

CONDICIONES DE FORMACIÓN DE LA ESCORRENTÍA EN SUELOS DE CULTIVO

*Taboada Castro, M^a Mercedes (1); Paz González, Antonio (1)
y Valcárcel Armesto, Montserrat (2)*

*Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña. A Zapateira. 15.071. A Coruña
EPS Lugo. Universidad de Santiago de Compostela. Campus Universitario. 27.002. Lugo.*

SUMMARY

Conditions affecting runoff formation on cultivated soils

This study aimed at determining which factors influence the frequency of runoff from agricultural lands. Agricultural fields both, left bare after cultivation and cropped with maize were monitored during a spring and a summer period. For each field, the time evolution of surface soil crusting was evaluated and the existence and extent of runoff was observed. In addition specific agricultural practices used in each field were surveyed. Sheet runoff was a general feature; concentrated runoff both, routed along agricultural features, such as tracks of wheels and cultivation equipment, and following topographic traits was also observed. The soil crusting kinetics depends on factors such as soil composition and initial surface roughness. Aggregates breakdown is the primary mechanism leading to surface crusting, producing also small particles that are easy transported. These results indicate the complexity of the runoff processes and the interaction between soil properties, agricultural practices and climate.

Key words: Soil crusting, runoff, sustainable agriculture, farming system, diffuse pollution.

RESUMEN

Este estudio analiza los factores que influyen en la frecuencia de la escorrentía en los terrenos agrícolas. Durante un período de primavera y verano se efectuó el seguimiento del estado de la superficie del suelo en parcelas agrícolas, algunas de las cuales fueron labradas pero dejadas a barbecho, y otras dedicadas a maíz. En cada parcela se estudió la evolución a lo largo del tiempo de la formación de costra superficial, se observó la presencia de escorrentía y se evaluó la magnitud de la misma. También se llevó a cabo una encuesta para conocer las labores agrícolas habituales en cada parcela. Se pudo observar la presencia generalizada de erosión difusa; también se apreció erosión concentrada, originada tanto a favor de rodadas y otras huellas de los aperos agrícolas como de atributos topográficos. La cinética de formación de costras depende de factores como la composición del suelo y la rugosidad inicial de la superficie. El principal mecanismo de encostrado es la desagregación, lo que también origina partículas de pequeño tamaño que pueden ser transportadas fácilmente. Se pone en evidencia la complejidad de los procesos erosivos y la interacción entre factores como las propiedades del suelo, el manejo de la explotación agrícola y el clima.

Palabras clave: Costra superficial, escorrentía, agricultura sostenible, sistema agrario, contaminación difusa.

INTRODUCCIÓN

En los horizontes superficiales de los suelos agrícolas, la estructura natural está sometida a constantes modificaciones por efecto del laboreo, lo que puede originar la fragmentación de determinados elementos estructurales y la compactación de otros. Por otra parte, muchos suelos de cultivo pueden constituir un medio sensible a la degradación, de tal modo que a partir de un lecho de siembra fragmentado y permeable se desarrolla bajo el impacto de las gotas de lluvia una costra superficial que reduce enormemente la infiltrabilidad.

La estabilidad de la estructura puede definirse como la capacidad del suelo para mantener la arquitectura de la fracción sólida y el espacio poroso, cuando se somete a la acción de fuerzas de intensidad dada. Esta propiedad de la estructura, la persistencia a una escala de tiempo como el período vegetativo o el año natural, se concibe según una doble vertiente: resistencia de los agregados a la acción del agua o a la deformación por acción de esfuerzos mecánicos externos.

La desagregación de la estructura del suelo a corto término puede ser consecuencia tanto de la dinámica natural, cuando confluyen determinadas condiciones particulares, como de la intervención del hombre. En efecto, la revisión bibliográfica permite constatar que el comportamiento global de las capas superficiales del suelo bajo la acción del agua de lluvia viene determinada por un conjunto de mecanismos de desagregación interrelacionados entre sí (HENIN et MONNIER, 1956). En general, la degradación de la capa superficial ha sido poco estudiada, mientras que la formación de costra, antes de que se desarrolle una cubierta vegetal protectora frente a la acción de la lluvia, ha merecido más atención (MUALEM et al., 1990).

Factores de los que depende la degradación

La dinámica natural de la estructura está considerada como uno de los procesos más complejos, debido al número, la diversidad e interdependencia de los factores que la condicionan. Dado que esta dinámica no se puede describir de un modo global, se suelen analizar los principales mecanismos de los que depende la misma; por tanto, la noción de estabilidad estructural de un suelo permite apreciar de modo cualitativo su sensibilidad a la acción de los agentes de desagregación, en concreto del agua.

Actualmente, se tiende a considerar la deformación de la estructura del suelo como un proceso básico que puede ser originado por causas diferentes. En efecto, se aprecia

que determinadas manifestaciones de la degradación son comunes al análisis de fenómenos como la erosión hídrica, la densificación del horizonte de laboreo (hardsetting, prise en masse) y la formación de costra superficial. Por ello, la prevención de cualquier proceso de deformación del suelo pasa, obligatoriamente, por la conservación de una estructura estable.

Los procesos elementales de degradación de la estructura incluyen el desprendimiento inicial de partículas, lo que puede motivar la formación de una costra superficial de poco espesor y muy compacta, o el aumento de densidad y la pérdida de porosidad del conjunto del horizonte superficial, por colapso de la superficie del suelo. De un modo simplificado, las principales modificaciones físicas inducidas por degradación del suelo durante la erosión son:

- La disminución de la estabilidad estructural, lo que provoca un incremento de la susceptibilidad al desprendimiento de las partículas elementales.
- La reducción, o incluso la pérdida de permeabilidad.
- La disminución de rugosidad en superficie y, en consecuencia, de la capacidad del microrrelieve para almacenar agua temporalmente.

La liberación o desprendimiento de fragmentos de tierra y partículas elementales puede ser el resultado de distintos mecanismos:

- 1) Desagregación, debido a la compresión provocada por el aire atrapado durante la humectación de unidades estructurales secas.
- 2) Desprendimiento, provocado por la energía cinética debida a la lluvia.
- 3) Microfisuración, durante los procesos de contracción y expansión.
- 4) Dispersión, originada por procesos de naturaleza física y química.

La importancia relativa de cada uno de estos mecanismos, depende del contenido hídrico inicial (VALENTIN and BRESSON, 1992) y composición del suelo (LE BISSONNAIS, 1988), por lo que la distribución de tamaño de las partículas liberadas puede ser muy variable.

Independientemente del mecanismo de degradación, las partículas y fragmentos desprendidos provocan la disminución del espacio poroso entre los agregados y terrones, como han puesto en evidencia numerosos autores en experiencias de campo y laboratorio (CERNUDA et al., 1954; HENIN et MONNIER, 1956; GOVERS and POESEN, 1988; SLATTERY and BRYAN, 1992; FIÈS et PANINI, 1995; FIÈS et CASTELAO, 1996).

Un estado inicial seco de la superficie, favorece el estallido de los agregados (BRESSION and CADOT, 1992) y pueden ocasionar cierta acumulación rápida de fragmentos. Por contra, si los agregados están inicialmente saturados, la desagregación ocurre progresivamente como consecuencia del impacto de las gotas de lluvia, lo que determina la liberación de partículas finas que colmatan el espacio interagregados formando una costra de iluviación (LE BISSONNAIS et al., 1989, 1995; LE BISSONNAIS, 1996).

Las fuerzas que se desarrollan como consecuencia de la compresión de la atmósfera interna de los agregados por los meniscos del agua que entra en los poros son tanto más importantes cuanto mayor es el volumen del aire atrapado y, por consiguiente, cuanto mayor es el volumen del fragmento. El desmoronamiento por estallido se produce si la presión del aire atrapado es más elevada que la resistencia a la tracción del agregado.

En los suelos húmedos, si la superficie no está protegida, el impacto de la gota de lluvia se considera la causa más importante de desprendimiento de partículas. En efecto, la energía cinética de las gotas de lluvia origina localmente un esfuerzo cortante elevado que provoca la separación de fragmentos y de partículas individuales o el colapso de la estructura (GOVERS and POESEN, 1988).

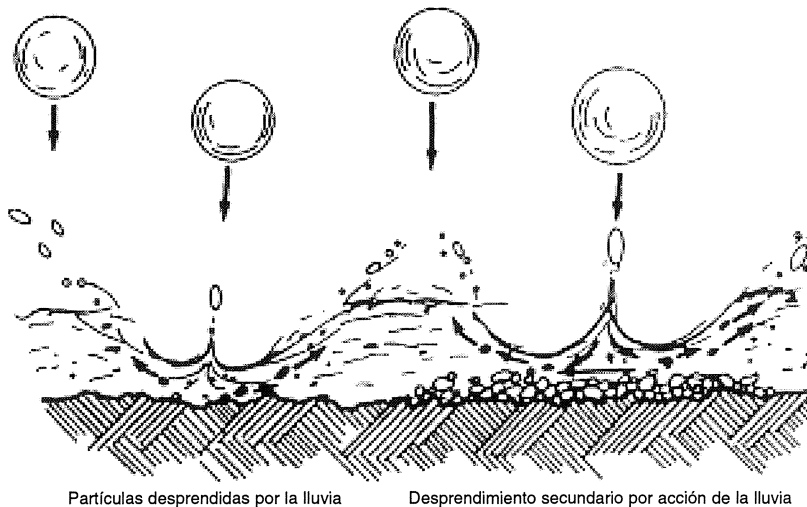


Figura 1. Desagregación en un suelo húmedo (Rose, 1993).

Mientras ocurre este proceso las partículas elementales separadas de la superficie pueden permanecer en suspensión en el seno de la débil lámina de agua que la recubre o bien ser movilizadas por salpicadura (fig. 1).

Tanto las partículas en suspensión como las desprendidas por salpicadura se depositan en las zonas más bajas del microrrelieve, originando una capa de material con cohesión muy baja. Estas partículas depositadas en los primeros estadios pueden ser movilizadas otra vez por impacto de nuevas gotas de lluvia volviendo a formar parte de una suspensión (PROFFITT and ROSE, 1991; ROSE, 1993), proceso que se denomina removilización.

Para una energía cinética dada, el desprendimiento de partículas previamente sedimentadas, es más intensa que el desprendimiento de nuevas partículas. Ello es debido a la baja cohesión de las partículas que ya sufrieron un primer proceso de sedimentación. En efecto, el tiempo que transcurre entre la deposición inicial y la nueva fase de movilización no es suficiente para que se puedan formar uniones estables entre las partículas elementales.

La disminución de la cohesión de las unidades estructurales a escala microscópica (dominios y clusters) y la modificación más o menos acentuada de la organización de las arcillas puede llegar a originar fenómenos de dispersión en condiciones extremas de inestabilidad.

Relación con las propiedades físicas, mecánicas e hídricas

Las propiedades del suelo de las que depende en mayor medida la susceptibilidad a la degradación del mismo pueden agruparse en tres categorías:

- 1) La aptitud para asimilar agua de lluvia por infiltración, y por lo tanto impedir o limitar su acumulación en superficie.
- 2) La capacidad para almacenar agua en las irregularidades del microrrelieve, y por lo tanto, prevenir la formación de escurrentía.
- 3) La estabilidad estructural, y por lo tanto la susceptibilidad que presenta el suelo al desprendimiento de partículas, fenómeno que comienza a ser importante cuando el esfuerzo cortante alcanza una magnitud suficientemente baja para que se inicie flujo por incisión.

De hecho, el esquema anterior es una visión simplificada de la realidad, ya que, por ejemplo, la resistencia mecánica del suelo también afecta a la desagregación en los primeros centímetros de la superficie y por lo tanto a la aptitud del suelo para asimilar y almacenar agua. El microrrelieve de la superficie, asimismo, afecta a la energía cinética por unidad de área, como consecuencia del impacto de las gotas de lluvia y por lo tanto influye en la degradación de la estructura.

En todo caso, el microrrelieve de la superficie del suelo suele analizarse bajo dos aspectos: como un índice que permite caracterizar adecuadamente la estructura de la misma, y como un factor importante en relación con el origen de la erosión hídrica, debido a la presencia de microdepressiones a favor de las que se acumula el agua de lluvia (DEXTER, 1977).

El parámetro utilizado habitualmente para evaluar cuantitativamente el relieve del suelo es la *rugosidad superficial*, término que fue utilizado ya por KUIPERS (1957). El microrrelieve se origina fundamentalmente durante las labores agrícolas y posteriormente tiende a degradarse por acción de los factores climáticos, fundamentalmente la lluvia. Los diversos métodos actuales de evaluación de la rugosidad del suelo se basan en la obtención de índices a partir de medidas puntuales a lo largo de transectos .

La evolución de la superficie del suelo es extremadamente compleja y en ella intervienen numerosos procesos determinados por las características del agua de lluvia, las propiedades físicas, mecánicas e hídricas del suelo y factores de sitio como el porcentaje de cobertura por la vegetación y la historia previa de la evolución de la superficie. En la última década se puso en evidencia que un número importante de suelos puede desarrollar una capa o nivel de permeabilidad reducida que evoluciona hacia una costra (SUMMER and STEWART, 1992) o hacia la densificación del horizonte superficial (MUALEN *et al.*, 1990; MULLINS *et al.*, 1990, 1992). Este proceso ha sido ampliamente estudiado para suelos con agregados bien desarrollados (FARRES, 1985; LE BISSONNAIS *et al.*, 1989, 1990; BRESSON and BOIFFIN, 1990; BRESSON and CADOT, 1992; TANAKA *et al.*, 1992; SHAINBERG *et al.*, 1992; SLATTERY and BRYAN, 1994), de texturas medias: limosas, francas y franco-limosas. Los mecanismos de formación de un horizonte con permeabilidad restringida también han sido estudiados en suelos con textura gruesa, arenosos y franco-arenosos (VALENTIN and BRESSON, 1992; BIELDERS and BAVEYE, 1995).

Actualmente se admite que, en los tipos de suelos antes mencionados, se desarrolla un primer estadio caracterizado por la costra inicial (WEST et al., 1992). En los suelos de texturas gruesas este estadio presenta una importancia particular ya que la reducción de permeabilidad es tan importante que motiva el inicio de la escorrentía y por lo tanto de la erosión. Posteriormente, puede apreciarse o no, dependiendo del tipo de suelo, la costra de deposición cuya modificación viene motivada en gran parte por la escorrentía y transporte de sedimento desde las zonas más altas del relieve hasta las microdepresiones (VALENTIN and BRESSON, 1992).

Se aprecia, una vez más, la complejidad de los procesos de degradación de la estructura y la interrelación entre ellos. Hay que destacar también que durante un único episodio de precipitación el valor de las variables que caracterizan el estado de degradación se puede ir modificando, sobre todo, cuando se desarrolla una costra; en este caso, en un intervalo breve de tiempo disminuye la infiltración, aumenta la escorrentía (FARRELL and LARSON, 1972), disminuye la cantidad de suelo desprendido (McINTYRE, 1958) y aumenta la resistencia a la tracción (SHARMA and AGRAWAL, 1980).

La modificación de la composición granulométrica inicial resulta del desprendimiento preferencial de partículas finas y depende también de la velocidad de sedimentación de las mismas, de modo que las más finas se depositan más lentamente recubriendo la superficie. Durante esta etapa, también se aprecia con frecuencia cierta diferenciación textural en las proximidades de la superficie del suelo.

Por ello, se puede considerar que la manifestación más evidente de la degradación del estado estructural es una diferenciación vertical en los primeros centímetros de la superficie del suelo (BOIFFIN, 1984, 1985). Así, independientemente de las condiciones climáticas y el tipo de suelo, a partir de un estado fragmentario inicial, se aprecian distintos estadios de evolución posteriores con la consecuente formación de costras.

La descripción morfológica de la evolución de la superficie ha sido puesta a punto por BOIFFIN (1984) y modificada posteriormente por este autor y su grupo de trabajo. Se trata de observar el conjunto de modificaciones que acompaña a la formación de una costra superficial y a la desagregación, de acuerdo con los criterios presentados más adelante.

Este estudio se centra en el análisis de la evolución de las características morfológicas de la superficie del suelo a partir de datos semicuantitativos obtenidos en ensayos de campo. Se describieron los sucesivos estadios de evolución de la superficie del suelo y se relacionaron con la precipitación acumulada desde el estado inicial fragmentado.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se seleccionaron parcelas agrícolas, pertenecientes al Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo, ubicado en San Tirso de Mabegondo (A Coruña). El área estudiada ocupa una posición topográfica de pendiente suavemente inclinada, perteneciente a la clase 2 (FAO, 1977) y su altitud está comprendida entre 125 y 135 m.

Ensayos de evolución de la superficie del suelo

La denominación, dedicación agrícola y tipo de superficie inicial de las parcelas estudiadas se consigna en la tabla 1.

Las tres primeras superficies consideradas (parcelas nº 1, 2 y 3, y código Ma 1, Ma 2 y Ma 3) se prepararon mediante labores de fresa, de modo que su superficie presentaba características similares a las de un lecho de siembra, pero quedaron a barbecho. Las diferencias iniciales de microrrelieve se deben al número de veces que fué fresada la superficie. El principal motivo originado por las labores agrícolas, son surcos de fresa que se encuentran espaciados de forma regular cada 1.80 m. En Ma 1 y Ma 2, la superficie inicial se logró mediante fresado en dirección perpendicular a la máxima pendiente; por contra, en Ma 3 los surcos de fresa discurrían en dirección perpendicular a la de máxima pendiente.

Nº Parcela	Código	Dedicación	Rugosidad inicial
1	Ma 1	Sin cultivo	Fina
2	Ma 2	Sin cultivo	Gruesa
3	Ma 3	Sin cultivo	Intermedia
4	Ma 12	Maíz	Cultivo convencional
5	Ma 13	Maíz	Cultivo convencional
6	Ma 14	Maíz	Cultivo convencional
7	Ma 15	Maíz	Cultivo convencional
8	Ma 17	Maíz	Cultivo convencional

Tabla 1. Identificación y características de las parcelas estudiadas.

En las parcelas Ma 1 y Ma 2 la descripción de la superficie se inició el día 10 de Marzo de 1997; Ma 3 se labró el 15 de Mayo de 1997 y se describió desde el mismo día. El período estudiado fue el comprendido entre los meses de Marzo a Julio de 1997 en Ma 1 y Ma 2 y entre Junio a Agosto del mismo año en Ma 3; en estas parcelas se realizaron 11, 12 y 8 descripciones, respectivamente.

Con el tiempo estas parcelas se cubrieron de malas hierbas, por lo que se midió la altura y se estimó el porcentaje de cubierta vegetal de las mismas. El ensayo finalizó cuando las malas hierbas cubrieron totalmente la superficie del suelo.

Las cinco parcelas restantes (n° 4, 5, 6, 7, 8, código Ma 12, Ma 13, Ma 14, Ma 15 y Ma 17) se cultivaron con maíz mediante técnicas convencionales. Estas técnicas incluyen labores previas a la siembra (arado, abonado, gradeado y siembra) y posteriores a la misma (aplicación mecánica de herbicida y, en ocasiones, labores de rotura de la costra desarrollada durante la fase de implantación). Como consecuencia, las principales características del microrrelieve de la superficie inicial de cultivo vienen determinadas por la presencia de un sistema regular de hileras de maíz cada 80 cm, surcos de fresa cada 1,60 m y, en aquellas parcelas en que se aplicó herbicida, rodadas de tractor también cada 1,60 m. La evolución del suelo en estas parcelas se estudió durante el ciclo vegetativo de un cultivo de maíz.

En las parcelas Ma 12 y Ma 13, las hileras de maíz y las rodadas eran paralelas. Sin embargo, estas estructuras del microrrelieve, de origen agrario, siguen la dirección perpendicular a la pendiente máxima en Ma 12, mientras que en la parcela de código Ma 13 siguen la dirección de máxima pendiente.

En la parcela Ma 15, la evolución de la superficie se describió tomando como referencia tres estados iniciales, ya que la superficie fue removida dos veces después de la siembra. En efecto, como consecuencia de una fuerte tormenta (26-5-97) se formó un gran surco, debido en buena parte a aportes por escorrentía externa, lo que determinó la necesidad de efectuar una labor con rotocultor, originando esta labor un segundo estado inicial. En una fecha posterior (8-7-97) se removió la superficie nuevamente, arando entre los surcos de maíz lo que supone un tercer estado inicial en esta parcela durante el ciclo vegetativo del maíz. Para su estudio se subdivide la parcela en dos subzonas que diferencian un área con mayor contenido en materia orgánica (como denota su color oscuro) y otra con menos materia orgánica en superficie, denominadas Ma 15a y Ma 15b, respectivamente.

La parcela Ma 17 se dividió en tres subzonas de estudio, atendiendo a las importantes diferencias de pendiente que existen en la misma. La denominación de estas subzonas y la clase de pendiente de acuerdo con la FAO (1977) es la siguiente:

Ma 17 a, zona inclinada (clase 3).

Ma 17 b, zona suavemente inclinada (clase 2).

Ma 17 c, zona casi llana (clase 1).

En las parcelas Ma 15 y Ma 17 se efectuó la siembra el día 23 de Mayo de 1997 y en las Ma 12, Ma 13 y Ma 14 el día 29 del mismo mes, fechas a partir de las que se iniciaron las descripciones del estado de la superficie. El número de descripciones realizadas a lo largo del ciclo vegetativo del maíz osciló entre 9 (parcela Ma 17) y 14 (parcela Ma 15).

Composición del suelo

La toma de muestras se llevó a cabo en el horizonte de laboreo, entre 0 y 15 cm de profundidad. Las muestras se secaron al aire y tamizaron a 2 mm.

En la tabla 2 se presentan los resultados de los análisis de las propiedades generales (pH, carbono, materia orgánica y granulometría) de los suelos estudiados. Las parcelas Ma 1, Ma 2 y Ma 3, colindantes entre sí, se consideraron homogéneas desde el punto de vista edafológico, por lo que en ellas se analizó una sola muestra compuesta. En la parcela Ma 15 se diferenciaron dos subzonas, en función del contenido en materia orgánica y en cada una de ellas se analizó una muestra. Por último, en la parcela Ma 17 se tomaron tres muestras, de acuerdo con las diferentes clases de pendiente que se observan en ella.

Parcela	pH H2O	pH KCl	C %	M.O %	Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura
Ma 1, Ma 2, Ma 3	5,87	4,58	1,71	2,94	29,5	55,5	15,0	franco-limosa
Ma 12	6,05	5,27	4,35	7,48	27,7	48,4	23,9	franca
Ma 13	5,93	5,30	3,45	5,93	29,3	50,9	19,8	franco-limosa
Ma 14	5,67	5,01	3,99	6,87	28,3	55,2	16,5	franco-limosa
Ma 15 (m)	4,83	3,67	0,55	0,95	26,9	66,5	6,6	franco-limosa
Ma 15 (o)	5,65	4,66	1,26	2,16	27,5	56,2	16,3	franco-limosa
Ma 17 a	5,96	5,09	2,85	4,9	35,9	54,2	9,9	franco-limosa
Ma 17 b	5,81	4,76	3,1	5,34	30,1	57,4	12,5	franco-limosa
Ma 17 c	5,92	5,01	1,69	2,91	26,6	61,2	12,2	franco-limosa

Tabla 2. Datos analíticos generales de los suelos de las parcelas estudiadas.

El pH de los suelos de las parcelas estudiadas es ácido. El contenido en materia orgánica es muy variable, oscilando entre 0,95 % y 7,84 %. En la parcela Ma 15 se cifra en 0,95 %, en la zona menos orgánica y 2,85 %, en la zona más rica en materia orgánica. También se aprecian importantes diferencias de materia orgánica dentro de la parcela Ma 17.

La textura es relativamente homogénea, franco-limosa, excepto en Ma 12, en donde es franca. Predomina la fracción limo, con contenidos que oscilan entre 48,4 % y 66,5 %. Las mayores diferencias relativas se aprecian entre los valores los máximos (23,9 %) y los mínimos (6,6 %) de arcilla. La arena es la más homogénea de las tres fracciones. De estos datos granulométricos se infiere que los suelos estudiados pueden presentar, a priori, una sensibilidad alta a la formación de costra, y por lo tanto a la erosión, debido a los importantes contenidos en limo.

La materia orgánica es un factor del que también depende el encostrado, ya que puede actuar, de acuerdo con las referencias bibliográficas, acelerando o retardando el proceso de degradación de la superficie por acción del agua de lluvia.

Condiciones climáticas

La finca experimental del Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo dispone de una estación climatológica en la que se registran las siguientes variables: precipitación, temperatura máxima y mínima y humedad relativa. Los datos de precipitación y temperatura se publican en el Boletín Climatológico Mensual de Galicia.

En la figura 2 se puede observar el diagrama de precipitación diaria durante el periodo en que se efectuaron ensayos de campo, así como la fecha de inicio de las descripciones de la superficie en cada una de las parcelas experimentales.

La distribución de la precipitación durante el año 1997 fue muy diferente de la que corresponde a un año climatológico medio, aunque la cifra total anual media y la registrada en 1997 son del mismo orden de magnitud. En efecto, no resultan habituales períodos de más de 40 días seguidos sin precipitación en la primavera, como ocurrió durante Marzo y Abril de 1997. Por otra parte, los meses de Mayo, Junio y Noviembre registraron lluvias muy superiores a la media (TABOADA CASTRO, 1998).

Los datos de precipitación acumulativa, contada desde el estado inicial se relacionaron con algunos de los parámetros morfológicos que se utilizaron para describir la evolución temporal de las superficies estudiadas.

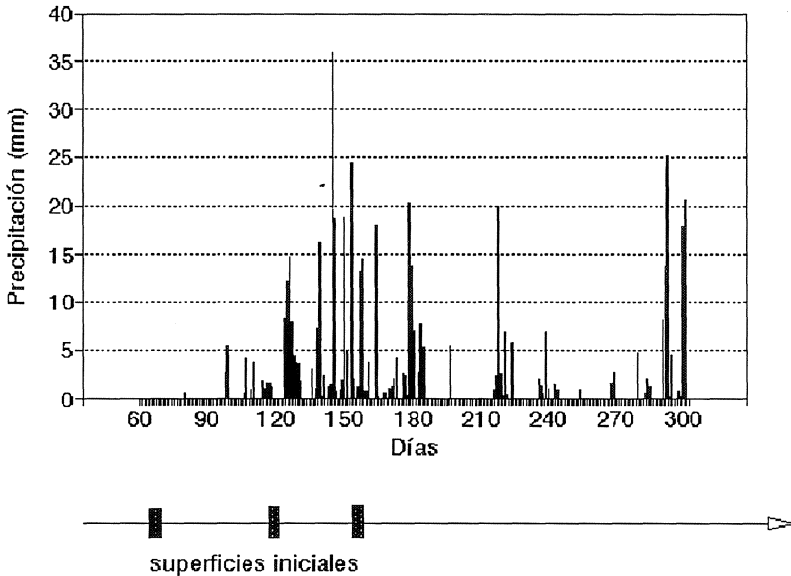


Figura 2. Pluviometría diaria en el período de ensayos de campo y fechas iniciales de las descripciones.

En la figura 2 también se relacionan el diagrama de precipitaciones durante Marzo - Octubre de 1997 y las fechas de inicio de los ensayos. Se aprecian las diferencias entre los dos períodos en que se llevaron a cabo labores para obtener superficies iniciales, en los meses de Marzo, en primer lugar, y a finales de la primavera en Mayo - Junio, en segundo lugar, siendo anormalmente seco el mes de Marzo y muy húmeda la segunda quincena de Mayo y la primera de Junio. El contenido de humedad inicial del suelo presenta una notable influencia sobre la formación de costra superficial, ya que determina la importancia relativa de los mecanismos de desagregación responsables de la evolución de la superficie (MONNIER and BOIFFIN, 1986; ROTH and HELMING, 1992).

Descripción de la evolución de la superficie del suelo

En cada una de las parcelas estudiadas se realizaron periódicamente descripciones del estado de la superficie del suelo mediante estimación visual de los cambios que en ella se producen. Esta estimación se hizo siguiendo unas claves de referencia y se acom-

pañó de tomas fotográficas. La clave utilizada, presenta la ventaja de que se trata de un método no destructivo, de modo que la descripción no interfiere con la evolución de la superficie del suelo. Esta clave se transcribe a continuación:

1) IDENTIFICACIÓN DE LA PARCELA

En este apartado se consideran los datos administrativos. Se identifica la parcela por su nombre y propietario, se toman datos acerca de la localidad en la que se encuentra situada, así como la fecha (día, mes, año) de observación. Se anota el uso agrícola al que se encuentra destinada, y el tipo de labores realizadas.

Si se toman fotos, en una libreta se anotaran datos del número de carrete y foto del mismo, así como localización, fecha y estado de la parcela con la finalidad de identificarlas fácilmente. Para facilitar el estudio de la parcela se toman vistas generales, fotos a media distancia y sobre todo fotos de detalle en zonas representativas. Una vez en el laboratorio se clasifican en álbumes agrupándolas por parcelas y fechas .

Otros datos que se incluyen en este apartado son los relativos a características del terreno tales como pendiente topográfica, material geológico sobre el que se asienta ese suelo etc. También se anotan datos sobre el porcentaje de cubierta vegetal, altura del cultivo, y número de hojas de este.

2) ESTADO DE LA SUPERFICIE

Se anota como está el estado de la superficie el día en que se realiza la descriptiva. Si es un estado inicial se anota la labor que lo ha originado. Si a lo largo del período de estudio tiene lugar una nueva labor se toman datos de ella y se continúan las descripciones a partir de este nuevo estado inicial.

La observación periódica de una superficie, muestra la existencia de facies de degradación sucesivas. Estas se pueden considerar en grandes grupos (F0, F1, F2), con fases intermedias (F0+, F1-, F1+, F1/2-, F1/2, F1/2+, F2-, F2+).

F0: Esta superficie presenta agregados muy pequeños y bien delimitados y separados de sus vecinos. La superficie es caótica y totalmente heterogénea, en particular desde el punto de vista de los fragmentos y de la disposición relativa de la misma.

F1: Es una facies fragmentada alterada; presenta agregados de aspecto continuo, fácilmente delimitables, ya que los pequeños fragmentos han desaparecido. La superficie se presenta menos rugosa.

F2: Es una facies continua. Disminuye aún más la rugosidad y se observan síntomas de acumulación en microdepressiones. El aspecto es bastante homogéneo y la superficie presenta muestras evidentes de fuerte encostramiento.

El estado de la superficie se describe dentro y fuera de las zonas con rodada según el esquema:

Clase	Descripción
F0	Estado inicial inmediatamente después del laboreo
F0 +	Estado inicial después de los primeros episodios de lluvia
F1-	Costra estructural, difícilmente visible
F1	Costra estructural, claramente visible
F1+	Costra estructural, con zonas de tonos claros
F1/2-	Costra sedimentaria en < del 10% de la superficie
F1/2	Costra sedimentaria en microdepressiones < del 30% de la superficie
F2-	Costra sedimentaria continua ocupando entre el 50-75% de la superficie
F2	Costra sedimentaria continua ocupando entre el 75-95% de la superficie
F2+	Costra sedimentaria continua en más del 90% de la superficie
F3-	Costra ligeramente fragmentada por agentes biológicos o climáticos
F3	Costra fragmentada
F3+	Costra completamente fragmentada

3) DIÁMETRO MÍNIMO DE LOS AGREGADOS

Se trata de observar el diámetro mínimo (expresado mm) de los agregados que no están incorporados a la costra.

Después del laboreo, el estado de la superficie presenta gran cantidad de agregados sueltos dando lugar a un aspecto pulverulento. Con los primeros eventos de lluvia, estos pequeños agregados, son los primeros que se incorporan a la costra. A medida que la superficie va evolucionando hacia un estado cada vez más encostrado, el diámetro mínimo se hace cada vez mayor (o lo que es lo mismo solo permanecen sin soldarse los agregados de mayores dimensiones), conforme los de menores dimensiones quedan sellados a la costra.

Después de precipitaciones importantes se observan agregados secundarios, que ya no se tienen en cuenta, aunque si se anota que existen.

4) RUGOSIDAD

Se mide perpendicular y paralelamente a la dirección del laboreo. Teniendo en cuenta la diferencia de altura entre el fondo de las microdepressiones locales y el punto más próximo por el que fluiría el agua de escorrentía. Se anota si ha disminuido respecto del estadio anterior.

Clase	Diferencia de altura
R0	0 - 1 cm (lecho de siembra degradado)
R1	1 - 2 cm (lecho de siembra fino)
R2	2 - 5 cm (lecho de siembra grueso)
R3	5 - 10 cm (lecho de siembra muy grueso o mulch degradado)
R4	10 - 20 cm (mulch o laboreo poco profundo)
R5	> 20 cm (laboreo profundo)

5) POROSIDAD

Se trata de determinar la densidad de macroporos que afectan a la infiltración, referidos a su número por cada m² de superficie. En estados iniciales el número de poros es máxima, y la cantidad de estos disminuye en función de la aparición del sellado de la superficie, y que acaban por desaparecer en estadios muy evolucionados.

Clase	Descripción
P0	Sin macroporos
P1	10 poros/m ²
P2	50 poros/m ²
P3	100 poros/m ²

6) GRIETAS

Se observa la presencia o la no existencia de estas. En caso de que se hallan formado se efectúa una estimación visual de la densidad en m/m²; se mide la anchura en mm y la profundidad en cm.

7) HUMEDAD

Se anota si la superficie está saturada, húmeda o seca. Se estima visualmente el porcentaje de superficie húmeda y encharcada.

8) ESCORRENTÍA

Se efectúa una estimación visual de la distancia (decimétrica, centimétrica o métrica) que alcanzó el desplazamiento por escorrentía. Se anota la dirección de la misma, denominándose "A" si es paralela al cultivo, "B" si es perpendicular a este, y "Z" si sigue la máxima pendiente.

Clase	Distancia
R00	Sin escorrentía
R01	Hasta 10^2 m
R02	Hasta 10^1 m
R03	Hasta 10^0 m
R04	Hasta 10^1 m
R05	Hasta 10^2 m

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La descripción de la superficie del terreno mediante características semicuantitativas estimadas visualmente, permite analizar, de acuerdo con BOIFFIN (1994), la evolución a lo largo del tiempo de la costra superficial en una parcela determinada, así como las diferencias entre parcelas con diferentes tratamientos. Ello proporciona una estimación indirecta de la magnitud de la capacidad de infiltración a través de la superficie y la retención de agua en las depresiones del microrrelieve.

La descripción del estado de la superficie en relación con las facies fundamentales F0 (estado inicial), F1 (costra estructural) y F2 (costra sedimentaria) que se desarrollan sucesivamente bajo la acción del agua proporcionó series de datos como los que se consignan, a título de ejemplo, en la tabla 3 y que corresponden a una de las parcelas estudiadas.

Evolución de la superficie y escorrentía en parcelas sin vegetación

Las observaciones efectuadas en las tres parcelas labradas y no cultivadas permitieron comparar la evolución de dos superficies con características similares a las de un lecho de siembra, pero con rugosidad inicial diferente, una relativamente poco importante (Ma 1) y otra más desarrollada (Ma 2). Además, comparando, por un lado, los tratamientos Ma 1 y Ma 2 (estado inicial seco) y, por otro, el Ma 3 (estado inicial húmedo) se obtiene información para evaluar el efecto de la humedad inicial del suelo.

Debido a la precipitación anormalmente baja entre Marzo y Abril de 1997, en los tratamientos Ma 1 y Ma 2 el suelo se mantuvo seco durante más de 40 días, después del día en que se preparó la superficie inicial, el 10 de Marzo. Posteriormente, se alcanzó la facies estructural (F1) mediante precipitaciones moderadas, por lo que, junto a la acción de la energía cinética de las gotas de lluvia, la desagregación por acción del aire atrapado en el interior de los agregados actuaría como principal mecanismo de evolución.

Por contra, en la parcela Ma 3 la facies estructural (F1) se alcanza en un periodo más corto, de 10 ó 11 días, lo que es tanto más relevante cuanto que la evolución ocurre partiendo de un estado inicial húmedo, que ralentiza los fenómenos de desagregación.

La influencia del régimen de precipitación sobre la evolución de la superficie del suelo se puede apreciar en la figura 3, en la que se representa el diámetro mínimo de los agregados no soldados en función de dos parámetros, por un lado, el tiempo transcurrido desde el estado inicial (F0) y, por otro, la precipitación acumulativa.

Se puede apreciar que, debido al diferente régimen de precipitación, las superficies Ma 1 y Ma 2, tardan mucho más tiempo en alcanzar un diámetro mínimo determinado que la superficie Ma 3. Ello es debido a que después del laboreo de las dos primeras parcelas hubo una época seca relativamente larga, mientras que poco después de labrar la tercera se registraron lluvias importantes. Sin embargo, cuando la evolución del diámetro mínimo se representa en función de la precipitación acumulativa, la evolución de este parámetro presenta muchas coincidencias siendo poco diferente en las tres parcelas en las que las condiciones iniciales de la superficie eran diferentes durante los primeros estadios.

En la figura 3 también se observan algunas diferencias entre velocidad de evolución de la superficie en las parcelas Ma 1 y Ma 2, con distinto microrrelieve inicial, de tal modo que el diámetro mínimo tiende a ser inferior en esta última en relación a la primera, para una precipitación acumulada dada. Sin embargo, las diferencias de diámetro mínimo entre estas dos parcelas son poco importantes en los primeros estadios de evolución, y solo se van poniendo de manifiesto cuando la costra superficial ya está relativamente desarrollada. En esta última etapa, por otra parte, es cuando las determinaciones de diámetro mínimo se consideran más imprecisas (BOIFFIN, 1984).

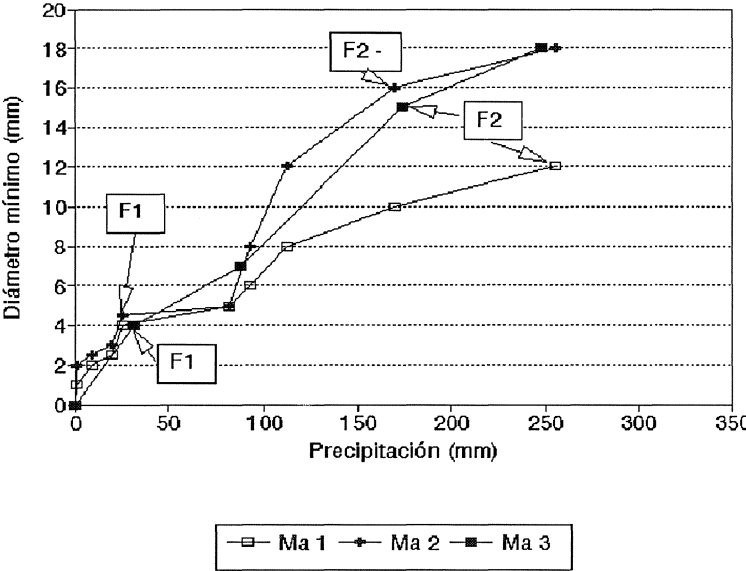
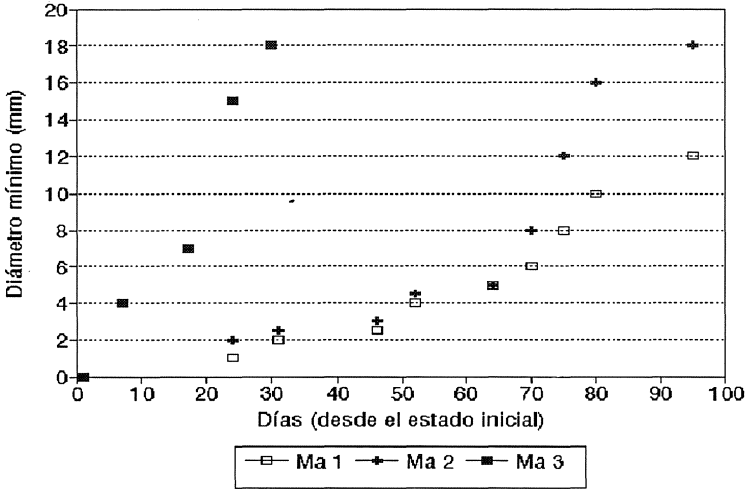


Figura 3. Evolución del diámetro mínimo en función del número de días después de laboreo (superior) y la precipitación acumulativa (inferior) en parcelas sin vegetación.

Por lo que respecta a la evolución de la rugosidad, también se observa el efecto de las diferencias del estado inicial entre Ma 1 y Ma 2. En Ma 1 la rugosidad paralela inicial pertenece a la clase R2 y la perpendicular a la clase R3, evolucionando a R0 en ambas direcciones. Puesto que en Ma 2 el microrrelieve inicial estaba más desarrollado, se parte de una rugosidad R2 en la dirección paralela a la del laboreo y R4 en la dirección perpendicular al mismo. De la clase R4 inicial la evolución paulatina llega a formar una superficie muy lisa, R0, aunque esta clase de rugosidad se alcanza en fecha posterior y con cantidades mayores de precipitación en relación con la parcela anterior. En la parcela Ma 3 la rugosidad inicial en la dirección paralela al laboreo pertenece a la clase R2 y evoluciona a R0; en la dirección perpendicular pasa de la clase inicial R3 (motivada por surcos de fresadora) a R2, después de 201,7 l de precipitación acumulada.

Conviene destacar que las tres superficies sin cultivo estudiadas, que simulaban un lecho de siembra inicial, presentan determinadas características comunes (fig. 3) puestas de manifiesto por la siguiente relación entre la facies de la superficie, la precipitación acumulativa y el diámetro mínimo de los agregados no soldados:

- a) La costra estructural (F1) se desarrolla con una cantidad de lluvia inferior a 50 mm y cuando el diámetro mínimo es menor de 5 mm.
- b) La costra sedimentaria se observó a partir de 150 mm de lluvia acumulativa y para diámetros mínimos mayores de 10 mm.

La porosidad evolucionó más rápidamente en la parcela Ma 3 en la que se observó la clase P0 después de 269,1 l de lluvia acumulada, mientras que en Ma 1 y Ma 2, después de 345,1 de lluvia, la superficie presentaba características intermedias de las clases P0 y P1.

En las parcelas sin cultivar se pone ya de manifiesto la escasa importancia de las grietas de retracción de este suelo, en el que predominan arcillas no expandibles. En efecto, cuando el sistema de grietas alcanza su máximo desarrollo, su densidad se estimó en una cifra de 3m/m².

Al igual que ocurría con la porosidad, la escorrentía presentó diferencias notables entre las parcelas Ma 1 y Ma 2, por una parte, y Ma 3 por otra. En las dos primeras únicamente se apreciaron desplazamientos a escala métrica al final del período de observación después de 345,1 l de lluvia acumulados. Por contra, en Ma 3 se observaron desplazamientos métricos después de 172,4 l de lluvia. En consecuencia, los datos

anteriores se pueden interpretar como indicativos de una mayor rapidez de evolución de la parcela Ma 3 en relación con la Ma 1 y Ma 2, que acaecería no tanto durante los estadios iniciales como cuando ya la precipitación acumulativa era ya importante (125 a 150 l). Esta observación puede estar motivada por el hecho de que durante el periodo de observaciones de la parcela Ma 1 y Ma 2 se desarrollaron malas hierbas. En ambas, a fecha 30 de junio de 1997 el porcentaje de cubierta vegetal era de un 60 % y ya a 7 de julio de 1997 el suelo se encuentra cubierto en un 70 %, lo que motiva que se produzca protección con respecto a la acción del agua de lluvia, mientras que en Ma 3 se observó que la importancia del efecto protector de las malas hierbas estuvo más limitado, ya que el suelo permaneció prácticamente desnudo a lo largo del periodo de observaciones.

Evolución de la superficie y escorrentía en parcelas sembradas de maíz

El estado inicial en este caso corresponde con las fechas de siembra, que fueron realizadas el 23-5-97 y el 29-5-97. Pronto se apreció que una de las parcelas estudiadas (Ma 15), presentaba una evolución muy rápida, lo que en parte pudo estar motivado por aportes de agua de escorrentía exterior, desde una parcela vecina dedicada a prado; en consecuencia, la parcela Ma 15 sembrada el 23-5-97 fue labrada posteriormente otras dos veces, el 30-5-97 mediante rotocultor y el 8-7-97 mediante una labor superficial entre las hileras del maíz.

Debido a las importantes precipitaciones durante la última quincena de Mayo y la primera quincena de Junio, la superficie de las parcelas sembradas de maíz evolucionó en un intervalo breve de tiempo. Así, el 12-5-97 ya se observó en Ma 12, Ma 13 y Ma 17 una costra sedimentaria que ocupaba una extensión variable, entre un 10 y un 75% de la superficie. Destaca que en la parcela Ma 15, mientras tanto, la superficie había evolucionado ya por dos veces hasta la facies sedimentaria.

En la figura 4 se representa el diámetro mínimo de los agregados no soldados frente a la precipitación acumulativa para las superficies Ma 12, Ma 13, Ma 14 y Ma 15. También se consignan los momentos en que se alcanzó la facies estructural (F1) y la sedimentaria (F2). Los datos de la parcela Ma 15, que se representan en la figura 4 corresponden a una de las dos zonas estudiadas, la que presenta contenidos inferiores en materia orgánica y los datos de la parcela Ma 17, en la que se estudiaron tres zonas con diferente pendiente, son los observados en la zona de máxima pendiente (clase 3). En la parcela Ma 15 se agruparon los datos de diámetro mínimo teniendo en cuenta dos estados iniciales diferentes.

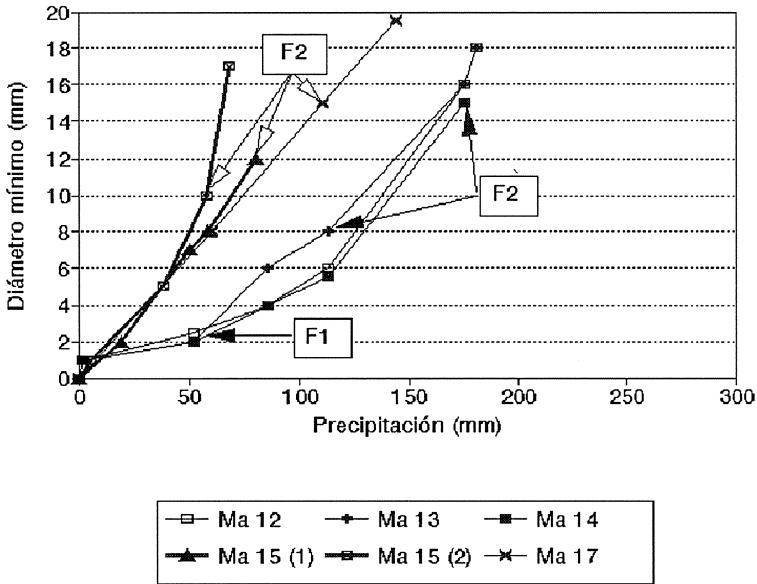


Figura 4. Evolución del diámetro mínimo en función de la precipitación acumulativa en parcelas dedicadas a maíz.

Se puede observar, en primer lugar, en la figura 4 como se diferencian dos grupos de parcelas atendiendo a la cinética de evolución, de modo que en las parcelas Ma 15 y Ma 17 la velocidad de evolución de la superficie es mucho mayor que en Ma 12, Ma 13 y Ma 14.

La evolución en las parcelas Ma 15 y Ma 17 es tan rápida en el tiempo, que de hecho la facies F1 no pudo ser observada. En Ma 15 después 38 l de precipitación a partir de un estado inicial, se observó ya la facies F1+; para otros estados iniciales después de 50,2 l de precipitación se observó la facies F1/2- (costra sedimentaria que ocupa > 10% de la superficie) y después de 58,6 l se observó la facies F2- (costra sedimentaria que cubre ya entre el 50 y el 70% de la superficie). Se puede apreciar también como la facies F2 (Costra sedimentaria que ocupa 75-90%) se alcanza en la parcela Ma 15, con una precipitación acumulativa inferior a 80 l, y en Ma 17 con una cifra del orden de los 100 l acumulativos.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que en la parcela Ma 15 se efectuaron observaciones en dos zonas y los datos consignados en la figura 4 corresponden a la zona que evoluciona más rápidamente apreciándose en esta parcela el efecto de la materia orgánica como factor que disminuye la velocidad de evolución de la costra.

Del mismo modo, los datos de la parcela Ma 17 corresponden a la zona de máxima pendiente (clase 3) y con mayor contenido en arena, en donde se observó una evolución más rápida que en otras dos zonas de la misma de menor pendiente, en las que también se efectuaron descripciones. En este caso se pone en evidencia el papel del contenido en arena (así como de la pedregosidad) sobre la evolución de la superficie.

Por contra, en las parcelas Ma 12, Ma 13 y Ma 14 la superficie evoluciona de un modo relativamente mas lento. El estado estructural, F1, se alcanza con una cifra de precipitación acumulativa del orden de los 50 l de agua y el estado F2 requiere, según el tipo de parcela, cifras del orden de 115 l (Ma 13) y 175 l de agua (Ma 12 y Ma 14).

En síntesis, la evolución del diámetro mínimo de algunas de las parcelas dedicadas a maíz, Ma 12, Ma 13 y Ma 14 presenta similitudes con la de las parcelas sin cultivar, Ma 1, Ma 2 y Ma 3. En otras de las parcelas dedicadas a maíz, Ma 15 y Ma 17, el diámetro de los agregados no soldados aumenta más rápidamente. Estas diferencias entre los dos grupos de parcelas se ponen ya de manifiesto durante los primeros estadios de evolución, con cantidades de precipitación inferiores a 50 mm.

Durante la última observación efectuada en las parcelas de maíz, después de las labores de recolección, la facies de la superficie correspondía a F3, es decir era patente ya la fragmentación de la costra superficial debido a la acción de la maquinaria agrícola. En algunas de las parcelas se pudo seguir un nuevo ciclo de evolución de la superficie sobre las rodadas.

La rugosidad inicial de las parcelas sembradas de maíz era muy importante en Ma 12, Ma 13, Ma 14, en las que se observó la clase R3 paralela a las líneas de siembra y las clases R3 a R4 en la dirección perpendicular a las mismas. Por contra, el lecho de siembra de la Ma 15, preparado el 23-5-97, era muy liso (clase R1 paralela y clase R2 perpendicular, debida ésta a los surcos de fresa). En las labores sucesivas se observó que la rugosidad inicial paralela era de la clase R2 y la perpendicular de la clase R3. Debido al régimen de precipitación, se aprecia como en todas las parcelas observadas la rugosidad disminuye sustancialmente a lo largo del período vegetativo. Así en las parcelas Ma 12 y Ma 13 se pasa de una superficie inicial muy rugosa a una superficie lisa (clase R0)

con 180,7 l de precipitación. En Ma 14, el importante microrrelieve inicial se ve también sustancialmente reducido, aunque menos que en el caso anterior. En Ma 15 se observan 3 ciclos sucesivos de evolución, siempre con disminuciones significativas del microrrelieve. Finalmente, en Ma 17 se pasa de la clase R2 inicial a la clase R0 después de 254 l de precipitación. En la última fecha de observación se aprecia un mayor desarrollo del microrrelieve en relación con las etapas precedentes, que se puede atribuir a la acción de la maquinaria agrícola durante la recolección del maíz.

Por lo que respecta a la porosidad, en algunas de las parcelas estudiadas, Ma 12, Ma 13, Ma 15 (1^a y 2^a etapa) se pasó de la clase P3 a la clase P1 en un intervalo muy breve de tiempo y no fué posible observar la fase de transición es decir la clase P2. En las superficies que evolucionaron más lentamente, como Ma 12, Ma 13 y Ma 14, se observó la clase P0 (sin macroporos) con 175 a 180 l de precipitación acumulada, y en la parcela Ma 15 se alcanza P0 con precipitaciones del orden de 80 l o inferiores. En Ma 17, a pesar de la rápida evolución del microrrelieve, prácticamente no se observó la clase de porosidad P0, lo que puede ser atribuido a la importancia relativa de la fracción arena que alcanza un 35 % y a la baja proporción de arcilla (9,9%).

Las grietas de retracción alcanzaron escaso desarrollo durante las primeras etapas de observación dado que la superficie estaba muy húmeda. El máximo desarrollo en general se observa durante el mes de Junio, apreciándose en algunas de las parcelas estudiadas cifras que pueden alcanzar entre 5 ó 6 m/m².

Destaca la importancia de la escorrentía en la mayor parte de las parcelas estudiadas que se originó muchas veces como consecuencia de las fuertes lluvias de la segunda quincena de Mayo y de la primera quincena de Junio. Así en Ma 12 se observa erosión métrica a partir del 8 de Julio. En Ma 13 la erosión es hectométrica a partir del 3 de Junio. La parcela Ma 14 fué la que presentó menos síntomas de erosión apreciándose solo desplazamientos decimétricos. En Ma 15 hubo diversos episodios de erosión; durante el primer ciclo ocurrió a la máxima escala, hectométrica, y en ciclos posteriores se observó una segunda fase decamétrica el 10 de Junio, y, finalmente, otra fase en invierno a partir del 12 de Noviembre. En la parcela Ma 17, por último, se observó erosión decamétrica a partir del 19 de Mayo y hectométrica después del 4 de Junio.

Las anteriores descripciones se refieren a zonas no afectadas por rodadas del tractor durante la preparación del lecho de siembra y las labores posteriores. La evolución del suelo en zonas de rodada puede diferir notablemente del modelo observado. En gene-

ral, en ellas se aprecia una degradación más rápida de la superficie del suelo. En efecto, inicialmente, en el estadio F0, las rodadas se caracterizan por una proporción de tierra fina más importante que las zonas vecinas y un índice de rugosidad muy débil, que corresponde a la clase R1 ó R0, propio de un lecho de siembra muy fino, sin apenas terrones ni agregados de dimensiones centimétricas.

Sobre estos motivos desarrollados por los aperos de labranza se observa costra sedimentaria antes que en el resto de la parcela, y cabe destacar además la soldadura rápida de los fragmentos de menor tamaño de modo que el diámetro mínimo de los agregados no soldados crece más rápidamente que en las zonas no afectadas por rodadas.

Comparación con otros datos

En la finca experimental de Mabegondo, ya se disponía de datos de campo previos sobre la cinética de evolución del microrrelieve, aunque en una sola parcela, estudiada por FERNÁNDEZ RUEDA (1997). La experiencia se llevo a cabo durante la implantación de una pradera en el Otoño de 1996. Se apreció una costra estructural después de 33,3 l de precipitación y costra sedimentaria, que ocupaba entre el 50-70 % de la superficie (F2), a partir de 192,4 l .

Otros índices de evolución de la superficie, como el diámetro mínimo, la rugosidad y la porosidad, evolucionaron de un modo paralelo al observado en el presente estudio.

Por otra parte, FERNÁNDEZ RUEDA (1997) analizó también datos de evolución de un lecho de siembra preparado en condiciones artificiales, en una experiencia llevada a cabo bajo simulador de lluvia.

La intensidad de la lluvia aplicada fué de 30 mm/h y el lecho de siembra se preparó mezclando agregados de distinto calibre en proporciones que intentan reconstruir la estructura del suelo durante un cultivo. La superficie inicial estaba seca por lo que en la desagregación intervenía tanto el impacto de las gotas de lluvia como por estallido del aire atrapado. Esta superficie evolucionó rápidamente observándose, formación de costra estructural (F1) con sólo 12,5 mm de precipitación y una costra sedimentaria que ocupaba entre el 70 - 75 % (F2) con solo 50 l de precipitación. El diámetro mínimo cuando solo se habían aplicado 5 l de precipitación ya era de 3 mm y con 50 l alcanzaba ya 6 mm.

Por tanto, los datos disponibles en la bibliografía sobre la evolución de la superficie de una pradera recién sembrada y de superficies artificiales sin cultivo, de un suelo similar

al estudiado en este trabajo, son del mismo orden de magnitud que los obtenidos en el presente estudio, a partir de ensayos efectuados en el campo. Todo ello confirma que la superficie del suelo estudiado es susceptible a la formación de costra, aunque la velocidad de formación de la misma puede variar ampliamente en función de las condiciones iniciales.

Los resultados precedentes ponen de manifiesto una relación entre el estadio morfológico de la costra y la precipitación acumulativa. Asimismo, queda establecida en términos cualitativos, la relación entre la susceptibilidad de la superficie del suelo a la de génesis de escorrentía y el estadio de evolución de la misma.

Condiciones de génesis de escorrentía

La gama de sensibilidad a la escorrentía presenta una gran diversidad. En las parcelas dedicadas a maíz, la escorrentía localizada a favor de rodadas aparece rápidamente después de la siembra y de la aplicación de productos fitosanitarios; mientras tanto, fuera de las rodadas el estado de la superficie es predominantemente de facies F0 o F1. En todas las parcelas se observó que estructuras como los surcos debidos al paso de una fresa o hileras de siembra tienden a evolucionar más rápidamente que las zonas vecinas en el momento en que comienza la escorrentía difusa; la formación de escorrentía difusa fue más o menos precoz, de acuerdo con la rugosidad de la superficie inicial fragmentada, pudiendo formarse a partir del momento en que se observa una facies estructural, es decir con aproximadamente 50 mm de precipitación acumulativa.

Independientemente de la época de laboreo o siembra considerada y de la precocidad de la escorrentía, se constata que la erosión difusa se generaliza cuando el 30-40% de la superficie total del suelo esta ocupada por una costra sedimentaria. El aumento del porcentaje de superficie encostrada va acompañado de una disminución paralela de la rugosidad, observándose en el estadio de máxima evolución valores máximos de costra tipo F2 cifrados en un 80% y de rugosidad del orden de 1 cm.

Teniendo en cuenta los datos de porosidad, se aprecia que la acción de la lluvia se traduce simultáneamente por una disminución de la capacidad de almacenamiento temporal de agua en la superficie, así como de la capacidad de infiltración a través de un microhorizonte centimétrico o incluso milimétrico. De este modo, cuando la estructura de los niveles más superficiales del suelo alcanza un estadio de degradación suficiente, que puede cifrarse en el caso estudiado aproximadamente en un 30-40% de superficie ocupada por una costra sedimentaria, los charcos que se generan en las microdepressiones comienzan a conectarse entre ellos, lo que constituye el estadio inicial de la esco-

rréntía. La presencia de estructuras lineales debidas a las operaciones agrícolas, como rodadas y, en menor medida, surcos e hileras, aumenta la distancia de transporte. El estadio de degradación en el que se inicia la escorrentía es más o menos precoz, dependiendo de la variabilidad de la respuesta, de factores como las condiciones de humedad del suelo o el tipo de labores agrícolas.

Las experiencias llevadas a cabo han puesto de manifiesto que la escorrentía concentrada en surcos afectó fundamentalmente a las praderas sembradas de maíz, pudiéndose comprobar la importancia de estructuras de origen agrario como hileras de siembra y rodadas de tractor en la formación de la misma. Este tipo de escorrentía puede presentar, en la zona estudiada, diversas formas y orígenes. En algunos casos se comprobó que la formación de surcos estaba relacionada con la degradación de la estructura de la superficie, y en otros se puso en evidencia que también existe escorrentía externa, ajena al laboreo de la parcela, que pone en evidencia problemas de ordenación del territorio.

En la zona estudiada, la composición de la fracción mineral del suelo, con contenidos elevados de limo y una proporción baja de arcilla, tiende a favorecer la desagregación, mientras que la cantidad relativamente importante de materia orgánica tiende a proporcionar resistencia a la degradación por acción del agua de lluvia (MONNIER et STENGEL, 1982; Le BISSONNAIS, 1988). Por tanto, en estas condiciones el efecto del laboreo y el tipo de útiles agrícolas empleados sobre el riesgo de escorrentía puede resultar predominante.

Los datos presentados constituyen una base para proponer posibles acciones que puedan limitar las pérdidas de suelo y la emisión de contaminantes hacia las aguas superficiales. En el contexto del medio físico analizado en este trabajo, la interceptación de los materiales erosionados antes de que alcancen la red hidrográfica resulta prioritaria frente a reducción de las mismas en las parcelas en las que tiene su origen. En este sentido, la capacidad de retención de la contaminación difusa asociada a la escorrentía depende de la organización del sistema de parcelas en el conjunto de una cuenca agrícola y sobre todo de la presencia de superficies verdes, tanto si se trata de praderas como de bandas relativamente estrechas.

Este estudio puso en evidencia que en la comarca estudiada existen estrechas relaciones entre el manejo de la explotación agrícola y el riesgo de erosión. La metodología utilizada para describir el estado de la superficie, basada en una jerarquización de los factores de los que depende la escorrentía puede ser útil para analizar la incidencia de la agricultura en el medio ambiente a escala de parcela o de cuenca agrícola.

CONCLUSIONES

Se siguió la evolución de la superficie del suelo en 3 parcelas sin cultivar y en 5 parcelas dedicadas a maíz, mediante descripciones en base a índices semicuantitativos, lo que permite deducir las siguientes conclusiones:

El suelo objeto de este estudio, desarrollado sobre esquistos de Órdenes, presenta texturas medias con contenidos en arcilla en general inferiores al 20%, lo que permite considerarlo como susceptible a la formación de costra superficial, por impacto de las gotas de lluvia.

La descripción de la superficie puso de manifiesto la presencia de una secuencia típica de estadios de evolución sucesivos, de modo que desde la fase inicial fragmentada y permeable se desarrolla una costra estructural, llegándose a observar, finalmente, en todos los casos estudiados una costra sedimentaria.

Se puso en evidencia que la velocidad de evolución del suelo en parcelas vecinas puede ser muy diferente. Se puede generalizar, sin embargo, concluyendo que una costra estructural siempre se forma con precipitaciones inferiores a 50 l, a partir de una superficie recién labrada, independientemente de la variabilidad de los factores agronómicos y edáficos.

La cantidad de agua de lluvia requerida para la evolución de una superficie recién labrada hasta el estadio de costra sedimentaria resulta, variable, pudiendo oscilar entre cifras del orden de 150 y 200 l.

El diámetro mínimo de los agregados no soldados es un índice de evolución que presenta una correlación positiva con la precipitación acumulada y que proporciona además información acerca de la velocidad de formación de costra superficial en las parcelas experimentales.

La escorrentía difusa o concentrada en surcos afectó en la primavera y el verano de 1997 a todas las parcelas estudiadas. En ausencia de aportes externos, el riesgo y la severidad de escorrentía a escala de parcela depende de la pluviometría durante el período en que la superficie del suelo está ocupada por facies poco permeables como la F2, así como del porcentaje de rodadas.

AGRADECIMIENTOS: Este trabajo se llevó a cabo en el marco del proyecto FAIR- CT95 - 0458, financiado por la Unión Europea.

BIBLIOGRAFÍA

- BIELDERS, C. L. and BAVEYE, P. (1995). Processes of structural crust formation on coarse textured soils. *European. J. of Soil Sci.*, 46: 221-232.
- BOIFFIN, J. (1984). *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse Docteur Ingénieur, Paris INA-PG. 320 pp. + annexes.
- BOIFFIN, J. (1985). Stages and time-dependency of soil crusting in situ. In: *Assessment of Soil Surface Crusting*. Proc Symposium ISSS AISS IBG Ghent (Belgique), edited by *Callebaut, F., Gabriels, D. and De Boodt, M.* State University of Ghent. Ghent. 91 - 98.
- BRESSON, L.M. and BOIFFIN, J. (1990). Morfological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma*, 47: 301-325.
- BRESSON, L. M. and CADOT, L. (1992). Illuviation and structural crust formation on loamy temperate soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56: 1565 - 1570.
- CERNUDA, C.F., SMITH, R. M. and VICENTE-CHANDLER, J. (1954). Influence of initial soil moisture condition on resistance of macroaggregates to slaking and to waterdrop impact. *Soil Sci.*, 77: 19-27.
- DEXTER, A.R. (1977). Effect of rainfall on the surface micro-relief of tilled soil. *J. of Terramech.*, 14 (1):11-22.
- FAO. (1977). Guía para la descripción de perfiles de suelos. Roma. 70 pp.
- FARREL, D. A. and LARSON, W. E. (1972). Dynamics of the soil-water system during a rainstorm. *Soil Sci.*, 113: 88 - 95.
- FARRES, P. (1985). Feedback relationships between aggregate stability, rainsplash erosion and soil crusting. In: *Assessment of soil surface sealing and crusting*. Edited by *Callebaut, F., Gabriels, D. and DeBoodt, M.* State University of Ghent. Ghent. Belgium, 82 - 90.
- FERNÁNDEZ RUEDA, M. J. (1997). *Características físicas y mecánicas de suelos de cultivo*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña. 283 pp.
- FIES, J. C. et CASTELAO - GEGUNDE, A. M. (1996). Modification de l'espace poral des croûtes de surface sous l'action des pluies et conséquences sur l'infiltrabilité. *Agronomie: Agriculture and Environment*, 16: 367 - 379.

- FIES, J. C. et PANINI, T. (1995). Infiltrabilité et caractéristiques physiques de croûtes formées sur masifs d'aggrégats initialement secs ou humides soumis à des pluies simulées. *Agronomie*, 15: 205-220.
- GOVERS, G. and POESEN, J. (1988). Assessment of the interrill and rill contributions to total soil loss from an upland field plot. *Geomorphology*, 1: 343-54.
- HENIN, S et MONNIER, G. (1956). Evaluation de la stabilité de la structure du sol. *VI Congrès Int. Sci. Sol. AISS*. Paris. 49-52.
- KUIPERS, H. (1957). A relief meter for soil cultivation studies. *Neth. J. Agric. Sci.*, 5: 255-262.
- LE BISSONNAIS, Y. (1988). *Analyse des mécanismes de dégradation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies*. Thèse de Doctorat. Université d'Orléans. 177 pp.
- LE BISSONNAIS, Y., BRUAND, A. and JAMAGNE, M. (1989). Laboratory experimental study of soil crusting: Relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. *Catena*, 16: 377 - 392.
- LE BISSONNAIS, Y., RENAUX, B. and DELOUCHE, H. (1995). Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. *Catena*, 25: 33 - 46.
- McINTYRE, D. S. (1958). Permeability measurements of soil crust formed by raindrop impact. *Soil Sci.*, 85: 185-189.
- MONNIER, G. et STENGEL, P. (1982). La composition granulométrique des sols: un moyen de prévoir leur fertilité. *Bull. Tech. Inf.* (FRA 370.372): 503-512.
- MONNIER, G and BOIFFIN, J. (1986). Effect of the agricultural use of soils on water erosion: the case of cropping systems in western Europe. In: *Soil Erosion in the European Community*, edited by Chisci, G. and Morgan, R.P.C. Balkema, Rotterdam, Boston. 210-217.
- MUALEM, Y., ASSOULINE, S. and ROHDENBURG, R.H. (1990). Rainfall induced soil seal (A) A critical review of observations and models. *Catena*, 17: 185-203.

- MULLINS, C. E., MacLEOD, D. A., NORTHCOTE, K. H., TISDALL, J. M. and YOUNG, I. M. (1990). Hardssetting soils: behavior, occurrence and management. In: *Advances in Soil Science*, 11: 37 - 108.
- PROFFITT, A.P.B. and ROSE, C. W. (1991). Soil erosion processes 1. The relative importance of rainfall detachment and runoff entrainment. *Aust. J. Soil Res.*, 29: 671 - 83.
- ROSE, C. W. (1993). Erosion and sedimentation. In: *Hidrology and water management in the humid tropics: hydrological research issues and strategies for water management*, edited by Bonnell, M., Hufschmidt, M. M. and Gladwell, J. S. Cambridge Univ Press. Cambridge, U. K. 301 - 343.
- ROTH, C. H. and HELMING, K. (1992). Dynamics of surface sealing, runoff formation and interrill soil loss as related to rainfall intensity, microrelief and slope. *Pflanzenernahr. Bodenk.*, 155: 209 - 216.
- SHAINBERG, I., LEVY, G.H., RENGASAMY, P. and FRENKEL, H. (1992). Aggregate stability and seal formation as affected by drops impact energy and soil amendments. *Soil Sci.*, 154:113-119.
- SHARMA, D.P. and AGRAWAL, R.P. (1980). Physiochemical properties of soil crust and their relationship with the modulus of rupture in alluvial soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 28:119-121.
- SLATTERY, M. C. and BRYAN, R. B. (1992). Laboratory experiments on surface seal development and its effect on interrill erosion processes. *J. Soil Sci.*, 43: 517-529.
- SLATTERY, M. C. and BRYAN, R. B. (1994). Surface seal development under simulated rainfall on an actively eroding surface. *Catena*, 22:17-34.
- SUMMER, M. E. and STEWART, B. A. (1992). *Soil Crusting: Chemical and Physical Processes*. In: *Advances in Soil Science*, 20. Lewis Publishers, Chelsea, MI.
- TABOADA CASTRO, M. M. (1998). *Dinámica de la formación de costras superficiales en suelos de cultivo*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña. 92 pp.
- TANAKA, U., YOKIO, Y. and KYUMA, K. (1992). Morphological characteristics of soil surface crust formed under simulated rainfall. *Soil Sci. and Plant Nutrition*, 28: 655 - 664.
- VALENTIN, C and BRESSON, L. M. (1992). Morphology, genesis and classification of surface crust in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 55: 225-245.