

Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetate t3 en Texcoco, México

Christian PRAT, Aurelio BÁEZ, Alfonso MÁRQUEZ

Abstract

The reclamation of volcanic indurated soils called tepetates in Mexico must control soil erosion and generate a good productivity of these new soils according to a sustainable development strategy. This paper shows the results of an european research program involving ORSTOM and the Colegio de Postgraduados en Agrociencias in the eastern part of the valley of Mexico (Texcoco). Different systems of culture have been studied (mono/associated culture, with/without manure, soil/tepetate, natural/cultivated tepetate, tepetate with deep/normal subsoiling, tillage practice) during four years on 8 large terraces (700 m²). After every rain, we measured the runoff, took and dried all the sediments, sampled water and followed the vegetation cover, the soil surface aggregates, the crops growing (see this papers in this publication).

In the study area, only few events generated an important soil erosion: 16 events ≥ 10 mm, representing 50 % of the total volume of the rain and 80 % of the R_{US} of the year. Only 3 events had an energy > 500 MJ/ha. For all the rain ≥ 1 mm, this R_{US} varied between 55 and 150. So it is not the annual R which is important but the frequency and the intensity of the rain during the year. In fact the annual and daily differences had more impact on the runoff and erosion than the kind of soils, crops and soil practices.

On the natural tepetate, 75 % of the rain runoff and the runoff coefficient (K_r) is between 40 and 50 %. The soil erosion varies from 10 to 30 t/ha/year, with an average of 20 t/ha/year. The solid charge is 30 %, showing that the erosion is more a gully than a laminar erosion. This is the consequence of the induration of the material which provokes high ranges of runoff. Water concentrates along the slope, and with the energy accumulated, is able to generate a deep and catastrophic soil erosion on the lower part of the hills, as it is possible to see on the actual landscape. In spite of the fact that the reclamation of the tepetate was controlled and the terraces were on the same area, we noticed differences in the results due to the station. So, we distinguish 2 groups, the upper and the lower terraces, and we still study the reasons of these differences. For the upper terraces, in the case of barley, during a dry year, the K_r is under 15 % and the $E = 1$ to 6 t/ha/year meanwhile in a rainy year, the K_r is 50 % and the E between 10 to 30 t/ha/year. In the case of corn growing on the same terraces, during a rainy year, the K_r is around 30 % and the $E = 4$ to 15 t/ha/year. For the lower terraces, in the case of the barley, during a dry year, the K_r is under 5 % and the E is 1 t/ha/year. In the case of the corn growing on the same terraces during a rainy year, the K_r is around 10 % and the E is less than 1.5 t/ha/year.

Barley reduces less and generates more soil loss than corn. But, in this case, the raw and the work of cleaning the fields must be made with care and at the good moment. The raw with little rain catchment is a very good alternative with this climate because it strongly

reduces soil erosion and the production of string beans is higher (meanwhile there is no effect on corn production). The association of string beans and corn reduces soil erosion and increases the productivity of both cultures in relation with the monoculture. We did not notice any kind of impact of the apportation of manure (20 t dry) as well as the deepness of the reclamation of the tepetate on the soil erosion.

Keywords: Tepetate - Vertic Phæozem - Mexico - Erosion - Runoff - Corn - Stringbeans - Barley - Tillage Practices

INTRODUCCIÓN

Convertir un horizonte volcánico endurecido estéril en un suelo agrícola productivo desde el primer año de su roturación es técnicamente factible. Sin embargo, debido a la inversión que estos trabajos requieren y porque hoy en día no se deberían realizar programas a corto plazo sin medir sus impactos a largo plazo, es necesario estudiar las modalidades para asegurar que el uso agrícola de los tepetates corresponda a un desarrollo sostenible, duradero y compatible con la problemática socioeconómica de la población local.

Prácticamente todos los estudios sobre la erosión de los tepetates se han realizado en parcela Wischmeier (Ruiz, 1987). Si bien esta metodología puede presentar un interés en términos de modelización de la susceptibilidad del material a la erosión (Oropeza, 1995), no se puede decir lo mismo cuando se pretende formular recomendaciones para los campesinos que van a trabajar estos nuevos suelos. Por ello, los experimentos objeto de este trabajo se efectúan en parcelas de aproximadamente 700 m². En efecto, se considera que los modelos de predicción de erosión que se generen con esta metodología serán más acordes con la realidad, pues en tales parcelas intervienen un mayor número de factores que pueden contrabalancearse. Siendo la parcela la unidad de estudio, no se pretende llegar a resultados que podrían ser utilizados a nivel del manejo de una cuenca. En efecto, para pasar de una escala a otra, se requiere no solamente tomar precauciones sino disponer de mayor cantidad de datos, ya que otros factores intervienen en la dinámica del agua y del arrastre.

A diferencia de otros trabajos realizados anteriormente en Tlaxcala en el marco del programa UE-ORSTOM-CP-UAT-UG (Quantin, 1992), se diseñó un programa donde los ensayos agronómicos y las medidas de erosión se efectúan a la par, lo que permite una mejor comprensión de las dinámicas en juego. Este programa es parte de un segundo proyecto cofinanciado por la UE y que cuenta con la participación de las mismas instituciones en México, además de otras en el Ecuador y en Chile.

El objetivo final de estos trabajos, es, a partir del conocimiento de los procesos que generan el escurrimiento y arrastre de los sedimentos, proponer soluciones y recomendaciones técnicas para limitar estos factores de degradación de los nuevos suelos.

METODOLOGÍA

La zona de estudio se encuentra en San Miguel Tlaixpan (Edomex) aproximadamente 15 km al este de Texcoco. Está localizada en la parte oriental de la cuenca de

México, a nivel de los 98° 47' 55" de longitud norte y 19° 29' 53" de latitud oeste. La altitud es de 2.555 m.s.n.m. El clima, según la clasificación de Köppen, es de tipo C(w1)(w), es decir templado subhúmedo, con un régimen de humedad ústico-údic (Peña y Zebrowski, 1992).

Características de las precipitaciones

Se colocaron 3 pluviómetros a una distancia de 100 m entre ellos a lo largo del área de experimentación. Uno de ellos se localizó cerca de un pluviógrafo de registro diario. En otro artículo presentado en este volumen (Prat, 1997), se detalla la metodología adoptada.

Características de las terrazas estudiadas

Las características de la preparación del tepetate t3 así como de las parcelas son detalladas en el artículo de Báez *et al.* (1997) presentado en este volumen. Se diseñaron 7 terrazas que fueron trabajadas de manera diferente, con lo que se trata de corroborar el efecto de un parámetro en otro, desde un punto de vista tanto agronómico como de conservación de suelos (cuadro 1).

Tratamiento	Ref.	Área (m ²)	Substrato	Prof.* (m)	Pendiente (%)
Referencia tepetate desnudo y no roturado	T0	1.800	Tepetate desnudo	**	2 a 10
Efecto profundidad roturación	T2	470	Tepetate roturado	0,60	4,7
Referencia monocultivo	T3	773	"	0,46	3,2
Efecto estiércol	T4	732	"	0,43	3,4
Efecto preparación de la tierra y plana (fina)	T5	792	"	0,44	2,5
Referencia (hasta inicios de 1995)	T6	1.152	"	0,40	4,4
A partir de inicios de 1995	T6a	733	"	0,40	4,4
Referencia suelo	T7	713	Faeozem vértico	0,53	5,9

*: Profundidad promedio de roturación, **: no roturado

Cuadro 1 - Características de las terrazas después de la roturación (salvo T0 no roturada)

En cuanto a los cultivos, de 1993 a 1996 se sembraron los siguientes:

Ref.	1993	1994	1995	1996
T2	Cebada + veza	Maíz + Haba + Frijol	Maíz + Haba	Cebada + Medicago p.
T3	Cebada	Maíz	Maíz	Cebada
T4	Cebada + veza	Maíz + Haba + Frijol	Maíz + Haba	Cebada + Medicago p.
T5	"	"	"	Maíz + Haba contreo
T6	"	"	"	Maíz + Haba
T7	"	"	"	Cebada + Medicago p.

Cuadro 2 - Condiciones de las terrazas de estudio de 1993 a 1996

Se trata de comparar los siguientes parámetros: asociación gramíneas + leguminosas vs. monocultivo, roturación normal vs. roturación profunda, aplicación de estiércol vs. abonos minerales, pendiente del 5-10 por ciento vs. pendiente plana, tepetate vs. suelo y en 1996, surcos con compartimentación —contreo— (T5) vs. surcos sin compartimentación (T6).

Medición de los escurrimientos y sedimentos arrastrados

Cada terraza tiene una pendiente general dirigida hacia un vertedor tipo H, el cual desemboca en una pileta de repartición de agua, de un volumen de alrededor de un metro cúbico. Esta pileta tiene a su vez una salida hacia una segunda pileta, donde se recupera un 1/20 ó 1/10, según los modelos, del total de agua. Finalmente, esta segunda pileta se vierte a su vez en un tambor de metal, también en una proporción de 1/20 ó 1/10 del volumen de agua que rebasa. Construidas de concreto, las piletas fueron pintadas para evitar la contaminación del agua por el cemento. A nivel del vertedor, se tiene un limnógrafo Stevens horizontal de registro diario, escala 1/1, con relojería de cuarzo (figura 1).

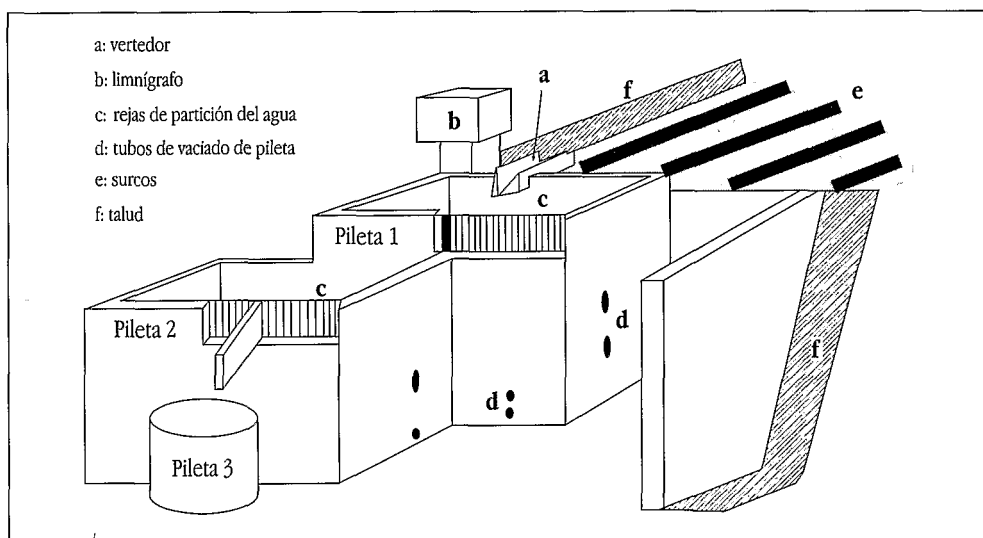


Figura 1 - Esquema de las instalaciones de captación de aguas y sedimentos

Después de cada aguacero se mide la altura de agua en las piletas y se recuperan todos los sedimentos en bolsas de plástico. Luego, se colocan dichos sedimentos en pequeñas charolas de zinc en una estufa a 105 °C durante uno a tres días, dependiendo de su grado de humedad.

El levantamiento de los limnigramas se realizó manualmente en una tabla de digitalización Summasketch conectada a una computadora a través de un módulo de HYDROM —programa desarrollado por el ORSTOM (Boyer *et al.*, 1994)—. Posteriormente, se procesaron todos los escurrimientos, independientemente de su duración o altura, utilizando ese mismo programa.

Análisis complementarios

Para completar los datos y mejorar su interpretación, se efectuaron una serie de mediciones, análisis y observaciones a lo largo de estos años. Así, se tomaron sistemáticamente muestras de agua cargada de sedimentos en suspensión, en las que se analizaron, en el laboratorio de fertilidad de suelos del CP, los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica, N, P, principales bases, M.O. y cantidad de sedimentos en suspensión. Se efectuó también, a partir de 1994, el seguimiento de la evolución de la superficie de los suelos y de la cobertura vegetal (Lauffer *et al.*, 1997). En la medida de lo posible, estos datos fueron completados mediante un levantamiento semi-cuantitativo del estado de los surcos a lo largo y ancho de cada terraza. Se instaló igualmente un sistema sencillo para captar el agua y los sedimentos arrastrados del borde localizado entre las terrazas T2 y T3 a fin de observar el comportamiento del borde nuevamente construido. Finalmente, se efectuaron mediciones de humedad de suelo a lo largo y ancho de cada terraza.

Hasta ahora, todos estos datos han sido procesados parcialmente y los resultados correspondientes se presentan en otros artículos de este volumen. El resto queda por analizarse.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las lluvias

El análisis detallado de las lluvias aparece en el artículo de Prat, publicado en este volumen (1997).

En síntesis, recordaremos que el comportamiento anual de las lluvias es muy variable de un año a otro, en términos tanto de cantidades de precipitaciones como de su distribución a lo largo de cada temporada lluviosa (cuadro 3).

	1992	1993	1994	1995	1996	1992-1996
Número de días de lluvia	126	81	105	120	90	105
Altura total (mm)	654,4	397	735,6	768,3	582,7	627
Número de aguaceros registrados con el pluviógrafo y procesados	193	132	148	154	109	-
Altura de aguaceros registrados con el pluviógrafo y procesados	654,4	396	594,1	528,6	417,8	-
% de días de lluvias registradas vs. totales	99	99	86	70	72	-
R métrico	259,2	96	216	196,7	204,4	194,4
R usa	149,3	55,3	124,4	113	118,2	112
«Tipo» tentativo de clasificación del año pluviométrico	Normal y erosiva	Muy seco	Normal	Irregular	Seco e irregular	Año promedio

Cuadro 3 - Características principales de las lluvias de 1992 a 1996

Salvo en el año 1995 durante el cual la cuarta parte de las lluvias cayeron antes o después de la temporada de cultivo, normalmente el 90 % de las precipitaciones anuales ocurren entre mayo y octubre, siendo agosto el mes más lluvioso. En el 90 % de los casos,

las precipitaciones son aguaceros simples (≥ 3 mm), breves (50 % ≤ 30 mm) y de baja intensidad (90 % ≤ 10 mm/h). Se calculó que en términos de agresividad hacia los suelos, las precipitaciones anuales tienen valores medios ($R_{US} \approx 150$) que corresponden efectivamente a valores registrados en climas parecidos. Como es clásico, son una cuantas lluvias las que provocan la mayor parte de la erosión hídrica: 16 eventos de más de 10 mm, que representan el 50 % del total del volumen de lluvias, generan el 80 % del R_{US} .

Dada la brevedad de las precipitaciones, la intensidad máxima ocurrida en 5 minutos (o 10) durante un aguacero debería ser un índice mejor que el R basado en esa intensidad pero con una duración de 30 minutos.

Número de escurrimientos

La figura 2 presenta la suma de los escurrimientos mensuales obtenidos cada mes durante 4 años en las diferentes parcelas de experimentación.

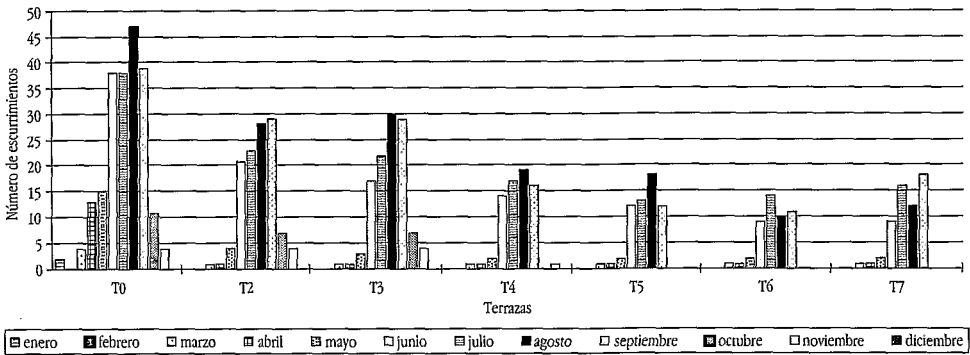


Figura 2 - Número de escurrimientos mensuales por terrazas de 1993 a 1996

Obviamente, la parcela de tepetate aflorante es la que presenta el mayor número de escurrimientos, seguida de las terrazas T2 y T3 que registran cerca de la mitad de los eventos ocurridos en T0. Si bien había que esperarse un elevado número de escurrimientos en la parcela de monocultivo T3, es sorprendente tener una respuesta similar en la parcela de cultivos asociados y con una roturación a 60 cm en lugar de 40 cm. La terraza en que se aplicó estiércol (T4) tiene un comportamiento intermedio entre las tres anteriores y las tres siguientes. Las terrazas T5, T6 y T7 presentan resultados globales similares aunque en cada año hubo diferencias notables. Es interesante anotar que, pese a haber reducido la superficie de T6 en 1995 para tener una dimensión similar a la de las demás (± 700 m²), se tiene el mismo tipo de respuesta que cuando esa parcela medía cerca de 1.150 m². El hecho de que la T2 tenga una superficie 30 % inferior a las demás, podría incidir en las altas tasas de escurrimiento, en la medida en que el agua tiene menos área de microdepresión donde podría estancarse, tal como ocurre en las demás terrazas.

En términos cualitativos, se podría clasificar, para cada año de medición, la importancia del número de escurrimientos de una terraza en comparación con las otras:

1993: T0 >> T2 ≈ T3 ≈ T4 ≈ T5 > T6 ≈ T7
 1994: T0 >> T2 ≈ T3 >> T4 ≈ T5 > T6 ≈ T7
 1995: T0 >> T2 ≈ T3 >> T4 > T5 ≈ T6 > T7
 1996: T0 >> T2 ≈ T3 >> T7 > T4 > T6* ≈ T5* (*con maíz + haba)
 Total: T0 >> T2 ≈ T3 >> T4 > T5 ≈ T7 > T6

Coefficiente de escurrimiento

En términos de coeficientes de escurrimiento encontrados cada mes en cada terraza, los resultados presentados en los cuadros 4 y 5, muestran que se registran las mismas tendencias que en el caso del número de escurrimientos: T0 presenta las mayores tasas de escurrimiento, seguida de T2 y T3, teniendo T4 un comportamiento intermedio entre las anteriores y las que siguen, T5, T6 y T7, que presentan los menores coeficientes.

Cuadro 4 - Número de escurrimientos ocurridos por terrazas vs. coeficiente de escurrimiento (1993 a 1996)

Ref.	T0	T2	T3	T4	T5	T6	T7
	Número						
0	53	38	40	40	38	33	36
10	31	20	11	11	11	3	7
20	24	11	7	3	5	3	6
30	23	7	9	4	1	2	6
40	24	18	13	3	0	0	0
50	16	5	14	3	0	2	0
60	15	7	6	1	0	0	0
70	10	4	4	0	0	0	0
> 80	8	1	3	0	0	0	0
Total	204	111	107	65	55	43	55

Nota: El número total de escurrimientos corresponde al número registrado y no ocurrido, como en el caso del cuadro anterior, ya que hubo varios eventos durante los cuales se juntaron los escurrimientos y sedimentos.

Cantidad de sedimentos arrastrados

Los resultados de los sedimentos arrastrados presentan las mismas tendencias que los escurrimientos (cuadros 5 y 6).

Si bien es cierto que la T0 registró la mayor cantidad de sedimentos arrastrados, es importante señalar que durante los cuatro años, los valores máximos no superan las 30 t/ha, lo que es elevado pero no exagerado en comparación con las 300 t/ha que se han podido registrar en otros experimentos. En cuanto a T2 y T3, el promedio de 10 t/ha es demasiado alto considerando que son terrazas aplanadas y con pendiente débil. En el caso de las demás terrazas, la cantidad de sedimentos perdidos se inscriben dentro el margen considerado aceptable, aunque sería preferible disminuirla.

Pese a haberse tomado muestras de 1 litro de agua cargada de sedimentos durante 3 años, no se logró establecer realmente una relación entre las cantidades de sedimentos de las muestras y las recolectadas efectivamente en las piletas. En efecto, esta técnica no permite obtener buenos resultados. Por lo tanto, se presentan únicamente los datos de los sedimentos de las piletas. Por otra parte, se considera que los sedimentos recogidos

después de la primera pileta corresponden a sedimentos en suspensión mientras que en ella, predominan los sedimentos de fondo. Por ello, se calculó, para los eventos que rebasaron la primera pileta, la relación entre los sedimentos de fondo (principalmente arena y grava arrastradas) y aquellos en suspensión (arcilla y limo).

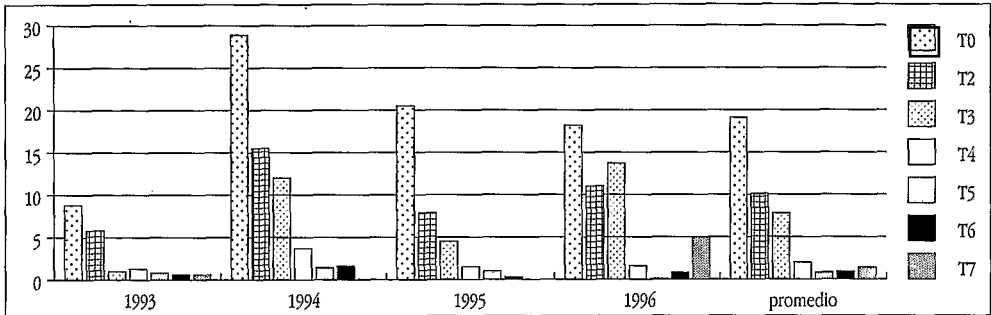
Mes	Lluvia mens. mm	T0		T2		T3		T4		T5		T6		T7	
		Kr %	Eros t/ha	Kr %	Eros t/ha	Kr %	Eros t/ha	Kr %	Eros t/ha	Kr %	Eros t/ha	Kr %	Eros t/ha	Kr %	Eros t/ha
Enero	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Febrero	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Marzo	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Abril	0,0	22,7	0,582	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mayo	16,6	1,8	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Junio	93,2	33,4	1,558	9,2	0,388	3,4	0,131	0,2	0,014	0,6	0,039	0,7	0,011	-	-
Julio	10,06	31,9	3,491	16,7	3,948	13,4	0,649	11,0	1,092	5,6	0,597	7,1	0,494	9,2	0,429
Agosto	72,4	32,0	1,821	18,2	0,992	8,3	0,091	3,8	0,069	3,7	0,059	3,8	0,104	2,6	0,090
Sept.	84,9	12,7	1,196	8,4	0,484	5,3	0,101	2,3	0,085	1,9	0,060	1,5	0,024	1,4	0,034
Oct.	14,2	18,4	0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nov.	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dic.	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Año 1993	397,0	26,9	8,774	13,2	5,812	7,9	0,972	4,7	1,261	3,0	0,756	4,0	0,633	4,9	0,553
Enero	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Febrero	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Marzo	40,0	62,4	2,148	*	0,125	*	0,010	0,2	0,005	0,9	0,009	1,5	0,010	0,8	0,010
Abril	23,3	31,7	0,437	17,1	0,032	4,6	0,008	0,3	0,006	1,0	0,006	0,9	0,003	0,5	0,001
Mayo	49,2	41,2	1,163	40,1	0,564	12,0	0,230	6,8	0,117	23,7	0,271	8,7	0,151	0,2	0,001
Junio	117,5	31,5	3,317	21,6	1,321	28,2	0,874	7,4	0,293	3,5	0,161	7,7	0,182	0,4	0,013
Julio	184,2	61,6	10,497	52,3	10,064	57,6	6,615	47,0	2,275	26,6	0,655	35,2	1,245	0,9	0,047
Agosto	212,8	56,3	8,172	23,7	2,143	34,6	3,197	6,4	0,392	4,6	0,188	1,6	0,031	0,6	0,003
Sept.	85,7	53,6	2,737	26,4	1,246	37,4	10,019	15,4	0,603	9,7	0,114	2,9	0,006	1,7	0,012
Oct.	26,9	32,6	0,406	7,4	0,012	13,1	0,011	-	-	-	-	-	-	-	-
Nov.	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dic.	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Año 1994	735,6	50,7	28,876	31,2	15,506	38,6	11,963	17,3	3,692	10,3	1,404	13,3	1,627	0,8	0,086
Enero	28,8	23,3	0,034	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Febrero	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Marzo	12,7	12,3	0,086	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Abril	14,6	4,4	0,011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mayo	60,9	12,7	0,303	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Junio	117,6	56,0	4,446	48,5	2,769	31,0	0,934	19,4	0,287	13,0	0,340	5,7	0,169	0,1	0,004
Julio	85,2	32,2	1,888	56,2	1,252	44,8	0,629	28,3	0,302	15,4	0,155	7,3	0,100	-	-
Agosto	206,0	47,9	9,941	29,4	3,258	48,6	2,021	20,6	0,889	13,6	0,500	2,4	0,027	0,3	0,008
Sept.	49,1	23,8	0,842	8,1	0,086	11,1	0,102	-	-	-	-	-	-	-	-
Oct.	61,0	32,8	1,880	16,7	0,287	18,9	0,217	-	-	-	-	-	-	-	-
Nov.	64,4	33,4	1,029	17,2	0,264	12,2	0,183	-	-	0,5	0,004	-	-	-	-
Dic.	68,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Año 1995	768,3	37,9	20,460	29,4	7,916	29,3	4,085	21,3	1,479	11,2	0,998	5,1	0,296	0,2	0,012
Enero	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Febrero	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Marzo	11,7	58,8	0,292	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Abril	32,5	80,4	1,124	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mayo	32	47,9	0,886	17,5	0,175	53,9	0,171	-	-	-	-	-	-	-	-
Junio	101	55,2	3,476	68,7	2,055	69,4	7,546	29,2	0,991	0,2	0,003	26,7	0,341	60,9	4,052
Julio	121	52,8	4,159	53,4	4,119	54,1	2,593	38,9	0,44	10,6	0,094	31,4	0,369	26,9	0,486
Agosto	77,5	27,9	0,786	33,4	0,731	31,1	0,559	9,1	0,012	-	-	-	-	13,1	0,087
Sept.	172	56,8	7,254	56,8	3,942	61,4	2,798	27,9	0,196	0,8	0,019	3,7	0,125	23,7	0,372
Oct.	35	26,0	0,193	6,0	0,018	5,1	0,006	-	-	-	-	-	-	-	-
Nov.	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dic.	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Año 1996	582,7	53,3	18,170	49,7	11,040	53,4	13,673	30,3	1,639	4,0	0,116	18,5	0,834	29,8	4,997

Nota: El Kr está calculado con base en las precipitaciones que generaron el escurrimiento y no en la pluviometría mensual.

Cuadro 5 - Erosión y promedios del coeficiente de escurrimiento (Kr) por mes y por año, de 1993 a 1996

Cuadro 6 - Cantidad de sedimentos arrastrados (t/ha en seco) de 1993 a 1996

Año	Terrazas						
	T0	T2	T3	T4	T5	T6	T7
1993	8,8	5,8	1,0	1,3	0,8	0,6	0,6
1994	28,9	15,5	12,0	3,7	1,4	1,6	0,1
1995	20,5	7,9	4,5	1,5	1,0	0,3	0,0
1996	18,2	11,0	13,7	1,6	0,1	0,8	5,0
Total	76,4	40,2	31,2	8,1	3,3	3,3	5,7
Prom.	19,1	10,1	7,8	2,0	0,8	0,9	1,4

**Figura 3**

El cuadro 7 muestra que en los materiales arrastrados en la T0 predominan los sedimentos de fondo, mientras que en las demás terrazas aquellos en suspensión. Este resultado se debe en parte al endurecimiento del tepetate aflorante en T0 que favorece el desprendimiento de partículas grandes, mientras que el tepetate roturado de las demás terrazas es blando y suelto por lo que son partículas pequeñas las arrastradas. Por otro lado, este tipo de relación muestra que la erosión del tepetate aflorante es principalmente de tipo regresivo, mientras que en las otras terrazas es de tipo laminar.

Cuadro 7 - Porcentaje de sedimentos en suspensión (t/ha en seco) de 1993 a 1996

Año	Terrazas						
	T0	T2	T3	T4	T5	T6	T7
1993	38	52	57	53	44	46	48
1994	36	59	66	76	50	77	0
1995	12	56	59	66	59	53	0
1996	40	67	68	90	81	80	67
Prom.	34	60	67	71	53	64	62

La erosión regresiva del tepetate endurecido y aflorante implica que debido a la localización de la zona de estudio, en la parte alta de una loma, se mida el inicio de los procesos de arrastre y escurrimiento. El incremento y la concentración de estos últimos a medida que aumenta la pendiente implican que a nivel de la ruptura de esta se cree una

caída de agua. A su pie se forma una cavidad que derrumba poco a poco los terrenos que dominan y así avanza la cañada hacia la parte alta del relieve. Hoy en día, se puede apreciar este tipo de erosión a nivel del piedemonte de la Sierra Madre donde afloran los tepetates. Obviamente, a partir de cierto momento, cada derrumbe corresponde a varias decenas de toneladas de materiales y no a las 30 t/ha/año como se midió. Por ello, en términos de manejo de cuenca, los resultados del presente trabajo corresponden a una pequeña parte de lo que realmente ocurre a nivel de una loma entera.

La erosión laminar que afecta a los terrenos cultivados implica que los sedimentos más finos, es decir aquellos que juegan el papel principal en la retención del agua y de los fertilizantes orgánicos como minerales, son los que se pierden en su mayoría.

Relación entre características pluviométricas y erosión

El principal factor del escurrimiento y de la erosión de los suelos son las precipitaciones. Los datos para establecer una relación entre volumen de agua escurrido/cantidad de sedimentos transportados y los diferentes factores ligados a las características de cada lluvia se están procesando actualmente, por lo que no es posible aún presentar resultados.

Relación entre profundidad de roturación y erosión

Mientras al inicio de estas experimentaciones se pensaba que T3 podría presentar una de las menores tasas de escurrimiento debido a su mayor capacidad de almacenamiento de agua, resulta ser, paradójicamente, la que mayores escurrimiento y erosión registra entre las terrazas de tepetate roturado. Sin embargo, este resultado no se debe a la roturación a mayor profundidad sino al encostramiento más rápido del nuevo suelo. Las costras no solamente limitan la infiltración sino que impiden la emergencia de las plántulas. Si bien el maíz y el haba logran emerger, la cebada no siempre consigue hacerlo, por lo que hay menos plantas y más espacios descubiertos que determinan un mayor escurrimiento y arrastre así como una menor producción.

Todavía no se ha logrado esclarecer la causa del mayor encostramiento en esta terraza con relación a las demás: ¿fase particular del tepetate? ¿mayor cantidad de partículas finas a raíz del paso más frecuente del Caterpillar para roturar el tepetate a mayor profundidad? ¿efecto del tamaño menor de la terraza?...

Relación entre tipo de cultivo y erosión

La comparación entre tipos de cultivo se puede hacer de dos formas: monocultivo vs. asociación y cebada vs. maíz.

T3 presenta, al igual que T2, el mayor número de escurrimientos y la mayor erosión de las terrazas de tepetate roturado. Independientemente de los factores intrínsecos al tepetate, está muy claro que el monocultivo favorece la erosión y disminuye la infiltración. También se pueden apreciar claramente los resultados en términos de rendimientos (Báez *et al.*, 1997; cuadro 9).

El cultivo de cebada, asociado o no, genera mayores escurrimientos y arrastres que el de maíz y haba. La comparación del comportamiento de T2, T3 y T4 con relación a T5 y T6 en 1996 lo muestra claramente (cuadro 8).

Pese a que la cobertura vegetal al momento de la floración es mayor en la cebada (y aún más en su asociación con Medicago) que en el maíz, el espacio que existe entre los pies de las plantas de cebada permite la circulación del agua a lo largo y ancho de toda la terraza mientras que en el maíz, los surcos limitan tal flujo. Al no ser controlada,

	Terrazas						
	T0	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Número de escurrimientos	46	32	30	11	4	6	23
Coefficiente de escurrimiento Kr (%)	53,3	49,7	53,4	30,3	4,0	18,5	29,8
Cantidad de sedimentos (T/ha)	18,2	11,0	13,7	1,6	0,1	0,8	5,0

Cuadro 8 - Número de escurrimientos, coeficiente de escurrimiento y cantidad de sedimentos arrastrados durante 1996

Terraza	Maíz			Haba		
	Altura al 50 % de floración	Nº de matas/m ²	Rendimientos (t/ha)	Altura al 50 % de floración	Nº de matas/m ²	Rendimientos (t/ha)
T5 (contreo*)	2,0	1,6	2,2	1,2	1,7	0,6
T6 (sin contreo*)	2,0	1,6	2,1	1,0	1,3	0,3

Cuadro 9 - Estimación de los rendimientos en maíz y haba en T5 y T6 en 1996

el agua se concentra generando una mayor capacidad de arrastre. Por otro lado, el encos-tramiento que se forma después de la siembra, al inicio de la temporada de lluvia, permanece durante todo el periodo de cultivo —pues no se puede trabajar la tierra para no dañar a las plantas— y contribuye también a amplificar los procesos erosivos (Laufer *et al.*, 1997).

Relación entre pendiente y erosión

La relación entre pendiente y erosión parece significativa, pero en el caso de la T6, que, pese a presentar la mayor pendiente, tiene un comportamiento erosivo similar a T5 que tiene la menor pendiente.

Si bien en un inicio se pensaba que era el tamaño de T6 lo que podía incidir en el escurrimiento, su reducción en 1995 no cambió los resultados. El hecho de presentar menos escurrimientos a partir del segundo mes de la temporada de lluvia coincide con una mayor cobertura vegetal en esa terraza en comparación con las demás. Sin embargo, eso no explica la mejor emergencia y crecimiento de los cultivos en ella. Se están analizando los datos de granulometría y de descripción de perfiles de cultivo para intentar explicar esta situación.

Relación entre aplicación de estiércol y erosión

El efecto de la aplicación de estiércol al tepetate (T4) no aparece claramente en términos de escurrimiento y arrastre. Esta situación se debe en parte a las fechas y reducidas dosis de aplicación del estiércol que limitaron el crecimiento de los cultivos, disminuyendo así la cobertura vegetal, lo que favoreció un más rápido encos-tramiento del suelo en esta parcela en comparación con las demás (T5 y T6) (Laufer *et al.*, 1997). Por ello, se observa que los principales eventos registrados en esa terraza corresponden al inicio de la época de lluvia, mientras que a partir de la segunda parte de la temporada, habiendo crecido las plantas, se generan menos escurrimientos y arrastres.

En cuanto al posible efecto de la materia orgánica en la estructura, no se lograron determinar hasta el momento efectos reales que pudieran tener una repercusión tendiente a disminuir la erosión.

Relación entre surcos con y sin contreo y la erosión

En 1996, se efectuó un experimento en T5 y T6, con y sin contreo respectivamente, a fin de determinar el impacto de dicha práctica agrícola poco frecuente en la región donde está localizado el experimento. En primera instancia, con base en los registros pluviométricos disponibles para estos 5 años, parece muy factible el sistema de contreo, ya que el impacto de las precipitaciones puede ser controlado mediante esa práctica. Por eso, se escogió «cerrar» los surcos cada 5 m, después de cada labor.

Además, la insuficiente humedad al inicio de la temporada de lluvia es uno de los factores que limitan drásticamente la obtención de buenos rendimientos. Gracias al contreo, se logra captar e infiltrar mayor cantidad de agua que en el sistema tradicional. Sin embargo, con el régimen de lluvia que imperó en 1996, este sistema no fue muy útil ya que las lluvias fueron bastante constantes a partir de fines de agosto. Por ello, entre T5 y T6 no hay tanta diferencia en términos de rendimientos en el caso del maíz, aunque en el haba sí existe una diferencia notable, la misma que fue acentuada por problemas fitosanitarios y una cantidad superior de haba verde robada en T6 (cuadro 9). De todas formas, el hecho de captar mayor cantidad de agua permite a las plantas crecer mejor y cubrir más rápidamente el suelo, protegiéndolo así de la energía de las gotas de agua y consecuentemente disminuyendo el encostramiento, el escurrimiento y el arrastre de sedimentos.

Pese a que se registraron pocos escurrimientos en T5 y T6, en la segunda hubo casi el doble de eventos (5) que en la primera (3). En términos de volumen de agua y cantidad de sedimentos, las diferencias fueron más marcadas, ya que a nivel anual, la tasa de escurrimiento en T6 fue casi 5 veces superior a la de T5 y la cantidad de sedimentos arrastrados 6 veces mayor (cuadro 8).

Los resultados muestran que a pesar de unas lluvias muy intensas, el sistema de contreo no fue afectado a lo largo del año, aun después de la lluvia del 31 de julio que, con un R_{us} de 45, una energía cinética máxima de casi 300 J/m^2 y una intensidad máxima durante 5 minutos de $13,2 \text{ mm/h}$ y durante 10 minutos de $19,0 \text{ mm/h}$, no logró destruir el sistema de contreo, y ello a pesar de que la cobertura vegetal no alcanzaba el 25 %.

Así, se aprecia claramente la gran ventaja que presenta este sistema en comparación con el sistema tradicional practicado en el área de estudio.

CONCLUSIONES

En la zona de San Miguel Tlaixpan (Texcoco), los eventos que generan erosión son muy pocos al año: 16 eventos $\geq 10 \text{ mm}$, que representan el 50 % del volumen total de las lluvias y provocan el 80 % del R_{us} .

La roturación de tepetate t3, la formación de terrazas y la preparación agrícola de estos nuevos suelos reduce de 3 a 10 veces tanto el escurrimiento como el arrastre de sedimentos. Así, de unas 20 t/ha de pérdida de tierra en promedio en el tepetate no roturado se puede reducir la erosión a 10 t/ha en el caso de monocultivo, y a una tonelada en los demás sistemas de cultivos.

Mientras en el caso de un tepetate no roturado, los sedimentos gruesos representan las dos terceras partes del total, en los demás casos predominan ampliamente los sedimentos finos. Esto se debe tanto a la compacidad del material como a las diferencias

entre los procesos erosivos. En el tepetate compacto y endurecido, se trata de una erosión regresiva, mientras que en el tepetate roturado y el suelo, es una erosión laminar.

La irregularidad de las lluvias, tanto en términos de altura como de intensidad y repartición en el tiempo, limita finalmente en cierta medida su capacidad erosiva ya que nunca se saturan los suelos. Por lo tanto, la siembra de la asociación maíz-haba en contorno es sumamente efectiva, disminuyendo de manera importante la erosión. Sin embargo, a la inversa, la irregularidad de las lluvias, en particular al inicio de la temporada, hace que, en el caso de las gramíneas como trigo, cebada, etc., sea muy recomendable esperar que el suelo constituya una reserva hídrica antes de sembrar. De esta forma no hay riesgo de que mueran parte de las plantas, lo que crearía en las parcelas áreas sin cobertura vegetal, favoreciendo importantes escurrimientos y arrastres, especialmente con estos cultivos.

No se logró detectar efecto alguno de la aplicación de estiércol en la erosión. En comparación con el monocultivo, la siembra en asociación, en especial de maíz con haba, reduce drásticamente los procesos erosivos. La formación de surcos limita también el fenómeno, en comparación con las siembras al voleo. Lo más adecuado es la siembra con contorno de unos 5 m de largo que, además de limitar la erosión, aumenta los rendimientos.

La zona de estudio tiene un tipo de lluvia que finalmente no es muy erosiva ($R_{us} \approx 150$), lo que implica que sería conveniente efectuar mediciones en otras áreas del eje neovolcánico para validar las recomendaciones aquí formuladas.

Referencias bibliográficas

- BÁEZ, A.; ASCENCIO, E.; PRAT, C.; MÁRQUEZ, A., 1997: *Análisis del comportamiento de cultivos en tepetate t3 incorporado a la agricultura pluvial (1993 a 1995), Texcoco, México*, en este volumen.
- CASENAVE, A.; VALENTIN, C., 1989: *Les états de surface de la zone sabélienne. Influence sur l'infiltration*, ORSTOM, París, Francia
- JANEAU, J.-L.; JEROME, G.; MIRANDA, M. E., 1992: Evolución estructural de la superficie de suelos con tepetate, en *Terra*, Vol. 10 (número especial: Suelos volcánicos endurecidos, Primer Simposio Internacional, México, 20-26 de octubre de 1991), ORSTOM-Colegio de Postgraduados de Montecillo, México, p. 374-378.
- JEROME, G., 1991: *Étude des réorganisations superficielles sous pluies naturelles sur sol volcanique induré, tepetate, dans la vallée du fleuve Texcoco au Mexique*, Mémoire de fin d'études, ISTOM, Le Havre, Francia.
- LAUFFER, M., 1996: *Facteurs et processus de réorganisations superficielles sur tepetates cultivés. Bassin du fleuve Texcoco, Edomex (Mexique)*, Mémoire de maîtrise, ISTOM, Paris, Francia, 93 p.
- LE BISSONNAIS, Y., 1988: *Analyses des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action de la pluie*, Thèse INRA, París, Francia.
- LEROUX, Y., 1994: *Étude des réorganisations superficielles de différentes parcelles de tepetate cultivées sur un versant nord-est de la vallée de Mexico, au Mexique*, Mémoire de maîtrise, ISTOM, Paris, Francia, 77 p.
- PEÑA, D.; ZEBROWSKI, C., 1992: *Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (tepetates) de las cuencas de México y Tlaxcala (México). Informe del mapa morfológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada*, anexo al informe final, Contrato CCE-ORSTOM N° TS2-0212, 101 p.
- PRAT, C., 1997: *Análisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en el área experimental de San Miguel Tlaxpan (Texcoco, México)*, en este volumen.
- RUIZ, J.F., 1987: *Les micro-organisations pelliculaires superficielles formées sous pluie simulée sur sols ferrallitiques de savanes*, Thèse INA-PG, París, Francia.