

**MANEJO Y USO DEL AGUA EN LAS CUENCAS
HIDROGRAFICAS DEL NORTE DE MEXICO
CENID RASPA, ORSTOM**

*Folleto Científico N° 4
INIFAP-ORSTOM*

**EROSION
Y PRODUCTIVIDAD
EN LA COMARCA LAGUNERA**

Ignacio SANCHEZ COHEN

INIFAP

CENID RASPA

ORSTOM

DEC

1995

EROSION Y PRODUCTIVIDAD EN LA COMARCA LAGUNERA

(PROYECTO INIFAP-ORSTOM 613)

Ph.D Ignacio SANCHEZ COHEN

**INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES
Y AGROPECUARIAS**

**Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación
Agua-Suelo-Planta-Atmósfera**

Gómez Palacio, Durango. MEXICO

Agosto 1995

**FOLLETO CIENTIFICO N° 4
(PROYECTO INIFAP-ORSTOM)
CUARTA EDICION, AGOSTO 1995
ISBN 968-6999-05-4
IMPRESO Y HECHO EN MEXICO
CENID-RASPA
Km 6.5 margen derecha Canal Sacramento
Gómez Palacio, Dgo.
Apdo. Postal 41
35150 Cd. Lerdo, Durango. MEXICO
Tels. 91(17) 14-72-95
14-72-42
Fax 14-71-90
Email: hernandc@cirnoc.inifap.conacyt.mx**

COMITE EDITORIAL

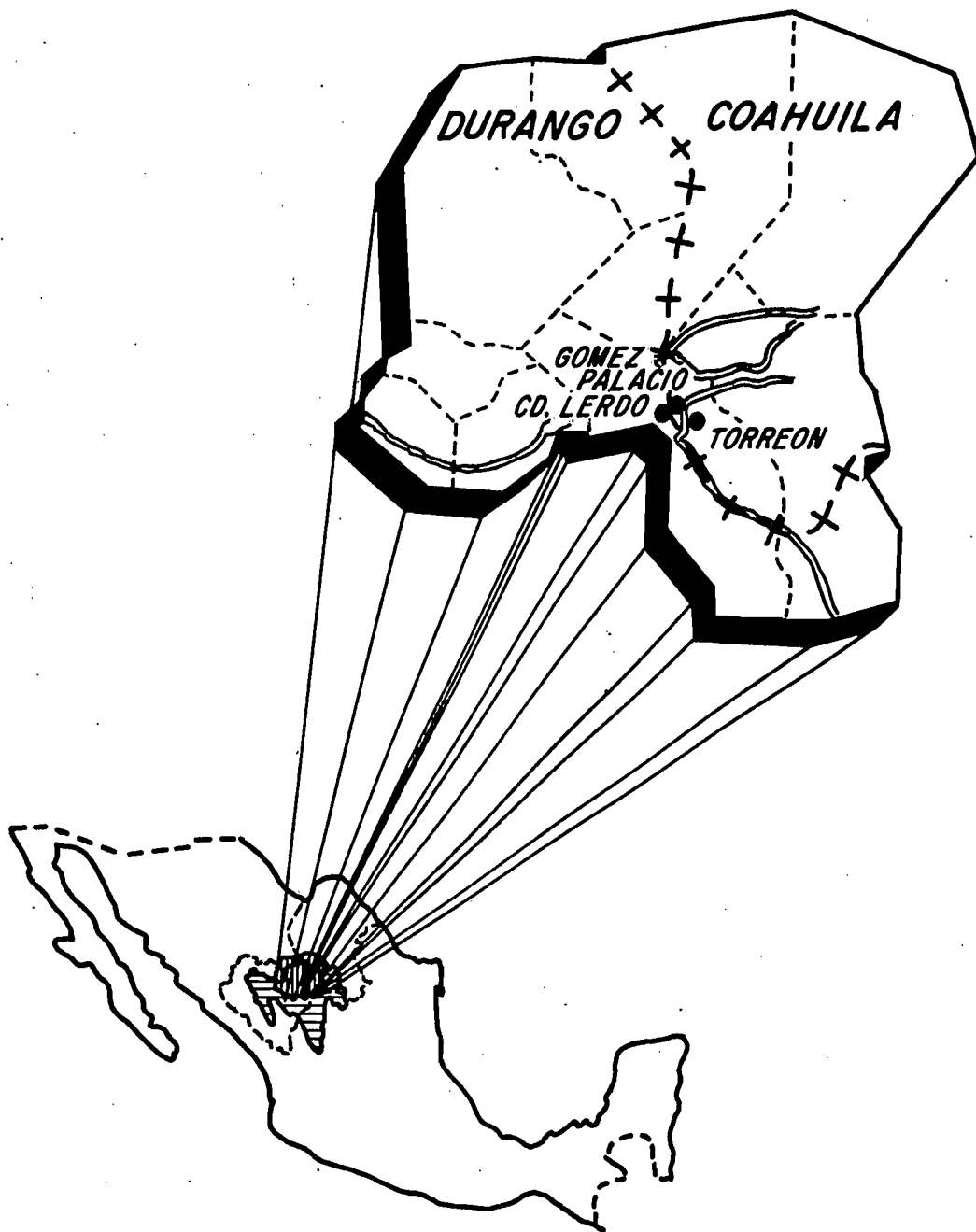
Presidente. Dr. Carlos Hernández Yáñez

Secretario: Ing. Raquel Anguiano Gallegos

**Vocales: Dr. José Luis González Barrios
M.C. Marco A. Inzunza Ibarra
M.C. Ma. Magdalena Villa Castorena**

REVISORES TECNICOS

**Dr. Carlos Hernández Yáñez
M.C. Leopoldo Moreno Díaz
M.C. Carlos Efrén Ramírez Contreras
Dr. Jean Françoise Nouvelot**



**UBICACION GEOGRAFICA DE LA COMARCA LAGUNERA DE
COAHUILA Y DURANGO EN LA REGION HIDROLOGICA 36**

INDICE DE CONTENIDO

	Página
PRESENTACION	1
RESUMEN	2
RESUME	3
ABSTRACT	4
INTRODUCCION	5
DEGRADACION DEL MEDIO FISICO	6
DEFINICION DEL PROBLEMA	6
ESTUDIO DE CASO	7
APROXIMACION PARA EL ANALISIS	8
SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA Y PARAMETRIZACION DEL MODELO	9
Determinación de "R"	10
Determinación de "K"	11
Determinación de "LS"	12
CONCLUSIONES Y DISCUSION	14
La productividad del suelo y el futuro	17
La productividad como consecuencia de fenómenos aleatorios	18
Nivel de impacto	20
ANEXO	21
LITERATURA REVISADA	25

INDICE DE TABLAS

	Página
1. Estaciones climáticas usadas para interpolar el valor de R	11
2. Valores de los intervalos de clase tomados para el cómputo de K	12
3. Valores usados para la reclasificación del mapa de pendientes	14
4. Reclasificación del mapa de pendientes para la obtención de LS	14
5. Participación relativa porcentual en la producción de erosión de los factores R y K	16
6. Tabulación cruzada de los factores R y K	16

INDICE DE FIGURAS

	Página
1. Comportamiento de las tasas de erosión como función de vegetación y precipitación.	22
2a. Erosionabilidad de la lluvia, MJ mm-ha.h.	23
2b. Erosionabilidad del suelo, ton.ha.h-MJ.mm	23
2c. Factor longitud - pendiente.	23
2d. Erosión potencial (ton ha ⁻¹)	23
3. Series de tiempo para reducción en rendimiento causado por pérdida gradual de suelo con diferentes tasas de erosión en la Comarca Lagunera.	24

PRESENTACION

En la última década nuestro país ha abierto paso a una nueva cultura conservacionista en donde la explotación racional de los recursos naturales es parte medular en esta filosofía de acciones. Los escasos estudios existentes en México relativos a la degradación del medio físico, sea por acciones directas del hombre o por condiciones naturales, indican el grave deterioro de nuestros suelos (i.e merma en productividad) a través del tiempo. Las reacciones en cadena de este efecto son cuantiosas impactando áreas del entorno productivo. Estimaciones de la erosión edáfica en México señalan que la pérdida media de suelo oscila entre 2 y 50 toneladas por hectárea por año, afectando entre el 45 y 86 por ciento del territorio nacional. Hace apenas un lustro se citaba que la producción de una tonelada de maíz en el suroeste de México llevaba implícito la pérdida de 13 toneladas de suelo.

El enfoque moderno de la investigación relativa a este problema contempla el uso de modelos de simulación en los que convergen parámetros relacionados con la capacidad de dislocar y transportar partículas de suelo en diferentes ambientes físico-climáticos. Desafortunadamente un incremento en la precisión de la cuantificación de erosión provoca un aumento exponencial en costos. Por tal motivo, los métodos modestos (pero no menos precisos) para estimar erosión hídrica se usan como herramienta para hacer una cuantificación potencial del problema. No se descarta a corto plazo el uso de modelos más precisos para cuantificar la erosión, sobre todo cuando se trate de construir obras de conservación de suelo.

El trabajo que hoy se presenta constituye un esfuerzo institucional para establecer un algoritmo de seguimiento en la cuantificación de erosión hídrica, considerando la capacidad limitada de información de calidad. Se cree que los Sistemas de Información Geográfica aunados a modelos de simulación de procesos son de gran utilidad al cuantificar sus parámetros tomando en cuenta la distribución espacial de estos. El presente enfoque da al trabajo un matiz técnico en el que los tomadores de decisiones pueden confiar al emitir un juicio o adjudicar un recurso en áreas afectadas por la erosión.

El trabajo se desarrolla en el contexto del proyecto binacional INIFAP, México-ORSTOM, Francia cuyo objetivo y área de impacto se ubican en las cuencas hidrográficas del norte de México, y constituye un primer paso para la cuantificación de la erosión hídrica en las 92,000 km² que comprende la Región Hidrológica 36.

Dr. Carlos Hernández Yáñez
Líder Nacional de Conservación de Suelos y Agua
del INIFAP

EROSION Y PRODUCTIVIDAD EN LA COMARCA LAGUNERA

Ignacio SANCHEZ COHEN¹

RESUMEN

Se plantea como premisa la erosión en la Región Hidrológica 36 debido a las condiciones hidrográficas existentes. Como primera aproximación y con la finalidad de calibrar el método de análisis propuesto, se analiza la situación de la Comarca Lagunera en lo que a erosión hídrica se refiere.

El método hace uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en conjunción con un sistema de información geográfica. Los resultados indican la existencia de un gradiente bien definido en cuanto a la potencialidad erosiva de la lluvia (R), no existiendo un gradiente definido en cuanto a la susceptibilidad erosiva del suelo (K). Según el análisis realizado, se tiene erosión cuantificable en un 50.1 por ciento del área de estudio, siendo severa en un 4.2 por ciento del área, moderada en un 11.8 por ciento y de moderada a baja en un 34.1 por ciento.

Aunque se puede decir que la erosión hídrica en la Comarca Lagunera no es de gran magnitud, la proyección de series de tiempo a 500 años indican que si las tasas actuales de erosión se mantienen constantes, a corto plazo el rendimiento del cultivo de maíz (como ejemplo) se verá seriamente afectado por el deterioro de la productividad del suelo.

¹ Ph. D. Investigador del CENID - RASPA, Gómez Palacio, Dgo. México

RESUME

Le présent travail a pour finalité l'étude de l'érosion dans la Région Hydrologique 36 en relation avec les conditions physico-climatiques qui la caractérisent. En première approche et avec l'objectif de préciser et affiner la méthode d'analyse proposée, la situation dans la "Comarca Lagunera" est prise comme exemple.

Cette méthode est basée sur l'application de "l'Equation Universelle de Perte en Sol" et l'utilisation d'un Système d'Information Géographique. Il apparaît que l'érosivité climatique (R) se répartie spatialement suivant un gradient très net alors que le facteur de susceptibilité des sols à l'érosion (K) ne présente pas d'organisation bien marquée. Par ailleurs, l'étude montre que l'érosion est quantifiable sur 50,1 % de l'aire analysée, parmi lesquels 4,2 % correspondent à une érosion sévère, 11,8 % à une érosion modérée et 34,1 % à une érosion modérée à faible.

Bien que l'on constate que l'érosion hydrique dans la "Comarca Lagunera" reste relativement peu importante, la simulation de séries temporelles sur 500 ans montre que si les taux actuels d'érosion se maintiennent constants, à court terme le rendement des cultures de maïs (prises comme exemple) sera sérieusement affecté par la dégradation de la productivité des sols.

ABSTRACT

The existence of water erosion in the Hydrologic Region 36 is proposed as premise following physical characteristics of the region. As a first approach and for method verification, water erosion in the Comarca Lagunera is analyzed.

The Universal Soil Loss Equation (USLE) linked with a Geographic Information System is used. Results, have shown the existence of varied erosion degrees. The USLE "R" factor follows a gradient from high altitudes to low altitudes. Nevertheless, the "K" factor does not follow any gradient due to the high spatial variability of soils characteristics in the region.

According to the analysis there is appreciable erosion in 50.1 per cent of the total area being severe in 4.2 per cent, moderate in 11.8 per cent and low in 34.1 per cent.

As general conclusion, we may say that water erosion in the Comarca Lagunera is not of considerable magnitude yet, although, if the actual rates of erosion are maintained constant, crop yields reduction will arise in the near future due to soil loss productivity.

INTRODUCCION

La protección de la calidad del suelo y agua es tópicos de serias magnitudes que la ciencia del siglo XXI tiene que encarar en virtud de la seria degradación de estos recursos que está ocurriendo principalmente en países en vías de desarrollo.

El daño causado por erosión no es, en la mayoría de los casos, evidente a primera impresión; sin embargo, comparando la productividad actual de los suelos en términos de las cantidades de fertilizante requeridos para producir potencialmente y considerando el grosor de la capa arable, pudiérase concluir el deterioro gradual al que este recurso ha estado sometido en forma continua, aunque en algunos casos, paulatinamente. Asimismo, los cauces de los ríos se ven afectados por procesos de agradación y degradación cuyo impacto final es en la capacidad útil de las obras de captación.

En forma resumida, Fogel y Lopes (1991) señalan los probables efectos que pudieran presentarse por concepto de erosión edáfica:

IN SITU:

Pérdida de la capacidad de retención de humedad por los suelos.

Sellamiento superficial.

Pérdida de nutrimentos.

Reducción en la capacidad de germinación.

Decremento en el desarrollo radical de los cultivos.

EXTERIOR:

Reducción en la capacidad de transporte en arroyos y ríos.

Sedimentación en obras de almacenamiento.

Contaminación de agua.

Los efectos IN SITU anotados líneas arriba se pueden resumir en el siguiente enunciado: A medida que las partículas finas del suelo son erodadas de la superficie del suelo, la textura va

convirtiéndose a gruesa hasta que expone el material madre causando condiciones de desierto. Asimismo, cuando las partículas finas han sido removidas de la superficie del suelo, la capacidad de retención de humedad decrece.

DEGRADACION DEL MEDIO FISICO

Acorde a Cassel y Fryrear (1990) a -33 kPa, por cada incremento unitario (por ciento por peso) en el contenido de arcilla, la capacidad de retención de humedad aumenta en 0.0082 g/g; y a -1500 kPa el incremento es de 0.0032 g/g. Las consecuencias primarias de esta situación es una disminución en la capacidad germinativa de las semillas por la efimera disponibilidad de agua y suelo; asimismo, por una creciente reducción en el contenido nutrimental del medio.

No existe un límite de tolerancia de pérdida de suelo estándar, más bien, esto dependerá de situaciones específicas de explotación del recurso; sin embargo, la tasa de suelo perdido permisible debiera ser función de: profundidad, distribución de nutrimentos en el perfil, capacidad de retención de humedad y la tasa de renovación (C.P., 1991).

Acorde a Kirkby (1969), el valor máximo de erosión permisible, T, está dado por:

$$T = D * \left(\frac{P_s}{1 - p_s} \right) \quad (1)$$

donde:

D: Tasa de reducción de los materiales solubles de la superficie del suelo causado por erosión, (μm).

p_s : Proporción de material madre en el suelo después del intemperismo. Para una roca madre no intemperizada, $p_s = 1$; normalmente este valor es de 0.8 .

DEFINICION DEL PROBLEMA

El proceso de erosión pudiera considerarse un fenómeno natural causado por el flujo de agua superficial con características adecuadas en capacidades de traslocación y transporte, impacto de las gotas de agua de lluvia sobre el suelo o por la acción del viento. Sin embargo, la

tasa de erosión se ve considerablemente acelerada por las acciones del hombre en su afán de incrementar la productividad de los cultivos, forraje, madera, etc.

Bajo condiciones alteradas, el suelo es más susceptible a pérdida de nutrimentos por concepto de remoción causada por el escurrimiento o lavados por percolación profunda.

El proceso de erosión en zonas áridas constituye un problema de mayores magnitudes a las que comúnmente se piensa. En áreas de vegetación dispersa, donde las precipitaciones torrenciales predominan con el establecimiento de flujo Hortoniano, la producción de sedimento es mucho más alta de lo que ordinariamente se reporta. La Figura 1 (Anexo) ilustra la importancia del proceso de erosión/sedimentación en regiones áridas o semiáridas. Acorde a la figura, la máxima erosión ocurre a los 300 mm de precipitación anual aproximadamente, ya que la densidad y tipo de vegetación que se desarrolla bajo este régimen pluvial no es suficiente protector del suelo. Donde la precipitación es menor a 300 mm anuales, no existe suficiente energía cinética para iniciar el proceso erosivo. Precipitación total anual mayor a los 300 mm promueven cubierta vegetal más densa con un cambio de especies de arbustos dispersos a gramíneas más densas (Ritter, 1986).

ESTUDIO DE CASO

En la Región Hidrológica 36 (RH 36) existen 4,459 km² de terreno con pendientes que oscilan de 0 a 0.5 grados; 28,036 km² con pendientes de 0.5 a 6 grados; 56,428 km² con pendientes en el rango de 6 a 45 grados y 2,181 km² con pendientes entre 45 y 72 grados (Loyer, 1995). Aunque a la fecha no existen datos medidos en cuanto al problema de erosión, la topografía y cubierta vegetal ponen de manifiesto la potencialidad de la región a sufrir erosión, la cual es evidente en partes altas en forma acanalada.

Por otro lado, las áreas con precipitaciones menores a los 300 mm anuales como promedio (a las que hace alusión la Figura 1) poseen pendientes que oscilan de 3.3 a 11.6 por ciento en donde en un gran porcentaje la vegetación consiste en matorral xerófilo (42.7 por ciento en la parte alta y 81.3 en la parte baja). Los bosques sólo ocupan el 24.1 por ciento en la parte alta y el 0.7 en la parte baja (Torres, 1993). Bajo la anterior información se sustenta la hipótesis del problema existente de erosión en la RH 36. Como caso de estudio, el presente trabajo se aboca a

la cuantificación de erosión hídrica en la región agrícola de la RH 36 conocida como Comarca Lagunera de Coahuila y Durango.

APROXIMACION PARA EL ANALISIS

Investigadores abocados a la ciencia del suelo han desarrollado procedimientos para predecir y cuantificar pérdidas de suelo por erosión con la finalidad de establecer tasas aceptables de estas pérdidas bajo manejos diferentes (Tiscareño, 1991). Los métodos para la evaluación y/o predicción varían desde netamente empíricos hasta modelos basados físicamente; en estos últimos se encuentra el modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project), el cual se espera sea liberado en 1995. Las ventajas del WEPP son numerosas comparadas con los métodos tradicionales para cuantificar erosión, siendo las más importantes: a) Cuantificación del escurrimiento en forma espacial, b) cuantificación de erosión causada por impacto de las gotas de lluvia, d) cuantificación de la capacidad de dislocamiento y transporte en áreas entre canalillos, f) tránsito de partículas en el dren principal, y g) cuantificación de la deposición en áreas de encharcamiento. El uso de este modelo queda aún restringido a áreas fuertemente instrumentadas en virtud de los requerimientos de base de datos para la cuantificación de sus parámetros.

Por este motivo, la metodología más ampliamente usada alrededor del mundo es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE por sus siglas en inglés), desarrollada por Whischmeier y Smith (1978). Esta ecuación calcula la erosión esperada en períodos largos de tiempo y debe ser modificada para estimar erosión para tormentas individuales; tiene aplicabilidad restringida por lo que su uso es recomendado para estimaciones gruesas del proceso de erosión. La USLE se representa de la siguiente manera:

$$A = RKLSCP \quad (2)$$

donde:

A = Pérdida de suelo por unidad de área en las unidades que se seleccionen para K y para el período considerado para R. En la práctica estos factores se seleccionan de tal manera que

los resultados arrojan A en toneladas por hectárea por año; sin embargo, se pueden seleccionar otras unidades.

R = Factor por precipitación y escurrimiento, el cual es el número de unidades de índice de erosión para un período de tiempo determinado, comúnmente un año.

K = Factor de erodabilidad del suelo que representa la tasa de suelo perdido por índice de erosión unitario para un suelo específico tomando como base una parcela experimental de 22.1 m de longitud de pendiente uniforme del 9 por ciento.

L = Factor por longitud de la pendiente, siendo el cociente de pérdida de suelo medida en el terreno con aquella pérdida en el terreno estándar con las especificaciones mencionadas arriba.

S = Factor por inclinación de la pendiente, el cual es el cociente del suelo perdido en condiciones de campo con el suelo perdido en la parcela estándar.

C = Factor por cubierta vegetal y manejo, que es el cociente de suelo perdido en una área con una cubierta y manejo específico con la pérdida de suelo de la parcela estándar bajo las mismas condiciones.

P = Factor de soporte por prácticas de manejo, el cual es el cociente del suelo perdido en un terreno con cualquier práctica de manejo con el suelo perdido en la parcela estándar, con prácticas de manejo de terraceo, curvas en contorno, etc.

Para el caso del cálculo de erosión potencial, estos dos últimos factores se asumen = 1, puesto que se pretende cuantificar la potencialidad de los factores restantes como promotores de erosión sin considerar las prácticas de manejo.

SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA Y PARAMETRIZACION DEL MODELO

En aras de la calibración del método propuesto se tomó como "laboratorio" a la Comarca Lagunera (región incluida dentro de la RH 36), siguiendo el algoritmo que enseguida se expone y en el que se utilizó el sistema de información geográfica IDRISI, versión 4.1.

1.- Determinación de "R" : Este parámetro puede definirse como la potencialidad de la lluvia para producir erosión, y es función de la energía cinética de las gotas de agua (E , MJ mm ha⁻¹ h) y la intensidad máxima de precipitación en 30 minutos (I_{30} , mm h⁻¹). La energía cinética total de un evento lluvioso (E) sería la sumatoria del producto de la energía cinética para los diferentes intervalos de tiempo considerados y la cantidad de lluvia en cada intervalo.

Para el presente caso y en virtud de la carencia de información detallada para la Comarca Lagunera, se utilizaron valores de "R" obtenidos por Cortés en 1991 (citado por el Colegio de Postgraduados, 1991) quien hizo uso de la técnica de interpolación usando 53 estaciones meteorológicas, las cuales regionalizó para caracterizar áreas sujetas a condiciones similares de lluvia. Este autor obtuvo regresiones para calcular "R" a partir de lluvia total en el año para diferentes localidades del país; así entonces, para el estado de Coahuila se obtuvo la siguiente regresión:

$$Y = 2.8959 x + 0.002983 x^2 \quad R^2 = 0.92 \quad (3)$$

y para Durango:

$$Y = 3.4880 x - 0.000188 \cdot x^2 \quad R^2 = 0.94 \quad (4)$$

donde:

x = Precipitación anual (mm).

En la Tabla 1 aparecen las estaciones climáticas georreferenciadas con las que se realizó la interpolación para la obtención del mapa parcial de "R" (Figura 2a. en Anexo) para la región de estudio.

Tabla 1. Estaciones climáticas usadas para interpolar el valor de R.

ESTADO	NOMBRE ESTACION	GEORREFERENCIA		VALOR DE R
		LAT	LONG	
COAHUILA	MATAMOROS	25.53	103.45	1500
	SAN PEDRO	25.75	103.22	1500
	VIESCA	25.77	102.80	1750
DURANGO	LERDO	25.55	103.52	2000
	TLAHUALILO	26.10	103.43	1400
	MAPIMI	25.83	103.85	2250
	NAZAS	25.22	104.10	2750
	RODEO	25.13	104.55	4250
	S.J. GUADALUPE	24.62	102.77	2250
	S.P. DEL GALLO	25.57	104.30	3250
	S.L.D. CORDERO	25.42	104.28	3250
	INDE	25.90	105.22	4750
	CUENCAME	24.87	103.70	2500
	PARRAS	25.47	102.23	1500
	PEÑON BLANCO	24.78	104.47	2500
	S.J.D. RIO	24.80	104.47	3500

2.- Determinación de "K": Para el cálculo de este parámetro, la literatura reporta un nomograma en el que convergen las siguientes variables (Wischmeier y Smith, 1978): por ciento de limo + arena muy fina, por ciento de arena, por ciento de materia orgánica, estructura de suelo y permeabilidad. El uso de este nomograma pudiera circunscribirse a la estimación de "K" estacional en virtud de la gran variación que tiene el contenido de materia orgánica del suelo aun dentro de un mismo año. Además, no fácilmente se encuentran en las bases de datos información respecto a las demás variables. Para el presente caso, en el cálculo de "K", se hizo uso de las siguientes ecuaciones propuestas por Romkens *et al.*, 1994:

$$K = 7.594 \left[0.0034 + 0.0405 \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\log(Dg) + 1.659}{0.7101} \right)^2 \right) \right] \quad (5)$$

donde:

$$Dg(\text{mm}) = \exp(0.01 \sum f_i \ln m_i) \quad r^2 = 0.983 \quad (6)$$

En esta ecuación f_i es el porcentaje presente de una determinada partícula de suelo (i.e. arena, limo o arcilla); m_i es la media aritmética de los límites de tamaño de esa partícula.

Las Ecuaciones 5 y 6 son de utilidad para el cálculo de "K" en aquellos lugares donde, por carencia de información, no se puede utilizar el nomograma desarrollado por Wischmeier y Smith (1978) para el cálculo de este parámetro. La secuencia en la obtención de "K" fue como sigue:

2.1 Creación de una base de datos georreferenciada (2,800 puntos) con los datos de: porcentajes de arena, limo y arcilla para las diferentes clases texturales. Esta base de datos se conformó con información existente en el laboratorio de suelos y agua del *CENID-RASPA*, y se complementó con información de las fases físicas que se encuentra en los mapas de INEGI, a escala 1:50,000.

2.2 Se tomó como criterio de amplitud de clase los intervalos mostrados en la Tabla No.2

Tabla 2. Valores de los intervalos de clase tomados para el cómputo de "K" acorde a las Ecuaciones 5 y 6.

PARTICULA	INTERVALO (mm)	PROMEDIO	TIPO SUELO
ARENA	0.06 - 0.25	0.15	ARENA MEDIA
LIMO	0.006 - 0.02	0.013	LIMO MEDIO
ARCILLA	0.0006 - 0.002	0.0013	ARCILLOSO

Es pertinente aclarar que los anteriores intervalos obedecen a los límites de la clase textural mostrada (Shultz, 1973) y se tomaron en virtud de que se desea estimar erosión potencial.

Se sistematizaron las Ecuaciones 5 y 6 antes anotadas mediante un programa en FORTRAN 77, en el que además se hace una corrección en la parte fraccionaria de las latitudes y longitudes para su lectura con el programa interpolador. El mapa resultante para este parámetro se muestra en el Anexo (Figura 2b).

3.- Determinación de "LS": El factor que utiliza "longitud" y grado de pendiente en forma combinada en la USLE se conoce como "LS" y representa la tasa de pérdida de suelo en una longitud de pendiente e inclinación dada con la pérdida de suelo de una pendiente que tiene una longitud de 22.1 m (72.6 pies) e inclinación de 9 por ciento, en donde todas las demás

condiciones permanecen constantes. Los valores de LS no son absolutos estando referenciados a un valor de 1 en un lote de escurrimiento con la longitud y pendiente antes anotadas.

La erosión media para una pendiente de longitud λ (en metros) varía de acuerdo a:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^m \quad (7)$$

donde 22.1 = longitud de la parcela unitaria en USLE y "m" una variable relativa a la longitud de la pendiente; λ es la proyección horizontal, no la distancia paralela a la superficie del suelo.

"m" está relacionada con la tasa β de erosión acanalada (causada por el flujo) y erosión entre canalillos (causada principalmente por los impactos de las gotas de lluvia) de la siguiente manera:

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (8)$$

Valores de β de la tasa entre erosión acanalada y erosión entre canalillos para condiciones donde el suelo es moderadamente susceptible a estos dos factores combinados pueden calcularse mediante:

$$\beta = \frac{\frac{\text{sen } \theta}{0.0896}}{[3.0(\text{sen } \theta)^{0.8} + 0.56]} \quad (9)$$

donde θ es el ángulo de la pendiente entre el terreno y el plano horizontal.

La Tabla 3 se derivó de las Ecuaciones 7-9, reclasificando el mapa de pendientes de la siguiente manera:

1.- Se eligió una longitud arbitraria de 30 m (100 pies) distribuyendo los valores de LS en tres categorías acorde a la Tabla 4. El racional para la selección de la longitud arbitraria de 30 m se fundamentó en la longitud de referencia de los lotes de escurrimiento usados para la calibración de la USLE (22.1 m); esto implica sólo la variación del ángulo de la pendiente; además, para el presente caso, la malla de pixeles está referenciada cada 900 m. El seguimiento es obtener la tangente entre el modelo digital de elevación y la distancia considerada para el análisis. Se

consideró entonces que con 30 m de longitud se obtendría un estimador "racional" de la erosión hídrica.

Tabla 3. Valores usados para la reclasificación del mapa de pendientes.

S (%)	θ	β	L(m)	LS	LS MEDIO
0.2	0.0020	0.0384	30	0.05	
0.5	0.0050	0.0925	30	0.09	0.09
1.0	0.0100	0.1757	30	0.14	
2.0	0.0200	0.3229	30	0.27	
3.0	0.0300	0.4514	30	0.39	
4.0	0.0400	0.5659	30	0.52	0.45
5.0	0.0500	0.6692	30	0.65	
6.0	0.0599	0.7635	30	0.08	
8.0	0.0798	0.9303	30	1.04	
10.0	0.0997	1.0745	30	1.38	1.24
12	0.1194	1.2012	30	1.79	

Tabla 4. Reclasificación del mapa de pendientes para la obtención de LS.

PENDIENTES (%)	LONGITUD (m)	LS
0.2 - 1.0	30.00	0.09
1.1 - 5.0	30.00	0.45
5.1 - 12.0	30.00	1.24

2.- La reclasificación del mapa de pendientes no procedió más allá de una pendiente del 12 por ciento en virtud de que para la región de estudio no se encontraron pendientes mayores a este valor. El mapa resultante de este parámetro se ilustra en el Anexo Figura 2c.

Una vez obtenidos los mapas parciales de los parámetros de la USLE, se procedió a realizar operaciones escalares entre mapas, resultando el mapa de erosión potencial de la Comarca Lagunera; Anexo Figura 2d.

CONCLUSION Y DISCUSION

Acorde al mapa de erodabilidad de la lluvia (R), existe un gradiente continuo de este factor de oeste a este para la región de estudio. Los valores más altos de R se ubican en forma de una franja, con la tendencia principal antes mencionada, que comprende el noroeste y suroeste de

la Comarca Lagunera, abarcando entidades como: Ceballos en el noroeste (y en sus límites con el estado de Chihuahua) y San Pedro del Gallo, San Luis del Cordero, Rodeo y Nazas en el suroeste con una variación de altura sobre el nivel del mar que oscila entre 1,452 y 1,037 m de oeste a este y 1,244 a 1,867 m de norte a sur. A mayor valor de R mayor la potencialidad erosiva de la lluvia causada por la intensidad y la consecuente energía cinética de la misma. Los valores más bajos de este factor se localizan en el área conurbada (entre 1,037 y 1,244 msnm), ubicándose los valores más bajos al noreste de San Pedro en el estado de Coahuila, a una altura de 850 msnm.

El mapa de erodabilidad del suelo (K) no muestra un gradiente tan definido como "R". Sin embargo, se puede establecer cierta tendencia de susceptibilidad del suelo a ser erodado de oeste a este en la región de estudio. Así entonces, los suelos más susceptibles se localizan alrededor de Ceballos en el estado de Durango, siguiéndole una franja que corre de norte a sur sobre la línea limítrofe con el estado de Coahuila, abarcando las entidades de Tlahualilo, Fco. I. Madero y parte de la zona conurbada de Torreón.

Los parámetros "R" y "K" por sí mismos indican el peso relativo que cada uno de ellos tiene sobre la erosión total. En lugares donde convergen valores altos de "R" y "K" será el lugar potencialmente más susceptible a contribuir a la erosión; sin embargo, es pertinente recalcar que el parámetro "LS" es el que ha mostrado mayor sensibilidad en el comportamiento del modelo en general. Para el presente caso y en virtud de que el modelo digital de elevación (DEM) se tiene para cada 900 m, no se analizó el efecto que como componente principal tiene este parámetro en la producción total de erosión.

Así entonces, la Tabla 5 muestra los resultados obtenidos al reclasificar los mapas de los parámetros "R" y "K" y al darle una cualificación al problema de erosión.

Tabla 5: Participación relativa porcentual en la producción de erosión de los parámetros "R" y "K".

CATEGORIA	PARAMETRO K	PARAMETRO R	DEFINICION
	%	%	
1	49.91*	49.9100*	NULO
2	0.0030	12.6400	POCA
3	2.1870	24.2000	BAJA
4	28.9200	11.0900	MEDIA
5	18.9700	21.3300	ALTA

* Se refiere al porcentaje fuera de la malla 360 x 360 en la región de estudio.

Como se mencionó con anterioridad, es deseable conocer el porcentaje de área en donde convergen los dos parámetros para definición de sitios potenciales al considerar sólo este criterio. Por tal motivo, se realizó una tabulación cruzada de ambos mapas mostrando los resultados de la Tabla 6.

Tabla 6. Tabulación cruzada de los parámetros "R" y "K".

INDICE	CATEGORIAS DE K	CATEGORIAS DE R	%
1	1	1	49.91*
2	3	2	2.015
3	4	2	10.090
4	5	2	0.530
5	2	3	0.003
6	3	3	0.172
7	4	3	13.630
8	5	3	10.390
9	4	4	4.330
10	5	4	6.760
11	4	5	0.860
12	5	5	1.270

* Se refiere al porcentaje fuera de la malla 360 x 360 en la región de estudio.

Al realizar la tabulación cruzada de ambos parámetros (cada uno teniendo cinco categorías como se muestra en la Tabla 5) resultan 25 combinaciones, de las cuales sólo se listan las de correlación significativa.

Como se puede apreciar en la Tabla 6, en sólo un 1.27 por ciento del área total de la Región Lagunera convergen los índices 5 y 5 (potencialidad erosiva del suelo y lluvia alta) para

ambos parámetros; por otro lado existe un 4.33 por ciento del área con potencial erosivo medio acorde a los mismos parámetros; asimismo, existe un 0.172 por ciento de área en donde convergen los índices bajos.

Al considerar el parámetro "LS" en la definición de áreas potenciales erosivas se observan los siguientes resultados: existe erosión cuantificable en un 50.1 por ciento del área total de estudio siendo severa en un 4.2 por ciento, moderada en un 11.8 por ciento y de moderada a baja en un 34.1 por ciento.

Acorde a los resultados obtenidos se puede concluir que la erosión hídrica "actual" en la Comarca Lagunera oscila de poca a media en virtud de la predominancia de las áreas de riego. Sin embargo, las tasas actuales de erosión no deberán mantenerse a corto plazo debido al impacto negativo que esto implicaría en la productividad del suelo como se señala a continuación.

La productividad del suelo y el futuro.

El método descrito en el presente trabajo para la estimación de pérdida de suelo por concepto de erosión se pudiera considerar determinístico en esencia, ya que los parámetros del modelo de predicción usado no consideran probabilidades ni variaciones en tiempo, aunque la variación espacial se toma en cuenta mediante el sistema de información geográfica.

El deterioro del recurso suelo en el contexto de erosión por agua se ubica en una escala de tiempo de décadas o quizás siglos. Sin embargo, el impacto en la sociedad pudiera ser de devastadoras consecuencias al mermar la productividad de este recurso reflejado en un decremento sustancial del rendimiento de los cultivos debido a las pérdidas de nutrientes adsorbidos en las partículas de suelo erodadas y por la reducción de la capacidad de retención de humedad de los suelos.

En las sociedades económicamente más desarrolladas las políticas de desarrollo agrícola han seguido estándares establecidos mediante el estudio de la degradación del medio físico. Más aún, es difícil la ejecución de proyectos de desarrollo económico que no hayan probado su nulo impacto sobre el ecosistema en términos de deterioro ambiental.

En términos de planeación a mediano y largo plazo es menester considerar la tasa de erosión o pérdida de productividad que el entorno permite aceptar como frontera para evitar el deterioro gradual persistente del recurso; esto es dictado por la fragilidad del sistema.

La productividad como consecuencia de fenómenos aleatorios.

En zonas de temporal el rendimiento de los cultivos está fuertemente asociado a la presencia de eventos climáticos adecuados (naturaleza aleatoria) para su óptimo desarrollo; así entonces, el proceso de erosión sigue las mismas variaciones que la precipitación pluvial. De ahí que es pertinente el visualizar la productividad de los suelos como consecuencia de factores edafo-climáticos.

Acorde a Todorovic *et al.* (1987), la relación entre el rendimiento de un cultivo en un año dado (Y_n) bajo condiciones "adecuadas" de suelo, y el rendimiento del mismo cultivo bajo un suelo sometido a erosión (X_n), está dado por:

$$X_n = Y_n \left[a + \frac{(1-a)d_n}{D} \right]; \quad d_n < D \quad (10)$$

$$X_n = Y_n; \quad D \leq d_n \quad (11)$$

donde el parámetro "a" se interpreta como el cociente de X_n , y Y_n , d_n es la profundidad de suelo disponible y "D" es el espesor de la capa arable. Si se define a "e" como la pérdida anual de suelo por concepto de erosión, la tasa de pérdida de suelo (r) es entonces dada por:

$$r = \frac{e}{D} \quad (12)$$

Así entonces, el suelo disponible d_n se irá degradando conforme a:

$$d_n = D(1-r)^n \quad (13)$$

donde "n" es un exponente que indica el número de año. Si la Ecuación 13 se sustituye en la ecuación 10 se tiene:

$$X_n = Y_n [a + (1-a)(1-r)^n] \quad (14)$$

La ecuación 14 indica el rendimiento " X_n " que se tendrá en el año enésimo manteniendo una tasa de erosión " r " y partiendo de un rendimiento del cultivo potencial " Y_n ".

Si consideramos que en zonas de temporal en la Comarca Lagunera el rendimiento del maíz varia aleatoriamente con una función probabilística de densidad normal con $\mu = 0.8$ ton y $\sigma = 0.56$ ton se pueden generar rendimientos aleatorios mediante:

$$Y_n = \mu + \sigma z \quad (15)$$

siendo z:

$$z = (-2\ln(\text{rnd}_1))^{0.5} \cos(2\pi(\text{rnd}_2)) \quad (16)$$

donde $\text{rnd}_{1,2}$ son números aleatorios de una distribución normal con $\mu = 0$ y $\sigma = 1$.

Para el caso de la Comarca Lagunera, como lo señala la Figura 2d, se han ubicado cuatro rangos de erosión: 0.01 - 62.20, 62.21 - 145.10, 145.11 - 228.0 y 228.02 - 311.0 ton ha⁻¹. Considerando una profundidad "D" = 1 m de capa arable, con una densidad aparente $D_a = 1.3$ gr cm⁻³, la pérdida de suelo superficial corresponde a 0.004, 0.011, 0.017 y 0.023 m año⁻¹ respectivamente. Con esta información se realizaron 500 simulaciones para un número igual de años del comportamiento del rendimiento del maíz obteniéndose las series de tiempo mostradas en la Figura 3 para tres de las cuatro tasas señaladas anteriormente.

Acorde a la Figura 3, si la tasa de pérdida de suelo se mantiene constante, en 62.20 ton ha⁻¹, la merma en rendimiento de maíz causada por un deterioro en la productividad del suelo es bastante fluctuante, pudiéndose ubicar los rendimientos en el futuro cercano en 0.4 ton ha⁻¹ aproximadamente si nada se hace para detener el deterioro gradual del suelo. Por lo que respecta a la tasa de erosión de 311 ton ha⁻¹, los rendimientos futuros tienden a estabilizarse más rápido en

valores bajos causados por el rápido deterioro del suelo. Bajo éstas condiciones de merma en la productividad del suelo, los problemas serios se agudizarán en los próximos 50 años. La proyección de las series de tiempo para los próximos 500 años (con las tasas constantes de erosión actuales) indican que la actividad agrícola habrá fenecido del todo en la entidad.

Como se asentó líneas arriba, el análisis asume tasas constantes de erosión, sin embargo, como también se ha asentado, éstas tasas son variables en tiempo acorde a eventos climáticos y al manejo del suelo.

Nivel de impacto.

Los resultados aquí mostrados, deberán ser usados únicamente como indicativos del problema de erosión en la entidad con base en la restringida información disponible para análisis. Una cuantificación más precisa del problema, requiere de mayor calidad en la información pluviográfica y de la obtención de los parámetros de modelos de predicción más precisos.

Sin embargo, se considera que la aproximación usada para el análisis es congruente a la información disponible al utilizar parámetros distribuidos en el espacio y en gran volumen. El método pudiera permitir la conformación de una base de datos dinámica, lo que redundaría en aproximaciones certeras considerando las variaciones en tiempo. En este sentido, un próximo paso sería el uso de modelos dinámicos de simulación con la interfase del sistema de información geográfica.

Uno de los objetivos del proyecto por colaboración con EL ORSTOM es la cuantificación de erosión hídrica potencial en la Región Hidrológica 36, para lo cual se está en proceso de la conformación de la base de datos en el formato requerido por el sistema de información geográfica.

A N E X O

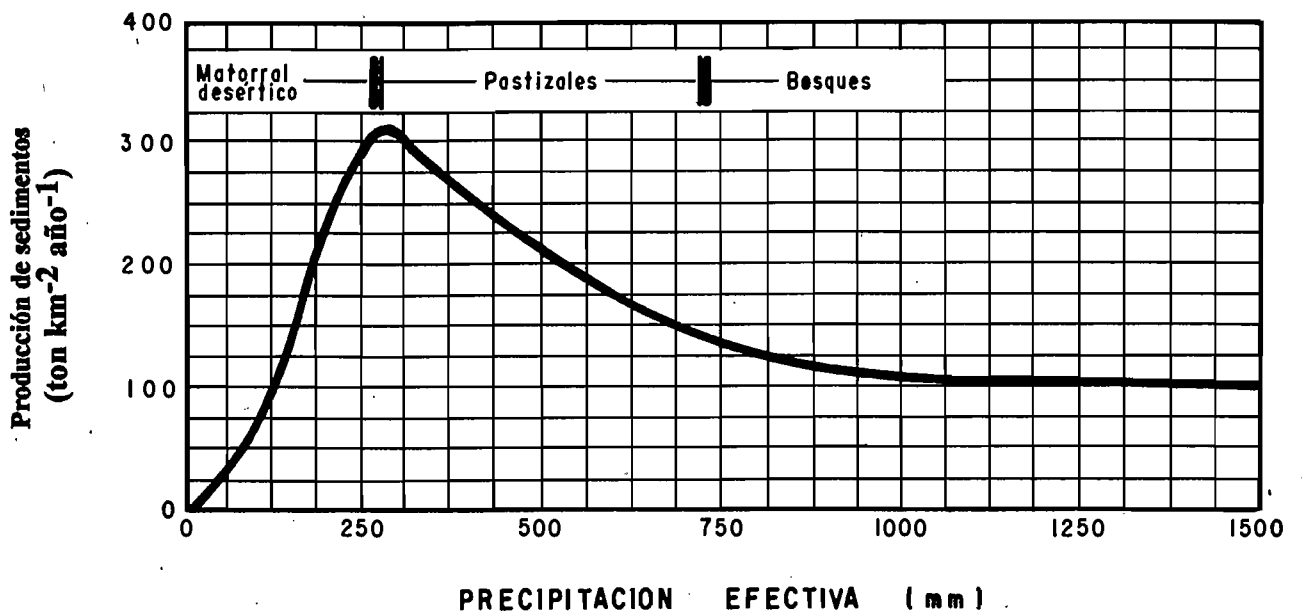


Figura 1. Comportamiento de las tasas de erosión como función de vegetación y precipitación.

COMARCA LAGUNERA

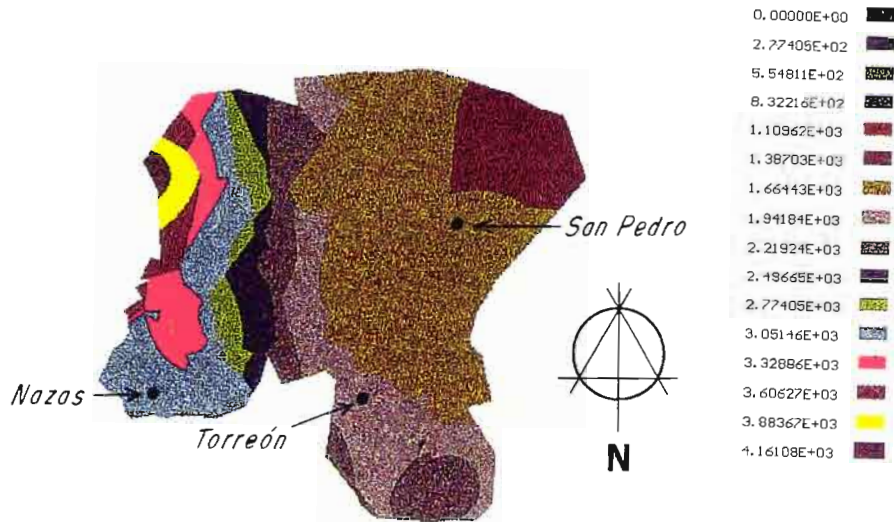


Figura 2a. Erosionabilidad de lluvia, MJ mm-ha.h.

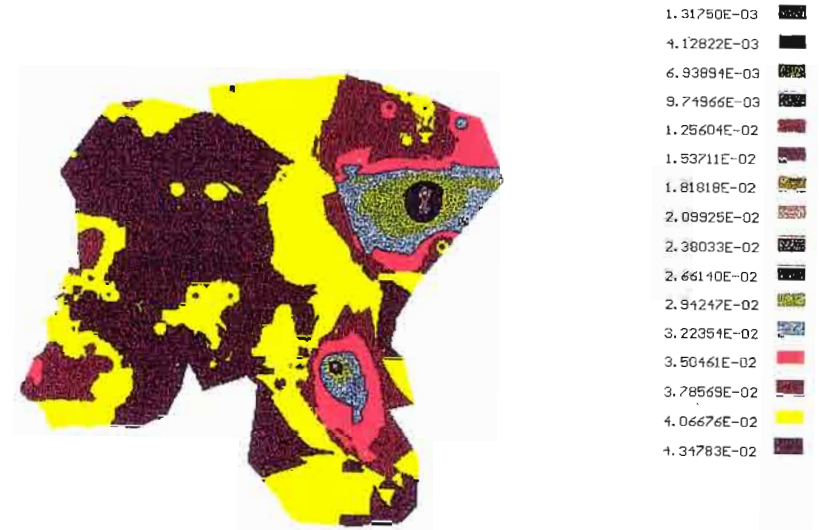


Figura 2b. Erosionabilidad del suelo, ton.ha.h-ha-MJ.mm

23

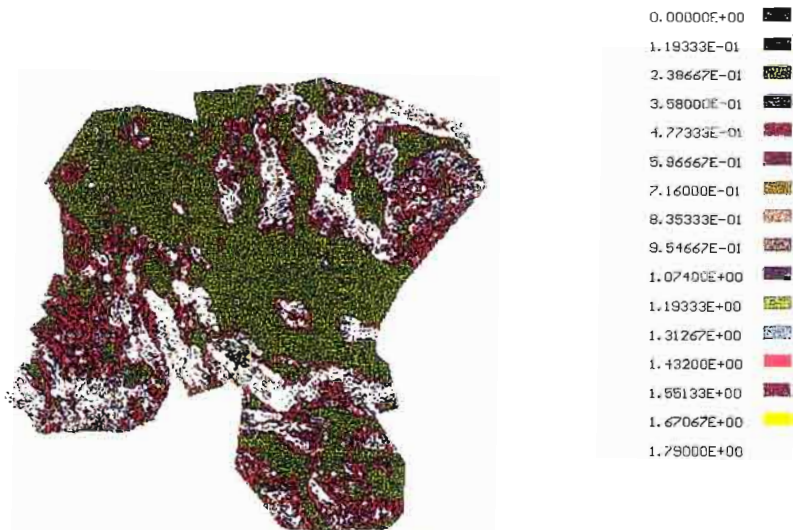


Figura 2c. Factor longitud-pendiente.



Figura 2d. Erosión potencial (ton ha⁻¹)

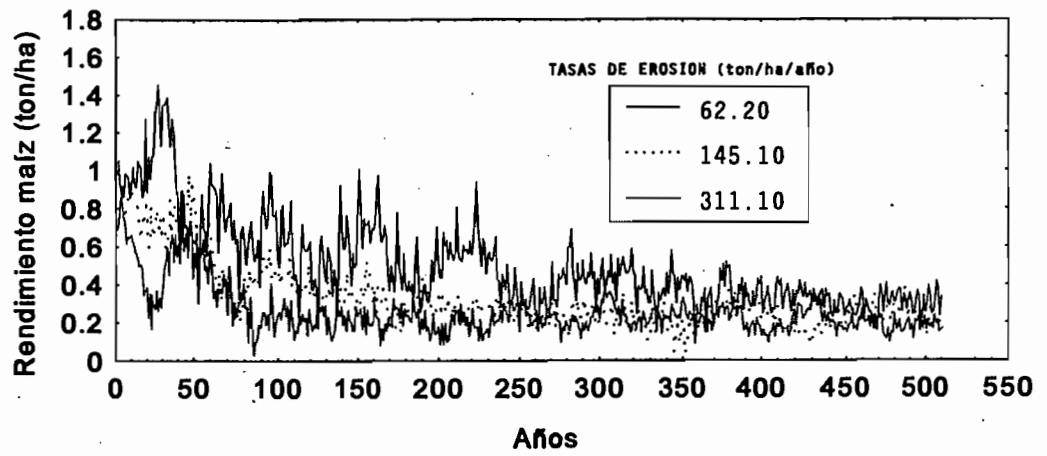


Figura 3. Series de tiempo para reducción en rendimiento causado por pérdida gradual de suelo con diferentes tasas de erosión en la Comarca Lagunera.

LITERATURA REVISADA

- Cassel, D. K. and D. W. Fryrear. 1990. Evaluation of productivity changes due to accelerated soil erosion. In Proceedings of Soil Erosion and Productivity Workshop. The University of Minnesota. pp 41-54
- Colegio de Postgraduados. 1991. Manual de Predicción de Pérdidas de Suelo por Erosión. SARH. 159 pp.
- Fogel, M. and V.L. Lopes 1991. Modeling soil erosion. Handouts for the class "Watershed process modeling". The University of Arizona. Tucson Az.
- Kirkby, M.J. 1969. Infiltration throughflow and overland flow. In: Chorley, R.J. (ed). Water earth and man. Methuen, pp. 215-227.
- Loyer, J.Y. 1995. Características de las pendientes de la RH 36. Proyecto INIFAP-ORSTOM. En prensa.
- Ritter, D. F. 1986. Process Geomorfology. WCB Ed. 577 p.
- Romkens, M.; R. A. Young; J. W. Poesen; D. K. Mc.Cool; S. A. El-Swaify; and J. M. Bradford. 1994. Soil erodibility factor (k). In Predicting Soil Erosion by Water. A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).
- Schulz, E. F. 1973. Problems in Applied Hydrology. Water Resources Publication. pp 190-191.
- Todorovic, P.; D. A. Woolhiser and K. G. Renard. 1987. Mathematical model for evaluation of the effect of soil erosion on soil productivity. Hydrological Processes, Vo. 1 pp 181 - 198.
- Torres G., T. 1993. La Vegetación Natural. En. Estudios de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. Loyer, Estrada, Jasso, Moreno Ed. pp 223-244.
- Tiscareño, M. 1991. Sensitivity Analysis of the WEEP Watershed Model. M. S. Thesis. Watershed Management Department. The University of Arizona, Tucson Az.
- Wischmeier, W. H., and D. D. Smith. 1978. Predicting Soil Losses: A guide to conservation planning. USDA Agric. Handbook No. 537.

**Esta publicación se terminó de imprimir en el mes
de agosto de 1995 en los Talleres del
Centro Nacional de Investigación
Disciplinaria en Relación
Agua-Suelo-Planta-Atmósfera.
Km. 6.5 margen Derecha
Canal Sacramento.
Gómez Palacio, Dgo.
Su tiraje consta de 300 ejemplares.**