

Uso de trazadores magnéticos para caracterizar la erosión del suelo

G. Guzmán¹, A. Laguna², J.V. Giráldez^{1,2}, S. Strohmeier³, J.A. Gómez¹

¹Instituto de Agricultura Sostenible-CSIC. Córdoba (España)

²Universidad de Córdoba. Córdoba (España)

³International Center for Agricultural Research in the Dry Areas. Amán (Jordania)

1. Introducción

La erosión hídrica es uno de los principales problemas ambientales de la agricultura en España, especialmente en las regiones sur y sureste, debido a una combinación de cultivos en pendiente, un manejo inadecuado del suelo y el clima mediterráneo. En este contexto, el estudio de los procesos erosivos resulta fundamental para la sostenibilidad de la agricultura, y se ve afectado por las limitaciones y coste de operación de las tecnologías tradicionales utilizadas: parcelas de escorrentía, medidas integradas a escala de cuenca, etc. Esta situación es general a los estudios de erosión en otros lugares del mundo, existiendo un esfuerzo por parte de diferentes grupos de investigación en el desarrollo de nuevos trazadores de erosión que permitan identificar, y si es posible cuantificar, el sedimento a lo largo de su movimiento dentro de la zona erosionada, con el fin de sustituir, o complementar, la información obtenida con las técnicas tradicionales.

La literatura recoge el uso de trazadores de sedimento de diversa naturaleza (Guzmán et al. 2013). Esta variedad de aproximaciones en el trazado de sedimento en estudios de erosión, es una señal de que hasta el momento ninguno de estos trazadores ha reunido todos los requisitos necesarios para ser un trazador de suelo ideal, definidos por Zhang et al. (2001), lo cual sugiere la conveniencia de profundizar en el estudio de estos trazadores.

Entre los diversos trazadores de sedimento propuestos, cabe destacar el aprovechamiento de las propiedades magnéticas de los minerales del suelo, que permiten una medida de forma no destructiva y económica (e.g. Dunlop 2012). En este trabajo se describen las características más significativas de un óxido de hierro magnético (magnetita), algunas de las características que condicionan su utilización como trazador de sedimento, además de un breve repaso de varios ensayos de erosión hídrica que se han llevado a cabo en los últimos años evaluando manejos agrícolas y prácticas de conservación de agua y suelo, en distintos sistemas de cultivo y escalas temporal y espacial.

2. Caracterización y aplicación del óxido de hierro magnético

2.1 Descripción de la magnetita

El óxido de hierro magnético o magnetita (Fe_3O_4), utilizado como trazador de sedimento se ha utilizado tradicionalmente como un pigmento negro en el ámbito de la construcción, Figura 1. Por eso es fácilmente adquirible, y a bajo coste en comparación con otras sustancias trazadoras. Entre las características que recomiendan su uso como trazador de sedimento es la sencillez y rapidez de su medida en los suelos.

Para evaluar cuantitativa y cualitativamente su presencia en el suelo es a través de la medida de la susceptibilidad magnética, χ , ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, SI). En nuestros suelos, generalmente, el valor de fondo de esta propiedad es cuatro órdenes de magnitud por debajo del valor de la magnetita pura ($485 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$), por lo que su presencia en el suelo es fácilmente detectable. Sus partículas son esféricas, Figura 2, con un tamaño predominante de $0.2 \mu\text{m}$ y una densidad de $\sim 4.6 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$.



Figura 1. Óxido de hierro magnético.

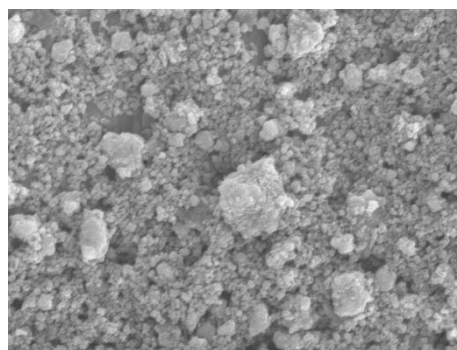


Figura 2. Imagen del microscopio electrónico de la magnetita.

2.2 Marcado del suelo

Al tratarse de un pigmento sólido de tamaño limo ($50\text{--}2 \mu\text{m}$), según la clasificación USDA, la forma más adecuada para ser añadido al suelo es mediante diluciones sucesivas. Para favorecer el fijado del óxido de hierro a los distintos agregados del suelo, la mezcla de magnetita y suelo debe someterse a varios ciclos de humedecimiento y secado al aire. Tras ese proceso, la mezcla homogénea se aplica directamente bien sobre la superficie de suelo o bien en zanjas o bandas.

Guzmán y col. (2010) evaluaron la idoneidad del método de mezcla y marcado y posteriormente su potencial como trazador estimando pérdidas de suelo en ensayos con lluvia simulada en condiciones controladas. Para ello se seleccionaron cuatro suelos representativos de zonas agrícolas andaluzas y de diversas clases texturales. Cada uno de ellos se mezcló con la magnetita tal y como se ha descrito anteriormente. Para comprobar el buen fijado del trazador a las partículas del suelo, se determinó la distribución del tamaño de partículas tanto de los suelos con y sin trazador sin obtener diferencias significativas en la

mayoría de los tamaños. Además, se midió la susceptibilidad magnética en cada uno de los tamaños obtenidos, observándose un ligero incremento de dicha susceptibilidad en los tamaños inferiores a 63 μm , lo cual indica una preferencia del trazador o selectividad de marcado por los tamaños de partícula más pequeños del suelo. Un ejemplo puede observarse en las Figuras 3 y 4, en la que se muestran tanto la distribución del tamaño de partículas como su susceptibilidad magnética en uno de los suelos, respectivamente, con y sin trazador.

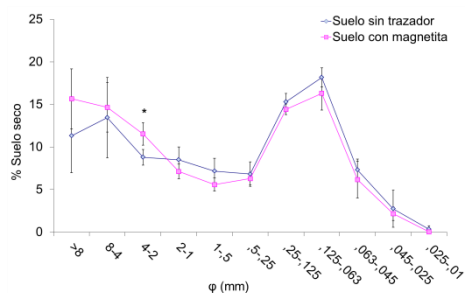


Figura 3. Distribución del tamaño de partículas de un suelo con y sin trazador (adaptada de Guzmán y col. 2010). * indica diferencias significativas ($p < 0.05$).

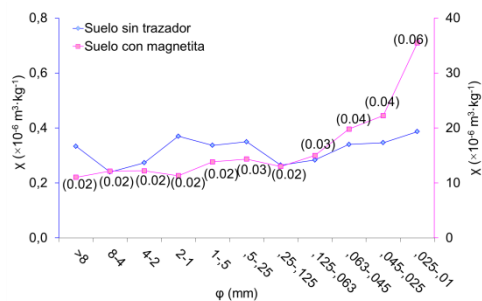


Figura 4. Susceptibilidad magnética de los distintos tamaños de partículas con y sin trazador (adaptada de Guzmán y col. 2010). Entre paréntesis, la concentración de magnetita en cada tamaño de suelo marcado.

Mediante el análisis de la concentración del trazador en el sedimento recogido en las simulaciones de lluvia, y por tanto el suelo asociado al mismo, se certificó la utilidad de la magnetita para evaluar las tasas de erosión. Dada la precisión (aproximadamente de $0.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$), de la técnica propuesta sería especialmente adecuada para evaluar pérdidas de suelo relativamente grandes (por ejemplo, durante cortos periodos de tiempo de intensa erosión o largos de intensidad moderada), o en combinación con otras medidas de pérdidas de suelo para identificar la importancia relativa de las distintas pérdidas de suelo ya sean superficiales o por salpicadura.

2.2 Modelo de mezcla

Entre la información que este trazador puede proporcionar caben destacar las pérdidas de suelo mediante el análisis del trazador en el sedimento recogido o la redistribución del suelo o la procedencia del mismo, a través de la cantidad de trazador presente o erosionado en el suelo.

La determinación del origen entre diferentes zonas dentro de una misma área de estudio se basa en el número de trazadores disponible. En el caso de la magnetita, podrían discriminarse dos zonas contribuyentes al sedimento: la zona con suelo sin trazador y con trazador, tal y como se describe en las Ecuaciones 1, 2 y 3:

$$\chi_{sed} = f_b \chi_b + \alpha f_t \chi_t \quad [1]$$

$$f_b = 1 - f_t \quad [2]$$

$$\alpha = c_s c_d \quad [3]$$

Donde χ_{sed} , χ_b y χ_t son las susceptibilidades magnéticas del sedimento, del suelo sin trazador y el marcado, respectivamente, f_b y f_t son las contribuciones al sedimento de las zonas sin y con trazador, y α es un coeficiente que explica la selectividad de la magnetita, c_s , y su distribución en el perfil del suelo marcado, c_d .

2.2 Coeficientes de selectividad y distribución

Como se ha descrito anteriormente, la magnetita presenta una preferencia en el marcado de los tamaños finos de las partículas del suelo, lo que hace que en dichos tamaños, la concentración de trazador sea ligeramente superior, Figura 4.

Además, en ensayos de laboratorio, Guzmán y col. 2015 observaron una distribución del trazador decreciente con la profundidad del perfil de suelo marcado. Esta distribución heterogénea, supone que conforme se va erosionando el suelo marcado, la señal magnética recogida en el sedimento es decreciente comparado con el sedimento recogido tras los primeros eventos erosivos, en los que la concentración de trazador es ligeramente superior.

Para incorporar tales efectos, determinaron de forma experimental en ensayos de laboratorio dos correlaciones para explicar la selectividad y la distribución de la magnetita en el suelo, a través de la medida de la susceptibilidad magnética de los distintos tamaños del suelo según su contenido de arcilla, Figura 5, y de distintos intervalos de profundidad en función de la altura de suelo erosionada, Figura 6.

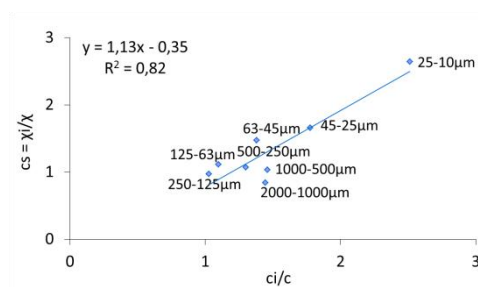


Figura 5. Coeficiente de selectividad de la magnetita en función del contenido de arcilla para un suelo (adaptada de Guzmán y col. 2015).

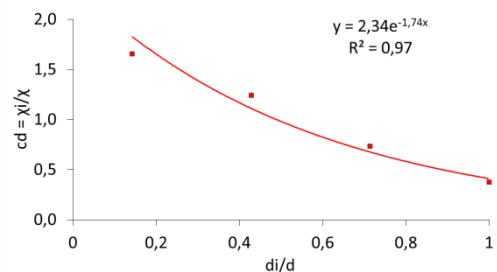


Figura 6. Coeficiente de distribución de la magnetita en función de la profundidad de un suelo marcado (adaptada de Guzmán y col. 2015).

3. Evaluación de estrategias de manejo de varios sistemas agrícolas

3.1 Estimación del origen de sedimento en un olivar

En un olivar intensivo, Guzmán y col. 2013 estimaron las pérdidas de suelo y la procedencia del sedimento distinguiendo tres zonas diferentes: la línea de árboles (copas), la línea entre árboles (calles) y los regueros (cuando los hubo), Figura 7. Para ello, se añadió magnetita en las calles, dejando la zona de copas sin marcar. Así pues y mediante el modelo de mezcla definido en las ecuaciones definidas en la sección 2.2, se estimaron las pérdidas de suelo a medio plazo, Figura 8, Las pérdidas de suelo procedentes de los regueros se estimaron mediante la caracterización de las dimensiones de los mismos y las pérdidas de suelo asociadas a dichas dimensiones.



Figura 7. Regueros en una de las parcelas.

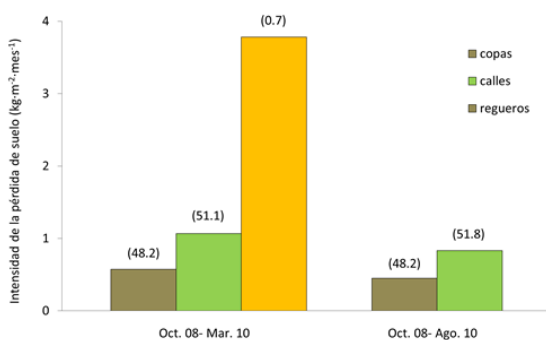


Figura 8. Erosión de las distintas zonas y períodos estudiados. En paréntesis se muestra la superficie relativa (%) de cada zona.

La magnetita no sólo permitió la estimación de las pérdidas de suelo totales con una precisión de 7.2 Mg ha^{-1} sino además la cuantificación de la contribución de cada zona dentro de las parcelas del estudio. Los resultados indicaron que tanto calles como copas presentaron una erosión apreciable, siendo claramente superior en la zona entre árboles. A pesar de que la superficie de los regueros sobre el total del área de estudio no fue significativa, sí es cierto que contribuyeron sustancialmente al total del suelo perdido, siendo necesario prevenir su aparición y controlar su crecimiento.

3.2 Eficacia de los diques de piedra en la retención de sedimentos

En las zonas altas de Etiopía, la conversión de zonas forestales a zonas agrícolas, ha incrementado la vulnerabilidad de los suelos a los efectos de la erosión hídrica. Debido a las altas pendientes cultivadas, donde predominan el suelo desnudo, y los eventos erosivos de

alta intensidad en la época de lluvias, las pérdidas de suelo y la escorrentía estas zonas montañosas sufren graves problemas de degradación.

Strohmeier y col. (2015) instalaron parcelas de escorrentía en el año 2013 para evaluar los procesos erosivos en zonas agrícolas y el efecto de los diques de piedra sobre los mismos. A pesar de la reducción significativa tanto de la escorrentía superficial y el sedimento (60 y 40 %, respectivamente), Figura 9, en comparación con las zonas sin ninguna protección, la eficiencia de estos diques está estrechamente relacionada con el tiempo transcurrido desde su formación y mantenimiento.



Figura 9. Efecto del dique de piedra en una de las parcelas (adaptada de Strohmeier y col. 2015).

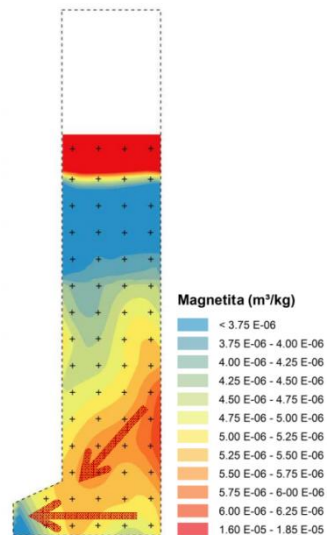


Figura 10. Redistribución de la magnetita tras las lluvias de 2013 (adaptada de Strohmeier y col. 2015).

El mapa de la redistribución del suelo obtenido tras la época de lluvias, Figura 10 indica el movimiento de sedimentos canalizado a lo largo del dique de piedra. Permite conocer los patrones de la erosión del suelo y detectar las interferencias en ellos del diseño experimental, proporcionando sugerencias para la nueva campaña llevada a cabo en junio de 2015, e información complementaria para la modelización y extrapolación de los resultados un escenario a mayor escala mediante el modelo SWAT.

3.3 Simulación de diferentes escenarios en un sistema de surcos y lomos de algodón

El aprovechamiento del agua disponible para el riego de los cultivos y la conservación del suelo son dos aspectos clave que fueron evaluados por Guzmán y col. 2015 utilizando óxidos de hierro, entre ellos la magnetita. En un ensayo llevado a cabo en una parcela alomada con algodón se evaluó el origen del sedimento producido en simulaciones de lluvia y riegos

controlados en las diferentes etapas de crecimiento del cultivo (lomos desnudos, mitad del ciclo con cobertura del suelo del 50 % y residuos sobre los lomos) y dos manejos de los surcos (con rodadas y sin rodadas).

Con el modelo de mezcla (sección 2.2), se determinó que en ausencia de residuos, la contribución de los lomos fue de casi el 90% al total del sedimento mientras que esa tendencia se invirtió (con el 30% del sedimento proveniente de los lomos) al presentar residuos sobre los mismos, debido además a una mayor consolidación del sistema. Figura 11.



Figura 11. Simulación de lluvia con el surco marcado con magnetita.

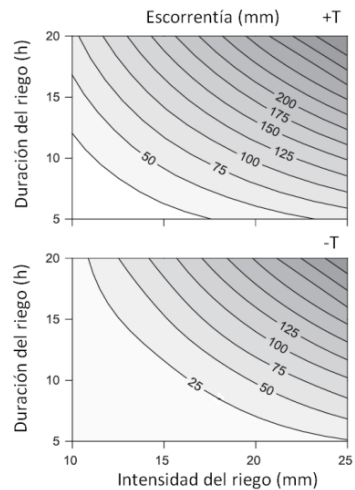


Figura 12. Generación de escorrentía en función de la duración e intensidad del riego para las condiciones evaluadas (adaptada de Guzmán y col. 2015).

Además de generar información que permite actuar sobre problemas localizados o situaciones puntuales dentro de los sistemas evaluados, los trazadores de sedimento, en este caso magnetita, esta información facilita la calibración y puesta a punto de modelos de erosión (por ejemplo, el desarrollado por Laguna y Giráldez (1993), o Kineros2). Así pues, con los resultados, se elaboraron diferentes diagramas de generación de escorrentía y sedimento para asesorar el diseño y las estrategias de manejo de estos sistemas de cultivo, combinando y variando factores de la geometría y manejo de la parcela, como por ejemplo la intensidad y duración de los riegos (Figura 12) muy útiles para desarrollar estrategias de conservación más sostenibles y adecuadas a la realidad de cada explotación.

4. Conclusiones

El uso de sustancias con elevada susceptibilidad magnética es un enfoque innovador en el que es necesario profundizar para contrastar su uso en estudios de erosión hídrica en

diferentes tipos de suelo y resolver cuestiones no abordadas aún. Tras la caracterización de un óxido de hierro magnético (magnetita) y su posterior utilización en ensayos de erosión hídrica a diferentes escalas, y bajo condiciones de lluvia y manejo de suelo diferentes, se han obtenido prometedores resultados.

La magnetita, al fijarse fuertemente a las partículas del suelo, permite monitorizar la redistribución del suelo e identificar zonas de erosión y depósito tras eventos erosivos. Ha posibilitado la estimación de forma precisa, de pérdidas de suelo y tasas de erosión de distintas zonas dentro de los sistemas agrícolas estudiados. Proporciona información adicional sobre los procesos erosivos, útiles en la evaluación de los diferentes manejos de suelo y técnicas de control de la erosión. Su bajo coste, la sencillez de la técnica y la naturaleza no destructiva de las medidas, confieren a la magnetita características ideales para ser una herramienta muy potente, complementaria y/o sustitutiva, en la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

Agradecimientos

Los autores agradecen la realización de este trabajo al Ministerio de Ciencia e Innovación a través de los proyectos AGL2006-10927-C03-01, AGL2009-12936-C03-01, AGL2012-40128-C03-01 y fondos FEDER.

Referencias

Guzmán, G., A. Laguna, J.C. Cañasveras, H. Boulal, V. Barrón, H. Gómez-Macpherson, J.V. Giráldez y J.A. Gómez, J.A. 2015. Study of sediment movement in an irrigated maize–cotton system combining rainfall simulations, sediment tracers and soil erosion models. *J. Hydrol.*, 524: 227-242.

Guzmán, G., J.N. Quinton, M.A. Nearing, L. Mabit y J.A. Gómez. 2013. Sediment tracers in water erosion studies: current approaches and challenges. *J. Soil Sediments*, 13(4): 816-833.

Guzmán, G., K. Vanderlinden, J.V. Giráldez, J.A. Gómez. 2013. Assessment of spatial variability in water erosion rates in an olive orchard at plot scale using a magnetic iron oxide tracer. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 77(2): 350-361.

Guzmán, G., V. Barrón y J.A. Gómez. 2010. Evaluation of magnetic iron oxides as sediment tracers in water erosion experiments. *Catena*, 82(2): 126-133.

Dunlop D.J. 2012. Magnetic recording in rocks. *Phys. Today*, 65(6): 31-37.

Laguna, A. y J.V. Giráldez. 1993. The description of soil erosion through a kinematic wave model. *J. Hydrol.*, 145: 65-82.

Strohmeier, S., J. Rieder, M. Kaltenleithner, N. Demelash, G. Guzmán, F. Ziadat y A. Klik. 2015. Using magnetite tracer to evaluate a novel plot experimental design for the assessment of soil

and water conservation impacts of stone bunds in Ethiopia. Geophysical Research Abstracts Vol. 17, EGU2015-14865-1.

Zhang X.C., J.M. Friedrich, M.A. Nearing y L.D. Norton. 2001. Potential use of rare earth oxides as tracers for soil erosion and aggregation studies. Soil Sci. Soc. Am. J., 65: 1508-1515.

