

EFFECTO DE LA EROSIÓN DEL SUELO SOBRE EL RENDIMIENTO DE MAÍZ DE TEMPORAL

Effect of Soil Erosion on Maize Yield under Rainfed Conditions

Ricardo González Mateos¹, Víctor Volke Haller^{2‡}, Jesús González Ríos²,
Minerva Ocampo Portillo¹, Carlos Ortiz Solorio² y Fernando Manzo Ramos²

RESUMEN

En el área de la cuenca de la laguna de Tuxpan, Guerrero, el uso del suelo corresponde a sistemas forestales, pecuarios de agostadero (pastoreo de bovinos y caprinos) y agrícolas de temporal (maíz, sorgo y cacahuete) y riego (hortalizas, flores y frutales), y en ello se estima que 50% del área presenta erosión hídrica, desde ligera hasta severa, y formación de cárcavas. El presente trabajo tuvo por objetivo evaluar la erosión del suelo y su efecto sobre el rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) de temporal, en el área de la cuenca de la laguna de Tuxpan, Guerrero. Se realizó la clasificación de la erosión del suelo mediante la metodología de Morgan, partiendo de un levantamiento fisiográfico a nivel de sistemas terrestres y facetas, y en 28 parcelas de productores distribuidas en las distintas clases de erosión de Morgan se determinó el rendimiento de maíz de temporal y los valores de factores de suelo, clima y manejo presentes; con estos datos se estimó una función de producción para el rendimiento de maíz, mediante la cual se determinó el efecto de las clases de erosión sobre éste. Se encontró que: a) en el Sistema Terrestre Tomatal, la superficie que abarcan las clases de erosión de Morgan (expresadas también en su equivalencia en clases de erosión de FAO) fue: clase 0.5 y 1 (erosión ligera), 106.7 ha (6.7%); clase 2 (erosión moderada), 187.9 ha (11.8%); clase 3 (erosión severa), 130.3 ha (8.2%); y, clases 4 y 5 (erosión muy severa), 998.9 ha (62.9%); y cárcavas, 164.8 ha (11.2%); y, b) un efecto depresivo de las clases de erosión sobre el rendimiento de maíz de 0.467 Mg ha⁻¹ (9.0%), para la clase 0.5, y 0.785 Mg ha⁻¹ (15.2%), para la clase 1, equivalentes a erosión ligera;

1.321 Mg ha⁻¹ (25.6%), para la clase 2, equivalente a erosión moderada; 1.790 Mg ha⁻¹ (34.7%), para la clase 3, equivalente a erosión severa; y 2.220 Mg ha⁻¹ (43.0%), para la clase 4, y 2.626 Mg ha⁻¹ (50.9%) para la clase 5, equivalentes a erosión muy severa.

Palabras clave: *clases de erosión de Morgan, función de producción, sistemas de producción, sistemas terrestres, facetas.*

SUMMARY

In the Tuxpan-Lagoon basin land is used for the following production systems: forests, cattle and goats under grazing, cropping under rainfall conditions (maize, sorghum and peanuts) and under irrigation (vegetables, flowers and fruit trees). It is estimated that 50% of this area has problems of water erosion ranging from slight to severe. The aim of this research was to evaluate the soil erosion problem and how it affects the yield of maize (*Zea mays* L.) sown under rainfall conditions in the Tuxpan-Lagoon watershed. The methodologies of Morgan and Land System Survey were applied to determine the different soil erosion classes parting from a physiographic survey at the level of land systems and facets. In 28 producing plots distributed in different Morgan erosion classes rainfed maize yield and the values of soil, climate and management factors present were determined. With these data, a production function was estimated for maize yield in which the effect of each class of erosion was estimated. It was found that a) in the "Tomatal" land system, the areas integrating the different Morgan soil erosion classes (and their equivalent FAO soil erosion classes) were the following: classes 0.5 and 1 (slight erosion), 106.7 ha (6.7%); class 2 (moderate erosion), 187.9 ha (11.8%); class 3 (severe erosion), 130.3 ha (8.2%); and classes 4 and 5 (very severe erosion), 998.9 ha (62.9%); and gullies, 164.8 ha (11.2%); and b) the depressive effect of the different soil erosion processes on maize yield was 0.467 Mg ha⁻¹ (9.0%) on class 0.5 and 0.785 Mg ha⁻¹ (15.2%) on class 1

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Universidad Autónoma de Guerrero. 40020 Iguala, Guerrero, México.

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

[‡] Autor responsable (vvolke@colpos.mx)

(equivalent to slight erosion); 1.321 Mg ha⁻¹ (25.6%) on class 2 (equivalent to moderate erosion); 1.790 Mg ha⁻¹ (34.7%) on class 3 (equivalent to severe erosion); 2.220 Mg ha⁻¹ (43.0%) on class 4 and 2.626 Mg ha⁻¹ (50.9%) on class 5 (equivalent to very severe erosion).

Index words: *Morgan's erosion classes, function of production, production system, land system, land facets.*

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales procesos de degradación del suelo lo constituye la erosión, principalmente hídrica. Tan es así que afecta alrededor de 80% de la superficie de suelos agrícolas en el mundo (Pimentel y Kounang, 1998; Napier *et al.*, 2000). La erosión causa: a) arrastre de los horizontes superficiales del suelo, con la consecuente pérdida de materia orgánica y nutrientes, deterioro de las propiedades físicas y disminución de la capacidad de almacenamiento de agua en los suelos delgados; b) en estados más avanzados, la pérdida de superficies importantes de suelos, debido a la formación de cárcavas. Por otra parte, el empobrecimiento y deterioro de las propiedades físicas del suelo incrementa los costos de producción, debido a los mayores requerimientos de fertilización y al aumento del consumo energético para preparar el suelo y los costos de mantenimiento de las unidades productivas. En conjunto, la menor productividad y producción, y el mayor costo de producción disminuirán los ingresos de los productores (USDA-SCS, 1990; Huitzhusen, 1993).

Las causas de la erosión del suelo se pueden englobar en el uso y manejo inapropiado de los agroecosistemas que, en términos generales, comprende la explotación destructiva de los bosques, el sobrepastoreo de los agostaderos y el uso agrícola de suelos con pendientes sin considerar prácticas de conservación de suelo y agua.

Sin embargo, estas causas tienen su origen en el ámbito social, económico y político, especialmente en las zonas rurales de pequeñas explotaciones, en relación con: a) la escasa disponibilidad de tierra, aunado a la presencia de suelos de pobre calidad (delgados, pendientes elevadas), que obliga a trabajar suelos no aptos para el cultivo, con fines de obtener un mínimo de producción para la subsistencia y la alimentación; b) la excesiva fragmentación de la tierra y la carencia de recursos socioeconómicos para establecer prácticas de conservación del suelo y agua; c) la tenencia comunal

de la tierra de pastoreo, que da derecho a su uso pero no obliga a conservarla, con el resultado de un sobrepastoreo de los agostaderos y la consecuente degradación del suelo; d) la explotación desmedida del bosque para obtener madera, leña, carbón, postes, etcétera, con fines de uso doméstico y venta para complementar los ingresos (Hudson, 1983; Contreras *et al.*, 2003).

Para evaluar la erosión del suelo se han desarrollado diversos procedimientos. Uno de ellos es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) (Wischmeier, 1976), la cual comprende cinco componentes: la intensidad de la lluvia, la erodabilidad del suelo, la longitud y grado de la pendiente, la presencia de prácticas de conservación del suelo y la cobertura del suelo, en relación con el cultivo y su manejo. La EUPS puede ser bastante precisa para predecir pérdidas de suelo, sin embargo, en los países en desarrollo muchas veces se dificulta su uso debido a que no siempre se dispone de la información suficiente, especialmente la climática. Otro procedimiento es el que propone Morgan (1997), el cual se basa en la presencia de indicadores como cobertura vegetal, montículos, pedestales, raíces y costras; éste, si bien es de tipo cualitativo y no tan preciso, tiene la ventaja de ser rápido y de bajo costo, sin requerir de laboratorios tan equipados ni de personal altamente calificado y puede prescindir de información que es esencial para la EUPS, como la climática.

El problema de la erosión del suelo en México es de gran magnitud, con cifras del orden de 74 a 95% de su territorio, en diferentes grados (FAO, 1994; Ortiz *et al.*, 1994; Figueroa, 1995; INEGI, 1998). En el área de la cuenca de la laguna de Tuxpan, Iguala, Guerrero, se estima que 50% de la superficie presenta grados de erosión hídrica, desde ligero hasta severo de cárcavas (González *et al.*, 2003), con consecuencias sobre la pérdida de productividad agrícola de los suelos y los agostaderos, además de la pérdida de superficies de suelos por la presencia de cárcavas (INEGI, 1994) y el azolvamiento de dicha laguna.

Con base en la problemática referida para la cuenca de la laguna de Tuxpan, Iguala, Guerrero, el presente trabajo tuvo por objetivo evaluar la erosión del suelo y su efecto sobre el rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) bajo condiciones de temporal en esta área.

MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca de la laguna de Tuxpan, municipio de Iguala, Guerrero, se ubica entre 18° 18' 44'' y

18° 24' 09'' N y 99° 27' 15'' y 99° 32' 07'' O, comprendiendo una superficie de alrededor de 7000 ha, de las cuales la laguna de Tuxpan ocupa 290 ha.

La geomorfología de la zona está formada por: a) montañas y cerros, con altitudes de 850 a 1870 m; b) lomajes asociados con valles aluviales y una red de drenaje dendrítico con cárcavas, barrancas y arroyos, con altitudes de 750 a 850 m; y c) planicies que circundan la laguna de Tuxpan, a altitudes de alrededor de 750 m. El clima de la zona es $Aw_0(w)(i)g$, que corresponde al más seco de los cálidos subhúmedos, y presenta temperatura media anual de 25.5 °C, precipitación media anual de 1067 mm (García, 1988) y régimen de lluvias de verano de junio a septiembre, con sequía interestival desde mediados de julio hasta mediados de agosto. Los suelos del área, según el sistema FAO/UNESCO/ISRIC-1988 (FAO/UNESCO/ISRIC, 1990), corresponden a Vertisoles éutricos, Fluvisoles calcáricos, Fluvisoles éutricos, Regosoles calcáricos, Leptosoles réndzicos y Leptosoles éutricos.

El uso del suelo comprende: sistemas agrícolas en unas 1344 ha (19%), con cultivos predominantemente de temporal, como maíz solo y asociado con calabaza, seguido por sorgo y en menor medida cacahuete, y cultivos de riego, como hortalizas, flores y frutales (principalmente mango y algo de tamarindo); sistemas pecuarios de agostaderos en unas 1908 ha (27%), con explotación extensiva de ganado bovino de doble propósito y caprino; y, sistemas forestales en unas 2908 ha (42%).

Los cultivos anuales, como maíz, sorgo y cacahuete, se han desarrollado en un sistema de cultivo-pastoreo, denominado *año y vez*, que consiste en sembrar un año el cultivo y el siguiente dedicarlo al pastoreo con ganado bovino y caprino.

La explotación inadecuada del bosque (para producción de leña y carbón, y extracción de postes), el sobrepastoreo de los agostaderos (con 1250 cabezas de ganado bovino y 600 cabezas de ganado caprino) y la explotación agrícola en suelos con pendientes (2 a 20%), han originado serios problemas de deterioro ambiental, debido principalmente a erosión del suelo con diversos grados en alrededor de 2070 ha (que incluye 164 ha de cárcavas y 392 ha de tepetate), pérdida de productividad de los sistemas agrícolas y pecuarios, y asolvamiento de la laguna de Tuxpan en 66 ha, con una disminución del volumen de agua y sus consecuencias.

La erosión del suelo se determinó mediante la metodología de Morgan (1997), según se indica en el Cuadro 1, a partir de un levantamiento fisiográfico (Ortiz y

Cuanalo, 1984); los sistemas terrestres se definieron en espaciomapas a escala 1:250 000 y las facetas de éstos en fotografías aéreas a escala 1:37 500 (INEGI, 1994).

Para determinar el efecto de la erosión del suelo sobre el rendimiento del maíz se procedió con base en: - un muestreo en parcelas de productores, distribuidas en las distintas clases de erosión de Morgan. Para esto, de los listados de productores registrados en el programa PROCAMPO, se tomó una muestra de 18, en 1999, y 10, en 2003, mediante un muestreo estratificado (Rendón y González, 1989); en ellas estimaron los rendimientos (Díaz, 1990), se determinaron las propiedades físicas y químicas del suelo, se obtuvo información sobre las características generales del sitio, como profundidad, y pendiente y clase de erosión del suelo, y se recopilaron datos sobre la tecnología de producción.

- la asociación y el establecimiento de equivalencias entre las clases de erosión de Morgan y las clases definidas por la FAO (FFTC, 1995).

- la estimación, mediante análisis de regresión, una función de los rendimientos en relación con las clases de erosión y los factores de suelo y manejo del cultivo, excluyendo aquéllos que estuviesen correlacionados con las clases de erosión (María y Volke, 1999).

Con la función de producción se determinó el efecto de las clases de erosión sobre el rendimiento de maíz, considerando los correspondientes valores de los factores incluidos en ésta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El levantamiento fisiográfico, realizado con fines de servir como marco geográfico para evaluar la erosión del suelo, determinó tres sistemas terrestres que se describen a continuación:

- **Sistema Terrestre Tomatal:** presenta altitudes de 800 a 900 m; el material parental es arenisca – conglomerado y pequeñas áreas con toba; el paisaje es de lomajes con pendientes de 8 a 25%, asociados con valles, barrancas y cárcavas; la hidrología está formada por un patrón de afluentes temporales; la vegetación es de matorral espinoso asociado con pastos nativos y plantas herbáceas anuales; el uso actual es agricultura de temporal, ganadería extensiva con bovinos y caprinos, y extracción de leña y postes.

- **Sistema Terrestre Tuxpan:** presenta altitudes de 900 a 1780 m; el material parental es roca caliza; el paisaje es de ladera escarpada con pendientes mayores de 30%, asociado con cañadas y depresiones con taludes;

Cuadro 1. Clases codificadas de erosión del suelo, según Morgan (1997).

Clase	Indicador de campo
0	Raíces de árboles no expuestas; sin costra superficial, ni pedestales por salpicadura; cobertura vegetal en más de 70%.
0.5	Ligera exposición de raíces de árboles; poca costra superficial; sin pedestales por salpicadura; nivel del suelo ligeramente más elevado pendiente arriba o a barlovento de las plantas y rocas; cobertura vegetal de 30 a 70%.
1	Exposición de raíces de árboles; formación de pedestales por salpicadura y montículos de suelo cubiertos con vegetación y profundidades de 1 a 10 mm; ligera costra superficial; cubierta vegetal de 30 a 70%.
2	Exposición de raíces de árboles; formación de pedestales por salpicadura y montículos de suelo de 1 a 5 cm; costra superficial; cubierta vegetal de 30 a 70%.
3	Exposición de raíces de árboles; formación de pedestales por salpicadura y montículos de suelo a profundidad de 5 a 10 cm; costra superficial de 2 a 5 mm; hierbas sucias y enlodadas por arrastre de material hacia la parte baja de la pendiente; arrastre de materiales gruesos por el agua y el viento; cobertura vegetal menor de 30%.
4	Exposición de raíces de árboles; formación de pedestales por salpicadura y montículos de suelo de 5 a 10 cm de profundidad; arrastre de materiales gruesos; canalillos hasta de 8 cm de profundidad; suelo desnudo.
5	Canalillos mayores de 8 cm de profundidad y cárcavas; arrastre de partículas por el agua; suelo desnudo.

la hidrología está formada por corrientes torrenciales temporales; la vegetación comprende bosque de encino y selva baja caducifolia; el uso actual es forestal y pastoreo con ganado bovino.

- **Sistema Terrestre Iguala:** presenta altitudes de 730 a 750 m; el material parental es aluvial; el paisaje es de planicies con pendientes de 2 a 4%; la hidrología está formada por corrientes temporales y la laguna de Tuxpan;

el uso actual es agrícola con cultivos anuales y perennes de mango y tamarindo.

El clima en el área de los tres sistemas terrestres es similar y presenta precipitación y temperatura medias anuales de 1067.4 mm y 25.5 °C, respectivamente.

Debido a que el Sistema Terrestre Tuxpan tiene un uso forestal y pecuario y que el Sistema Terrestre Iguala presenta bajas pendientes, el estudio se centró en

Cuadro 2. Descripción de las facetas del Sistema Terrestre Tomatal.

Faceta	Forma del relieve	Suelos	Uso actual
1	Planicie ligeramente ondulada, pendientes de 2 a 8%.	Profundos (> 90 cm), textura arcillosa, medios en materia orgánica.	Matorral espinoso, cobertura de 20 a 50%, pastoreo, extracción de leña y cultivos anuales de maíz y sorgo.
2	Ladera ligeramente ondulada, pendientes de 2 a 8%.	Profundos (> 90 cm), textura arcillosa, pobres en materia orgánica.	Cobertura de 20 a 50%, estrato herbáceo, cultivos anuales de maíz y sorgo, y pastoreo.
3	Planicie asociada con cauces, material sedimentario, pendientes de 2 a 8%.	Profundos (> 90 cm), textura franca, pobres en materia orgánica.	Cobertura de 50% con estrato herbáceo, cultivos anuales de maíz y sorgo, y pastoreo.
4	Planicie, pendientes de 2 a 4%, material transportado.	Profundos (> 90 cm), textura franca, pobres en materia orgánica.	Estrato herbáceo con 50% de cobertura, cultivos anuales de maíz y sorgo, y pastoreo.
5	Ladera ondulada, pendientes de 8 a 25%, con basalto y conglomerado.	Esqueléticos (< 10 cm), textura franca, medios en materia orgánica.	Matorral espinoso asociado con pastos nativos, cobertura de 20 a 40%, pastoreo, extracción de leña.
6	Ladera convexa asociada con cárcavas, pendientes de 8 a 16%, arenisca-conglomerado, terrenos erosionados.	Esqueléticos (< 10 cm), textura franca, pobres en materia orgánica.	Matorral espinoso fuertemente perturbado, cobertura de 15 a 45%, pastoreo y extracción de leña.
7	Ladera convexa, drenaje dendrítico, pendientes de 8 a 16%, arenisca-conglomerado, terrenos erosionados, con cárcavas y barrancas.	Esqueléticos (< 10 cm), con textura franca, pobre en materia orgánica.	Matorral espinoso de 10 a 30%, cultivos anuales de maíz y sorgo, pastoreo y extracción de leña.

Cuadro 2. Descripción de las facetas del sistema terrestre Tomatal (continuación).

Faceta	Forma del relieve	Suelos	Uso actual
8	Ladera convexa, pendientes de 8 a 20%, arenisca-conglomerado, terrenos erosionados con presencia de cárcavas y barrancas.	Someros (10 a 30 cm), textura franca, pobres en materia orgánica.	Asociación de herbáceas y pastos nativos, cobertura de 10 a 30%, cultivos anuales de maíz y sorgo, y pastoreo.
9	Tepetate, pendientes de 4 a 20%, asociado con cauces, barrancas y cárcavas arenisca-conglomerado.	Aflora el tepetate, textura gruesa, presencia de costras y muy pobres en materia orgánica.	Cobertura de 5 a 20%, no tiene uso.
10	Tepetate, pendientes de 8 a 16%, arenisca-conglomerado, con red de drenaje dendrítico.	Esqueléticos (< 10 cm), textura gruesa, pobres en materia orgánica.	Cobertura de 5 a 20%, pastoreo y extracción de leña.
11	Planicie, pendientes de 2 a 8%, suelos aluviales.	Profundos (> 100 cm), pardos, textura franco arcillosa, muy pobres en materia orgánica.	Uso agrícola, con diversidad de sistemas de producción: maíz, sorgo, hortalizas, flores y perennes (frutales, mango, limón mexicano y guanábano), estrato herbáceo, cobertura de 50%, y pastoreo.
12	Planicie, pendientes de 2 a 4%, suelos aluviales.	Profundos (> 110 cm), pardos, textura franca, moderado en materia orgánica.	Uso agrícola, con maíz y sorgo, estrato herbáceo, cobertura de 50%, y pastoreo.
13	Planicie ligeramente ondulada, pendientes de 2 a 8%, arcilla-conglomerado.	Moderadamente profundos (50 a 90 cm), pardos, textura franco arcillo limosa, muy pobres en materia orgánica.	Uso agrícola, con maíz, sorgo y flor de cempasúchil, y pastoreo.
14	Ladera ondulada, pendientes de 8 a 20%, con roca ígnea de tipo toba.	Someros (< 30 cm), negros, textura arcillosa, moderados, en materia orgánica.	Uso agrícola, cultivo de maíz, con vegetación de selva baja caducifolia asociada con matorral espinoso, cobertura de 20 a 45%, pastoreo y extracción de leña.
15	Ladera ondulada asociada con cárcavas y arroyos, pendientes de 8 a 16%, arcilla-conglomerado.	Someros (20 cm), textura arcillo limosa, pobres en materia orgánica.	Uso agrícola, con maíz y sorgo, cobertura de 10 a 30%, estrato herbáceo y pastos nativos fuertemente deteriorados por pastoreo.
16	Ladera asociada con cárcavas y barrancas, pendientes de 8 a 16%, arenisca-conglomerado, terrenos erosionados.	Esqueléticos (< 10 cm), textura franca, pobres en materia orgánica.	Matorral espinoso asociado con pastos nativos fuertemente perturbado por pastoreo, cobertura de 5 a 40%.
17	Pequeñas depresiones en laderas de cerro, pendientes de 2 a 8%, roca caliza.	Moderadamente profundos (60 a 70 cm), negros, textura franco arcillo limosa, ricos en materia orgánica.	Uso agrícola, con diversidad de sistemas de producción: maíz, sorgo, hortalizas, flores, frutales (mango, aguacate, mamey) y pastoreo, cobertura de 5 a 30%.
18	Planicie, pendientes de 2 a 4%, arenisca-conglomerado.	Profundos (> 90 cm), pardos, textura franco arcillosa, pobres en materia orgánica.	Uso agrícola, con maíz y sorgo, estrato herbáceo, cobertura de 15 a 50%, y pastoreo.
19	Ladera, pendientes de 4 a 8%, terrenos ligeramente erosionados, piedras abundantes, redondas, sobre y dentro del suelo, arenisca-conglomerado.	Moderadamente profundos (70 cm), textura arcillosa, pobres en materia orgánica.	Uso agrícola, con diversidad de sistemas de producción: maíz, sorgo, flores, hortalizas y cultivos perennes (papayo, limón mexicano), y pastoreo.
20	Ladera, pendientes de 8 a 16%, terrenos erosionados, asociados con cárcavas y arroyos, arenisca-conglomerado.	Someros (< 30 cm) textura arcillosa, pobres en materia orgánica.	Uso agrícola, con maíz y pastos inducidos, cobertura de 10 a 30%, y pastoreo.
21	Tepetate, pendientes de 4 a 16%, asociado con barrancas y cárcavas, arenisca-conglomerado.	Aflora el tepetate, textura gruesa, presencia de piedras con 70 a 90% sobre la superficie, pobres en materia orgánica.	La cobertura vegetal dispersa de 5 a 20%, pastos nativos fuertemente deteriorados por pastoreo.

el Sistema Terrestre Tomatal. En éste se identificaron 21 facetas, a escala 1:75 000, cuya descripción se presenta en el Cuadro 2.

En términos generales, las facetas pueden agruparse en siete con suelos profundos (más de 90 cm), pendientes de 2 a 8% y uso agrícola (Facetas 1, 2, 3, 4, 11, 12 y 18); tres con suelos someros (de 10 a 30 cm), pendientes de 8 a 20% y uso agrícola y pecuario (Facetas 8, 15 y 20); una con suelos someros (de 10 a 30 cm), pendientes de 8 a 20% y uso agrícola, pecuario y forestal (Faceta 14); una asociada con cárcavas y barrancas, y uso forestal (Faceta 7); dos con suelos moderadamente profundos (60 a 70 cm), pendientes de 4 a 8% y uso agrícola y pecuario (Facetas 17 y 19); cuatro con suelos esqueléticos (< 10 cm), pendientes de 8 a 16% y uso forestal y pecuario (Facetas 5, 6, 10 y 16); una con suelos moderadamente profundos (50 a 90 cm), pendientes de 2 a 8% y uso agrícola y pecuario (Faceta 13); una con suelos esqueléticos (< 20 cm), pendientes de 8 a 25% y uso agrícola, pecuario y forestal; y dos con afloramiento de tepetate, pendientes de 4 a 20% y uso pecuario (Facetas 9 y 21).

Con base en las facetas, el método de Morgan dio los valores codificados para los componentes de cobertura vegetal, costras, montículos, pedestales y raíces, y clases codificadas de erosión (promedio), según se presenta en el Cuadro 3.

Con el fin de contar con una equivalencia, las clases de erosión de Morgan se relacionaron con las clases de erosión propuestas por FAO (FFTC, 1995), que se indican en el Cuadro 4, como:

Clase de Morgan	Clase de FAO
0.5 y 1	Ligera
2	Moderada
3	Severa
4 y 5	Muy severa

Cuadro 4. Clases e indicadores de erosión del suelo, según FAO.

Clase de erosión	Indicador de erosión
Ninguna a ligera	Nula evidencia de erosión. Alta permeabilidad del suelo. Buena cobertura vegetal. Ningún signo de movimiento de suelo. Pérdida de suelo menor de 25% y de 10 Mg ha ⁻¹ año ⁻¹ .
Moderada	Presencia de zanjas de 30 a 100 cm de ancho y de 15 a 30 cm de profundidad. Presencia de grava sobre el suelo menor de 20%. Pérdida de suelo de 25 a 50% y de 10 a 50 Mg ha ⁻¹ año ⁻¹ .
Severa	Presencia de zanjas que exceden anchuras de 100 cm y profundidades de 30 cm en forma de U o V, o ambas. Presencia de grava entre 20 y 40%. Pérdida de suelo mayor de 50% y de 50 a 200 Mg ha ⁻¹ año ⁻¹ .
Muy severa	Pérdida total del suelo. La erosión agotó el suelo, presencia de material rocoso. Presencia de grava más de 40%. Pérdida de suelo mayor de 200 Mg ha ⁻¹ año ⁻¹ .

Fuente: FFTC (1995).

Cuadro 3. Valores codificados de indicadores de erosión y la clase de erosión del suelo por faceta, según Morgan, en el Sistema Terrestre Tomatal.

Faceta [†]	Valores codificados de erosión de acuerdo con la presencia de:					Clase de erosión (promedio)
	Cobertura vegetal	Costras	Montículos	Pedestales	Raíces	
1	2	0	0	0	0.5	0.5
2	2	0.5	1	1	0.5	1
3	3	0.5	0.5	0.5	0.5	1
4	3	1	2	3	1	2
5	3	3	3	3	3	3
6	5	5	5	5	5	5
7	4	4	4	4	4	4
8	5	5	5	5	5	5
9	5	5	5	5	5	5
10	5	5	5	5	5	5
11	2	2	2	2	2	2
12	1	1	1	1	1	1
13	2	2	2	2	2	2
14	3	3	3	3	3	3
15	4	4	4	4	4	4
16	5	5	5	5	5	5
17	2	2	2	2	2	2
18	2	2	2	2	2	2
19	2	2	2	2	2	2
20	4	4	4	4	4	4
21	5	5	5	5	5	5

[†] Las facetas se describen en el Cuadro 2.

En la Figura 1 se presenta la cartografía de las clases de erosión de Morgan y su equivalencia con las clases de erosión de la FAO, en el Sistema Terrestre Tomatal, a la vez que se indica la correspondiente superficie, lo mismo que de las cárcavas, cuya ubicación no se señala por la escala de trabajo. Como puede observarse, resalta la elevada superficie afectada por un grado severo y muy severo de erosión del suelo en el área estudiada, que alcanza 71.1%, y por las cárcavas, con 10.4%.

Los datos para obtener la función de producción que permitiese determinar el efecto de la erosión sobre

el rendimiento de maíz determinada en las 28 parcelas cultivadas con éste, se presenta para las propiedades físicas y químicas, y las clases de erosión del suelo en el Cuadro 5, y para las prácticas agrícolas y factores tecnológicos y los rendimientos de maíz en los Cuadros 6 y 7.

El modelo de regresión para el rendimiento de maíz obtenido fue:

$$Y = 5.4268 - 0.78542 E^{0.75} + 0.52321 K - 1.83198 D - 0.097443 M^2 + 0.037318 A M^2$$

(CME = 0.0444, Pr > F = 0.0001, R² = 0.889)

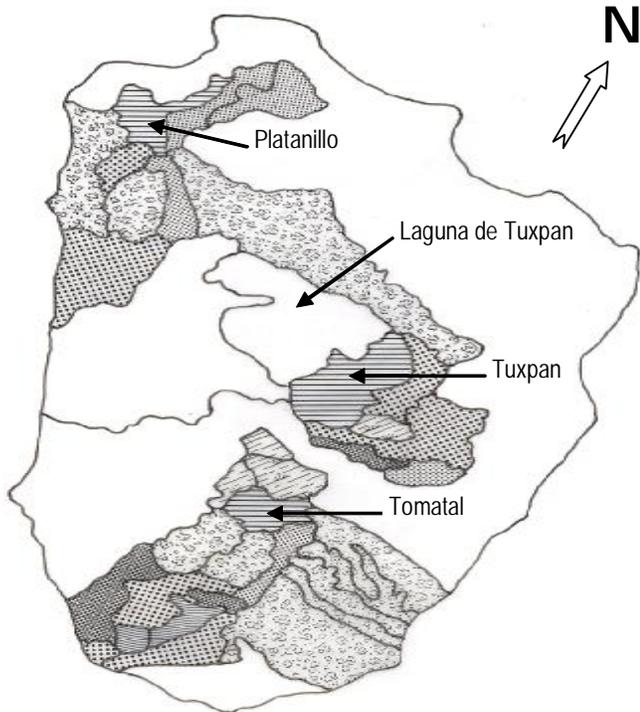
donde: Y es el rendimiento (Mg ha⁻¹), E es la clase de erosión de Morgan (codificada como: 0.5, 1, 2, 3, 4 y 5), K es el potasio intercambiable del suelo (cmol_c kg⁻¹),

D es una variable auxiliar para densidad de plantas (para densidades menores de 30 000 plantas ha⁻¹, D = 1; para densidades mayores de 30 000 plantas ha⁻¹, D = 0); M es la infestación de maleza en el momento de la cosecha (escala de 1 a 5); y A es una variable auxiliar para año (para 1999, A = 0; para 2003, A = 1).

Los factores incluidos en el modelo de regresión explican un alto porcentaje de la variación de los rendimientos, entre ellos las clases de erosión de Morgan. No obstante, el modelo excluyó al factor profundidad del suelo, altamente correlacionado con las clases de erosión del suelo (r = -0.764, P = 0.01), así como al factor pendiente del suelo, que no presentó correlación con las clases de erosión del suelo (r = 0.332, P = 0.09), lo que indicaría que ésta no tuvo un efecto depresivo directo sobre el rendimiento de maíz.

En el Cuadro 8 se presenta el rendimiento de maíz estimado con la función de producción por faceta y sus respectivos valores de clase de erosión de Morgan, profundidad del suelo, potasio intercambiable del suelo y un valor medio de infestación de malezas a la cosecha referida al año 1999 de 2.9; en el Cuadro 9 se presenta el efecto de reducción del rendimiento de maíz debido a las clases de erosión del suelo, a valores medios de K intercambiable del suelo de 0.45 cmol_c kg⁻¹ e infestación de malezas a la cosecha referida al año 1999 de 2.9, y a una densidad de población mayor de 30 000 plantas ha⁻¹.

Los rendimientos de maíz variaron de 2.703 a 5.256 Mg ha⁻¹ en las distintas facetas, lo que tiene que



Clase de erosión		Superficie	
Morgan	FAO	(ha)	(%)
0.5	Ligera	106.7	6.7
1	Ligera		
2	Moderada	187.9	11.8
3	Severa	130.3	8.2
4	Muy severa	998.0	62.9
5	Muy severa		
	Cárcavas	164.8	10.4
Total		1587.7	

Figura 1. Cartografía de las clases de erosión de Morgan y su equivalente con las clases de FAO, su superficie, así como la de las cárcavas, en el Sistema Terrestre Tomatal.

Cuadro 5. Valores de propiedades físicas y químicas y clases de erosión del suelo, en 28 parcelas con maíz, en el Sistema Terrestre Tomatal.

Propiedad	Valor		
	Mínimo	Máximo	Medio
Profundidad (cm)	20	120	72
Pendiente (%)	2	25	4.9
Arena (%)	10	56	29
Limo (%)	15	46	31
Arcilla (%)	25	64	40
Densidad aparente (Mg m ⁻³)	1.25	1.57	1.37
pH	7.7	8.1	8.0
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	0.10	0.17	0.13
Materia orgánica (%)	0.13	4.59	1.76
N-NH ₄ (mg kg ⁻¹)	3	14	7
N-NO ₃ (mg kg ⁻¹)	8	25	14
Fósforo Olsen (mg kg ⁻¹)	2	25	7
Capacidad de intercambio catiónico (cmol kg ⁻¹)	16	41	24
Ca intercambiable (cmol kg ⁻¹)	20	68	45
Mg intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0.62	5.80	1.64
K intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0.22	0.91	0.44
Clase de erosión (valores de 0 a 5)	0.5	5.0	1.7

Cuadro 6. Prácticas agrícolas y porcentaje de uso por los agricultores, en 28 parcelas con maíz, en el Sistema Terrestre Tomatal.

Práctica agrícola y porcentaje de uso						
Barbecho	Surcado	Siembra	Escarda	Chaponeo	Fertilización orgánica	Variedad
Tractor, 100%	Tractor, 93% Animal, 7%	Manual, 89% Mecanizada, 11%	Animal, 72% No, 28%	No, 79% Sí, 21%	No, 89% Si, 11%	H-515 18%, H-516 11% VS-535, 50% ASGRO, 3% PIONER, 4% TEHU, 14%

Cuadro 7. Valores mínimo, máximo y medio de algunos factores tecnológicos, infestación de malezas y rendimientos, en 28 parcelas con maíz, en el Sistema Terrestre Tomatal.

Concepto	Valor		
	Mínimo	Máximo	Medio
Fertilización (kg ha ⁻¹):			
N	90	140	110
P ₂ O ₅	34	92	67
K ₂ O	0	34	4
Densidad de población (plantas ha ⁻¹)	19 011	55 555	38 778
Infestación de malezas (escala de 0 a 5):			
a los 25 días	0	5	2.8
a la cosecha	1	5	2.9
Rendimiento (Mg ha ⁻¹)	2640	4890	3925

ver con los valores de los factores que los afectan y quedaron incluidos en la función de producción, fundamentalmente la clase de erosión de Morgan y, en menor medida, el potasio intercambiable del suelo.

El efecto depresivo de la erosión del suelo sobre el rendimiento de maíz varió de 0.467 y 0.785 Mg ha⁻¹, para las clases de erosión de Morgan de 0.5 a 1 y su equivalente de erosión ligera de FAO, a 2220 y 2626 Mg ha⁻¹, para las clases de erosión de Morgan 4 y 5 y su equivalente de erosión muy severa de FAO, valores que en porcentaje van de 9.0 y 15.2% a 43.0 y 50.9%, respectivamente. De acuerdo con estos valores, resulta claro que la erosión del suelo presenta un efecto depresivo importante sobre la productividad en los suelos del área del Sistema Terrestre Tomatal.

Los productores están plenamente conscientes del efecto depresivo de la erosión sobre la productividad del suelo (González *et al.*, 2003) y suelen no sembrar en los suelos con erosión muy severa. Sin embargo, el efecto se manifiesta también en una muy baja productividad de los agostaderos, como se observó en el desarrollo de la presente investigación.

Cuadro 8. Rendimiento de maíz estimado por faceta y sus respectivos valores de clase de erosión de Morgan, profundidad del suelo, potasio intercambiable del suelo y un valor medio de infestación de malezas a la cosecha, en el Sistema Terrestre Tomatal.

Faceta	Clase de erosión de Morgan	Profundidad del suelo	K intercambiable del suelo	Rendimiento
		cm	cmol kg ⁻¹	Mg ha ⁻¹
1	0	110	0.64	5.256
1	0.5	110	0.64	4.789
2	1	100	0.63	4.466
3	1	85	0.34	4.314
4	2	90	0.4	3.81
6	5	20	0.78	2.703
8	0.5	90	0.86	4.904
11	1	100	0.32	4.303
12	1	110	0.39	4.34
13	2	55	0.37	3.794
14	3	30	0.49	3.387
17	2	65	0.3	3.357
19	2	70	0.36	3.789
20	4	30	0.69	3.061

Por otro lado, la seria erosión del suelo que se presenta en la cuenca de la laguna de Tuxpan ha originado el azolvamiento de ésta y la disminución de su superficie, en 66 ha, con los consiguientes efectos sobre el volumen de agua almacenado.

Para solucionar la problemática de la erosión del suelo en el área de la cuenca de la laguna de Tuxpan, sin duda, se requeriría de esfuerzos conjuntos del Estado, las comunidades y los técnicos, en un plan de conservación y manejo sustentable de los recursos naturales y el suelo. En cuanto a algunos aspectos técnicos, cabe señalar que durante el desarrollo de la investigación se logró controlar la erosión del suelo mediante la construcción de tinas ciegas y la plantación

Cuadro 9. Efecto de disminución de rendimiento de maíz por clase de erosión de Morgan, y su equivalente en clase de erosión de FAO, en el Sistema Terrestre Tomatal.

Clase de erosión de Morgan	Clase de erosión de FAO	Reducción de rendimiento por clase de erosión	
		Mg ha ⁻¹	%
0.5	Ligera	-0.467	9.0
1	Ligera	-0.785	15.2
2	Moderada	-1.321	25.6
3	Severa	-1.79	34.7
4	Muy severa	-2.22	43.0
5	Muy severa	-2.626	50.9

de nopal sobre ellas, a la vez que el segundo año de establecidas la recuperación de las arvenses nativas aportó una producción de 2750 kg de materia seca por hectárea.

CONCLUSIONES

- En el área del Sistema Terrestre Tomatal, las clases de erosión de Morgan y su equivalente en clases de erosión de FAO abarcan las siguientes superficies: clases 0.5 y 1, erosión ligera, 6.7%; clase 2, erosión moderada, 11.8%; clase 3, erosión severa, 7.6%; y, clases 4 y 5, erosión muy severa, 62.9%; a la vez que las cárcavas ocuparon 10.4% de la superficie.

- El efecto depresivo de las clases de erosión de Morgan y su equivalente en clases de erosión de FAO, sobre el rendimiento de maíz fue de: 0.467 Mg ha⁻¹ (9.0%) y 0.785 Mg ha⁻¹ (15.2%) para las clases 0.5 y 1, respectivamente, erosión ligera; 1.321 Mg ha⁻¹ (25.6%) para la clase 2, erosión moderada; 1.790 Mg ha⁻¹ (34.7%) para la clase 3, erosión severa; y, 2.220 Mg ha⁻¹ (43.0%) y 2.626 Mg ha⁻¹ (50.9%) para las clases 4 y 5, respectivamente, erosión muy severa.

- La superficie que ocupan las distintas clases de erosión de Morgan y su equivalente en clases de erosión de FAO, y la reducción de los rendimientos de maíz que causan indican el gran deterioro que ha sufrido el recurso suelo en el área del Sistema Terrestre Tomatal, en la cuenca de la laguna de Tuxpan, Guerrero, derivado de su uso inadecuado, en relación con el uso de suelos con elevadas pendientes y sin prácticas de conservación del suelo y agua, el sobrepastoreo y la deforestación de suelos no agrícolas.

LITERATURA CITADA

- Contreras H., J., V. Volke H., J. Oropeza M., C. Rodríguez F., T. Martínez S. y A. Martínez G. 2003. Estado actual y causas de la degradación de los agostaderos en el municipio de Yanhuítlan, Oaxaca. *Terra* 21: 427-435.
- Díaz C., H. 1990. Manual para estimar rendimientos de maíz y determinar el uso de la tierra en programa de desarrollo agrícola regional. Colegio de Postgraduados. Puebla, Pue., México.
- FAO (Food and Agricultural Organization). 1994. Plan de acción para combatir la desertificación en México (PACD-MEXICO). Comisión Nacional de Zonas Áridas. México, D. F.
- FAO/UNESCO/ISRIC. 1990. Mapa mundial de suelos. Leyenda Revisada. Versión en español, por T. Carballas, F. Macías, F. Díaz-Fierro, M. Carballas y J. A. Fernández-Urrutia. FAO. Roma, Italia.
- FFTC (Food and Fertilizer Technology Center for the Asian and Pacific Region). 1995. Soil conservation handbook. Chinese edition compiled by the Council of Agriculture, ROC Taiwan Provincial Soil and Water Conservation Bureau and the Chinese Soil and Water Conservation Society. Taipei, Taiwan, Republic of China.
- Figueroa S., B. 1995. Diseño de programas de conservación del suelo y agua a nivel de finca, usando modelos de simulación de erosión y su análisis financiero. pp. 259-294. *In*: J. F. Ruiz F. (ed.). Evaluación de tierras para una agricultura sostenible en México. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx., México.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- González M., R., C. A. Ortiz S., V. Volke H., J. González R. y F. Manzo R. 2003. Conocimiento local de pequeños productores sobre la erosión del suelo en el ejido El Tomatal, Guerrero, México. *Terra* 21: 245-258.
- Hudson, N. W. 1983. Soil conservation strategies in the Third World. *J. Soil Water Conserv.* 38: 446-450.
- Huitzhusen, F. J. 1993. Land degradation and sustainability of agricultural growth: some economic concepts and evidence from selected developing countries. *Agric. Ecosyst. Environ.* 46: 69-79.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1994. Registro Agrario Nacional. Tipo de Plano: Interno. Escala 1:10 000. Chilpancingo, Gro., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1998. Estadísticas del medio ambiente, México, 1997. Aguascalientes, Ags., México.
- María R., A. y V. Volke H. 1999. Estratificación del potencial productivo del maíz en la región oriente del estado de Tlaxcala. *Terra* 17: 131-138.
- Morgan, R. P. C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Trad. al español por P. Urbano Terrón y J. de M. Urbano López de Meneses. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Napier, T. L., S. M. Napier, and J. Tyrdon. 2000. Soil and water conservation policies and programs: successes and failures. CRC. Boca Raton, FL, USA.
- Ortiz S., C.A. y H.E. Cuanalo de la C. 1984. Metodología del levantamiento fisiográfico: un sistema de clasificación de tierras. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx., México.

- Ortiz S., Ma. de la L. M., M. Anaya G. y J.W. Estrada Berg Wolf. 1994. Evaluación, cartografía y política preventiva de la degradación de la tierra. Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo y Comisión Nacional de las Zonas Áridas. Chapingo, Méx., México.
- Pimentel, D. and N. Kounang, 1998. Ecology of soil erosion in ecosystems. Cornell University. Ithaca, NY, USA.
- Rendón S., G. y V. González R. 1989. Tamaño de muestra: una alternativa para su determinación con extensión a estudios con propósitos múltiples. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx., México.
- USDA (United States Department of Agriculture) – SCS (Soil Conservation Service). 1990. Soil erosion by water. Agriculture Information Bulletin 513. USDA-SCS. Washington, DC, USA.
- Wischmeier, W. H. 1976. Use and misuse of the universal soil loss equation. *J. Soil Water Conserv.* 31: 5-19.