

ANÁLISIS MORFOCLIMÁTICO DE LA CUENCA DEL RÍO TLALNEPANTLA

Por *Magdalena Meza S.**

RESUMEN

Este trabajo sugiere una forma analítica diferente para hacer estudios mesoclimáticos y de balance hídrico en cuencas fluviales pequeñas, con datos de mala calidad e insuficientes. La metodología aquí expuesta integra datos cualitativos y cuantitativos y los interpreta en función de los cambios que inducen en el medio natural.

Este ensayo de metodología fue aplicado a la cuenca del río Tlalnepantla, cercana al noroeste de la ciudad de México. Los resultados fueron significativos y ello permitió su aplicación en el manejo posterior de dicha cuenca, por parte de la ex Secretaría de Recursos Hidráulicos, en cuanto a la conservación y usos del agua para fines doméstico e industrial.

SUMMARY

This project suggests forms of analysis in order to find solutions to a common problem in Mexico, that is: making mesoclimatic analysis and water balance of small drainage areas with poor and insufficient data. The methodology exposed here integrates and combines qualitative and quantitative data interprets them in relation with the changes which they produce on the natural environment.

1. INTRODUCCION

La cuenca del río Tlalnepantla se ubica en la vertiente noroeste de la cuenca de México, sobre la Sierra de Monte Alto. Se encuentra limitada, al norte, por las cuencas de los ríos Cuautitlán y San Javier; al sur, por las de los ríos Totolica y Chico de

los Remedios; al oriente, por la del río Chico de los Remedios; mientras que, al poniente, la divisoria de aguas del oeste de la cuenca de México, establece también su umbral (ver mapa No. 1).

Por su posición geográfica, al oeste de la cuenca de México y en la vertiente oriental de la Sierra de Monte Alto, presenta tres regiones diferentes: una zona montañosa, una de elevaciones medias o talud de

* Investigadora del Instituto de Geografía de la UNAM.



MAPA No. 1
 Localización de la Cuenca del Río Tlalnepantla

transición y una baja, considerando como tal el nivel de base de la presa Madín.

Drena una superficie de 101.55 Km² y se divide en tres subcuencas: la del río Tlalnepantla propiamente dicha, con 75.93 Km²; la del Tepatlaxco, con 23.15 Km²; y la del Colmenera, con 2.42 Km². Estas subcuencas han sido estimadas en una superficie de avenamiento tomando como punto final la presa Madín, actualmente en reconstrucción.

Esta obra forma parte del programa de control de los ríos del poniente del Valle de México y tiene como propósitos fundamentales controlar las fuertes avenidas del río Tlalnepantla, contribuyendo, así, a reducir el riesgo de inundaciones en la zona noroeste de la ciudad de México y, además, utilizar el vaso como fuente de aprovechamiento de agua para uso doméstico e industrial, instalando, para ello, una planta potabilizadora.

La presa Madín, localizada entre las coordenadas 19°32' y 19°34' de latitud norte, y 99°20' y 99°23' de longitud oeste, ocupa una posición estratégica, ya que aguas abajo se ubican: el área industrial de la ciudad de Tlalnepantla (una de las más importantes del país), fraccionamientos residenciales tales como Lomas de Bellavista, Rincón Colonial, Jacarandas y algunos sectores de Ciudad Satélite, lo mismo que poblados de la importancia de Calacoaya y Rancho Castro que, en conjunto, representan una población cercana a los dos millones de habitantes.

Con base en los datos del proyecto, la capacidad total estimada del almacenamiento es de 24.7 millones de m³, de los cuales 14 millones de m³ corresponden a la capacidad útil, 6 millones de m³ se destinarían a azolves y 4.7 millones de m³ para almacenamientos extraordinarios. La longitud de la cortina es de 250 m medidos sobre la corona original, la altura de la sección máxima sobre el lecho del río es de 57 m, y la misma, sobre el desplante, de 79 m.

2. MÉTODO

La metodología aplicada en este estudio se ha venido utilizando ya en trabajos teórico-experimentales para diferentes cuencas con características similares; en estos estudios hemos venido insistiendo en que se puede hacer un análisis ponderado y funcional de orden geocosistémico que consiste en lo siguiente:

Un estudio sinóptico de los elementos meteorológicos, para elaborar una carta mesoclimática que dé una idea del comportamiento dinámico de la atmósfera inferior. Para ello se requiere de datos determinados o calculados de: temperatura, precipitación, humedad, velocidad del viento, evaporación, evapotranspiración y radiación solar. En el caso de que no exista información estadística, será suficiente el apoyo de un año de datos de campo. Si, además, existe información y un número adecuado de estaciones de registro, el cálculo y extrapolación de datos a nivel mesoclimático pueden ser inmediatos si se apoyan con información geomorfológica ecológica ínsita.

El establecimiento de un balance hídrico en el que se da énfasis no tanto al agua que sale de la cuenca, sino fundamentalmente al comportamiento que ésta tiene en las vertientes, tanto en sus formas de escorrentía libre como en pérdidas por evapotranspiración potencial, por infiltración, o por el uso humano que de ella se hace.

En todo caso, si un valor puntual existe, siempre deberá correlacionarse con el tipo, cantidad y frecuencia de la lluvia; si no es el caso, deberá estimarse por medio del volumen precipitado en el que el tratamiento geomorfológico de las vertientes y cauces a partir del análisis de la pendiente, de la litología y de la morfometría, por secciones, dará idea de los volúmenes esperados. En este mismo aspecto, la evaluación de la evapotranspiración potencial o de la infiltración, o de ambas, puede ser muy importante en la estimación de los volúmenes de escurrimiento,

Con estos criterios se llega a la valoración de los elementos que intervienen en la operación conjunta de la cuenca, sea por cuantificación directa o indirecta, derivadas ambas del análisis geomorfológico o ecológico, que definen el comportamiento de la dinámica del agua en el medio natural y, por tanto, la del sistema fluvial de la cuenca.

3. SINOPSIS METEOROLOGICA

Del análisis de los climogramas (ver gráficas Nos. 1, 2, y 3) elaborados para las estaciones situadas dentro de la cuenca, se pueden deducir las siguientes características que presenta la dinámica atmosférica en el año:

3.1 *Circulación de verano*

Durante el verano, la influencia del centro anticiclónico denominado Bermudas-Azores determina la circulación superficial y profunda de los vientos del este (alisios), de fuerte intensidad y amplitud, que penetran al país como masas frías y húmedas; en los climogramas se observa que esta circulación se inicia en la cuenca desde el mes de abril y se manifiesta por una reducción térmica y un aumento de la precipitación, fenómenos que se acentúan plenamente en los meses de junio, julio y agosto.

Parece ser que la Sierra de Guadalupe, situada frente a la cuenca, forma una barrera climática que dificulta el paso del aire húmedo superficial de la estación y, por esto, en la parte baja de ella las precipitaciones terminan en julio, en tanto que en las partes media y superior de la misma (desde los 2 750 metros sobre el nivel del mar), la penetración de aire de altura permite que el periodo se retarde hasta el mes de agosto.

Por otra parte, la orientación de la cuenca, en sentido suroeste-noreste, la hace poco favorable a la penetración de los vientos

ciclónicos de fines del verano y principios del otoño (agosto-septiembre-octubre), por lo cual la humedad que este tipo de circulación deja en el área es mínima.

3.2 *Circulación de invierno*

A principios del otoño se inicia progresivamente, en la Sierra de las Cruces, el predominio de la circulación de los vientos del oeste, que causan las primeras heladas en la cuenca. Ya en el invierno se presentan las invasiones de aire frío y polar que provocan fuertes descensos térmicos que son más importantes en las partes altas de la cuenca donde, incluso, con frecuencia se producen nevadas.

Hacia el mes de abril la circulación invernal empieza a disminuir al alcanzar, en el continente, tal grado de caldeamiento que permite que el gradiente de presión meridional del nivel medio de la troposfera se debilite y los vientos del oeste pierdan intensidad, al mismo tiempo que el anticiclón Bermudas-Azores se desplaza nuevamente hacia el norte iniciando, con ello, el dominio progresivo de los alisios que dominarán la siguiente mitad húmeda del año.

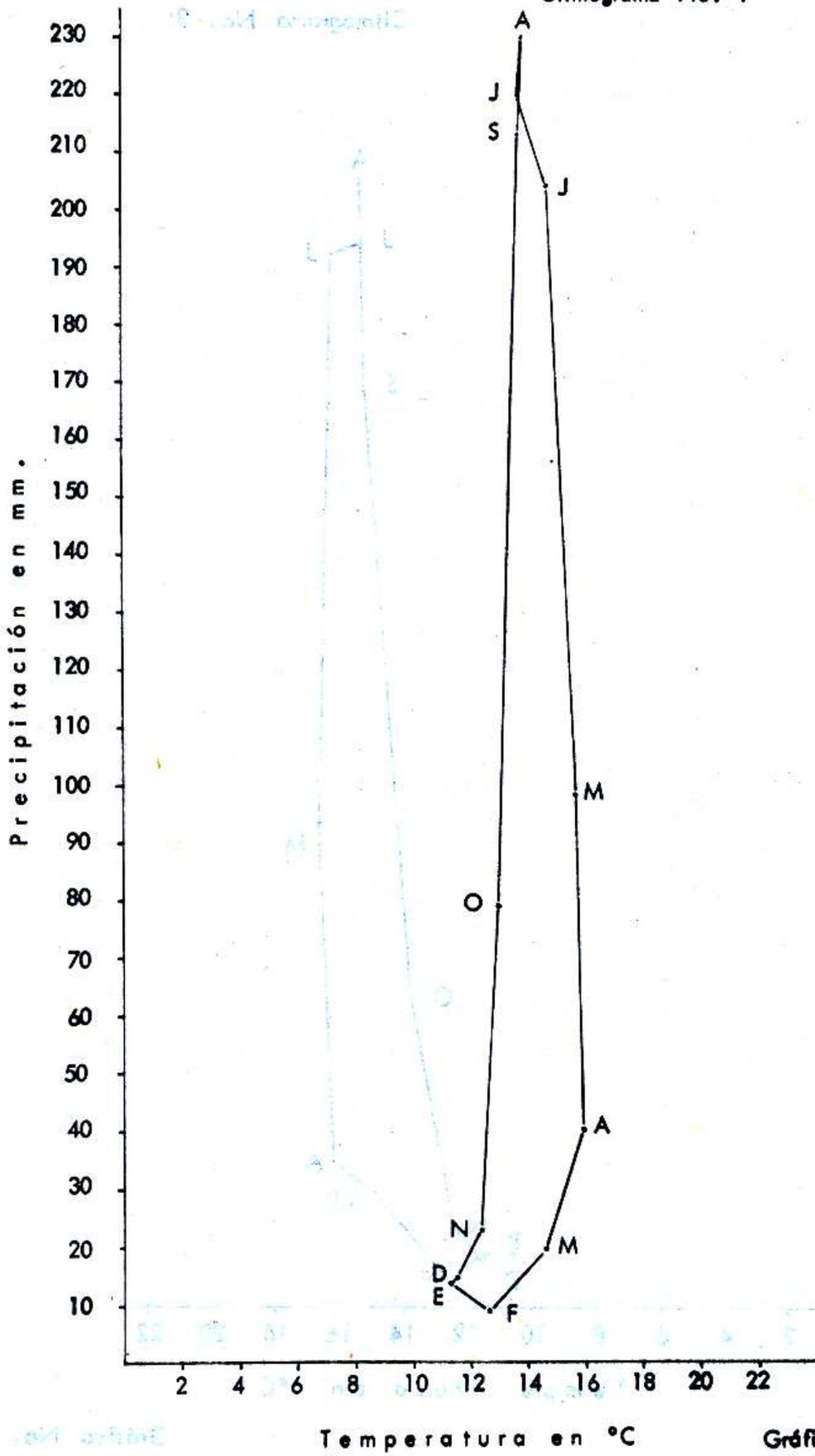
3.3 *Marcha anual de la temperatura*

La marcha de la temperatura media anual en las estaciones de la cuenca muestra, en general, dos máximos y dos mínimos, o sea una curva típica de regiones tropicales (ver gráficas 4, 5 y 6). Es necesario hacer hincapié en que el segundo máximo no es muy notorio, porque al ocurrir en plena época de lluvias, lo elevado de la humedad relativa hace que sea fuertemente amortiguado.

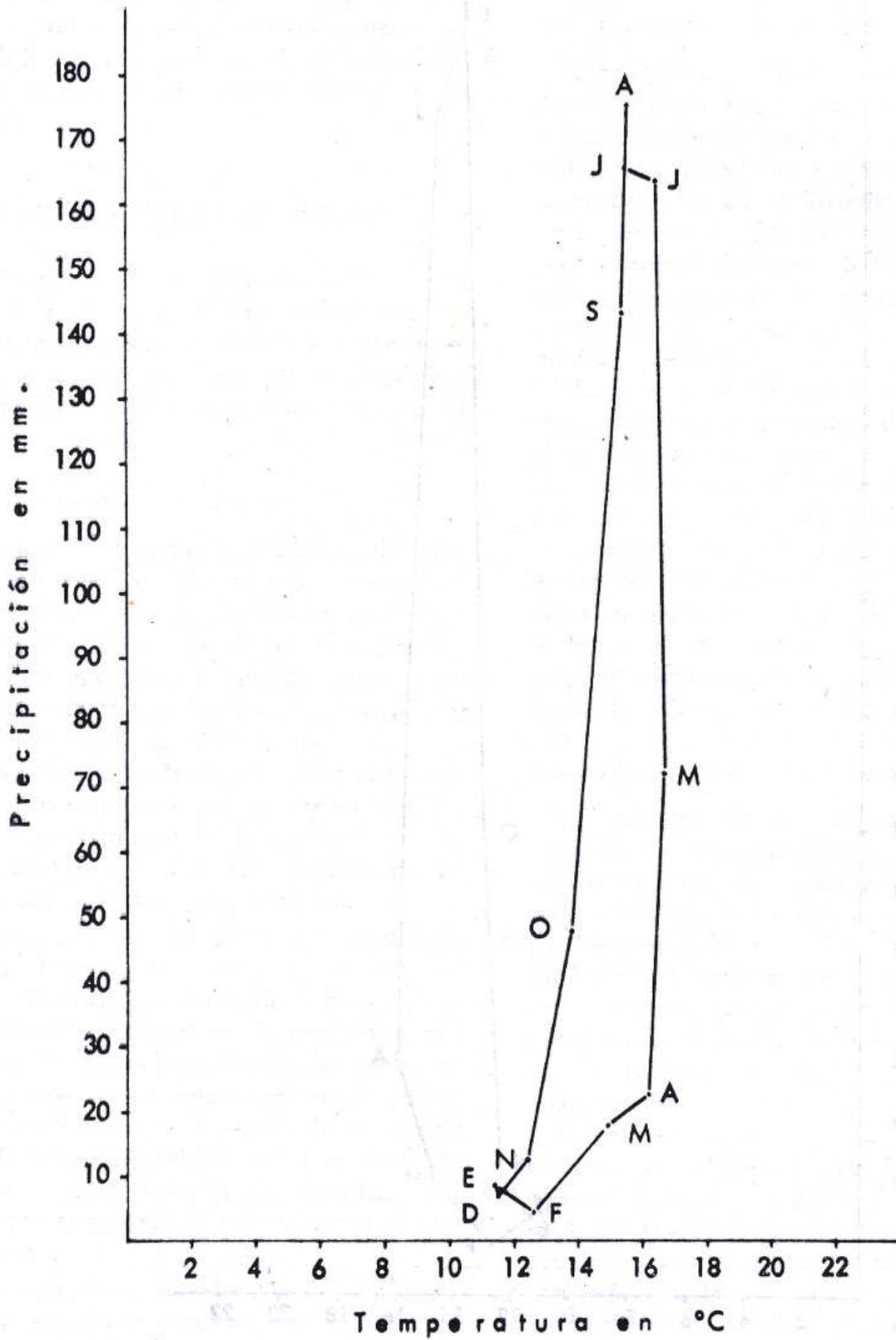
Respecto a la posición de los máximos térmicos, el primero y más importante se presenta a finales de mayo o principios de junio, y el segundo en agosto o septiembre, debidos ambos al retraso de la temperatura con respecto a la insolación. En cuanto a los mínimos térmicos, éstos ocurren principalmente durante la época invernal, en el mes

SAN LUIS AYUCÁN

Climograma No. 1



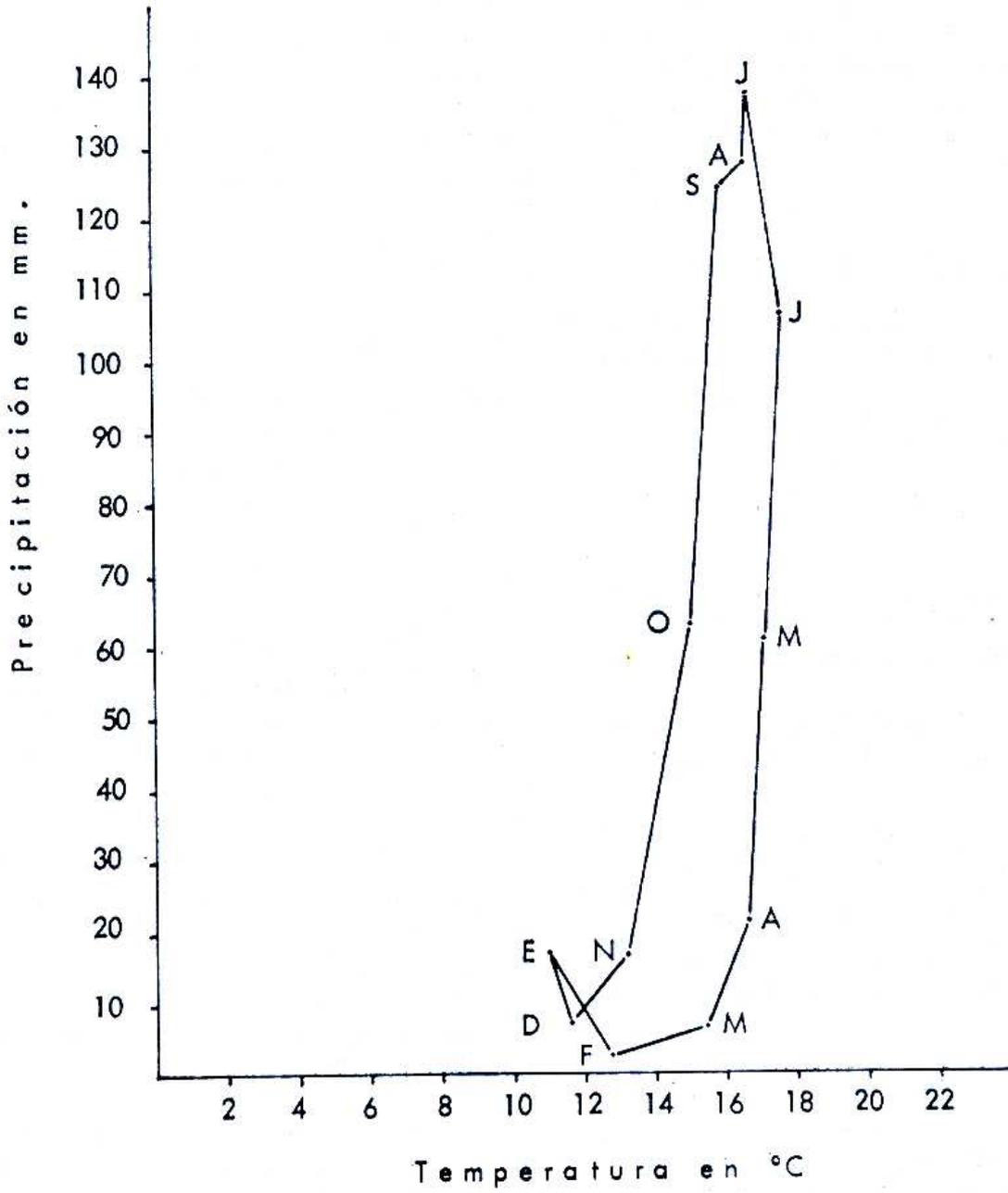
Climograma No. 2



Gráfica No. 2

MADIN

Climograma No. 3



Gráfica No. 3

de enero, cuando la insolación llega a su mínimo y dominan las masas de aire frío del oeste y las polares del norte; el segundo mínimo ocurre durante la estación húmeda, en el transcurso de julio, cuando penetran de lleno los vientos húmedos que provienen del mar y actúan como masas de aire frío en contraste con las cálidas y secas que se encuentran en la cuenca, determinando que la temperatura máxima alcanzada en junio decrezca en promedio 1° o 2°C.

Con todo, la oscilación térmica media de la cuenca es poco extremosa, entre 5° y 7°C, siendo en algunas partes isothermal, con menos de 5°C (ver tablas 1, 2 y 3).

3.4 Tipos y periodos de precipitación

El factor orográfico es determinante en la generación y distribución de la humedad y de las lluvias en la cuenca, por ello se encuentra una transición del régimen de humedad, de subhúmedo en la parte baja, a húmedo en la parte media y alta de la cuenca; en la parte baja se halla la isoyeta de 800 mm, aproximadamente a 2 500 msnm; hacia la parte media, la isoyeta de 1 000 mm se ubica sobre los 2 700 msnm y la de 1 200 mm, arriba de los 3 000 msnm.

La temporada de lluvia tiene su máximo durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre; en el transcurso del verano los alisios y las ondas del este causan la mayoría de las precipitaciones que son tanto de tipo orográfico como convectivo. En el caso de los primeros, el relieve constituye una barrera que los intercepta y obliga a subir, lo que produce en ellos turbulencias que provocan su enfriamiento adiabático, la saturación del aire y la formación de nubes de la familia de los cúmulos, sobre los flancos de las sierras, las cuales causan las precipitaciones más intensas en el área.

Las segundas, de tipo convectivo, son en su mayoría vespertinas y nocturnas, debido a que están condicionadas al movimiento advectivo y convectivo del aire que se inten-

sifica y produce sólo después de que el aire alcanza su caldeoamiento máximo, en las primeras horas de la tarde.

Los periodos de precipitación que se producen por los alisios, se inician desde mayo y son típicos en junio; durante el mes de julio la precipitación decrece, acentuándose la influencia de las ondas del este que se caracterizan por una alternancia de periodos secos y húmedos predominantes hasta agosto. Ambas situaciones producen fuertes aguaceros, chubascos, tormentas eléctricas y granizo. Es importante considerar aquí que, la dirección dominante del viento es del noreste y este, como típico de los alisios, y del sureste cuando existe influencia de las ondas del este.

3.5 Zonificación mesoclimática

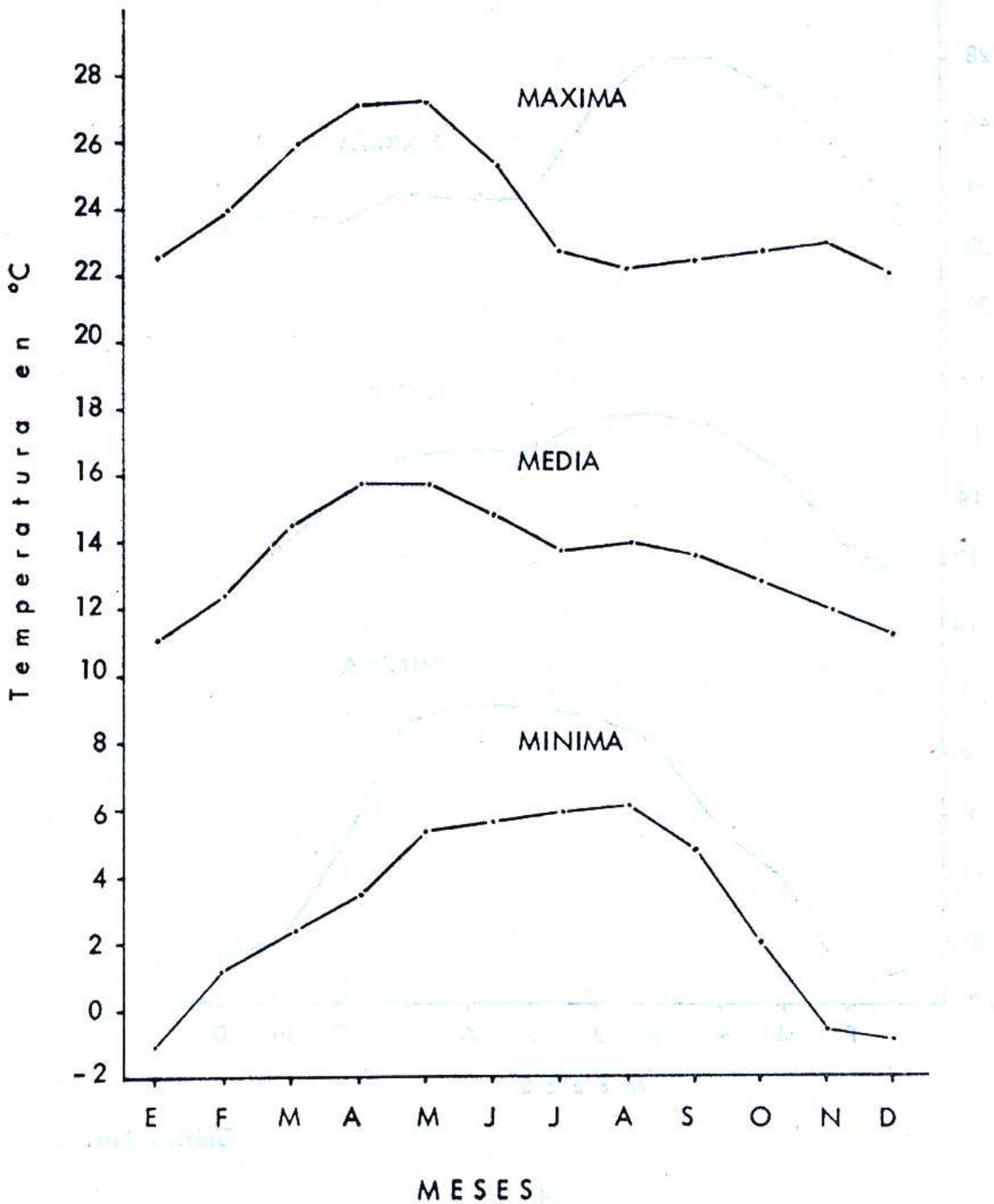
Para obtener una evaluación dinámica de los fenómenos que caracterizan el área, se hizo necesario definir el mesoclima de ésta deduciéndolo tanto de la interpretación de los valores climáticos como de la influencia que éstos determinan en el medio natural.

Para ello se establecieron diferentes pisos térmicos en función de la variación de la temperatura con la altura; se definió la circulación y dirección de los vientos y, de su relación con el relieve, se dedujeron los lugares típicos de asentamientos de masas de aire, de corredores de viento, de producción de inversiones térmicas y los procesos de heladas aunadas a ellas. Por último, se zonificaron y dedujeron los mesoclimas integrando areal y espacialmente las condiciones operativas de la temperatura, humedad y cantidad de precipitación anual. Del continuo transicional de los valores climáticos se ubicaron los límites de cada mesoclima, de acuerdo con las transiciones morfoclimáticas o bioclimáticas mostradas en el medio natural. De acuerdo con ello se obtuvo la siguiente zonificación (ver mapa No. 2 y gráficas Nos. 7, 8, 9, 10, 11 y 12):

SAN LUIS AYUCAN

3 2 1 1 2 1 1

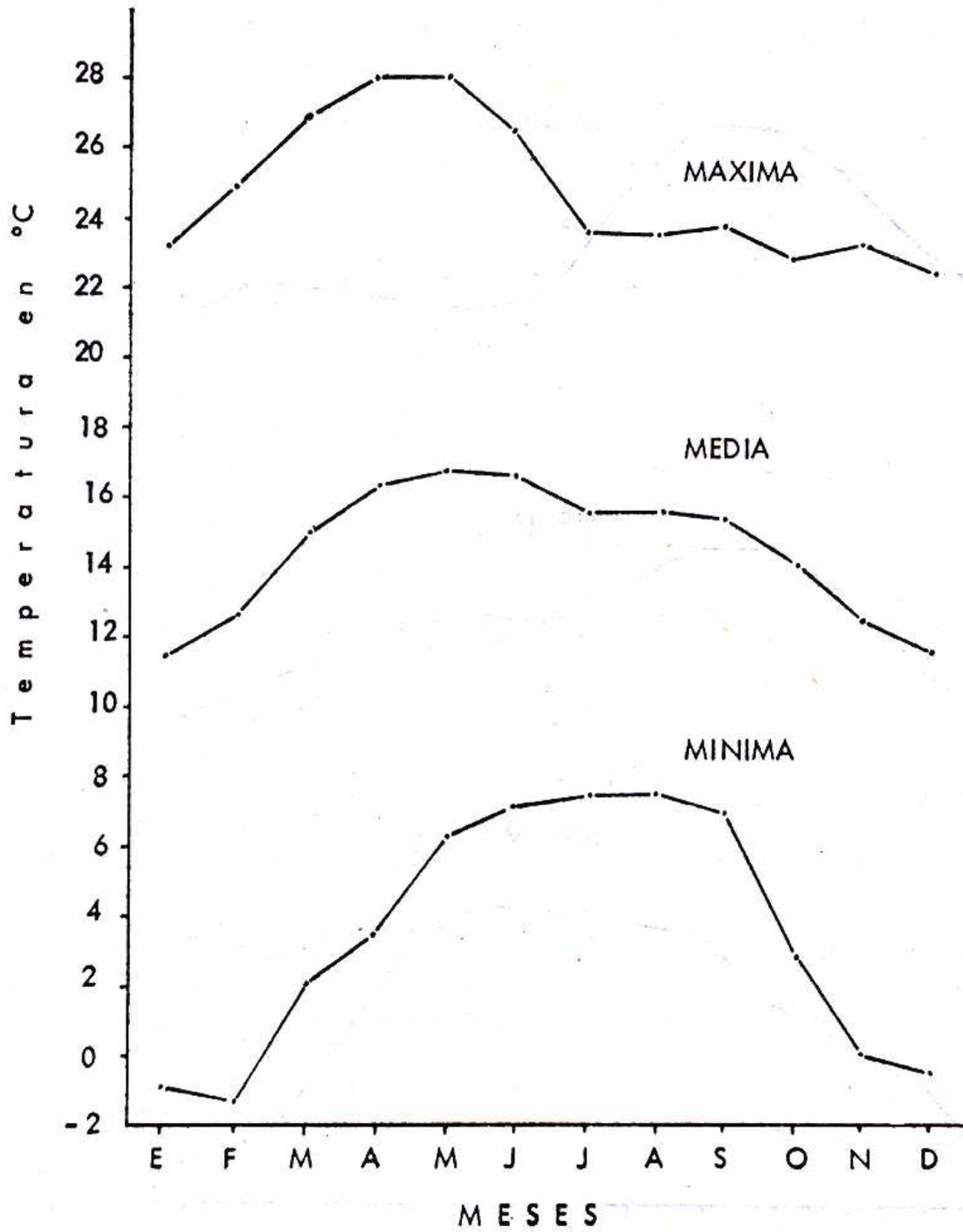
Termograma



Gráfica No. 4

EL SALITRE

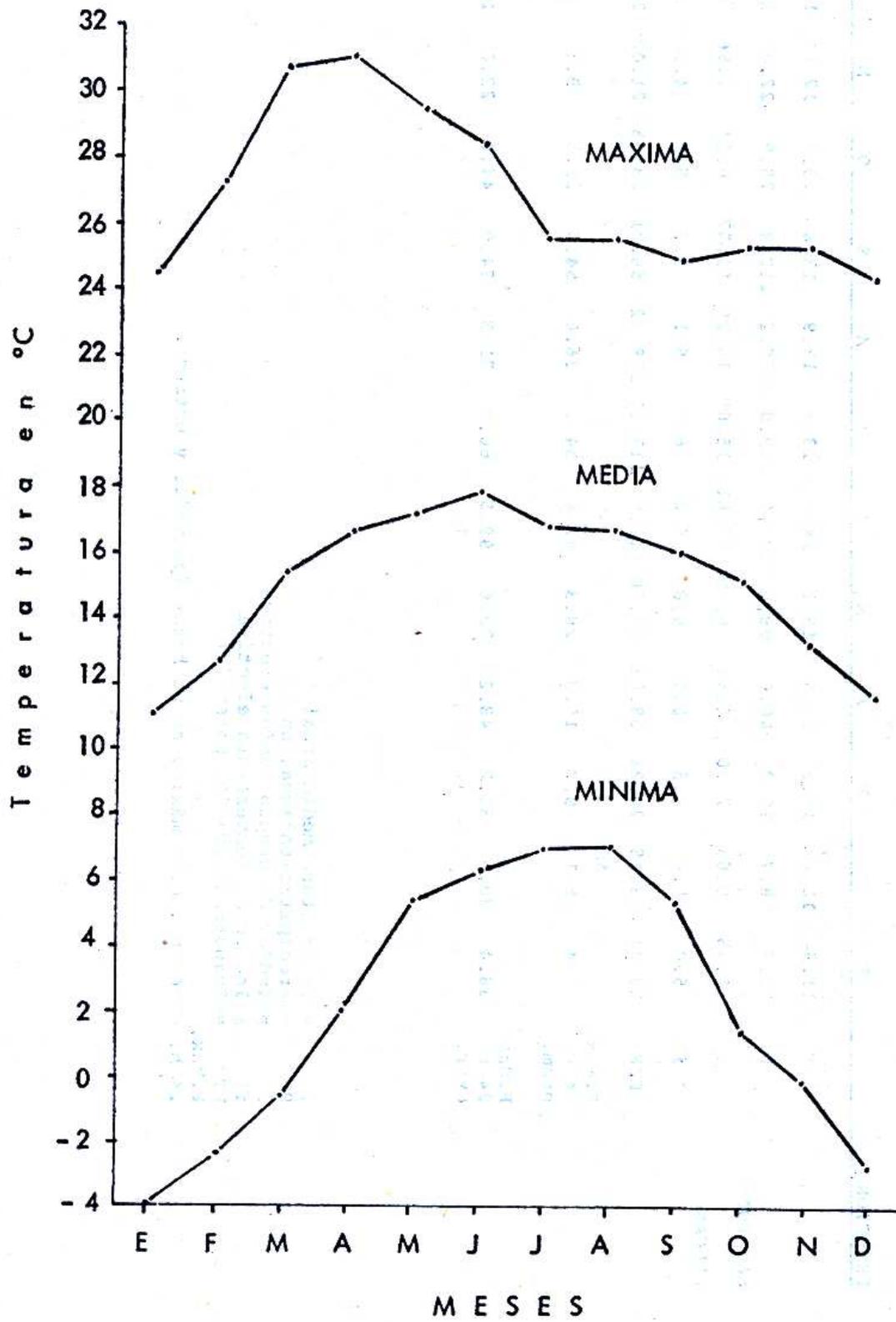
Termograma



Gráfica No. 5

M A D I N

Termograma



Gráfica No. 6

TABLA No. 1
Resumen de los datos climáticos de la Cuenca

ESTACION	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANUAL
SAN LUIS													
T	11.3	12.6	14.6	15.9	15.7	14.8	13.8	13.9	13.8	13.0	12.4	11.5	13.6
P	13.6	8.7	19.2	40.0	98.0	204.0	219.9	230.2	212.8	78.9	22.9	14.2	1162.4
i	1.05	0.63	2.30	2.64	6.49	13.81	15.65	16.25	15.57	6.04	1.86	1.18	82.47
i'	5.0	5.6	6.5	6.9	6.8	6.6	6.0	6.1	5.7	5.2	4.5	4.3	69.2
ETP	23.84	23.18	28.24	58.82	97.50	113.94	117.12	109.32	56.21	23.05	21.03	21.12	693.37
AYUCAN													
P.Max. 24 h. prom.	7.4	6.1	9.0	15.3	28.3	42.4	54.1	36.6	54.3	21.5	9.3	6.9	291.2
P.Max. 24 h. extr.	38.4	30.5	35.2	48.2	72.6	99.5	60.0	71.3	74.9	44.0	22.0	28.2	

T = Temperatura media anual
P = Precipitación anual en mm
i = Índice de precipitación efectiva
i' = Índice de temperatura efectiva
ETP = Evapotranspiración potencial
P.Max.
24 h. = Precipitación máxima en 24 horas (promedio y extrema)

TABLA No. 3

Resumen de los datos climáticos de la Cuenca

ESTACION	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANUAL
T	11.0	12.7	15.4	16.6	17.1	17.7	16.8	16.7	16.0	15.1	13.2	11.6	15.0
P	12.7	2.5	6.4	21.6	60.7	106.4	137.6	128.1	124.5	63.0	16.7	7.1	687.3
i	0.99	0.18	0.42	1.36	3.77	6.48	8.64	8.07	8.04	4.20	1.19	0.54	43.88
i'	4.9	5.7	6.9	7.4	7.6	7.9	7.5	7.5	7.2	6.7	5.9	5.2	80.95
ETP	24.60	38.43	69.25	93.41	127.68	134.26	136.98	128.73	102.42	88.81	58.25	37.10	1039.92
P.Max. 24 h.	3.8	1.6	4.6	10.0	21.2	26.2	31.4	24.6	30.5	18.8	8.6	3.3	184.6
Prom.	23.5	5.5	23.0	20.0	40.0	50.0	66.5	42.0	47.0	50.0	34.5	12.5	
P.Max. 24 h. extr.													

MADIN

- T = Temperatura media anual
- P = Precipitación anual en mm.
- i = Índice de precipitación efectiva
- i' = Índice de temperatura efectiva
- ETP = Evapotranspiración potencial
- P.Max. 24 h. = Precipitación máxima en 24 horas (promedio y extrema)

- I. Zona fresca semiseca (con seis meses de lluvia) (A-6)
- II. Zona semifría subhúmeda (con seis meses de lluvias) (B-6)
- III. Zona fría subhúmeda (con siete meses de lluvia) (C-7)
- IV. Zona fría húmeda (con siete meses de lluvia) (D-7)

I. Zona fresca semiseca (A-6)

Esta zona se encuentra localizada desde la parte baja de la cuenca, hasta una altitud de 2 500 msnm; la temperatura media predominante es de 15°C y las precipitaciones menores a 800 mm; la evapotranspiración potencial (ETP) está entre los 800 y 1000 mm, o sea un tercio mayor que la precipitación, por lo cual la zona se puede considerar como semiseca. Por ser una parte baja y rodeada de montañas que bajan encajonadas por los valles produciendo heladas débiles en esta zona.

II. Zona semifría subhúmeda (B-6)

Se localiza entre los 2 500 y los 2 750 msnm; su temperatura media está entre 14°C y 15°C y las precipitaciones entre 800 y 1 000 mm; la ETP es menor de 800 mm, lo que hace que la zona sea subhúmeda. En su parte superior se presentan lluvias orográficas y de tipo convectivo, con granizo y tormentas eléctricas esporádicas; aquí no se presentan heladas frecuentes debido a que el aire frío proveniente de las partes altas, por ser denso y pesado, no se estaciona en esta parte sino que continúa hasta la parte baja.

III. Zona fría subhúmeda (C-7)

Se localiza desde los 3 000 msnm hasta las cimas de la cuenca; su temperatura media es menor de 12°C, no obstante que las lluvias son superiores a los 1 200 mm y la ETP oscila entre 600 y 800 mm, la humedad relativa es menor que la encontrada para la zona que se localiza entre los 2 750

m y los 3 000 msnm (la zona fría húmeda D-7); esto se debe a que, en esta parte, se ha talado el bosque, lo que ocasiona que la zona pierda humedad al recibir mayor insolación y, por tanto, sea más seca que la que se encuentra inmediatamente abajo de ella. Las lluvias son de tipo orográfico, torrenciales y con fuertes granizadas.

IV. Zona fría húmeda (D-7)

Se localiza entre los 2 750 y los 3 000 msnm; la temperatura media varía entre 14° y 12°C y la precipitación es de 1 000 a 1 200 mm; la ETP es menor de 600 mm, por lo que la humedad relativa en esta zona se mantiene alta, ya que aquí el bosque está mejor conservado, lo que propicia que se mantenga más la humedad ambiental, a nivel mesoclimático.

Es necesario hacer notar que, en la parte alta de esta zona, en el límite con la zona fría subhúmeda, el mesoclima está sufriendo un cambio a frío subhúmedo, ocasionado por la tala intensiva del bosque que avanza en forma acelerada hacia la parte baja, lo que propicia la pérdida de gran parte de la cobertura vegetal que es la responsable de mantener la humedad ambiental y proteger el suelo de las lluvias torrenciales y de la insolación.

3.6 *Eficiencia de la precipitación o precipitación efectiva*

Para llegar a comprender los diversos grados de humedad que pueden existir en la cuenca, se tomó como base el índice propuesto por W. Thornthwaite¹, que calcula la humedad efectiva, partiendo de la precipitación y de la evaporación, por medio de la expresión P/E; pero como no en todas las estaciones se tiene el dato de evaporación, Thornthwaite trató de encontrar otra expresión equivalente en función de los da-

¹ Thornthwaite, C. S. "The climates of North-america, according to a new classification". *Geographical Review*, 21, 1931, pp. 633-655.

- I. Zona fresca semiseca (con seis meses de lluvia) (A-6)
- II. Zona semifría subhúmeda (con seis meses de lluvias) (B-6)
- III. Zona fría subhúmeda (con siete meses de lluvia) (C-7)
- IV. Zona fría húmeda (con siete meses de lluvia) (D-7)

I. Zona fresca semiseca (A-6)

Esta zona se encuentra localizada desde la parte baja de la cuenca, hasta una altitud de 2 500 msnm; la temperatura media predominante es de 15°C y las precipitaciones menores a 800 mm; la evapotranspiración potencial (ETP) está entre los 800 y 1000 mm, o sea un tercio mayor que la precipitación, por lo cual la zona se puede considerar como semiseca. Por ser una parte baja y rodeada de montañas que bajan encajonadas por los valles produciendo heladas débiles en esta zona.

II. Zona semifría subhúmeda (B-6)

Se localiza entre los 2 500 y los 2 750 msnm; su temperatura media está entre 14°C y 15°C y las precipitaciones entre 800 y 1 000 mm; la ETP es menor de 800 mm, lo que hace que la zona sea subhúmeda. En su parte superior se presentan lluvias orográficas y de tipo convectivo, con granizo y tormentas eléctricas esporádicas; aquí no se presentan heladas frecuentes debido a que el aire frío proveniente de las partes altas, por ser denso y pesado, no se estaciona en esta parte sino que continúa hasta la parte baja.

III. Zona fría subhúmeda (C-7)

Se localiza desde los 3 000 msnm hasta las cimas de la cuenca; su temperatura media es menor de 12°C, no obstante que las lluvias son superiores a los 1 200 mm y la ETP oscila entre 600 y 800 mm, la humedad relativa es menor que la encontrada para la zona que se localiza entre los 2 750

m y los 3 000 msnm (la zona fría húmeda D-7); esto se debe a que, en esta parte, se ha talado el bosque, lo que ocasiona que la zona pierda humedad al recibir mayor insolación y, por tanto, sea más seca que la que se encuentra inmediatamente abajo de ella. Las lluvias son de tipo orográfico, torrenciales y con fuertes granizadas.

IV. Zona fría húmeda (D-7)

Se localiza entre los 2 750 y los 3 000 msnm; la temperatura media varía entre 14° y 12°C y la precipitación es de 1 000 a 1 200 mm; la ETP es menor de 600 mm, por lo que la humedad relativa en esta zona se mantiene alta, ya que aquí el bosque está mejor conservado, lo que propicia que se mantenga más la humedad ambiental, a nivel mesoclimático.

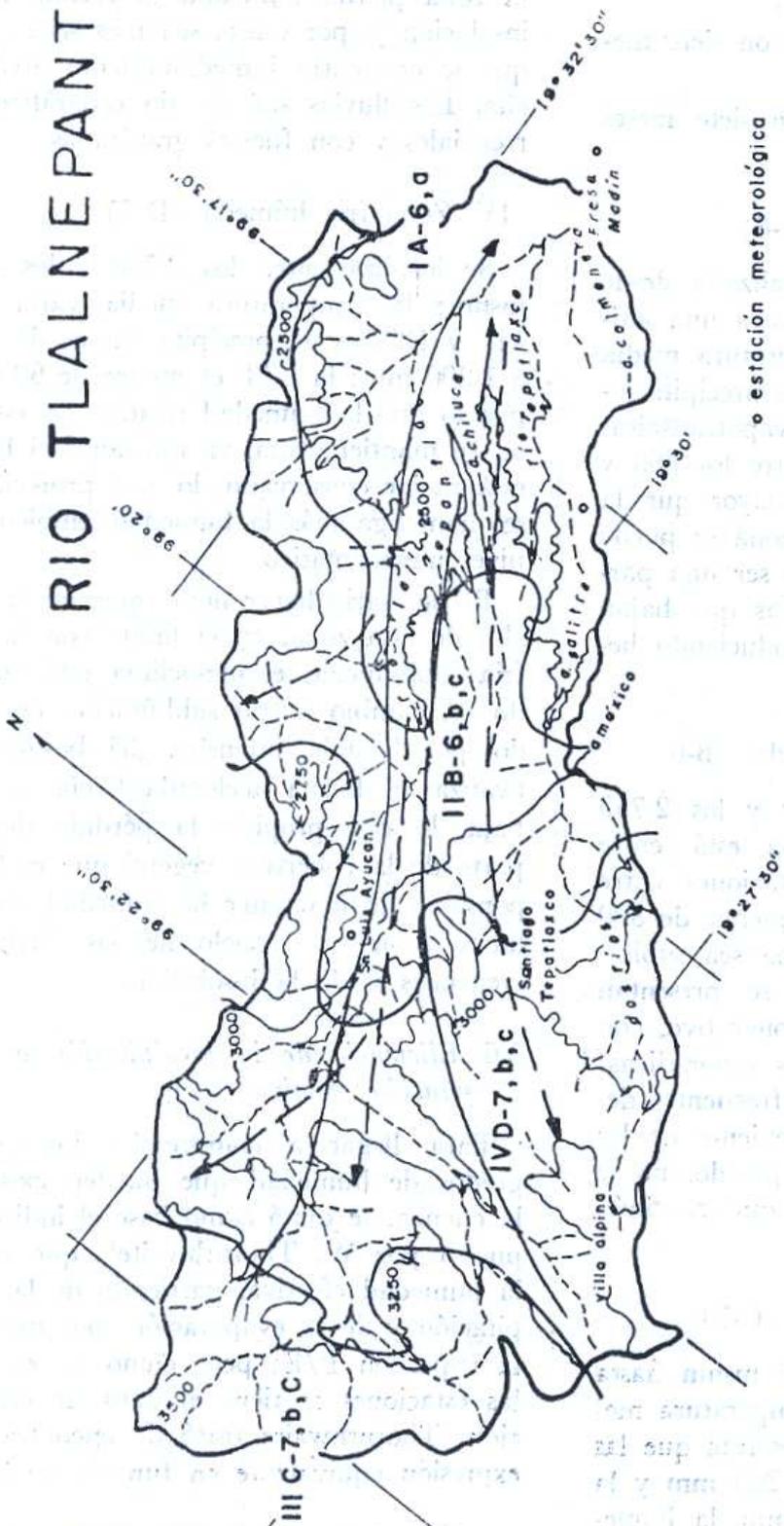
Es necesario hacer notar que, en la parte alta de esta zona, en el límite con la zona fría subhúmeda, el mesoclima está sufriendo un cambio a frío subhúmedo, ocasionado por la tala intensiva del bosque que avanza en forma acelerada hacia la parte baja, lo que propicia la pérdida de gran parte de la cobertura vegetal que es la responsable de mantener la humedad ambiental y proteger el suelo de las lluvias torrenciales y de la insolación.

3.6 Eficiencia de la precipitación o precipitación efectiva

Para llegar a comprender los diversos grados de humedad que pueden existir en la cuenca, se tomó como base el índice propuesto por W. Thornthwaite¹, que calcula la humedad efectiva, partiendo de la precipitación y de la evaporación, por medio de la expresión P/E; pero como no en todas las estaciones se tiene el dato de evaporación, Thornthwaite trató de encontrar otra expresión equivalente en función de los da-

¹ Thornthwaite, C. S. "The climates of North America, according to a new classification". *Geographical Review*, 21, 1931, pp. 633-655.

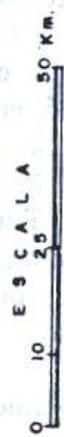
RIO TLALNEPANTLA



- ZONAS MESOCLIMATICAS**
- FRESCA SEMISECA IA-6, a
 - SEMIFRIA SUBHUMEDA IIB-6, b, c
 - FRIA HUMEDA IV D-7, b, c
 - FRIA SUBHUMEDA III C-7, b, c

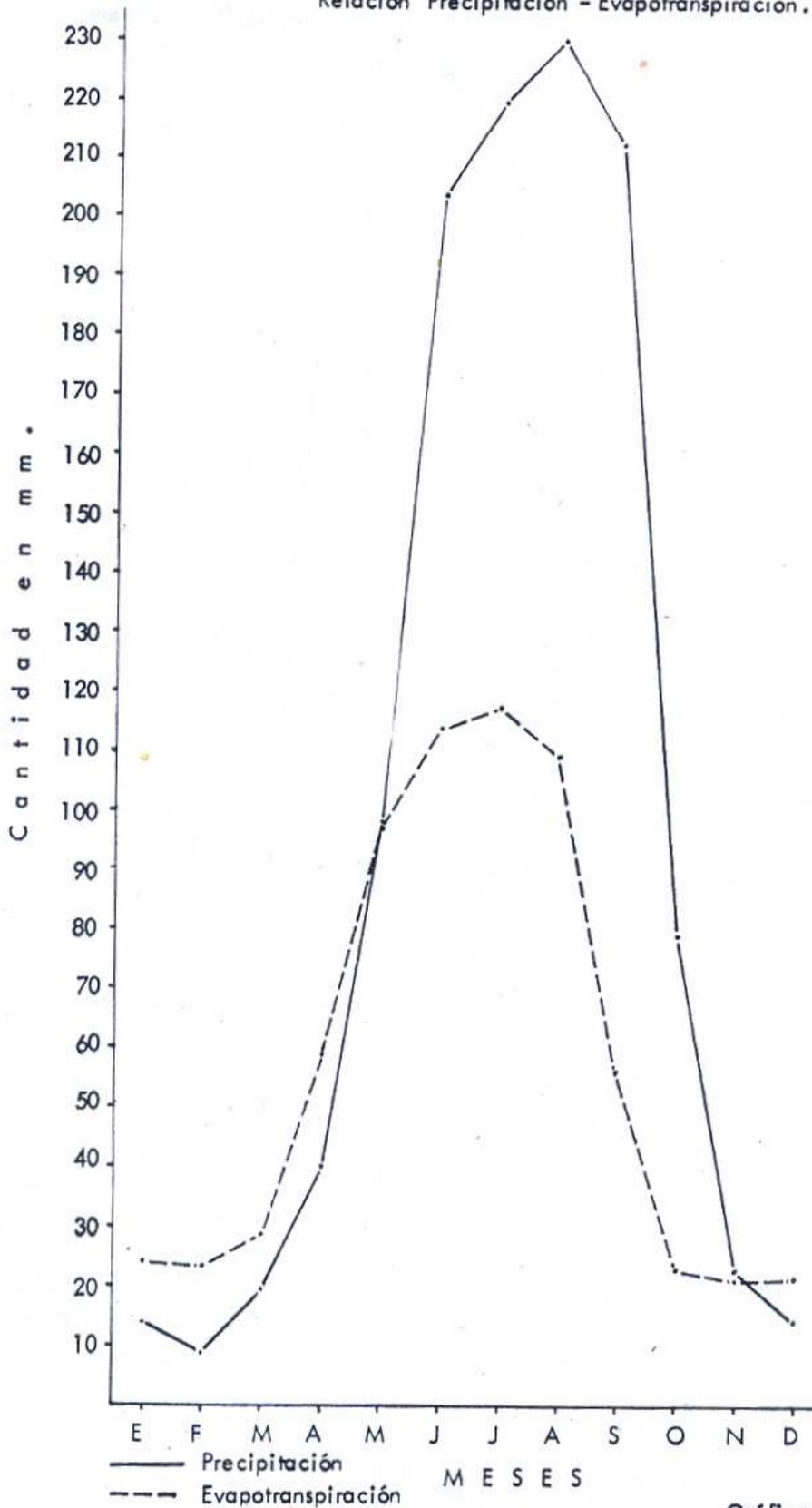
FENOMENOS SECUNDARIOS

- a. heladas débiles
- b. heladas intensas
- c. lluvias orográficas intensas con - granizo y tormenta eléctrica.
- viento nocturno \dashrightarrow
- viento diurno \dashleftarrow



o estación meteorológica

SAN LUIS AYUCAN
 Relación Precipitación - Evapotranspiración.

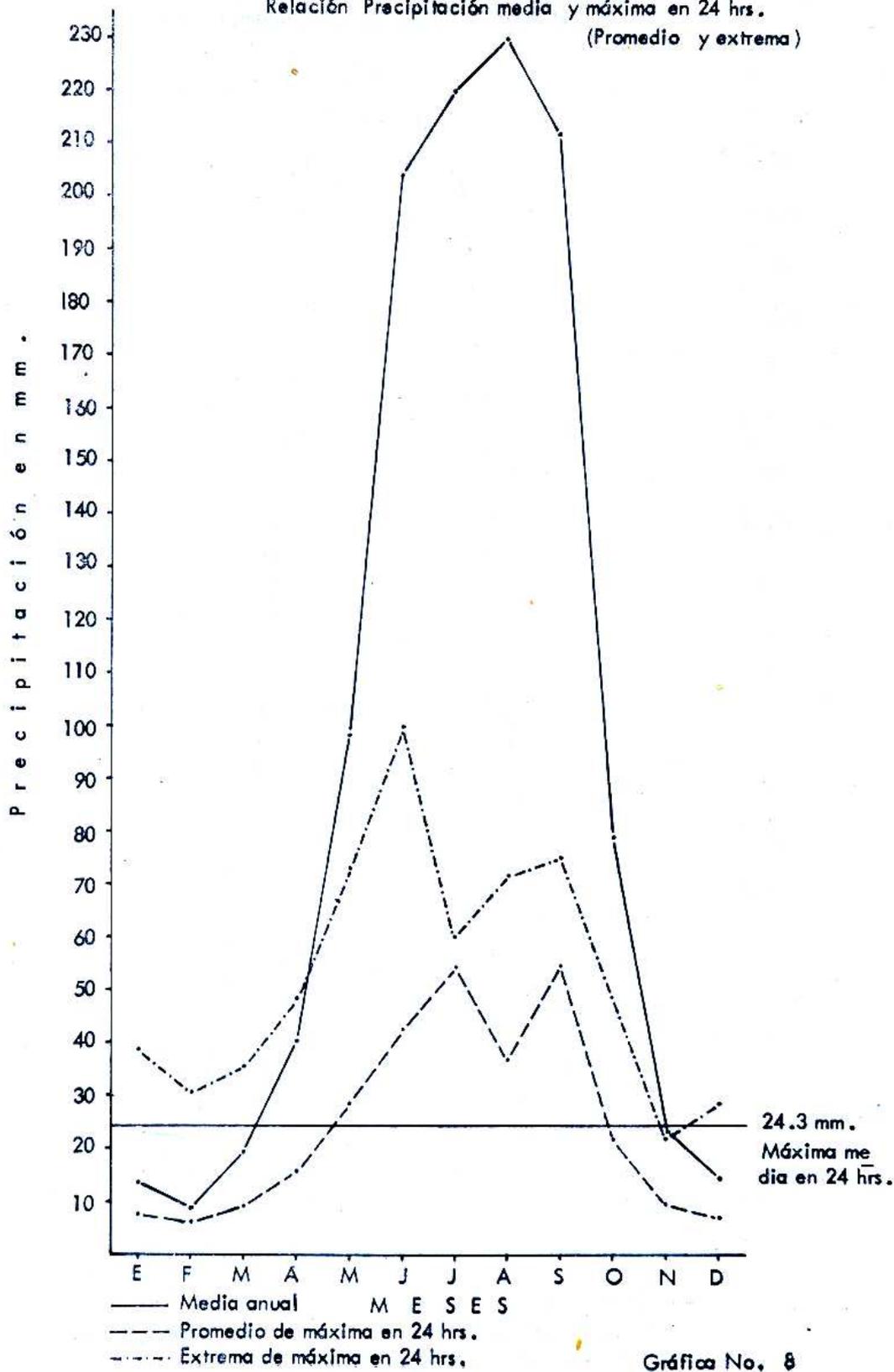


— Precipitación
 - - - Evapotranspiración
 Potencial calculada
 (Método de Blaney y Criddle)

Gráfica No. 7

SAN LUIS AYUCAN

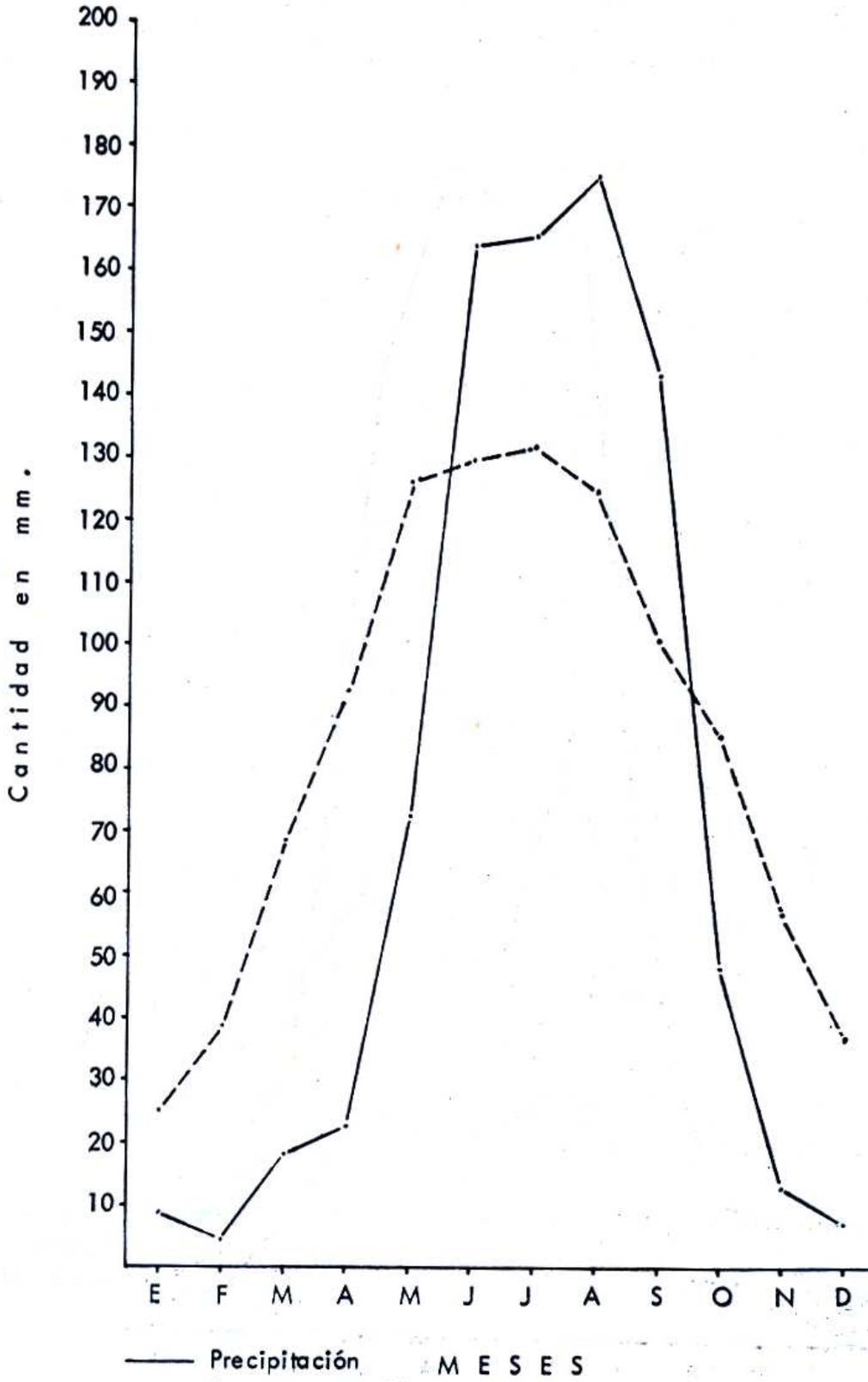
Relación Precipitación media y máxima en 24 hrs.
(Promedio y extrema)



Gráfica No. 8

E L S A L I T R E

Relación Precipitación - Evapotranspiración



— Precipitación M E S E S

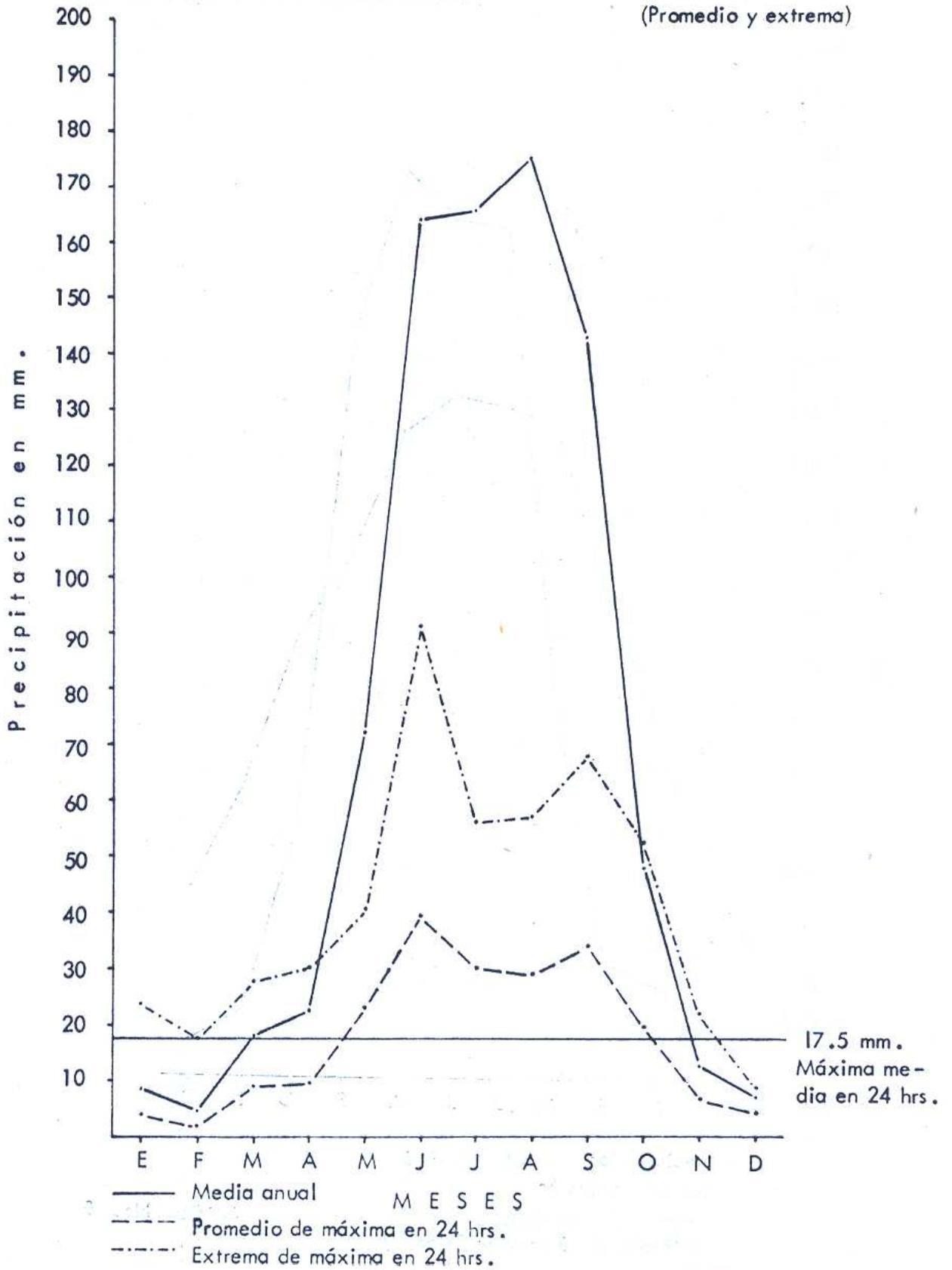
- - - Evapotranspiración

Potencial calculada
(Método de Blaney y Criddle)

Gráfica No. 9

EL SALITRE

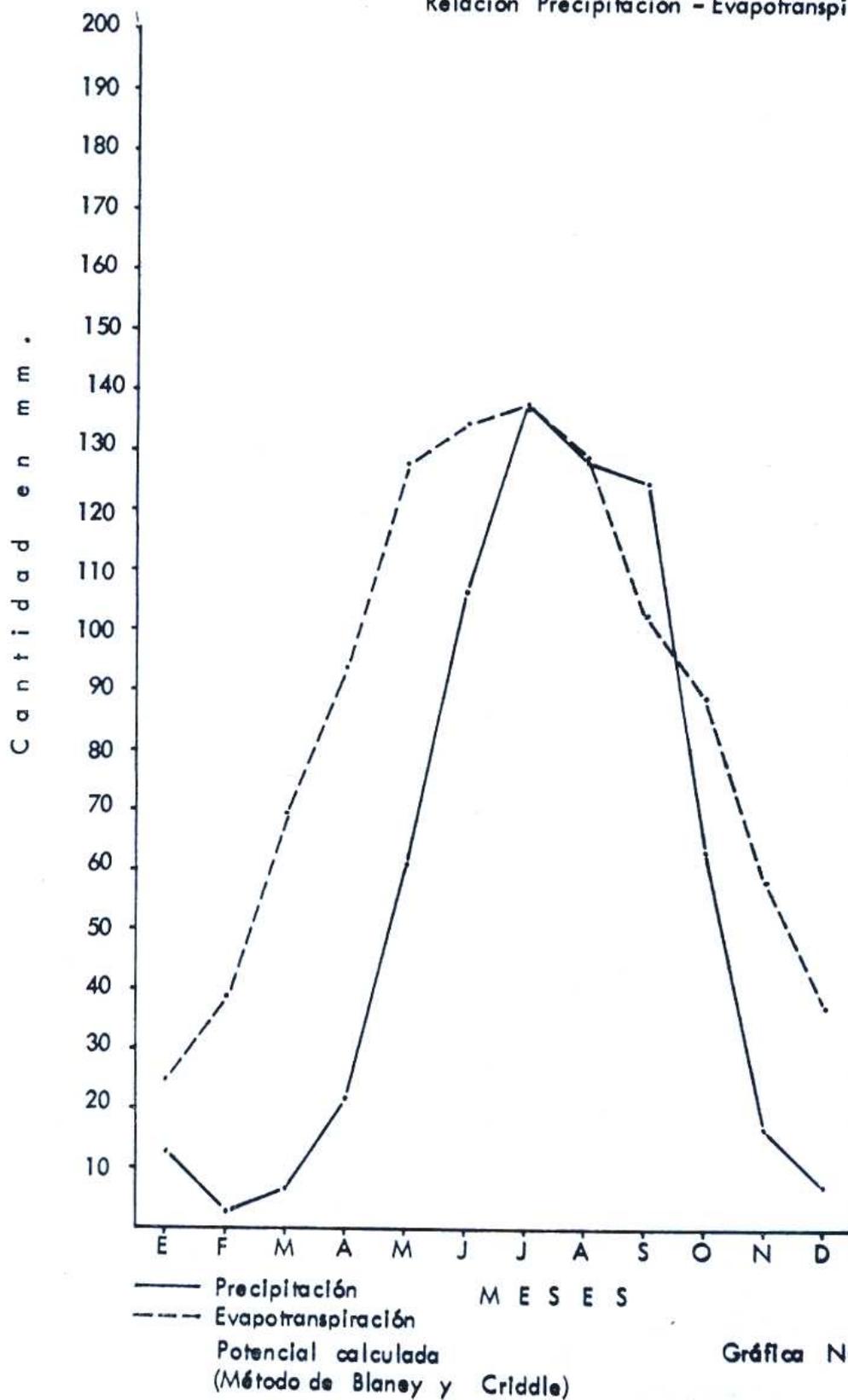
Relación Precipitación media y máxima en 24 hrs.
(Promedio y extrema)



Gráfica No. 10

M A D I N

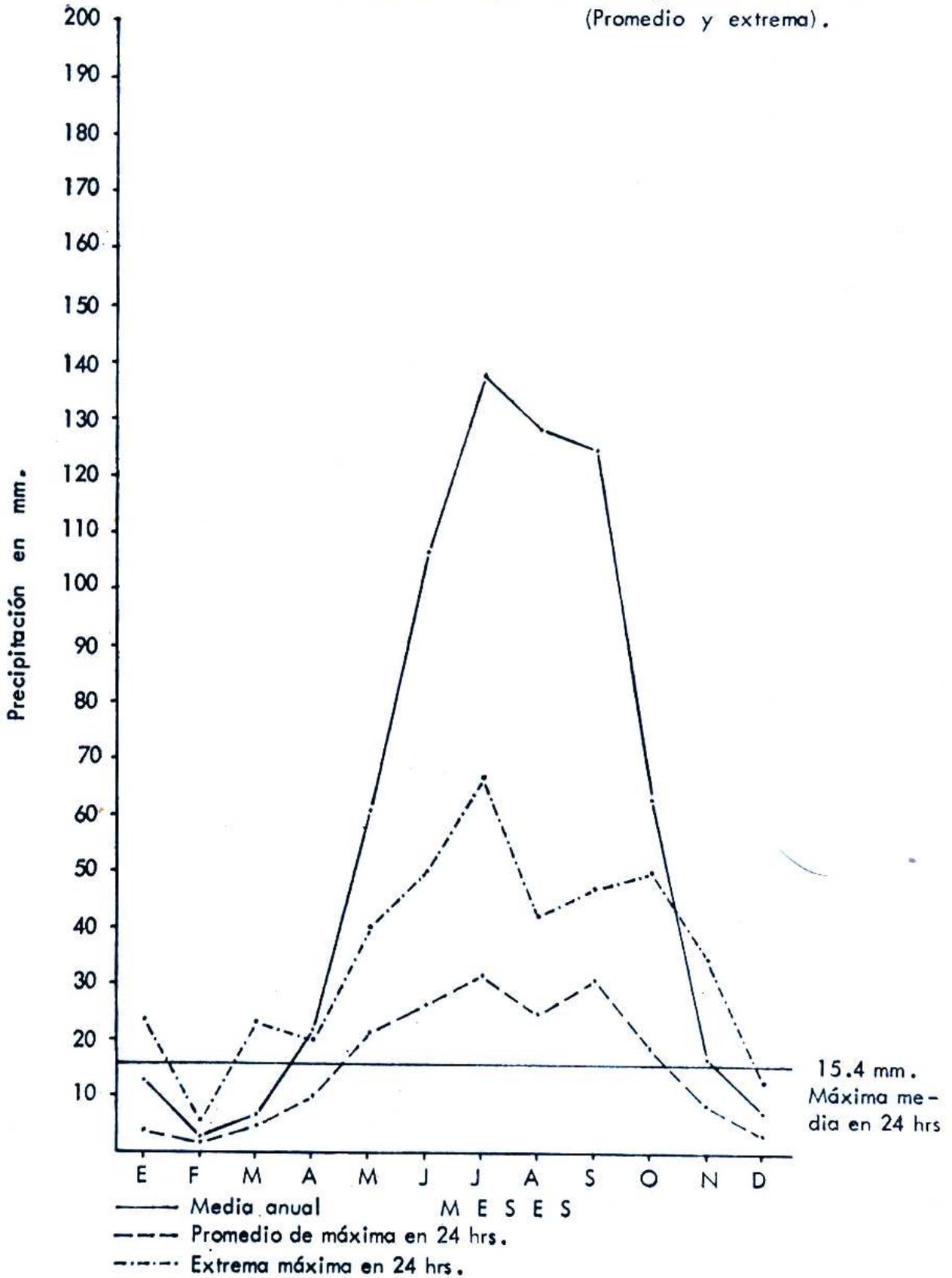
Relación Precipitación - Evapotranspiración



Gráfica No. 11

M A D I N

Relación Precipitación media y máxima en 24 hrs.
(Promedio y extrema).



Gráfica No. 12

tos de lluvia y de temperatura media, llegando a obtener la siguiente fórmula:

$$\sum_1^{12} i = \frac{P}{E} = 11.5 \left(\frac{P}{T-10} \right) \frac{10}{9}$$

Aplicando los datos a esta fórmula se tiene el valor mensual de i , y a la suma de los 12 valores se le denomina "índice de la efectividad de la precipitación".²

Respecto a la temperatura, y de manera empírica, Thornthwaite establece la fórmula siguiente para calcular lo que llama "índice mensual de la eficiencia de la temperatura", en tanto que a la suma de los 12 valores los denomina "índice de la eficiencia de la temperatura" (i').

$$\sum_1^{12} i' = \frac{T-32}{4}$$

El Ing. A. Contreras Arias,² adoptó este sistema para aplicarlo a la República Mexicana, obteniendo las siguientes categorías climáticas con respecto a:

H U M E D A D

Valor del índice i	Rango de humedad
128 o mayor	muy húmedo
64 a 127	húmedo
32 a 63	semiseco
16 a 31	seco
menor de 16	muy seco

Las fórmulas para calcular i e i' , según nuestras unidades, son:

$$\sum_1^{12} i = 1.64 \left(\frac{P}{t + 12.2} \right) \frac{10}{9} \text{ y } \sum_1^{12} i' = \frac{9t}{20}$$

donde:

P = precipitación mensual en mm.
 t = temperatura media mensual en °C

La suma anual de los valores del índice i (ver tablas Nos. 1, 2 y 3), nos indica el rango de humedad. Así, tenemos que, para las estaciones de "El Salitre" y "Madín", dicho rango es semiseco (entre 31 y 63), siendo para la primera de 55.8, lo que hace que sea un poco más húmeda que la segunda que tiene un índice i de 43.8, mientras que para la estación de San Luis Ayucan, por encontrarse a mayor altitud, su índice i es de 82.4, que la sitúa en el rango de húmedo (de 64 a 127). Esto es lógico si tomamos en cuenta que las primeras dos estaciones se localizan en la parte baja-me-

T E M P E R A T U R A*

Valor del índice i'	Rango de temperatura
128 o mayor	cálido
101 a 127	semicálido
80 a 100	templado
64 a 79	semifrío
32 a 63	frío
16 a 31	de taiga
1 a 15	de tundra

* Dicha tabla se modificó para adaptarla a las condiciones específicas de la zona, quedando como sigue:

128 o mayor	cálido
101 a 127	semicálido
31 a 100	templado
16 a 30	semifrío
1 a 15	frío

² Contreras, A. A. "Clasificación de climas". *Revista de Agricultura*, D.A.P.P. México, 1937.

día de la cuenca, donde llegan los vientos de superficie con poca humedad, con respecto a su capacidad de saturación. Estos vientos, al chocar con la sierra ascienden provocando una condensación y precipitación de la lluvia en las partes media y alta de la cuenca.

Analizando lo anterior, encontramos que la precipitación efectiva ocurre en los meses de junio a septiembre, cuando se presentan las mayores precipitaciones, a pesar de que la temperatura es mayor. Ahora bien, esta precipitación efectiva es más alta en la parte media y alta de la cuenca, debido a que, además de caer mayor cantidad de lluvia, ésta es retenida por las plantas y el suelo, ya que existe mayor cobertura vegetal y también menor temperatura en relación con la que se presenta en la parte baja media en donde, por ser mayores las temperaturas y menor la cantidad de agua que cae, la precipitación efectiva se reduce porque la evapotranspiración y la evaporación son mayores, y la cobertura vegetal casi no existe.

Respecto a la temperatura, los climogramas muestran un comportamiento de zonas templadas, encontrándose las tres estaciones dentro del rango térmico templado; mientras que los valores mensuales de i' (ver tablas Nos. 1, 2 y 3) van en aumento de los meses fríos a los cálidos, presentándose la eficiencia de la temperatura en los meses de abril-junio, cuando la región alcanza su máximo caldeoamiento antes de ser amortiguado por las precipitaciones.

En los climogramas (gráficas Nos. 13, 14 y 15), en los que se muestran las diferencias del valor de los índices i e i' , podemos observar que, mientras para la estación de San Luis Ayucan los meses de mayor eficiencia de la temperatura son de abril a junio, valores que decrecen más adelante por el aumento en las precipitaciones, para las estaciones El Salitre y Madín el ciclo se alarga más, siendo de abril a agosto y de abril a setiembre respectivamente. Es-

to se explica por el hecho de que, si bien las precipitaciones es presentan también en junio, su cantidad no es tan alta como para amortiguar el efecto de las temperaturas, y es por ello que también los datos de evapotranspiración potencial son más altos.

4. EL BALANCE HÍDRICO.

Para integrar el balance hídrico, o sea la determinación de la forma como se distribuye el agua, desde su entrada hasta su salida de la cuenca, fue necesario manejar en forma sistemática los valores de la evapotranspiración calculada, la infiltración y el escurrimiento, cuya suma total debe, en teoría, corresponder al valor de entrada de la precipitación (ver cuadros Nos. 1, 2 y 3).

4.1 *La relación ETP-Ev.*

Como sabemos, los datos de evaporación tienen la desventaja de sobreestimar los valores, por ello se presenta en toda la cuenca una evaporación media muy fuerte (1 305.9 mm), siendo mayor en la parte baja, donde la ausencia de vegetación aumenta aparentemente su valor, por el incremento de la velocidad y frecuencia del viento.

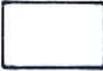
Por lo anterior, el valor de la evaporación obtenido no se tomó en cuenta en el balance hídrico. Por otro lado, en diversos trabajos realizados por algunos investigadores del área de geomorfología, del Instituto de Geografía de la UNAM³, se ha encontrado que los valores de evaporación superan en una tercera o dos terceras partes el valor de la precipitación total anual, en medios similares, por lo que pudiera esperarse que un valor de 679.2 mm de evaporación

³ Cervantes, B. J. y otros, "Análisis climático", en: *Estudio geomorfológico de la cuenca del río Alfajayucan*, Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación, S.R.H. México, D. F. 1972.

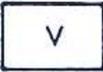
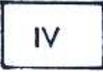
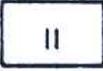
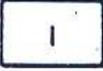
S I M B O L O G I A

De los índices i e i'

HUMEDAD

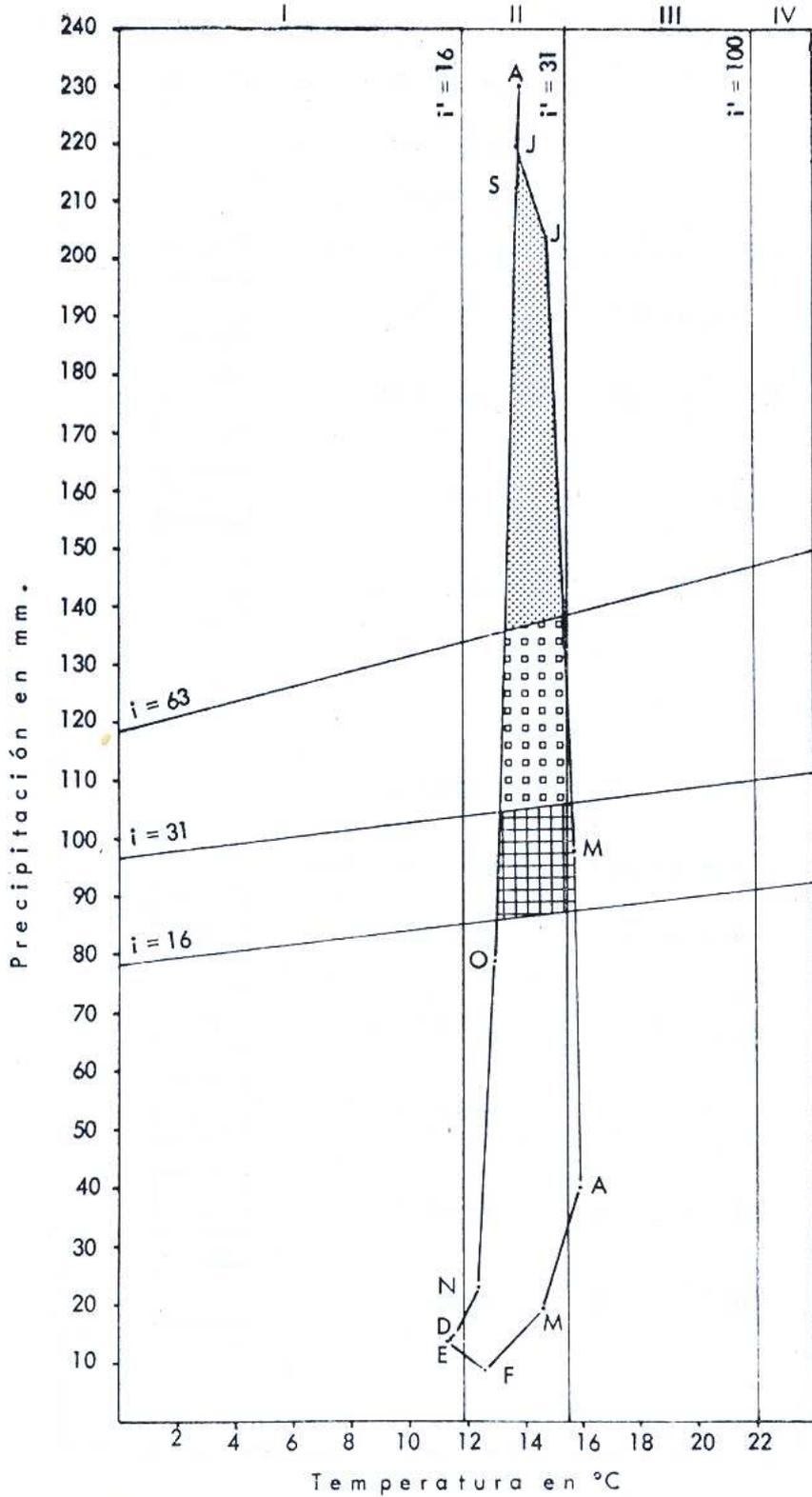
Valor de índice i	Rango de humedad	Símbolo
DE 64 A 127	HUMEDO	
DE 32 A 63	SEMISECO	
DE 16 A 31	SECO	
MENOR DE 16	MUY SECO	

TEMPERATURA

Valor del índice i'	Rango de temperatura	Símbolo
128 o mayor	CALIDO	
DE 101 a 127	SEMICALIDO	
DE 31 a 100	TEMPLADO	
DE 16 a 31	SEMIFRIO	
DE 1 a 15	FRIO	

S A N LUIS AYUCAN

Climograma No. 4

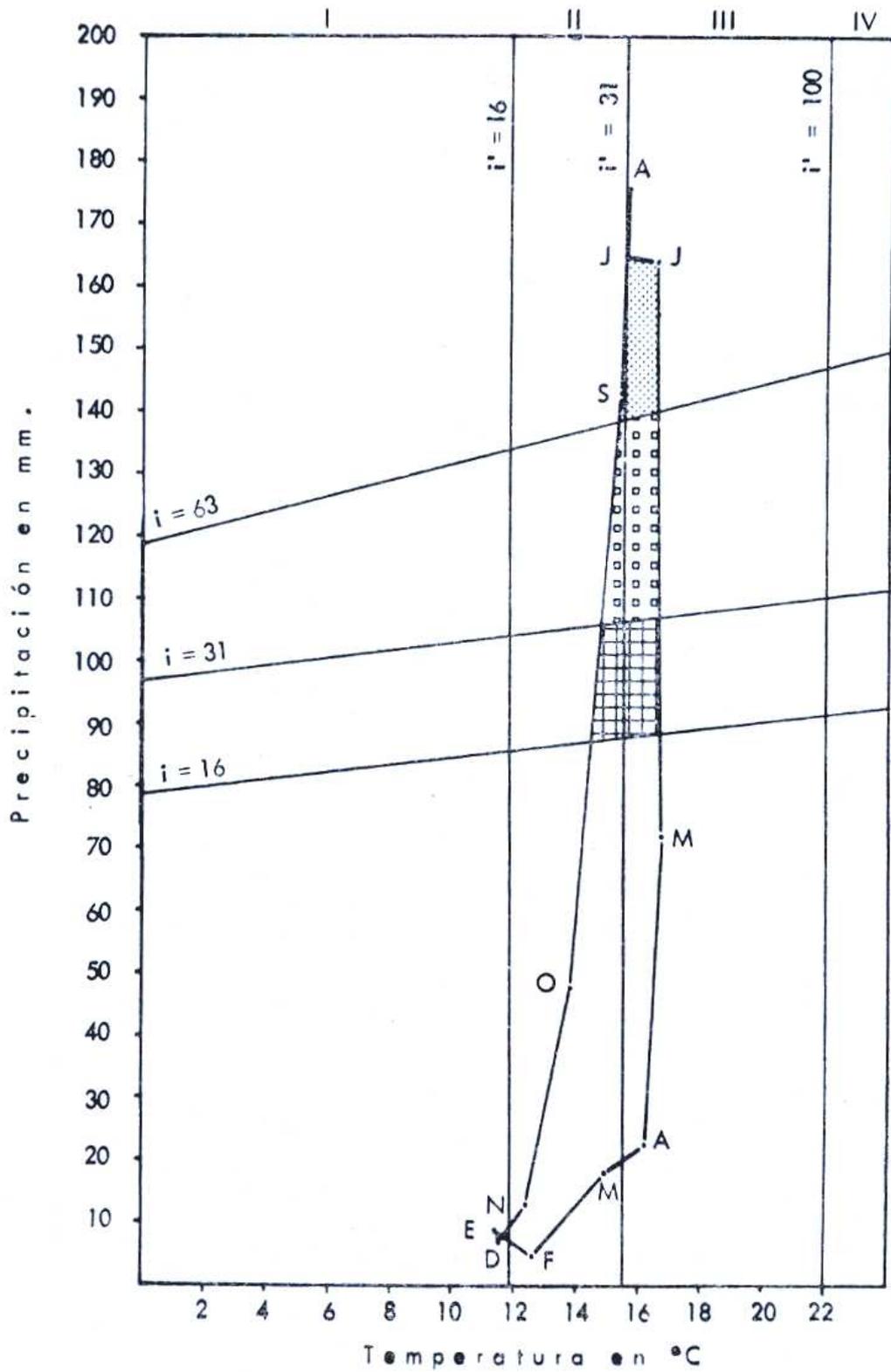


Representación gráfica de i e i'

Gráfica No. 13

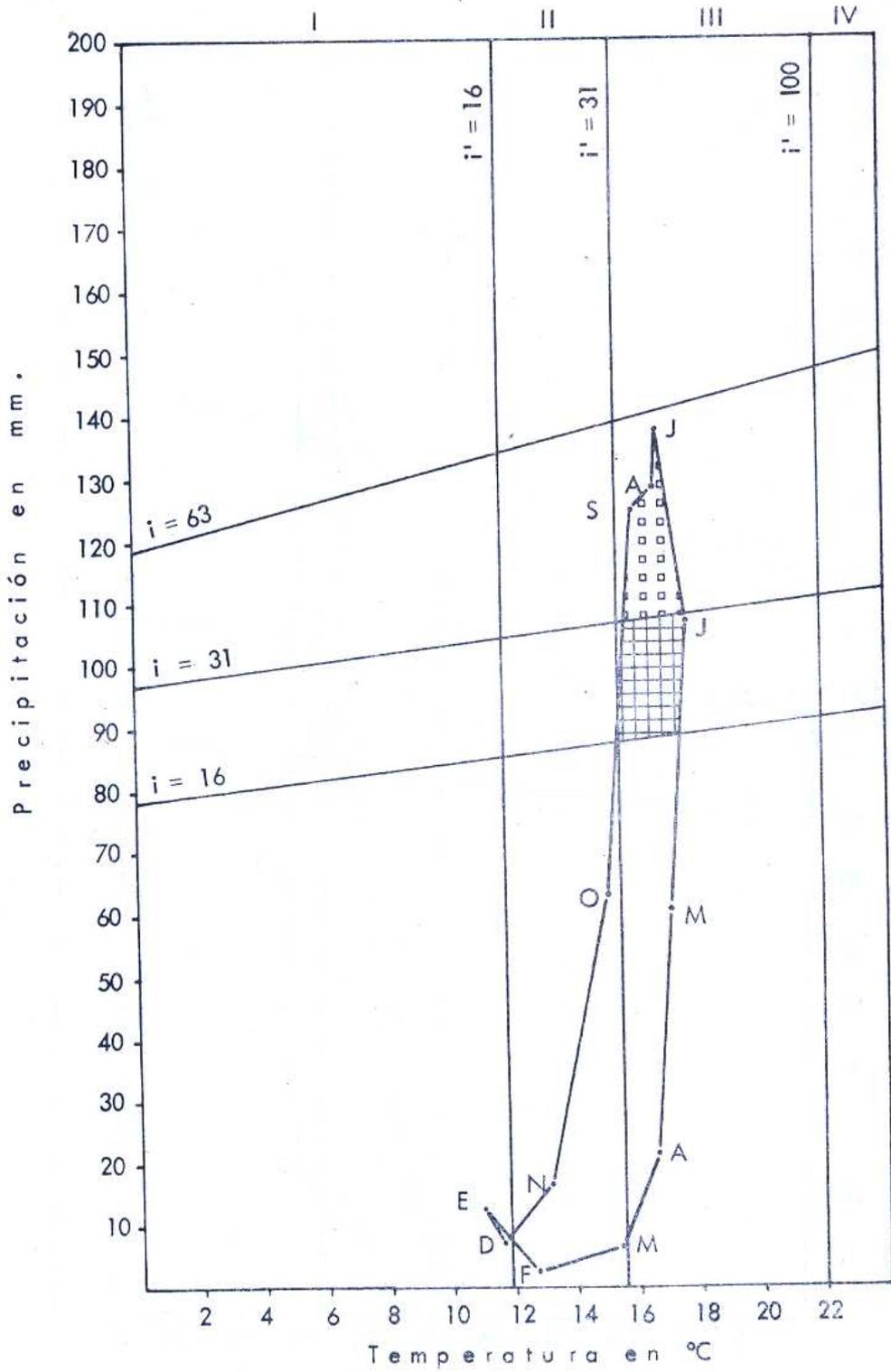
EL SALITRE

Climograma No. 5



Representación gráfica de i e i'

Gráfica No. 14



Representación gráfica de i e i'

Gráfica No. 15

CUADRO No. 1

VOLUMENES MENSUALES Y GASTOS MEDIOS DE LOS RIOS TLALNEPANTLA Y TEPATLAXCO

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
1.	0.47	0.39	0.39	0.40	0.53	0.73	1.22	1.03	1.79	1.10	0.70	0.53	0.76
2.	1241.3	1033.6	1035.9	1045.5	1395.2	1894.8	3183.5	2685.9	4643.7	2876.3	1816.1	1388.8	24,241.1
3.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.14	0.17	0.25	0.29	0.10	0.03	0.02	0.09
4.	51.1	34.9	27.3	27.1	116.7	366.2	443.0	650.0	752.5	274.0	98.9	66.1	2,915.8

(1 y 2 río Tlalnepantla; 3 y 4 río Tepatlaxco. Gasto en m³ por segundo y volúmenes en miles de m³).

CUADRO No. 2

DISTRIBUCION DEL ESCURRIMIENTO MEDIO POR SUBCUENCAS

Subcuencas	Area en Km ²	% del área total	Volumen precipitado miles de m ³	Volumen escurrido miles de m ³	% del escurrimiento con respecto a la precipitación
1. Río Tlalnepantla	75.93	78.8	77,783.2	24,241.18	31.1
2. Río Tepatlaxco	23.18	22.8	23,750.4	2,915.80	12.2
3. Río Colmenera	2.42	2.3	1,936.0	577.68	20.8
TOTAL	101.55		103,469.6	27,734.66	

CUADRO No. 3

Relación de áreas, precipitación, infiltración, escurrimiento y evapotranspiración, por subcuencas.

SUBCUENCAS	AREA DE LA CUENCA en Km ²	PRECIPITACION MEDIA ANUAL en mm (a+b+c)	INFILTRACION MEDIA ANUAL en mm. (a)	ESCURRIMIENTO MEDIO ANUAL en mm. (b)	EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL en mm. (c)
1. Río Tlalnepanitla	75.93	761.9	40.4	171.2	550.4
2. Río Tepatlaxco	23.18	232.7	12.3	52.2	168.1
3. Río Colmenea	2.42	24.3	1.3	5.4	17.6
	101.55	1018.9	54.0	228.8	736.1

(2/3 de la precipitación) sea lo más cercano a la realidad.

Por lo que toca a la evapotranspiración potencial, el valor medio calculado para ella, por el método de Blaney y Criddle, fue de 736.1 mm, que representa aproximadamente tres cuartas partes del valor total de la precipitación media y, por tanto, es significativo para el balance hídrico total.

Por ejemplo, para la parte baja de la cuenca la evapotranspiración potencial calculada es mayor un 60% (441.6 mm), ya que las temperaturas medias están sobre 15°C y los vientos fuertes y continuos provocan un cambio en las masas de aire secas; en cambio, en la parte media y alta los valores de la ETP disminuyen un 40% (294.4 mm) y son más concordantes con los de la precipitación y la temperatura. En efecto, esta última decrece con la altura, lo que ocasiona que la capacidad de evaporación del aire sea menor y, por tanto, se presenta menor ETP.

4.2 Infiltración

Respecto a la infiltración, por la falta de datos cuantitativos, se tuvo que deducir su valor medio por la diferencia de los valores del escurrimiento y de la evapotranspiración respecto del volumen total precipitado. El valor medio de infiltración obtenido es de 54.0 mm que se distribuye de la siguiente manera: en la parte alta de la cuenca es donde alcanza su mayor valor (entre 60% y 70% de la precipitación, de 32.4 a 37.8 mm), mientras que en el resto de la cuenca, toda vez que el material es más impermeable, se registran los valores mínimos: aproximadamente el 30% (16.2 mm) del total medio.

4.3 Escurrimiento

Por lo que respecta al escurrimiento, se puede observar que está dirigido por las

condiciones climáticas, ya que sus máximos se presentan durante los meses de julio, agosto y septiembre que corresponden al periodo estacional de precipitación del verano otoño (ver gráficas 16, 17, 18 y 19). Durante el resto del año el escurrimiento decrece en forma notable y su alimentación se basa en el volumen surgente de manantiales o, bien, en precipitaciones aisladas propiciadas por perturbaciones de la atmósfera superior, que pueden provocar un flujo mínimo que ocurre desde las partes superiores de la cuenca.

Por último, éste se distribuye espacialmente como sigue: el 60% del escurrimiento total, equivalente a 137.3 mm, cae en las partes alta y media de la cuenca, mientras que el restante 40%, equivalente a 91.5 mm, se distribuye desde la parte media hasta la baja.

Resumiendo lo anteriormente expresado, vemos que los valores más altos de precipitación, escurrimiento e infiltración se encuentran en la parte media y alta de la cuenca donde, por las características del relieve, del suelo y de la vegetación, existen condiciones favorables para ello; mientras que en las partes media y baja estos valores se reducen; no así los de evaporación y evapotranspiración potencial, que son máximos por las condiciones físicas degradadas del área que favorecen mayor capacidad de evaporación por la mayor temperatura y velocidad que adquieren los vientos.

Así, de la cantidad total precipitada, su distribución se realiza con los valores siguientes:

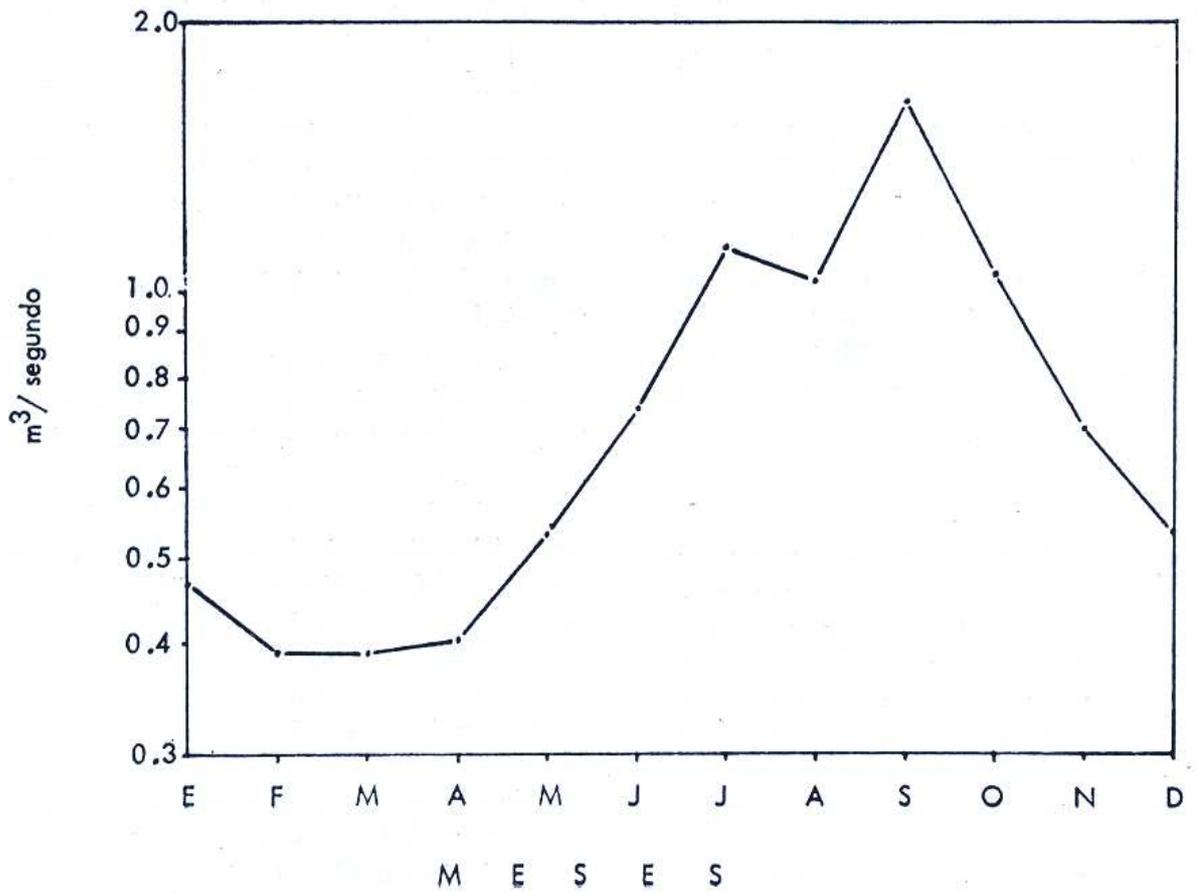
a) Evapotranspiración potencial	736.1 mm
b) Infiltración	54.0 mm
c) Escurrimiento	228.8 mm
Suma	1018.9 mm

que corresponden al valor de la precipitación en la cuenca.

RIO TLALNEPANTLA

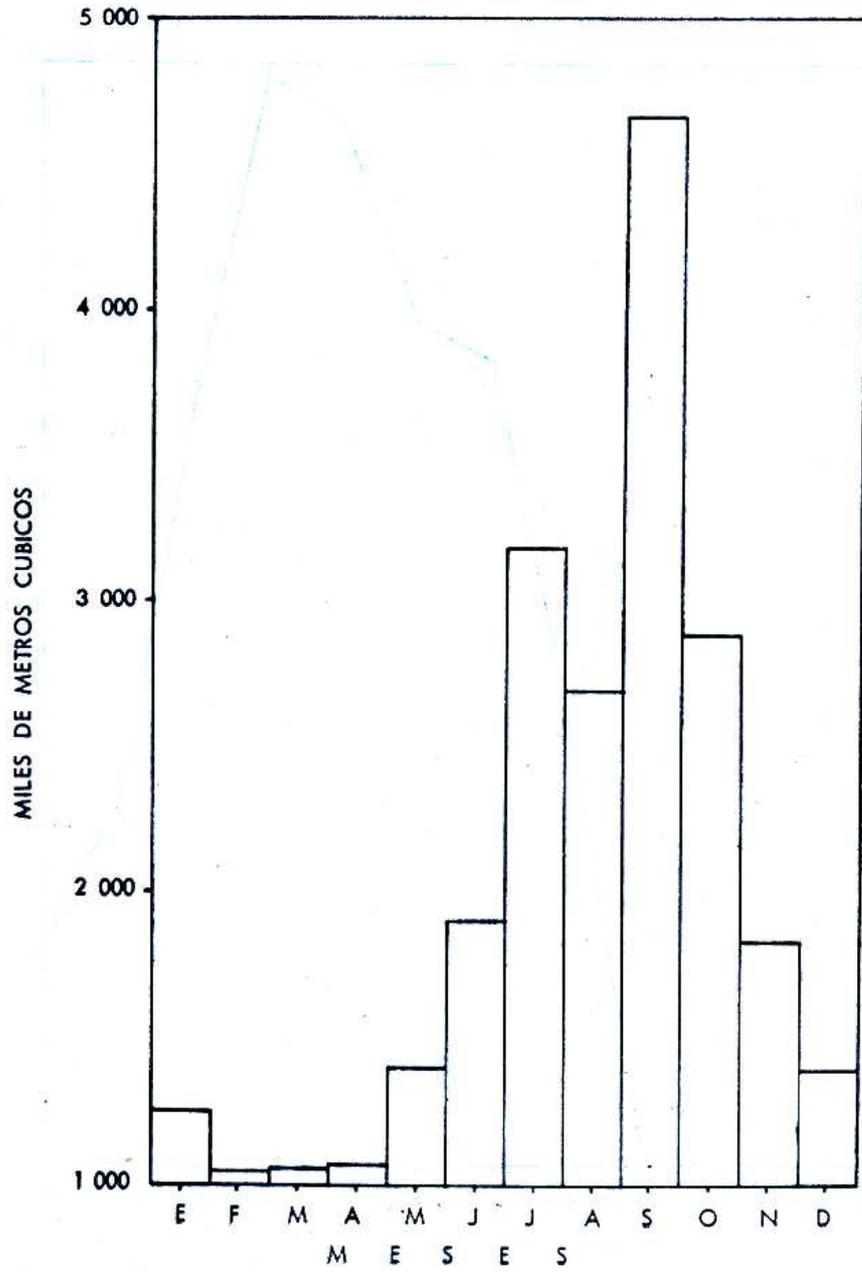
GASTO MEDIO MENSUAL

Período 1947 - 1958



Gráfica No. 16

RIO TLALNEPANTLA
GASTO MEDIO MENSUAL
Período 1947 - 1958

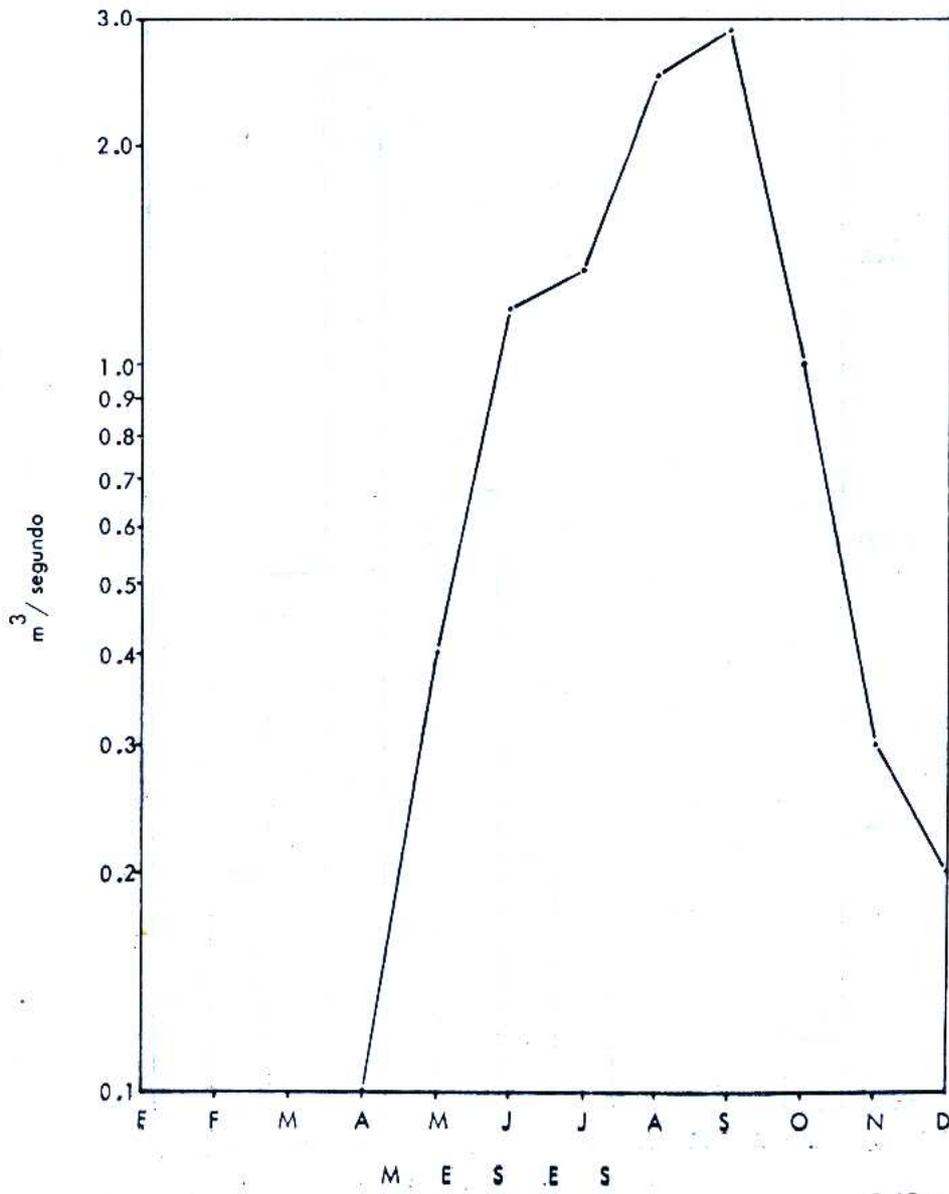


Gráfica No. 17

RIO TEPATLAXCO

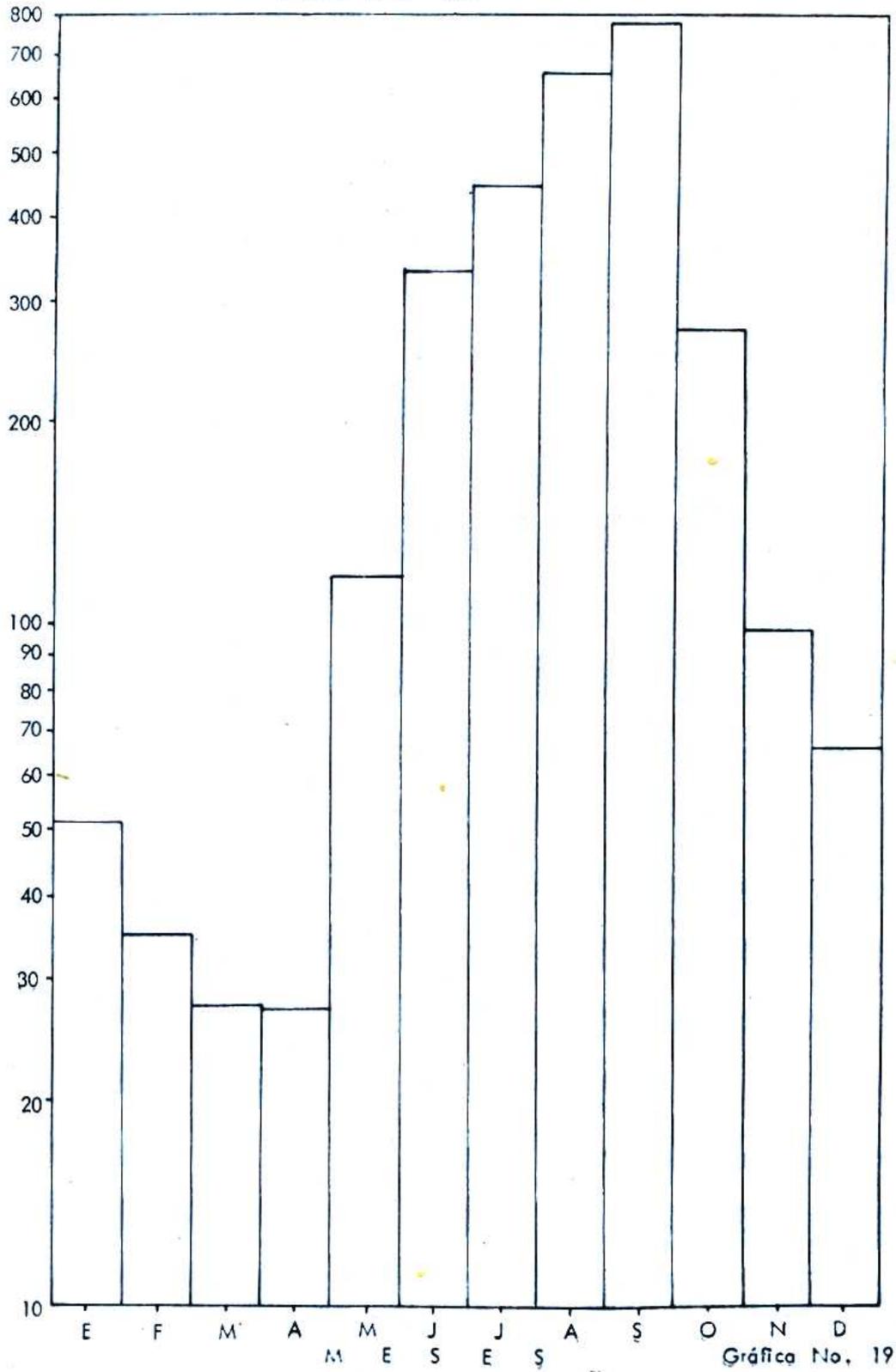
GASTO MEDIO MENSUAL

Período 1959 - 1974



Gráfica No. 18

RIO TEPATLAXCO
GASTO MEDIO MENSUAL
Período 1959 - 1974



5. ZONIFICACION DE LA ERODABILIDAD Y EROSIVIDAD DEL SUELO (mapa 3).

Las situaciones morfogenéticas que condicionan la erosividad del suelo presentan dos áreas de condiciones diferentes. Una corresponde a la zona de las sierras y el talud de transición que presentan fuertes procesos hídricos, diluviales, gravitacionales y coluviales. La otra corresponde a la parte baja de la cuenca, constituida por los aluviones, la cual tiene tendencia a sufrir acciones diluviales e hídricas.

Las dos zonas de condiciones morfogenéticas diferentes se deben al carácter topográfico, que ha sido determinante en la distribución mesoclimática, por lo cual existe una graduación climática de subhúmedo a húmedo y de cálido a frío, desde el plan a las cimas de las sierras.

Así, hay una típica correspondencia entre el clima, el suelo y la vegetación sólo en las áreas de las estribaciones de la Sierra de Las Cruces, puesto que en ellas han actuado conjuntamente las acciones del clima y del tiempo y han propiciado una evolución edáfica adecuada para soportar los procesos erosivos, cosa que no ocurre ya en el talud de transición que ha sufrido intensas acciones destructivas tanto naturales como culturales, de manera que ahora su grado de resistencia a la erosión está aniquilado, por lo que el suelo sufre fuertes procesos erosivos.

Por lo que respecta a la parte baja, ésta funciona como el área de captación de las corrientes pluviales, tomando como nivel de base local a la presa Madín.

5.1 Formas e intensidad de la erosión diluvial.⁴

⁴ Cervantes, B. J. F. "Modificación al Método de Storie por el Método Geomorfológico". *Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM. Vol. V, México, 1974.

5.1.1 Erosión superficial (decapitación pelicular y decapitación laminar).

A. *La decapitación pelicular*. Esta consiste en una desagregación y remoción de la capa superficial del suelo, y se presenta en forma heterogénea en toda el área afectada. La desagregación, tanto pluvial como diluvial, afecta a los microagregados y tiende a dejar tersas las superficies.

El tipo de escorrentía que la genera es areolar discontinua, con capacidad para cargar material coloidal y limoso por cortas distancias (de 3 a 5 m como máximo). Este fenómeno se presenta desde los dos grados de pendiente y se acentúa en terrenos con inclinaciones mayores de cinco grados.

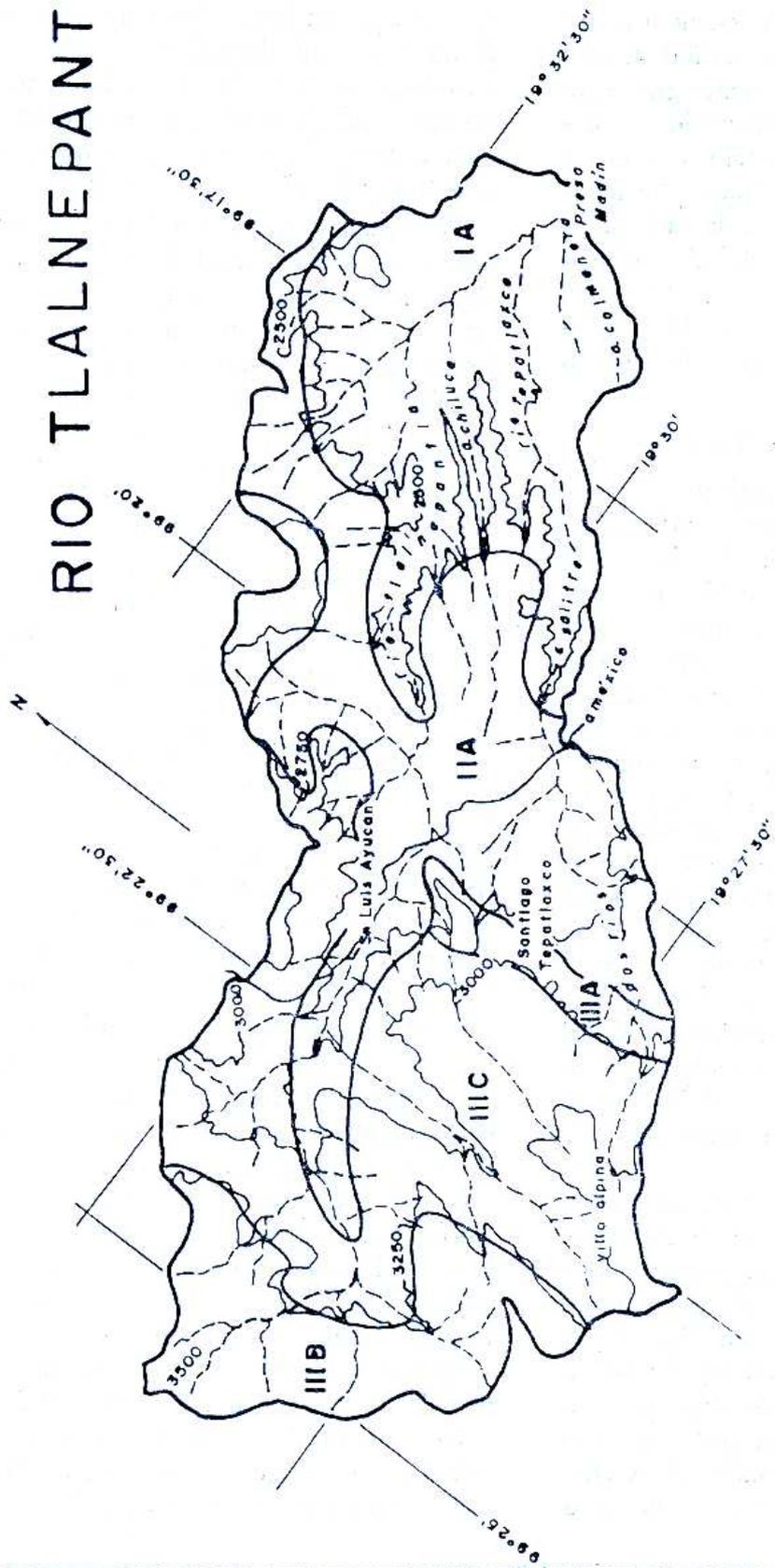
El mecanismo se presenta generalmente en áreas con buena o mediocre cobertura vegetal, con suelos poco profundos, medianamente permeables y sujetos a lluvias ligeras de duración moderada.

La importancia de todo el proceso es que prepara el terreno favoreciendo la eficacia de la erosión laminar; por tanto, la hemos jerarquizado dentro de la erosión ligera A.

B. *La decapitación laminar*. Se presenta también como consecuencia del mecanismo diluvial que provoca en el suelo su remoción en capas o láminas delgadas que son separadas, disgregadas y transportadas por escorrentías de tipo discontinuo, embrionarias y difusas, de grado 1, capaces de transportar material fino, principalmente el que cae en los diámetros de 20 a 200 micras. La condición de flujo discontinuo que se presenta provoca la migración de elementos del suelo por tramos heterogéneos, lo que da lugar a que se formen microdepósitos en toda el área afectada donde la escorrentía aborta (se mueve o queda atorada en las microdepresiones).

Sin embargo, cuando la condición pluvial es suficientemente intensa o bien su duración es constante, se genera la escorrentía difusa de grado 1, que actúa sobre un material desagregado y suficientemente mojado como para no oponer resistencia al mo-

RIO TLALNEPANTLA



GRADO DE ERODABILIDAD

- I ALTO
- II MEDIO
- III BAJO

GRADO DE EROSIVIDAD

- A ALTO
- B MEDIO
- C BAJO

vimiento, siendo, entonces, fácilmente arrastrado a lo largo de toda la vertiente.

Este tipo de erosión laminar es altamente nociva porque destruye la estructura del suelo, afectando su textura y fertilidad, además de que aporta a las corrientes gran cantidad de sedimentos finos, causando los problemas de azolve tan característicos en el vaso regulador de la presa Madín. Se le ha clasificado también dentro de la erosión ligera A, ya que constituye una de las etapas críticas para la conservación local del suelo; es en este momento cuando se puede evitar el desarrollo de tipos de erosión más desastrosos.

5.1.2 Erosión horizontal y vertical

A. *Decapitación y surcamiento*. En este tipo de erosión diluvial la escorrentía generada adquiere capacidad de trabajo no sólo para transportar sino, también, para socavar y remover las capas superiores del suelo. Las condiciones en que se produce este tipo de erosión requieren, generalmente, de lluvias violentas, persistentes e intensas, tales como las de convección, y las orográficas que son comunes en toda la cuenca.

Es en este caso cuando se necesita una buena pantalla vegetal, sobre todo en las áreas de la sierra, ya que en función de su efectividad se presenta la intensidad de la escorrentía, puesto que en donde es mediocre, por la tala inmoderada, la laceración del suelo es intensa, alcanzando no sólo el suelo sino, también, comúnmente, el subsuelo de tobas y piroclastos volcánicos, en el que con gran eficacia ataca materiales más coherentes.

Existen dos tipos de escorrentías que se producen en estas condiciones: la difusa de grado 2 y la concentrada. La primera escurre libremente formando láminas continuas que se separan y concentran en hilos al encontrar irregularidades microtopográficas; en una de estas separaciones los hilos de agua pueden juntarse al encontrar material poco resistente que permita su canalización y concentración formando, así, una tira de agua

con mayor poder de erosión. Otro tipo de obstáculos hace que las láminas e hilos de agua, al chocar con ellos, formen remolinos que socavan su base e inician un surco incipiente que evolucionará hacia arriba y hacia abajo de la vertiente. Se ha jerarquizado este tipo de erosión como moderada B, cuando sólo alcanza un estado que presenta la escorrentía difusa de grado 2.

Por último, la erosión fuerte C sólo representa mayor intensidad del proceso anterior, con predominio de escorrentías concentradas que mantienen una acción que lesiona profundamente el suelo y el subsuelo provocando incisiones de amplitud y profundidad variables, así como la separación y arrastre de capas y paquetes que fragmentan y transportan hasta los lechos fluviales por los que se pierden definitivamente.

Esta forma de erosión constituye la última fase en la intensidad de las escorrentías que se forman a partir de precipitaciones violentas e intensas que les dan capacidad para formar, en un solo aguacero, cárcavas extensas y profundas. Después que se inicia la incisión de un surco éste evoluciona rápidamente por la baja resistencia de las capas del suelo y subsuelo, adoptando generalmente la forma de V, angosta y profunda, que puede ser rectilínea o sinuosa y extenderse por la parte media y baja de las vertientes, donde se conecta a los canales de drenaje y a la red de escurrimiento fluvial, como un nuevo cauce de aguas broncas.

Cuando la acción se realiza en terrenos deforestados de las sierras, pero básicamente en el talud de transición, donde existen subsuelos impermeables y coherentes, la incisión llega rápidamente al sustrato, socava la base del suelo y separa las capas de éste abriendo también una serie de grietas a favor de las cuales se debilita y desmorona el suelo y el subsuelo, como una etapa de preparación previa a su remoción. Aquí la incisión termina o actúa débilmente dando lugar a que el agua se desplace en láminas que penetran como cuñas entre los horizon-

tes del suelo y del subsuelo, es entonces cuando el suelo se elimina por capas, deslizándose por toda la vertiente y fragmentándose en paquetes más y más pequeños, hasta terminar por disgregarse y perderse totalmente. Esta es una erosión horizontal e interna más importante que la superficial y vertical, porque propicia la eficacia de los movimientos de masa en una mayor superficie, por lo que debe agruparse dentro de las áreas con procesos que obedecen a movimientos de masa que dan origen a los coluviales.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con las características anteriormente descritas y explicadas, podemos concluir que la alteración de la cubierta vegetal, que protege los suelos, ha ocasionado un aumento en la erosividad de los mismos. Por lo anterior, grandes volúmenes de material suelto son arrastrados por los escurrimientos superficiales, hasta el vaso de almacenamiento de la presa Madín.

Este fenómeno es característico en las partes media y baja de la cuenca, en donde se presentan abarrancamientos que tienden a extenderse y evolucionar a *bad-lands*, ya reconocibles plenamente desde la parte media hasta el norte de la cuenca. Estos abarrancamientos son ahora las áreas críticas que afectan la operatividad de la presa Madín.

El desarrollo de dicha área crítica está ampliamente influida por las pendientes fuertes y, principalmente, porque es en esta zona donde las lluvias son más torrenciales

y, por tanto, de mayor efectividad dispersiva. A lo anterior debe agregarse el agrietamiento que, por desecación, sufren las formaciones de tobas y clásticos volcánicos, lo que permite la concentración e incisión profunda de filetes de agua que desarrollan cárcavas que evolucionan a grandes abarrancamientos por los cuales se pierde gran cantidad de suelo y subsuelo; esto va minando la resistencia de las formaciones litológicas y las predispone, así, al ataque de otros procesos gravitacionales tales como deslizamientos, derrumbes, asentamientos, etc.

Por otro lado, en las partes media-alta y alta de la cuenca, el régimen pluvial, con tipo de lluvias orográficas, da por resultado que, aunque se recibe la mayor cantidad de precipitación de toda la cuenca (ya que estas lluvias se presentan en forma de aguaceros ligeros o lluvias normales de baja intensidad erosiva), por el hecho de contar con una cubierta vegetal densa, los procesos morfogenéticos se encuentran equilibrados y, por ello, la erosión y decapitación del suelo es mínima. En tales condiciones podemos expresar que:

El régimen morfogenético está supeditado al régimen de lluvias, por lo que la época de mayor intensidad de los procesos hídricos se establece durante el principio y la mitad húmeda del año, cuando las precipitaciones son continuas e intensas en las partes alta y media de la cuenca, siendo las lluvias orográfico-convectivas las que propician la mayor actividad morfogenética y, por tanto, las que producen los cambios más significativos del paisaje.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Contreras, A. A. "Clasificación de climas". *Revista de Agricultura*, D.A.P.P. 1937.
- García, E. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koeppen (*para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*). Offset Larios, México, D. F. 1964.
- García, E. "Los climas del Valle de México según el sistema de clasificación climática de Koeppen modificado por la autora". *Memorias de la Conferencia Regional Latinoamericana*. Tomo IV, Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, 1966. pp. 27-59.
- Jáuregui, O. E. *Las zonas climáticas de la ciudad de México*. 1971.

- Meza, S. M. *Interpretación de los elementos climáticos en la evolución morfológica de la cuenca baja del río Tepeji, Hgo.* Tesis Profesional, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. 1976.
- S.R.H., Comisión de Aguas del Valle de México. *Estudio para el diseño de obras de control de azolves en la cuenca de la presa Madín y preservación de la calidad del agua almacenada en la presa*. 1977. pp. 4-14.
- S.R.H. Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, *Hidrología de la Cuenca del Valle de México*, Cap. II Climatología, México, 1963. pp. 1-333.