

VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL EN SUELOS DE TEXTURA GRUESA BAJO CULTIVO Y HUERTA

Structural Vulnerability on Coarse Texture Soils under Crop and Orchard

Taboada-Castro, M. M.^{1‡}, Rodríguez-Blanco, M. L.¹, Taboada-Castro, M. T.¹ y Oropeza-Mota, J. L.²

RESUMEN

La desagregación del suelo por efecto del agua se origina como consecuencia de diversos mecanismos físicos y físico-químicos influenciados por el tipo de suelo, textura, porcentaje de materia orgánica y contenido hídrico, entre otros factores. En una comarca agrícola de la provincia de La Coruña (noroeste de España), cuyo suelo es franco arenoso, se seleccionaron parcelas con tres usos (cereal de invierno, maíz y huerta). Se analizó la estabilidad estructural del horizonte superficial con la finalidad de: a) identificar los mecanismos que causan la rotura de los agregados bajo los tres usos del suelo; b) evaluar el potencial de la prueba de estabilidad para predecir la sensibilidad al encostrado y a la erosión en esas parcelas, y c) caracterizar desde el punto de vista micromorfológico una costra desarrollada en un lecho de siembra (cereal de invierno). Los agregados se sometieron simultáneamente a tres tratamientos: humectación rápida (T1), desagregación mecánica por agitación tras rehumectación en etanol (T2) y humectación lenta por capilaridad (T3). El efecto de cada proceso fue evaluado mediante el diámetro medio ponderado. Los valores del DMP_{T1} , DMP_{T2} y DMP_{T3} obtenidos, indicaron que la desagregación mecánica debida al impacto de las gotas de lluvia constituye el principal mecanismo de fragmentación de los agregados, seguido por el estallido, debido a la compresión del aire ocluido durante el proceso de humectación. La textura franco arenosa induce una importante macroporosidad que podría contribuir a la reducción del estallido por acción del aire atrapado. Aun así, estos suelos son sensibles al encostrado, fenómeno influenciado por el laboreo convencional y por la acción de la lluvia

acumulada sobre el suelo desnudo o con escasa protección vegetal. Los estudios micromorfológicos de una costra sedimentaria desarrollada sobre estos suelos, revelan que está formada por una capa densa con un espesor inferior a 1 cm.

Palabras clave: *mecanismos de desagregación, textura franco-arenosa, suelos cultivados, encostrado superficial.*

SUMMARY

Soil disaggregation by the effect of water is a consequence of various physical and physical-chemical mechanisms influenced by soil type, texture, organic matter and water content, among other factors. In an agricultural district of La Coruña province (northwestern Spain), whose soil is sandy loam, plots with three soil uses (winter wheat, maize and orchard) were selected. We analyzed the structural stability of the surface layer in order to (i) identify the mechanisms that cause aggregate breakdown under the three soil uses, (ii) assess the ability of stability test for predicting crusting and erosion susceptibility in these plots, and (iii) characterize a crust developed on a seedbed (winter wheat) from a micromorphological perspective. The aggregates were subjected simultaneously to three treatments: fast wetting (T1); mechanical breakdown by stirring after pre-wetting in ethanol (T2) and slow wetting by capillarity (T3). The effect of each process was evaluated by mean weight diameter (MWD). The values resulting from MWD_{T1} , MWD_{T2} and MWD_{T3} indicate that mechanical breakdown due to rainfall impact was the main aggregate-breakdown mechanism, followed by slaking due to compression of entrapped air during wetting. The sandy loam texture induces important macroporosity, which could contribute to reduce slaking. Even so, these soils are susceptible to crusting, a phenomenon affected by conventional tillage and by the action of accumulated rainfall on bare soil or with low vegetation cover. Micromorphological studies of a sedimentary crust

¹ Universidad de A Coruña, Facultad de Ciencias. A. Zapaterira, 15071. A Coruña, España.

[‡] Autor responsable (mtaboada@udc.es)

² Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

developed on these soils reveal that this crust consists of a dense layer less than 1 cm thick.

Index words: *aggregate-breakdown mechanism, sandy-loam soils, cultivated soils, surface crusting.*

INTRODUCCIÓN

La estabilidad de los agregados es un indicador de los procesos implicados en la degradación del suelo (Six *et al.*, 2000) dado que incide sobre la infiltración, la retención de agua, la aireación y resistencia a la penetración de las raíces (Fox y Le Bissonnais, 1998; Rillig *et al.*, 2002) y la formación de sellado superficial (Moore y Singer, 1990; Gallardo-Carrera *et al.*, 2007). Además, es el parámetro que mejor se correlaciona con la erosionabilidad del suelo (Auzet *et al.*, 1995; Amézketa *et al.*, 1996).

Una estructura adecuada y una elevada estabilidad de los agregados es fundamental para mantener la productividad agrícola y reducir la contaminación ambiental derivada de la degradación del suelo por erosión. La estabilidad estructural hace referencia a la persistencia de los agregados frente a determinadas fuerzas destructivas, sean éstos factores climáticos, de presión por tráfico u otros (Kay y Angers, 2000). Está influenciada por el tipo y contenido de arcilla, los iones asociados al complejo de intercambio, los óxidos de Fe y Al, el número de contactos entre partículas, la tensión de agua y los niveles de materia orgánica (Hartge, 2000), y su persistencia en el tiempo posee efectos ambientales en la conservación del suelo y el rendimiento de los cultivos (Olson *et al.*, 1999).

El deterioro de la estructura, por lo tanto, se contempla como una forma de degradación del suelo (Chan *et al.*, 2003), y a menudo se relaciona con el uso y las prácticas de manejo. En el contexto de los suelos agrícolas, la estabilidad estructural está sujeta a alteraciones periódicas debido a las intervenciones culturales (Caravaca *et al.*, 2004; Carter, 2004). Asimismo, la lluvia en contacto con el suelo constituye uno de los principales agentes destructivos de los agregados y lo hace mediante diferentes mecanismos. Diversos autores (Emerson, 1967; Le Bissonnais, 1989; Bradford y Huang, 1996) han identificado cuatro principales: (a) disgregación por compresión del aire ocluido que origina rotura de los agregados por efecto del estallido; (b) desagregación mecánica debida al impacto de las gotas de lluvia; (c) microfisuración por hinchamiento

diferencial; y (d) dispersión por procesos fisico-químicos. Tales mecanismos están condicionados, entre otros factores, por el tipo de suelo, textura, mineralogía de las arcillas, tipo y concentración de cationes y contenido en materia orgánica (Le Bissonnais, 1996; Tisdall, 1996; Boix-Fayos *et al.*, 2001; Powers y Schlesinger, 2002). En relación con la rotura de agregados, la materia orgánica actúa de diversos modos. Por una parte, protege la superficie de los agregados del impacto de las gotas de lluvia (Sullivan, 1990), y por otra modifica las características de humectación al aumentar la hidrofobia de los agregados, disminuyendo la velocidad de avance del frente de humectación y en consecuencia reduciendo la sensibilidad al estallido (Jouany *et al.*, 1992). Además, el material orgánico del suelo interviene de modo diferente sobre los mecanismos de rotura de agregados (Le Bissonnais, 1996; Amézketa, 1999) debido a que los agregados de distintos tamaños (macroagregados > 250 μm y microagregados < 250 μm) son estabilizados por mecanismos diferentes. En algunos casos actúan agentes cementantes transitorios (raíces, hifas y polisacáridos) y en otros agentes cementantes persistentes (material húmico aromático asociado a compuestos amorfos de Fe y Al); por tanto, responden de forma diferente cuando se someten a distinto estrés (lluvia, viento, riego y otras prácticas agronómicas).

En la región de Galicia, al noroeste de España, existen diversos estudios relacionados con la estabilidad estructural; algunos de ellos, analizan el efecto de la materia orgánica, Fe y Al sobre la estabilidad de los agregados (Benito y Díaz Fierros, 1989, 1992; Arias *et al.*, 1999, Barral *et al.*, 1998). Benito y Díaz Fierros (1992) indican que la materia orgánica es el principal factor que controla la estabilidad estructural en los suelos pobres en arcilla y en óxidos de Fe y Al. Por otra parte, Taboada *et al.* (2007) analizan la intensidad de disgregación en suelos agrícolas desarrollados sobre diferente material geológico, a partir de la relación entre dos índices de estabilidad (diámetro medio ponderado (DMP) y fragmentos inferiores a 200 μm). Estos autores observaron una relación exponencial muy significativa entre ambos índices, siendo el índice "fragmentos inferiores a 200 μm " más sensible que el DMP para diferenciar entre suelos con baja estabilidad. Sin embargo, se desconocen los mecanismos que causan la rotura de los agregados y la formación de costras en suelos francos arenosos desarrollados sobre material granítico, aun cuando es reconocido que estos suelos presentan baja cohesión y son frágiles frente a la acción

de fuerzas mecánicas, características que pueden condicionar los mecanismos de desagregación.

Los objetivos de la presente investigación son: a) evaluar la importancia relativa de los mecanismos que causan la rotura de los agregados en suelos franco arenosos, con contenidos variables en materia orgánica y diferente dedicación agrícola: cultivo y huerta; b) evaluar el potencial de la prueba de estabilidad para predecir la sensibilidad al encostrado y a la erosión en esos suelos; y c) caracterizar una costra desarrollada sobre ellos desde el punto de vista micromorfológico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del Área de Estudio

Este estudio se efectuó en suelos desarrollados sobre un área granítica localizada en la provincia de La Coruña (Galicia, noroeste de España), 43° 19' N y 8° 24' W. La región se caracteriza por un clima templado húmedo, con una temperatura y precipitación media anual de 12.3 °C y 1100 mm. Las lluvias se concentran entre octubre y abril y son generalmente de moderada o baja intensidad (<10 mm h⁻¹). Los suelos se caracterizan por presentar un espesor del orden de 50 cm, coloraciones pardo oscuras causadas por la materia orgánica, pH ácido y desaturación en bases, siendo clasificados como Umbrisoles (FAO, 2006).

El área experimental se ubica dentro de una pequeña comarca agrícola, caracterizada por parcelas que en función de la rotación de cultivos a lo largo del año agrícola pueden resultar divididas en subparcelas. En este contexto, se seleccionaron nueve unidades de estudio con diferentes usos: cereal de invierno, maíz y huerta (tres unidades por uso). Estas parcelas presentan una extensión media de 0.85 ha, 1.27 ha y 0.19 ha respectivamente, con pendientes entre 1-10%. En todas ellas el sistema de laboreo es convencional. Los lechos de siembra del cereal de invierno generan superficies pulverizadas, de escasa rugosidad, firmes y con rodadas equidistantes (1.70 m) dejadas por la sembradora. Los lechos de maíz presentan mayor rugosidad y el sembrado se efectúa en hileras. En huerta, parte de las operaciones de laboreo son manuales, manteniendo la superficie cubierta con hojarasca, práctica muy común en Galicia, que impide la proliferación de malas hierbas y sirve como aporte de materia orgánica.

En cada una de las unidades de estudio se tomaron al azar cuatro muestras del horizonte superficial

(0-15 cm), y se elaboraron muestras compuestas que fueron secadas al aire. Éstas se usaron para determinar algunas propiedades del suelo, mineralogía de las arcillas y para efectuar los ensayos de estabilidad. Partiendo de que los suelos del área experimental son relativamente homogéneos, y que las principales diferencias entre ellos se derivan del uso, los datos se tratan como valores medios por cada uso del suelo. Por último, en los lechos de cereal de invierno se tomaron cuatro muestras de suelo encostrado, colectadas con cajas de Kubiena para preservar la costra y el material subyacente sin perturbar hasta la elaboración de las láminas delgadas. Estas muestras se extrajeron de zonas de entresurco, con escasa rugosidad (< 5 cm), situadas en partes llanas de la parcela. Las costras superficiales, que recubrían más del 90% de la parcela cuando se realizó el muestreo, se formaron tras un episodio lluvioso que totalizó 20 mm (duración: 15:30 h; intensidad media: 1.4 mm h⁻¹; intensidad máxima: 14.4 mm h⁻¹).

Metodología

Se llevaron a cabo los siguientes análisis de laboratorio: pH (con H₂O y KCl) por el método potenciométrico usando una relación suelo: agua 1: 2.5; bases intercambiables y capacidad de intercambio total por desplazamiento y percolación con una solución 1N de acetato amónico a pH 7; y análisis granulométrico mediante el método de la pipeta Robinson, siguiendo en todos los casos los métodos oficiales de análisis descritos por el MAPA (1994). La clasificación textural del suelo se realizó de acuerdo con los criterios de tamaño del USDA (arcilla < 2 μm, limo 2-50 μm, arena 50-2000 μm) (Soil Survey Staff, 2006). El carbono orgánico se analizó por el método de Walkley y Black (1974) y la materia orgánica (MO) se calculó multiplicando el carbono orgánico por el factor 1.724. Los minerales de la fracción arcilla se identificaron por difracción de rayos X (DRX) previa preparación de las muestras siguiendo los métodos descritos en Guitián y Carballas (1976).

La estabilidad de los agregados al agua se analizó por el método de Le Bissonnais (1996). La elección de esta metodología, a pesar de ser más laboriosa y consumir más tiempo que los métodos estándares, obedece a que al incluir tres tratamientos diferentes (humectación rápida, desagregación mecánica por agitación tras rehumectación y humectación lenta por capilaridad) ayuda a identificar los mecanismos que causan la rotura de agregados; además, permite

reproducir el comportamiento de los agregados bajo tres supuestos de condiciones hídricas en los que puede ocurrir la desagregación bajo lluvias naturales: humectación rápida de un suelo seco (ej. tormentas de verano), desagregación mecánica posterior a la rehumectación (ej. periodos invernales húmedos con lluvias persistentes) y humectación lenta por capilaridad (ej. lluvias suaves y continuas). Estos tratamientos combinan la humectación con una acción mecánica con niveles de energía variables.

Cada muestra de suelo (5 g de agregados secos comprendidos entre 3 y 5 mm) se expuso simultáneamente a los tres tratamientos, con tres repeticiones. La humectación se realizó sumergiendo directamente los agregados en agua (T1) o en etanol (T2) (para reducir el estallido y la reagregación de partículas) o bien se colocaron sobre una esponja saturada en agua, para que se humedecieran lentamente por capilaridad (T3). Posteriormente las muestras se tamizan separando la fracción < 2 mm la cual, una vez seca a 30 °C, se lleva a un granulómetro de rayos láser con el fin de conocer la distribución de tamaño de los agregados resultantes de cada tratamiento. Las clases de diámetro generadas por este equipo se reagruparon en siete intervalos: <50 µm, 50-100 µm, 100-200 µm, 200-500 µm, 500-1000 µm, 1000-2000 µm y > 2000 µm. A partir de estas clases se calcularon valores del diámetro medio ponderado (DMP) para cada tratamiento (DMP_{T1} , DMP_{T2} y DMP_{T3}) y el promedio de los tres tratamientos (DMP_{T123}). Los valores promedios de los tres tratamientos (DMP_{T123}) se usan para evaluar el potencial de esta prueba como predictor de la sensibilidad al encostrado y a la erosión de los suelos estudiados, siguiendo criterios propuestos por Le Bissonnais (1996). Este autor define intervalos de valores de DMP_{T123} a partir de los cuales establece una escala de estabilidad con cinco clases, y con base en ello, formula las condiciones bajo las cuales puede existir riesgo de encostrado y erosión. Un resumen de estos criterios se muestra en el Cuadro 1.

Por último, se elaboraron láminas delgadas cuyo proceso consistió en el secado al aire de la muestra, fijación (impregnación con resinas y endurecimiento), corte (sierra de borde de diamante), micropulido (1.4 µm) y metalización con carbono. Las láminas delgadas se observaron con microscopio electrónico de barrido. Con las imágenes proporcionadas por este equipo se reconstruyó una secuencia vertical que engloba la costra y el material subyacente. Ambas zonas fueron caracterizadas desde el punto de vista micromorfológico siguiendo la terminología de Bullock *et al.* (1985).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades del Suelo

Los resultados derivados de los análisis físicos y químicos de los suelos estudiados mostraron pocas diferencias entre ellos, excepto en lo que respecta a los contenidos de MO.

Estos suelos son ácidos, con textura moderadamente gruesa (franco-arenosa) como es habitual en suelos desarrollados sobre granito (Cuadro 2). Los suelos bajo maíz y cereal de invierno, presentan porcentajes de MO relativamente bajos (2.93 y 4.25%, respectivamente) si se comparan con los de huerta (7.88%). Estas diferencias pueden estar relacionadas con una menor remoción del suelo y con un mayor aporte de abonos orgánicos en huertas en comparación con cultivos. El contenido de MO contribuye en la formación de los agregados proporcionándoles mayor cohesión y aumentando su estabilidad más que ningún otro factor (Tisdall y Oades, 1982), de modo que *a priori* cabría esperar que la estabilidad de los agregados en el área de estudio esté influenciada por este componente.

El análisis del complejo de cambio (Cuadro 3) revela una baja capacidad de intercambio de cationes en todos los suelos, en concordancia con la escasa proporción

Cuadro 1. Intervalos de valores de diámetro medio ponderado (DMP) a partir de los cuales se establecen clases de estabilidad y se predice el riesgo de encostrado y erosión (de acuerdo con Le Bissonnais, 1996).

Prueba DMP	Clases de estabilidad	Riesgo de encostrado	Riesgo de escorrentía y erosión difusa
mm			
< 0.4	Muy inestable	Sistemático	Riesgo alto y permanente en todas las condiciones topográficas
0.4 – 0.8	Inestable	Muy frecuente	Riesgo frecuente en toda situación
0.8 – 1.3	Medianamente estable	Frecuente	Riesgo variable según la climatología y topografía
1.3 – 2.0	Estable	Ocasional	Riesgo limitado
> 2.0	Muy estable	Muy raro	Riesgo muy débil

Cuadro 2. Características físicas y químicas del horizonte superficial (0-15 cm) de las parcelas estudiadas.

Usos del suelo	pH		C	MO	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural
	H ₂ O	KCl						
	----- % -----							
Cereal de invierno	5.88	4.60	2.47	4.25	65.78	23.23	10.99	Franco-arenosa
Maíz	5.84	4.62	1.70	2.93	59.56	26.90	13.54	Franco-arenosa
Huerta	5.55	4.39	4.58	7.89	64.52	24.98	10.50	Franco-arenosa

C = carbono; MO = materia orgánica.

de arcilla que poseen (Cuadro 2), así como, con el predominio de la caolinita en su mineralogía. La mayor capacidad de intercambio de cationes (CIC) en los suelos de huerta ($15.24 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$) es reflejo de la mayor cantidad de MO existente en ellos. Los cationes de cambio apenas muestran variabilidad entre parcelas, siendo escasos en todas ellas, lo que concuerda con el pH ácido, reflejo de la naturaleza granítica de la roca y del clima húmedo al que están sometidos los suelos, el cual provoca un rápido lavado de las bases de cambio del perfil. Se trata de suelos desaturados en bases con valores del grado de saturación que oscilan entre 37.93 y 54.69%.

En relación con la arcilla, como se indicó anteriormente, tanto los suelos de cultivo como de huerta presentan valores similares en lo referente a la proporción y a la composición mineralógica. El tipo de arcilla que domina es la caolinita (> 50% del total), seguida de los interstratificados mica-vermiculita (30-50%) y de trazas de cuarzo, feldespato y gibsita. La mineralogía de la fracción arcilla de estos suelos concuerda con estudios realizados anteriormente en suelos desarrollados sobre materiales graníticos del noroeste peninsular (Calvo *et al.*, 1983).

Estabilidad de los Agregados

Los resultados del DMP para cada tratamiento individual (humectación rápida-DMP_{T1}; desagregación

mecánica, DMP_{T2}; y humectación lenta, DMP_{T3}) y el DMP promedio de los tres tratamientos (DMP_{T123}) se muestran en el Cuadro 4. La estabilidad del suelo aumenta a medida que los valores de DMP se incrementan. Los valores de DMP promedios de los tres tratamientos permiten diferenciar clases de estabilidad. El valor más elevado de DMP (1.70 mm) se obtuvo en los suelos de huerta, debido posiblemente tanto a su mayor contenido de materia orgánica como a la mayor capacidad de intercambio de cationes (Cuadro 2 y 3), parámetros que a menudo se relacionan con el incremento de la estabilidad de los agregados (Dimoyiannis *et al.*, 1998; Le Bissonnais, 1989). Otros parámetros considerados frecuentemente promotores de la agregación son las bases de cambio, concretamente el Ca y el Mg (Bronick y Lal, 2005). Sin embargo, su presencia en los suelos estudiados (Cuadro 3) es escasa, por lo que no deben de influir en la agregación.

La comparación entre tratamientos ayudó a identificar los mecanismos responsables de la pérdida de estabilidad, con base en humedecer lentamente a los agregados secos estos no estallan, y tampoco lo hacen tras la desagregación mecánica por agitación después de rehumectarlos en etanol dado que este compuesto evita el estallido. La reducción de estabilidad causada por estallido se interpreta a partir de la rotura de partículas provocada por la inmersión rápida de los agregados en agua.

Cuadro 3. Cationes de cambio y capacidad de intercambio catiónico (CIC) del horizonte superficial (0-15 cm) de las parcelas estudiadas.

Usos del suelo	Ca	Mg	Na	K	S	CIC	V
Cereal de invierno	3.70	0.49	0.08	1.20	5.47	12.06	45.36
Maíz	4.67	0.48	0.05	0.81	6.01	10.99	54.69
Huerta	4.48	0.61	0.12	0.57	5.78	15.24	37.93

V = porcentaje de saturación de bases.

Cuadro 4. Valores medios del diámetro medio ponderado (DMP) (mm) para cada tratamiento individual y DMP promedio de los tratamientos.

Usos del suelo	Humectación rápida (DMP _{T1})	Desagregación mecánica (DMP _{T2})	Humectación lenta (DMP _{T3})	Promedio tratamientos (DMT _{T123})
Cereal de invierno	0.82	0.78	1.07	0.89
Maíz	1.41	1.27	1.64	1.44
Huerta	2.09	0.77	2.23	1.70

Fuente: Taboada *et al.*, 2007.

El DMP de los tres tratamientos individualizados osciló entre 0.77 y 2.23 mm. En huerta, cuyos contenidos en MO son elevados (7.88%), después de someter los agregados a humectación lenta por capilaridad y a humectación rápida del suelo seco, se obtuvieron de DMP muy altos (2.23 y 2.09 mm, respectivamente), en tanto que el tratamiento de desagregación mecánica proporcionó valores muy bajos (0.77 mm). Un comportamiento similar se observó en las parcelas de maíz; sin embargo, en las de cereal de invierno, los valores de DMP_{T1} y DMP_{T2} fueron del mismo orden de magnitud, pero en ambos casos inferiores a los proporcionados por el tratamiento de humectación lenta (1.07 mm). En consecuencia, los valores de DMP obtenidos tanto en huerta como en cultivo, indican que la estabilidad decrece de acuerdo con la secuencia: humectación lenta > humectación rápida > desagregación mecánica. A la vista de estos resultados, la desagregación mecánica es el tratamiento para el que la inestabilidad relativa tiende a ser más elevada. Por lo tanto, en estos suelos la desagregación mecánica debida al impacto de la lluvia puede constituir el principal mecanismo de la pérdida de estabilidad. A su vez, el estallido debido a la compresión del aire ocluido también puede intervenir pero su contribución relativa en el proceso de desestabilización de estos suelos fue menor. Amézketa *et al.* (2003) señalaron que cuatro de 36 suelos, procedentes de la Cuenca del Río Ebro en España, eran muy susceptibles a la rotura mecánica, mientras que en los 32 restantes el mecanismo más desestabilizador era debido a la desagregación inducida por la humectación rápida de los agregados. Amézketa *et al.* (1996) y Zhang y Horn (2001) analizando la estabilidad de los agregados de 10 suelos californianos y nueve chinos respectivamente, encontraron que la estabilidad decrecía en el orden humectación lenta > desagregación mecánica > humectación rápida, mientras que Le Bissonnais y Arrouays (1997) encontraron el orden: desagregación mecánica > humectación lenta > humectación rápida

para 12 suelos de Francia, utilizando agregados con un diámetro inicial de 3-5 mm. Por otra parte, Boruvka *et al.* (2002), encontraron que la vulnerabilidad de los agregados a la destrucción por fuerzas mecánicas es menos dependiente de las propiedades básicas del suelo que la destrucción de agregados por humectación rápida. Legout *et al.* (2005) reportan que la desagregación mecánica por impacto de las gotas de lluvia tiene un efecto importante en suelos húmedos, mientras que el estallido juega un importante papel en los procesos de desagregación en suelos secos. Teniendo en cuenta estas consideraciones, en el área de estudio durante el otoño-invierno (periodo húmedo/siembra de cereal de invierno) la fragmentación de agregados por rotura mecánica originará un número elevado de pequeñas partículas contribuyendo a la aparición de fenómenos de encostrado. Sin embargo, durante el final de primavera-verano (periodo seco/siembra de maíz), la susceptibilidad a la formación de costra, en general, estará más reducida que en los suelos derivados de esquisto, hecho que se ha observado repetidas veces en campo.

Entre las propiedades edáficas que afectan a los mecanismos de ruptura de los agregados por acción del agua, cabe citar la textura, el porcentaje de materia orgánica y el contenido hídrico (Barral *et al.*, 1998; Truman *et al.*, 1990). La organización del espacio poroso, que resulta de las características texturales del suelo y de la interacción entre las partículas minerales y orgánicas permite explicar en parte los mecanismos de fragmentación en estos suelos, ya que cuanto mayor es la porosidad más desarrolladas están las zonas de debilidad mecánica (Paz y Guerif, 2000). Por tanto, la desagregación mecánica es el mecanismo de fragmentación que predomina en suelos con baja cohesión, debido a las débiles interacciones entre componentes de la fracción coloidal, como sería el caso de los suelos estudiados.

En relación con la MO esta puede actuar de modo diferente sobre los mecanismos de rotura de

los agregados. Por un lado, puede comportarse como un agente cementante aumentando la cohesión de los agregados (Tisdall y Oades, 1982), y por otro, puede aumentar la hidrofobia, y en consecuencia, la humectabilidad de los agregados disminuye y reduce así el estallido cuando los agregados secos se sumergen en agua (D'Acqui *et al.*, 1999). Chenu *et al.* (2000) mostraron que la MO asociada con minerales de arcilla incrementa la hidrofobia de los agregados y que el SOC puede contribuir a la estabilidad de los agregados impartiendo repelencia parcial, particularmente después de largos periodos secos. Este punto puede ser particularmente relevante a la hora de interpretar el comportamiento en los suelos de huerta. La MO podría conferirles un importante grado de hidrofobia, a juzgar por el escaso efecto del estallido manifestado por altos valores de DMP_{T1} (2.09 mm). En los suelos de Galicia, la hidrofobia puede ser temporal y sigue patrones estacionales, aumentando tras periodos de sequía (Rodríguez *et al.*, 2005). Teniendo en cuenta que el muestreo de huerta se realizó al final del periodo estival tras varios meses de sequía, parece bastante factible que hubieran ocurrido fenómenos de hidrofobia y que estos sean parcialmente responsables del comportamiento de los agregados. El hecho de que la humectación con etanol (T2) sea el tratamiento más destructivo puede deberse al efecto de la importante macroporosidad de estos suelos que en conjunción con posibles fenómenos de hidrofobia reducirían el estallido.

A continuación se analizó la distribución del tamaño de las partículas resultantes de la desintegración de los macroagregados después de la aplicación de los tres tratamientos (Figura 1). El porcentaje de agregados estables $> 2000 \mu\text{m}$ varió en función del tratamiento y del uso del suelo. Así, en huerta entre 51 y el 58% de los macroagregados se encuentran dentro de esta fracción, después de humectación rápida y lenta respectivamente, lo cual indica que ambos tratamientos son los menos

destructivos. En cereal de invierno la fracción más abundante se distribuye en la clase comprendida entre 200 y 500 μm . En general, el porcentaje de partículas $< 500 \mu\text{m}$, es elevado tras ruptura mecánica. De los tres usos del suelo estudiados, el de huerta es el que presenta una mayor susceptibilidad a la desagregación mecánica.

De acuerdo con Le Bissonnais *et al.* (1989) el desarrollo de costras está relacionado con la distribución del tamaño de partículas resultantes de la rotura de agregados y a su vez el tamaño de las partículas desintegradas determinan las propiedades físicas de las costras (porosidad e infiltración) y la transportabilidad de fragmentos.

Sensibilidad al Encostrado y a la Erosión

Algunos índices de estabilidad, entre ellos el DMP, permiten predecir bajo algunas condiciones el comportamiento de la superficie del suelo frente al encostrado y la erosión.

En el Cuadro 5 se muestran los resultados del pronóstico de sensibilidad al encostrado y a la erosión en función del grado de inestabilidad de los suelos de estudio, dado por los valores de DMP promedios (DMP_{T123}), recogidos en el Cuadro 4, a los cuales se les aplican los criterios señalados en el Cuadro 1. Le Bissonnais (1996), estableció dichos criterios para suelos de Francia con texturas franco limosas, de modo que cuando se extrapolan a otras regiones solamente permiten hacer aproximaciones del grado de inestabilidad de los agregados de un suelo determinado.

A la vista de los resultados se observa que el riesgo de encostrado del suelo puede ser frecuente u ocasional. No obstante, este pronóstico debe ser considerado solamente como una primera aproximación, puesto que la susceptibilidad a la formación de costra en estos suelos, puede aumentar o disminuir en función de factores tales como la humedad del suelo y las prácticas agrícolas.

Cuadro 5. Clases de estabilidad, susceptibilidad al encostrado y riesgo de erosión considerando el diámetro medio ponderado (DMP) de los tratamientos de humectación rápida (1), desagregación mecánica tras rehúmedación en etanol (2) y humectación lenta por capilaridad (3).

Tratamiento	† Prueba del DMP	DMP_{T123}	Clases de estabilidad	Encostrado	Escorrentía y erosión difusa
Cereal	0.8 – 1.3	0.89	Moderadamente estable	Frecuente	‡ Riesgo variable
Maíz	1.3 – 2.0	1.44	Estable	Ocasional	Riesgo limitado
Huerta	1.3 – 2.0	1.7	Estable	Ocasional	Riesgo limitado

† Intervalo de valores de DMP (media de los tres tratamientos) propuestos por Le Bissonnais (1996) a partir de los cuales se establecen las diferentes clases de estabilidad y la sensibilidad al encostrado y a la erosión. ‡ Riesgo variable: según factores climáticos y topográficos; DMP_{T123} (promedio de los tres tratamientos).

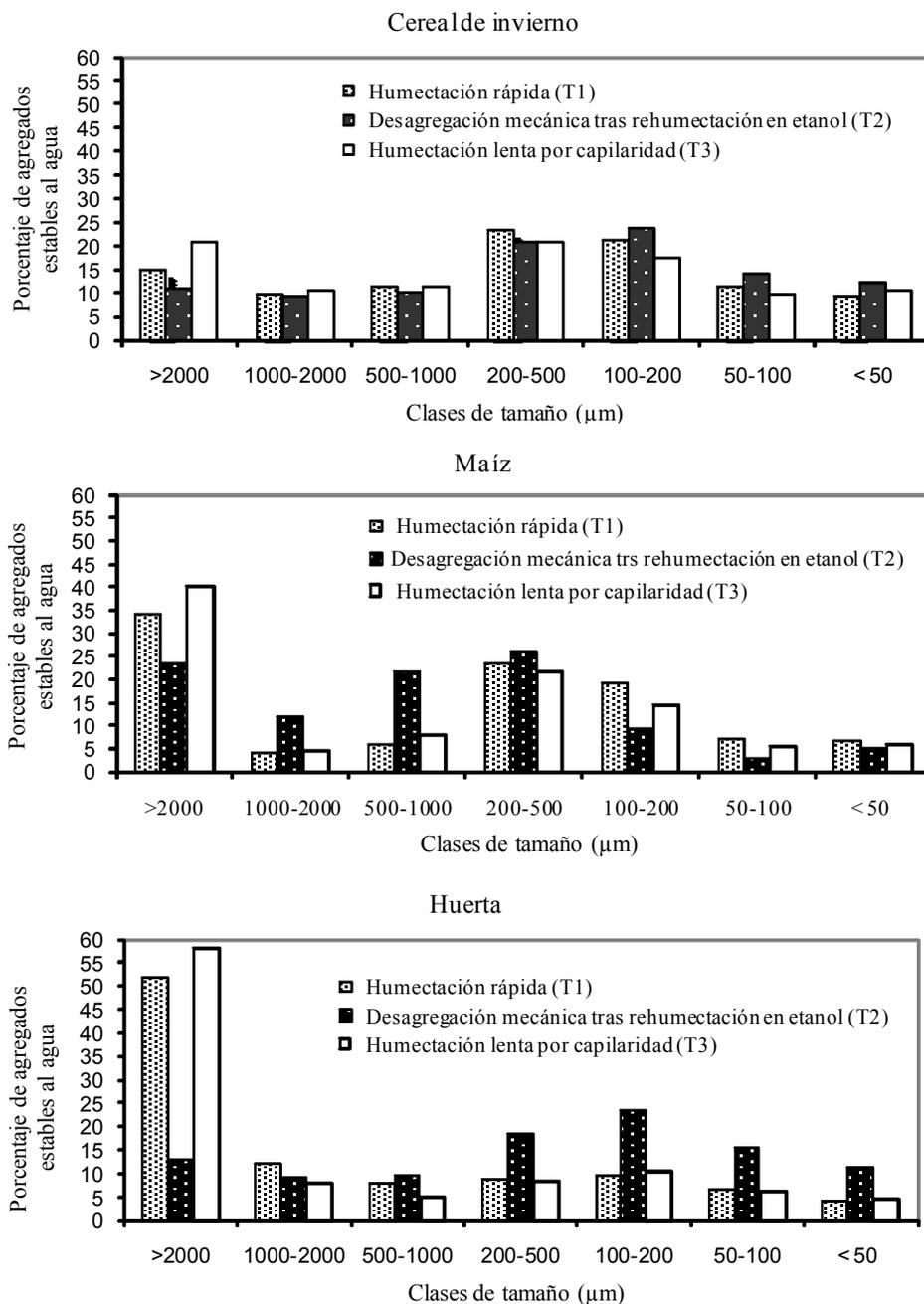


Figura 1. Distribución del tamaño de partículas (µm) resultantes de la rotura de agregados después de los tratamientos aplicados a las parcelas con cereal de invierno, maíz y huerta (clases de tamaño obtenidas a partir de la media de tres repeticiones).

En este sentido, este tipo de suelos cuando están húmedos son más susceptibles a formar costra que cuando están secos, circunstancia que podría favorecer el desarrollo de este fenómeno durante el otoño (siembra de cereal) frente a la época de primavera (siembra de maíz con suelo seco). A su vez, prácticas agrícolas que generen lechos de baja rugosidad superficial (típica modalidad de siembra del cereal en la zona de estudio)

fomentaran el desarrollo de costra frente a los lechos gruesos. Asimismo, los cultivos sembrados en hileras y de crecimiento lento (ej. maíz) mantienen un mayor porcentaje de superficie desnuda y durante más tiempo que los cultivos sembrados a voleo y de rápido crecimiento (ej. cereal de invierno), de modo que esas superficies parcialmente desnudas quedan vulnerables a la acción de la lluvia durante largos periodos.

Así pues, la sensibilidad al encostrado superficial puede variar con respecto a lo que sugieren los datos presentados en el Cuadro 5. En cuanto a la generación de escorrentía y erosión, los datos sugieren que el riesgo es variable en función de factores climáticos y topográficos en las parcelas de cereal, en tanto que, en maíz y huerta este riesgo es limitado. Observaciones de campo confirman que en huerta el “acolchado” aplicado sobre la superficie impide la formación de escorrentía y erosión, y en las parcelas de maíz la prueba subestima estos fenómenos. Los suelos de Galicia de textura franco arenosa desarrollados sobre granito presentan menor erosionabilidad que los de textura franca y franco limosa desarrollados sobre esquistos (Benito y Díaz-Fierros, 1989; Díaz-Fierros y Benito, 1991). Al considerar la erosionabilidad del suelo, y de acuerdo con Le Bissonnais (1996), habría que distinguir entre erosión de tipo hortoniano, en superficies en las que se desarrolla costra y no hortoniano, en las que no se reduce tan drásticamente la capacidad de infiltración del suelo. Obviamente, en el segundo caso los índices de estabilidad como el DMP, no predicen adecuadamente la erosionabilidad, ya que los agregados o fragmentos de grandes dimensiones también son transportados por el agua de escorrentía. En estas condiciones, las características del suelo prácticamente no intervienen en la intensidad de la erosión.

Micromorfología de Costras Superficiales

Las superficies labradas quedan expuestas a la acción de la lluvia y por tanto a procesos que incluyen rotura de agregados y reorganización de pequeñas partículas desprendidas que dan lugar a la formación de costras. En la Figura 2 se muestran microfotografías resultantes de la observación de una sección vertical

de un suelo encostrado a través de un microscopio electrónico de barrido. Se distinguen dos zonas: (a) una capa densa y continua en la superficie, que constituye la costra sedimentaria y (b) otra capa situada por debajo de esta que corresponde al material subyacente o suelo inalterado.

La costra consta esencialmente de masa basal constituida por partículas minerales gruesas (límite grueso/fino: 10 μm ; proporción 85:15) las cuales tienden a disponerse superpuestas unas a otras. El tamaño de las partículas corresponde básicamente a arena fina y limo; la arena gruesa en esta sección de la costra es relativamente poco abundante. La porosidad es escasa (5%), con poros de dimensiones inferiores a 25 μm y poros comunicantes muy finos, de modo que el material grueso ensamblado origina una estructura prácticamente impermeable. Esta costra de 1 cm de espesor, está formada por una sola capa y no por múltiples capas (como consecuencia de la acción de diferentes episodios de lluvia) como es habitual dentro del patrón general de formación de costras sedimentarias (Valentín y Bresson, 1992). Esta única capa sugiere que su formación tuvo lugar durante el episodio de lluvia, descrito en párrafos anteriores.

En relación al material subyacente (límite grueso/fino: 10 μm ; proporción 40:60), se observó la presencia de componentes minerales gruesos inmersos en la micromasa. La abundancia de micromasa en esta zona en contraposición a la escasez observada en la costra, sugiere un desplazamiento de las partículas más finas hacia niveles más profundos, hecho observado también por Valentín (1986) en suelos de textura arenosa sometidos al impacto de las gotas de lluvia. Contrariamente a la capa encostrada, el material subyacente presenta una notable porosidad (37%), relacionada con la baja cohesión de este tipo de suelos

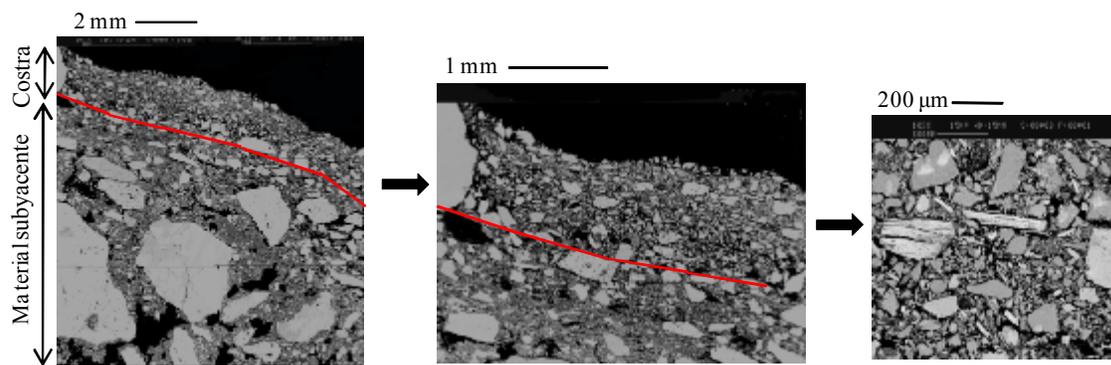


Figura 2. Microfotografías de la sección de una costra sedimentaria y del material subyacente, tomadas con el microscopio de barrido.

desarrollados sobre granito. La presencia de gravas y arena gruesa (3 y 4 mm) es frecuente tal como se refleja en la microfotografía (Figura 2a). Datos correspondientes al análisis de una muestra puntual de suelo procedente de esta parcela indican que las gravas son más abundantes que la arena gruesa (33 y 24% respectivamente).

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio muestran que bajo lluvias naturales, la desagregación del horizonte superficial de los suelos de textura gruesa está más relacionada con la acción mecánica provocada por el impacto de las gotas de lluvia que con el estallido. Estos suelos son susceptibles al desarrollo de costras superficiales si bien este fenómeno está condicionado en buena medida por la humedad del suelo y las prácticas agrícolas. Estas costras se caracterizan por su escaso espesor (alrededor de 1 cm) y reducida porosidad (5%). La mayor presencia de micromasa en el material subyacente podría interpretarse como un desplazamiento de las partículas más finas hacia niveles más profundos.

LITERATURA CITADA

- Amézketa, E. 1999. Soil aggregate stability: a review. *J. Sust. Agric.* 14: 83-151.
- Amézketa, E., M. J. Singer, and Y. Le Bissonnais. 1996. Testing a new procedure for measuring water-stable aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 888-894.
- Amézketa, E., R. Aragüés, R. Carranza, and B. Urgel. 2003. Macro- and micro-aggregate stability of soils determined by a combination of wet-sieving and laser-ray diffraction. *Spanish J. Agric. Res.* 1: 83-94.
- Arias, M., M. T. Barral, and F. Díaz-Fierros. 1999. Effects of organic matter, iron and aluminium on soil structural stability. pp. 79-87. *In: J. Berthelin, P. M. Huang, J. M. Bollag, and F. Andreux (eds.). Effect of mineral-organic microorganisms interactions on soil and freshwater environments. Kluwer Academic-Plenum Press. New York, NY, USA.*
- Auzet, A. V., J. Boiffin, and B. Ludwig. 1995. Concentrated flow erosion in cultivated catchments: influence of soil surface state. *Earth Surf. Processes Landforms* 20: 759-767.
- Barral, M. T., M. Arias, and J. Guérif. 1998. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. *Soil Tillage Res.* 46: 261-272.
- Benito, E. and F. Díaz-Fierros. 1992. Effects of cropping on the structural stability of soils rich in organic matter. *Soil Tillage Res.* 23: 153-61.
- Benito, E. y F. Díaz-Fierros. 1989. Estudio de los principales factores que intervienen en la estabilidad estructural de los suelos de Galicia. *Anal. Edafol. Agrobiol.* 48: 229-253.
- Boix-Fayos, C., A. Calvo-Cases, A. C. Imeson, and M. D. Soriano-Soto. 2001. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size stability as land degradation indicators. *Catena* 44: 47-67.
- Boruvka, L., M. Valla., H. Donátová, and K. Nêmeček. 2002. Vulnerability of soil aggregates in relation to soil properties. *Rostlinná Výroba* 48: 329-334.
- Bradford, J. M. and C. Huang. 1996. Splash and detachment by waterdrops. pp 64-76. *In: Agassi, M. (ed.). Soil erosion, conservation and rehabilitation. New York, NY, USA.*
- Bronick, C. J. and R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124: 3-22
- Bullock, P., N. Fedoroff, A. Jongerius, G. Stoops and T. Tursina. 1985. *Handbook for Soil Thin Section Description.* Waite Research Publications, Albrighton, England.
- Calvo, R., E. García-Rodeja, and F. Macías. 1983. Mineralogical variability in weathering microsystems of a granitic outcrop of Galicia (Spain). *Catena* 10: 225-236.
- Caravaca, F., A. Lax., and Albadalejo. 2004. Aggregate stability and carbon characteristics of particle-size fractions in cultivated and forested soils of semiarid Spain. *Soil Tillage Res.* 78: 83-90.
- Carter, M. R. 2004. Researching structural complexity in agricultural soils. *Soil Tillage Res.* 79: 1-6.
- Chan, K. Y., D. P. Heenan, and H. B. So. 2003. Sequestration of carbon and changes in soil quality under conservation tillage on light-textured soils in Australia: a review. *Aust. J. Exp. Agric.* 43: 325-334.
- Chenu, C., Y. Le Bissonnais, and D. Arrouays. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1479-1486.
- D'Acqui L. P., G. J. Churchman, L. J. Janik, G. G. Ristori, and D. A. Weissmann. 1999. Effect of organic matter removal by low-temperature ashing on dispersion of undisturbed aggregates from a tropical crusting soil. *Geoderma* 93: 311-324.
- Díaz-Fierros V., F. y E. Benito R. 1991. Material geológico y erosionabilidad en Galicia. *Revista Academia Gallega de Ciencias* 10: 126-143.
- Dimoyiannis, D. G., C. D. Tsadilas, and S. Valmis. 1998. Factors affecting aggregate instability of Greek agricultural soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29: 1239-1251.
- Emerson, W. 1967. A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Aust. J. Soil Res.* 5: 47-57.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2006. World reference base for soil resources 2006. *World Soil Resources Report.* N° 103. FAO, Roma, Italy.
- Fox, D. M. and Y. Le Bissonnais. 1998. A process-based analysis of the influence of aggregate stability on surface crusting, infiltration and interrill erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 717-724.
- Gallardo-Carrera, A., J. Léonard, Y. Duval, and C. Dürr. 2007. Effects of seedbed structure and water content at sowing on the development of soil surface crusting under rainfall. *Soil Tillage Res.* 95: 207-217.
- Gutián, F. y T. Carballas. 1976. *Técnicas de análisis de suelos.* Pico Sacro. Santiago de Compostela, España.
- Hartge, K. H. 2000. The effect of soil deformation on physical soil properties. A discourse on the common background. pp.32-43. *In: Horn, R., J. J. H. van den Akker, and J. Arvidsson (eds.). Subsoil compaction. Distribution, processes and consequences. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany.*

- Jouany, C., C. Chenu y P. Chassin. 1992. Determination de la mobilité des constituants du sol à partir de mesure d'angles de contacts: revue bibliographique. *Science du Sol* 30: 33 - 47.
- Kay, B. D. and D. A. Angers. 2000. Soil structure. pp. 229-276. *In*: Sumner, M. (ed.). *Handbook of Soil Science*. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Le Bissonnais, Y. 1989. Analyse des processus de microfissuration des agrégats à l'humectation. *Science du Sol* 27: 187-199.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 425-437.
- Le Bissonnais, Y. and D. Arrouays. 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *Eur. J. Soil Sci.* 48: 39-48.
- Legout, C., S. Leguédais, and Y. Le Bissonnais. 2005. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements. *Eur. J. Soil Sci.* 56: 225-237.
- MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). 1994. *Métodos oficiales de análisis*. Tomo III. Madrid, España.
- Moore, D. C. and M. J. Singer. 1990. Crust formation effects on soil erosion processes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1117-1123.
- Olsen, K. R., D. L. Mokma, R. Lal, T.E. Schumacher, and M. J. Lindstrom. 1999. Erosion impacts on crop yield for selected soils of the north central United States. pp. 259-283. *In*: R. Lal. (ed.). *Soil quality and soil erosion*. Soil and Water Conservation Society. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Paz, A. and J. Guerif. 2000. Influence of initial packing density, water content and load applied during compaction on tensile strength of dry soil structural units. pp. 55-63. *In*: R. Horn, J. J. H. van den Akker, and J. Arvidsson (eds.). *Subsoil compaction: distribution, processes and consequences*. *Advances in GeoEcology* 32. CATENA supplements. Reiskirchen, Germany.
- Powers, J. S. and W. H. Schlesinger. 2002. Relationships among soil carbon distributions and biophysical factors at nested spatial scales in rain forest of northeastern Costa Rica. *Geoderma* 109: 165-190.
- Rillig, M. C., S. F. Wright, and V. T. Eviner. 2002. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species. *Plant Soil* 238: 325-333.
- Rodríguez-Alleres, M. E. Benito y E. de Blas. 2005. Implicaciones de la repelencia al agua del suelo en la generación de escorrentía y en la erosión en un área quemada del NW de España. pp. 165-168. *In*: F. J. Samper Calvete y A. P. González. *Estudios de la Zona no Saturada del Suelo*. La Coruña, España.
- Six, J., E. T. Elliot, and K. Paustian. 2000. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1042-1049.
- Soil Survey Staff. 2006. *Keys to Soil Taxonomy*, 10th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, USA.
- Sullivan, L. A. 1990. Soil organic matter, air encapsulation and water stable aggregation. *J. Soil Sci.* 41: 529-534.
- Taboada-Castro, M. M., M. L. Rodríguez-Blanco y M. T. Taboada Castro. 2007. Relación entre dos índices de estabilidad estructural aplicados a suelos agrícolas. pp. 119-127. *In*: N. Bellinfante y A. Jordán (eds.). *Tendencias actuales de la Ciencia del Suelo*. Sevilla, España.
- Tisdall, J. M. 1996. Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter. pp. 57-96. *In*: M. R. Carter and B. A. Stewart (eds.). *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Tisdall, J. M. and J. M. Oades. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- Truman, C. C., J. M. Bradford, and F. E. Ferris. 1990. Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1385-1392.
- Valentin, C. 1986. Surface crusting of arid sandy soils. *In*: F. Callebaut, D. Gabriels, M. De Boodt (eds.). *Assessment of soil surface sealing and crusting*. Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation. Ghent, Belgium.
- Valentin, C. and L. M. Bresson. 1992. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma* 55: 225-245.
- Walkley, A. and I. A. Black. 1934. A critical examination of rapid method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-37.
- Walkley, A. and I. A. Black. 1974. A critical examination of rapid method for determining organic carbon in soils. *Development in Geochemical Engineering*, 73. Elsevier. London.
- Zhang, B. and R. Horn. 2001. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China. *Geoderma* 99: 123-145.