

EFFECTO DE LA LLUVIA SOBRE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL E INFILTRACION DEL AGUA EN EL SUELO BAJO DOS SISTEMAS DE LABRANZA*

Esteban S. OSUNA CEJA¹

RESUMEN

En la literatura científica se consigna que la labranza de conservación favorece un incremento en la infiltración y reduce el escurrimiento superficial. Se reporta también que la rugosidad superficial del suelo producida por los diversos sistemas de labranza es un indicador de estabilidad temporal de la estructura del suelo, y es un factor preventivo contra la erosión. El objetivo de este estudio llevado a cabo en la región árida del altiplano Zacatecano-Potosino fue evaluar cuantitativamente el efecto de la energía cinética de lluvia simulada sobre la rugosidad superficial e infiltración de agua en un suelo Cambisol eútrico bajo dos sistemas de labranza en la región árida del altiplano potosino-zacatecano. Los sistemas de labranza evaluados fueron: arado de discos más rastra o labranza tradicional (LT) y labranza cero (NL). En ambos sistemas de labranza se utilizó una doble malla mosquitera (25 mallas) para simular un mantillo de residuos vegetales sobre la superficie; así mismo se aplicaron cuatro niveles de precipitación (40, 120, 200 y 280 mm) por medio de un simulador de lluvia tipo Morín. Los parámetros físicos medidos fueron: rugosidad superficial del suelo (R_o), infiltración (I), escurrimiento (E), energía cinética de la lluvia (E_c) y el espacio poroso del suelo (f). Los resultados obtenidos muestran que la rugosidad superficial del suelo y la infiltración del agua de lluvia disminuyeron conforme se incrementó la energía cinética de la lluvia, por lo que un modelo de tipo exponencial describe la decadencia de los cambios en rugosidad e infiltración en ambos sistemas de labranza. La labranza cero con y sin malla mostró los valores más altos de rugosidad e infiltración y menor escurrimiento en relación con el sistema de labranza tradicional con y sin malla, el cual presentó los valores de rugosidad e infiltración más bajos y por consiguiente mayor escurrimiento.

* Artículo enviado al Comité Editorial Agrícola del INIFAP el 7 de noviembre de 1995.

¹ M.C. Investigador del Campo Experimental Pabellón, CIR-Norte Centro, INIFAP.

SUMMARY

Some reports state that conservation tillage increases water infiltration and reduces surface runoff. It is also reported that soil surface roughness, produced by different tillage systems, is an indicator of temporary stability of the soil structure, and it is a preventive factor to reduce soil erosion. The objective of the present study conducted in a site in the arid region of the San Luis Potosi-Zacatecas highlands was to evaluate quantitatively the effect of the kinetic energy of simulated rainfall on surface roughness and water infiltration of a eutric Cambisol soil under two tillage systems. The tillage systems studied were: plowing plus disking, or traditional tillage (TT), and Zero tillage (ZT). In both tillage systems a double screen (25 screens) was used to simulate a crop residues cover on the soil surface. Four rainfall amounts were applied (40, 120, 200 and 280 mm) using the Morin type rainfall simulator. The physical parameters measured were: surface roughness of the soil (R_o), infiltration (I), runoff (E), kinetic energy of the rainfall (E_c) and pores space of the soil (f). Results show that soil surface roughness of the soil and infiltration of the rainfall water decreased as kinetic energy of the rainfall increased. This behavior was described by an exponential model, which also describes the changes in surface roughness and infiltration in both tillage systems. Zero tillage system with and without screen showed the highest values of roughness and infiltration, and lower runoff values than traditional tillage system with and without screen, which showed the lowest values of surface roughness and infiltration, and therefore the highest runoff values.

INTRODUCCION

Los sistemas de labranza de conservación son aquellos en los que se mantiene una cantidad adecuada de residuos de cosecha en la superficie del suelo o cerca de ella; también se consideran dentro de estos sistemas a aquellos que producen y mantienen una rugosidad alta en el suelo con la finalidad de controlar la erosión hídrica y eólica, y mejorar las relaciones agua-suelo.

De la década de 1950 a la fecha se han realizado numerosas investigaciones que han demostrado que se puede reducir la erosión del suelo, tanto hídrica como eólica, mediante sistemas de labranza de conservación, Wischmeier y Smith (17), 1978, y mejorar las relaciones agua-suelo, especialmente cuando los residuos de los cultivos se mantienen en la superficie o cerca de ella, y cuando existe una rugosidad superficial alta producida por los diferentes sistemas de labranza, Johnson *et al.* (10), 1979; Huang y Bradford (9), 1992.

La agricultura de secano, también llamada de temporal, consiste en el cultivo de tierras aprovechando solamente las precipitaciones pluviales, y se practica en un alto porcentaje en la zona semiárida del norte-centro del país. La irregular distribución espacial y temporal de la lluvia en esta zona ha obligado a desarrollar prácticas de captación y conservación de humedad

capaces de compensar la escasez de agua, evitar el escurrimiento superficial, y de esta forma lograr el aprovechamiento óptimo de este recurso. Una parte de la lluvia que es interceptada por la cobertura vegetal posteriormente se pierde por evaporación. Suponiendo una intensidad de lluvia i , variable o constante sin almacenamiento en microdepressiones, algunos investigadores, Rubin (15), 1966 y Mein y Larson (12), 1973, indicaron que las tasas de intensidad de lluvia (i), infiltración (f), escurrimiento (r) y la capacidad de infiltración (f_p) se relacionan bajo tres posibilidades:

a) Si $i < f_p$ entonces $f = i$ $f < f_p$ $r = 0$

b) Si $i = f_p$ entonces $f = i$ $f = f_p$ $r = 0$

c) Si $i > f_p$ entonces $f = f_p$ $i > f$ $r = i - f_p$

El escurrimiento superficial en una cuenca determinada depende de la lluvia, infiltración y rugosidad superficial. Todos los fenómenos pueden avanzar a velocidades diferentes dependiendo de las condiciones físicas del suelo. Por ejemplo, si la lluvia excede la capacidad de infiltración, el agua se almacenará en las microdepressiones superficiales y será drenada. Es por eso que la conductividad hidráulica ($di/dt = K_0$) se encuentra asociada con el tiempo de inicio de escurrimiento, ya que en un evento de lluvia primero se moja el suelo y después ocurre el cambio en la configuración del terreno con su consecuente almacenamiento.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la energía cinética de la lluvia sobre la rugosidad superficial e infiltración del agua en un suelo Cambisol eútrico bajo dos sistemas de labranza, en la región árida del altiplano potosino-zacatecano.

REVISION DE LITERATURA

La estructura del suelo se ha definido como el arreglo espacial de las partículas sólidas (agregados), la fase porosa y las relaciones entre ellas, Figueroa (6), 1979. El tamaño y la forma de los poros dependen del tamaño y la forma de las partículas y su arreglo dentro del suelo. En suelos con buen contenido de materia orgánica, las partículas primarias tienden a formar agregados o partículas secundarias espontáneamente. Sin embargo, es la

estabilidad y cimentación de las partículas en agregados la que determina la estabilidad y naturaleza de la fracción porosa del suelo ante cambios naturales y artificiales, Bolaños (1), 1989.

El arreglo geométrico y topológico de los poros que se forman entre los agregados del suelo y su estabilidad en tiempo y espacio ante cambios de humedad, labranza, temperatura, etc., determinan las características físicas relacionadas con la productividad agronómica del suelo, Figueroa y Ventura (7), 1990. El espacio poroso determina la facilidad del flujo de agua a través del medio y la cantidad de agua que el medio puede almacenar, controlando procesos como infiltración, redistribución, evaporación superficial, drenaje, absorción de agua por raíces, etc. La porosidad, además, influye en la aireación de los suelos, la compactación, el encostramiento superficial, la penetración y proliferación radicular, Elwell (5), 1989; Messing y Jarvis (13), 1990.

En general los sistemas de labranza crean diferentes condiciones de rugosidad superficial al suelo cuando éstos son laboreados; es por eso que investigadores como Burwell y Larson (2), 1969; Johnson *et al.* 1979; Steichen (16), 1984; Zobeck y Onstad (18), 1987; Elwell (5) 1989, han considerado a la rugosidad superficial como un medio de clasificación de sistemas de labranza, aunque también se ha utilizado para explicar las variaciones en erosión de suelo, escurrimiento superficial y propiedades físicas provocadas por la labranza, Elwell (5), 1989.

La rugosidad superficial es comúnmente medida con un rugosímetro de contacto o de manera electrónica (por medio de rayo láser) y se expresa estadísticamente en términos de desviación estándar obtenida de las diferencias de medidas en elevaciones en la superficie del terreno, Elwell (5), 1989; Huang y Bradford (9), 1992.

Existe una interacción entre la labranza que acondiciona el suelo y la cobertura superficial que lo protege. La labranza, que inicialmente incrementa la capacidad de infiltración, tiene un limitado efecto cuando la energía cinética de la lluvia empareja y encharca la superficie del suelo. No obstante, la cobertura superficial puede absorber mucha de la energía de la lluvia y eso ayuda a mantener el potencial para una alta infiltración, Steichen (16), 1984.

Laflen y Colvin (11), encontraron en 1981 efectos de interacción entre los residuos de cosecha, tipo de cultivos, suelo y pendiente del terreno en relación con la pérdida de suelo. El volumen de escurrimiento de la lluvia

simulada fue similar para la labranza cero y para el tratamiento con arado de vertedera; mientras que el arado de cinceles tuvo un 20% menos de escurrimiento que labranza cero y barbecho (arado de vertedera).

Steichen (16), estudió en 1984 la influencia de cuatro sistemas de labranza sobre la infiltración de agua de lluvia y encontró que los sistemas de labranza evaluados provocaron diferentes incrementos en la rugosidad superficial y espacios porosos en el suelo, lo cual repercutió en un incremento en la infiltración del agua de lluvia antes del inicio del escurrimiento. Por consiguiente, determinó que la rugosidad superficial puede ser un factor significativo y determinante para incrementar la infiltración en los suelos desnudos (sin cobertura superficial). Este autor concluyó que los sistemas de labranza que provocaron una rugosidad alta incrementaron la infiltración antes del escurrimiento cuando fueron comparados con una superficie plana. Sin embargo, después de iniciado el escurrimiento, la rugosidad fue abatida por la energía cinética de la lluvia, encontrando muy poca diferencia entre sistemas de labranza.

Una rugosidad superficial áspera es quebrada gradualmente y aplanada por la energía de la gota de lluvia. Dexter (4), midió en 1977 la rugosidad del suelo y consignó una relación muy estrecha entre la rugosidad superficial del suelo y la energía cinética de la lluvia natural ocurrida durante un año en Australia. Encontró que el decrecimiento en la rugosidad superficial por la energía cinética acumulada después de la labranza puede ser ajustada a una ecuación lineal o una exponencial. Johnson *et al.* (10), también evaluaron en 1979 la rugosidad superficial y energía cinética de la lluvia, encontrando que el abatimiento de rugosidad superficial provocada por la energía cinética de la lluvia fue ajustada a un modelo de tipo exponencial.

La importancia de la energía cinética y su efecto sobre el escurrimiento superficial y pérdidas de suelo es bien conocida. Por tanto, la rugosidad superficial del suelo desempeña un papel muy importante en el abatimiento de estos fenómenos. Elwell (5), mostró en 1989 que una labranza reciente, burda y superficie porosa permite mayor infiltración de agua de lluvia que una superficie plana. Este autor encontró que algunos suelos labrados con alta rugosidad pueden absorber la mayor parte de la energía potencial de la lluvia que ocurre desde el inicio de la temporada de lluvias hasta antes del establecimiento de la cobertura vegetal del cultivo que está desarrollándose.

MATERIALES Y METODOS

La presente investigación se desarrolló en la región árida del altiplano potosino-zacatecano, en el ejido "La Palma Pegada", municipio de Salinas de Hidalgo, S.L.P., entre los paralelos 22° 42' 30" latitud norte y 101° 47' 40" longitud oeste, con una elevación aproximada de 2 100 msnm. El clima de la región corresponde a un BSoK(w), de acuerdo con Köpen modificado por García (8), 1974, con precipitación media anual de 400 mm distribuida principalmente de junio a septiembre, y temperatura media anual entre 16° y 17°C. El suelo es un Cambisol eútrico (Be), DETENAL (3), 1971, es de textura migajón arenoso en la parte superficial, con 1.2% de materia orgánica, un pH de 7.2, bajo contenido de sales solubles (0.009mmho.cm⁻¹), con una capacidad de retención de humedad de 15.7 y PMP 7.99%, profundidad del perfil de 50 cm, y una densidad real y aparente de 2.55 y 1.50 gr.cm⁻³, respectivamente.

Los sistemas de labranza estudiados fueron: a) barbecho con arado de vertedera a 25 cm de profundidad, más un paso de rastra de discos a 10 cm de profundidad (labranza tradicional), y b) cero labranza. En ambos sistemas de labranza se fraccionaron cinco lotes de 1.25m² (área de mojado que cubre el simulador de lluvias) con dos repeticiones. Cuatro de ellos tuvieron superficie completamente desnuda (sin malla, SM) y uno fue cubierto con una doble malla (con malla, CM) tipo mosquitero para simular una cubierta vegetal. En cada lote se aplicaron niveles de precipitación de 40, 120, 200 y 280 mm, respectivamente, durante 30 minutos, con un simulador de lluvia tipo Morin, cuyas características son descritas detalladamente por Osuna (14), 1987. Las aplicaciones de lluvia se realizaron con intervalos de 24 horas después de iniciada la primera simulación, con una intensidad de 80.27 mmh⁻¹, para cada uno de los eventos. De acuerdo con la ecuación de Wischmeier y Smith (17), 1978, la energía cinética de la lluvia fue de 2 331.89 Jm⁻².

La energía cinética de los diferentes niveles de precipitación se estimó mediante una ecuación empírica, en unidades métricas propuesta por Wischmeier y Smith (17) en 1978, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$E_c = 210 + 89 \log_{10} I, \text{ Jm}^{-2} \text{ mm}^{-1}. \quad (1)$$

Donde E_c es la energía cinética disipada por metro cuadrado de suelo por intensidad de lluvia (I) mmh⁻¹.

Los valores reportados al aplicar la ecuación a los cuatro niveles de precipitación fueron: 1 162, 3 495, 5 825 y 8 155 Jm^{-2} , respectivamente.

El escurrimiento fue colectado del terreno a través de una manguera conectada a una bomba de vacío y ésta lo transportaba a un tanque para medir el volumen escurrido. Las observaciones que se realizaron en cada uno de los niveles de precipitación evaluados en los dos sistemas de labranza fueron: rugosidad superficial del suelo (R_o), medida antes y después de que se realizó la labranza y después de cada tratamiento de lluvia aplicado. La rugosidad se midió dentro del área efectiva (1.25 m^2) que cubrió la lluvia uniformemente. En dicha área se trazó un transecto de 110 cm a lo largo de cada parcela y se utilizó un rugosímetro de contacto que se compone de 120 agujas debidamente acomodadas en forma lineal y a espacios de 0.5 cm. Las agujas se acomodaron en 1 metro dentro del área efectiva y éstas caen verticalmente, en esta forma la rugosidad se midió cada 10 cm a través de todo el transecto, sumando un total de 11 lecturas de rugosidad en cada parcela. La rugosidad fue analizada como la desviación estándar obtenida de las diferencias de medidas en elevaciones sobre la superficie del terreno. Este método de estimación de rugosidad es descrito con mayores detalles por Dexter (4), 1977.

La infiltración antes de la aplicación de lluvia se midió por el método del infiltómetro, y después de la aplicación de lluvia se determinó a partir de la diferencia entre la intensidad de la lluvia y el escurrimiento ocurrido en cada evento.

$$I = \text{Int} (\text{cmh}^{-1}) - \text{Esc.} (\text{cmh}^{-1}) \quad (2)$$

A partir de los resultados obtenidos se elaboraron las curvas para cada sistema de labranza con los diferentes niveles de aplicación de la lluvia.

El espacio poroso inicial (f) se calculó mediante la ecuación 3.

$$f = (1 - D_a/2550) * A \quad (3)$$

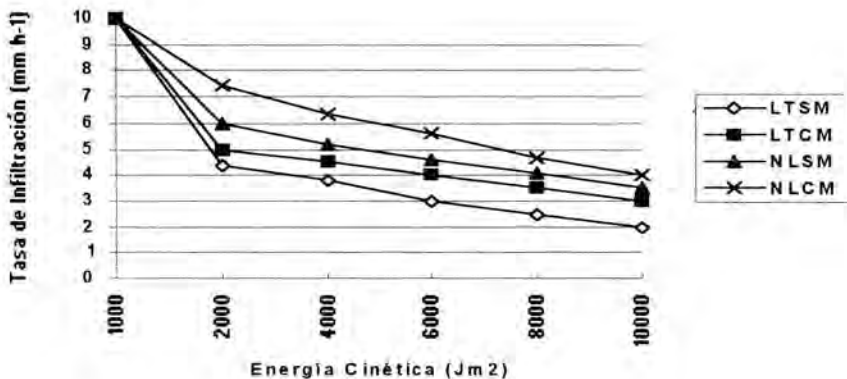
Donde D_a es la densidad aparente en Kg.m^{-3} y A es la profundidad de labranza, la cual fue de 25 cm para labranza tradicional. Los cambios de elevación media de la superficie del terreno se denotó como ΔZ .

RESULTADOS Y DISCUSION

Escurrimiento e infiltración

La variación en el escurrimiento superficial y la infiltración del agua en el suelo para cada aplicación de lluvia simulada para los dos sistemas de labranza se muestran en la Figura 1. Los resultados indican que existió un menor escurrimiento y una mayor infiltración en los cuatro niveles de energía cinética aplicada en el sistema de labranza cero (NL), en comparación el de labranza tradicional (LT). Así mismo, en ambos sistemas de labranza, a medida que aumentó la energía cinética (E_c) aplicada, disminuyó la infiltración y como consecuencia se incrementó el volumen de escurrimiento.

A

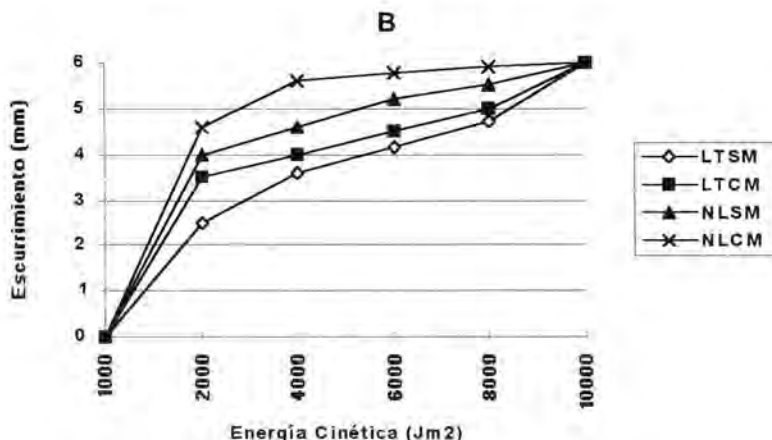


$$LTSM \ i = 349.92 \ E_c^{-.572} \ R^2=0.95$$

$$LTCM \ i = 354.92 \ E_c^{-.550} \ R^2=0.99$$

$$NLSM \ i = 287.86 \ E_c^{-.532} \ R^2=0.99$$

$$NLCM \ i = 227.76 \ E_c^{-.487} \ R^2=0.95$$



$$\text{LTSM } E = -14.16 + 2.27(\text{LnEc}) \quad R^2 = .91$$

$$\text{LTCM } E = -16.93 + 2.53(\text{LnEc}) \quad R^2 = .95$$

$$\text{NLSM } E = -15.06 + 2.33(\text{LnEc}) \quad R^2 = .95$$

$$\text{NLCM } E = -15.75 + 2.35(\text{LnEc}) \quad R^2 = .96$$

Figura 1. Relación de energía cinética vs. tasa de infiltración (A) y vs. escurrimiento superficial (B), bajo dos sistemas de labranza.

Lo anterior se explica porque al aplicar lluvia continua sobre el suelo labrado, la rugosidad superficial de éste se va quebrando gradualmente de acuerdo con la capacidad de la energía cinética aplicada, ya que el golpe de las gotas de lluvia tiende a producir un "achatamiento" de la rugosidad superficial del terreno. En los primeros instantes, después de humedecido el suelo, este fenómeno se hace importante pero disminuye posteriormente en forma brusca. Este problema se acentúa más en LT porque el suelo fue laboreado y hubo mayor destrucción de agregados, los cuales presentaron menor resistencia al impacto directo de la gota de lluvia. Este proceso involucra una menor infiltración del agua a través del perfil y por lo tanto un mayor escurrimiento superficial.

Las diferencias apreciables de infiltración y escurrimiento entre ambos sistemas de labranza se debieron en gran parte a la condición del terreno, que presentaba una mayor rugosidad en NL que en LT, como se observa en la Figura 1. No obstante, las diferencias de estos parámetros también se debieron, entre otras razones, a que la energía cinética de las gotas de lluvia al disiparse en la superficie del terreno generó un rompimiento de los

agregados del suelo y redujo la porosidad superficial, dando lugar a un proceso de encostramiento en la superficie que reduce la conductividad hidráulica y por consiguiente la infiltración, y aumenta en el mismo orden el escurrimiento superficial.

De la discusión anterior se concluye que la porosidad disminuyó en la superficie del suelo después de las aplicaciones de lluvia y energía cinética acumulada. Esto se pudo verificar en el análisis del espacio poroso (f) y rugosidad superficial del suelo (R_o), donde se observó que f y R_o tienden a disminuir conforme aumenta la energía cinética acumulada. Por lo tanto, cabe destacar que la infiltración en NL fue mayor que en LT, debido a que f y R_o fueron menos afectadas por la E_c de la lluvia (Cuadro 1).

El tratamiento de doble malla (donde se simuló una cubierta vegetal) mostró mayor infiltración en ambos sistemas de labranza; sin embargo, esta mayor infiltración se vio más favorecida en NL debido a que la doble malla disipó la energía de las gotas de lluvia y por esta razón los cambios en R_o y en la estructura del suelo fueron menores, como se puede observar en el Cuadro 1.

La infiltración acumulada antes del inicio del escurrimiento se presenta en la Figura 2. Con el objeto de detectar si las diferencias observadas eran significativas, se realizó un análisis de varianza, el cual indicó una diferencia significativa ($P=0.05$) en infiltración entre los tratamientos con malla y los tratamientos sin malla en ambos sistemas de labranza. El tratamiento con malla en el sistema de NL tuvo significativamente más infiltración ($P=0.05$) que los tratamientos descubiertos en ambos sistemas de labranza. Entre los tratamientos sin malla la labranza cero también tuvo mayor volumen infiltrado, pero las diferencias entre ambos sistemas de labranza sin malla no fueron estadísticamente significativas.

Por otro lado, se correlacionó la infiltración acumulada antes de que iniciara el escurrimiento con f y R_o . Para el tratamiento con malla se encontró una alta correlación entre la infiltración acumulada con la rugosidad superficial y el espacio poroso. Los coeficientes de correlación fueron 0.97 para infiltración acumulada vs f y de 0.98 para infiltración acumulada vs R_o . Se encontró una correlación no significativa para los tratamientos sin malla.

CUADRO 1. CAMBIOS EN EL ESPACIO POROSO Y RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN LOS DIFERENTES NIVELES DE ENERGIA CINETICA EN UN SUELO CON Y SIN MALLA BAJO DOS SISTEMAS DE LABRANZA.

Sist. de labranza	Medida (cm)	A.L.	D.L.	A*	B*	C*	D*
Itsm	f^a	9.4	10.3	10.0	9.6	9.0	8.5
	Ro	1.6	1.3	1.0	0.9	0.8	0.7
	ΔZ		+0.9	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6
Itcm	f	10.3	10.3	10.3	10.1	9.9	9.5
	Ro	1.6	1.3	1.27	1.16	1.03	0.90
	ΔZ		+0.9	-0.03	-0.14	-0.27	-0.40
nlsm	f	9.4	9.4	9.4	9.3	9.2	9.0
	Ro	1.6	1.6	1.55	1.5	1.46	1.4
	ΔZ		0.0	-0.03	-0.09	-0.1	-0.2
nlcm	f	9.4	9.4	9.38	9.33	9.25	9.15
	Ro	1.6	1.6	1.58	1.55	1.52	1.50
	ΔZ		0.0	-0.02	-0.05	-0.05	-0.10

Itsm = labranza tradicional sin malla, Itcm = labranza tradicional con malla, nlsm = labranza cero sin malla y nlcm = labranza cero con malla; A.L. = antes de la labranza y D.L. = después de la labranza; f^a = espacio poroso; Ro = rugosidad superficial y ΔZ = cambio en la elevación media del terreno; * = tratamiento de energía cinética, 1162; 3495; 5825 y 8155 Jm⁻²

Rugosidad superficial (R_o)

Los valores de R_o medidos en este estudio resultaron similares a los reportados por otros autores para el caso del sistema de labranza tradicional. Por ejemplo, R_o en el sistema de barbecho tradicional fue de 1.13 cm; Steichen (16), en 1984 reportó un valor de R_o de 1.09 cm para un sistema de labranza similar. Sin embargo, el valor de R_o para el sistema de labranza cero fue de 1.27 cm, el cual difiere de los valores de 0.5 y 0.7 cm reportados por Burwell y Larson (2), en 1969 y Steichen (16), en 1984. Esta alta rugosidad encontrada en el sistema de NL se atribuye a que este terreno estuvo ocupado por un cultivo el ciclo anterior, por lo que el surco quedó formado después de la cosecha, lo cual provocó este incremento. La rugosidad superficial en ambos sistemas de labranza fue cambiando gradualmente entre aplicaciones de lluvia, como ya se mencionó anteriormente.

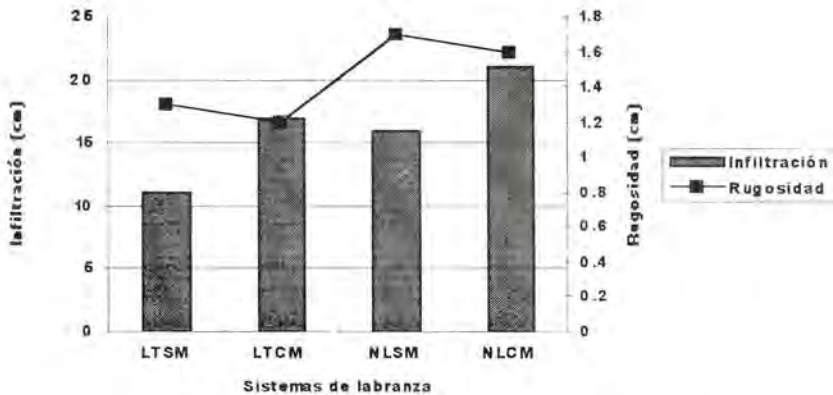


Figura 2. Infiltración acumulada previo al escurrimiento y rugosidad inicial bajo dos sistemas de labranza con y sin malla.

La R_o del suelo fue medida antes y después de la aplicación de lluvia, de donde se obtuvo una gráfica de R_o vs. energía cinética de la lluvia para el suelo descubierto en los dos sistemas de labranza. En la Figura 3 puede observarse una relación inversa entre R_o y la energía cinética, por lo que una función de tipo exponencial describe los cambios en R_o para los sistemas de labranza estudiados. Lo anterior se pudo comprobar ya que algunos investigadores han reportado en la literatura mundial que la relación entre R_o

y la energía cinética de la lluvia es plenamente descrita por modelos de tipo lineal y/o exponencial, Dexter (4), 1977; Johnson *et al.* (10), 1979 y Steichen (16), 1984.

$$R_o = A - BE \quad (4)$$

Donde R_o es la rugosidad superficial (cm), A es el intercepto (cm), B es la pendiente ($\text{cm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{J}^{-1}$), y E es la energía cinética de la lluvia ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$), y

$$R_o = A \exp (E/G) \quad (5)$$

Donde G es la pendiente inversa de forma semilogarítmica ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$).

CUADRO 2. PARAMETROS DEL MODELO EXPONENCIAL* QUE EXPLICA LOS CAMBIOS DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DE UN SUELO CAMBISOL EUTRICO BAJO DOS SISTEMAS DE LABRANZA Y DIFERENTES TRATAMIENTOS DE ENERGIA CINETICA.

Sistemas de labranza	A (CM)	G ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)	In A	E. Std In A	1/G	E. Std 1/G
lt	1.13	-463	0.122	0.023	-0.0022	0.00037
nl	1.27	-14003	0.239	0.016	-0.0001	0.00026

* [$R_o = A \exp (E/G)$]; lt = Labranza tradicional y nl = Labranza cero

No obstante, la ecuación lineal presenta el inconveniente de predecir valores de R_o cercanos o iguales a cero después de una cantidad dada de energía cinética de lluvia igual a A/B . En la práctica un valor de R_o menor de 0.5 cm no puede ser medido. Por lo tanto, el modelo exponencial probablemente predice valores de R_o más congruentes con la realidad.

Los datos graficados en la Figura 3 fueron ajustados a un modelo exponencial, donde los valores de A y G del modelo (5) se presentan en el Cuadro 2. La pendiente y el intercepto para ambos sistemas de labranza fueron probados contra la hipótesis nula $1/G = 0$ y $A = 0$ y fueron significativamente diferentes

de cero ($P > 0.95$). Al comparar las pendientes entre sistemas de labranza se encontró que la labranza tradicional fue estadísticamente diferente a la labranza cero, así como también sus interceptos. En el mismo Cuadro 2 se muestran los interceptos y pendientes estimados y sus respectivos errores estándar. Así, por ejemplo, se puede decir que la energía cinética que se necesita para degradar la rugosidad superficial de un suelo labrado y uno no labrado y dejarlo prácticamente liso ($R_o = 0.50$ cm) es de $17\ 144$ Jm^{-2} para el caso de la LT y $30\ 155$ Jm^{-2} para NL, en este caso considerando los surcos del cultivo anterior.

Al comparar los parámetros del modelo exponencial encontrado en este estudio (suelo de textura migajón arenosa) con los reportados por Steichen (16), en 1984 para un suelo franco limoso, se encontró que la rugosidad superficial del tratamiento tradicional de Steichen (barbecho más rastra) fue prácticamente igual ($A = 1.09$ cm comparado con 1.13 cm), aunque la velocidad de decadencia de R_o es más alta en el tratamiento de Steichen ($G = -7\ 880$ Jm^{-2} comparado con -463 Jm^{-2}).

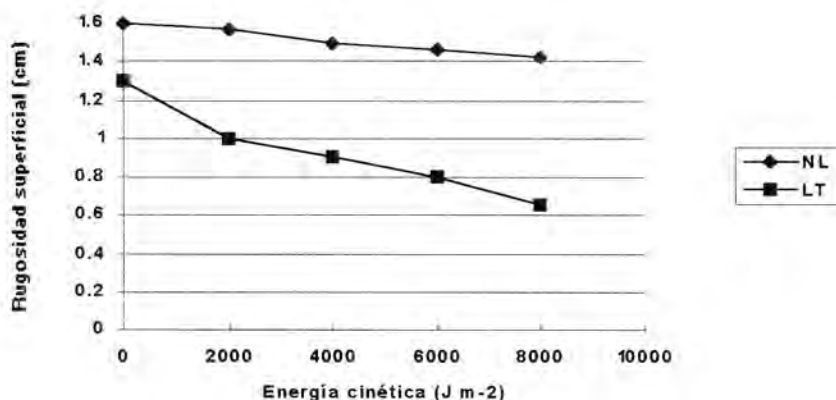


Figura 3. Relación de la energía cinética vs. rugosidad superficial bajo dos sistemas de labranza.

En el caso del sistema de labranza cero, el mismo autor obtuvo $A = 0.67$ cm comparado con $A = 1.27$ cm. Para el primer caso $G = -12\ 390$ Jm^{-2} comparado con $G = -14\ 003$ Jm^{-2} , por lo que puede concluirse que la velocidad de decadencia de R_0 en ambos casos fue prácticamente similar; la diferencia de R_0 que se observa entre tratamientos obedece a la formación de surcos dejados después de la cosecha del cultivo anterior en este estudio.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos y de acuerdo con el objetivo planteado en el presente estudio se llegó a las siguientes conclusiones:

1. El sistema de labranza cero con y sin malla mostró los valores más altos de rugosidad e infiltración y menor escurrimiento en comparación con el sistema de labranza tradicional con y sin malla, que presentó los valores de rugosidad e infiltración más bajos y por consiguiente mayor escurrimiento.
2. Los cambios de la rugosidad superficial del suelo laboreado y no laboreado expuestos a la energía cinética de la lluvia simulada son plenamente descritos por una función exponencial.
3. En las zonas áridas y semiáridas de México las prácticas de labranza de conservación deben constituir un mayor esfuerzo para reducir la erosión del suelo y el escurrimiento, ya que generalmente estas prácticas incrementan la rugosidad superficial y mantienen los residuos vegetales sobre la superficie, condiciones que incrementan la infiltración. La relación de la decadencia de la rugosidad superficial causada por la energía cinética ayuda a predecir el potencial efectivo de la rugosidad superficial sobre el escurrimiento y control de la erosión.

LITERATURA CITADA

1. Bolaños, J. 1989. *Suelos en relación a labranza de conservación: Aspectos físicos*. Memoria de Labranza de Conservación en Maíz. CIMMYT-PROCIANDINO. p. 19-17.
2. Burwell, R.E. and Larson, W.E. 1969. Infiltration as influenced by tillage induce random roughness and pore space. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33:449-452.

3. DETENAL. 1971. *Carta F14A61 de edafología*. México. Secretaría de Programación y Presupuesto. Departamento de Estudios del Territorio Nacional.
4. Dexter, A.R. 1977. Effect of rainfall on the surface microrelief of tilled soil. *J. Terramechanics*. 14: 11-22.
5. Elwell, H.A. 1989. Modelling clod breakdown by rainfall energy on a fersiallitic clay soil. *Soil Tillage Res.* 14: 241-257.
6. Figueroa, S.B. 1979. *A study of the physical stability of soil aggregates and its relevance to water erosion*. Ph.D. Thesis. University of Sidney, Australia.
7. Figueroa, S.B. y Ventura R., E. Jr. 1990. *Proyecto para el estudio del efecto de la labranza en la estructura del suelo y su relación con el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos*. Salinas, S.L.P. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (Serie: Documentos Técnicos de la Red de Conservación de Suelo y Agua 1).
8. García, E. 1974. *Modificación al sistema de clasificación de Köppen*. México, Universidad Nacional Autónoma de México. p. 7-51.
9. Huang, C. and Bradford, J.M. 1992. Applications of a laser scanner to quantify soil microtopography. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:14-21.
10. Johnson, C.B., Mannering, J.V. and Moldenhauer, W.C. 1979. Influence of surface roughness and clod size and stability on soil and water losses. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43:772-777.
11. Lafflen, J.M. and Colvin, T.S. 1981. Effect of crop residue on soil loss from continuous row cropping. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 24:605-609.
12. Mein, R.G. and Larson, C.L. 1973. Modelling infiltration during a steady rain. *Water Res.* 9 (2): 1284-1288.
13. Messing, I. and Jarvis, N.J. 1990. Seasonal variation in field-saturated hydraulic conductivity in two swelling clay soils in Sweden. *J. Soil Sci.* 41:229-237.
14. Osuna, C.E.S. 1987. *Efecto de la lluvia sobre las propiedades físicas de los suelos laboreados*. Tesis M.C. Montecillos, Méx. Colegio de Postgraduados. 182 p.
15. Rubin, J. 1966. Theory of rainfall uptake by soils initially drier than their field capacity and its applications. *Water Resour. Res.* 2:739-749.
16. Steichen, J.M. 1984. Infiltration and random roughness of a tilled and untilled claypan soil. *Soil Tillage Res.* 43:251-267.
17. Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. 1978. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. (Agriculture Handbook No. 537). Washington, D.C., USDA-SEA. 58 p.

18. Zobeck, T.M. and Onstad, C.A. 1987. Tillage and rainfall effects on random roughness: a review. *Soil Tillage Res.*, 9:1-20.