

PÉRDIDA DE SUELO Y RELACIÓN EROSIÓN-PRODUCTIVIDAD EN CUATRO SISTEMAS DE MANEJO DEL SUELO

Soil Loss and Erosion-Productivity Relationships in Four Soil Management Systems

Néstor Francisco-Nicolás^{1†}, Antonio Turrent-Fernández², José Luis Oropeza-Mota³,
Mario Roberto Martínez-Menes³ y José Isabel Cortés-Flores³

RESUMEN

En sistemas agrícolas tropicales, la erosión hídrica pone en riesgo su sostenibilidad porque disminuye la infiltración, la fertilidad y la productividad. El objetivo fue evaluar la pérdida de suelo, la productividad y estabilidad del maíz, y la relación erosión-productividad. Se instalaron lotes de escurrimiento de 50 m², con el cultivo doble de maíz de primavera-verano (P-V) con sucesión de otoño-invierno (O-I), en un Entisol con 14.6% de pendiente, en Los Tuxtlas, Veracruz, México. Los sistemas de manejo fueron: a) labranza de conservación (LC), b) terrazas de muro vivo con tracción animal y 1 m de desnivel (TMV-TA), c) terrazas de muro vivo con tracción mecánica y 1 m de desnivel (TMV-TM), y d) labranza tradicional con quema de rastrojo y roturación mecánica (LT). De 1995 a 2002, las pérdidas de suelo fueron de 0.85, 2.16, 9.62 y 146.24 t ha⁻¹ año⁻¹, los coeficientes de escurrimiento fueron de 13.9, 13.8, 14.7 y 27.7%, las concentraciones de sedimentos fueron de 338, 812, 3761, 29 522 mg L⁻¹ y las relaciones erosión-productividad fueron de 0.2, 0.4, 2.3 y 35.5 t de suelo perdido por t de maíz producido en LC, TMV-TA, TMV-TM y LT, respectivamente. TMV-TA superó a LC, TMV-TM y LT en 690, 820 y 830 kg ha⁻¹ de rendimiento de grano anual, respectivamente; respuesta explicada porque en la sección alta del terreno y en el ciclo P V, TMV-TA superó significativamente a los demás sistemas. Sin embargo, en el ciclo O-I, el mismo sistema sólo superó al testigo, para condiciones de humedad limitativas de producción.

Asimismo, TMV-TA se asoció con estabilidad aceptable del rendimiento. Los resultados indican que LT limitó en mayor escala la sostenibilidad del recurso suelo; mientras que, TMV-TA constituyó el manejo pro-sostenible en condiciones tropicales, con alta intensidad y cantidad de precipitación, terrenos con pendientes pronunciadas y suelo mal drenado.

Palabras clave: terraza de muro vivo, labranza de conservación, pérdida de productividad, manejo de laderas.

SUMMARY

Water erosion is a threat to sustainability of tropical farming systems because it decreases water infiltration, lowers both soil fertility and crop productivity. Conventional run off plots (2 m wide by 25 m long) were installed on a 14.6% slope Entisol in Los Tuxtlas, Veracruz, Mexico, to measure soil loss as well as losses in crop productivity and stability of double-cropped maize. Four soil management systems were tested: a) conservation tillage (CT), b) live tree hedgerow terraces, one meter apart vertically, with light tillage (LTHT-LT), c) live tree hedgerow terraces, one meter apart vertically, with heavy tillage (LTHT-HT), and d) conventional tillage, all crop residues burned (COT). Soil losses averaged 0.85 t ha⁻¹ yr⁻¹ for CT, 2.16 t ha⁻¹ yr⁻¹ for LTHT-LT, 9.62 t ha⁻¹ yr⁻¹ for LTHT-HT, and 146.24 t ha⁻¹ yr⁻¹ for COT. Runoff coefficients were 13.9% for CT, 13.8% for LTHT-LT, 14.7% for LTHT-HT, and 27.7% for COT. Sediment concentrations were 338, 812, 3761, and 29 522 mg L⁻¹; and environmental costs were 0.2, 0.4, 2.3, and 35.5 ton of soil lost per ton of maize produced, respectively, with systems CT, LTHT-LT, LTHT-HT, and COT. System LTHT-LT was associated with higher yields of maize grain as compared to other systems: 0.69t ha⁻¹ over CT, 0.82 t ha⁻¹ over LTHT-HT, and 0.83 t ha⁻¹ over COT. Yield associated to LTHT-LT in the higher section of the experimental site was significantly higher than yields of all other systems in

¹ Campo Experimental Papaloapan, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 95641 Cd. Isla, Veracruz, México.

[†] Autor responsable (francisco.nestor@inifap.gob.mx)

² Campo Experimental Valle de México, INIFAP. 56230 Chapingo, estado de México.

³ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

the spring-summer season, while only the yield difference to COT remained significant in the soil moisture deficient winter-spring season. LTHT-LT system was associated with the highest yield stability. COT was the least sustainable system. This information is relevant to tropical rainy conditions, high rainfall intensity, steep slopes, and poorly drained soils.

Index words: live tree hedgerow terrace, conservation tillage, productivity loss, hillslope management.

INTRODUCCIÓN

En la región de Los Tuxtlas, Veracruz, México los agricultores practican el cultivo doble de maíz con sucesión en laderas, en una superficie de 50 000 ha. El sistema de cultivo está asociado a quema de residuos de cosecha, laboreo y siembra en el sentido de la pendiente; prácticas que propician alto grado de escurrimiento y de erosión. Estos procesos disminuyen la infiltración y la fertilidad del suelo, como consecuencia decrece el rendimiento de maíz del ciclo otoño-invierno, dejándose de sembrar en este ciclo por su baja productividad. Al aumentar la degradación del suelo, también se interrumpe la siembra de maíz del ciclo primavera-verano, entonces, los terrenos descansan un periodo de cuatro años para que recuperen su fertilidad.

En el mundo, la erosión hídrica es el principal problema de degradación del suelo y se estima que 562 millones de hectáreas presentan erosión hídrica moderada o severa (Craswell, 1993). En México, 32 millones de hectáreas presentan erosión severa a muy severa (SEMARNAP, 1996).

El monocultivo de maíz es más susceptible a la erosión hídrica que una rotación. Gantzer *et al.* (1991), en una rotación de cultivos durante 74 años, encontraron una pérdida promedio de 12.4 cm de suelo; mientras que, durante 60 años con monocultivo de maíz, se perdieron 22 cm de suelo. Paningbatan *et al.* (1995), con tecnología tradicional observaron pérdidas anuales de suelo de 100 a 200 t ha⁻¹; en cambio, en el sistema de cultivo en callejones (SCC), la pérdida disminuyó hasta 5 t ha⁻¹. Sin embargo, Poudel *et al.* (1999) encontraron altas pérdidas de suelo, tanto con la tecnología del agricultor (65.3 t ha⁻¹ año⁻¹), como en el SCC (45.4 t ha⁻¹ año⁻¹). Estos estudios sugieren que no existe una respuesta general sobre el control de la erosión con

el SCC. Mueller *et al.* (1984) encontraron pérdidas de suelo de 3.8 t ha⁻¹ año⁻¹ en labranza convencional y de 0.8 t ha⁻¹ año⁻¹ en no labranza.

Estudios sobre pérdida de productividad del cultivo de maíz asociada a erosión indican que el rendimiento de grano de maíz decrece en función de años en la producción del suelo. Pérez-Nieto *et al.* (1998) encontraron que la tasa anual de pérdida de rendimiento de grano de maíz fue de 3.4 y 70 kg ha⁻¹ año⁻¹, para Faeozem y Leptosol, respectivamente. Asimismo, el rendimiento de maíz disminuye con la pérdida de suelo acumulada; Lal (1981), en Nigeria en un Alfisol, encontró una reducción de rendimiento de 9 kg t⁻¹ de suelo perdido. La reducción en rendimiento de grano de maíz en suelos moderadamente y severamente erosionados asciende a 14 y 39%, respectivamente, comparados con suelos no erosionados (Kilasara *et al.*, 1996).

El objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia técnica de la terraza de muro vivo y de la labranza de conservación, en términos del escurrimiento superficial, la pérdida de suelo, la productividad y estabilidad del cultivo doble de maíz, la relación erosión-productividad y la pérdida de productividad durante un periodo de ocho años, en condiciones de alta intensidad y cantidad de precipitación, ladera con pendiente alta y suelo mal drenado.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación inició en 1988, en el sitio experimental Vistahermosa, localizado en la región de Los Tuxtlas, ubicada al sureste del estado de Veracruz, entre 18° 00' y 18° 45' N y 94° 55' y 95° 30' O. El experimento se ubicó en una ladera cóncava, con 14.6% de pendiente y una precipitación media anual de 1683 mm. El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw₂) (García, 1981). El suelo es Typic Tropofluvents (Uribe-Gómez *et al.*, 2000), con textura franco arcillo arenoso, bajo contenido de materia orgánica (1.4%) y pH moderadamente ácido (6.1). De 1995 a 2002 se realizó la evaluación hidrológica, en cuatro sistemas de manejo del suelo: 1) terraza de muro vivo con tracción animal y 1.0 m de intervalo vertical (TMV-TA), 2) terraza de muro vivo con tracción mecánica y 1.0 m de intervalo vertical (TMV-TM), 3) labranza de conservación (LC), y 4) labranza tradicional (LT). En TMV-TA y TMV-TM, las parcelas constaron de seis terrazas de 20.0 m de longitud por

un ancho variable asociado a la distancia entre setos. En LC y LT, las parcelas fueron de 17.5 m de longitud transversal a la pendiente y de 40.0 m de ancho.

Las terrazas consistieron en el establecimiento de setos en contorno con *Gliricidia sepium*, la instalación anual de un filtro de escurrimientos con residuos de cosecha y la roturación unidireccional del suelo con arado reversible (Turrent-Fernández *et al.*, 1995). El sistema LC consistió en no roturar el suelo, controlar malezas con herbicidas, eliminar la quema y dejar en el campo el rastrojo de dos ciclos de cultivo de maíz (4.10 t ha⁻¹ año⁻¹ de materia seca). El sistema LT consistió en quemar los residuos de cosecha de maíz de dos ciclos de cultivo (3.59 t ha⁻¹ año⁻¹ de materia seca) y en roturar el suelo en el sentido de la pendiente con arado de tracción mecánica.

El experimento se condujo con el cultivo doble de maíz de primavera-verano (P-V) con sucesión de otoño-invierno (O-I), estableciéndose en la segunda quincena de junio y primera de noviembre, respectivamente. El ciclo P-V se sembró con la variedad VS-536 y el ciclo O-I con la variedad V-530, con densidades de 60 mil y 45 mil plantas ha⁻¹, respectivamente. El maíz se fertilizó con la dosis 138-69-00 y 100-40-00, en los ciclos respectivos. En ambos ciclos, se estimó el rendimiento de grano de maíz en los surcos primero, segundo, central, penúltimo y último, con relación al seto aguas abajo de la terraza. En los sistemas LC y LT, el rendimiento se midió en surcos ubicados a la misma cota que las terrazas.

La precipitación se midió durante 1995 con dos pluviómetros de tubo PVC de 2.54 cm de diámetro y de 80 cm de longitud y, en 1996, se instaló un pluviógrafo de registro diario, el cual se utilizó hasta el final del experimento. En los pluviogramas se obtuvieron la cantidad y la intensidad máxima de la lluvia en 30 min (I_{30}), para estimar el índice de erosividad de la lluvia (EI_{30}) (Wischmeier y Smith, 1978). El escurrimiento superficial y la pérdida de suelo se registraron en lotes de escurrimiento, de 2 m de ancho y 25 m de longitud, delimitados con lámina de asbesto, con descarga en tres depósitos. Cada 24 h se midió la altura del escurrimiento en los depósitos, para obtener la lámina escurrida, mientras que la pérdida de suelo implicó tomar las muestras de agua con sedimentos totales, las cuales se secaron a 105 °C en estufa de aire forzado.

El rendimiento de grano de maíz se analizó mediante un análisis combinado de varianza, incluyendo ocho años (A), dos ciclos de cultivo (C), cuatro sistemas de manejo

del suelo (M), dos secciones del terreno (S) y tres terrazas (T), con 383 grados de libertad (gl) en total. Las secciones del terreno fueron la sección alta (Terrazas 1, 2 y 3) y la sección baja (Terrazas 4, 5 y 6) ubicadas en la parte alta y baja de la ladera, respectivamente. El error "a" (interacción AxCxM con 21 gl) se utilizó para probar los efectos de los primeros tres factores y sus interacciones. El error "b" (interacciones AxCxS, AxMxS y AxCxMxS con 49 gl) se usó para probar el efecto de secciones del terreno y sus interacciones con A, C y M. El error "c" (interacciones de cuatro factores y la interacción de los cinco factores con 146 gl) se utilizó para probar el factor terrazas y sus interacciones con A, C, M y S. El análisis de estabilidad consistió en regresiones lineales entre el rendimiento obtenido en cada sistema y la media ambiental, estimada mediante el promedio de todos los sistemas en cada año y ciclo, considerando como más estable aquel sistema con menor pendiente (Raun *et al.*, 1993). La diferencia en los coeficientes de las ecuaciones entre dos sistemas se determinó mediante una prueba t de Student (Steel y Torrie, 1986). El costo ambiental de la producción de maíz se obtuvo mediante la relación entre las pérdidas de suelo y el rendimiento de maíz. La pérdida de productividad se estimó mediante una regresión lineal del rendimiento anual de grano de maíz en función de años de la producción del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del Escurrimiento Superficial y de la Pérdida de Suelo

Los escurrimientos superficiales y las pérdidas de suelo presentaron alta variabilidad entre años y entre sistemas, asociada a la cantidad de precipitación, a la intensidad de la lluvia y a la energía erosiva de la lluvia. Nearing *et al.* (1999) también reportaron alta variabilidad, incluso entre repeticiones, pero mencionaron que el conocimiento causal es limitado. El sistema LT presentó la pérdida anual de suelo más alta, con promedio de 146.24 t ha⁻¹ (Cuadro 1); resultado similar reportaron Paningbatan *et al.* (1995). Esto muestra la poca protección que el monocultivo de maíz proporciona al suelo contra la erosión (Gantzer *et al.*, 1991) y manifiesta la insostenibilidad del suelo con manejo tradicional. En el sistema TMV-TA, el promedio de pérdida anual de suelo fue de 2.16 t ha⁻¹, la cual fue inferior a 5.0 t ha⁻¹ año⁻¹ observada por Paningbatan

Cuadro 1. Precipitación, escurrimiento y pérdida de suelo observados en un Entisol en cuatro sistemas de manejo del suelo en el sitio experimental Vistahermosa.

Año [†]	Lluvia anual (mm)	Sistemas de manejo del suelo [‡]			
		TMV-TA	TMV-TM	LC	LT
Escurrecimiento anual (mm)					
1995	1 254	118.0	30.0	64.1	201.7
1996	1 529	205.4	303.6	205.8	453.9
1997	1 354	163.9	434.1	299.3	554.3
1998	1 391	259.7	149.1	235.5	408.0
1999	2 691	581.8	415.3	787.1	1 007.2
2000	2 088	462.1	479.9	203.1	424.2
2001	2 313	268.5	294.3	263.6	870.7
2002	1 425	16.2	25.1	46.1	142.0
Promedio	1 756	259.4	266.4	263.1	507.7
Pérdida de suelo anual					
	El ₃₀ anual [§] (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹)	(t ha ⁻¹)			
1995	NR	0.550	0.158	0.275	44.530
1996	6 115	0.297	5.141	0.694	81.727
1997	7 122	3.455	27.075	0.436	240.534
1998	10 210	3.922	18.914	2.094	285.174
1999	14 063	5.715	14.887	2.100	344.674
2000	7 426	2.216	7.142	0.332	39.501
2001	17 172	1.063	2.900	0.790	93.174
2002	5 160	0.066	0.725	0.078	40.569
Promedio	9 610	2.161	9.618	0.850	146.235

[†] El año hidrológico inicia en mayo y termina en abril del año siguiente. [‡] TMV-TA = terrazas de muro vivo con tracción animal, TMV-TM = terrazas de muro vivo con tracción mecánica, LC = labranza de conservación y LT = labranza tradicional.

[§] El valor del índice de erosividad de la lluvia El₃₀ corresponde al periodo erosivo registrado en el sistema LT; NR = no registrado.

et al. (1995) en el sistema de cultivo en callejones. En labranza de conservación, el promedio de pérdida anual de suelo fue de 0.85 t ha⁻¹; resultado similar al reportado por Mueller *et al.* (1984).

En el trópico húmedo y subhúmedo, la pérdida de suelo máxima permisible asciende a 12 t ha⁻¹ año⁻¹ (El-Swaify, 1993), entonces, en los ocho años, el sistema LT rebasó el límite permisible de pérdida de suelo. Los demás sistemas en todos los años presentaron pérdida de suelo tolerable, excepto el sistema TMV-TM que, en los años más erosivos (1997, 1998 y 1999), rebasó la pérdida permisible.

El sistema LT se asoció a alto coeficiente de escurrimiento (27.7%), implicando mayor concentración de sedimentos (29522 mg L⁻¹). En el sistema LC, el coeficiente promedio de escurrimiento fue de 13.9%, similar al observado en TMV-TA (13.8%) y en TMV-TM (14.7%), entonces, en estos sistemas, la reducción de la pérdida de suelo se atribuye al menor volumen de escurrimiento con baja concentración de

sedimentos que, en promedio, fue de 338, 812 y 3761 mg L⁻¹ en los sistemas LC, TMV-TA y TMV-TM, respectivamente.

Entre los años más erosivos, el año 1999 presentó la mayor lluvia, el mayor escurrimiento y un valor alto de El₃₀, asociándose a mayor pérdida de suelo en los sistemas TMV-TA, LC y LT. Sin embargo, en el año 2001, también con alta lluvia y con el mayor valor de El₃₀, la erosión tendió a disminuir. Este año mostró el máximo valor anual de El₃₀, porque se asoció con la lluvia máxima en 24 h (330 mm) ocurrida en ocho años, con una intensidad máxima (I₃₀) de 109 mm h⁻¹ y con un valor de El₃₀ de 7255 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹, asociándose con la mayor pérdida de suelo del año en los cuatro sistemas. Sin embargo, no correspondió a la mayor pérdida en ocho años, porque el evento ocurrió el 15 de septiembre, cuando el suelo presentaba alta cobertura. El año 1998 se asoció con el evento que registró el máximo valor de El₃₀ (7288 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹) en ocho años, con 206 mm de lluvia y 160 mm h⁻¹ de intensidad

máxima (I_{30}), vinculándose con la mayor pérdida de suelo en los cuatro sistemas durante ocho años. Este evento ocurrió el 10 de julio, cuando el suelo tenía baja cobertura vegetal, condición en la cual la pérdida de suelo es sensible a la energía de la tormenta (Solano de la Sala-Torres *et al.*, 1990). En general, los sistemas TMV-TA y LC mostraron su eficiencia técnica en el control de la erosión en los años más erosivos.

Análisis de Rendimiento de Grano del Cultivo Doble de Maíz en Terraza

En el análisis de varianza de rendimiento de grano de maíz, el coeficiente de variación fue de 14.2% y resultaron significativos a 1% los efectos factoriales: años (A), ciclos de cultivo (C), sistemas de manejo del suelo (M), secciones de la ladera (S), terrazas (T), y las interacciones AxS, AxT y MxT. El efecto de secciones indica que rendimiento mayor significativamente se asocia a la sección baja de la ladera, respuesta asociada a la interacción CxS, cuando, en ambos ciclos, el rendimiento es significativamente superior en la sección baja de la ladera (Cuadro 2). La interacción MxS muestra que el mayor rendimiento se asoció al sistema

Cuadro 2. Rendimientos medios de grano de maíz asociados a cuatro sistemas de manejo del suelo, dos ciclos de cultivo y dos secciones del terreno, promediados sobre ocho años.

Sistema de manejo [†]	Rendimiento de maíz		
	P-V	O-I	Promedio
----- t ha ⁻¹ -----			
Sección alta			
TMV-TA	3.05 (0.51) [‡]	1.75 (0.51) [‡]	2.40 (0.36) [§]
TMV-TM	2.28	1.34	1.81
LC	2.39	1.43	1.91
LT	2.33	1.16	1.74
Promedio	2.51 (0.21) [¶]	1.42 (0.21) [¶]	1.96 (0.15) ^{¶¶}
Sección baja			
TMV-TA	2.95 (0.51) [‡]	2.15 (0.51) [‡]	2.55 (0.36) [§]
TMV-TM	2.73	1.92	2.32
LC	2.81	1.90	2.36
LT	2.75	2.01	2.38
Promedio	2.81	1.99	2.40

[†] TMV-TA = terrazas de muro vivo con tracción animal, TMV-TM = terrazas de muro vivo con tracción mecánica, LC = labranza de conservación y LT = labranza tradicional. [‡] Diferencia mínima significativa (DMS) (Tukey, 0.01) para comparar entre sistemas de manejo en la misma sección y el mismo ciclo de cultivo. [§] DMS (Tukey, 0.01) para comparar entre sistemas de manejo dentro de una misma sección. [¶] DMS (Tukey, 0.01) para comparar entre secciones dentro de un mismo ciclo. ^{¶¶} DMS (Tukey, 0.01) para diferenciar entre secciones.

TMV-TA en ambas secciones, superando significativamente a los demás sistemas sólo en la sección alta. Esta respuesta se vincula a la interacción MxCxS, cuando, en la sección alta, el sistema TMV-TA superó con diferencia significativa a los demás sistemas en el ciclo P-V, pero en el ciclo O-I sólo superó al sistema LT. En la sección baja de la ladera, en ambos ciclos, la diferencia de rendimientos entre sistemas no fue significativa.

En producción anual promedio, suma de rendimientos de ambos ciclos de cultivo, TMV-TA en promedio superó a los sistemas LC, TMV-TM y LT en 690, 820 y 830 kg ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 3). Se aprecia que los sistemas LC y LT se asocian a pérdida de productividad del cultivo de maíz. En estos sistemas, a partir del quinto año, el rendimiento fue inferior al promedio. Esta tendencia no es evidente para ambos sistemas con terrazas.

En el sistema LT, la pérdida de productividad se asocia a alta erosión (Lal, 1981; Kilasara *et al.*, 1996) más evidente en la sección alta de la ladera (Cuadro 2). La erosión disminuye la profundidad del suelo, decrece las fracciones finas del suelo, reduce la disponibilidad de agua para las plantas, remueve nutrientes y altera propiedades físicas del suelo (Littleboy *et al.*, 1992). En TMV-TM, el menor rendimiento se vincula con mayor transporte de sedimentos de la sección donante de la terraza por el laboreo intenso; daño causado por excesos de humedad asociado a la menor pendiente de la terraza, que en 15 años se redujo de 16.2% a 0.6%.

Cuadro 3. Rendimiento anual de grano de maíz asociado a cuatro sistemas de manejo del suelo durante ocho años.

Año [†]	Sistema de manejo del suelo [‡]			
	TMV-TA	TMV-TM	LC	LT
Rendimiento anual (t ha ⁻¹) [§]				
1995	5.20	4.31	5.03	5.72
1996	6.24	5.99	6.43	6.11
1997	4.85	3.92	4.96	5.18
1998	4.96	4.05	4.40	4.21
1999	4.97	4.03	4.11	3.74
2000	3.27	2.58	2.76	1.77
2001	4.77	4.02	2.99	3.17
2002	5.33	4.17	3.43	3.08
Promedio	4.95	4.13	4.26	4.12

[†] El año hidrológico inicia en mayo y termina en abril del año siguiente. [‡] TMV-TA = terrazas de muro vivo con tracción animal, TMV-TM = terrazas de muro vivo con tracción mecánica, LC = labranza de conservación y LT = labranza tradicional. [§] Incluye la producción de dos ciclos de cultivo, primavera-verano y otoño-invierno.

y menor efecto de la fertilización, originado por la mayor remoción del suelo. Esto sugiere que la formación de la terraza debe realizarse con una labranza reducida para menor movimiento de suelo, como rastreo en vez de barbecho.

El sistema LC, aunque presentó bajo escurrimiento y disminuyó los excesos de humedad en el ciclo P-V, no logró aumentar el rendimiento en este ciclo; mientras que, en la respuesta del ciclo O-I, no se observa el efecto de la conservación de humedad. Entonces, puede inferirse que faltó aumentar la dosis de fertilización para una mejor respuesta en LC. La mayor ventaja en rendimiento en TMV-TA se asocia a la dinámica de humedad vinculada al desarrollo de las terrazas (Uribe-Gómez *et al.*, 1998). En este sistema, la pendiente disminuyó de 14.2% a 5.5% en un periodo de 15 años, esto se vinculó con bajo escurrimiento, favoreciendo la infiltración de agua. En el ciclo P-V, la humedad almacenada en el perfil provocó excesos de humedad en las terrazas de la sección baja, limitando la producción; en cambio, en el ciclo O-I cuando la humedad fue el factor limitativo principal para la producción, el maíz aprovechó eficientemente el agua acumulada, manifestándose en rendimientos más altos en ambas secciones de la ladera.

En el año agrícola 2000, se aprecian bajos rendimientos de maíz en todos los tratamientos (Cuadro 3) asociados a la distribución de la lluvia. En el ciclo P-V 2000, se registraron 913 mm del 1° de julio al 15 de septiembre, de los cuales 552 mm correspondieron a agosto; resultando afectado el maíz en sus etapas vegetativa y reproductiva con excesos de humedad. En cambio, el ciclo O-I 2000-2001 se asoció con 229 mm de lluvia de noviembre a marzo, de los cuales 172 mm ocurrieron en noviembre y diciembre; el resto del ciclo sufrió escasez de humedad, afectando las etapas vegetativa y reproductiva del maíz.

Estabilidad del Rendimiento de Grano del Cultivo Doble de Maíz

Los sistemas con terrazas y LC presentaron menor pendiente que LT (Cuadro 4) y proporcionaron estabilidad al rendimiento de grano de maíz (Raun *et al.*, 1993). La prueba de homogeneidad de varianzas mostró homogeneidad en los datos observados, excepto en TMV-TA con TMV-TM y con LC en la sección alta; y en TMV-TA con LT en la sección baja.

Relación Erosión-Productividad en el Cultivo Doble de Maíz

El sistema LT presentó la mayor relación erosión-productividad (E-P) promedio (35.5 t t⁻¹) que hace insostenible el recurso suelo (Cuadro 5). Los años más erosivos se asociaron con la mayor E-P en todos los sistemas de manejo del suelo. En LT, la máxima E-P ocurrió en 1999, cuando el rendimiento mermó debajo de la media y la producción no se recuperó en los años siguientes (Cuadro 3). En esta respuesta influyó la erosión ocurrida en los dos años previos, que en conjunto de tres años acumularon 74% de la pérdida de suelo en el periodo de ocho años.

La prueba de homogeneidad de varianzas aplicada a las ecuaciones de regresión entre rendimiento de maíz en función de años transcurridos en la producción del suelo (Cuadro 6), mostró homogeneidad en los datos observados.

Las ecuaciones encontradas mostraron baja correlación para los sistemas con terrazas. En el sistema LT, una lámina de suelo perdido de 1.0 cm anual se asoció con una pérdida de productividad de 523 kg ha⁻¹ año⁻¹ de grano de maíz; pérdida superior a la encontrada por Pérez-Nieto *et al.* (1998) en Leptosoles (70 kg ha⁻¹ año⁻¹). La pérdida de

Cuadro 4. Ecuaciones de regresión entre el rendimiento de grano de maíz por sistema de manejo del suelo y la media ambiental en dos secciones de la ladera durante ocho años.

Sistema de manejo [†]	Sección alta			Sección baja		
	Ordenada al origen	Pendiente	R ²	Ordenada al origen	Pendiente	R ²
TMV-TA	0.46383	0.98404	0.91	0.52946	0.84294	0.80
TMV-TM	0.09830	0.87068	0.70	-0.01801	0.97549	0.81
LC	-0.02853	0.98620	0.83	0.00530	0.97888	0.81
LT	-0.52666	1.15660	0.89	-0.51820	1.20529	0.77

[†] TMV-TA = terrazas de muro vivo con tracción animal, TMV-TM = terrazas de muro vivo con tracción mecánica, LC = labranza de conservación y LT = labranza tradicional.

Cuadro 5. Costo ambiental de la producción de maíz registrado en un Entisol en cuatro sistemas de manejo del suelo.

Año [†]	Sistemas de manejo del suelo [‡]			
	TMV-TA	TMV-TM	L. Conservación	L. Tradicional
	Costo ambiental de la producción de maíz (t t ⁻¹) [§]			
1995	0.106	0.037	0.055	7.785
1996	0.048	0.858	0.108	13.376
1997	0.712	6.907	0.088	46.480
1998	0.791	4.670	0.476	67.737
1999	1.150	3.694	0.511	92.282
2000	0.679	2.768	0.120	22.380
2001	0.223	0.721	0.264	29.392
2002	0.012	0.174	0.023	13.172
Promedio	0.437	2.327	0.199	35.489

[†] El año hidrológico y agrícola inicia en mayo y termina en abril del año siguiente.

[‡] TMV-TA = terrazas de muro vivo con tracción animal, TMV-TM = terrazas de muro vivo con tracción mecánica, L = labranza.

[§] El costo ambiental relaciona la pérdida de suelo con la producción anual de maíz; es decir, es la relación erosión/productividad.

Cuadro 6. Ecuaciones de regresión entre rendimiento anual de grano de maíz en función de años en la producción del suelo en Vistahermosa, Veracruz.

Sistema de manejo [†]	Ecuaciones de regresión [‡]	R ²
TMV-TA	R = 5.54964 - 0.13298(A)	0.16
TMV-TM	R = 4.93000 - 0.17667(A)	0.22
LC	R = 6.15393 - 0.41976(A)	0.71
LT	R = 6.47643 - 0.52310(A)	0.75

[†] TMV-TA = terrazas de muro vivo con tracción animal, TMV-TM = terrazas de muro vivo con tracción mecánica, LC = labranza de conservación y LT = labranza tradicional.

[‡] R = rendimiento anual de grano de maíz (t ha⁻¹) y A = años transcurridos en la producción.

productividad en LC (420 kg ha⁻¹ año⁻¹) indica que para condiciones de laderas degradadas la labranza de conservación no sustentó la productividad, requiriéndose una modalidad alterna adecuada a las condiciones de la región de estudio.

CONCLUSIONES

- La terraza de muro vivo con tracción animal (TMV-TA) resultó eficiente porque disminuyó el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo dentro del límite permisible, mostró mayor productividad del maíz, presentó estabilidad aceptable en el rendimiento,

se asoció con baja relación erosión-productividad, y baja pérdida de productividad en el cultivo de maíz. Sin embargo, el sistema de labranza tradicional (LT) fue ineficiente porque presentó indicadores contrarios al sistema TMV-TA. Por lo tanto, LT fue el sistema de manejo que más limitó la sostenibilidad del recurso suelo; mientras que el sistema TMV-TA constituyó una alternativa de manejo del suelo pro-sostenible en condiciones tropicales, con alta cantidad de precipitación, alta intensidad de la lluvia, terrenos con pendientes pronunciadas y suelo mal drenado.

- La terraza de muro vivo con tracción mecánica (TMV-TM) y el sistema de labranza de conservación (LC) fueron eficientes en reducir el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo dentro del límite permisible, excepto en TMV-TM la pérdida de suelo fue mayor que la permisible en los años más erosivos. Ambos sistemas se asociaron a menor rendimiento de maíz con estabilidad aceptable. La relación erosión-productividad fue moderada y baja, y la pérdida de productividad fue moderada y alta, en los sistemas TMV-TM y LC, respectivamente. Estos indicadores sugieren que la formación de la terraza debe realizarse con una labranza reducida para menor movimiento de suelo y que se necesita una modalidad de labranza de conservación alterna a las condiciones de la región de estudio.

LITERATURA CITADA

- Craswell, E. T. 1993. The management of world soil resources for sustainable agricultural production. pp. 258-276. In: Pimentel, D. (ed.). World soil erosion and conservation. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- El-Swaify, S. A. 1993. Soil erosion and conservation in the humid tropics. pp. 233-255. In: Pimentel, D. (ed.). World soil erosion and conservation. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Gantzer, C. J., S. H. Anderson, A. L. Thompson y J. R. Brown. 1991. Evaluation of soil loss after 100 years of soil and crop management. *Agron. J.* 83: 74-77.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 3ª edición. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Kilasara, M., I. K. Kullaya, F. B. Kaihura, B. R. Singh, R. Lal y J. B. Aune. 1996. Topsoil thickness effects on soil properties and maize (*Zea mays*) yield in three ecoregions of Tanzania. *J. Sustainable Agric.* 9: 11-30.
- Lal, R. 1981. Soil erosion problems on Alfisols in western Nigeria. VI. Effects of erosion on experimental plots. *Geoderma* 25: 215.
- Littleboy, M., D. M. Freebairn, G. L. Hammer y D. M. Silburn. 1992. Impact of soil erosion on production in cropping systems.

- II. Simulation of production and erosion risks for a wheat cropping system. *Austr. J. Soil Res.* 30: 775-788.
- Mueller, D. H., R. C. Wendt y T. C. Daniel. 1984. Soil and water loss as affected by tillage and manure application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 896-900.
- Nearing, M. A., G. Govers y L. D. Norton. 1999. Variability in soil erosion data from replicated plots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1829-1835.
- Paningbatan, E. P., C. A. Ciesiolka, K. J. Coughlan y C. W. Rose. 1995. Alley cropping for managing soil erosion of hilly lands Philippines. *Soil Tech.* 8: 193-204.
- Pérez-Nieto, J., V. Volke-Haller, M. Martínez-Menes y N. Estrella-Chulín. 1998. Erosión, productividad y rentabilidad de dos suelos del estado de Oaxaca. *Agrociencia* 32: 113-118.
- Poudel, D. D., D. J. Midmore y L. T. West. 1999. Erosion and productivity of vegetable systems on sloping volcanic ash-derived Philippine soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1366-1376.
- Raun, W. R., H. J. Barreto y R. L. Westerman. 1993. Use of stability analysis for long-term soil fertility experiments. *Agron. J.* 85: 159-167.
- SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). 1996. pp: 30-40. Programa Forestal y de Suelos 1995-2000. México, D. F.
- Solano de la Sala-Torres, J. A., M. Martínez-Menes, J. L. Oropeza-Mota y M. Anaya-Garduño. 1990. Efecto de la relación precipitación-escorrentía en el proceso erosivo en diferentes usos del suelo en la cuenca del río Texcoco. *Agrociencia* 1: 25-44.
- Steel, R. G. D. y J. H. Torrie. 1986. *Bioestadística: principios y procedimientos*. Trad. al español por R. Martínez B. McGraw-Hill. México, D. F.
- Turrent-Fernández, A., S. Uribe-Gómez, N. Francisco-Nicolás y R. Camacho-Castro. 1995. La terraza de muro vivo para laderas del trópico subhúmedo de México. I. Análisis del desarrollo de la terraza durante 6 años. *Terra* 13: 276-298.
- Uribe-Gómez, S., A. Turrent-Fernández, N. Francisco-Nicolás y R. Camacho-Castro. 1998. Productividad y estabilidad del rendimiento de maíz en terrazas de muro vivo en el trópico subhúmedo de México. *Agrociencia* 32: 301-309.
- Uribe-Gómez, S., M. del C. Gutiérrez-Castorena, C. Tavarez-Espinosa y A. Turrent-Fernández. 2000. Caracterización y clasificación de suelos de ladera manejados con terrazas de muro vivo en Los Tuxtlas, Veracruz. *Agrociencia* 34: 403-412.
- Wischmeier, W. H. y D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook* 537. US Department of Agriculture. Washington, DC, USA.