

VARIACIONES DEL IMPACTO PLUVIAL COMO BASE PARA INFERIR CAMBIOS CLIMÁTICOS EN EL SUR DE LA CUENCA DE MÉXICO.*

Por *Magdalena Meza Sánchez***
y *Jorge F. Cervantes Borja***

RESUMEN

En este estudio se hace un análisis de la intensidad de la energía pluvial que se presenta en la parte sur de la cuenca de México; aquélla correlacionada con un análisis morfométrico y de disección de relieve, a fin de deducir los posibles cambios paleoclimáticos en dicha área.

SUMMARY

This study shows an analysis of pluvial energy intensity that is usually presented in the south zone of Mexico's Basin; this intensity is correlated with the morphometric analysis and relief dissection in order to deduce possible paleoclimatic changes in this area.

1. INTRODUCCIÓN

La explicación lógica y simple de los procesos morfogenéticos, y sus resultados expresados en la hechura de relieve y modelado, ha manifestado dos posiciones: la primera, que las formas del relieve tienen un carácter histórico-aditivo, de modo que todos los procesos morfogenéticos dejan marcas que pueden ser no sólo identificadas, sino cronológicamente integradas en una secuencia evolutiva. Los conceptos de Davis y Penck se basan en esta posición y, por ello, interpretan el

paisaje en función del conjunto de formas, sin importar que tengan origen, características y edades diferentes.

La segunda posición se remite al concepto de equilibrio dinámico de G. K. Gilbert, el cual supone que los procesos morfogenéticos presentan fases en las que todos los elementos son erosionados vertical y horizontalmente con una intensidad igual, de modo que, al correr el tiempo, no se presentan alteraciones diferenciales, sino graduales, en la hechura del relieve. En lo anterior existe una profunda relación de forma-proceso y forma-conforma, tal como lo manifiestan Hack (1960) y Chorley (1962)¹.

* Estudio incluido dentro del proyecto: "ESTUDIOS GEOMORFOLOGICOS EN LA CUENCA DE MEXICO".

** Investigadores del Instituto de Geografía de la UNAM.

Actualmente se trata de complementar y unificar ambas posiciones, partiendo del concepto de que tanto el contenido histórico de

las formas del relieve, como la tendencia de las mismas para ajustarse continuamente a los procesos que actúan sobre ellas, pueden ser endobados y analizados bajo un proceso de análisis metodológico-sistémico.³

Considerando que el sistema es un modelo general que nos permite la analogía de teoría y realidad para los fenómenos naturales; que los sistemas morfogenéticos funcionan por el intercambio de energía y materia y que, por ello, dicha función puede ser no sólo definible sino previsible en sus fases y estados en el tiempo y el espacio, es posible y deseable que exista interés mayor por experimentar este tipo de análisis en nuestros diagnósticos geomorfológicos.

Podemos considerar que los sistemas geomorfológicos son altamente "pasivos", ya que sólo pueden ser alterados o modificados a partir de reajustes operados en sistemas vecinos que actúan como factores externos. En esta forma, cualquier modificación no aleatoria a un sistema geomorfológico, en el tiempo y en el espacio, debe atribuirse a la influencia de una variable externa que propicia el reajuste o cambio de todos los elementos del mismo. Lógicamente, esta concepción, que condiciona y orienta fases de desarrollo y de cambio temporales, cumple con la condición de ajuste de forma-proceso o proceso-forma, y la secuencia progresiva de estas fases puede llevar a "estados típicos" que en el tiempo lleguen a caracterizar umbrales de discontinuidad que manifiestan una evolución histórica por el alto grado de independencia que existe entre los diferentes estados componentes, lo que, finalmente, está de acuerdo con las ideas de las escuelas cíclicas de Davis y Penck.

En el programa denominado "Estudios geomorfológicos en la cuenca de México", se están desarrollando las dos tendencias anotadas anteriormente: por una parte, se está realizando un análisis geomorfológico estructural basado fundamentalmente en las teorías de Penck, que determinan la conjugación de la denudación y la hechura de vertientes, con la consecuente retrogradación de las cabeceras fluviales, a un ritmo constante.

Por otra parte, y de acuerdo con Schumm (1956), Carter y Chorley (1961) (ver Howard 1963),⁴ se ha comprobado la presencia de avances marginales en la retrogradación

de las vertientes de las cuencas de más bajo orden cuando en éstas se intensifica la erosión al aumentar en forma progresiva el área de drenaje. Acorde con esta concepción, en este estudio se analiza el desarrollo de este avance marginal de las cabeceras de drenaje, a fin de detectar sus etapas y correlacionarlas con estados de elevada precipitación; es decir, se trata de establecer las oscilaciones climáticas vistas como periodos de mayor energía pluvial y, por tanto, reflejadas en la intensidad de la erosión marginal de las vertientes. Esta determinación incluye el establecimiento de los umbrales de escurrimiento y escorrentía en las cabeceras de bajo orden fluvial, su correlación con una valoración aproximativa de la energía pluvial como factor de cambio externo, y los resultados expresados en la disección final del relieve.

2. VALORACIÓN APROXIMATIVA DE LA ENERGÍA PLUVIAL

La cuantificación y jerarquización de la erosión pluvial vista a partir de la valoración energética que produce el impacto pluvial por las gotas de lluvia o por las de agua sólida al golpear el suelo, ha sido tema de diversas formas analíticas que, en términos generales, son, por un lado, el cálculo de la energía que liberan las precipitaciones, considerando el volumen, velocidad y viscosidad de las gotas y, por otro, la determinación de la velocidad con que son removidas las capas del suelo al ser golpeado.

No obstante, hasta ahora no hay un método general y, por ello, se ha llegado a resultados y puntos de vista particulares que en muchas ocasiones ha vuelto muy complejo el problema. Por esto, en la mayor parte de los casos, los autores llegan a la determinación de usar métodos empíricos que sólo pueden ser establecidos en condiciones particulares. Por ejemplo, Smith⁵ cita que, desde 1936, en los inicios de la geomorfología cuantitativa, Cook puso énfasis en los procesos de erosión pluvial, lo que más tarde, en 1940 y 1941, Otis Laws empleó en sus análisis acerca del efecto del impacto de la lluvia en la erosión del suelo. Laws incluyó medidas de la velocidad de caída de las gotas, de acuerdo con su distribución na-

tural y sus diámetros. Estos fueron trabajos muy importantes en el desarrollo de la investigación de la erosión pluvial - mismos que más tarde fueron completados por otros investigadores como Ellison⁵ quien desde 1947 hasta 1953 estuvo trabajando en el análisis experimental de cuantificación de las salpicaduras de la lluvia - que dieron alguna luz sobre la capacidad de trabajo para remover las partículas de suelo. Finalmente, sus conclusiones fueron resumidas en una ecuación denominada de "la disgregación relativa del suelo":

$$E = K_V 4.33 d^{1.07} I^{0.65}$$

en dicha ecuación:

E = es la suma relativa de la salpicadura del suelo en un periodo de 30 minutos.

K = es una constante del suelo.

V = es la velocidad de las gotas por segundo.

d = el diámetro de las gotas en mm.

I = la intensidad pluvial en pulgadas por hora.

A fin de obtener una relación directa entre la intensidad de la lluvia, el tiempo y la dispersión del suelo, Ellison modificó la velocidad de las gotas y sus equivalentes en tamaño, obtenidos por Otis Laws. Esto determinó que Ellison encontrara una relación directa entre la intensidad de la lluvia, el tiempo y la dispersión del suelo.

En cuanto al carácter de amortiguamiento o resistencia existente en el suelo, para soportar el trabajo de impacto pluvial, Smith (*op. cit.*) indica que este aspecto también fue analizado, desde la década de 1940-50, por varios investigadores del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de Norteamérica. Dichos estudios se hicieron en función del riesgo potencial o grado de erodabilidad relativa para diferentes suelos, con diferentes grados de pendiente, pero con precipitaciones iguales ajustadas a 30 minutos. La mayor parte de sus conclusiones fueron aprovechadas posteriormente por varios autores como Osborn,⁶ quien concluyó que los valores de mayor desagregación del suelo ocurren con mayor frecuencia en aquellos de texturas gruesas y finas que en los de medias, por lo cual este carácter y la pendiente del suelo se han

usado con gran peso dentro del factor K de la ecuación de Ellison y otras semejantes.

Conocido lo anterior se decidió establecer una forma de análisis que permitiera detectar, con un grado de confiabilidad mayor de 60%, el potencial energético que se libera durante el fenómeno pluvial, por ser éste el que inicialmente determina la pérdida potencial y real del suelo y del subsuelo. Este es, entonces, el "factor clave" indicado para sustentar un criterio que permita la comparación y diferenciación de la eficacia morfoclimática establecida para los diferentes ambientes mesoclimáticos que presenta la cuenca de México (ver mapa 1). Con esa pretensión se buscó la forma más adecuada para cuantificar el valor de dicho potencial, que se obtiene a partir de la determinación de la intensidad de la lluvia considerada en la forma de la meteorología tradicional;* dicho valor se transformó, empíricamente, en valores de energía pluvial que, vistos como energía de trabajo para ejercer una actividad morfogenética, permitieron establecer una comparación con las formas de erosión reales del terreno y, con ello, definir si existía una correlación directa entre el carácter climático actual con la morfogénesis o, si no, concluir, con inferencias lógicas basadas o apoyadas en otros estudios que se han hecho en la misma zona^{2,6} si el carácter morfogenético actual ha sido originado en condiciones climáticas diferentes, por lo menos en lo que toca a la erosión pluvial.

Para establecer lo anterior, el trabajo consistió en lo siguiente:

Se hizo una selección del total de estaciones termoplumiométricas utilizadas para la obtención del mesoclima;⁷ dicha selección consistió en separar aquellas que tuvieron datos de intensidad de lluvia real y calculada para diversos tiempos; en este aspecto se eliminaron también las que tuvieron registros menores de cinco años. De las estaciones seleccionadas se obtuvieron datos de intensidad de lluvia en 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos de duración; este umbral final se tomó como base para la globalización total de la intensidad

* Es decir, intensidad de la lluvia
cantidad de lluvia

$$I = \frac{\text{cantidad de lluvia}}{\text{tiempo}}$$

MAPA No. 1

ZONIFICACION MESOCLIMATICA

CUENCA DE MEXICO

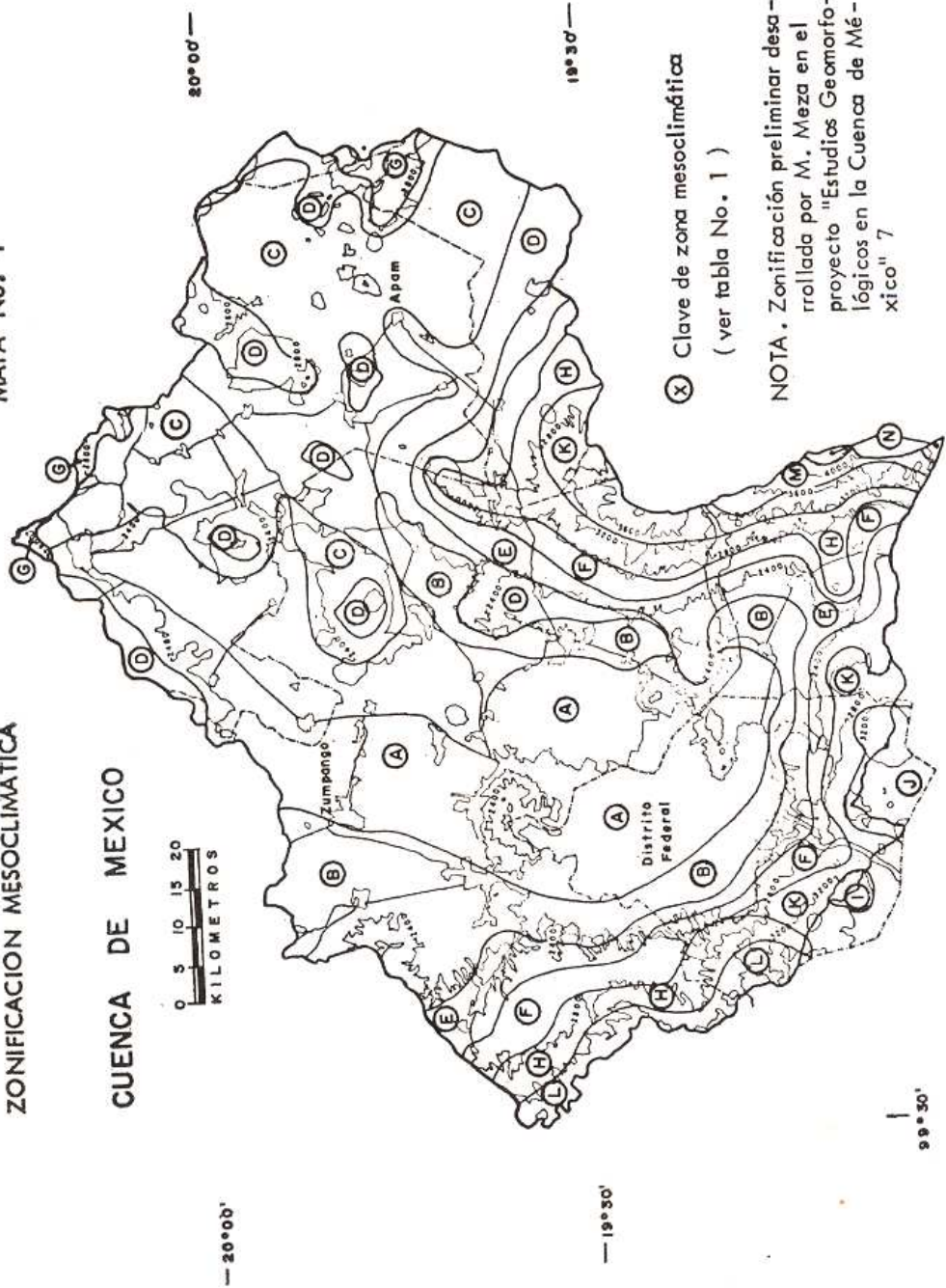


TABLA No. 1
M E S O C L I M A

Símbolo	Tipo meso-climático	Piso altitudi- nal msnm.	T media anual °C	P anual en mm.	No. me- ses de P
A	Templado seco	< 2400	>15	< 600	5
B	Templado semiseco	< 2400	>15	600 - 800	6
C	Fresco seco	2400 - 2750	13 - 15	< 600	5
D	Fresco semiseco	2400 - 2750	13 - 15	600 - 800	6
E	Fresco subhúmedo	2400 - 2750	13 - 15	800 - 1000	6
F	Fresco subhúmedo	2400 - 2750	13 - 15	800 - 1000	7
G	Semifrío semiseco	2750 - 3000	11 - 13	600 - 800	6
H	Semifrío húmedo	2750 - 3000	11 - 13	1000 - 1200	7
I	Frío semiseco	3000 - 3500	9 - 11	> 1200	7
J	Frío subhúmedo	3000 - 3500	9 - 11	800 - 1000	6
K	Frío húmedo	3000 - 3500	9 - 11	1000 - 1200	7
L	Frío muy húmedo	3000 - 3500	9 - 11	> 1200	7
M	Muy frío húmedo	3500 - 4500	5 - 9	1000 - 1200	7
N	Polar húmedo	> 4500	< 5	1000 - 1200	7

T = temperatura; P = precipitación.

porque, de acuerdo con los propios supuestos teóricos y los resultados mostrados por los diferentes autores anotados en la revisión bibliográfica, la mayor intensidad de la precipitación y su mayor potencial energético se presentan, en promedio, durante este lapso, punto a partir del cual se empieza a equilibrar la cantidad de energía pluvial con respecto al tiempo.

Con los valores obtenidos de intensidad de lluvia, se estableció la determinación potencial de la energía pluvial que actúa sobre el terreno; para ello fue necesario conocer la energía que se libera por las gotas de agua al caer sobre el suelo y, con ello, discriminar cuantitativamente las zonas de alta y de baja energía pluvial, objeto del trabajo.

Para determinar lo anterior se utilizó la fórmula de Otis Laws,⁵ que da los diámetros medios de las gotas de una precipitación, de acuerdo con la intensidad de la misma.

$$D = 2.23 (25.4 \times i)^{0.182}$$

Donde:

D = diámetro medio en mm.

i = intensidad en mm/hora

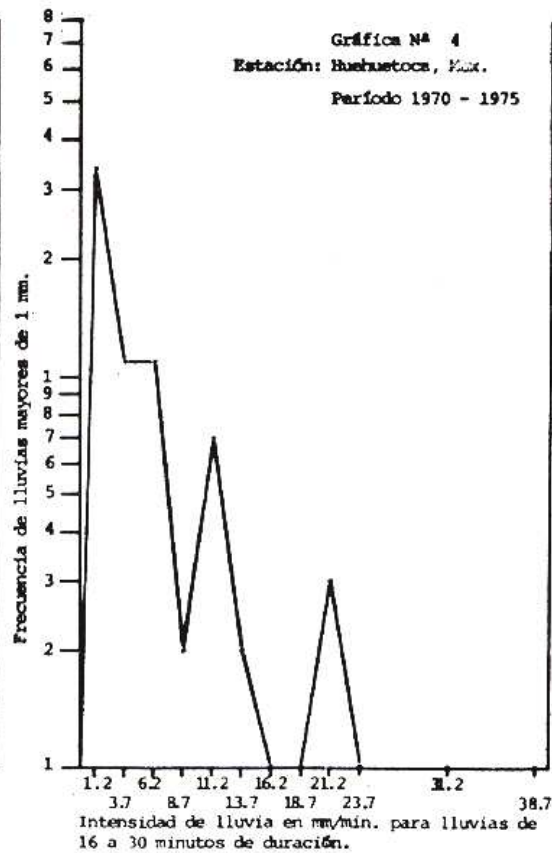
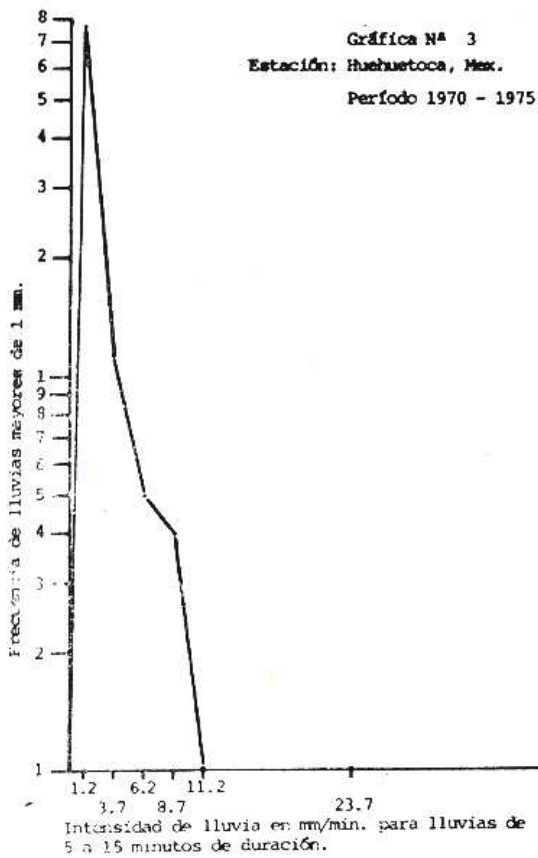
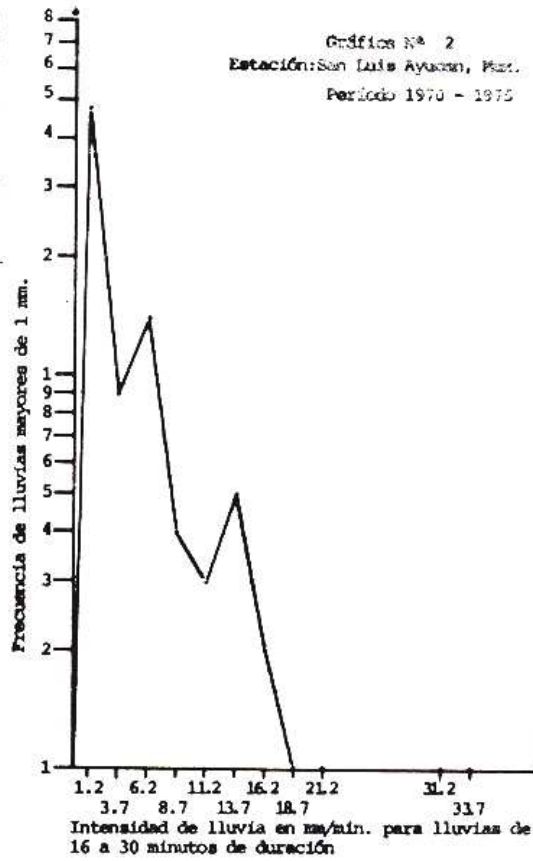
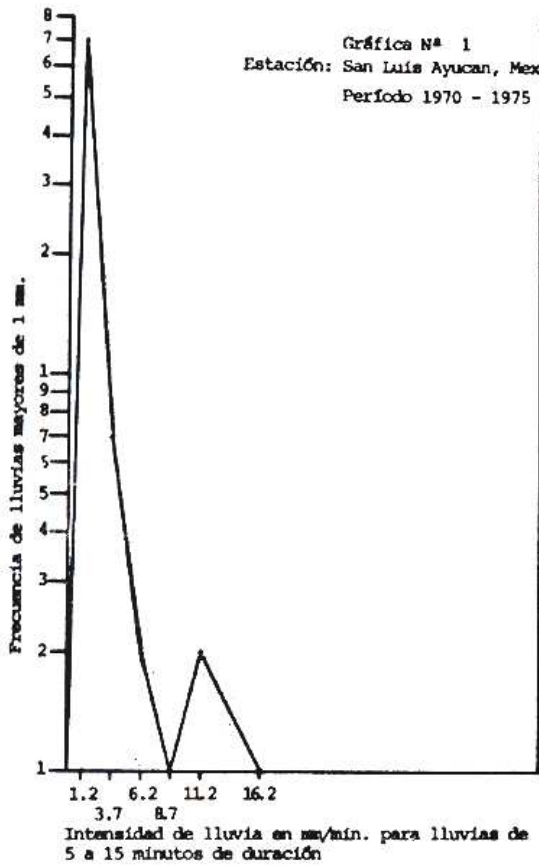
Es claro que la determinación del diámetro de la gota permite conocer su volumen y, con ello, saber la fuerza que libera al golpear el suelo desde diferentes alturas. El mismo autor trabajó experimentalmente velocidades de caída para diferentes diámetros, valorando la energía liberada en cada caso. De acuerdo con lo anterior, y haciendo uso de nomogramas, se determinaron los diámetros de gotas, altura inicial de la precipitación, velocidad de caída y, finalmente, se valoró el potencial energético liberado. Por ejemplo, una gota de lluvia de 4 mm de \emptyset , cayendo de una altura infinita, a una velocidad promedio de 9 m/seg, libera, en promedio, entre 20 000 y 40 000 ergios, en tanto que una gota de 5 mm \emptyset , a una velocidad entre 9 y 10 m/seg, libera una energía superior a 100 000 ergios. Además, se observó que, cuando la intensidad de lluvia es mayor de 1 mm, el tamaño de las gotas que la componen es, en promedio, de 15 mm de diámetro.

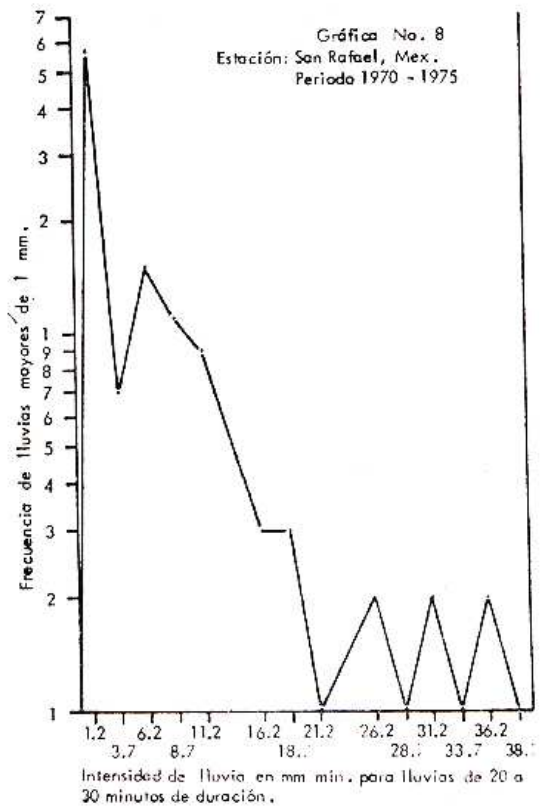
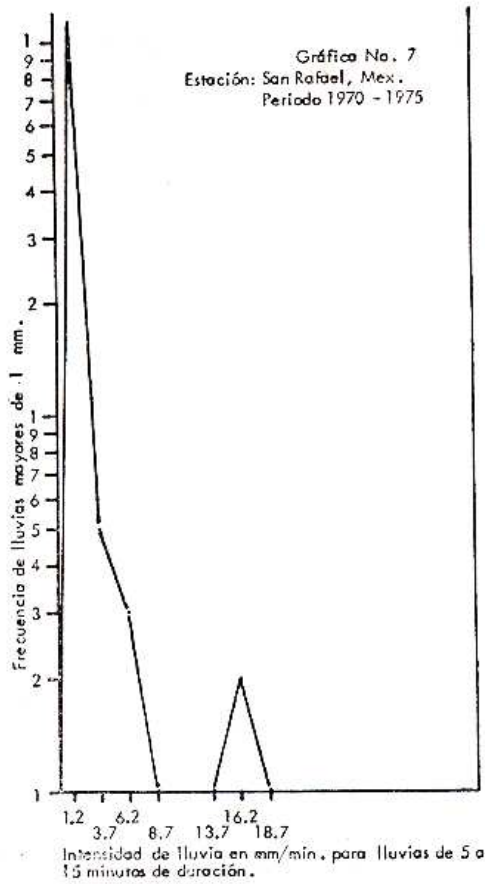
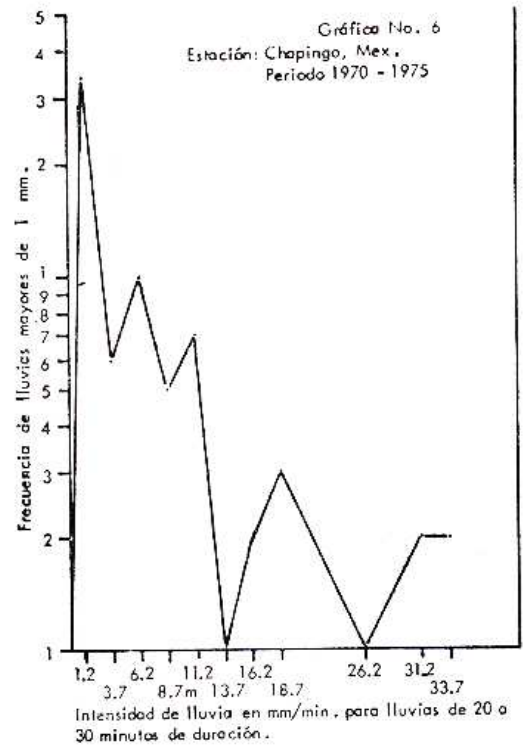
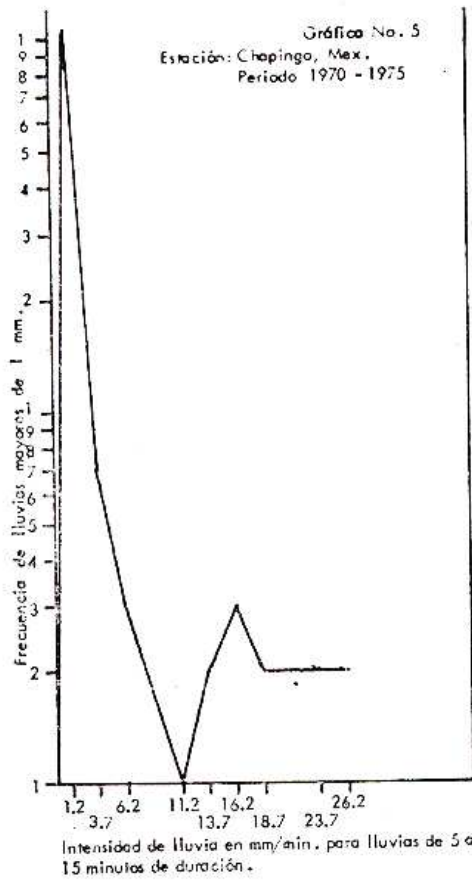
El cálculo de la energía liberada, no por una gota, sino por una precipitación de un milímetro de intensidad, se obtuvo al considerar que 1 mm de lluvia equivale a un litro de agua/m². Si las gotas fueran uniformes, de 5 mm de \emptyset , un litro de agua estaría formado por 8 000 gotas equivalentes a cubitos de 5 mm por lado, y si una gota libera en promedio 10 000 ergios, 8 000 gotas liberan 800 millones de ergios.

Por lo anterior se decidió usar como unidad de energía pluvial la que se libera por una lluvia de 1 mm. Con dicha unidad se estableció la cantidad de energía liberada en diferentes periodos e intensidades de lluvia. Con tal propósito se hizo un análisis de la intensidad de las lluvias mayores de 1 mm, en lapsos de 0 a 15 minutos y de 16 a 30 minutos. Los resultados muestran que la intensidad media de las lluvias es menor de 3 mm en lapsos de 15 minutos o menos, y de 7.5 mm en lapsos de 15 minutos a 30 minutos. Por los datos obtenidos se seleccionaron cuatro estaciones representativas del área que se considera en esta etapa del estudio, a fin de establecer su comparación con el ambiente mesoclimático en que se encuentran. Dichas estaciones están representadas en las gráficas Nos. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8, y corresponden, respectivamente, a las estaciones de Ajusco (pueblo) y Desierto de los Leones situadas en el suroeste y oeste de la zona, y las de Chapingo y San Rafael situadas en el noreste y sureste, respectivamente.

Las estaciones del noreste y sureste muestran que las lluvias más frecuentes, en los primeros 15 minutos tienen una intensidad de 1 a 4 mm, al 60% de probabilidad, por lo que se consideran de alta energía pluvial, ya que liberan entre 800 y 3 200 millones de ergios; en tanto que en las estaciones del oeste y suroeste, la clase más frecuente de las lluvias, en el mismo tiempo, es menor de 2 mm y su probabilidad también menor de 60%, por lo que se consideran de baja energía pluvial, ya que liberan menos de 1 600 millones de ergios.

La relación inversa se presenta al considerar el lapso de 20 a 30 minutos, ya que entonces las estaciones del noreste y sureste muestran un valor máximo de 8 mm de intensidad en la primera, y de 7 mm en la segunda, con probabilidades menores de 10% y





20% respectivamente. En el caso de las estaciones del oeste y suroeste, la intensidad máxima es de 11 minutos en la primera y de cuatro en la segunda, con probabilidades menores de 5% en ambas. Lo anterior determina dos situaciones de potencialidad energética, ya que, según muestran las estaciones del noreste y sureste, las lluvias que caen en esas partes suman menor altura anual, pero por el hecho de ser más esporádicas son más intensas puesto que cuando caen liberan una energía igual a la que liberarían lluvias más abundantes, pero de mayor tiempo de duración, tal como ocurre con las del oeste y suroeste. En otras palabras, el análisis concluye que, las lluvias en las partes noreste y sureste tienen un carácter de torrencialidad e intensidad morfogenética mayor que las que se encuentran al suroeste y oeste.

Lo anterior fue comprobado al relacionar la conclusión anterior con los resultados de las cartas de amplitud de relieve preparadas por J. Lugo y V. M. Martínez,⁹ para la misma zona. Así, se encuentra que, en las partes oeste y suroeste existe una relación directa entre el potencial energético liberado en 30 minutos o más, y los valores de la profundidad de la disección vertical y horizontal del relieve (ver mapa 2). En la parte del noreste, la relación del potencial energético que se presenta con respecto a la amplitud del relieve es directa y de alta intensidad; es decir, la capacidad energética que liberan las lluvias que caen en esta parte concuerda con la elevadísima amplitud de relieve (disección vertical) que existe. Por lo que toca a la parte del sureste hay una tendencia de cambio y la relación no es muy clara; aparentemente las condiciones de potencial energético muestran una ligera deficiencia respecto al valor de amplitudes del relieve mostrado; sin embargo, la situación aparente de áreas vecinas es la de un decremento de potencial de energía, de manera que en esta área se puede llegar a una relación directa como la del noreste. En las partes del oeste y suroeste la relación del potencial energético con respecto a la amplitud del relieve es directa y de baja intensidad, o sea que, la baja capacidad energética que liberan las lluvias, por ser menos intensas, concuerda con la baja amplitud del relieve que se en-

cuentra en esta zona. Sin embargo, hacia el sur, en la parte este de la sierra de Chichinautzin, las precipitaciones disminuyen en cantidad aunque no en intensidad, que aumenta, por lo que esta zona es similar a la porción noreste, por lo que se encuentra también, entre la intensidad de la precipitación y la amplitud del relieve, una relación directa de alta intensidad.

3. CONCLUSIONES

El estudio de esta parte sur de la cuenca de México indica que, de manera general, existe tendencia a cambios en las condiciones mesoclimáticas de la misma. Particularmente en lo referente a las condiciones de humedad, se preparó un mapa que muestra la relación entre el balance de la energía pluvial y la capacidad de amortiguamiento del medio considerada como un factor de resistencia al cambio (ver mapa 3).

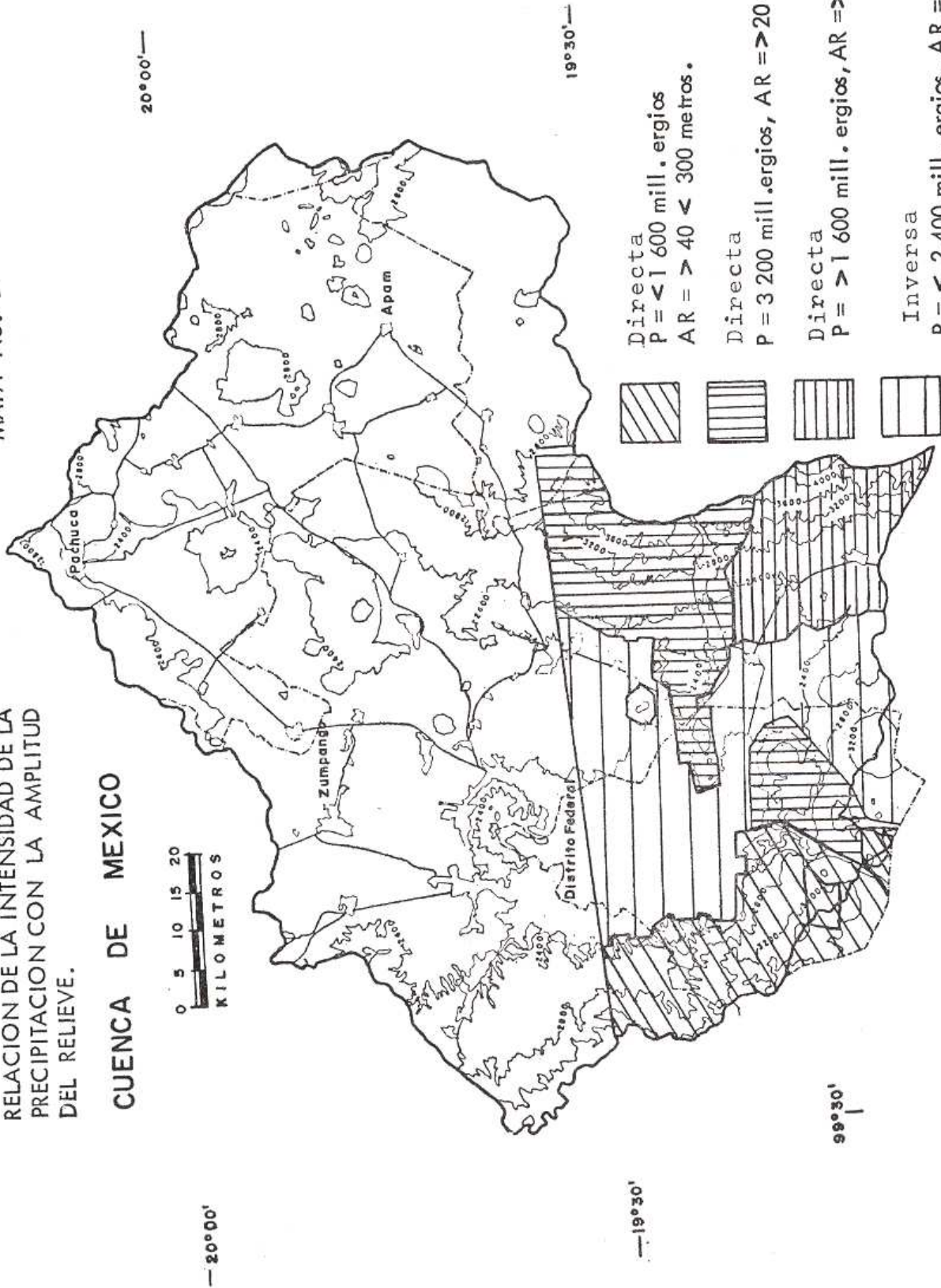
La situación de cambio mesoclimático detectada es particularmente notoria en el paso de subhúmedo a seco y de templado a cálido. De acuerdo con ello, las áreas con tendencia a mayor impacto pluvial son más secas y cálidas. Esta situación es muy clara en el declive noroccidental de la Sierra Nevada, y progresivamente avanza hacia la parte sur de la misma. Sólo en la parte de la Sierra de las Cruces y del Ajusco, y la porción limítrofe a ellas, de la sierra de Chichinautzin, mantiene aún un equilibrio aparente con las condiciones mesoclimáticas templado-húmedas.

Las situaciones anteriores nos indican, además, que los cambios climáticos actuales no presentan relación directa con la morfogénesis en cuanto a la disección profunda del relieve y la hechura de las vertientes de la morfología actual, aunque sí en lo que toca a la remoción violenta de las capas superficiales del terreno que afectan y cambian notablemente el modelado. En este proceso la erosión pluvial tiene valor importante como agente dispersante e iniciador de la erosión horizontal del terreno. Esta importancia aumenta progresivamente en intensidad y en extensión, corriéndose desde la parte noreste y este de la cuenca hasta la parte sur y oeste de la misma.

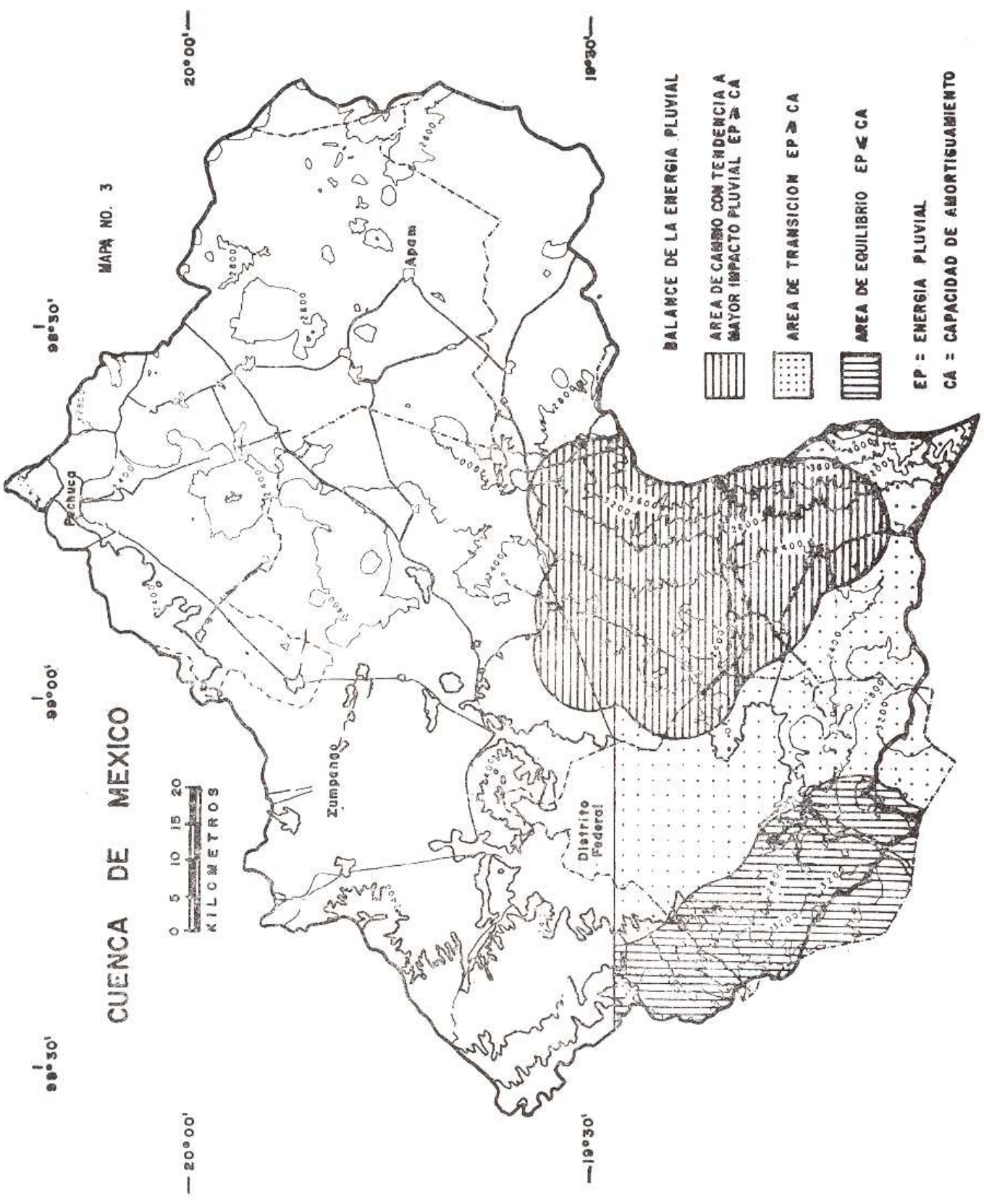
MAPA No. 2

RELACION DE LA INTENSIDAD DE LA
PRECIPITACION CON LA AMPLITUD
DEL RELIEVE.

CUENCA DE MEXICO



- Directa
P = < 1 600 mill. ergios
AR = > 40 < 300 metros.
- Directa
P = 3 200 mill. ergios, AR = > 20 < 400 metros
- Directa
P = > 1 600 mill. ergios, AR = > 40 < 400 metros
- Inversa
P = < 2 400 mill. ergios, AR = < 40 metros
P = Intensidad de precipitación
AR = Amplitud del relieve.



MAPA NO. 3

CUENCA DE MEXICO

0 5 10 15 20
KILOMETROS

BALANCE DE LA ENERGIA PLUVIAL

AREA DE CAMBIO CON TENDENCIA A MAYOR IMPACTO PLUVIAL $EP > CA$

AREA DE TRANSICION $EP >= CA$

AREA DE EQUILIBRIO $EP <= CA$

EP = ENERGIA PLUVIAL

CA = CAPACIDAD DE AMORTIGUAMIENTO

BIBLIOGRAFÍA

- Chorley, R. J. 1962. "Geomorphology and general systems theory", *U.S. Geol. Survey Prof. Paper (500-B)*. 10 p.
- D.D.F. 1976. *El medio natural, Cuenca de México*. Dirección General de Planificación, Cervantes Asociados, S. A., mayo, México, D. F.
- Howard, D. A. 1965. "Equilibrio y dinámica dos sistemas geomorfológicos". *Noticia geomorfológica*. Campinas 13 (26) 3-20, dez. 1965.
- Lauer, W. y Stiehl, E. 1973. "La clasificación del clima en la región Puebla-Tlaxcala". *Comunicaciones*, 7, Fundación Alemana para la Investigación Científica, Puebla, México.
- López, G. de Ll. F y Blanco, C. M. 1968. *Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica, y del transporte y depósito de materiales*. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, Madrid, España.
- Lugo, H. J. y Martínez, L. V. M. 1980. "La disección del relieve del sur de la Cuenca de México y porciones adyacentes". *Boletín* 10, Instituto de Geografía, UNAM, p. 55-64.
- Meza, S. M. *El mesoclima de la cuenca de México, en proceso*.
- Smith, D. D. and Wischmeier, H. W. 1969. "Factors affecting sheet and Rill erosion". *Slope morphology* No. 28 Trans. Amer. Soc. Agri. Eng. 12, 231-233-239.
- S. R. U. 1972-1976. *Boletín hidrológico* Nos. 23, 24, 25, 26, 27 y 28, de datos diarios del valle de México correspondientes a los años de 1970 a 1975. Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, México.