205 del trazador magnético.

206 Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza y test de Tukey (con un valor de significancia
207 del 5%). Las funciones matemáticas de ajuste de datos fueron obtenidas con Sigmaplot 13.

208 4.3-. Resultados y discusión

209 4.3.1-. Concentración y profundidad del trazador

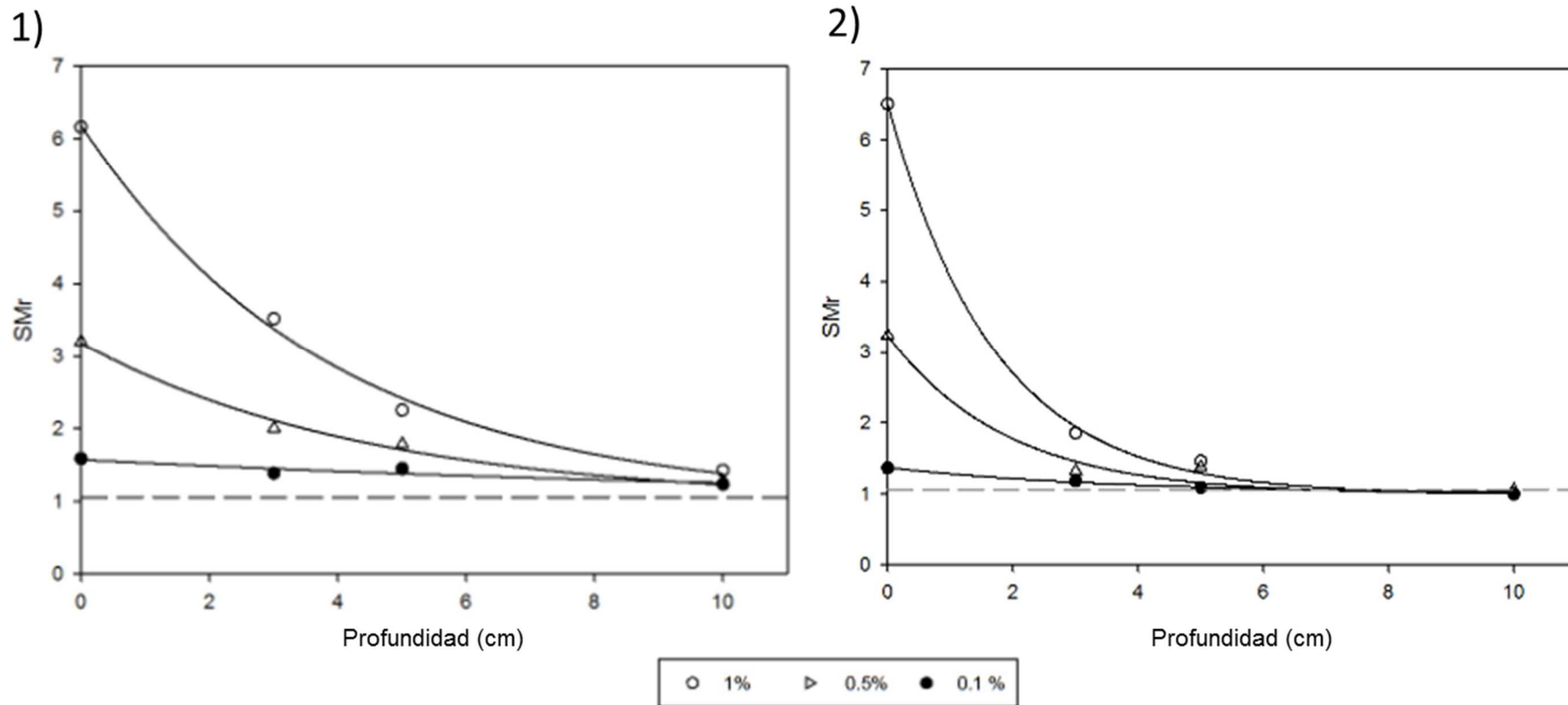
210 Como era de esperar, la susceptibilidad magnética aumentó con la concentración del trazador y
211 disminuyó con la profundidad a la que se éste se encontraba enterrado (Dearing, 1999; Lecoanet
212 et al., 1999). El valor de SM_r fue muy superior a la unidad sólo para las dos mayores
213 concentraciones (0,5% y 1,0%), al menos en los primeros centímetros de profundidad (Figura
214 4.2). En cambio, a la concentración de 0,01% los valores de SM_r , en las diferentes profundidades,
215 se mantuvieron próximos a uno. De hecho, a esta última concentración, la señal magnética
216 resultaba sólo claramente proveniente del trazador (SM_r marcadamente superior a 1,06)
217 cuando el mismo se ubicaba en superficie (Figura 4.2). Se infiere entonces que la concentración
218 de 0,1% resulta insuficiente para estudios donde se pretende detectar la presencia del trazador

219 por debajo de la superficie del suelo. De ahí que, a partir de ahora, sólo se analizarán los
220 resultados de aquellos tratamientos que involucran las dos máximas concentraciones (0,5% y
221 1,0%).

222 Para cada concentración, el decrecimiento de la señal magnética con la profundidad sigue una
223 función exponencial (ecuación 4.2, Tabla 4.2) (Figura 4.2) en concordancia con lo observado por
224 Lecoanet et al. (1999) (ver abajo).

$$225 \quad \quad \quad SMr = 1 + a e^{(-b \times d)} \quad \quad \quad (4.2)$$

226 Donde d es la profundidad de enterramiento del trazador; a y b son constantes (tabla 4.2); y e
227 base de logaritmo neperiano



228

229 Figura 4.2: Variación de la susceptibilidad magnética relativa $SMr (=SMi/SMref)$ con la profundidad para las tres concentraciones del trazador estudiadas, para el suelo 1 y
 230 suelo 2 (ver Tabla 4.1). Los datos ajustan a una función de decrecimiento exponencial del tipo $SMr=1+a e^{(-b \cdot d)}$ (ver ecuación 4.2); los respectivos valores de a y b se indican
 231 en la Tabla 4.2. La línea discontinua corresponde al valor de $SMr=1,06$, valor por encima del cual se consideraba que la señal magnética detectada provenía del trazador
 232 (magnetita)

233 Tabla 4.2: Detalle de la función de ajuste de la variación de la susceptibilidad magnética (SMr) con la
234 profundidad (d) según tipo de suelo y concentración del trazador. Un valor de p igual o menor a 0.01
235 indica un ajuste altamente significativo del modelo.

Suelo	Concentración de trazador (%)	Función	R ² ajust	p
1	1,0	$SMr = 1 + 5.18 e^{(-0.26 \times d)}$	0,9943	0,0020
	0,5	$SMr = 1 + 2.18 e^{(-0.22 \times d)}$	0,9850	0,0050
2	1,0	$SMr = 1 + 5.5 e^{(-0.58 \times d)}$	0,9972	0,0009
	0,5	$SMr = 1 + 2.2 e^{(-0.53 \times d)}$	0,9661	0,0110

236 El muy buen ajuste de los datos experimentales a un modelo matemático (ecuación 4.2, Tabla
237 4.2) nos permite estimar la máxima profundidad de detección de señal proveniente del trazador
238 (SMr ≥ 1.06) esperada para las dos diferentes concentraciones (0,5% y 1,0%) y tipos de suelo
239 (suelo 1 y suelo2) (Tabla 4.3). Para el suelo 2, en ambas concentraciones, la máxima profundidad
240 de detección estimada es de 7 cm (Tabla 4.3). En cambio, en el suelo 1 (en ambas
241 concentraciones) podría llegar a detectarse presencia del trazador hasta 18 cm de profundidad
242 (Tabla 4.3). A pesar de encontrarse este último resultado fuera de nuestro rango experimental,
243 sí se ubica dentro del rango de medición de señal obtenido por Lecoanet et al. (1999) en su
244 trabajo de caracterización de diferentes susceptómetros. Entre otras determinaciones, los
245 autores midieron en aire la SM de una fuente ferromagnética (2,5 gr de magnetita, volumen=1
246 cm³; lo que equivaldría, en nuestras condiciones de trabajo, a una concentración suelo-trazador
247 de alrededor de 0,5%) colocada a diferentes alturas de un sensor idéntico al usado en nuestra
248 experimentación (Bartington-MS2D). Aunque la señal decrecía exponencialmente a medida que
249 la fuente se alejaba del sensor, detectaban la fuente ferromagnética hasta profundidades
250 cercanas a 20 cm.

251 Cabe destacar que cuanto menor sea la susceptibilidad magnética del suelo sobreyacente al
252 trazador (SMref), mayor será el valor de SMr para un mismo valor de SMi (ecuación 4.1); y por
253 tanto más factible resultará la identificación de la señal proveniente del trazador a medida que
254 ésta se debilita con el aumento de la profundidad. Esto explica que la máxima profundidad de
255 detección de la SM, como se dijo, fuera mayor en el suelo 1 (18 cm) (SMref=2,35·10⁻⁴ SI) que en
256 el suelo 2 (7cm) (SMref=2,98·10⁻⁴ SI). Es decir, un 20% de reducción en el valor de SMref
257 permitiría duplicar fácilmente la profundidad de detección del trazador.

258 Ahora bien, estos valores de máxima profundidad (7 cm y 18 cm) consideran, como ya se indicó,
259 una variabilidad espacial de la susceptibilidad magnética (SMi) de aproximadamente 6%. Sin

260 embargo, la variabilidad de la susceptibilidad magnética de los suelos, en condiciones naturales,
261 sería (muy) superior a la registrada en esta experimentación. Por ejemplo, Yue et al. (2019)
262 estudiaron los cambios en la lectura de la susceptibilidad magnética a lo largo de una ladera
263 erosionada. Los máximos valores de susceptibilidad magnética se registraron en los extremos
264 de la ladera, con valores mínimos a mitad de pendiente. Los altos valores pendiente abajo se
265 registraron en el área de sedimentación del suelo erosionado, encontrándose de esta manera
266 variaciones de SM de aproximadamente un 50%. Por otro lado, mediciones propias de SM
267 hechas en campo mostraron variaciones de la SM_{ref} de aproximadamente 30%. Resulta entonces
268 oportuno estimar ahora la máxima profundidad de registro de lectura proveniente del trazador,
269 para ambos suelos y concentraciones, pero esta vez considerando un valor umbral de $SM_r=1,3$
270 (variabilidad espacial en los registros de SM de 30%). La profundidad máxima de detección de
271 señal se reduce en aproximadamente 40% con respecto a la esperada con una variabilidad
272 espacial de 6% ($SM_r=1,06$) (Tabla 4.3).

273 Tabla 4.3: Profundidad máxima de detección estimada (en cm) para los diferentes suelos (suelo 1 y suelo
274 2) y concentraciones (0,5% y 1,0%), considerando una variabilidad espacial en el registro de
275 susceptibilidad magnética de 6% y 30%, $SM_r=1,06$ y $SM_r=,30$, respectivamente.

	Concentración			
	1%		0.50%	
SMr	1,06	1,3	1,06	1,3
Suelo 1	18	11	18	11
Suelo 2	7	5	7	4

276 4.3.2-. Contenido de humedad del suelo

277 Si bien el contenido de humedad del suelo a lo largo de la experimentación varió entre 5% y 40%
278 v/v, este parámetro no afectó de manera significativa ($p < 0,05$) el registro de la SMi en ningún
279 caso. La explicación reside en el hecho de que la susceptibilidad magnética del agua ($\chi = -0,09 \cdot 10^{-6}$
280 SI) es dos órdenes de magnitud menor que la del suelo en estado natural ($2,35 \cdot 10^{-4}$ en el caso
281 de nuestro suelo 1) .Esta SM se debe a la masa de suelo que ocupa alrededor del 60% del
282 volumen total de ese suelo; el 40% restante está, por lo tanto, ocupado por el aire cuya $SM_{air}=0$.
283 Pero, en saturación, todo el espacio de los poros (alrededor del 40%) estaría ocupado por el
284 agua y la susceptibilidad magnética generada por esta masa de agua sería igual a $SM = -9 \cdot 10^{-6} \times$
285 $0,4 = -3,6 \cdot 10^{-6}$ SI. En consecuencia, la susceptibilidad magnética del suelo cuando está saturado
286 sería $SM = 2,35 \cdot 10^{-4} + (-3,6 \cdot 10^{-6}) = 2,23 \cdot 10^{-4}$. La SM del suelo con el 40% de su volumen ocupado
287 por el agua (en lugar del aire) se reduce tan sólo en alrededor del 1,5%. Es decir, la variación de

288 la señal magnética ejercida por cambios extremos en el contenido de humedad del suelo sería
289 insignificante como para influir en la señal obtenida por el susceptómetro debida al trazador, tal
290 como observaron Maier et al. (2006) al estudiar la influencia de la humedad del suelo en las
291 medidas de susceptibilidad magnética de éste.

292 4.3.3-. Densidad aparente

293 En nuestros experimentos la densidad aparente se incrementó de 1,73 a 1,82 gcm⁻³ y de 1,48 a
294 1,51 gcm⁻³ en el suelo 1 y 2, respectivamente. Un incremento de la densidad aparente implica
295 un aumento en el porcentaje del volumen total del suelo ocupado por la fase sólida; y
296 consecuentemente, una compactación del mismo. Si el trazador hubiera sido aplicado
297 homogéneamente en todo el volumen de suelo, un incremento de la densidad aparente habría
298 significado una mayor concentración de trazador por volumen de suelo y, por tanto, habría
299 afectado la intensidad de la SMi (Jiménez et al. 2017). Pero, este no fue el caso en nuestros
300 experimentos ya que, como se recuerda, el trazador fue mezclado sólo en una delgada lámina
301 de suelo subsuperficial. Pero, por otro lado, un incremento en la compactación del suelo implica
302 una disminución del nivel de la superficie, con lo cual la distancia vertical entre dicha superficie
303 y el trazador habría también disminuido. De hecho, se registró una disminución del nivel de la
304 superficie de aproximadamente 0,5 cm y 0,2 cm en el suelo 1 y 2, respectivamente. Es así que,
305 por ejemplo, el trazador originalmente ubicado a 10 cm de la superficie del suelo habría pasado
306 a estar aproximadamente 9,5 y 9,8 cm de la misma. Consideramos estas variaciones
307 despreciables (e incluso dentro del margen del error experimental) como para merecer un
308 recalcu de la máxima profundidad de detección de la SM indicada anteriormente (ver tabla
309 4.3).

310 4.4-. Conclusiones

311 En la erosión por cárcavas el suelo desprendido por acción de la corriente erosiva puede ser
312 transportado por la misma grandes distancias a lo largo de la red de drenaje del terreno. En este
313 largo derrotero, el material erosionado puede ir (en mayor o menor medida) redistribuyéndose
314 y/o depositándose sobre la superficie para luego, eventualmente, quedar enterrado por
315 material erosionado proveniente de nuevos eventos erosivos. Asimismo, en áreas extensas, la
316 variabilidad del suelo (ej. en textura y contenido de humedad) sobre el cual transita este
317 material, puede ser considerable. El desplazamiento del material erosionado podría detectarse
318 a través de trazadores magnéticos adheridos/mezclados con el mismo. En esta experimentación
319 se evalúa, en laboratorio, el grado de afectación de la señal magnética del trazador (magnetita)

320 según su concentración y profundidad de enterramiento, así como las características y
321 contenido de humedad del suelo sobreyacente.

322 Para la detección subsuperficial de la señal magnética proveniente del trazador en un punto
323 determinado se requiere una concentración suelo:trazador superior 200:1. Podríamos asumir
324 entonces que si se sembrara trazador, en concentración 100:1 sobre una ladera a punto de
325 erosionarse por acción de un flujo concentrado, en aquellas localizaciones aguas abajo donde
326 sólo hubiera llegado el 50% del trazador (relación 200:1) podría seguir detectándose su señal,
327 siempre por debajo de los 14 cm de penetración efectiva del sensor MS2D.

328 La intensidad de la señal magnética (susceptibilidad magnética) generada por el trazador decae
329 drásticamente con el aumento de la profundidad de enterramiento del mismo. Cuando la
330 susceptibilidad magnética del trazador es próxima a la propia del suelo resulta muy dificultoso
331 distinguir la fuente de origen de la señal. Por tanto, la máxima profundidad de detección de la
332 señal magnética está muy condicionada por la susceptibilidad magnética propia del suelo. En
333 experimentación en campo, se hace necesario, entonces, conocer con antelación los valores
334 medios de susceptibilidad magnética del suelo, y su variabilidad espacial, para el correcto
335 análisis de los datos.

336 La variación en el contenido de humedad del suelo (entre Punto de Marchitez y Capacidad de
337 Campo, aproximadamente) no afecta significativamente la señal magnética. En la
338 experimentación en campo, por tanto, el monitoreo de la susceptibilidad magnética no estaría
339 supeditado a la variabilidad espacial y/o temporal (incluso, estacional) del contenido hídrico de
340 los suelos.

341 Los resultados obtenidos han sido obtenidos en condiciones ideales de medición, esto es, con
342 suelo desnudo, superficie nivelada y con mínima rugosidad (sólo la propia de los microagregados
343 del suelo). En campo, en cada punto de lectura con el susceptómetro, deberían darse estas
344 mismas condiciones. De ser necesario, éstas podrían procurarse manualmente con relativa
345 facilidad, ya que el disco sensor del susceptómetro tiene un diámetro de 18,5 cm.

346 La siembra de la magnetita en áreas propensas a la formación de cárcavas efímeras para el
347 posterior monitoreo de los sedimentos erosionados implicaría aplicar este trazador en amplias
348 superficies (100 m² aproximadamente). Si el trazador fuese mezclado previamente con el suelo,
349 como se hizo en esta experimentación, el volumen de material (suelo-trazador) a manejar sería
350 muy elevado (toneladas). Por tanto, se hace necesario experimentar con nuevas técnicas de
351 aplicación del trazador en el suelo. Por ejemplo, aplicar la magnetita suspendida en agua sobre

- 352 la superficie del terreno y luego redistribuirla en el perfil del suelo a través de un determinado
353 apero de labranza.

354 **CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN DE LA MAGNETITA COMO TRAZADOR**
355 **MAGNÉTICO DE SEDIMENTOS EN EL ESTUDIO DE LA EROSIÓN POR**
356 **CÁRCAVAS EFÍMERAS: APLICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN EN EL PERFIL DEL**
357 **SUELO***

358 **5.1- Introducción**

359 Como se ha visto en el capítulo 4, los trazadores magnéticos como la magnetita se vienen
360 utilizando desde hace más de una década en el estudio de la dinámica de sedimentos originados
361 principalmente por erosión laminar (Ventura et al., 2002; Guzmán et al., 2013). En el caso de la
362 erosión por flujo laminar, la escasa capacidad de transporte del flujo hace que el
363 material/trazador erosionado tienda a permanecer cerca de la fuente de origen y a ser
364 depositado, bien sobre la superficie del terreno o ligeramente enterrado. Estas circunstancias
365 hacen que el uso de susceptómetros de campo permita detectar fácilmente la magnetita a
366 través de los cambios que ésta induce en la susceptibilidad magnética del suelo.

367 En el monitoreo de sedimentos en erosión por flujo concentrado, en cambio, la mezcla de
368 sedimentos y trazador puede ser transportada grandes distancias desde la fuente de origen (ej.,
369 cárcavas, surcos), y podría quedar, eventualmente, enterrada bajo varios centímetros de
370 material erosionado con posterioridad. Por tanto, la casuística en cuanto a las condiciones en
371 que pueda detectarse el trazador erosionado (distancia de la fuente de origen, grado de
372 enterramiento, naturaleza del material sobreyacente, etc.) es amplia y compleja, dificultando
373 así el correcto monitoreo del trazador.

374 La principal limitación de los trazadores magnéticos radica en su acondicionamiento y aplicación.
375 Normalmente el trazador se aplica mezclado con el mismo suelo del sitio experimental (ej. Zhang
376 et al., 2001). Así, Polyakov y Nearing (2004) mezclaron suelo seco con trazador (en este caso,
377 tierras raras) y, tras un ciclo de humectación y secado, esparcieron la mezcla suelo-trazador
378 sobre la superficie del suelo antes de realizar un laboreo superficial para su incorporación en el
379 suelo. Por otra parte, Stevens y Quinton (2008) mezclaron el trazador con arena, y Yang et al.
380 (2008) excavaron pequeños pozos sobre la zona de estudio y posteriormente rellenaron estos

381 **Capítulo basado en: Zubieta, E., Larrasoaña, J., Aldaz, A., Casalí, J., and Giménez, R. 2020. Assessment of magnetite as a magnetic*
382 *tracer for sediments in the study of ephemeral gully erosion: application and distribution in the soil. Earth Surface Processes and*
383 *Landforms. En preparación.*

384 de tierra mezclada con el trazador. Polyakov et al. (2009) esparcieron manualmente la mezcla
385 suelo-trazador y posteriormente rociaron agua para facilitar la adhesión del trazador con el
386 suelo.

387 Resulta evidente que, si la superficie a aplicar una mezcla suelo-trazador es considerable (> 100
388 m²), el volumen y peso de material a manejar (incluso para una fina lámina del mismo) sería muy
389 elevado, del orden de varias toneladas; se recuerda que la densidad aparente de suelos de
390 texturas medias es de aproximadamente 1,2-1,4 t/m³. Una técnica alternativa, que no ha sido
391 suficientemente explorada pero que permitiría solventar este problema, consiste en mezclar el
392 trazador con agua para luego aplicarlo mediante una mochila sulfatadora (ej., Deasy and
393 Quinton, 2010). En cualquier caso, conviene destacar que, en todas estas técnicas, el trazador
394 es depositado sólo en superficie o bien ligeramente redistribuido a muy poca profundidad en el
395 perfil del suelo. Ahora bien, en erosión por cárcavas, los canales de erosión pueden alcanzar
396 varios centímetros de profundidad, con lo cual el trazador también debería ubicarse en
397 profundidad. Esto último podría lograrse a través de algunas de las labores agrícolas
398 convencionales de preparación del suelo, que afectan típicamente a un espesor del mismo (20-
399 25 cm) que coincide, aproximadamente, con la máxima profundidad esperada en una cárcava
400 efímera (Casalí et al., 1999). Hasta la fecha no se ha realizado ningún estudio sobre cómo un
401 trazador magnético quedaría redistribuido en el suelo tras la aplicación de técnicas de laboreo.

402 En este trabajo se evalúa una innovadora técnica que combina la aplicación, mediante spray, y
403 distribución, mediante distintas técnicas de laboreo, de magnetita en el perfil del suelo, para su
404 uso en campo como trazador magnético de sedimentos erosionados por la acción de cárcavas
405 (efímeras). La obtención de resultados concluyentes puede permitir, por primera vez, estudiar
406 el impacto de la erosión por cárcavas efímeras en cuencas agrarias s (ej., Casalí et al., 2008;
407 Giménez et al., 2012) a partir de trazadores magnéticos.

408 La experimentación se realizó en campo en micro-parcelas. La magnetita se aplicó mezclada con
409 agua y redistribuida en el suelo con diferentes aperos de uso convencional en Navarra. Con fines
410 comparativos, la misma experimentación se llevó a cabo aplicando la magnetita mezclada con
411 suelo siguiendo la técnica convencional. Además, de forma complementaria, se estudió el efecto
412 de la precipitación en la movilidad del trazador a lo largo del perfil del suelo para ambas técnicas
413 de aplicación.

414

415 5.2-. Materiales y métodos

416 5.2.1-. Diseño experimental

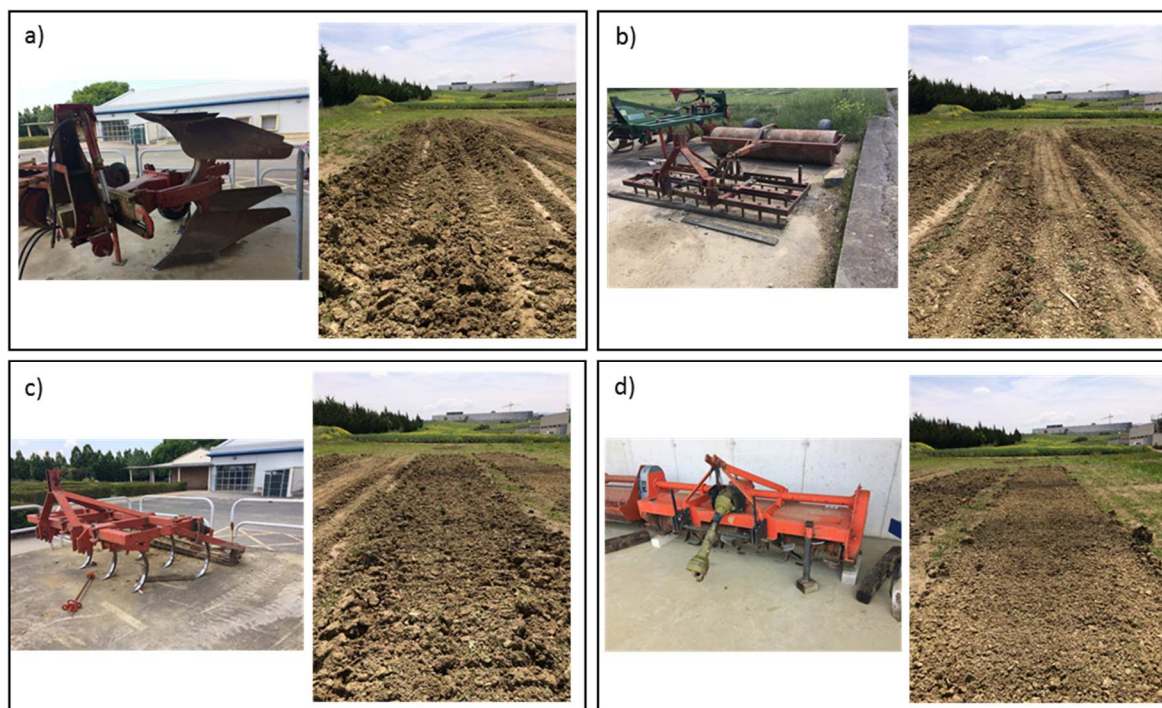
417 La experimentación se realizó en campo (finca de prácticas de la UPNA) en 8 micro-parcelas
418 (2x2m) libre de malezas. En 4 micro-parcelas se aplicó una mezcla de magnetita en agua
419 mediante una mochila sulfatadora de tal manera de asegurar la aplicación de 300 g de magnetita
420 por metro cuadrado de superficie. Se roció cada parcela homogéneamente evitando
421 encharcamientos (Figura 5.1). Posteriormente, con el suelo en tempero, se realizó en cada
422 parcela una de las siguientes labores: vertedera (VE), vertedera más rastra molón (VE+RM),
423 chisel (CH) y rotavator (RV) (Figura 5.2) (ver abajo características de estas labores). Las 4 micro
424 parcelas restantes fueron usadas como testigos; en ellas, la magnetita fue aplicada después de
425 ser mezclada previamente con el mismo suelo de la experimentación. La preparación de esta
426 mezcla se explica a continuación.

427 Mezcla suelo-magnetita. El suelo se seca al aire y se pasa por tamiz de 6 mm. Luego se mezcla
428 con magnetita a una concentración final de 2,4 % en peso, siguiendo el procedimiento de
429 Guzmán et al. (2010). Luego esta mezcla se esparce manualmente y de forma homogénea sobre
430 la superficie de cada parcela. La distribución de la mezcla suelo+magnetita en las 4 parcelas
431 testigos fue realizada con los mismos aperos de labranza antes mencionados.



432

433 Figura 5.1: Aspecto de las parcelas experimentales tras la aplicación del trazador en superficie con las
434 diferentes técnicas y anteriormente a las labores. Mezcla suelo-trazador (izquierda) y aplicación
435 con sulfatadora (derecha).



436

437 Figura 5.2: Aspecto de la superficie de las parcelas experimentales tras la realización de las distintas
438 labores y sus aperos correspondientes. a) Vertedera (VE). b) Vertedera con rastra molón (VE+RM). c)
439 Chisel (CH). d) Rotavator (RV).

440 A continuación, en cada parcela, se realizó un mapeo superficial de la susceptibilidad magnética
441 mediante un barrido de la misma con el susceptómetro MS3 acoplado a un sensor MS2D (ambos
442 de Bartington Instruments, ver capítulo 4). Cada superficie fue cubierta con 35 lecturas.

443 Luego, en cada una de las parcelas se efectuó un corte vertical en el perfil del suelo, del que se
444 obtuvieron muestras (de alrededor de 20 cm³ cada una) cada 3 cm de profundidad hasta llegar
445 a una profundidad de 20 cm. Estas muestras fueron secadas en estufa a 105 °C y luego
446 introducidas en cajas de 8 cc para posteriormente realizar la medida de susceptibilidad
447 magnética en laboratorio con un susceptómetro MS3 acoplado a un sensor MS2B (ambos de
448 Bartington Instruments,) (ver abajo detalles del equipo). A diferencia del sensor MS2D, que
449 proporciona valores de susceptibilidad por unidad de volumen de muestra (susceptibilidad
450 volumétrica, κ), la susceptibilidad de las muestras de suelo se refiere al peso en seco de las
451 mismas (susceptibilidad másica, χ) (ver más detalles sobre unidades en el Capítulo 4).

452 A continuación, las 8 parcelas fueron sometidas a la acción de una lluvia simulada (64 mm/h
453 durante 30 minutos, equivalente a un período de retorno de 2,5 años) (Iturria et al., 2017) con
454 el fin de evaluar la incidencia del agua de percolación en el arrastre del trazador. Al cabo de 48
455 horas se procedió a un nuevo muestreo del perfil del suelo para la determinación de la
456 susceptibilidad magnética. Las parcelas se mantuvieron durante 3 meses más (sin control de

457 malezas), período en el cual la precipitación natural acumulada fue de 53 mm. Aprovechando
458 esta nueva condición, se decidió realizar un nuevo muestreo del perfil suelo para la
459 determinación de la susceptibilidad magnética.

460 De la combinación de las dos técnicas de aplicación del trazador y las cuatro labores para su
461 distribución en el perfil del suelo, resultan 8 tratamientos. Los ensayos, en cada tratamiento, se
462 llevaron a cabo en seco y con dos diferentes volúmenes de lluvia acumulados, resultado
463 entonces un total de 24 experimentos.

464 5.2.2-. Análisis de datos

465 Cada tipo de suelo tiene una determinada cantidad de partículas magnéticas de origen natural
466 y, por tanto, está caracterizado por una susceptibilidad magnética intrínseca que sirve de
467 referencia (SM_{ref} , medida en las parcelas testigo). Las mediciones en los diferentes tratamientos
468 fueron normalizadas (SM_r) (ec. 5.1) dividiendo cada lectura realizada (SM_i) por el valor de
469 susceptibilidad magnética del correspondiente suelo testigo sin trazador (SM_{ref}).

$$470 \quad \quad \quad SM_r = SM_i / SM_{ref} \quad \quad \quad (5.1)$$

471 La variación de SM_{ref} en las parcelas testigo, tanto en superficie como en profundidad, fue
472 aproximadamente del 25 %, por lo que este valor se tomó como umbral de mínima para
473 determinar si la señal obtenida en superficie se debía a la presencia del trazador o no. Por tanto,
474 valores de $SM_r \geq 1,25$ estarían evidenciando la presencia del trazador magnético. Los datos
475 fueron sometidos a un análisis de varianza y test de Tukey (con un valor de significancia del 5
476 %).

477 5.2.3-. Efecto de las diferentes labores en el suelo

478 Las labores realizadas son las de uso convencional en Navarra. La vertedera (VE) es una labor
479 primaria de preparación del suelo que realiza un corte en el mismo y posteriormente voltea el
480 material; su profundidad media de trabajo ronda los 30 cm. La labor vertedera seguida de rastra
481 más molón (VE+RM) es más superficial tras voltear el suelo, de forma que rompe los terrones,
482 homogeneiza el suelo y lo nivela. El objetivo del chisel (CH) es romper el suelo sin mezclar
483 notoriamente los diferentes estratos, de esta forma se permite dejar protegida la superficie con
484 restos vegetales. Su profundidad media de trabajo son 20 cm. Finalmente el rotavator (RV) es la
485 labor que más desmenuza el suelo, homogeneizando la profundidad de trabajo que en la
486 presente experimentación fue de 20 cm.

487 5.2.4-. Sensor de laboratorio MS2B. Descripción y utilización

488 El sensor de laboratorio MS2B funciona siguiendo el mismo principio descrito para el sensor
489 MS2D. Así, contiene una bobina emplazada en material plástico por la que circula una corriente
490 eléctrica a una frecuencia de 0,46 o 4,6 kHz que, a su vez, crea un campo magnético. La
491 magnetización inducida por dicho campo en la muestra altera la corriente eléctrica que circula
492 por la bobina; la susceptibilidad magnética de la muestra es función de la diferencia que existe
493 entre la corriente inicial que circula por la bobina y la corriente final. En el caso del sensor MS2B,
494 la muestra se coloca en el interior de la bobina mediante un portamuestras de tamaño estándar.
495 Permite obtener la susceptibilidad volumétrica (κ) o másica (χ) de una muestra referida a su
496 volumen o bien a su peso. Las partículas ultrafinas de magnetita ($< 0,020 \mu\text{m}$) tienen una
497 susceptibilidad distinta en función de la frecuencia de trabajo. En el caso de las muestras
498 estudiadas en este trabajo, no se encontraron diferencias en los valores de susceptibilidad
499 magnética en función de la frecuencia utilizada. Todas las medidas realizadas con el sensor MS2B
500 se llevaron a baja frecuencia (0,46 kHz).

501 5.3-. Resultados y discusión

502 La distribución del trazador en el perfil del suelo, tanto el caso de la magnetita aplicada mediante
503 mezcla con suelo o mediante sulfatadora, se mantuvo sin cambios significativos ($p < 0,05$) tras
504 los diferentes eventos precipitación, tanto simulada como de origen natural. Esto indica que el
505 movimiento de percolación de agua en el suelo no comporta el arrastre de la magnetita usada
506 como trazador de manera significativa. Estos resultados corroboran los estudios realizados por
507 Liu et al. (2018) y Guzmán et al. (2010), quienes, a partir de distintos test de percolación,
508 demostraron la ausencia de movimiento del trazador magnético cuando este se aplica mezclado
509 con suelo. En nuestro caso, es especialmente relevante el hecho de que la magnetita aplicada
510 con sulfatadora tampoco se ve afectada por la percolación, ya que apunta a que las partículas
511 de magnetita han quedado adheridas de manera eficaz a los agregados del suelo. Esta
512 circunstancia constituye una de las principales limitaciones que hay que solventar a la hora de
513 usar un trazador (Zhang et al., 2001), y abre así las puertas a estudios en cuencas en los que la
514 magnetita puede aplicarse de manera sencilla y efectiva a grandes superficies de terreno. Por lo
515 expuesto, de ahora en más cada una de las 3 series de mediciones se considerará como
516 repetición de un mismo tratamiento.

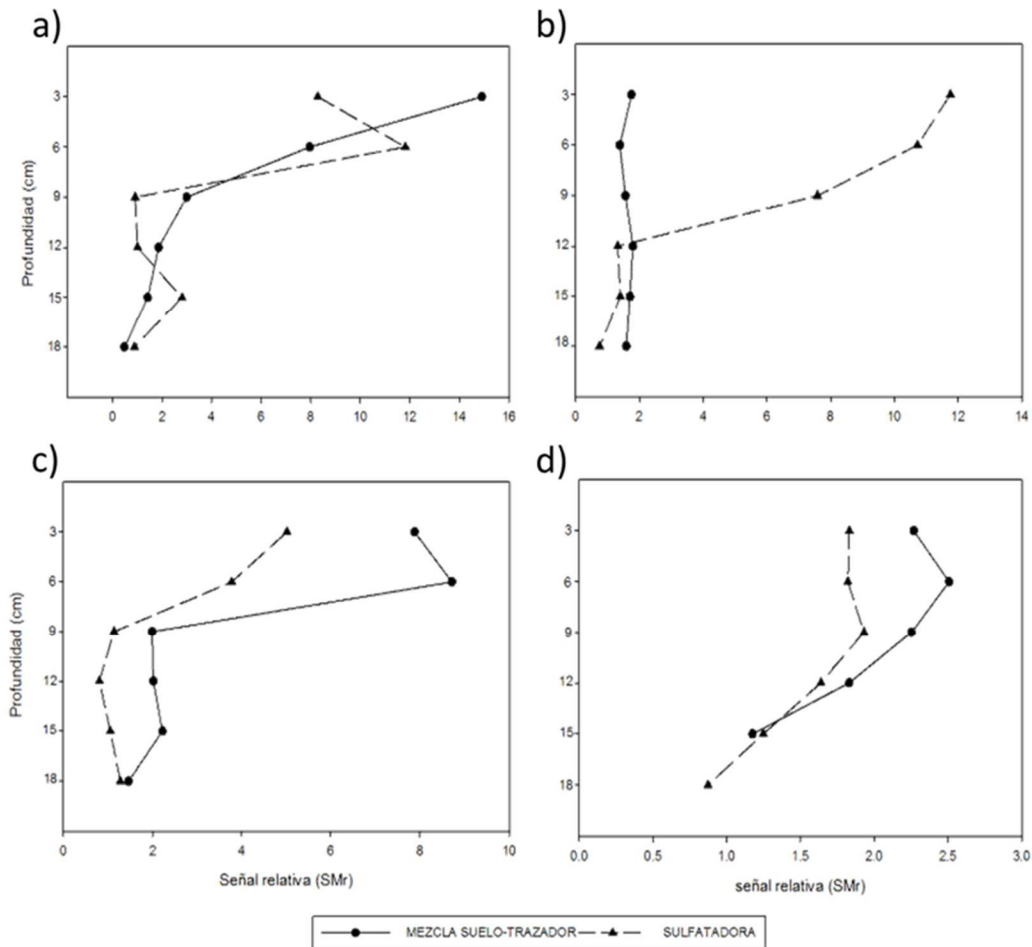
517 Es así que el par de experimentos realizados para evaluar la incidencia del agua de percolación
518 en cada una de los 8 tratamientos (4 tratamientos *per se* y 4 tratamientos testigos) serán

519 considerados, de ahora en más, como *repeticiones* del tratamiento correspondiente, que se
520 suman a la realizada previamente en seco. Entonces, cada tratamiento pasará a tener un total
521 de 3 repeticiones (Tabla 5.1).

522 5.3.1-. Evaluación de las técnicas de aplicación

523 En general, los tratamientos VE, CH y RV, muestran similares tendencias en cuanto al perfil de
524 distribución del trazador en el suelo para ambas técnicas de aplicación (suelo+trazador vs
525 sulfatadora) (Figura 5.3). Esto es, se detecta una elevada concentración del trazador en los
526 primeros centímetros y un brusco decrecimiento del mismo en profundidad. La máxima
527 profundidad de detección de señal proveniente del trazador ($SMr \geq 1,25$) fue de 9-10 cm,
528 aproximadamente. En el tratamiento VE+RM, en cambio, el perfil de distribución del trazador
529 difiere según la técnica de aplicación. Dicho perfil es similar al arriba descrito sólo cuando el
530 trazador fue aplicado con sulfatadora; mientras que, con la otra técnica de aplicación, el trazador
531 mostró similares valores de concentración de trazador ($SMr \sim 1,5-2$) en todas las profundidades,
532 incluso hasta más allá de 15 cm. Este patrón se observó en todas las repeticiones (Tabla 5.1),
533 por lo que interpretamos que no es aleatorio. No encontramos, sin embargo, una explicación
534 clara para este comportamiento.

535 El hecho de que todos los aperos, salvo el VE+RM, originaran similares patrones de distribución
536 del trazador en el perfil del suelo, independientemente de la técnica de aplicación del mismo,
537 refuerzan el papel de la sulfatadora como técnica de aplicación de la magnetita alternativa al
538 método convencional (suelo+trazador). Además, en el tratamiento VE+RM, donde se observó la
539 mencionada disparidad entre perfiles de distribución del trazador, el perfil correspondiente a la
540 aplicación con sulfatadora sí fue similar a la de los restantes tratamientos (ver arriba). Es así que,
541 de ahora en adelante, la discusión de los resultados se centrará en los experimentos llevados a
542 cabo con la técnica propuesta (mezcla agua+magnetita aplicada con sulfatadora).



543

544 Figura 5.3: susceptibilidad magnética relativa (SMr) medida en diferentes profundidades según técnica de
 545 aplicación del trazador (suelo-magnetita y agua-magnetita) y tipo de laboreo: a) Vertedera; b) Vertedera
 546 más rastra más molón; c) Chisel; d) Rotavator. Advértase el cambio de escala en la abscisa del tratamiento
 547 correspondiente al rotavator.

548 5.3.2-. Distribución del trazador por el laboreo

549 Se sabe que la vertedera invierte el pan de tierra algo más de 90º con respecto a la horizontal.
 550 Como consecuencia de esta rotación, el trazador, inicialmente dispuesto sobre o adherido a la
 551 superficie, pasaría a quedar más o menos perpendicular a la misma, a modo de estrechas
 552 “columnas” en sucesión separadas entre sí por suelo con menor concentración de trazador
 553 (Figura 5.4). Puesto que cada una de los tres sucesivos muestreos se hicieron en perfiles de
 554 suelos paralelos entre sí y que los mismos se fueron abriendo siguiendo un transecto ortogonal
 555 a las mencionadas columnas, sería de esperar que alguna/s de las muestras de suelo haya/n sido
 556 tomada/s en alguno de estos sitios de alta concentración de trazador. Esto explicaría la elevada
 557 variabilidad de la susceptibilidad magnética (SMr) observada en las diferentes repeticiones
 558 (Tabla 5.1). Una anisotropía similar en la distribución del trazador en el suelo habría ocurrido

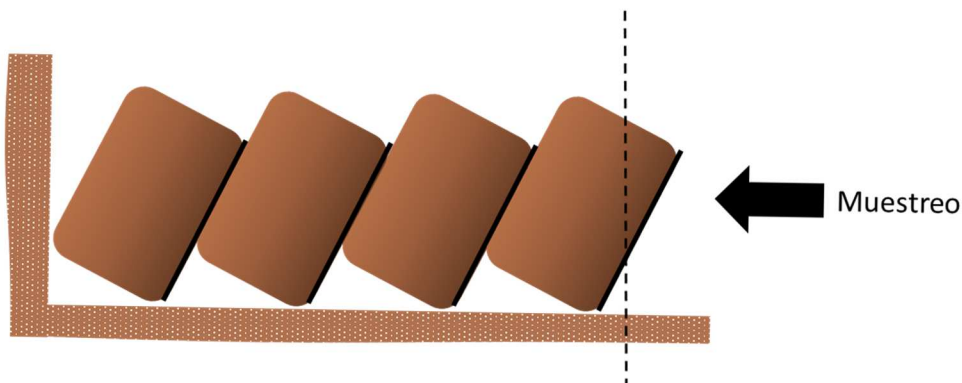
559 con el tratamiento con chisel, aunque originada de manera diferente. Este aporo produce una
560 rotura y mezcla del suelo (sin llegar a invertir el pan de tierra como la vertedera) más intensa
561 alrededor de cada una de las púas que en el suelo más alejado de las mismas. En cambio, en el
562 tratamiento con rotavator, las azadas del mismo desmenuzan y mezclan el suelo/trazador de
563 forma homogénea en todo el volumen del suelo. Esto explicaría que, por un lado, los valores de
564 SM de las diferentes repeticiones se den dentro de un estrecho rango de variación y, por otro,
565 que los cambios de los valores de susceptibilidad magnética relativa (SMr) en profundidad sean
566 más graduales que en los otros tratamientos. Aun así, resulta llamativo que los valores de SMr
567 sean inferiores a 2, a diferencia de lo que ocurre en los demás tratamientos con valores de SMr
568 muy superiores a la unidad (Figura 5.5, Tabla 5.1).

569 Tabla 5.1: Valores de susceptibilidad magnética relativa (SMr) a diferentes profundidades, con 3
570 repeticiones, correspondientes a los tratamientos donde el trazador fue aplicado con sulfatadora y luego
571 distribuido en el suelo mediante 4 labores diferentes (ver leyenda en Figura 5.2). En negrita, el valor
572 promedio.

Profundidad (cm)	VE				VE+RM				CH				RV			
3	4,82	4,74	15,32	8,29	6,44	17,09	N.D	11,76	2,82	7,92	N.D	5,37	2,03	2,14	1,33	1,83
6	5,23	12,97	17,27	11,82	8,83	18,76	4,60	10,73	4,12	3,43	6,25	4,60	2,56	1,81	1,50	1,96
9	0,72	1,26	0,77	0,92	4,21	16,41	2,15	7,59	1,04	1,09	1,28	1,14	1,74	2,76	1,29	1,93
12	0,81	0,95	1,27	1,01	0,70	2,14	1,12	1,32	0,85	0,75	N.D	0,80	1,97	1,56	1,38	1,64
15	0,75	7,00	0,68	2,81	0,76	2,53	0,91	1,40	0,87	1,24	1,04	1,05	1,08	1,10	1,57	1,25
18	0,80	1,03	0,85	0,89	0,75	0,73	0,77	0,75	0,94	1,96	0,93	1,28	0,76	0,92	0,95	0,87

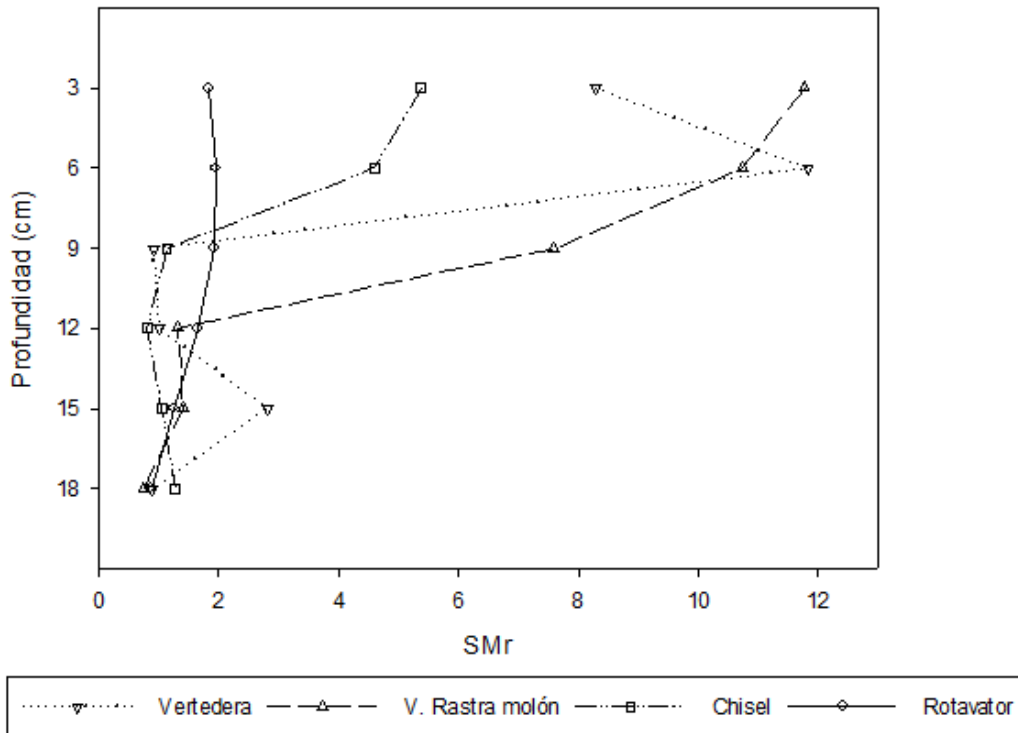
573

574



575

576 Figura 5.4: Inversión esperada de bloques/terrones de suelo tras el pase de una vertedera. La magnetita,
577 originalmente adherida a la superficie, pasaría a quedar ubicada en un lateral del bloque de suelo (línea
578 negra llena). La línea de puntos indica la dirección del corte vertical realizado en el perfil del suelo para el
579 muestreo a diferentes profundidades. Dichos perfiles se fueron abriendo siguiendo un transecto, cuya
580 dirección está indicada por la flecha.

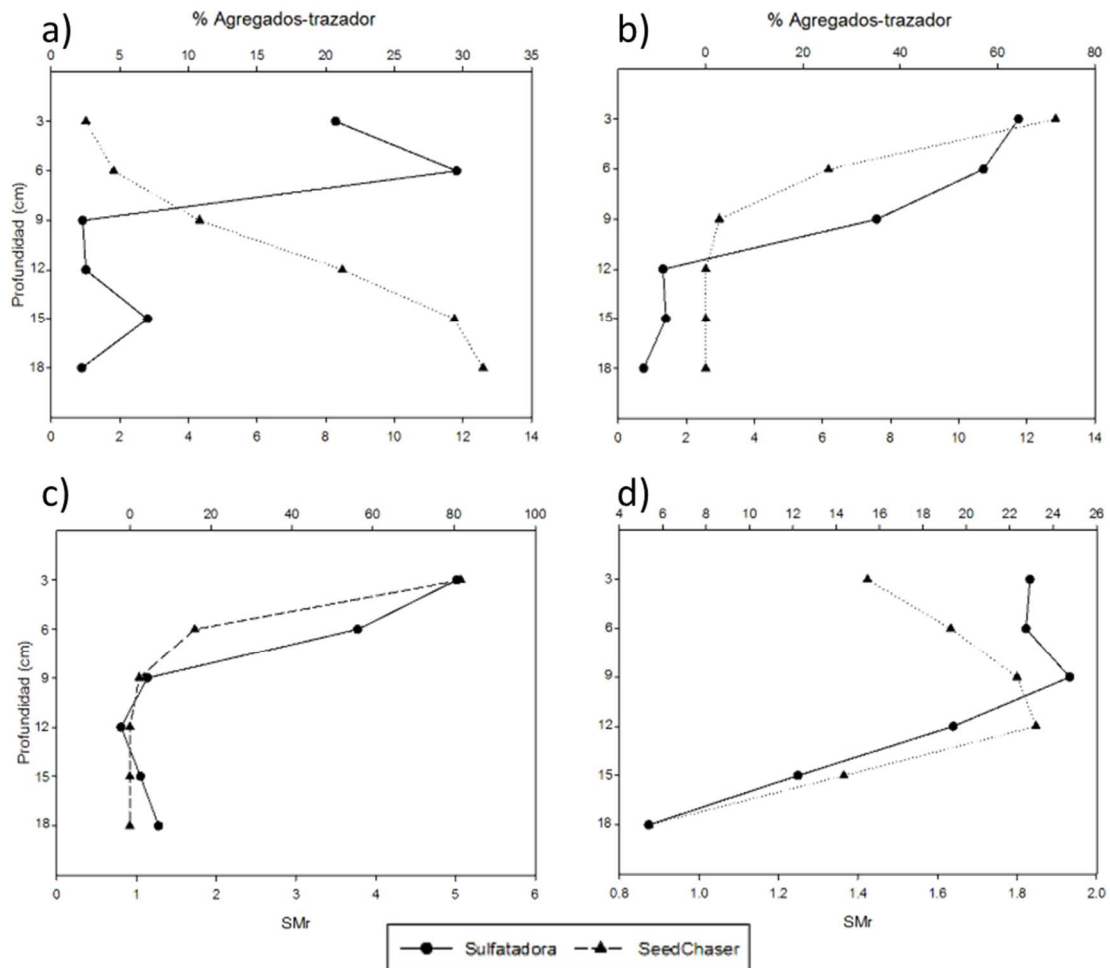


581
582 Figura 5.5: Distribución del trazador en profundidad en la técnica de aplicación del trazador con
583 sulfatadora. El tratamiento con rotavator presenta valores de susceptibilidad magnética más o menos
584 homogéneos en todas las profundidades, a diferencia de los restantes tratamientos que presentan un
585 marcado gradiente.

586 No se han encontrado en la literatura trabajos similares al presente, donde se estudie la
587 redistribución de un trazador magnético (o similar) en el perfil del suelo a través del laboreo. Lo
588 más aproximado es el trabajo de Spokas et al. (2007), en el que se propuso un modelo
589 (SeedChaser) que predice la redistribución de semillas, de distintas especies, en el perfil del
590 suelo por la acción de diferentes aperos. Asumiendo que las semillas se comportan como
591 “agregados de suelo” y sabiendo que la magnetita se adhiere a las partículas/agregados del
592 mismo, la distribución de las semillas sería de alguna forma, la que tendría dicho trazador. Cabe
593 destacar que Spokas et al. (2007) observaron que el patrón de distribución de semillas no variaba
594 con el tamaño de las mismas, con lo cual sería de esperar que también los agregados de suelo
595 se distribuirían en el perfil del suelo independientemente de su tamaño. Puesto que los perfiles
596 de distribución del trazador han sido similares en ambas técnicas de aplicación (suelo+magnetita
597 vs agua+magnetita), las simulaciones del modelo serían también válidas aun cuando el trazador
598 no se incorpore ya mezclado y adherido a los agregados del suelo, sino mezclado con agua
599 (sulfatadora).

600 Los patrones de distribución obtenidos por el modelo muestran una gran similitud con los
601 observados experimentalmente en los tratamientos donde el trazador se aplicó con la
602 sulfatadora, excepto cuando el apero utilizado fue vertedera, (VE) (Figura 5.6).

603



604

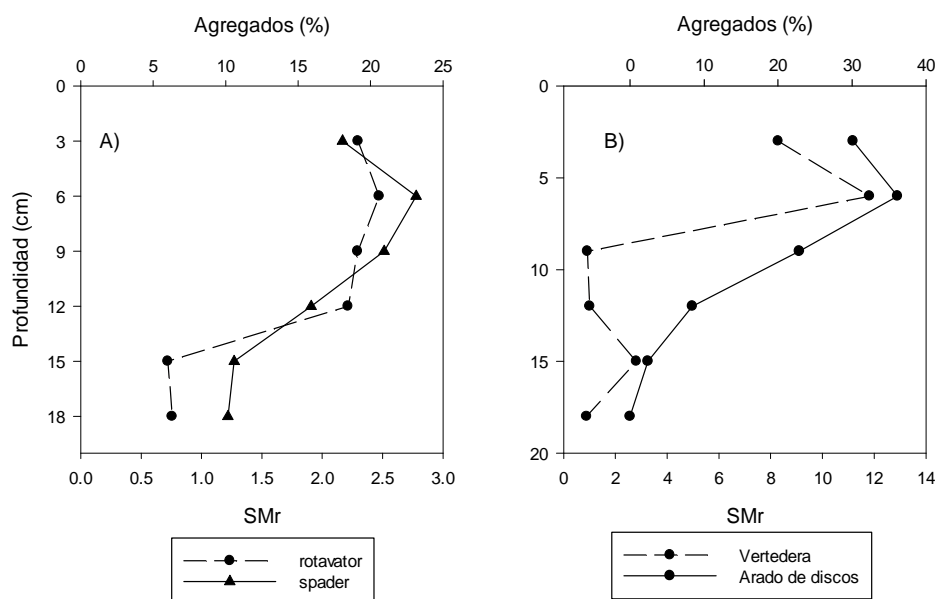
605 Figura 5.6: Distribución de agregados de suelo simulados por el modelo SeedChaser (Spokas et al., 2007);
606 se asume que la magnetita tiene la capacidad de adherirse a dichos agregados y por tanto moverse junto
607 con éstos (ver texto). Y susceptibilidad magnética relativa (SMr) a diferentes profundidades según tipo de
608 laboreo; en todos los casos, la magnetita se aplicó con sulfatadora (estos últimos perfiles se muestran
609 también en la Figura 5.3). a) Vertedera; b) Vertedera más rastra más molón; c) Chisel; d) Rotavator.

610 Por otro lado, el patrón de distribución del trazador en las muestras más superficiales (3cm) en
611 el perfil del suelo en los diferentes tratamientos (Figura 5.4) coincide, grosso modo, con el
612 patrón superficial de la SM observado, con el susceptómetro de campo MS2D, en cada
613 tratamiento, tras el pase del apero respectivo (Figura 5.7). Se recuerda que el trazador, en cada
614 microparcela (previamente al laboreo) fue distribuido uniformemente en superficie en una
615 concentración de magnetita varias veces superior a la original del suelo (ej. $SMr \gg 1$). Por lo
616 tanto, tras el laboreo, el grado de atenuación de la SM en superficie y la variabilidad de la misma,

617 estarían indirectamente reflejando el grado y homogeneidad de enterramiento del trazador,
618 respectivamente. Precisamente, el tratamiento RV muestra tanto la menor media de valores de
619 SM como de variabilidad de la misma (Figura 5.7). Y lo opuesto se observa en los tratamientos
620 con vertedera donde se alternan valores de SMr cercanos a 10, en zonas donde la magnetita se
621 habría mantenido en superficie, con otros donde la SMr es próxima a la unidad, donde la
622 magnetita habría permanecido enterrada (Figura 5.7).

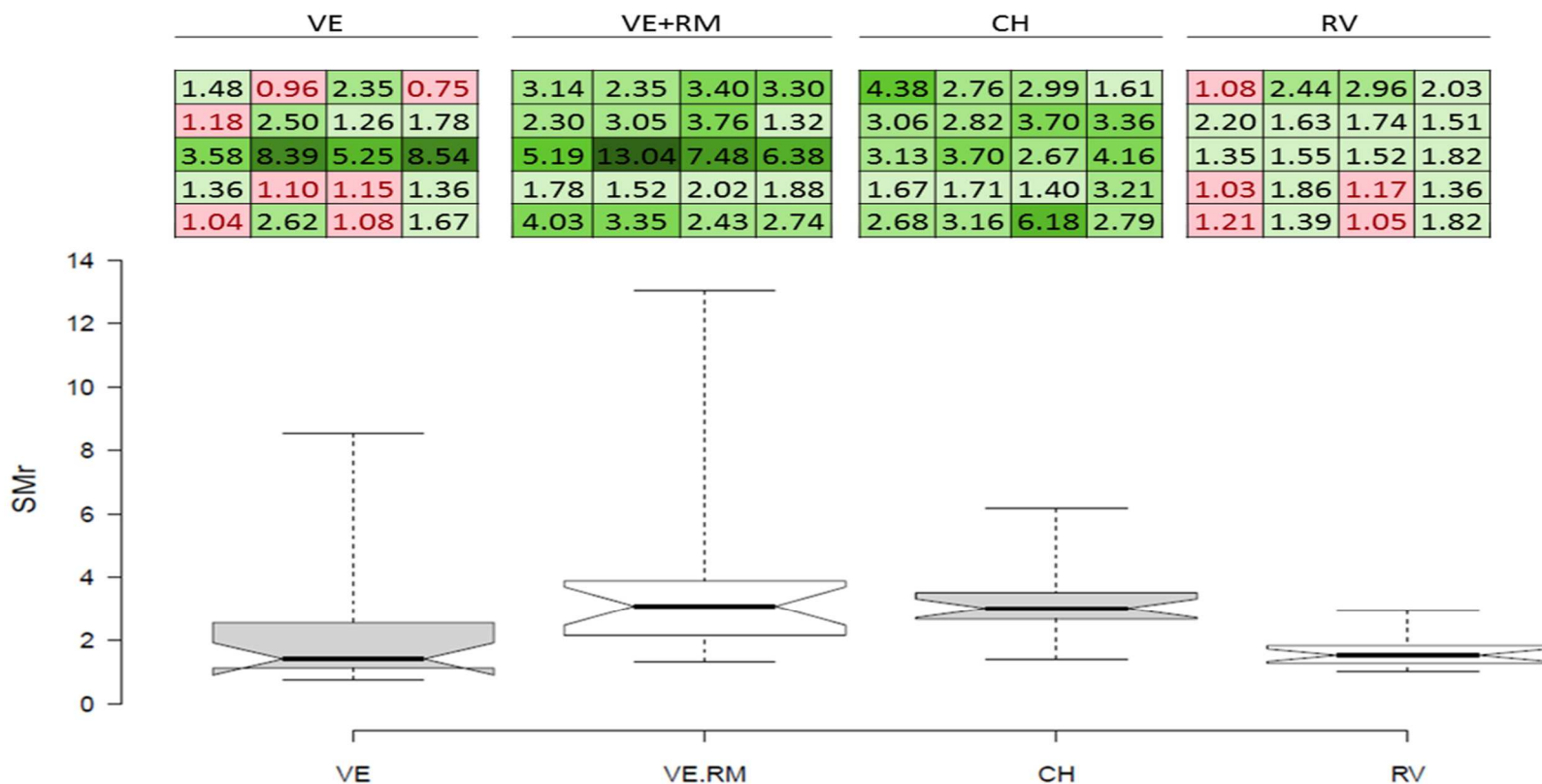
623 En definitiva, el laboreo con rotavator (RV) fue el que aseguró una distribución más uniforme de
624 la magnetita en el perfil del suelo. Sin embargo, los valores de susceptibilidad magnética relativa
625 fueron relativamente bajos.

626 Por último, a través del modelo citado (SeedChaser), se analiza la potencialidad de otros aperos
627 como alternativa al rotavator. De entre todos los aperos contemplados en el modelo, sólo el
628 *Spader*, al presentar azadas similares al rotavator, aseguraría una homogénea distribución
629 horizontal (esto es, en superficie) del trazador. Además, la distribución vertical (en el perfil del
630 suelo) del trazador simulada por el modelo guarda buena similitud con el perfil de distribución
631 observado en el tratamiento con rotavator (Figura 5.8a). Otro posible apero es el arado de disco,
632 también con una buena distribución vertical del trazador (Figura 5.8b). Sin embargo, resulta algo
633 aventurado presuponer que los discos lograrían una distribución horizontal del trazador tan
634 homogénea como la alcanzada con aperos con azadas (rotavator, *spader*).



635

636 Figura 5.8: Comparación entre la distribución del trazador en profundidad obtenida mediante la aplicación
637 con sulfatadora de la magnetita tras el pase de la labor rotavator (A) y vertedera (B), con la distribución
638 en profundidad obtenida por el modelo SeedChaser para las labores *spader* (A) y arado de discos (B).



639

640 Figura 5.7: Valores de susceptibilidad magnética relativa (SMr) medido en la superficie de parcelas una vez incorporado el trazador a través de diferentes labores (ver leyenda
 641 en figura 5.3). Se muestran sólo aquellos tratamientos/parcelas donde el trazador se aplicó con sulfatadora. En rojo valores de SMr < 1,25. El diagrama de cajas representa
 642 la variación de los valores de susceptibilidad magnética relativa (SMr) en superficie: los límites de las cajas muestran el percentil 75 (límite superior) y el percentil 25 (límite
 643 inferior), la línea entre límites representa la mediana, y los extremos de los bigotes muestran el valor de SMr máximo y mínimo. Las muescas que se observan en las cajas
 644 están definidas como $\pm 1,5 \cdot \text{IQR} / \sqrt{n}$ (rango intercuartil)/sqrt(n) (raíz cuadrada de n), y representa un intervalo de confianza del 95% para cada mediana. El solapamiento de
 645 muescas entre cajas significa que los tratamientos no difieren entre ellos. Los laboreos se realizaron en la dirección del eje vertical de las figuras.

646 5.4-. Conclusiones

647 La laboriosa preparación de la mezcla suelo-magnetita, así como la gran cantidad de suelo
648 necesario, hacen inviable el uso de esta técnica de aplicación del trazador en parcelas mayores
649 a pocos metros cuadrados. Una técnica alternativa más factible de aplicación de la magnetita
650 sería a través de una pulverizadora (ej., mochila agrícola) previa dilución del trazador en agua.
651 La expulsión a presión de dicha mezcla hace mucho más eficiente esta forma de aplicación, que
652 la convencional. Esto es, para cubrir una misma superficie de terreno con igual cantidad de
653 magnetita, la relación agua:magnetita resulta muy inferior a la alternativa suelo:magnetita (16:1
654 frente a 50:1). Además, el peso específico del agua es alrededor de 20-30 % menor a la del suelo
655 seco (volumen suelo= fase sólida+ fase porosa), lo que facilita su transporte.

656 Los aperos convencionales usados en esta experimentación han permitido una incorporación
657 del trazador en el suelo hasta una profundidad de detección (susceptibilidad magnética del
658 trazador distinguible de la propia del suelo) de aproximadamente 9 cm. Nuestros datos indican,
659 sin embargo, que sólo los aperos de azada (ej., rotavator, posiblemente *spader*) aseguran una
660 distribución más o menos homogénea en el perfil del suelo como consecuencia del fino
661 desmenuzamiento del suelo que dichos aperos logran cuando se aplican en condiciones
662 adecuadas de humedad edáfica.

663 Si en experimentos en campo el trazador se fuera a aplicar en amplias zonas donde se esperase
664 la formación de cárcavas efímeras que afecten sólo una mínima parte de esa superficie, resulta
665 importante (como se entenderá) que el trazador se haya distribuido previamente de manera
666 homogénea en toda la superficie (horizontalmente), y también en el perfil del suelo
667 (verticalmente). Como ya se ha indicado anteriormente, con el laboreo sólo se asegura
668 incorporar el trazador hasta 9 cm de profundidad, de manera que una cárcava, una vez superada
669 esta profundidad, estaría generando sedimentos libres de trazador que, eventualmente, podrían
670 sepultar el sedimento marcado previamente erosionado y depositado aguas abajo de la red de
671 drenaje. Esto es una importante consideración ya que, como se ha mostrado en el Capítulo 4, la
672 intensidad de la señal magnética detectada por el sensor MS2D de campo decrece
673 drásticamente con la profundidad de enterramiento del trazador.

674 Por otro lado, con el rotavator, los valores de SMr en el perfil del suelo (habiendo aplicado en
675 superficie 300 g de magnetita/m²) han sido inferiores a 2. Valores tan bajos de SMr en la
676 superficie de colocación de la magnetita (donde se esperaría que se origine una cárcava) lleva a

677 pensar que la señal magnética, proveniente del suelo eventualmente erosionado y transportado
678 aguas abajo, podría ser indistinguible de la propia del suelo ($SMr \leq 1$) si este material quedara
679 mínimamente diluido o enterrado por suelo sin trazador (ver Capítulo 4). Por tanto, en
680 experimentos en campo, la dosis de magnetita debería ser al menos 2-3 veces superior a la usada
681 en esta investigación, es decir, 600-900 g/m².

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES GENERALES

Cabe resaltar que la erosión por flujos concentrados, y en concreto la que afecta a terrenos de cultivo, plasmada en surcos y cárcavas, es un fenómeno que, aunque estudiado profundamente durante las últimas décadas por muchos científicos en todo el mundo, muestra todavía muchas incógnitas. De modo que nos encontramos aún lejos de poder responder a muchas preguntas clave sobre el fenómeno. De hecho, los principales factores que lo controlan, sus interacciones, y los parámetros implicados, son aún poco conocidos. Esta tesis ha pretendido ampliar y mejorar el conocimiento actual sobre este complejo fenómeno.

6.1- Evaluación y análisis de las macroformas típicas de surcos de erosión

Los surcos se generan en laderas homogéneas por la acción de diferentes caudales y evolucionan rápidamente debido a una fuerte interacción entre el flujo y la morfología del canal. Tal interacción genera una reconfiguración de la geometría del canal. Anteriores trabajos sugieren que la geometría del canal se caracteriza a menudo por la alternancia entre depresiones (*step*) y tramos planos (*pools*). Cada unidad *step-pool* podría contribuir a la resistencia hidráulica y afectar el comportamiento de la corriente (por ej., la velocidad media del flujo es independiente del grado de la pendiente). Se ha realizado una exhaustiva evaluación y análisis del arreglo espacial de las macroformas originadas en surcos experimentales desarrollados en campo bajo diferentes combinaciones de pendiente y caudal.

La formación de las unidades *step-pool* requiere una pendiente mínima de entre 5 y 15%. A pesar de que en pendientes inferiores al 5%, no se aprecie un claro desarrollo de unidades *step-pool*, igualmente se estaría produciendo un incremento en la macrorugosidad del surco (resultado de la interacción entre el flujo y la morfología del canal) que estaría igualmente condicionando el comportamiento de la corriente (por ej. la velocidad media del flujo sigue siendo independiente del grado de la pendiente).

No parece haber una periodicidad (distancia más o menos constante) clara entre unidades *step-pools*. Pero no se puede ser concluyente en la inexistencia de un arreglo espacial sistemático de estas macroformas ya que, limitaciones experimentales (propias de experimentos en campo) podrían haber afectado el normal desarrollo de estas unidades o macroformas. La identificación de las unidades *step-pool* a partir de perfiles de elevación longitudinales podría realizarse objetivamente, aunque todavía con ciertas imprecisiones, utilizando una serie de reglas geométricas y umbrales morfológicos propuestas originalmente para ríos y grandes canales. En

esta tesis se proponen nuevos umbrales para adaptar y poder aplicar dichas reglas a pequeños canales de erosión.

Se requieren nuevos experimentos, esta vez en condiciones más controladas de laboratorio, combinando diferentes suelos (homogéneos), pendiente y caudal. Y con una mejor y más detallada caracterización del flujo, como por ejemplo a través de mediciones de su velocidad a lo largo del canal, mediante instrumentos de precisión (ej., con medidores basados en el efecto *doppler*); como así también de la topografía (escaneo laser/lidar). Estos completos perfiles de elevación y de velocidad en surcos originados en condiciones contrastantes de pendiente y caudal serían una invaluable base de datos para entender mejor el complejo fenómeno de la erosión por flujo concentrado en pequeños canales, como ser surcos y cárcavas efímeras.

6.2-. Caracterización morfológica de canales de erosión: discrepancia de criterios entre investigadores

La correcta caracterización de la geometría de los canales de erosión (surco, cárcavas) es esencial en estudios de erosión por flujo concentrado. Para tal fin, es necesario primero una precisa delimitación del límite superior (anchura) de su sección transversal; lo que permite luego determinar los restantes parámetros morfológicos (profundidad, área). Sin embargo, la delimitación de la anchura puede resultar ambigua, sobre todo en secciones de formas complejas; y su determinación por tanto quedar supeditada al particular criterio del investigador. No obstante, no seríamos conscientes de esta disparidad de criterios y por tanto del error implícito en los estudios comparativos. La única forma unívoca de realizar estas determinaciones sería contando con un perfil de elevación del terreno antes del proceso erosivo. La superposición de éste con el perfil de elevación de la sección transversal permitiría definir la anchura: comprendida entre los puntos de intersección de los perfiles. Pero rara vez se cuenta con información topográfica previa a la formación del canal de erosión. Se realizó una exhaustiva y pionera caracterización morfológica (anchura, área) de diferentes secciones transversales contrastantes de surcos obtenidos en campo a partir de DEMs anteriores y posteriores al proceso erosivo. Paralelamente, estas mismas determinaciones fueron hechas por un grupo de expertos que contaban sólo con el perfil de la sección transversal del surco y zona aledaña. Estas determinaciones se contrastaron con las primeras (valores de referencia). Se observó una importante disparidad de criterio entre los expertos al delimitar la anchura de cada una de las secciones transversales (CV= 64%); y consecuentemente del área de la sección transversal (CV= 75%). En la mayoría de las secciones la anchura y el área fueron

sobreestimadas: en un 40% y un 75% (promedio de todos los expertos), respectivamente. Se necesita, por tanto, definir criterios claros y universales para la correcta caracterización morfológica de surcos y cárcavas, con fines comparativos.

Al disponer de secciones transversales con valores reales de anchura y profundidad, un buen trabajo de cara al futuro, sería realizar una comparación de los valores obtenidos por procedimientos sistemáticos y repetibles, como por ejemplo los proporcionados por algoritmos matemáticos, con nuestros valores de referencia. Disponer de esta metodología facilitaría estimar tasas de erosión por flujos concentrados de manera automatizada, sistemática y repetible, proporcionando valores comparables. En efecto, esto último es particularmente importante de cara a proponer formas de manejo y gestión de suelos en cuencas agrícolas con la intención de minimizar el impacto de la erosión por cárcavas efímeras.

6.3-. Evaluación de la magnetita como trazador magnético: factores condicionantes de la señal magnética.

En la erosión en cárcavas, el suelo desprendido por la acción del flujo erosivo puede ser transportado a grandes distancias a lo largo de la red de drenaje de la cuenca. De esta manera, el material erosionado puede ser redistribuido y/o depositado en la superficie del suelo, y luego eventualmente enterrado por el material erosionado de los eventos de erosión subsiguientes. Asimismo, la variabilidad del suelo (por ej., textura y contenido de humedad) sobre el que se mueve este material puede ser considerable. La presencia del material erosionado podría detectarse mediante trazadores magnéticos adheridos/mezclados con el suelo erosionado. En esta tesis se evaluó el grado en que la señal magnética de la magnetita está condicionada por i) la profundidad de enterramiento del trazador, ii) la textura y el contenido de humedad del suelo que cubre el trazador y iii) la concentración del trazador.

El estudio se llevó a cabo en laboratorio en microparcels (0,5 x 0,5 x 0,3 m). Cada una se llenó con un suelo determinado. En el perfil del suelo (a una determinada profundidad) se intercaló una delgada capa de una mezcla de suelo y magnetita de concentración conocida. En total, se utilizaron 3 concentraciones diferentes de suelo:trazador (1000:1, 200:1, 100:1), 4 profundidades de enterramiento del trazador (0 cm, 3 cm, 5 cm y 10 cm de la superficie del suelo), y 2 suelos contrastantes (arcillo limosa y arcillo arenosa). En cada caso, la susceptibilidad magnética se midió con un magnetómetro (MS3 de Bartington Instruments). Se repitieron los experimentos con diferentes contenidos de humedad del suelo (desde capacidad de campo hasta suelo seco). Se concluye que, si el trazador está situado bajo la superficie del suelo, se

requiere una concentración mínima de suelo:trazador de 200:1 para su correcta detección desde la superficie con un magnetómetro. La intensidad de la señal magnética disminuye drásticamente con la distancia vertical del trazador a la superficie del suelo (profundidad de enterramiento). La máxima profundidad de detección de la señal magnética del trazador depende en gran medida de la susceptibilidad magnética natural del suelo que oculta la propia señal del trazador. En experimentos en campo se hace necesario, entonces, conocer a priori la susceptibilidad magnética promedio de los suelos dominantes, como así también la variabilidad espacial de los valores de la misma. La variación del contenido de humedad del suelo no afecta significativamente a la señal magnética. El monitoreo en campo de la susceptibilidad magnética no estaría, por tanto, condicionado por la variabilidad espacial y/o temporal (incluso estacional; por ej. verano vs. invierno) del contenido de agua en el suelo. Para estudios extensivos en campo, el volumen de suelo+trazador que debería manejarse sería muy alto y por tanto inviable esta forma de distribución y aplicación de la magnetita.

6.4- Evaluación de la magnetita como trazador magnético: técnicas de aplicación y distribución

Son pocos los trabajos publicados donde se usen trazadores magnéticos para la evaluación de la erosión hídrica; y son siempre enfocados a la trazabilidad de sedimentos superficiales y en áreas poco extensas (erosión laminar). En esos experimentos la manera de aplicación del trazador más extensamente utilizada consiste en aplicarlo en una mezcla de suelo, previamente tamizado, con el propio trazador (ver arriba). Pero en estudios extensivos (>100 m²) esta metodología, como se menciona en el anterior apartado de conclusiones, sería inviable por la cantidad de suelo necesario para la mezcla y su posterior transporte y aplicación en campo. Es así que se ha evaluado una metodología alternativa más factible de aplicación de la magnetita a través de una pulverizadora (ej., mochila agrícola) previa dilución del trazador en agua. De esta forma, el volumen de agua necesario para aplicar una cierta cantidad de trazador es mucho menor que el volumen de suelo necesario para aplicar ese mismo volumen de trazador, con las ventajas de manejo que ello conlleva.

En cualquier caso, con esta técnica el trazador es igualmente depositado sólo en *superficie* o a muy poca profundidad en el perfil del suelo. Pero, en erosión por cárcavas, los canales de erosión pueden alcanzar varios centímetros de profundidad, con lo cual el trazador también debería ubicarse en profundidad. Esto último podría lograrse mediante algunas de las labores agrícolas convencionales de preparación del suelo.

Se evaluó una innovadora técnica de aplicación de magnetita en superficie y redistribución en el suelo. La experimentación se realizó en campo en micro-parcelas. La magnetita se aplicó con pulverizadora mezclada con agua y luego redistribuida en el perfil de suelo con diferentes aperos de uso convencional en Navarra. Con fines comparativos, la misma experimentación se llevó a cabo aplicando la magnetita mezclada con suelo siguiendo la técnica convencional. Además, de forma complementaria, se estudió el efecto de la precipitación en la movilidad del trazador a lo largo del perfil del suelo para ambas técnicas de aplicación.

Se puede inferir que la técnica de aplicación propuesta permitiría la correcta aplicación de magnetita en forma extensiva, siendo por tanto un prometedor sustituto de la técnica convencional.

La magnetita podría aplicarse aprovechando las labores agrícolas propias del suelo bajo estudio. Concretamente, los aperos de azada, aplicados en condiciones óptimas de humedad edáfica, aseguran una distribución del trazador más o menos homogénea en el perfil del suelo. Pero esto sólo hasta una profundidad inferior a 10 cm; con lo cual una cárcava, una vez superada esta profundidad, estaría generando sedimentos libres de trazador que, eventualmente, podrían enmascarar la señal magnética de sedimentos con trazador previamente erosionado y depositado aguas abajo de la red de drenaje.

6.4.1-. Pautas para futura experimentación en campo

Con la información obtenida en este trabajo, un siguiente paso sería realizar una identificación de zonas candidatas a la formación de cárcavas efímeras para la aplicación en ellas del trazador. Esta selección se realizaría mediante índices CTI (*Compound Topographic Index*). Este índice representa la intensidad del flujo concentrado superficial necesario para iniciar la erosión y canalizar el flujo en un determinado conjunto de circunstancias. El cálculo del CTI se encuentra integrado en el modelo AnnAGNPS (*Annualized Non-Point Source Pollution Model*).

Una vez seleccionadas las zonas candidatas a la formación de las cárcavas efímeras, previamente a la aplicación del trazador sería necesario la realización de un muestreo de reconocimiento en dichas zonas para poder conocer el valor promedio de susceptibilidad magnética del suelo (susceptibilidad magnética de referencia) y su patrón de distribución. Tras ello se aplicaría el trazador mediante la nueva técnica con ayuda de una mochila sulfatadora. Como se ha visto, ésta aplicación debería realizarse con anterioridad a las labores primarias de preparación del terreno para así asegurarnos una incorporación del trazador en profundidad.

Con el trazador ya incorporado en el suelo, el muestreo se realizaría tras eventos de precipitación cuya erosividad fuese suficiente como para iniciar la formación de una cárcava efímera. Para ello, el muestreo se haría con el susceptómetro de campo MS2D utilizado en los trabajos previos de puesta a punto del método. Los muestreos realizados en campo, podrían completarse con muestras de suelo para analizar en laboratorio con el susceptómetro de laboratorio MS2B, de la misma casa comercial. Como se ha podido ver en este trabajo, este susceptómetro puede obtener resultados más precisos al detectar el trazador en concentraciones menores que el susceptómetro de campo. Por lo que sería una herramienta complementaria de mucha utilidad. La base para este estudio será la diferencia de valores de susceptibilidad magnética obtenidos en los muestreos, en relación al valor de referencia del suelo. Así, tras repetidos muestreos a lo largo del tiempo, se podría obtener un patrón, espacial y temporal, del movimiento de los sedimentos a lo largo de la red de drenaje.

REFERENCIAS

- Abrahams, A.D., Li, G., Atkinson, J.F. 1995. Step pool streams: adjustment to maximum flow resistance. *Water Resources Research* 31(10): 2593–2602.
- Abrahams, A.D., Parsons, A.J., Wainwright, J. 1995. Resistance to overland flow on semiarid grassland and shrubland hillslopes, Walnut Gulch, southern Arizona. *J. Hydrol.*, 156, pp. 431-446 [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90088-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90088-4)
- Agisoft L.L.C., 2013. Agisoft PhotoScan Professional Edition.
- Ali, G., Birkel, C., Tetzlaff, D., Soulsby, C., McDonnell, J. J., Tarolli, P. 2014. 'A Comparison of Wetness Indices for the Prediction of Observed Connected Saturated Areas under Contrasting Conditions'. *Earth Surface Processes and Landforms* 39(3): 399–413. <https://doi.org/10.1002/esp.3506>
- Alonso, C.V.; Bennett, S.J.; Stein, O.R. 2002. Predicting headcut erosion and migration in concentrated flows typical of upland areas. *Water Resour. Res.*, 38.
- Arnold, J.R., Al-Salih, H.A., (1955). Beryllium-7 produced by cosmic rays. *Science*, 121, 451–453.
- Bagnold, R. 1943. *The physics of blown sand and desert dunes*. p. 265. Methuen London
- Bennett SJ, Alonso CV, Prasad SN, Römkens MJM. 2000. Experiments on headcut growth and migration in concentrated flows typical of upland areas. *Water Resources Research* 36(7): 1911–1922.
- Bennett, S. J., Casali, J., Robinson, K. M., Kadavy, K. C.. 2000. 'Characteristics of Actively Eroding Ephemeral Gullies in an Experimental Channel'. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 43(3): 641–49. doi:10.13031/2013.2745
- Bernatek-Jakiel, A., and Poesen, J. 2018. 'Subsurface Erosion by Soil Piping: Significance and Research Needs'. *Earth-Science Reviews* 185(April): 1107–28. doi:10.1016/j.earscirev.2018.08.006
- Billi P., D'Agostino V., Lenzi M.A., Marchi L. 1998. Bedload, slope and channel processes in a high-altitude torrent. In *Gravel-Bed Rivers in the Environment*, Klingemann PC, Beschta RL, Komar PD, Bradley JB (eds). Water Resources Publications: Highlands Ranch, CO; 15–38.
- Bingner, R. L., and Theurer, F. D. 2002. 'PHYSICS OF SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT IN AnnAGNPS'. *Proceedings of the 2nd Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, NV, USA*. (November): 1–12.
- Bingner, R. L., Theurer, F. D., Yuan, Y., and Taguas, E.V. 2018. 'AnnAGNPS Technical Process, Version 5.5'. (Version 5.5). <https://www.wcc.nrcs.usda.gov/>.

- Bingner, R. L., Wells, R. R., Momm, H. G., Rigby, J. R., Theurer, F. D. 2015. 'Ephemeral Gully Channel Width and Erosion Simulation Technology'. *Natural Hazards* 80(3): 1949–66. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2053-7>
- Blong R.J., Graham P., Veness J.A. 1982. The role of sidewall processes in gully development: some NSW examples *Earth Surf. Process. Landforms* 7, pp. 381-385
- Bracken, L. J. and Crocke, J. 2007. 'The Concept of Hydrological Connectivity and Its Contribution to Understanding Runoff-Dominated Geomorphic Systems'. *Hidrological Processes* 21: 1749–63. <http://jamsb.austms.org.au/courses/CSC2408/semester3/resources/ldp/abs-guide.pdf>.
- Brevik E.C., Cerdà A., Mataix-Solera J., Pereg L., Quinton J.N., Six J., Van Oost, K. 2015. 'The Interdisciplinary Nature of SOIL'. *Soil* 1(1): 117–29. DOI:10.5194/soil-1-117-2015.
- Brice, J.B., 1966. Erosion and deposition in the loess-mantled Great Plains, Medicine Creek drainage basin, Nebraska. U.S. Geological Survey Professional Paper 352H, 235–339.
- Bryan, R. 2000. "Soil Erodibility and Processes of Water Erosion on Hillslope." *Geomorphology* 32(August 1999): 385–415.
- Bull, L.J.; Kirkby, M.J. 1997. Gully processes and modelling. *Progress Phys. Geogr.*, 21, 354–374.
- Camprubi A., Zárate I.A., Adholeya A., Lovato P.E., Calvet C. 2015. 'Field Performance and Essential Oil Production of Mycorrhizal Rosemary in Restoration Low-Nutrient Soils'. *Land Degradation and Development* 26(8): 793–99. DOI:10.1002/ldr.2229.
- Casalí, J., Gastesi, R., Álvarez-Mozos, J., De Santisteban, L. M., Del Valle de Lersundi, J., Giménez, R., Larrañaga, A., Goñi, M., Agirre, U., Campo, M. A., López, J. J., Donézar, M.. 2008. 'Runoff, Erosion, and Water Quality of Agricultural Watersheds in Central Navarre (Spain)'. *Agricultural Water Management* 95(10): 1111–28. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.06.013>
- Casalí, J.; Giménez, R.; Bennett, S. 2009. Gully erosion processes: monitoring and modelling. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 1839-1840.
- Casalí, J., Giménez, R. and Campo-Bescós, M. A. 2015. 'Gully Geometry: What Are We Measuring?' *Soil* 1(2): 509–13. <http://www.soil-journal.net/1/509/2015/>.
- Casalí, J., Loizu, J., Campo, M. A., De Santisteban, L. M., Álvarez-Mozos, J. 2006. 'Accuracy of Methods for Field Assessment of Rill and Ephemeral Gully Erosion'. *Catena* 67(2): 128–38. Doi:10.1016/j.catena.2006.03.005
- Casalí, J., López, J. J. and Giráldez, J. V. 1999. 'Ephemeral Gully Erosion in Southern Navarre (Spain)'. *Catena* 36(1–2): 65–84. Doi: 10.1016/S0341-8162(99)00013-2

- Castillo, C., Marín-Moreno, V. J., Pérez, R., Muñoz-Salinas, R., Taguas, E. V. 2018. 'Accurate Automated Assessment of Gully Cross-Section Geometry Using the Photogrammetric Interface FreeXSapp'. *Earth Surface Processes and Landforms* 43(8): 1726–36. Doi: 10.1002/esp.4341
- Castillo, C., Taguas, E. V., Zarco-Tejada, P., James, M. R., Gómez, J. A. 2014. 'The Normalized Topographic Method: An Automated Procedure for Gully Mapping Using GIS'. *Earth Surface Processes and Landforms* 39(15): 2002–15. Doi: 10.1002/esp.3595
- Cerdà, A., González-Pelayo, O., Giménez-Morera, A., Jordán, A., Pereira, P., Novara, A., Brevik, E. C., Prosdocimi, M., Mahmoodabadi, M., Keesstra, S., Orenes, F., Ritsema, C. J. 2016. 'Use of Barley Straw Residues to Avoid High Erosion and Runoff Rates on Persimmon Plantations in Eastern Spain under Low Frequency-High Magnitude Simulated Rainfall Events'. *Soil Research* 54(2): 154–65. Doi: 10.1071/SR15092
- Cerdan, O., Govers, G., Le Bissonnais, Y., Van Oost, K., Poesen, J., Saby, N., Gobin, A., Vacca, A., Quinto, J., Auerswald, K., Klik, A., Kwaad, F.J.P.M., Raclot, D., Ionita, I., Rejman, J., Rousseva, S., Muxart, T., Roxo, M.J. & Dostal, T. 2010. 'Rates and Spatial Variations of Soil Erosion in Europe: A Study Based on Erosion Plot Data'. *Geomorphology* 122(1–2): 167–77. Doi: 10.1016/j.geomorph.2010.06.011
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Couturier, A., Bourennane, H., Souchère, V.. 2002. 'Rill Erosion on Cultivated Hillslopes during Two Extreme Rainfall Events in Normandy, France'. *Soil and Tillage Research* 67(1): 99–108. Doi: 10.1016/S0167-1987(02)00045-4
- Chambers, B. J., Garwood, T. W. D. and Unwin, R. J. 2000. 'Controlling Soil Water Erosion and Phosphorus Losses from Arable Land in England and Wales'. *Journal of Environmental Quality* 29(1): 145–50. Doi: 10.2134/jeq2000.00472425002900010018x
- Chen, D., Wei, W., and Chen, L. 2017. 'Effects of Terracing Practices on Water Erosion Control in China: A Meta-Analysis'. *Earth-Science Reviews* 173(January): 109–21. Doi:10.1016/j.earscirev.2017.08.007
- Chen, F., Nufang, F., and Zhihua, S. 2016. 'Using Biomarkers as Fingerprint Properties to Identify Sediment Sources in a Small Catchment'. *Science of the Total Environment* 557–558: 123–33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.028>.
- Chen, Z., Lü, B., Zheng, X., Ma, X., He, M., Zhao, G. 2019. Topsoil magnetic properties and its environmental significance in West Sichuan. *Acta Pedologica Sinica* 56, Issue 3, May 2019, Pages 691-701
- Cheng, H., Zou, X., Wu, Y.Q., Zhang, C.Q., Zheng, Q.H., Jiang, Z.Y. 2007. 'Morphology Parameters of Ephemeral Gully in Characteristics Hillslopes on the Loess Plateau of China'. *Soil and Tillage Research* 94(1): 4–14. Doi: 10.1016/j.still.2006.06.007
- Chepil, W., 1945a. Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement of soil by wind. *Soil Sci.* 60, 305-320.

- Chepil, W., Woodruff, N., 1963. The physics of wind erosion and its control. *Adv. Agron.* 15, 211-302.
- Chin A. 1989. Step pools in stream channels. *Progress in Physical Geography* 13(3): 391-407.
- Chin A. 2003. The geomorphic significance of step-pools in mountains streams. *Geomorphology* 55: 125-137.
- Church M. 2002. Geomorphic thresholds in riverine landscapes. *Freshwater Biology* 47(4): 541-557.
- Church, M., and Zimmermann, A. 2007. 'Form and Stability of Step-Pool Channels: Research Progress'. *Water Resources Research* 43(3): 1-21. Doi: 10.1029/2006WR005037
- Collins, A. L. and Walling, D. E. 2004. Documenting catchment suspended sediment sources: Problems, approaches and prospects, *Prog. Phys. Geog.*, 28, 159-196
- Collins, A. L., Walling, D. E., Sickingabula, H. M. and Leeks, G. J.L. 2001. 'Suspended Sediment Source Fingerprinting in a Small Tropical Catchment and Some Management Implications'. *Applied Geography* 21(4): 387-412. Doi: 10.1016/S0143-6228(01)00013-3
- Colotti Bizzarri, E. 1999. La erosividad: cualidad de la lluvia poco conocida. *Terra. Nueva Etapa* XV(24): 99-116 ISSN: 1012-7089
- Costa, J. L., Aparicio, V., and Cerdà, A. 2015. 'Soil Physical Quality Changes under Different Management Systems after 10 Years in the Argentine Humid Pampa'. *Solid Earth* 6(1): 361-71. Doi: 10.5194/se-6-361-2015
- Curran J.H., Wohl E.E., 2003. Large woody debris and flow resistance in step-pool channels, Cascade Range, Washington. *Geomorphology* 51: 141-157.
- Dabney, S.M., Vieira, D.A.N., Yoder, D.C., Langendoen, E.J., Wells, R.R., Ursic, M.E. 2015. 'Spatially Distributed Sheet, Rill, and Ephemeral Gully Erosion'. *Journal of Hydrologic Engineering* 20(6): 1-12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001120](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001120)
- Dearing, J., and Dearing, J. A. 1999. 'Environmental Magnetic Susceptibility Using the Bartington MS2 System'.
- Deasy, C., and Quinton, J. N. 2010. 'Use of Rare Earth Oxides as Tracers to Identify Sediment Source Areas for Agricultural Hillslopes'. *Solid Earth* 1(1): 111-18. Doi: 10.5194/se-1-111-2010
- Deng, Q., Qin, F., Zhang, B., Wang, H., Luo, M., Shu, C., Liu, H., Liu, G. 2015. 'Characterizing the Morphology of Gully Cross-Sections Based on PCA: A Case of Yuanmou Dry-Hot Valley'. *Geomorphology*. Doi 10.1016/j.geomorph.2014.10.032
- De Ploey, J., 1989. A model for headcut retreat in rills and gullies. *Catena supplement* 14: 81-86.

- Diodato, N., Jasper, K., and Gianni, B. 2013. 'Reduced Complexity Model for Assessing Patterns of Rainfall Erosivity in Africa'. *Global and Planetary Change* 100: 183–93. Doi: 10.1016/j.gloplacha.2012.10.016
- Di Stefano, C., Ferro, V., Pampalone, V., Sanzone, F. 2013. 'Field Investigation of Rill and Ephemeral Gully Erosion in the Sparacia Experimental Area, South Italy'. *Catena* 101: 226–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2012.10.012>.
- Di Stefano C., Ferro V., Palmeri V., Pampalone V. 2017. Flow resistance in step-pool rills. *Vadose Zone Journal* 16(12). <https://doi.org/10.2136/vzj2017.05.0104>.
- Di Stefano C, Ferro V, Palmeri V, Pampalone V. 2018. Testing slope effect on flow resistance equation for mobile bed rills. *Hydrological Processes* 32(5): 664–671.
- Di Stefano C, Palmeri V, Pampalone V, Ferro V. 2019. Dissipative analogies of step-pool features: from rills to mountain streams. *Catena* 174: 235–247.
- Dong Y, Li F, Zhang Q, Lei T. 2015. 'Determining Ephemeral Gully Erosion Process with the Volume Replacement Method'. *Catena* 131: 119–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.03.021>.
- Douglas D., Peucker T.K. 1973. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *The Canadian Cartographer* 10(2): 112–122.
- Dunlop, D.J., Özdemir, Ö., 1997. *Rock magnetism. Fundamentals and frontiers*. Cambridge University Press.
- Duckson D.W., Duckson L.J. 2001. Channel bed steps and pool shapes along Soda Creek, Three Sisters Wilderness, Oregon. *Geomorphology* 38(3–4): 267–279.
- Ellison, W.D. 1947. Soil Erosion. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, 12: 479-84.
- Escobar, M.A. y Alatorre, M. 2005. Medición de susceptibilidad magnética de materiales. Laboratorio de Propiedades Magnéticas de Materiales, Centro Nacional de Metrología. CENAM.
- Estrany, J., Garcia, C., and Walling, D.E.. 2010. 'An Investigation of Soil Erosion and Redistribution in a Mediterranean Lowland Agricultural Catchment Using Caesium-137'. *International Journal of Sediment Research* 25(1): 1–16. [http://dx.doi.org/10.1016/S1001-6279\(10\)60023-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-6279(10)60023-6).
- Evans, R. 1993b. On assessing accelerated erosion of arable land by water. *Soils and Fertilizers*, 56, 1285–1293.
- Evans, M., Lindsay, J., 2010. High resolution quantification of gully erosion in upland peatlands at the landscape scale. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 876; 886-876; 886.

- FAO. 2017. Voluntary guidelines for sustainable soil management. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 26pp. (also available at <http://www.fao.org/3/a-bl813e.pdf>)
- FAO. 2019. Soil erosion: the greatest challenge to sustainable soil management. Rome. 100pp. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO
- Flanagan, D.C., Nearing, M.A., 1995. USDA-Water Erosion Prediction project: Hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Rep. No. 10.
- Foster, G.R., Lane, L.J., 1983. Erosion by concentrated flow in farm fields. Proc. D. B. Simons Symp. Eros. Sedimentation. Color. State Univ. Ft. Collins 9, 65–82.
- Foster, G.R. 1986. Understanding ephemeral gully erosion. Soil Conservation, vol. 2. National Academy of Science Press, Washington, DC,: 90-125.
- Giménez, R., Casali, J., Grande, I., Díez, J., Campo, M. A., Álvarez-Mozos, J., Goñi, M. 2012. 'Factors controlling sediment export in a small agricultural watershed in Navarre (Spain)', *Agricultural Water Management*, 110, pp. 1–8. doi: 10.1016/j.agwat.2012.03.007.
- Giménez, R., and Govers, G.. 2001. 'Interaction between Bed Roughness and Flow Hydraulics in Eroding Rills'. *Water Resources Research* 37(3): 791–99. Doi: 10.1029/2000WR900252
- Giménez, R. and Govers, G. 2008. Effects of freshly incorporated straw residue on rill erosion and hydraulics. *Catena*, 72 (2), pp. 214-223.
- Giménez R., Léonard J., Duval Y., Richard G., Govers G. 2007. Effect of bed topography on soil aggregates transport by rill flow. *Earth Surface Processes and Landforms* 32: 602–611.
- Giménez, R., Planchon, O., Silvera, N., and Govers, G. 2004. 'Longitudinal Velocity Patterns and Bed Morphology Interaction in a Rill'. *Earth Surface Processes and Landforms* 29(1): 105–14. Doi: 10.1002/esp.1021
- Gómez, A., Susanne, S., Fernando, B.S., Francisco, L.C., Judit, R.D. 2014. 'Using 3D Photo-Reconstruction Methods to Estimate Gully Headcut Erosion'. *Catena* 120: 91–101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.004>.
- Goosens, D. and Riksen, M.. 2004. Wind Erosion and Dust Dynamics : Observations, Simulations, Modelling.
- Gordon, L.M., Bennett, S.J., Bingner, R.L., Theurer, F.D., Alonso, C.V., 2007. Simulating ephemeral gully erosion in AnnAGNPS. *Trans. ASABE* 50, 857–866.
- Goulsbra, C., Evans, M., Lindsay, J. 2014. 'Temporary Streams in a Peatland Catchment: Pattern, Timing, and Controls on Stream Network Expansion and Contraction'. *Earth Surface Processes and Landforms* 39(6): 790–803. Doi: 10.1002/esp.3533

- Govers, G., 1987. Spatial and temporal variability in rill development processes at the Huldenberg experimental site. *Catena Supplement* 8: 17-34.
- Govers, G. 1992. 'Relationship between Discharge, Velocity and Flow Area for Rills Eroding Loose, Non-layered Materials'. *Earth Surface Processes and Landforms* 17(5): 515–28. Doi:10.1002/esp.3290170510
- Govers, G., Giménez, R., Van Oost, K. 2007. 'Rill Erosion: Exploring the Relationship between Experiments, Modelling and Field Observations'. *Earth-Science Reviews* 84(3–4): 87–102.
- Govers, G., Poesen, J. 1988. Assessment of interill and rill contributions to total soil loss from an upland field plot. *Geomorphology* 1: 343-354.
- Grant G.E., Swanson F.J., Wolman M.G. 1990. Pattern and origin of stepped-bed morphology in high gradient streams, Western Cascades, Oregon. *Geological Society of America Bulletin* 102: 340–352.
- Guzmán, G., Barrón, V., Gómez, J.A. 2010. 'Evaluation of Magnetic Iron Oxides as Sediment Tracers in Water Erosion Experiments'. *Catena* 82(2): 126–33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2010.05.011>.
- Guzmán, G.; Laguna, A.; Cañasveras, J.C.; Boulal, H. barrón, V.; Gómez-Macpherson, H.; Giráldez, J.V.; Gómez, J.A. 2015. Study of sediment movement in an irrigated maize-cotton system combining rainfall simulations, sediment tracers and soil erosion models. *Journal of Hydrology* 524: 227-242. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydrol.2015.02.033>
- Guzmán, G., Quinton, J.N., Nearing, M.A., Mabit, L., Gómez, J.A., 2013. 'Sediment Tracers in Water Erosion Studies: Current Approaches and Challenges'. *Journal of Soils and Sediments* 13(4): 816–33. Doi: 10.1007/s11368-013-0659-5
- Guzmán, G., Vanderlinden, K., Giráldez, J.V., Gómez, J. A.. 2013. 'Assessment of Spatial Variability in Water Erosion Rates in an Olive Orchard at Plot Scale Using a Magnetic Iron Oxide Tracer'. *Soil Science Society of America Journal* 77(2): 350. <https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/77/2/350>.
- Gyssels, G., Poesen, J.2003. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28 (4), pp. 371-384.
- Hauge, C., 1977. Soil erosion definitions. *California Geology* 30, 202–203
- Heede, B.H. 1970. 'Morphology Of Gullies In The Colorado Rocky Mountains'. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin* 15(2): 79–89. Doi: 10.1080/02626667009493955
- Heede B.H. 1981. Dynamics of selected mountain streams in the western USA. *Zeitschrift für Geomorphologie* 25(1): 17–32.

- Hooper, D., Svoray, T., Cohen, S. 2017. 'Using a Landform Evolution Model to Study Ephemeral Gullying in Agricultural Fields: The Effects of Rainfall Patterns on Ephemeral Gully Dynamics'. *Earth Surface Processes and Landforms* 42(8): 1213–26. DOI: 10.1002/esp.4090
- Hou, X., Shao, J., Chen, X., Li, J., & Lu, J. 2020. 'Changes in the Soil Erosion Status in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Basin from 2001 to 2014 and the Impacts of Erosion on the Water Quality of Lakes and Reservoirs'. *International Journal of Remote Sensing* 41(8): 3175–96. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1699974>
- Houser, C., and Hamilton, S., 2009. "Sensitivity of Post-Hurricane Beach." *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 613–28. <http://doi.wiley.com/10.1002/esp.1730>.
- Hu, G.Q.; Dong, Y.J.; Wang, H.; Qiu, X.K; wang, Y.H. 2011. Laboratory testing of magnetic tracers for soil erosion measurements. *Pedosphere* 21(3): 328-338. Doi: 10.1016/S1002-0160(11)60133-1
- Huffaker R., Muñoz-Carpena R., Campo-Bescós M.A., Southworth J. 2016. Demonstrating correspondence between decision-support models and dynamics of real-world environmental systems. *Environmental Modelling and Software* 83: 74–87.
- Hutchinson, D.E, Pritchard, H.W. 1976. Resource conservation glossary. *Journal of Soil and Water Conservation*, 31:1-63
- Imeson, A.C., Kwaad, F.J.P.M. 1980. Gully types and gully prediction. *KNAG Geografisch Tijdschrift* XIV 5: 430-441.
- I. Iturria, Elena Zubieta, Rafael Giménez, Miguel Ángel Campo-Bescós, 2017. Preferential flow dynamics in agricultural soils in Navarre (Spain): an experimental approach to gain insight into water connectivity. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 19, EGU2017-18146, EGU General Assembly
- Jimenez, C.; Benavides, J.; Ospina-Salazar, D. I.; Zuñiga, O.; Ochoa, O.; Mosquera, C. 2017. Relationship between physical properties and the magnetic susceptibility in two soils of Valle del Cauca. *Rev. Cienc. Agri.* 34 (1): 33-45. doi:<http://dx.doi.org/10.22267/rcia.173402.70>.
- Jones, J.A.A., 2004b. Pipe and piping. In: Goudie, A.S. (Ed.), *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge, London, pp. 784–788
- Jordanova, D.; Jordanova, N.; Petrov, P. 2014. Pattern of cumulative soil erosion and redistribution pinpointed through magnetic signature of Chernozem soils. *Catena* 120: 46-56. doi: 10.1016/j.catena.2014.03.020.
- Judd H.E. 1964. A study of bed characteristics in relation to flow in rough high gradient natural streams. PhD thesis, Utah State University, USA.

- Khaledian, Y., Kiani, F., Ebrahimi, S., Brevik, E. C., Aitkenhead-Peterson, J.. 2016. 'Assessment and Monitoring of Soil Degradation during Land Use Change Using Multivariate Analysis'. *Land Degradation and Development* 28(1): 128–41. Doi: 10.1002/ldr.2541
- Khaledian, Y., Kiani, F., Weindorf, D.C., Ebrahimi, S. 2013. 'Relationship of Potentially Labile Soil Organic Carbon with Soil Quality Indicators in Deforested Areas of Iran'. *Soil Horizons* 54(4) DOI:10.2136/sh13-04-0011.
- Kimberlin, L.W., and Moldenhauer, W.C. 1977. "Predicting Soil Erosion." *ASAE Publ* (4–77): 31–42.
- Knapen, A., and Poesen, J. 2010. 'Soil Erosion Resistance Effects on Rill and Gully Initiation Points and Dimensions'. *Earth Surface Processes and Landforms* 35(2): 217–28. Doi:10.1002/esp.1911
- Knisel, W.G., 1980. CREAMS: A Field-Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. USDA Sci. Educ. Adm. Report
- Koiter, A.J., Owens, P.N., Petticrew, E.L., Lobb, D.A. 2013. 'The Behavioural Characteristics of Sediment Properties and Their Implications for Sediment Fingerprinting as an Approach for Identifying Sediment Sources in River Basins'. *Earth-Science Reviews* 125: 24–42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.05.009>.
- Lamba, J., Karthikeyan, K.G., Thompson, A.M. 2015. 'Apportionment of Suspended Sediment Sources in an Agricultural Watershed Using Sediment Fingerprinting'. *Geoderma* 239: 25–33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.024>.
- Lecoanet, H., Lévêque, F., and Segura, S. 1999. 'Magnetic Susceptibility in Environmental Applications: Comparison of Field Probes'. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 115(3–4): 191–204.
- Liu, L., Huang, M., Zhang, K., Zhang, Z., Yu, Y. 2018. 'Preliminary experiments to assess the effectiveness of magnetite powder as an erosion tracer on the Loess Plateau', *Geoderma*. Elsevier, 310, pp. 249–256. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.09.024.
- Liu, Q., Roberts, A.P., Larrasoana, J.C., Banerjee, S.K., Guyodo, Y., Tauxe, L., Oldfield, F. (2012). Environmental magnetism: principles and applications. *Reviews of Geophysics*, 50, RG4002.
- Liu, X., Zhou, K., Miao, S., Sui, Y., and X. Zhang. 2012. "Crop Yield and Relevant Factors as Affected by Soil Erosion." *Soil and Crop* 1 (4): 205–211
- Ludwig, B., Boiffin, J., Chaduf, J., Auzet, A. V. 1995. 'Hydrological Structure and Erosion Damage Caused by Concentrated Flow in Cultivated Catchments'. *Catena* 25(1–4): 227–52. Doi:10.1016/0341-8162(95)00012-H

- Mabit, L., Benmansour, M., Walling, D.E. (2008a) Comparative advantages and limitations of fallout radionuclides (^{137}Cs , ^{210}Pb and ^7Be) to assess soil erosion and sedimentation. *J Environ Radioactiv* 99:1799–1807
- Maier, G., Scholger, R. and Schön, J. 2006. The Influence of Soil Moisture on Magnetic Susceptibility Measurements. *Journal of Applied Geophysics* 59: 162–175.
- Marston R.A. 1982. The geomorphic significance of log steps in forest streams. *Annals of the Association of American Geographers* 72: 99–108.
- Masselink, R., Temme, A. J. A. M., Giménez, R., Casalí, J., Keesstra, S. D2017. 'Assessing Hillslope-Channel Connectivity in an Agricultural Catchment Using Rare-Earth Oxide Tracers and Random Forests Models'. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 43(1): 17. <https://publicaciones.unirioja.es/ojs/index.php/cig/article/view/3169>.
- Masselink, R., Keesstra, S., Temme, Arnaud J.A.M., Seeger, M-, Giménez, R., Casalí, J. 2016a. 'Modelling Discharge and Sediment Yield at Catchment Scale Using Connectivity Components'. *Land Degradation and Development* 27(4): 933–45. Doi:10.1002/ldr.2512
- McBride. 1986. Magnetic methods. In *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods*. Agronomy monograph, nº 9 (2nd Edition). American Society of Agronomy-Soil Science Society of America publisher, USA.
- Merkel, W.H.; Woodward, D.E.; Clarke, C.D. 1988. Ephemeral gully erosion model (EGEM). In *Modeling Agricultural, Forest, and Rangeland Hydrology, Proceedings of the International Symposium, Chicago, IL, USA, 12–13*; American Society of Agricultural Engineers: St. Joseph, MI, USA; pp. 315–323.
- Merritt, W.S., Letcher, R.A., Jakeman, A.J. 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environ. Model. Softw.*, 18, 761–799.
- Michaelides K, Ibraim I, Nord G, Esteves M. 2010. 'Tracing Sediment Redistribution across a Break in Slope Using Rare Earth Elements'. *Earth Surface Processes and Landforms* 35(5): 575–87. Doi:10.1002/esp.1956
- Montanarella, L., Pennock, D. J., McKenzie, N., Badraoui, M., Chude, V., Baptista, I., Mamo, T., Yemefack, M., Aulakh, M. S., Yagi, K., Hong, S., Vijarnsorn, P., Zhang, G. L., Arrouays, D., Black, H., Krasilnikov, P., Sobocká, J., Alegre, J., Henriquez, C. R., Mendonça-Santos, M. L., Taboada, M., Espinosa-Victoria, D., AlShankiti, A., AlaviPanah, S. K., Mustafa, E., Hempel, J., Arbestain, M., Nachtergaele, F., Vargas, R. 2016. 'World's Soils Are under Threat'. *Soil* 2(1): 79–82. Doi: 10.5194/soil-2-79-2016
- Montgomery, D.. 2007. 'Soil Erosion and Agricultural Sustainability'. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104(33): 13268–72. Doi:10.1073/pnas.0611508104
- Montgomery D.R, Buffington J.M. 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin* 109(5): 591–611.

- Mueller, E.; Wainwright, J.; Parson, A.J. 2008. 'Spatial Variability of Soil and Nutrient Characteristics of Semi-Arid Grasslands and Shrublands, Jornada Basin, New Mexico'. *Ecohydrology* 1: 3–12. <http://www3.interscience.wiley.com/journal/122653919/abstract>.
- Nachtergaele, J., Poesen, J., Steegen, A., Takken, I., Beuselinck, L., Vandekerckhove, L., Govers, G. 2001. 'The Value of a Physically Based Model versus an Empirical Approach in the Prediction of Ephemeral Gully Erosion for Loess-Derived Soils'. *Geomorphology* 40(3–4): 237–52. Doi: 10.1016/S0169-555X(01)00046-0
- Nachtergaele, J., Poesen, J., Vandekerckhove, L., Oostwoud-Wijdenes, D.J., Roxo, M. 2001a. Testing the ephemeral gully erosion model (EGEM) for two Mediterranean environments. *Earth Surf. Process. Landf.*, 26, 17–30.
- Nearing, M.A., Norton, L.D., Bulgakov, D.A., Larionov, G.A., West LT, Dontsova, K.M. 1997. Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resources Research* 33(4): 865–876.
- Nearing, M.A., Pruski, F.F., O'Neal, M.R. 2004. 'Expected Climate Change Impacts on Soil Erosion Rates: A Review'. *Journal of Soil and Water Conservation* 59(1): 43–50.
- Nearing, M.A., Simanton, J.R., Norton, L.D., Bulygin, S.J., Stone, J. 1999. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope. *Earth Surface Processes and Landforms* 24(8): 677–686.
- Novara, A., Gristina, L., Saladino, S.S., Santoro, A., Cerda, A. 2011. 'Soil Erosion Assessment on Tillage and Alternative Soil Managements in a Sicilian Vineyard'. *Soil and Tillage Research* 117: 140–47. Doi: 10.1016/j.still.2011.09.007
- Ollobarren Del Barrio, P., Campo-Bescós, M. A., Giménez, R., Casalí, J. 2018. 'Assessment of Soil Factors Controlling Ephemeral Gully Erosion on Agricultural Fields'. *Earth Surface Processes and Landforms* 43(9): 1993–2008. Doi:10.1002/esp.4347
- Owens, P.N., Walling, D.E., Leeks, G.J.L., 2000. Tracing fluvial suspended sediment sources in the catchment of the river Tweed, Scotland, using composite fingerprints and numerical mixing models. In: Foster, I.D.L. (Ed.), *Tracers in Geomorphology*. John
- Owoputi, L.O., Stolte, W.J., 1995. Soil detachment in the physically based soil erosion process: a review. *Transactions of the ASAE* 38 (4), 1099–1110.
- Pacheco, F.A.L., Sanches Fernandes, L.F., Valle Junior, R.F., Valera, C.A., Pissarra, T.C.T. 2018. 'Land Degradation: Multiple Environmental Consequences and Routes to Neutrality'. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 5: 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.07.002>.
- Parker, C., Clifford, N.J., Thorne, C.R., 2012. Automatic Delineation of Functional River Reach Boundaries for River Research and Applications. *River Res. Appl.* 28, 1708-1725.

- Parras-Alcántara, L., Lozano-García, B., and Galán-Espejo, A. 2015. 'Soil Organic Carbon along an Altitudinal Gradient in the Despenaperros Natural Park, Southern Spain'. *Solid Earth* 6(1): 125–34. Doi: 10.5194/se-6-125-2015
- Parras-Alcántara, L., Díaz-Jaimes, L., Lozano-García, B. 2015. 'Management Effects on Soil Organic Carbon Stock in Mediterranean Open Rangelands-Treeless Grasslands'. *Land Degradation and Development* 26(1): 22–34. Doi: 10.1002/ldr.2269
- Parsons, A. J., Abrahams, A. D., Wainwright, J. 1996. 'Responses of Interrill Runoff and Erosion Rates to Vegetation Change in Southern Arizona'. *Geomorphology* 14(4 SPEC. ISS.): 311–17. Doi:10.1016/0169-555X(95)00044-6
- Peng, W., Zhang, Z., Zhang, K. 2015. Hydrodynamic characteristics of rill flow on steep slopes. *Hydrological Processes* 29(17): 3677–3686.
- Pérez-Latorre, F. J., de Castro, L., Delgado, A. 2010. 'A Comparison of Two Variable Intensity Rainfall Simulators for Runoff Studies'. *Soil and Tillage Research* 107(1): 11–16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2009.12.009>.
- Piscitelli, M., Varni, M., Sfeir, A., Ares, G. 2010. 'Valores de Erodabilidad (Factor K-USLE) Para Suelos Representativos de La Cuenca Alta Del Arroyo Azul (Partido de Azul- Buenos Aires).' *Revista de la Facultad de Agronomía* 109(1): 17–22.
- Poesen, J., 1993. Gully typology and gully control measures in the European loess belt. In: Wicherek, S. (Ed.), *Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills*. Elsevier, Amsterdam, pp. 221–239
- Poesen, J. 2018. 'Soil Erosion in the Anthropocene: Research Needs'. *Earth Surface Processes and Landforms* 43(1): 64–84. DOI: 10.1002/esp.4250
- Poesen, J., and G. Govers. 1990. 'Gully Erosion in the Loam Belt of Belgium: Typology and Control Measures'. *Soil erosion on agricultural land* (January 1990): 513–30.
- Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, Valentin C. 2003. 'Gully Erosion and Environmental Change : Importance and Research Needs'. 50: 91–133.
- Polyakov, V.O., Kimoto, A., Nearing, M.A., Nichols, M.H. 2009. 'Tracing Sediment Movement on a Semi-arid Watershed Using Rare Earth Elements'. *Soil Science Society of America Journal* 73(5): 1559–65. Doi:10.2136/sssaj2008.0378
- Polyakov, V. O., Nearing, M. A. 2003. 'Sediment Transport in Rill Flow under Deposition and Detachment Conditions'. *Catena* 51(1): 33–43. Doi: 10.1016/S0341-8162(02)00090-5
- Polyakov, V. O., Nearing, M. A. 2004. 'Rare Earth Element Oxides for Tracing Sediment Movement'. *Catena* 55(3): 255–76. Doi: 10.1016/S0341-8162(03)00159-0

- Polyakov, V.O., Nearing, M.A., Shipitalo, M.J. 2004. 'Tracking Sediment Redistribution in a Small Watershed: Implications for Agro-Landscape Evolution'. *Earth Surface Processes and Landforms* 29(10): 1275–91. Doi:10.1002/esp.1094
- Pulley, S., Rowntree, K. 2016. 'The Use of an Ordinary Colour Scanner to Fingerprint Sediment Sources in the South African Karoo'. *Journal of Environmental Management* 165: 253–62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.09.037>.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K. & Yoder, D.C. 1997. 'Predicting Soil Erosion.' *ASAE Publ* (4–77): 31–42.
- Royall, D. 2001. 'Use of Mineral Magnetic Measurements to Investigate Soil Erosion and Sediment Delivery in a Small Agricultural Catchment in Limestone Terrain'. *Catena* 46(1): 15–34. Doi: 10.1016/S0341-8162(01)00155-2
- Ryken, N., Vanden Nest, T., Al-Barri, B., Blake, W., Taylor, A., Bodéd S., Ruyschaert, G.,
- Boeckx, P., Verdoodt, A. 2018. 'Soil Erosion Rates under Different Tillage Practices in Central Belgium: New Perspectives from a Combined Approach of Rainfall Simulations and 7Be Measurements'. *Soil and Tillage Research* 179(January): 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.01.010>.
- Sarmast, M., Farpoor, M.H., Boroujeni, I.E., 2017. Magnetic susceptibility of soils along a lithotoposequence in southeast Iran. *Catena* 156, 252–262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.019>.
- Schumm, S.A., 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geol. Soc. Am. Bull.* 67, 597–646
- Sherriff, S.C., Rowan, J.S., Fenton, O., Jordan, P., Ó hUallacháin, D. 2018. 'Sediment Fingerprinting as a Tool to Identify Temporal and Spatial Variability of Sediment Sources and Transport Pathways in Agricultural Catchments'. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 267(September): 188–200. Doi: 10.1016/j.agee.2018.08.023
- Sonneveld, B.G.J.S., Keyzer, M.A., Ndiaye, D. 2016. 'Quantifying the Impact of Land Degradation on Crop Production: The Case of Senegal'. *Solid Earth* 7(1): 93–103. Doi:10.5194/se-7-93-2016
- Spokas, K., Forcella, F., Archer, D., Reicosky, D. 2007. 'SeedChaser: Vertical soil tillage distribution model', *Computers and Electronics in Agriculture*, 57(1), pp. 62–73. doi: 10.1016/j.compag.2007.01.014.
- Stevens, C. J. and Quinton, J. N. 2008. 'Investigating source areas of eroded sediments transported in concentrated overland flow using rare earth element tracers', *Catena*, 74(1), pp. 31–36. doi: 10.1016/j.catena.2008.01.002.

- Takken, I., Govers, G., Ciesiolka, C.A.A., Silburn, D.M. and Loch, R.J., 1998. Factors influencing the velocity-discharge relationship in rills. Proceedings of the international symposium on modelling soil erosion, sediment transport and closely related hydrological processes, Vienna, 1998. IAHS publication no. 249: 63-70.
- Taguas, E.V., Arroyo, C., Lora, A., Guzmán, G., Vanderlinden, K., Gómez, J.A. 2015. 'Exploring the Linkage between Spontaneous Grass Cover Biodiversity and Soil Degradation in Two Olive Orchard Microcatchments with Contrasting Environmental and Management Conditions'. *Soil* 1(2): 651–64. Doi: 10.5194/soil-1-651-2015
- Taguas, E.V., Yuan, Y. Bingner, R.L., Gomez, J.A. 2012. Modeling the contribution of ephemeral gully erosion under different soil managements: A case study in an olive orchard microcatchment using the AnnAGNPS model. *Catena*, 98, 1–16
- Thompson, J., Cassidy, R., Doody, D.G., Flynn, R. 2013. 'Predicting Critical Source Areas of Sediment in Headwater Catchments'. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 179: 41–52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.07.010>.
- Ventura, E., Nearing, M. A., Amore, E., Norton, L. D. 2002. 'The Study of Detachment and Deposition on a Hillslope Using a Magnetic Tracer'. *Catena* 48(3): 149–61. Doi:10.1016/S0341-8162(02)00003-6
- Vrieling, A., Sterk, G., de Jong, S. 2010. 'Satellite-Based Estimation of Rainfall Erosivity for Africa'. *Journal of Hydrology* 395(3–4): 235–41. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.10.035
- Wallbrink, P.J., Murray, A.S. 1993. Use of fallout radionuclides as indicators of erosion processes. *Hydrological Processes* 7:297–304. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360070307>
- Walling, D.E. 1988. Erosion and sediment yield research: some recent perspectives. *Journal of Hydrology* 100 (1–3), pp. 113-141. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90183-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90183-7)
- Walling, D.E. 2003. Using environmental radionuclides as tracers in sediment budgets investigations. In: Bogen J, Fergus T, Walling DE (eds) *Erosion and sediment transport: Measurement in rivers*. IAHS Publication 283, Wallingford, pp 57–78
- Walling, D. E. 2013. 'The Evolution of Sediment Source Fingerprinting Investigations in Fluvial Systems'. *Journal of Soils and Sediments* 13(10): 1658–75. Doi; 10.1007/s11368-013-0767-2
- Walling, D.E.; He, Q. 1999. Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion on cultivated land. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63 (5), pp. 1404-1412. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351404x>
- Walling, D. E., He, Q. and Blake, W. 1999. "Use of ⁷Be and ¹³⁷Cs Measurements to Document Short and Medium Terms Rates of Water Induced Soil Erosion on Agricultural Land." *Water Resources* 35(12): 3865–74. <https://doi.org/10.1029/1999WR900242>

- Watson, D.A., Laflen, J.M., Franti, T.G., 1986. Estimating ephemeral gully erosion., in: Paper - American Society of Agricultural Engineers.
- Wells, R., Momm, H. G., Rigby, J- R., Bennett, S. J., Bingner, R. L., Dabney, S. M. 'An Empirical Investigation of Gully Widening Rates in Upland Concentrated Flows'. *Catena* 101: 114–21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2012.10.004>.
- Wertz, J.B. 1966. The flood cycle of ephemeral mountain streams in the southwestern United States. *Annals of the Association of American Geographers* 56: 598–633. <https://doi.org/10.1111/j.14678306.1966.tb00582.x>.
- Wilson, G.. 2011. 'Understanding Soil-Pipe Flow and Its Role in Ephemeral Gully Erosion'. *Hydrological Processes* 25(15): 2354–64. Doi: 10.1002/hyp.7998
- Wirtz, S., Seeger, M., Ries, J. B. 2012. 'Field Experiments for Understanding and Quantification of Rill Erosion Processes'. *Catena* 91: 21–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2010.12.002>.
- Wohl, E.E., Grodek, T. 1994. Channel bed-steps along NahalYael, Negev Desert, Israel. *Geomorphology* 9: 117–126.
- Wohl, E.E., Thompson, D.M. 2000. Velocity characteristics along a small step–pool channel. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 353–367.
- Woodward, D. E. 1999. 'Method to Predict Cropland Ephemeral Gully Erosion'. *Catena*: 393–99.
- Xu, G., Zhou, P., 1988. The application of stereoscopic photogrammetry on ground in monitoring valley erosion evolution. *Memoir of NISWC, Academia Scinica* 7, pp. 97–102 (In Chinese).
- Yang, W., Song, X., Sui, G., Ding, G.2008. 'A europium tracer method for investigating vertical distribution of Loess slopleland soil erosion', *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(5–6), pp. 824–832. doi: 10.1080/00103620701880883.
- Yu, Y., Zhang, K., Liu, L., Ma, Q., Luo, J. 2019. Estimating Long-Term Erosion and Sedimentation Rate on Farmland Using Magnetic Susceptibility in Northeast China. *Soil and Tillage Research* 187: 41–49.
- Zhang, X.C., Friedrich, J.M., Nearing, M.A., Norton, L.D., 2001. Potential use of rare earth oxides as tracers for soil erosion and aggregation studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 1508–1515.
- Zhang, P., Zheng, F., Wang, B., Chen, J., Ding, X., 2008a. Comparative study of monitoring gully erosion morphology change process by using high precision GPS, Leica HDS 3000 laser scanner and needle board method. *Bull. Soil Water Conserv.* 28, 11–16
- Zhang, T., Wilson, G.V., 2013. Spatial distribution of pipe collapses in Goodwin Creek Watershed. Mississippi. *Hydrol. Process.* 27, 2032–2040. <https://doi.org/10.1002/hyp.9357>.

- Zhang, X.C., Friedrich, J.M., Nearing, M.A., Norton, L.D. 2001. 'Potential Use of Rare Earth Oxides as Tracers for Soil Erosion and Aggregation Studies'. *Soil Science Society of America Journal* 65(5): 1508. <https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/65/5/1508>
- Zimmermann, A., Church, M. 2001. Channel morphology, gradient profiles and bed stresses during flood in a step-pool channel. *Geomorphology* 40: 311–327.
- Zimmermann, A., Church, M., Marwan, A.H. 2008. Identification of steps and pools from stream longitudinal data. *Geomorphology* 102: 395–406.

ANEXOS

ANEXO I: PUBLICACIONES Y CONGRESOS

Artículos publicados en revistas indexadas.....

- Giménez, R., Zubieta, E., Govers, G., and Campo-Bescos, M.A. 2019. In-situ assessment of the spatial arrangement of step–pool units on eroded rills. *Earth Surf. Process. Landforms* 44, 2731–2740. DOI: 10.1002/esp.4700

Artículos en revisión en revistas indexadas

- Zubieta, E., Larrasoaña, J., Aldaz, A., Casalí, J., and Giménez, R. 2020. Assessment of magnetite as a magnetic tracer for sediments in the study of ephemeral gully erosion: conditioning factors of magnetic susceptibility. *Earth Surface Processes and Landforms*
- Zubieta, E., Giménez, R., Campo-Bescós, M.A., Casalí, J. 2020. Towards a better assessment of the geometry of rills and gullies. *Earth Surface Processes and Landforms*. Volumen Especial.

Artículos en revistas: preparación.....

- Zubieta, E., Larrasoaña, J., Aldaz, A., Casalí, J., and Giménez, R. 2020. Assessment of magnetite as a magnetic tracer for sediments in the study of ephemeral gully erosion: application and distribution in the soil.

Documentos en congresos internacionales

- Zubieta, E., Larrasoaña, J., Giménez, R., Aldaz, A., and Casalí, J.: Evaluation of the magnetite as a magnetic tracer of eroded sediment from ephemeral gullies: conditioning factors of magnetic susceptibility. EGU2020-2199. EGU General Assembly
- Zubieta, E., Casalí, J., Castillo, C., Campo-Bescós, M.A., and Giménez, R.: Testing a new and realistic approach to assess eroded channel geometry. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 21, EGU2019-15859, EGU General Assembly

- Zubieta, E; Casalí, J; Masselink, R; Giménez, R; Keesstra, S. 2017. “Effects of gully erosion on sediment connectivity in a small agrarian catchment: basis of an experimental proposal” Geophysical Research Abstracts Vol. 19, EGU2017-13448. EGU General Assembly
- Giménez R, Zubieta E, Campo-Bescós MA, Casalí J. 2016b. Bed roughness and flow hydraulics interaction in small eroded channels. In 7th International Symposium on Gully Erosion. Purdue University: West Lafayette, IN
- Giménez, R; Zubieta, E; Campo-Bescós, M.A.; Casalí, J. 2016. Towards a better understanding of the interaction between bed roughness and flow hydraulics in small eroded channels. Geophysical Research Abstracts Vol. 18, EGU2016-15336. EGU General Assembly

ANEXO II: HTML NECESARIO PARA LA INTRODUCCIÓN DE LOS DATOS Y VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS Y SCRIPIT DE ALGORITMO MODIFICADO DE ZIMMERMANN.

a) HTML para la introducción de datos y visualización de resultados

```

<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
  <title></title>
  <meta charset="utf-8" />
  <script src="JavaScript.js"></script>
  <script
src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/Chart.js/2.3.0/Chart.bundle.min.js"></scri
pt>
</head>
<body>
  <input type="file" id="csvFileInput" onchange="handleFiles(this.files)"
  accept=".csv">
  <p>
  Anchura del surco:<br />
  <input id="Anchura_surco" type="text" /></p>
  <p>
  Pendiente(º):<br />
  <input id="Pendiente_surco" type="text" /></p>
  <p>
  Altura residual (% anchura):<br />
  <input id="Residual" type="text" /></p>
  <p>
  Longitud pool mínima (% anchura):<br />
  <input id="Len_pool" type="text" /></p>
  <p> % cálculo inicio step:<br />
  <input id="inicio_step" type="text" /></p>
  <p>
  Altura minima drop (% anchura):<br />
  <input id="Drop_height" type="text" /></p>
  <p>
  Grados Extra Step:<br />
  <input id="Grados_extra" type="text" />
</p>
  <p>
  Lmin: (%)<br />
  <input id="lmin" type="text" /></p>
</p>

```

```

Lmax: (veces longitud pool)<br />
<input id="lmax" type="text" />

</p>
<p>
Cantidad de elementos a considerar para la media de la pendiente
<br />
<input id="step" type="text" /></p>
<p>
Zoom:<br />
de: <input id="Zoom_inicio" type="text" />&nbsp;&nbsp;&nbsp;<input id="Zoom_Fin"
type="text" />&nbsp;&nbsp;&nbsp;<input id="Zoom" type="button" value="Zoom steps"
onclick="grafico_Zoom(1)" />&nbsp;&nbsp;&nbsp;<input id="Zoom2" type="button"
value="Zoom steps y Pools" onclick="grafico_Zoom(2)"/>
</p>
<p>
<input id="Button1" type="button" value="Calcular Alternativa"
onclick="procesar_candidatos()"/>&nbsp;&nbsp;&nbsp;
<input id="Button2" type="button" value="Calcular Zimmerman"
onclick="procesar_candidatos_zimmerman()"/>&nbsp;&nbsp;&nbsp;
<input id="But_grafico" type="button" value="Grafico Pools" onclick="grafico(1)"
/>
<input id="but_pools_1" type="button" value="Calcular Steps Alternativa"
onclick="find_step()"/>&nbsp;&nbsp;&nbsp;
<input id="but_pools_2" type="button" value="Calcular Steps Zimmerman"
onclick="find_step_zm()"/>&nbsp;&nbsp;&nbsp;
<input id="But_grafico2" type="button" value="Grafico Pools-Steps"
onclick="grafico(2)" /></p>
<p>
Resultados</p>
<div id="results"></div>
</body>
</html>

```

b) Script del algoritmo de Zimmermann y modificado de Zimmerman.

```

var puntos = new Array();
var candidatos = new Array();
var pools_steps = new Array();
var unidades_pool_step = new Array();

function handleFiles(files) {
    // Check for the various File API support.
    if (window.FileReader) {
        getAsText(files[0]);
    } else {
        alert('El objeto FileReader no está soportado en este navegador, use un navegador más moderno.');
```

```

    }
}

function getAsText(fileToRead) {
    var reader = new FileReader();
    // Read file into memory as UTF-8
    reader.readAsText(fileToRead);
    // Handle errors load
    reader.onload = loadHandler;
    reader.onerror = errorHandler;
}

```

```

function loadHandler(event) {
    var csv = event.target.result;
    processData(csv);
}

```

```
function processData(csv) {
    puntos = new Array();
    var allTextLines = csv.split(/\r\n|\n/);
    var lines = [];
    for (var i = 0; i < allTextLines.length; i++) {
        var data = allTextLines[i].split(';');
        var tarr = [];
        for (var j = 0; j < data.length; j++) {
            tarr.push(Number(data[j].replace(",", ".")));
        }
        puntos.push(tarr);
    }
}

function errorHandler(evt) {
    if (evt.target.error.name == "NotReadableError") {
        alert("No se puede leer el archivo");
    }
}

function procesar_candidatos() {
    candidatos = new Array();
    pools_steps = new Array();

    find_points();

    var porcentaje_altura_step =
    Number(document.getElementById("Drop_height").value.replace(",", ".")); /*sale de un
    textbox*/

    var anchura_surco =
    Number(document.getElementById("Anchura_surco").value.replace(",", "."));

    var altura_minima = anchura_surco * porcentaje_altura_step / 100;

    for (i = 0; i < candidatos.length ; i++) {
```



```

var triada = new Array();

triada = candidatos[i];

var puntoinicial = triada[0];

var puntoinferior = triada[1];

var puntofinal = triada[2];

var porcentaje_corte =
Number(document.getElementById("inicio_step").value.replace(",", "."));

var pendiente_pool = Math.atan((puntos[puntofinal][1] - puntos[puntoinferior][1]) /
(puntos[puntoinferior][0] - puntos[puntofinal][0])) * (180 / Math.PI);

var encontrado = false;

var paso = Number(document.getElementById("step").value); /*cuantos puntos vamos a
mirar para la media*/

var punto_step = -999999999999999;

for (j = puntofinal; j > 0; j--)//* recorremos desde el punto final*/ {

    var auxiliar = 0;

    for (k = 0; k < paso; k++) {

        if (j - k > 0) {

            auxiliar += Math.atan(puntos[j - k][1] - puntos[j - k - 1][1]) / (puntos[j - k - 1][0] -
puntos[j - k][0]) * (180 / Math.PI);

        }

    }

    var media_pendiente = auxiliar / paso;

    if (media_pendiente <= pendiente_pool * (100 - porcentaje_corte) / 100) {

        punto_step = j;

        /* miramos si el cuarto punto es válido*/

        var altura_encontrada = puntos[punto_step][1] - puntos[puntoinicial][1];

        if (altura_encontrada >= altura_minima) {

            encontrado = true;

        } break;

    }

}

```

```

    }
}
if (encontrado) {
    var cuaterna = new Array();
    cuaterna.push(puntoinicial);
    cuaterna.push(puntoinferior);
    cuaterna.push(puntofinal);
    cuaterna.push(punto_step);
    pools_steps.push(cuaterna);
}
}

muestra_puntos();
}

function procesar_candidatos_zimmerman() {
    candidatos = new Array();
    pools_steps = new Array();
    find_points_zm();
    var porcentaje_altura_step = Number(3.3);
    var anchura_surco =
    Number(document.getElementById("Anchura_surco").value.replace(",","."));
    var pendiente_surco =
    Number(document.getElementById("Pendiente_surco").value.replace(",","."));/* sale de un
    textbox*/
    var valor_zimmerman = 3.3;
    var altura_minima = anchura_surco * porcentaje_altura_step / 100;
    for (i = 0; i < candidatos.length ; i++) {

        var triada = new Array();

```

```

triada = candidatos[i];

var puntoinicial = triada[0];
var puntoinferior = triada[1];
var puntofinal = triada[2];
var encontrado = false;

var paso = Number(document.getElementById("step").value);
var punto_step = -999999999999999;

for (j = puntofinal; j > 0; j--) {
    var auxiliar = 0;

    for (k = 0; k < paso; k++) {
        if (j - k > 0) {
            auxiliar += Math.atan(puntos[j - k][1] - puntos[j - k - 1][1]) / (puntos[j - k - 1][0] -
puntos[j - k][0]) * (180 / Math.PI);
        }
    }

    var media_pendiente = auxiliar / paso;
    if (media_pendiente <= pendiente_surco + 10) {
        punto_step = j;
        var altura_encontrada = puntos[punto_step][1] - puntos[puntoinicial][1];
        if (altura_encontrada >= altura_minima) {
            encontrado = true;
        } break;
    }
}

if (encontrado) {
    var cuaterna = new Array();
    cuaterna.push(puntoinicial);
    cuaterna.push(puntoinferior);
    cuaterna.push(puntofinal);
}

```

```

    cuaterna.push(punto_step);

    pools_steps.push(cuaterna);

}

}

muestra_puntos();
}

function find_points() {
    var i;
    var valor_inicio_pool = -999999999999999;
    var punto_inicio_pool;
    var valor_fondo_pool;
    var punto_fondo_pool;
    var en_pool = false;

    var anchura_surco =
    Number(document.getElementById("Anchura_surco").value.replace(",",".")); /* se obtiene de
    un textbox*/

    var porcentaje_longitud = Number(document.getElementById("Len_pool").value.replace(",",".
    ")); /* se obtiene de un textbox*/

    var porcentaje_anchura = Number(document.getElementById("Residual").value.replace(",",".
    ")); /* se obtiene de un textbox*/

    for (i = puntos.length - 2; i >= 0; i--) {
        if (puntos[i][1] >= valor_inicio_pool) {
            if (en_pool == false) {
                valor_inicio_pool = puntos[i][1];
                punto_inicio_pool = i;
                valor_fondo_pool = puntos[i][1];
                punto_fondo_pool = i;
            }
            else {

```

```

var cumple = true;

var residual = puntos[punto_inicio_pool][1] - puntos[punto_fondo_pool][1];
if (residual < anchura_surco * (porcentaje_anchura / 100)) {
    cumple = false;
}

var longitud = puntos[punto_inicio_pool][0] - puntos[i][0];
if (longitud < anchura_surco * (porcentaje_longitud / 100)) {
    cumple = false;
}

if (cumple) {
    var triada = new Array();
    triada.push(punto_inicio_pool);
    triada.push(punto_fondo_pool);
    triada.push(i);
    candidatos.push(triada);
}

en_pool = false;
punto_inicio_pool = i;
valor_inicio_pool = puntos[i][1];

}

}

else {
    en_pool = true;
    if (puntos[i][1] < valor_fondo_pool) {
        valor_fondo_pool = puntos[i][1];
        punto_fondo_pool = i;
    }
}

```

```

    }
}
}

function find_points_zm() {
    var i;
    var valor_inicio_pool = -999999999999999;
    var punto_inicio_pool;
    var valor_fondo_pool;
    var punto_fondo_pool;
    var en_pool = false;
    var anchura_surco =
    Number(document.getElementById("Anchura_surco").value.replace(",",".")); /* se obtiene de
    un textbox*/

    var porcentaje_longitud = Number(10);
    var porcentaje_anchura = Number(0.23);
    for (i = puntos.length - 2; i >= 0; i--) {
        if (puntos[i][1] >= valor_inicio_pool) {
            if (en_pool == false) {
                valor_inicio_pool = puntos[i][1];
                punto_inicio_pool = i;
                valor_fondo_pool = puntos[i][1];
                punto_fondo_pool = i;
            }
        }
        else {
            var cumple = true;

            var residual = puntos[punto_inicio_pool][1] - puntos[punto_fondo_pool][1];
            if (residual < anchura_surco * (porcentaje_anchura / 100)) {
                cumple = false;
            }

            var longitud = puntos[punto_inicio_pool][0] - puntos[i][0];

```

```

if (longitud < anchura_surco * (porcentaje_longitud / 100)) {
    cumple = false;
}

if (cumple) {
    var triada = new Array();
    triada.push(punto_inicio_pool);
    triada.push(punto_fondo_pool);
    triada.push(i);
    candidatos.push(triada);
}

punto_inicio_pool = i;
valor_inicio_pool = puntos[i][1];
en_pool = false;
}
}
else {
    en_pool = true;
    if (puntos[i][1] < valor_fondo_pool) {
        valor_fondo_pool = puntos[i][1];
        punto_fondo_pool = i;
    }
}
}
}

function muestra_puntos() {
    document.getElementById("results").innerHTML = "";
    var innerhtml = "He encontrado " + pools_steps.length + " Pools<br/><br/>";
    for (let i = 0; i < pools_steps.length; i++) {

```

```

    innerhtml += puntos[poos_steps[i][0]][0] + ";" + puntos[poos_steps[i][0]][1] + "<br/>" +
    puntos[poos_steps[i][1]][0] + ";" + puntos[poos_steps[i][1]][1] + "<br/>" +
    puntos[poos_steps[i][2]][0] + ";" + puntos[poos_steps[i][2]][1] + "<br/>" +
    puntos[poos_steps[i][3]][0] + ";" + puntos[poos_steps[i][3]][1] + "<br/><br/>"
}

document.getElementById("results").innerHTML = innerhtml;
}

```

```
function grafico(opcion) {
```

```

    document.getElementById("results").innerHTML = '<canvas id="myChart" width="500"
height="300"></canvas>';

```

```
var ctx = document.getElementById("myChart");
```

```
var datos = new Array();
```

```
var piscinas = new Array();
```

```
var escaleras = new Array();
```

```
switch (opcion) {
```

```
    case 0:
```

```
        for (let i = 0; i < puntos.length - 1; i++) {
```

```
            var obj = { x: puntos[i][0], y: puntos[i][1] };
```

```
            datos.push(obj);
```

```
        }
```

```
var scatterChart = new Chart(ctx, {
```

```
    type: 'line',
```

```
    data: {
```

```
        datasets: [{
```

```
            label: "Perfil",
```

```
            data: datos,
```

```
            backgroundColor: "rgba(255,255,255,0.4)",
```

```
            borderColor: "rgba(75,192,192,1)",
```

```
            pointRadius: 0
```

```
        ]}

```



```

    },
    options: {
      scales: {
        xAxes: [{
          type: 'linear',
          position: 'bottom'
        }]
      }
    }
  });
  break;
case 1:
  for (let i = 0; i < puntos.length - 1; i++) {
    let obj = { x: puntos[i][0], y: puntos[i][1] };
    datos.push(obj);
  }
  for (let i = pools_steps.length - 1; i >= 0; i--) {
    let aux = { x: NaN, y: NaN };
    piscinas.push(aux);
    for (let j = pools_steps[i][3]; j <= pools_steps[i][0]; j++) {
      let obj = { x: puntos[j][0], y: puntos[j][1] };
      piscinas.push(obj);
    }
    aux = { x: NaN, y: NaN };
    piscinas.push(aux);
  }
  var scatterChart = new Chart(ctx, {
    type: 'line',
    data: {
      datasets: [

```

```

    {
      label: "Pools",
      data: piscinas,
      backgroundColor: "rgba(255,255,255,0.4)",
      borderColor: "rgba(255,75,75,1)",
      pointRadius: 0,
      lineTension: 0,
      borderWidth: 1
    },
    {
      label: "Perfil",
      data: datos,
      backgroundColor: "rgba(255,255,255,0.4)",
      borderColor: "rgba(192,192,192,1)",
      pointRadius: 0,
      lineTension: 0,
      borderWidth: 1
    }
  ]
},
options: {
  scales: {
    xAxes: [{
      type: 'linear',
      position: 'bottom'
    }]
  }
}
});
break;
case 2:

```

```

for (let i = 0; i < puntos.length - 1; i++) {
    let obj = { x: puntos[i][0], y: puntos[i][1] };
    datos.push(obj);
}

for (let i = unidades_pool_step.length - 1; i >= 0; i--) {
    let aux = { x: NaN, y: NaN };
    piscinas.push(aux);
    for (let j = unidades_pool_step[i][3]; j <= unidades_pool_step[i][0]; j++) {
        let obj = { x: puntos[j][0], y: puntos[j][1] };
        piscinas.push(obj);
    }
    aux = { x: NaN, y: NaN };
    piscinas.push(aux);
}

for (let i = unidades_pool_step.length - 1; i >= 0; i--) {
    let aux = { x: NaN, y: NaN };
    escaleras.push(aux);
    for (let j = unidades_pool_step[i][4]; j <= unidades_pool_step[i][3]; j++) {
        let obj = { x: puntos[j][0], y: puntos[j][1] };
        escaleras.push(obj);
    }
    aux = { x: NaN, y: NaN };
    escaleras.push(aux);
}

var scatterChart = new Chart(ctx, {
    type: 'line',
    data: {
        datasets: [
            {
                label: "Pools",

```

```

    data: piscinas,
    backgroundColor: "rgba(255,255,255,0.4)",
    borderColor: "rgba(255,75,75,1)",
    pointRadius: 0,
    lineTension: 0,
    borderWidth: 1
  },
  {
    label: "Steps",
    data: escaleras,
    backgroundColor: "rgba(255,255,255,0.4)",
    borderColor: "rgba(75,255,75,1)",
    pointRadius: 0,
    lineTension: 0,
    borderWidth: 1
  },
{
  label: "Perfil",
  data: datos,
  backgroundColor: "rgba(255,255,255,0.4)",
  borderColor: "rgba(192,192,192,1)",
  pointRadius: 0,
  lineTension: 0,
  borderWidth: 1
}
]
},
options: {
  scales: {
    xAxes: [{
      type: 'linear',

```

```

        position: 'bottom'
    }}
    }
}
});
break;

}

//alert(datos);

}

function find_step() {
    procesar_candidatos();

    var anchura_surco =
    Number(document.getElementById("Anchura_surco").value.replace(",",".")); /* se obtiene de
    un textbox*/

    var pendiente_surco =
    Number(document.getElementById("Pendiente_surco").value.replace(",",".")); /* sale de un
    textbox*/

    var extra_pendiente =
    Number(document.getElementById("Grados_extra").value.replace(",","."));

    unidades_pool_step = new Array();

    var lmin = Number(document.getElementById("lmin").value.replace(",",".")) / 100 *
    anchura_surco;

    var lmax = Number(document.getElementById("lmax").value.replace(",",".")) *
    anchura_surco;

    for (let i = pools_steps.length - 1; i >= 0; i--) {

        let distancia_ud_pool_step;

        let quintopunto;

        let altura_ud_pool_step;

        let media_pendiente_ud_pool_step;
    }
}

```

```

let correcto = true;

if (i == pools_steps.length - 1)//Para el primer pool tomamos el punto 0 como inicio de la
unidad step_pool

{
    distancia_ud_pool_step = puntos[pools_steps[i][3]][0];
    altura_ud_pool_step = puntos[0][1] - puntos[pools_steps[i][3]][1];
    quintopunto = 0;
}
else {
    distancia_ud_pool_step = puntos[pools_steps[i][3]][0] - puntos[pools_steps[i + 1][0]][0];
    altura_ud_pool_step = puntos[pools_steps[i + 1][0]][1] - puntos[pools_steps[i][3]][1];
    quintopunto = pools_steps[i + 1][0];
}

media_pendiente_ud_pool_step = Math.atan(altura_ud_pool_step /
distancia_ud_pool_step) * (180 / Math.PI);

if (media_pendiente_ud_pool_step < pendiente_surco + extra_pendiente) {
    correcto = false;
}

if (distancia_ud_pool_step > lmax || distancia_ud_pool_step < lmin) {
    correcto = false;
}

if (correcto) {
    let quinteto = new Array();
    quinteto.push(pools_steps[i][0]);
    quinteto.push(pools_steps[i][1]);
    quinteto.push(pools_steps[i][2]);
    quinteto.push(pools_steps[i][3]);
    quinteto.push(quintopunto);
    unidades_pool_step.push(quinteto);
}

```

```

    }
}
muestra_puntos2();
}

function find_step_zm() {
    procesar_candidatos_zimmerman();

    var anchura_surco =
    Number(document.getElementById("Anchura_surco").value.replace(",",".")); /* se obtiene de
    un textbox*/

    var pendiente_surco =
    Number(document.getElementById("Pendiente_surco").value.replace(",",".")); /* sale de un
    textbox*/

    var extra_pendiente = 10;
    unidades_pool_step = new Array();
    var lmin = 2.25 / 100 * anchura_surco;
    var lmax = 2 * anchura_surco;
    for (let i = pools_steps.length - 1; i >= 0; i--) {
        let distancia_ud_pool_step;
        let quintopunto;
        let altura_ud_pool_step;
        let media_pendiente_ud_pool_step;
        let correcto = true;

        if (i == pools_steps.length - 1) //Para el primer pool tomamos el punto 0 como inicio de la
        unidad step_pool
        {
            distancia_ud_pool_step = puntos[pools_steps[i][3]][0];
            altura_ud_pool_step = puntos[0][1] - puntos[pools_steps[i][3]][1];
            quintopunto = 0;
        }
        else {
            distancia_ud_pool_step = puntos[pools_steps[i][3]][0] - puntos[pools_steps[i + 1][0]][0];
            altura_ud_pool_step = puntos[pools_steps[i][3]][1] - puntos[pools_steps[i + 1][0]][1];
        }
    }
}

```

```

    quintopunto = pools_steps[i + 1][0];
}

media_pendiente_ud_pool_step = Math.atan(altura_ud_pool_step /
distancia_ud_pool_step) * (180 / Math.PI);

if (media_pendiente_ud_pool_step < pendiente_surco + extra_pendiente) {
    correcto = false;
}

if (distancia_ud_pool_step > lmax || distancia_ud_pool_step < lmin) {
    correcto = false;
}

if (correcto) {
    let quinteto = new Array();
    quinteto.push(pools_steps[i][0]);
    quinteto.push(pools_steps[i][1]);
    quinteto.push(pools_steps[i][2]);
    quinteto.push(pools_steps[i][3]);
    quinteto.push(quintopunto);

    unidades_pool_step.push(quinteto);
}
}

muestra_puntos2();
}

function muestra_puntos2() {
    document.getElementById("results").innerHTML = "";
    var innerhtml = "He encontrado " + unidades_pool_step.length + " Pools<br/><br/>";
    for (let i = 0; i < unidades_pool_step.length; i++) {
        innerhtml += puntos[unidades_pool_step[i][0]][0] + ";" +
puntos[unidades_pool_step[i][0]][1] + "<br/>" + puntos[unidades_pool_step[i][1]][0] + ";" +

```



```
puntos[unidades_pool_step[i][1]][1] + "<br/>" + puntos[unidades_pool_step[i][2]][0] + ";" +
puntos[unidades_pool_step[i][2]][1] + "<br/>" + puntos[unidades_pool_step[i][3]][0] + ";" +
puntos[unidades_pool_step[i][3]][1] + "<br/>" + puntos[unidades_pool_step[i][4]][0] + ";" +
puntos[unidades_pool_step[i][4]][1] + "<br/><br/>"

}

document.getElementById("results").innerHTML = innerhtml;

}
```

```
function grafico_Zoom(opcion) {

    document.getElementById("results").innerHTML = '<canvas id="myChart" width="500"
height="300"></canvas>';

    var inicio = Number(document.getElementById("Zoom_inicio").value.replace(",", "."));
    var fin = Number(document.getElementById("Zoom_Fin").value.replace(",", "."));
    var ctx = document.getElementById("myChart");
    var datos = new Array();
    var piscinas = new Array();
    var escaleras = new Array();
    switch (opcion) {
        case 0:
            for (let i = 0; i < puntos.length - 1; i++) {
                if (puntos[i][0] >= inicio && puntos[i][0] <= fin)
                {
                    var obj = { x: puntos[i][0], y: puntos[i][1] };
                    datos.push(obj);
                }
            }
            var scatterChart = new Chart(ctx, {
                type: 'line',
                data: {
                    datasets: [{
                        label: "Perfil",
                        data: datos,
```

```

        backgroundColor: "rgba(255,255,255,0.4)",
        borderColor: "rgba(75,192,192,1)",
        pointRadius: 0
    }}
},
options: {
    scales: {
        xAxes: [{
            type: 'linear',
            position: 'bottom'
        }]
    }
}
});
break;
case 1:
    for (let i = 0; i < puntos.length - 1; i++) {
        if (puntos[i][0] >= inicio && puntos[i][0] <= fin)
        {
            let obj = { x: puntos[i][0], y: puntos[i][1] };
            datos.push(obj);
        }
    }

    for (let i = pools_steps.length - 1; i >= 0; i--) {
        let aux = { x: NaN, y: NaN };
        piscinas.push(aux);
        for (let j = pools_steps[i][3]; j <= pools_steps[i][0]; j++) {
            if(puntos[j][0]>=inicio && puntos[j][0]<=fin)
            {
                let obj = { x: puntos[j][0], y: puntos[j][1] };

```

```

    piscinas.push(obj);
  }
}

if(puntos[pools_steps[i][0]][0]>=inicio && puntos[pools_steps[i][0]][0]<=fin)
{
  let aux = { x: NaN, y: NaN };
  piscinas.push(aux);
}

}

var scatterChart = new Chart(ctx, {
  type: 'line',
  data: {
    datasets: [
      {
        label: "Pools",
        data: piscinas,
        backgroundColor: "rgba(255,255,255,0.4)",
        borderColor: "rgba(255,75,75,1)",
        pointRadius: 0,
        lineTension: 0,
        borderWidth: 1
      },
      {
        label: "Perfil",
        data: datos,
        backgroundColor: "rgba(255,255,255,0.4)",
        borderColor: "rgba(192,192,192,1)",
        pointRadius: 0,
        lineTension: 0,
        borderWidth: 1
      }
    ]
  }
});

```

```

    }
  ]
},
options: {
  scales: {
    xAxes: [{
      type: 'linear',
      position: 'bottom'
    }]
  }
}
});
break;
case 2:
  for (let i = 0; i < puntos.length - 1; i++) {
    if (puntos[i][0] >= inicio && puntos[i][0] <= fin)
    {
      let obj = { x: puntos[i][0], y: puntos[i][1] };
      datos.push(obj);
    }
  }

  for (let i = unidades_pool_step.length - 1; i >= 0; i--) {
    if (puntos[unidades_pool_step[i][3]][0] >= inicio &&
puntos[unidades_pool_step[i][3]][0] <= fin)
    {
      let aux = { x: NaN, y: NaN };
      piscinas.push(aux);
    }
    for (let j = unidades_pool_step[i][3]; j <= unidades_pool_step[i][0]; j++) {
      if (puntos[j][0] >= inicio && puntos[j][0] <= fin) {

```

```

        let obj = { x: puntos[j][0], y: puntos[j][1] };
        piscinas.push(obj);
    }
}

if(puntos[unidades_pool_step[i][0]][0]>=inicio &&
puntos[unidades_pool_step[i][0]][0]<=fin)
{
    let aux = { x: NaN, y: NaN };
    piscinas.push(aux);
}

for (let i = unidades_pool_step.length - 1; i >= 0; i--) {
    if (puntos[unidades_pool_step[i][4]][0] >= inicio &&
puntos[unidades_pool_step[i][4]][0] <= fin)
    {
        let aux = { x: NaN, y: NaN };
        escaleras.push(aux);
    }
    for (let j = unidades_pool_step[i][4]; j <= unidades_pool_step[i][3]; j++) {
        if (puntos[j][0] >= inicio && puntos[j][0] <= fin) {

            let obj = { x: puntos[j][0], y: puntos[j][1] };
            escaleras.push(obj);
        }
    }
    if (puntos[unidades_pool_step[i][3]][0] >= inicio &&
puntos[unidades_pool_step[i][3]][0] <= fin)
    {
        let aux = { x: NaN, y: NaN };
        escaleras.push(aux);
    }
}
}

```

```

var scatterChart = new Chart(ctx, {
  type: 'line',
  data: {
    datasets: [
      {
        label: "Pools",
        data: piscinas,
        backgroundColor: "rgba(255,255,255,0.4)",
        borderColor: "rgba(255,75,75,1)",
        pointRadius: 0,
        lineTension: 0,
        borderWidth: 1
      },
      {
        label: "Steps",
        data: escaleras,
        backgroundColor: "rgba(255,255,255,0.4)",
        borderColor: "rgba(75,255,75,1)",
        pointRadius: 0,
        lineTension: 0,
        borderWidth: 1
      },
      {
        label: "Perfil",
        data: datos,
        backgroundColor: "rgba(255,255,255,0.4)",
        borderColor: "rgba(192,192,192,1)",
        pointRadius: 0,
        lineTension: 0,
        borderWidth: 1
      }
    ]
  }
}

```

```
    ]  
  },  
  options: {  
    scales: {  
      xAxes: [{  
        type: 'linear',  
        position: 'bottom'  
      }]  
    }  
  }  
});  
break;  
  
}  
//alert(datos);  
  
}
```

ANEXO III: SCRIPT DOUGLAS Y PEUCKER Y HTML PARA LA INTRODUCCIÓN DE DATOS Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS

a) HTML para la introducción de datos y obtención de resultados

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
  <script src="Douglas.js"></script>
  <title></title>
  <meta charset="utf-8" />
</head>
<body>
  <input type="file" id="csvFileInput" onchange="handleFiles(this.files)"
    accept=".csv">
  <p>
    Tolerancia<br />
    <input id="tolerancia" type="text" />
  </p>
  <div id="resultado"></div>
</body>
</html>
```


b) Script Douglas and Peucker

```
var puntos = new Array();
```

```
function errorHandler(evt) {
    if (evt.target.error.name == "NotReadableError") {
        alert("No se puede leer el archivo");
    }
}
```

```
function handleFiles(files) {
    // Check for the various File API support.
    if (window.FileReader) {
        getAsText(files[0]);
    } else {
        alert('El objeto FileReader no está soportado en este navegador, use un navegador más moderno.');
```

```
function getAsText(fileToRead) {
    var reader = new FileReader();
    // Read file into memory as UTF-8
    reader.readAsText(fileToRead);
    // Handle errors load
    reader.onload = loadHandler;
    reader.onerror = errorHandler;
}
```

```
function loadHandler(event) {
```

```

var csv = event.target.result;

processData(csv);
}

function processData(csv) {
    puntos = new Array();
    var allTextLines = csv.split(/\r\n|\n/);
    var lines = [];

    for (var i = 0; i < allTextLines.length; i++) {
        var data = allTextLines[i].split(';');
        var tarr = [];
        if (data.length > 1) {
            var Vector = function (x, y) {
                this.x = x;
                this.y = y;
            };
            Vector.x = Number(data[0].replace(", ", "."));
            Vector.y = Number(data[1].replace(", ", "."));
            puntos.push(Vector);
        }
    }

    var tolerancia = Number(document.getElementById("tolerancia").value.replace(", ", "."))
    var puntos2 = simplifyPath(puntos, tolerancia);
    alert("Eran: " + puntos.length + " puntos, ahora son: " + puntos2.length);
    document.getElementById("resultado").innerHTML = "";
    var innerhtml = "";
    for(let i=0; i< puntos2.length;i++)
    {
        innerhtml += puntos2[i].x + ";" + puntos2[i].y + "<br/>"
    }
}

```

```
document.getElementById("resultado").innerHTML = innerhtml;
}
```

```
function simplifyPath(points, tolerance) {

    // helper classes
    var Vector = function (x, y) {
        this.x = x;
        this.y = y;
    };

    var Line = function (p1, p2) {
        this.p1 = p1;
        this.p2 = p2;

        this.distanceToPoint = function (point) {
            // slope
            var m = (this.p2.y - this.p1.y) / (this.p2.x - this.p1.x),
                // y offset
                b = this.p1.y - (m * this.p1.x),
                d = [];

            // distance to the linear equation
            d.push(Math.abs(point.y - (m * point.x) - b) / Math.sqrt(Math.pow(m, 2) + 1));

            // distance to p1
            d.push(Math.sqrt(Math.pow((point.x - this.p1.x), 2) + Math.pow((point.y - this.p1.y),
2))));
        };
    };
}
```

```

// distance to p2
d.push(Math.sqrt(Math.pow((point.x - this.p2.x), 2) + Math.pow((point.y - this.p2.y),
2)));
// return the smallest distance
return d.sort(function (a, b) {
    return (a - b); //causes an array to be sorted numerically and ascending
})[0];
};
};

var douglasPeucker = function (points, tolerance) {
    if (points.length <= 2) {
        return [points[0]];
    }
    var returnPoints = [],
        // make line from start to end
        line = new Line(points[0], points[points.length - 1]),
        // find the largest distance from intermediate poitns to this line
        maxDistance = 0,
        maxDistanceIndex = 0,
        p;

    for (var i = 1; i <= points.length - 2; i++) {
        var distance = line.distanceToPoint(points[i]);
        if (distance > maxDistance) {
            maxDistance = distance;
            maxDistanceIndex = i;
        }
    }

    // check if the max distance is greater than our tollerance allows
    if (maxDistance >= tolerance) {
        p = points[maxDistanceIndex];
    }
}

```

```

    line.distanceToPoint(p, true);

    // include this point in the output

    returnPoints = returnPoints.concat(douglasPeucker(points.slice(0, maxDistanceIndex +
1), tolerance));

    // returnPoints.push( points[maxDistanceIndex] );

    returnPoints = returnPoints.concat(douglasPeucker(points.slice(maxDistanceIndex,
points.length), tolerance));

    } else {

        // ditching this point

        p = points[maxDistanceIndex];

        line.distanceToPoint(p, true);

        returnPoints = [points[0]];

    }

    return returnPoints;

};

var arr = douglasPeucker(points, tolerance);

// always have to push the very last point on so it doesn't get left off
arr.push(points[points.length - 1]);

return arr;

};

```

ANEXO IV: DATOS OBTENIDOS POR LOS EXPERTOS. ANCHURA DE LOS CANALES DE EROSIÓN Y SUPERFICIE EROSIONADA ESTIMADA.

ANCHURA (m)

	Nº sección	Valor de referencia	Experto 1	Experto 2	Experto 3	Experto 4	Experto 5	Experto 6	Experto 7	Experto 8	Experto 9	Experto 10	Experto 11	Experto 12	Experto 13
trapecio/cuadrado/ rectangular	1	0,140	0,099	0,117	0,105	0,105	0,110	0,110	0,450	0,476	0,105	0,120	0,130	0,467	0,115
	2	0,244	0,259	0,261	0,202	0,260	0,265	0,270	0,450	0,572	0,260	0,265	0,262	0,261	0,218
	3	0,198	0,160	0,196	0,200	0,195	0,196	0,190	0,630	0,583	0,194	0,195	0,200	0,197	0,187
	4	0,165	0,165	0,166	0,166	0,160	0,175	0,220	0,540	0,652	0,163	0,175	0,219	0,163	0,161
	5	0,228	0,228	0,165	0,164	0,167	0,244	0,300	0,520	0,554	0,164	0,160	0,380	0,180	0,200
	6	0,220	0,214	0,223	0,212	0,220	0,232	0,320	0,360	0,455	0,215	0,220	0,242	0,224	0,214
	7	0,128	0,093	0,096	0,100	0,097	0,502	0,370	0,540	0,563	0,094	0,095	0,094	0,100	0,128
	8	0,179	0,171	0,171	0,172	0,172	0,230	0,230	0,560	0,589	0,177	0,175	0,210	0,172	0,173
triangular	9	0,104	0,052	0,056	0,054	0,053	0,055	0,070	0,590	0,652	0,058	0,100	0,080	0,050	0,060
	10	0,085	0,095	0,089	0,058	0,085	0,093	0,110	0,420	0,519	0,095	0,140	0,120	0,097	0,043
	11	0,150	0,127	0,111	0,100	0,143	0,138	0,140	0,400	0,493	0,144	0,135	0,145	0,138	0,205
	12	0,100	0,109	0,109	0,107	0,106	0,108	0,120	0,560	0,575	0,103	0,105	0,110	0,107	0,103
	13	0,091	0,113	0,113	0,109	0,115	0,331	0,110	0,400	0,440	0,105	0,120	0,120	0,117	0,314
	14	0,200	0,205	0,205	0,205	0,203	0,205	0,210	0,480	0,563	0,200	0,200	0,210	0,207	0,493
irregular	15	0,245	0,195	0,195	0,204	0,205	0,210	0,210	0,620	0,641	0,205	0,245	0,205	0,205	0,218
	16	0,231	0,228	0,209	0,207	0,212	0,248	0,240	0,540	0,700	0,211	0,245	0,250	0,229	0,224
	17	0,241	0,239	0,219	0,219	0,225	0,234	0,240	0,560	0,637	0,234	0,240	0,225	0,224	0,222
	18	0,304	0,149	0,205	0,202	0,205	0,218	0,230	0,420	0,534	0,203	0,250	0,248	0,206	0,201
	19	0,216	0,100	0,202	0,198	0,200	0,205	0,220	0,340	0,345	0,204	0,209	0,220	0,199	0,197
	20	0,301	0,172	0,171	0,171	0,170	0,379	0,360	0,600	0,562	0,170	0,170	0,172	0,172	0,332

SUPERFICIE EROSIONADA (m²)

	Nº sección	Valor de referencia	Experto 1	Experto 2	Experto 3	Experto 4	Experto 5	Experto 6	Experto 7	Experto 8	Experto 9	Experto 10	Experto 11	Experto 12	Experto 13
trapezio/cuadrado/ rectangular	1	0,005	0,003	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,020	0,023	0,004	0,005	0,005	0,023	0,005
	2	0,014	0,017	0,018	0,011	0,018	0,018	0,018	0,026	0,033	0,018	0,018	0,018	0,017	0,012
	3	0,013	0,003	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,039	0,031	0,012	0,013	0,013	0,013	0,012
	4	0,007	0,009	0,009	0,009	0,008	0,009	0,010	0,028	0,032	0,008	0,009	0,010	0,009	0,008
	5	0,009	0,014	0,010	0,010	0,010	0,016	0,018	0,025	0,027	0,010	0,009	0,021	0,012	0,011
	6	0,014	0,013	0,014	0,013	0,014	0,015	0,019	0,020	0,028	0,013	0,014	0,015	0,014	0,013
	7	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,026	0,009	0,027	0,031	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
	8	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,010	0,010	0,030	0,031	0,009	0,009	0,010	0,009	0,009
triangular	9	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,035	0,043	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002
	10	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,014	0,024	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001
	11	0,005	0,003	0,003	0,003	0,005	0,005	0,005	0,013	0,023	0,005	0,005	0,005	0,005	0,007
	12	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,025	0,027	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
	13	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,010	0,002	0,012	0,013	0,002	0,003	0,003	0,003	0,008
	14	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,033	0,041	0,012	0,011	0,012	0,012	0,038
irregular	15	0,016	0,012	0,012	0,014	0,014	0,014	0,014	0,037	0,039	0,014	0,016	0,014	0,014	0,012
	16	0,012	0,011	0,011	0,010	0,011	0,014	0,012	0,024	0,038	0,011	0,013	0,013	0,012	0,011
	17	0,013	0,013	0,010	0,010	0,010	0,013	0,010	0,033	0,041	0,013	0,013	0,010	0,010	0,010
	18	0,013	0,005	0,012	0,011	0,012	0,013	0,013	0,020	0,024	0,012	0,015	0,013	0,012	0,011
	19	0,011	0,001	0,010	0,010	0,010	0,010	0,011	0,016	0,016	0,010	0,011	0,011	0,010	0,009
	20	0,014	0,009	0,009	0,009	0,009	0,022	0,021	0,036	0,033	0,009	0,009	0,009	0,009	0,016

