

## INTENSIDAD DE LA PRECIPITACIÓN EN EL VALLE DE MEXICO

Por *Laura Elena Maderey R.\**

### RESUMEN

En este estudio se analiza el comportamiento espacial y temporal de la intensidad máxima de la precipitación en el Valle de México, a través de los valores máximos anuales para las duraciones de 5 y 60 minutos y de los esperados para las duraciones de 5, 10, 15, 30, 60 y 120 minutos en los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años. Esto con el fin, por una parte, de proporcionar información útil en proyectos de obras hidráulicas o en investigaciones sobre erosión del suelo y, por otra, de detectar las posibles relaciones existentes entre la intensidad de la precipitación y la acción del hombre en el medio físico, dado que se trata de una de las regiones más pobladas y alteradas de México.

### SUMMARY

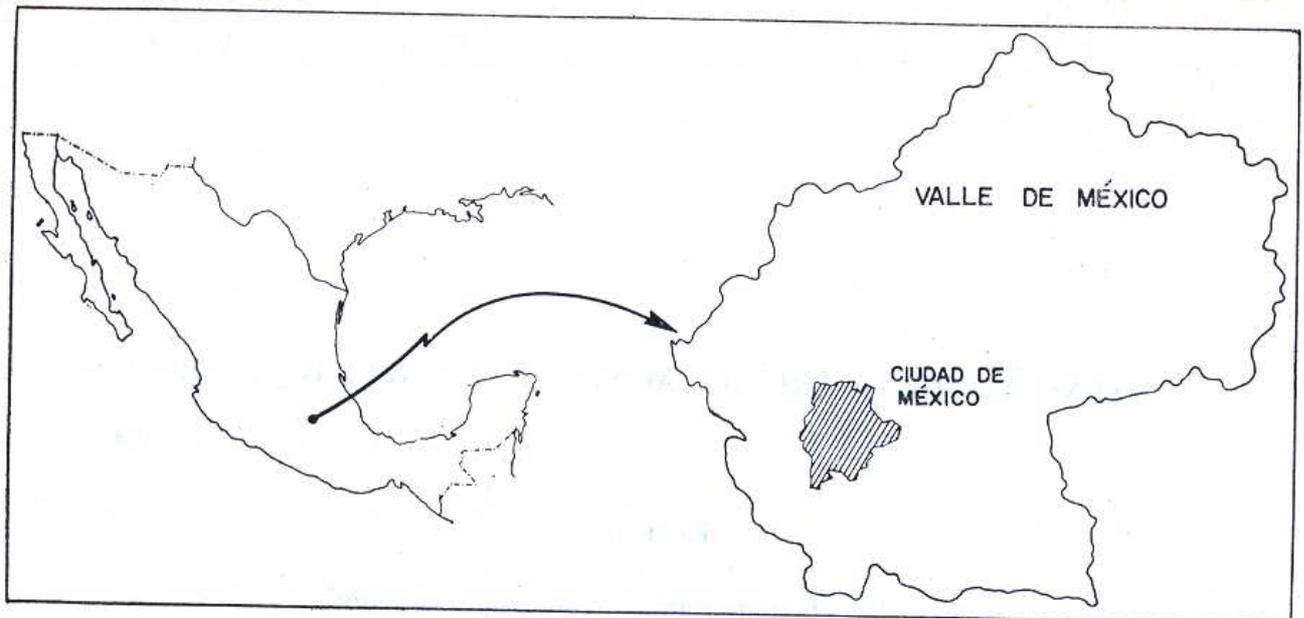
In this paper the spatial and temporal behavior of the maximum rainfall intensity is analyzed in the Valley of Mexico by means of the maximum annual values for the duration of 5 and 60 minutes and the expected values for the durations of 5, 10, 15, 30, 60 and 120 minutes in the return periods of 10, 25, 50 and 100 years. All this with the purpose, on one side, of providing useful information to projects of hydraulic structures or researchings on soil erosion, and on the other side to detect the possible relationships existing between the rainfall intensity and the human action in the physical environment, considering that the Valley of Mexico is one of the regions more populated and disturbed of Mexico.

### I. INTRODUCCIÓN

El Valle de México (mapa 1) es una región en la que la amplia alteración a la que ha sido sometido por la acción del hombre se refleja, necesariamente, en una transforma-

ción ambiental que afecta la vida que en ella se desarrolla. La precipitación, como parte constitutiva del medio ambiente, está sujeta, por tanto, a los cambios esperados de dicha alteración, lo cual implica la necesidad de su estudio y análisis dado el efecto que produce en la superficie terrestre, no solamente por sus propias características

\* Investigadora del Instituto de Geografía de la UNAM.



MAPA I. Localización de la zona de estudio en la República Mexicana.

(intensidad, forma, duración, etc.), sino también por las condiciones físicas del terreno sobre el que cae.

La intensidad es una característica de la precipitación cuyo análisis tiene particular importancia en las tormentas debido a que sus consecuencias se dejan sentir rápidamente en la superficie que cubren. De aquí que este tipo de estudios tenga gran valor en el diseño de obras hidráulicas para el aprovechamiento del recurso y de desagüe, especialmente en áreas urbanas y agrícolas, así como en la conservación del suelo por lo que respecta a la erosión.

Generalmente, cuando se estudia la intensidad de la precipitación se hace en forma muy particular, puramente con fines estadísticos, con el objeto de encontrar valores útiles en el cálculo de dimensiones adecuadas para las obras hidráulicas de determinada región.<sup>1</sup> En el presente trabajo

<sup>1</sup> Por mencionar algunos estudios:

SOP. Modelos de análisis de las características de la precipitación y de las condiciones de la cuenca para obtener criterios de diseño de estructuras de cruce y drenaje de carreteras. 1973.

SOP. Isoyetas de la cuenca alta del río Lerma. 1974.

Domínguez M. R. y Breña A. Análisis climático para la determinación de tormentas de diseño en el Valle de México. 1976.

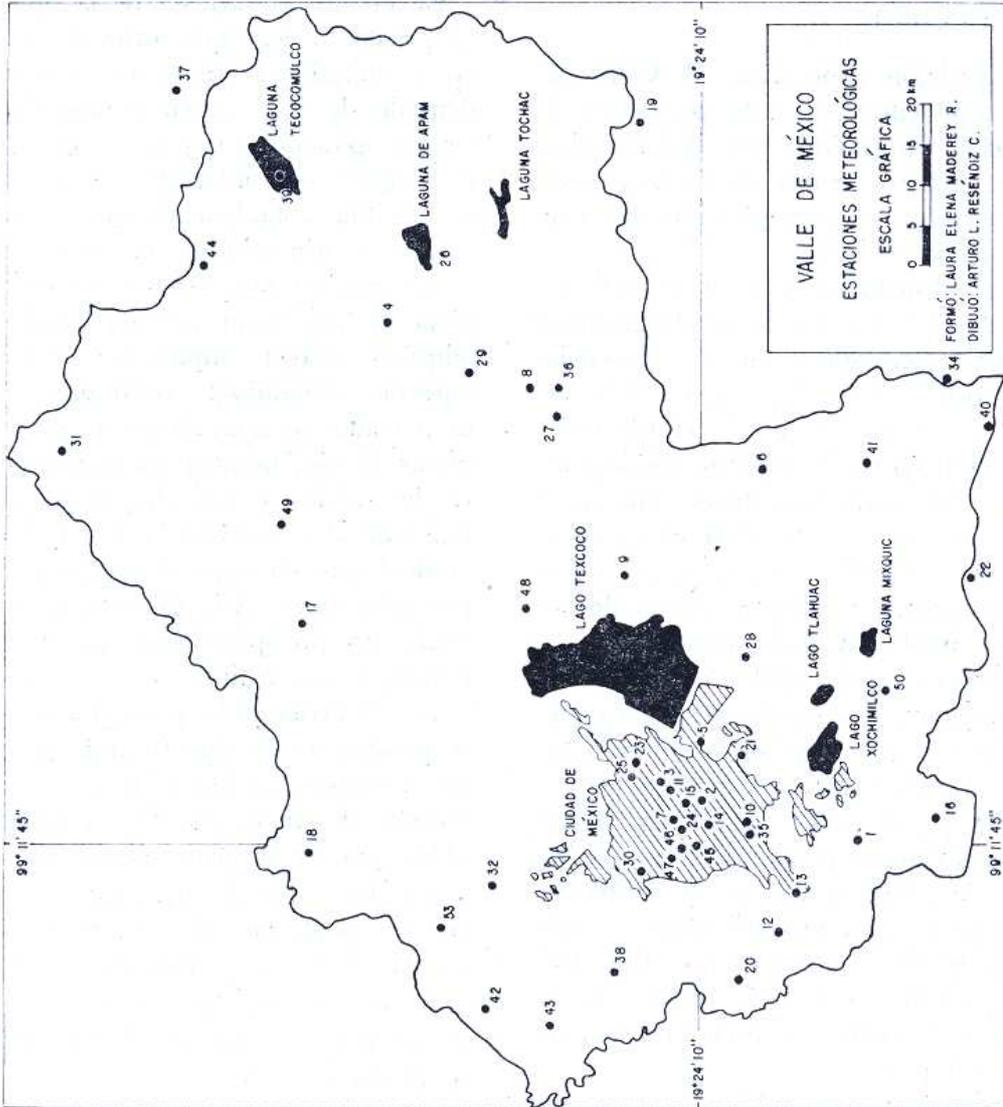
se examina espacial y temporalmente la intensidad máxima de la precipitación en el Valle de México, con doble propósito, el primero, localizar las áreas en donde ocurre la mayor intensidad y tratar de encontrar las posibles causas; el segundo, obtener los valores máximos de intensidad de la lluvia con duraciones de 5, 10, 15, 30, 60 y 120 minutos, esperados una vez en 10, 25, 50 y 100 años, información que puede ser de utilidad por las razones arriba expuestas.

Para la realización de esta investigación se utilizaron las estaciones meteorológicas que cuentan con pluviógrafo, aparato necesario para la obtención de la intensidad de la precipitación. No se pudo escoger un periodo igual de observaciones para la totalidad de las estaciones ya que éste es muy irregular en todas ellas, de manera que, para contar con una red aceptable por su distribución y número de años de registro, se consideraron aquellas que reúnen 8 o más años de observaciones. Estas hacen un total de 50 estaciones meteorológicas (mapa 2).

A lo largo del desarrollo del estudio se contó con la cooperación del maestro en Geografía, Alberto López Santoyo, investigador del Instituto de Geografía, UNAM,

MAPA 2

1. AJUSCO PUEBLO, D.F.
2. ANDALUCÍA, D.F.
3. AVENIDA DEL TRABAJO, D.F.
4. CD. SAHAGUN, ESTADO DE MÉXICO.
5. COLONIA AGRÍCOLA DE MÉXICO
6. COL. MANUEL AVILA CAMACHO, EDO. DE MÉXICO.
7. COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, D.F.
8. CUAULA, TLAXCALA
9. CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO.
10. DELEGACIÓN DE COYOACÁN, D.F.
11. DEPARTAMENTO DEL DIS-TRITO FEDERAL, D.F.
12. DESIERTO DE LOS LEONES, D.F.
13. DESVIACIÓN ALTA DEL PEDREGAL, D.F.
14. DIVISION DEL NORTE 114, D.F.
15. DOCTOR PASCUA 75, D.F.
16. EL GUARDA, D.F.
17. EL MANANTIAL, HIDALGO.
18. HUEHUETOCA, ESTADO DE MÉXICO.
19. HUEYOTLIPAN, TLAXCALA.
20. HUIXQUILUCAN, ESTADO DE MÉXICO.
21. IZTAPALAPA, D.F.
22. JUCHITEPEC, ESTADO DE MÉXICO.
23. KM 6 + 250 GRAN CANAL, D.F.
24. LA CONDESA, D.F.
25. LA FORTUNA, D.F.
26. LAGUNA DE APAM, HIDALGO.
27. LÍMITES, TLAXCALA.
28. LOS REYES DE LA PAZ, ESTADO DE MÉXICO.
29. LLANO CHICO, HIDALGO.
30. MOLINO BLANCO, ESTADO DE MÉXICO
31. PACHUCA, HIDALGO.
32. PRESA GUADALUPE, EDO. DE MÉXICO.
33. PRESA LA CONCEPCIÓN, ESTADO DE MÉXICO.
34. REPETIDORA DE TV, ESTADO DE MÉXICO.
35. SAN ANGEL, D.F.
36. SAN CRISTOBAL, TLAXCALA.
37. SAN LORENZO SAYULA, HIDALGO.
38. SAN LUIS AYULAM, ESTADO DE MÉXICO.
39. SAN MIGUEL ALLENDE, HIDALGO.
40. SAN PEDRO NEXAPA, ESTADO DE MÉXICO.
41. SAN RAFAEL, ESTADO DE MÉXICO.
42. STA. MARÍA CAHUACAN, ESTADO DE MÉXICO.
43. SANTIAGO TLAZALA, ESTADO DE MÉXICO.
44. SINGUILUCAN, HIDALGO.
45. TACUBAYA, D.F.
46. TALLERES DOLORES, D.F.
47. TECAMACHALCO, D.F.
48. TEPEXPAN, ESTADO DE MÉXICO
49. TEZONTEPEC, HIDALGO
50. VERTEDOR MILPA ALTA, D.F.



quien elaboró el programa de computación del método seleccionado para calcular la intensidad máxima de la precipitación esperada, correspondiente a las distintas duraciones para las diferentes frecuencias; así como la de los becarios, licenciados en Geografía, Carlos Coronado Gallardo y Gerardo Bustos Trejo quienes, bajo la asesoría de la autora de este trabajo, se ocuparon de la recabación y procesamiento de los datos requeridos. Para todos ellos, el justo reconocimiento.

## II. OCURRENCIA DE LA PRECIPITACION EN EL VALLE DE MEXICO

Por su posición geográfica, el Valle de México se encuentra afectado por sistemas de circulación atmosférica que definen claramente la época húmeda de la seca; asimismo determinan la precipitación que cae en el transcurso del año.

La época húmeda en el Valle de México se inicia cuando, debido al desplazamiento de la zona intertropical de convergencia hacia el norte del ecuador geográfico, se restablece, en la mayor parte del territorio mexicano, el flujo de los vientos alisios que, procedentes del mar, introducen humedad al país y, por tanto, a la zona en estudio. Esto sucede comúnmente en el mes de junio; sin embargo, las primeras lluvias de esta época se presentan desde mayo y en algunas ocasiones desde abril.

Las precipitaciones producidas por la entrada de los vientos alisios se intensifican durante los meses de julio, agosto y septiembre y se prolongan hasta octubre por la influencia de las ondas del este y de los ciclones tropicales, hidrometeoros que afectan las costas mexicanas tanto del Golfo de México como del Océano Pacífico a fines del verano y principios del otoño. Estos provocan fuertes e importantes lluvias en la mayor parte del país.

Durante los meses de invierno, al correrse la zona intertropical de convergencia ha-

cia el hemisferio sur, en México imperan condiciones de sequía; sin embargo, por el predominio de los vientos del oeste, el territorio mexicano queda expuesto al influjo de las perturbaciones propias de las latitudes medias, así como a la invasión de masas de aire polar, situaciones que dan lugar a precipitaciones en la zona en estudio; no obstante, en la mayor parte de la región éstas no llegan a constituir el 5% del total anual.<sup>2</sup>

De esta manera se puede asentar que la época húmeda comprende seis meses, de mayo a octubre; es decir, todo el verano y principios del otoño.

En cuanto al carácter de la precipitación, se presentan los tipos orográfico, convectivo y frontal. El relieve montañoso y accidentado de la zona en estudio motiva que las precipitaciones que ocurren en ella sean de índole eminentemente orográfica. Esta se acentúa notablemente en la estación de verano y principios de la de otoño cuando el ascenso de temperatura en el valle propicia el fenómeno de convección, el cual adquiere mayor importancia frente a las barreras montañosas circundantes que actúan como un mecanismo disparador de las masas de aire húmedo provenientes del Golfo de México y del Océano Pacífico, ocasionando una nubosidad de gran desarrollo vertical que da lugar a fuertes y cuantiosas precipitaciones. Así, durante la época húmeda las precipitaciones son de tipo orográfico y convectivo.

En el invierno la poca precipitación que se produce es de tipo frontal, dado que tiene su origen precisamente en los frentes que afectan al país en esa época. Estos son causados por el desplazamiento de masas de aire polar hacia el sur, donde se encuentran con masas de aire de características diferentes. Desde luego, el factor orográfico es importante también en esta estación, especialmente por la forma de la precipitación que se produce.

<sup>2</sup> García, E. 1968, p. 11.

Las precipitaciones del Valle de México generalmente se presentan en forma de lluvia; pero en la época húmeda, verano y principios de otoño, por el gran calentamiento que se experimenta, la velocidad de la convección de las masas de aire húmedo origina gigantescos cúmulos nimbos, nubes de profundo desarrollo vertical que provocan intensos aguaceros acompañados, en ocasiones, de fuertes granizadas. En la estación fría del año las lluvias son menos intensas pero más pertinaces y, aunque no periódicamente, se llegan a presentar nevadas, en especial en las sierras que limitan al Valle.

En virtud de que entre mayo y octubre cae del 80 al 94% de la precipitación anual,<sup>3</sup> la cantidad total anual refleja, pues, las particularidades de la época húmeda del año.

En el mapa 3 se muestra la distribución de la precipitación media anual, con base en las isoyetas. En él se advierte que la precipitación pluvial sufre un aumento hacia el oeste y sureste del Valle de México, de manera que mientras en el norte hay precipitaciones menores de 400 mm, en la parte oeste y sureste son superiores a los 1 200 mm. Si se relaciona esta distribución de la lluvia con el relieve de la región (mapa 4), destaca claramente la influencia de éste en esa disposición, con lo que se comprueba la eficacia del efecto orográfico en la cantidad de precipitación, pues a mayor altitud mayor altura de la lluvia, y esa mayor altitud está representada precisamente por las sierras con las que topan y por las que ascienden las masas de aire húmedo que llegan al Valle. Estas sierras son las de Las Cruces, Monte Alto y la Nevada.

### III. INTENSIDAD DE LA PRECIPITACION

La intensidad de la precipitación es la cantidad de lluvia que cae en determinado

<sup>3</sup> *Ibid.*

tiempo. Se acostumbra medirla en milímetros por hora, así, en los boletines hidrológicos anuales<sup>4</sup> aparecen registradas las intensidades de lluvia en milímetros por hora, para diversos tiempos de duración y para cada tormenta.

La intensidad es mayor al principio de la tormenta y va disminuyendo a medida que la duración de la lluvia se alarga, pero, obviamente, la altura del agua acumulada crece a medida que dicha lluvia se prolonga, por lo que a menor duración de la lluvia más intensidad y menos agua acumulada; a mayor duración, menos intensidad y más agua acumulada; por ejemplo, a una intensidad de 103.2 mm/hora para una duración de 5 minutos corresponde una altura de la lluvia de 8.6 mm; en cambio, a una intensidad de 19.8 mm/hora, para una duración de 26.4 minutos corresponden 46 mm.

Si  $i$  es la intensidad de la lluvia en mm/hora,  $d$  la duración de la lluvia en minutos y  $hp$  la altura de la lluvia, se tiene:

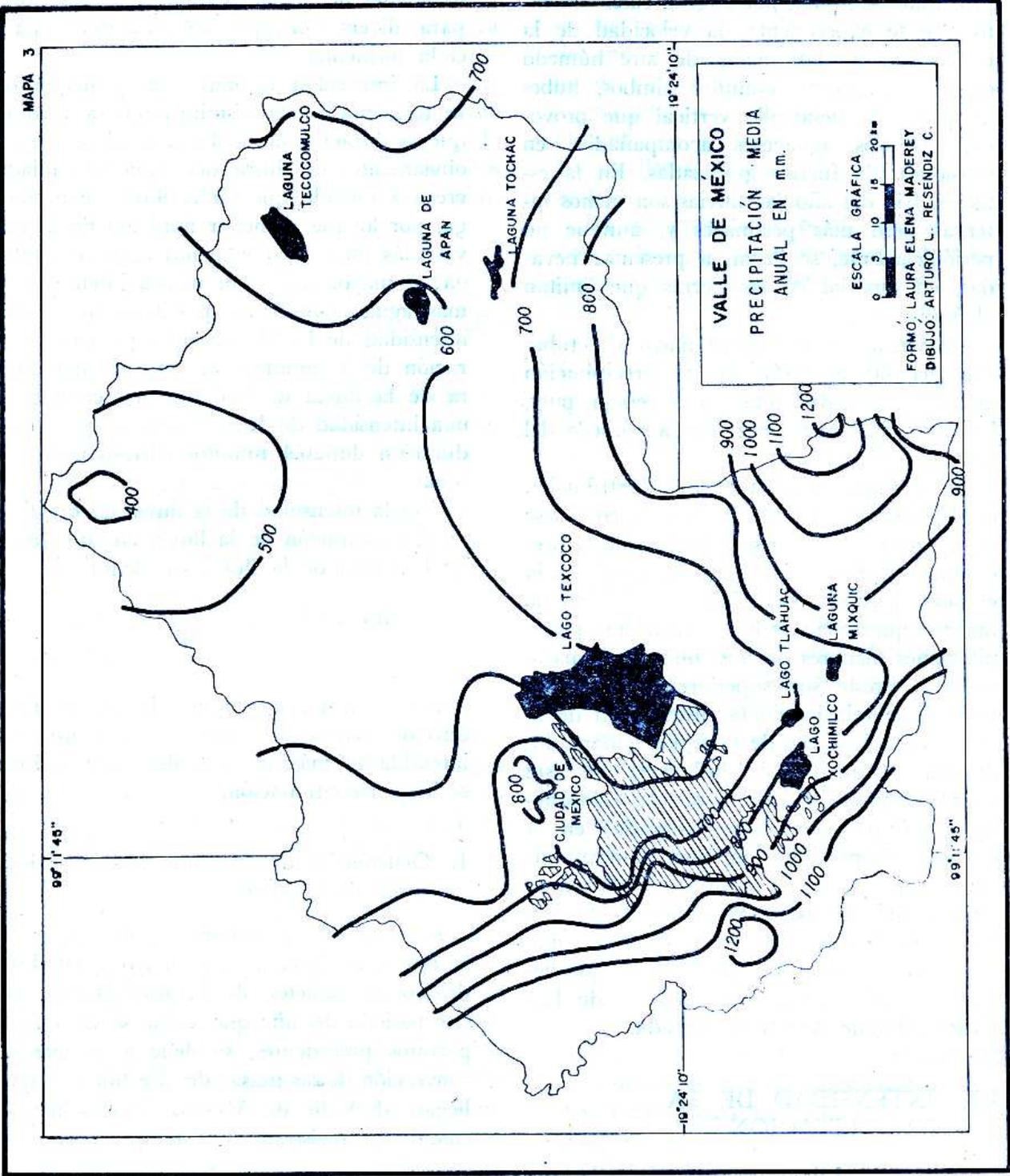
$$i = \frac{hp \times 60 \text{ min}}{d} \quad \text{y} \quad hp = \frac{i \times d}{60 \text{ min}}$$

Por las razones ya apuntadas en la introducción, para este estudio se escogieron las intensidades máximas anuales cuyo análisis se hace a continuación.

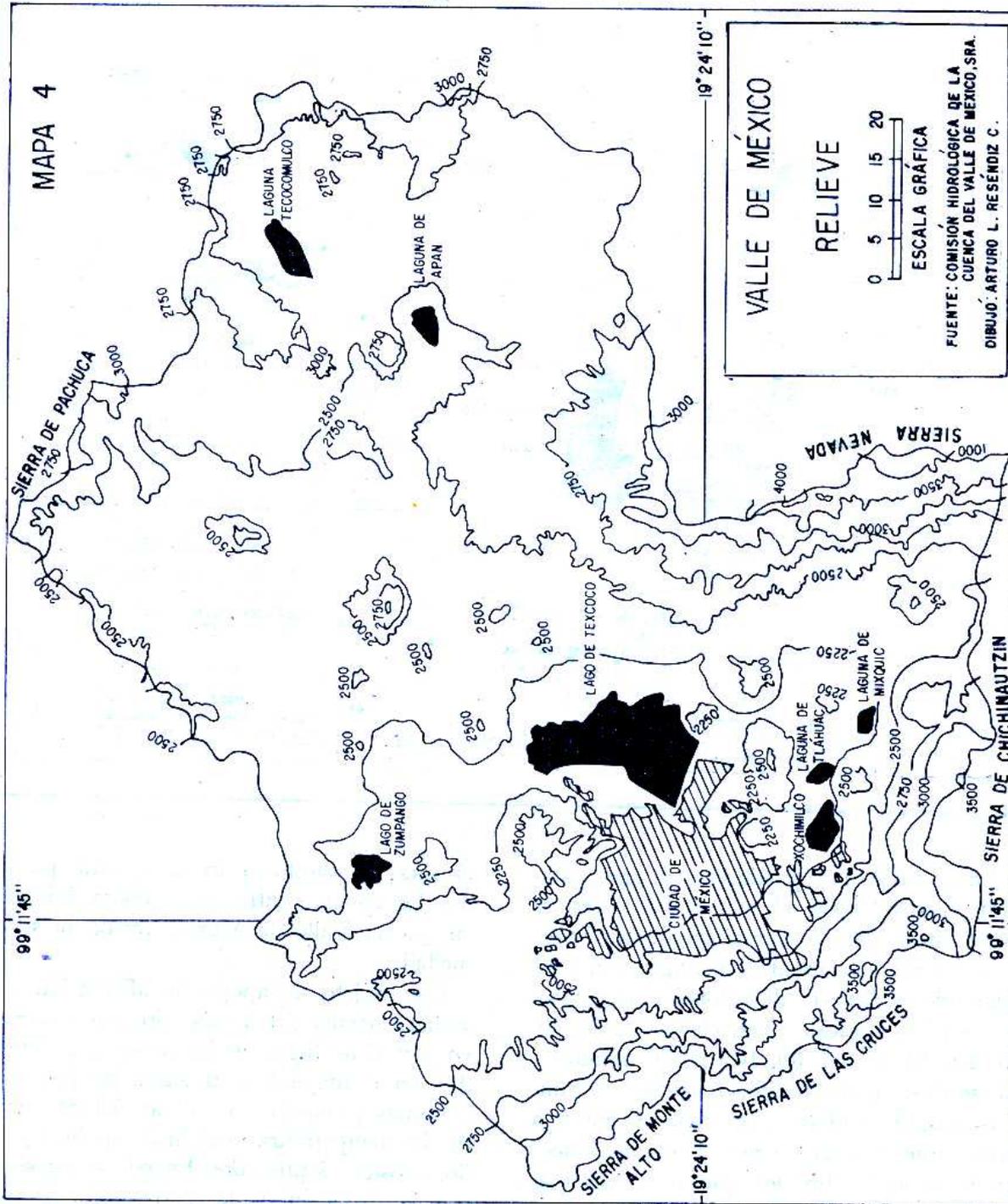
#### 1. Ocurrencia de la intensidad máxima anual de la lluvia.

Las intensidades máximas tienen lugar en la época de lluvias, entre mayo y octubre, debido al carácter de la precipitación en este periodo del año que, como se vio en los párrafos precedentes, se debe a la intensa convección de las masas de aire húmedo que llegan al Valle de México en esos meses, cuando se registran altas temperaturas.

<sup>4</sup> SRH, Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México y, ahora, SARH, Comisión de Aguas del Valle de México. *Boletines Hidrológicos. Datos del Valle de México.*

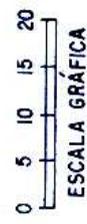


MAPA 4

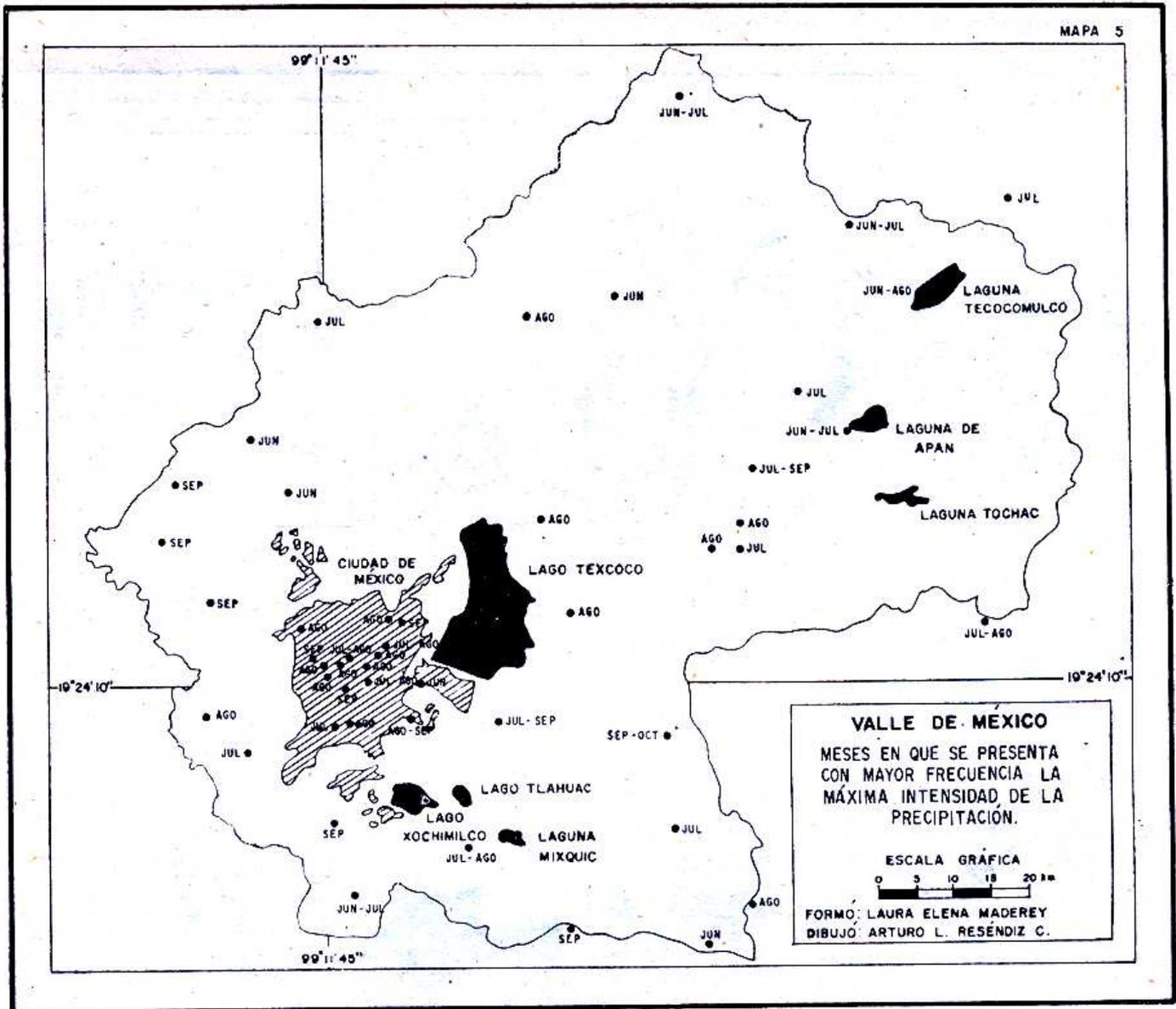


VALLE DE MÉXICO

RELIEVE



FUENTE: COMISION HIDROLOGICA DE LA CUENCA DEL VALLE DE MEXICO, S.R.A.  
DIBUJO: ARTURO L. RESENDIZ C.

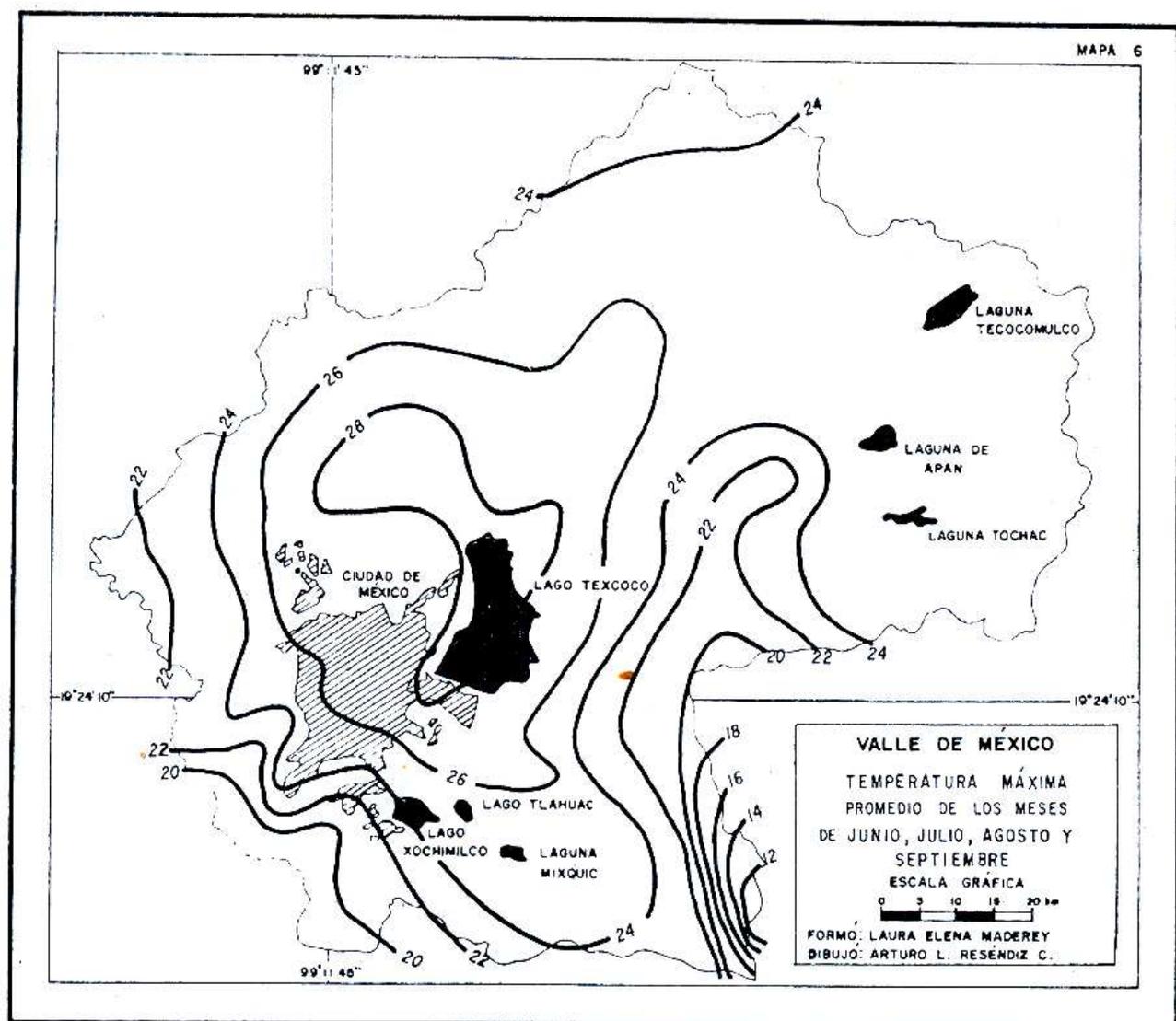


En el mapa 5 se puede ver, en cada estación meteorológica, el mes o los meses en que se presenta con mayor frecuencia la intensidad máxima anual de precipitación considerando todas las duraciones que aparecen en los boletines hidrológicos<sup>5</sup> (5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 80, 100 y 120 minutos). No se observa predominio particular de ningún mes, sin embargo, se advierte, por una parte, que son los meses de junio, julio, agosto y septiembre los que muestran mayor frecuencia y, por otra, que para el área urbana de la ciudad de México sí sobresale

el mes de agosto. Esto se explica porque son los meses, dentro de la época húmeda, en que el Valle de México recibe más humedad.

Con objeto de apoyar la afirmación que se hace acerca del intenso proceso convectivo que tiene lugar en los meses más húmedos, en el mapa 6 se trazaron las isotermas máximas promedio, obtenidas del promedio de las temperaturas máximas de junio, julio, agosto y septiembre. En este mapa se ve que la variación de la temperatura se realiza de acuerdo con el cambio de altitud, como normalmente sucede. Las temperaturas máximas promedio más altas se locali-

<sup>5</sup> *Ibid.*



zan en los sitios de menor altitud y las más bajas en las zonas de mayor altitud; es decir, en la parte central anteriormente ocupada por el lago de Texcoco (menos de 2 250 msnm) que ahora abarca parte de la ciudad de México, y en la Sierra Nevada donde se localizan los picos más altos, los volcanes Popocatepetl (5 450 msnm) e Iztaccíhuatl (5 386 msnm) respectivamente. Estas observaciones resultan interesantes si se considera que, a la altitud de los volcanes, puesto que están nevados, se registran temperaturas de 0°C o menos, y que en las partes más bajas del Valle éstas son mayores de 28°C, incluso llegan a ser hasta de

33°C, lo cual significa una disminución de aproximadamente 30°C en tan sólo un ascenso de 3 kilómetros. El gradiente vertical de temperatura que es, en general, de 6.5°C por kilómetro, en este caso resulta de 10°C por kilómetro como consecuencia del fuerte calentamiento de la tierra en esos meses. Este contraste tan pronunciado de temperaturas, a tan corta distancia en la vertical, facilita grandemente la inestabilidad de las masas de aire, dando lugar a la convección y, por tanto, a las intensas precipitaciones de naturaleza tormentosa, a menudo acompañadas de granizo, características de la temporada lluviosa en el Valle de México.

## 2. Variación de la intensidad máxima de la precipitación en el espacio.

Si bien las máximas intensidades de la lluvia suceden en determinada época del año, por las condiciones ambientales que se crean, éstas no se presentan uniformemente en todo el territorio que abarca el área en estudio.

### a) *Intensidad máxima media*

Para analizar la distribución espacial de la intensidad máxima media se transformaron los valores relativos a las intensidades máximas anuales en mm/hora, de duraciones de 5 y 60 minutos a la altura de la lluvia en esas duraciones, y posteriormente se promediaron para obtener el dato medio. Se escogieron estas duraciones por ser la de 5 minutos la de más intensidad, puesto que se trata del intervalo más corto en la duración de las tormentas consideradas,<sup>6</sup> y la de 60 minutos el intervalo medio de la duración total para la que se obtiene la intensidad de las tormentas.<sup>6</sup>

Con las alturas así obtenidas se elaboraron los mapas 7 y 8. En ellos se nota que la distribución de la precipitación sufre un cambio muy notorio en comparación con la de la precipitación media anual. Las isoyetas, en el caso de la precipitación media, son continuas y siguen los contornos del relieve, de tal manera que se puede afirmar que su variación es más o menos uniforme según el mismo. En el caso de la intensidad máxima media de la precipitación, la continuidad de las isolíneas se rompe y éstas se cierran formando células o centros, en ocasiones de configuraciones caprichosas, que marcan las zonas en donde se presentan las mayores intensidades máximas o, bien, aquellas en donde se encuentran los valores mínimos de la intensidad máxima estudiada. Esto no permite aseverar que la intensidad de la lluvia tiene una variación espacial uni-

forme en cuanto a la distribución del relieve.

En la distribución de la altura máxima media de la lluvia acumulada en 5 minutos los valores son poco cambiantes en el área en cuestión, entre 5.8 y 12.6 mm; sin embargo, destacan cuatro centros o zonas en las que la altura es mayor de 10 mm y, de éstas, tres en las que sobrepasa los 12 mm.

Estas zonas de precipitación máxima media en 5 minutos se localizan, una en la parte centro norte del Valle que es donde está la menor altitud, y las otras tres en las que la altura de la lluvia es superior a los 12 mm, una en el extremo noreste (12.6 mm/5 min.), otra en las sierras de Monte Alto y de Las Cruces, abarcando parte de la ciudad de México (también 12.6 mm/5 min) y la tercera en el sureste del Valle de México, en la extensión limitada por la Sierra de Santa Catarina, la Sierra Nevada y la Sierra de Chichinautzin.

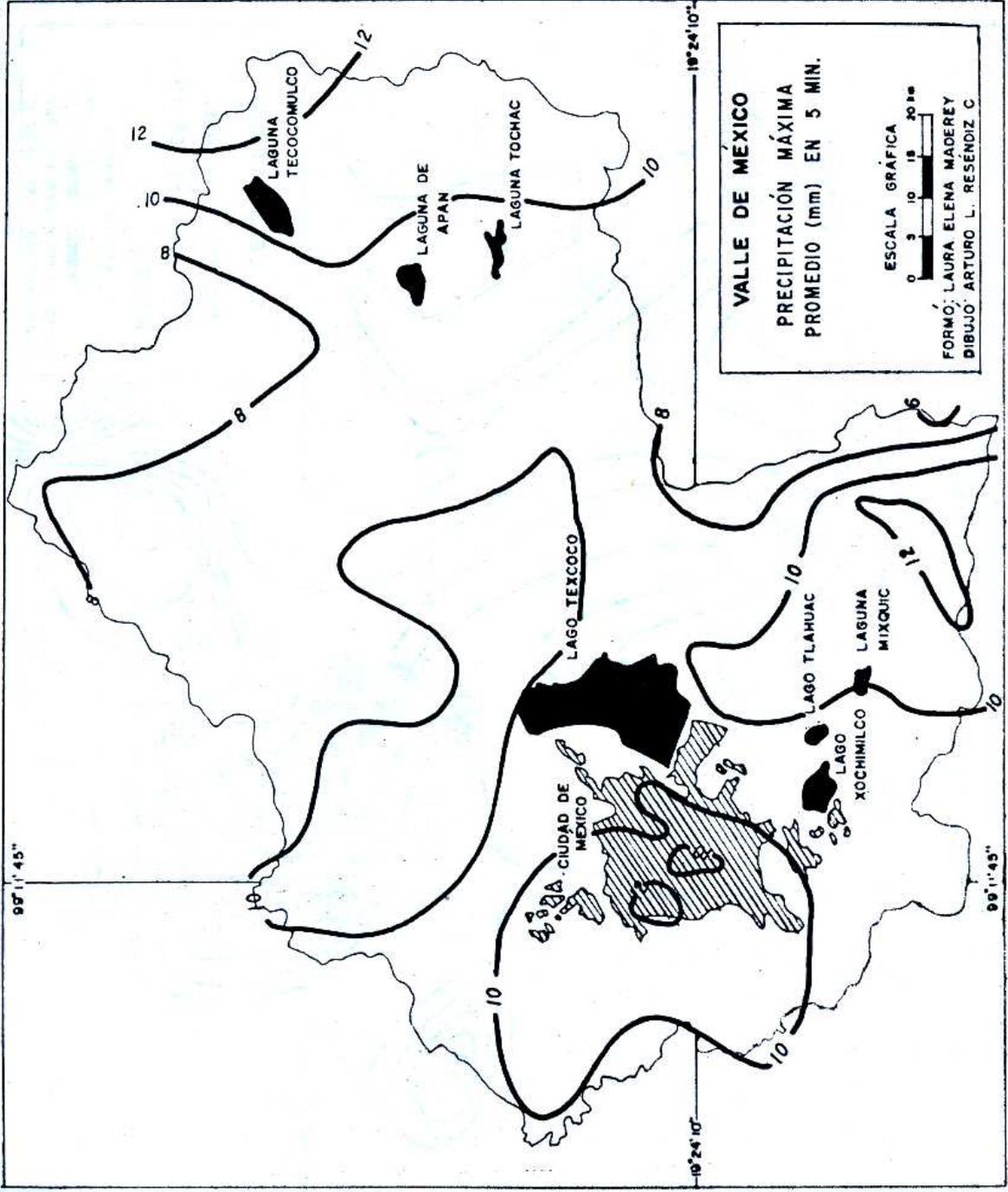
Las intensidades máximas menores se sitúan en el extremo sureste, en la parte alta de la Sierra Nevada y en el norte del Valle.

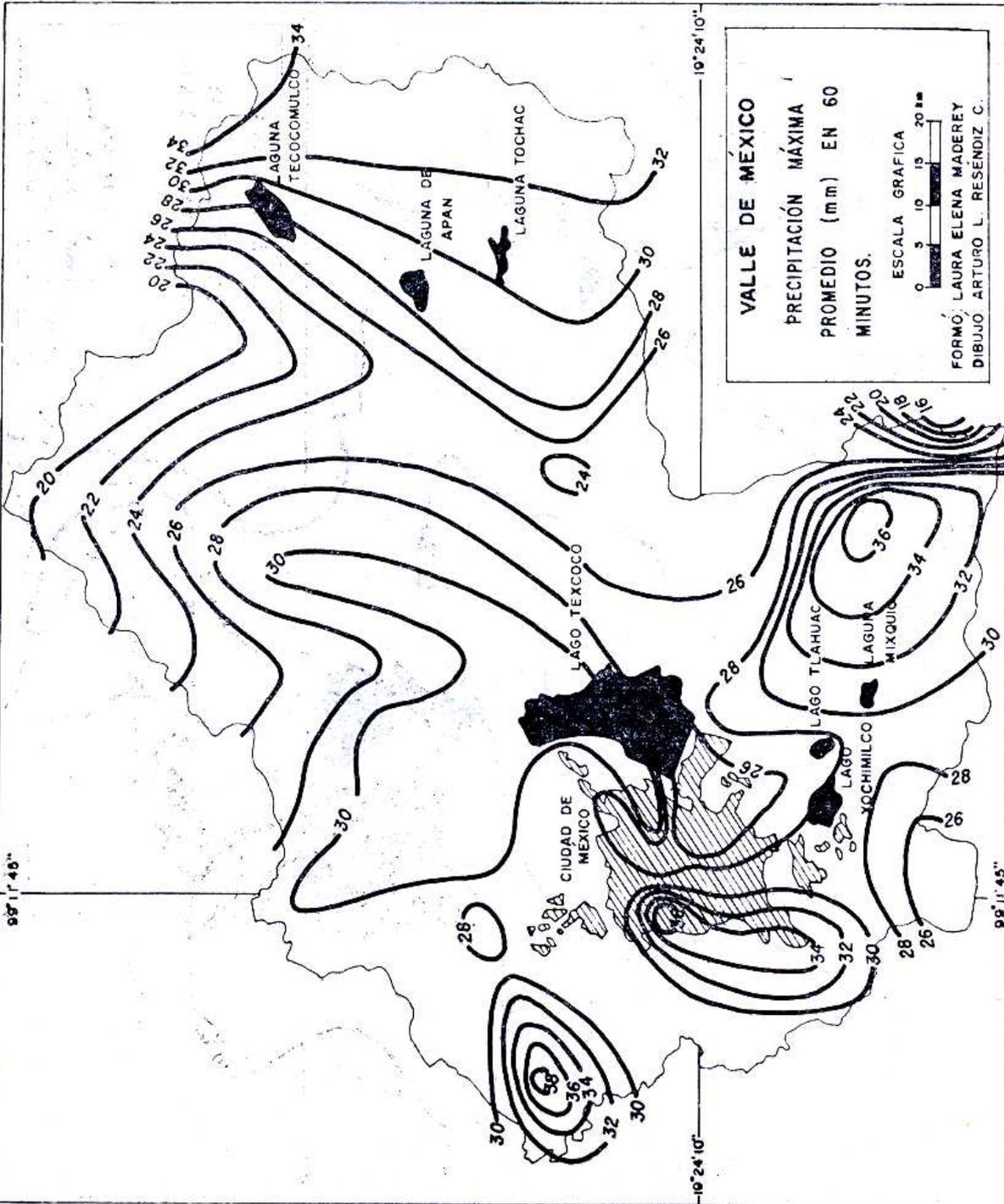
La distribución de la altura máxima media de la lluvia en 60 minutos se efectúa de modo semejante a la de 5 minutos en cuanto a la ubicación de los valores mayores y menores, pero en este caso la variación espacial es más brusca; la altura de la lluvia oscila entre 14.3 mm y 38 mm, y las zonas donde se presentan las mayores alturas, aunque se conservan geográficamente, aumentan a cinco, pues el centro que se tenía en las sierras de Monte Alto y de Las Cruces, abarcando una porción de la ciudad de México, se rompe en dos, quedando una en la Sierra de Monte Alto y otra en parte de la Sierra de Las Cruces y de la ciudad de México.

Las zonas o centros de menor altura máxima son los mismos que en la altura antes examinada.

Como es lógico suponer, la altura máxima media de la lluvia es mayor para la duración de 60 minutos, debido a que el in-

<sup>6</sup> Ibid.





VALLE DE MEXICO  
PRECIPITACION MÁXIMA  
PROMEDIO (mm) EN 60  
MINUTOS.  
ESCALA GRAFICA  
0 5 10 15 20 km  
FORMO: LAURA ELENA MADEREY  
DIBUJO: ARTURO L. RESENDIZ C.

tervalo es más amplio que para la de 5 minutos, por lo cual se alcanzan los valores de los órdenes arriba citados.

b) *Análisis de la intensidad máxima de la precipitación esperada para diversas duraciones y frecuencias.*

“El análisis de frecuencia define el suceso que cabe esperar ocurra por término medio, una vez cada N años”.<sup>7</sup> A este periodo se le denomina periodo de retorno o intervalo de recurrencia. Desde luego, no se puede asegurar con una probabilidad del 100% que el evento esperado ocurra exactamente una vez en el intervalo de recurrencia seleccionado, pues puede acontecer que se presente dos veces en ese intervalo y que en el siguiente no ocurra. A pesar de ello, la aplicación del análisis de frecuencia es hasta ahora el recurso más confiable en los estudios y proyectos hidrológicos.

En el presente trabajo este análisis se llevó a cabo con series de valores máximos anuales, como ya se indicó. El cálculo de la intensidad máxima esperada en distintas duraciones, para los diferentes periodos de retorno, se hizo a través de la expresión generalizada derivada del método de Gumbel para calcular valores extremos, con la que se puede resolver la mayoría de las funciones aplicables al análisis hidrológico, según lo ha demostrado V. T. Chow:<sup>8</sup>

$$X = \bar{X} + \sigma_x K$$

en donde:

- X valor máximo esperado de intensidad de la precipitación para la duración y periodo de retorno considerados.
- $\bar{X}$  media aritmética de los valores máximos anuales de la intensidad de la

<sup>7</sup> Linsley, R. K., Kohler, M. A. y Paulhus, J. 1967, p. 262.

<sup>8</sup> Chow, V. T., 1951.  
Linsley, R. K., Kohler, M. A. y Paulhus, J. *op. cit.*, 267.

Springall G. R., 1975, pp. 76 y 78.

precipitación para la duración considerada.

$\sigma_x$  desviación estándar.

K factor de frecuencia, así denominado por V. T. Chow.

El factor de frecuencia K está en función del tamaño de la muestra de datos y del periodo de retorno:

$$K = - \frac{1}{\sigma_n} (\bar{Y}_n + \log_e \log_e \frac{T_m}{T_m - 1})$$

en donde:

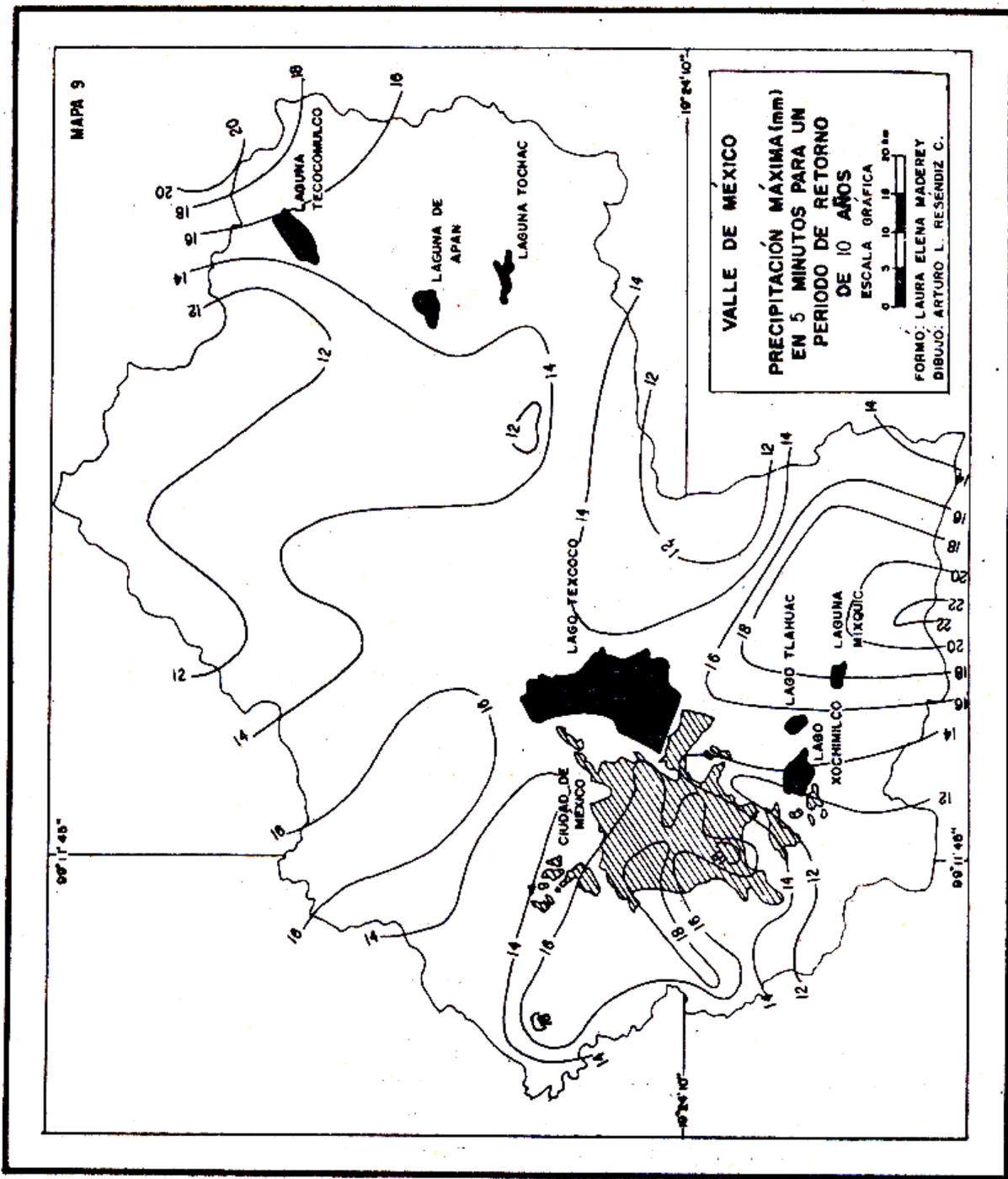
$\sigma_n$  y  $\bar{Y}_n$  son valores tabulados que dependen del tamaño de la muestra de datos, en este caso el número de años de observaciones.

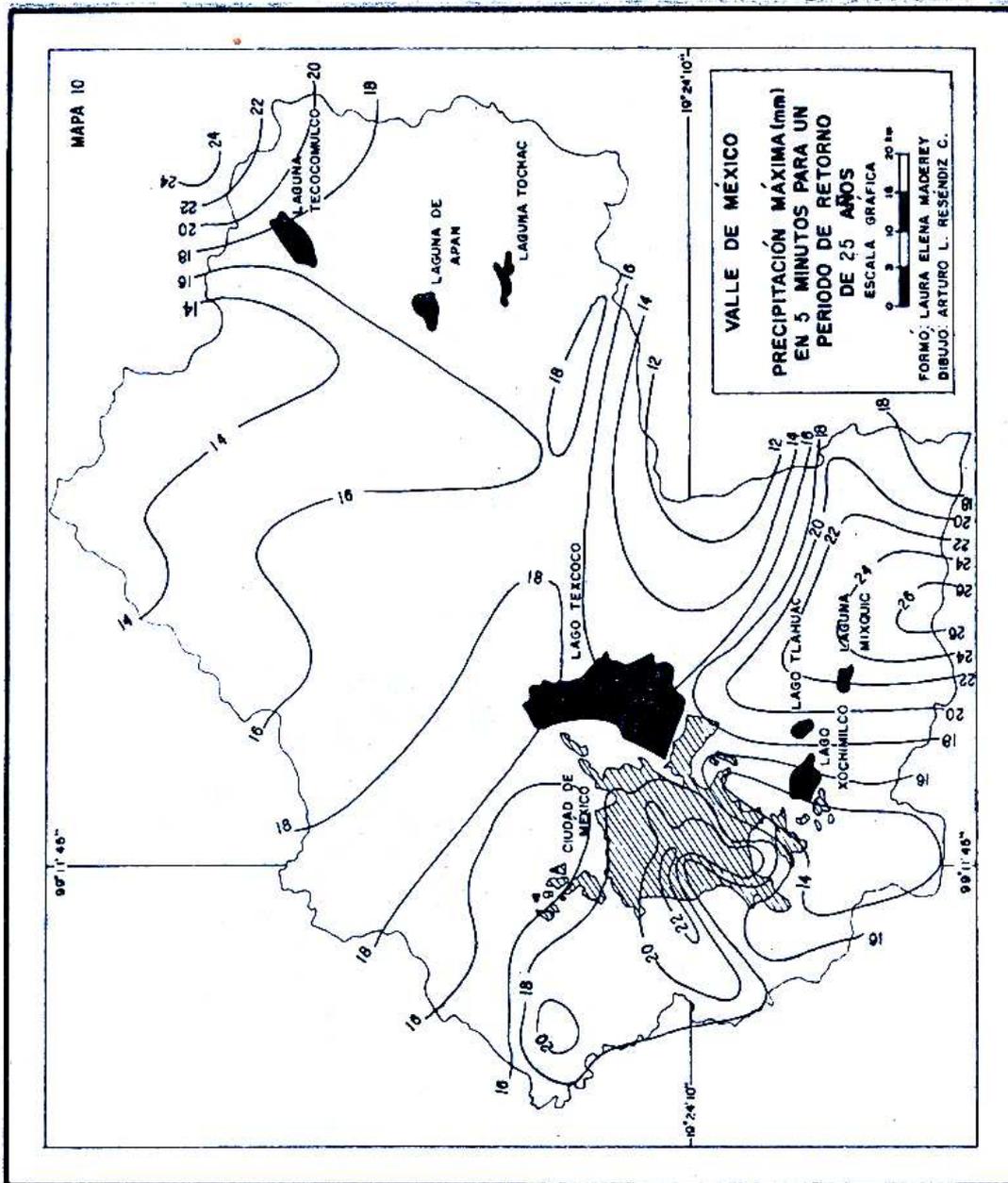
$T_m$  periodo de retorno.

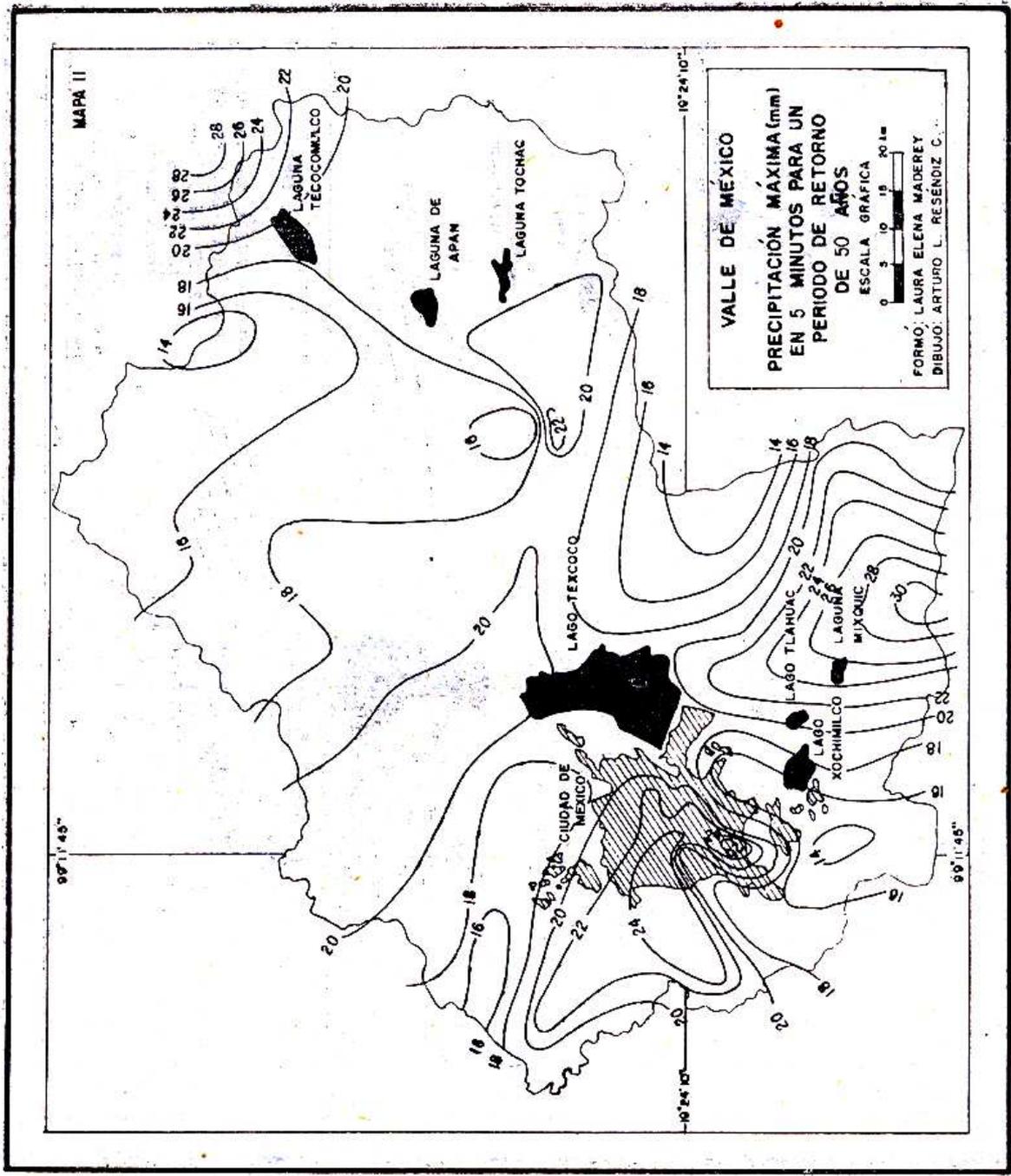
Las duraciones analizadas fueron las de 5, 10, 15, 30, 60 y 120 minutos, y los periodos de retorno escogidos los de 10, 25, 50 y 100 años, como ya antes se había dicho; éstos son los más frecuentemente empleados debido a que constituyen los periodos de vida que se da a las diferentes obras hidráulicas (drenajes, presas, etc.) para su óptima utilización.

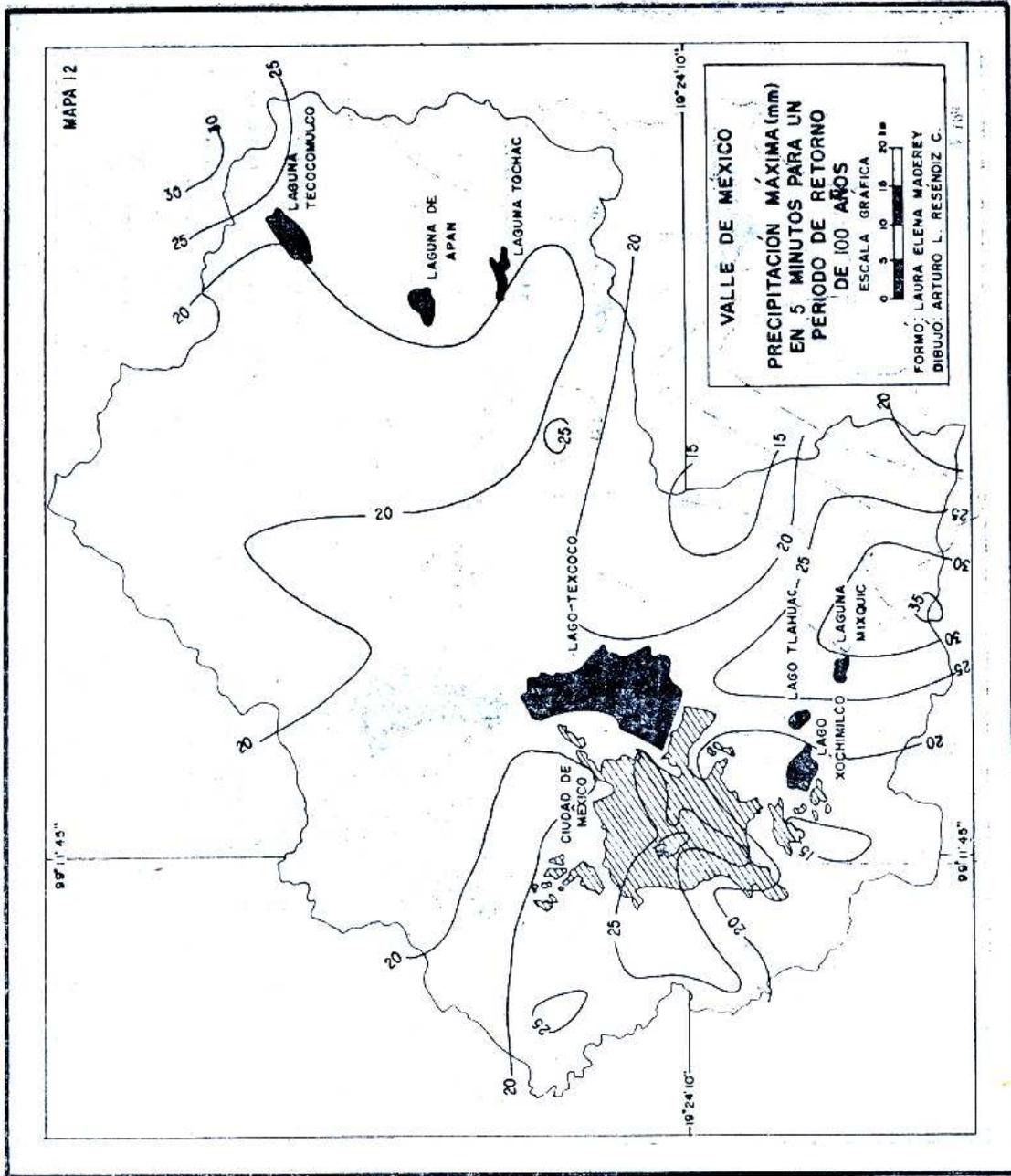
Con las intensidades máximas de la precipitación así obtenidas se elaboraron los mapas correspondientes (del 9 al 32). Lo que en ellos se observa es muy similar a lo que se describió al tratar la intensidad máxima media de la precipitación, con algunas variantes que se producen sobre todo en la parte media del Valle, para la duración de 5 minutos, en el sureste del mismo, en donde el punto de más intensidad máxima se encuentra francamente desplazado hacia la Sierra de Chichinautzin, en cambio, para el resto de las duraciones que se tomaron en cuenta, dicho punto se registra en el declive de la Sierra Nevada.

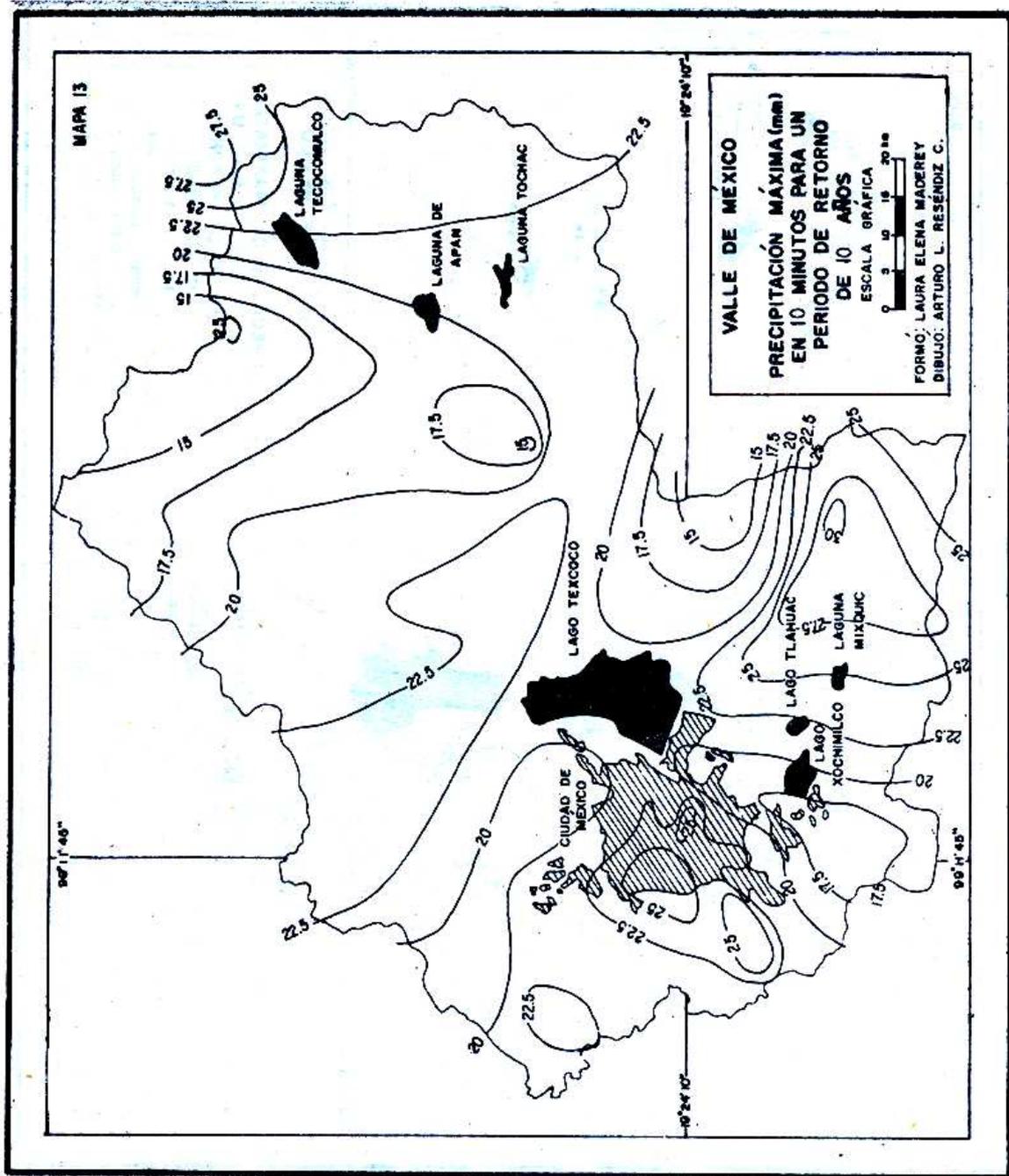
La similitud a la que se alude resulta lógica si se considera que estos valores fueron estimados con base en los datos reales de los que se obtuvo la intensidad máxima me-

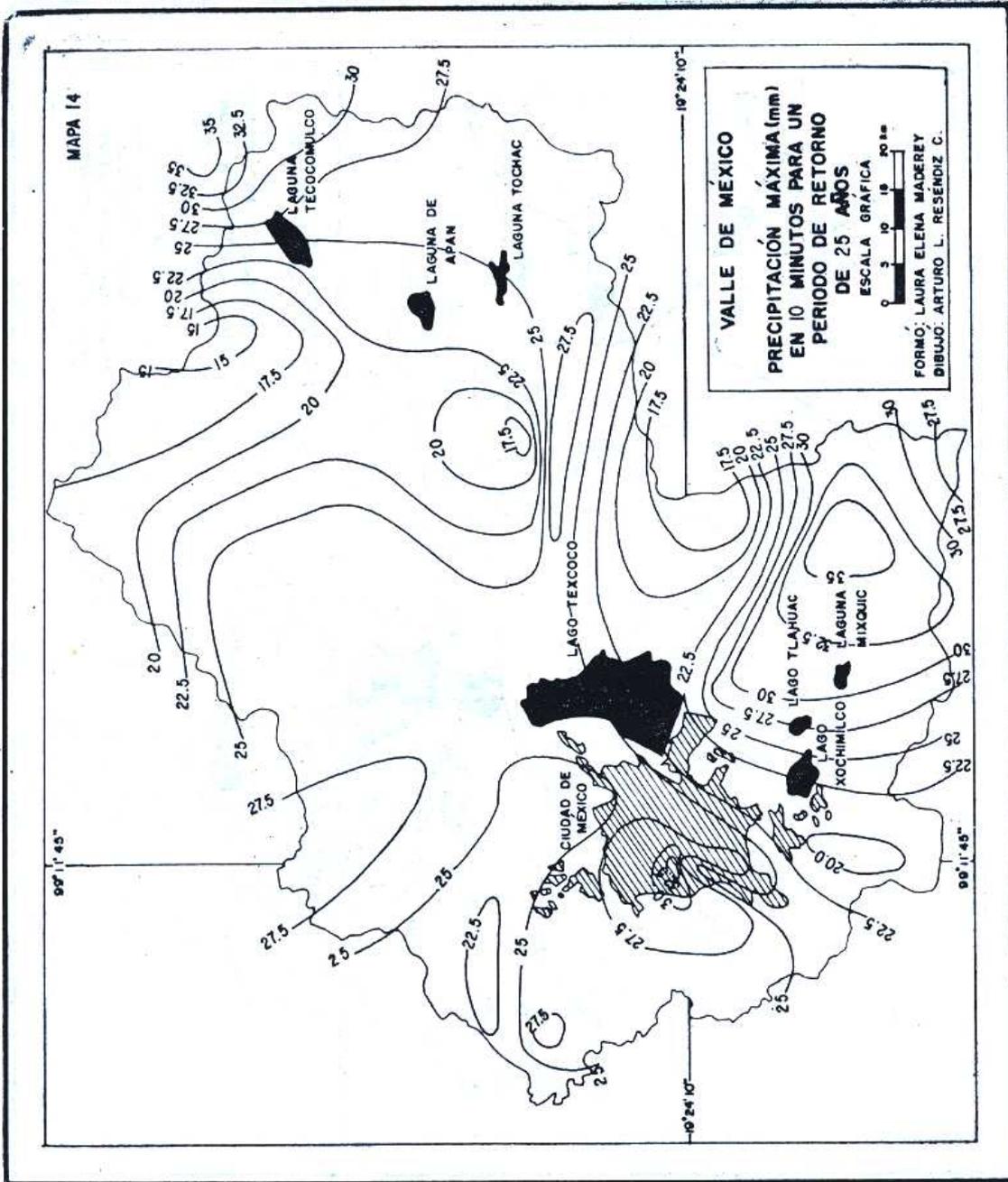


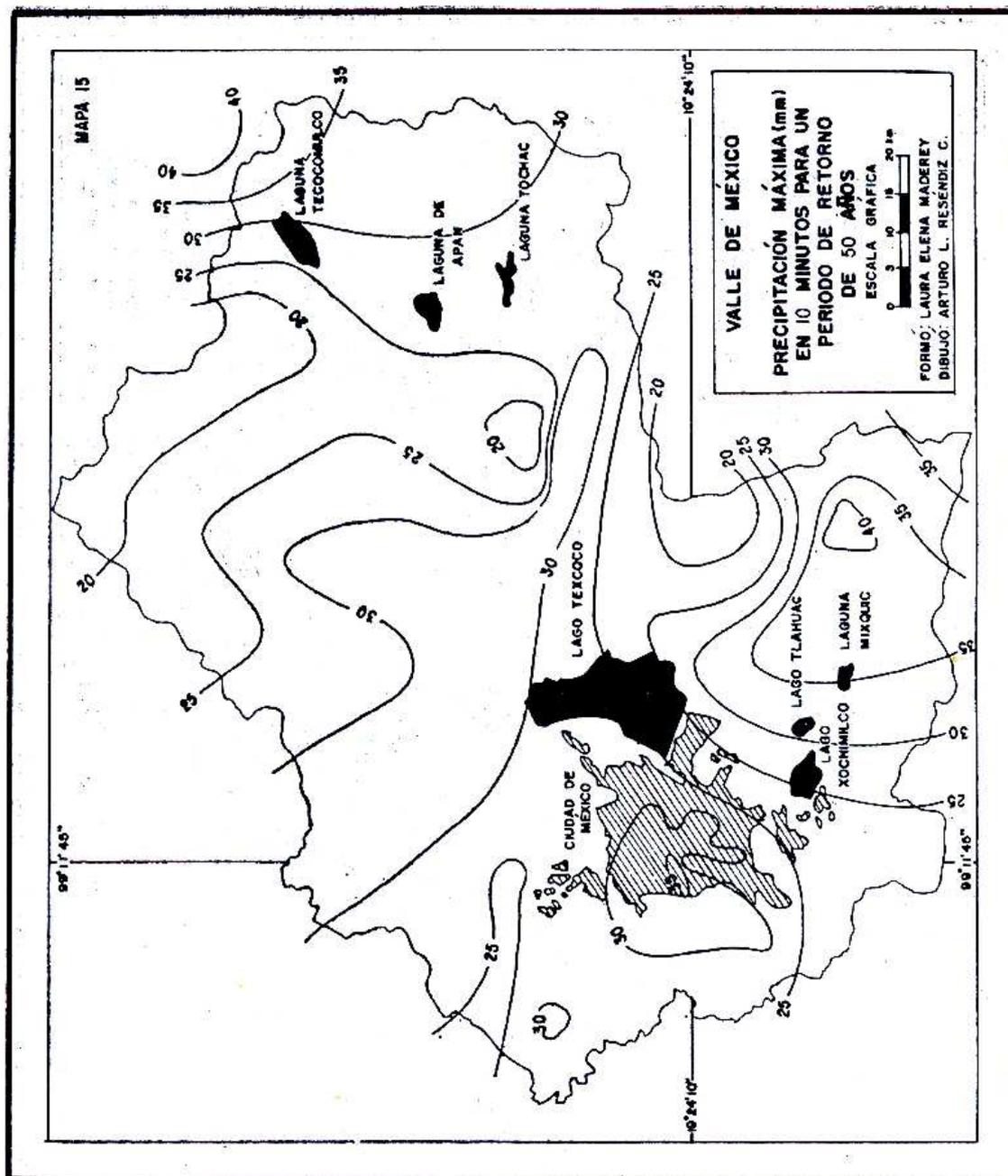


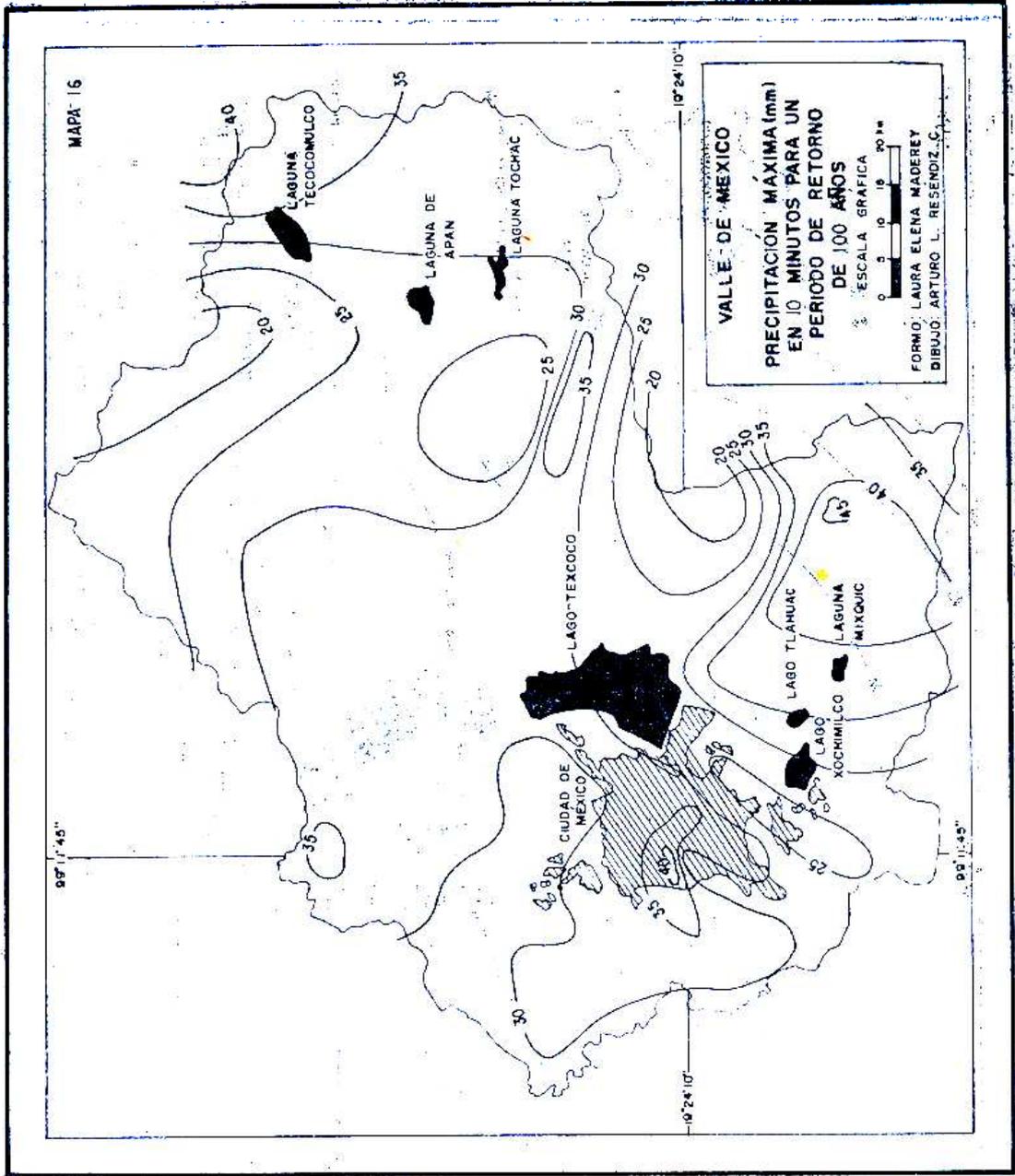


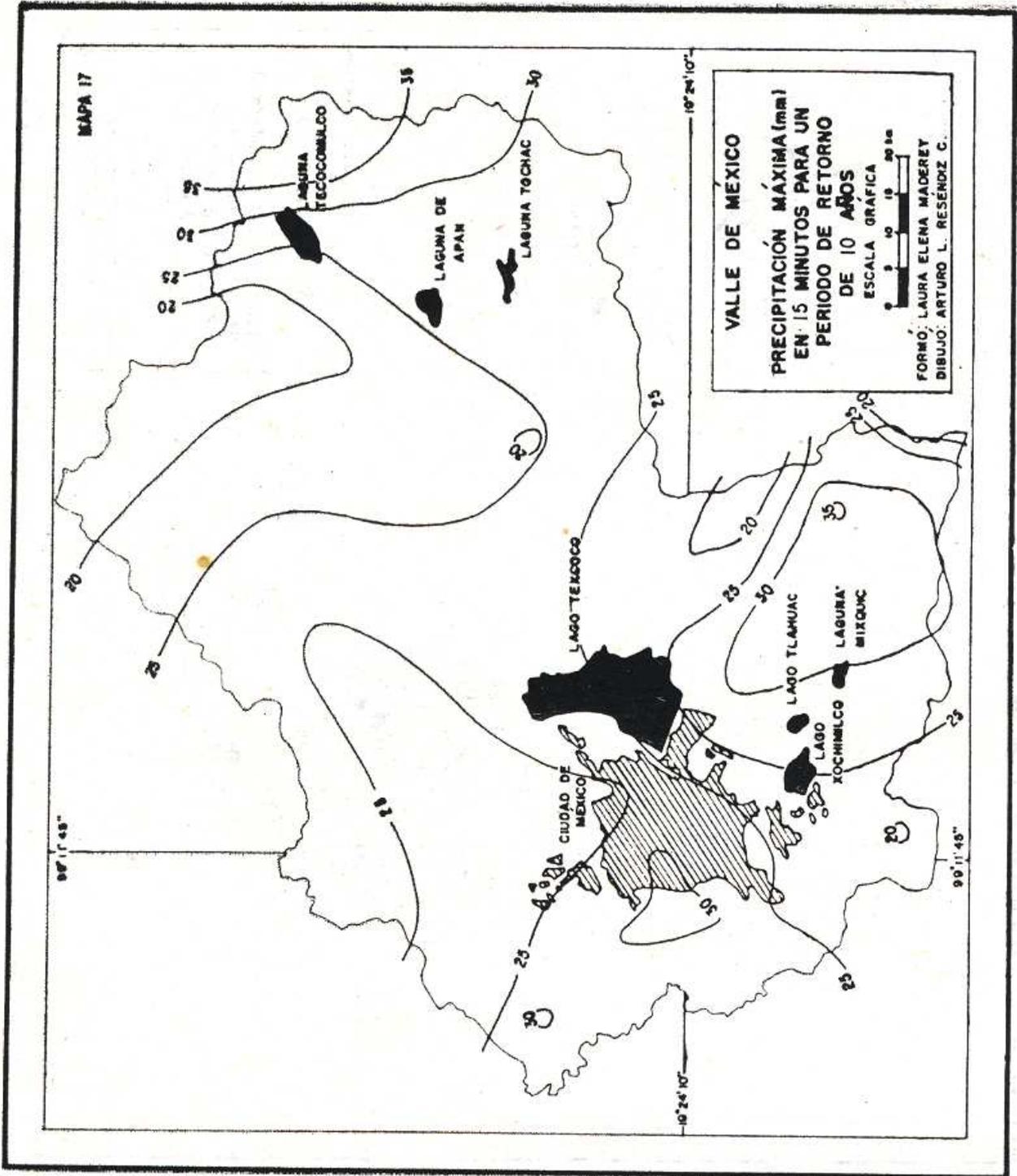




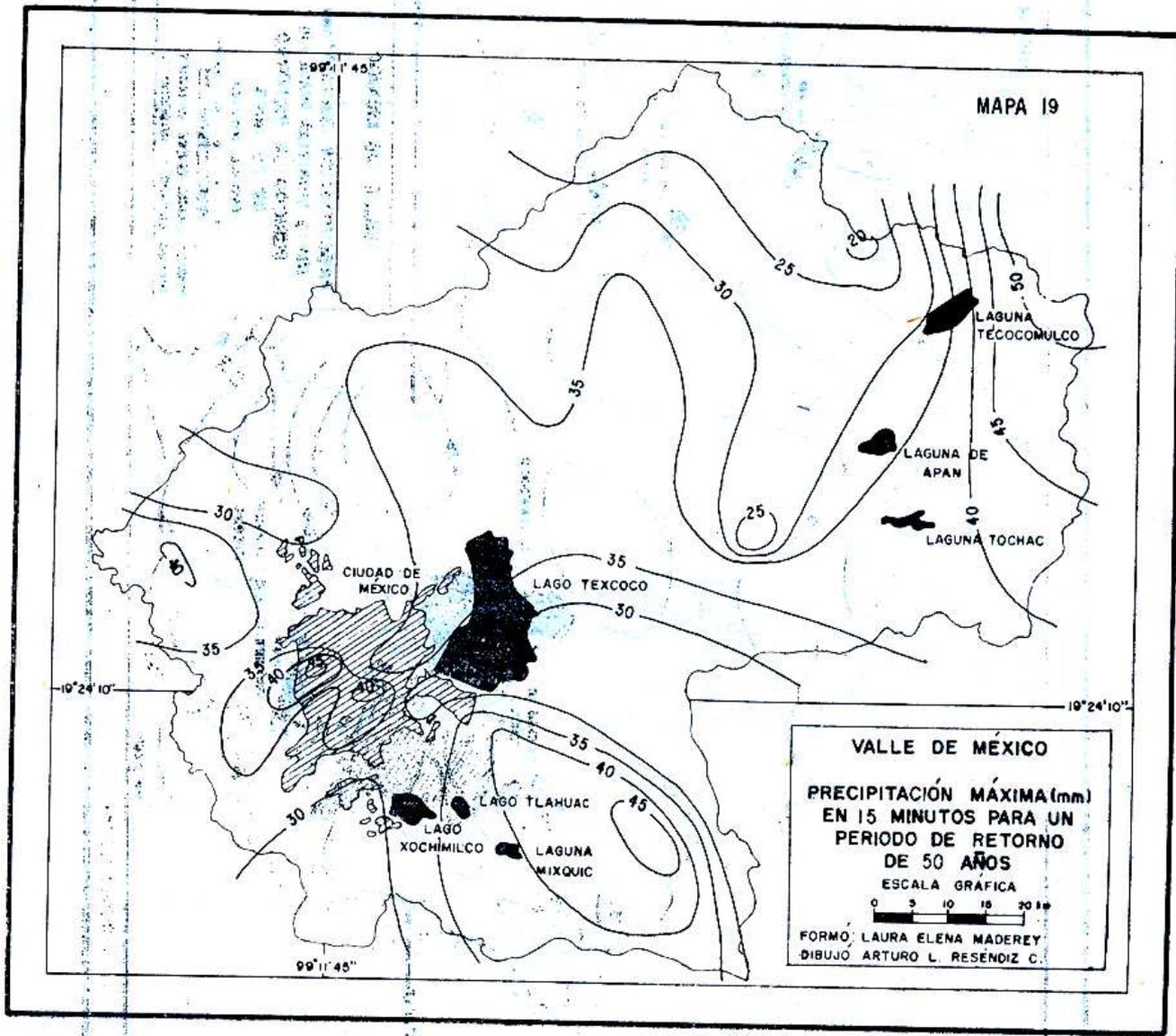


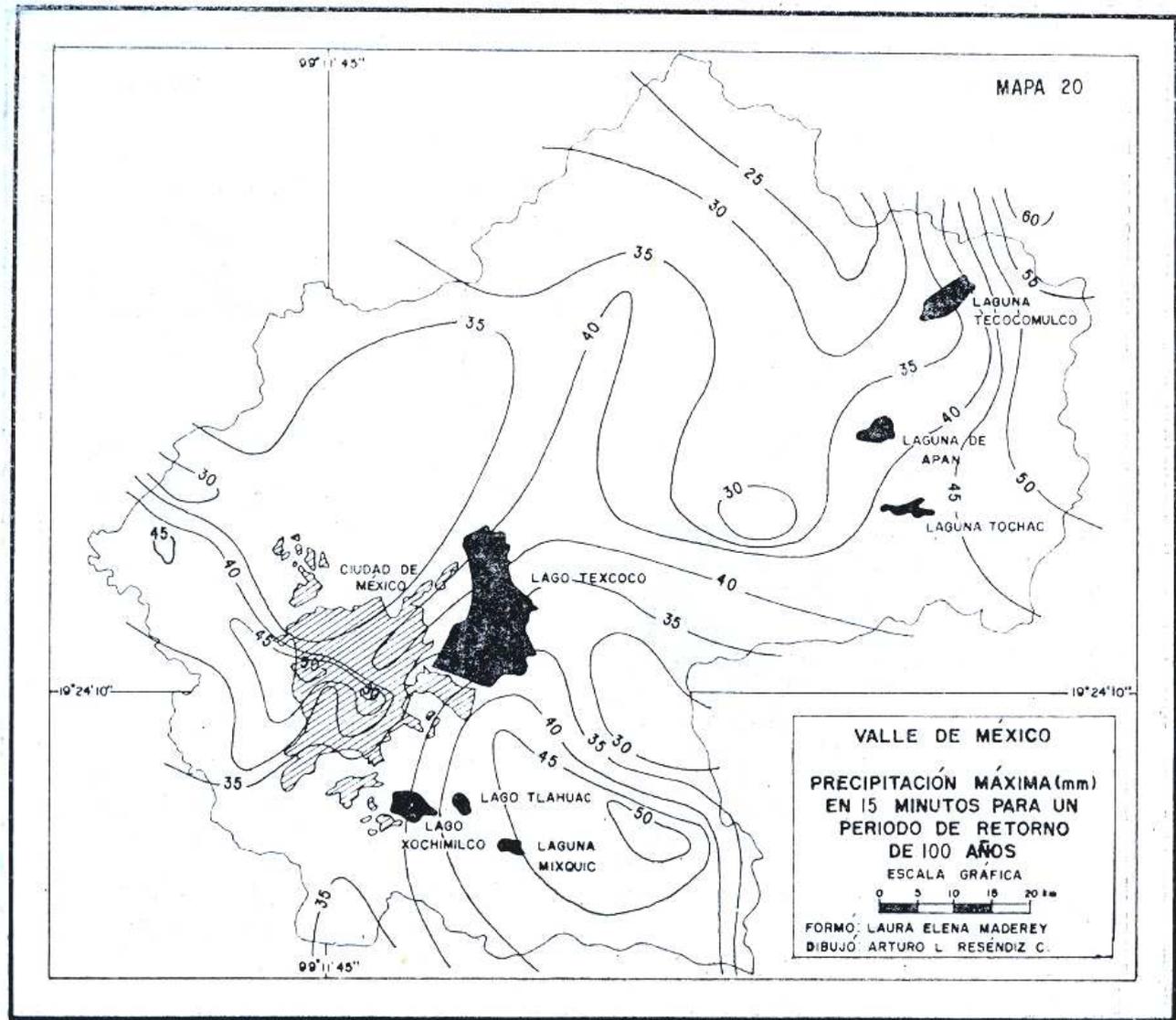


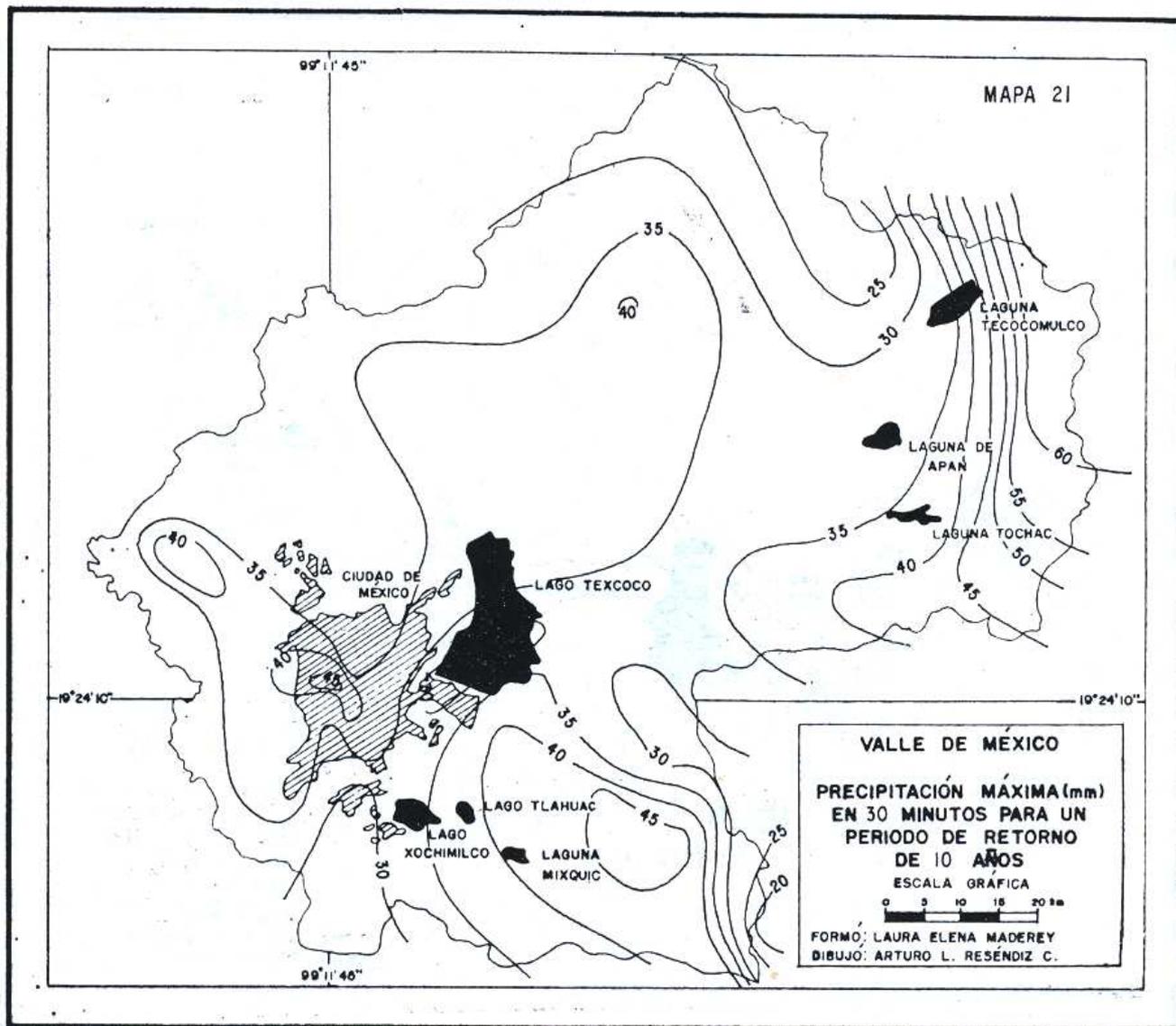


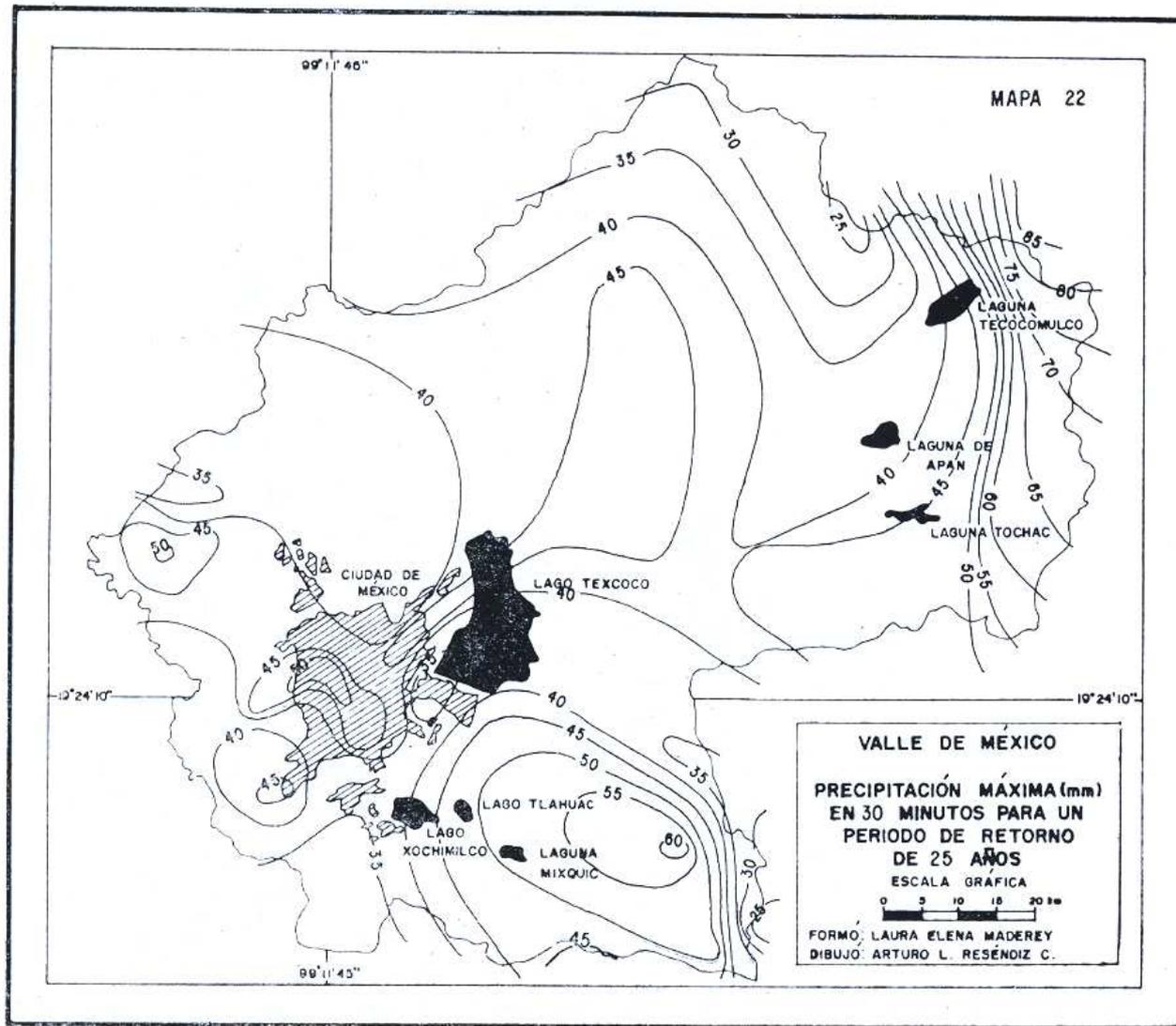


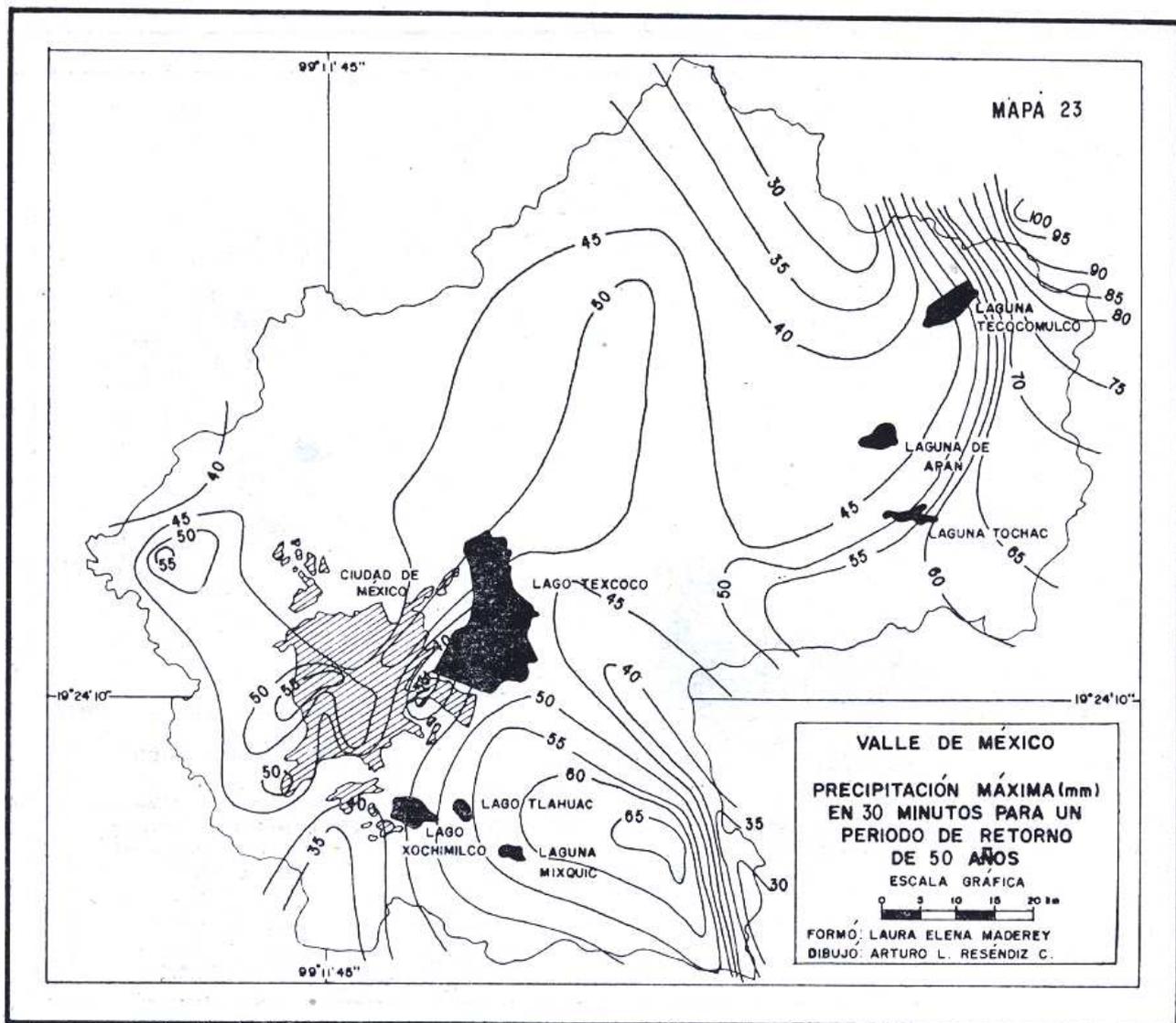


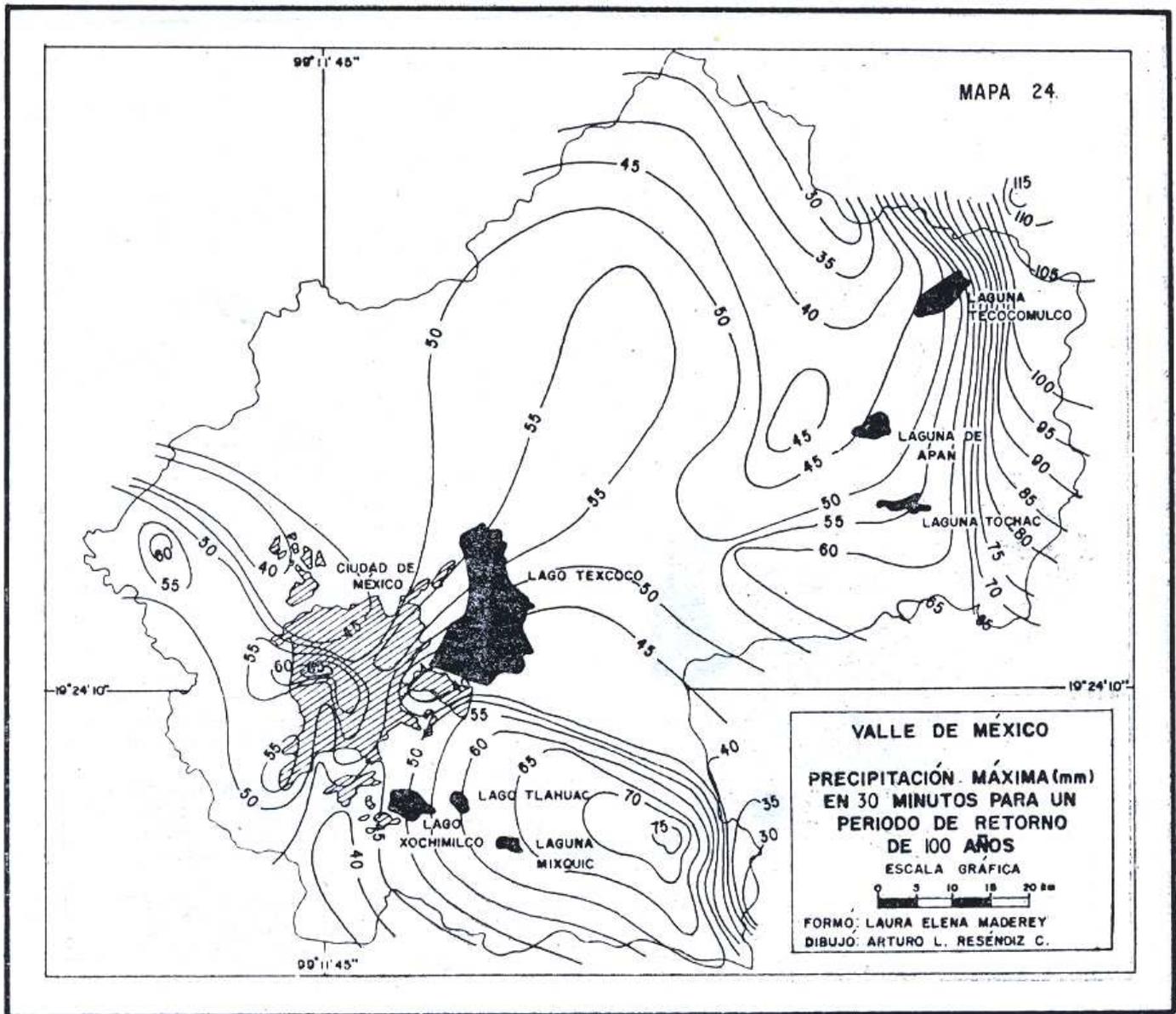


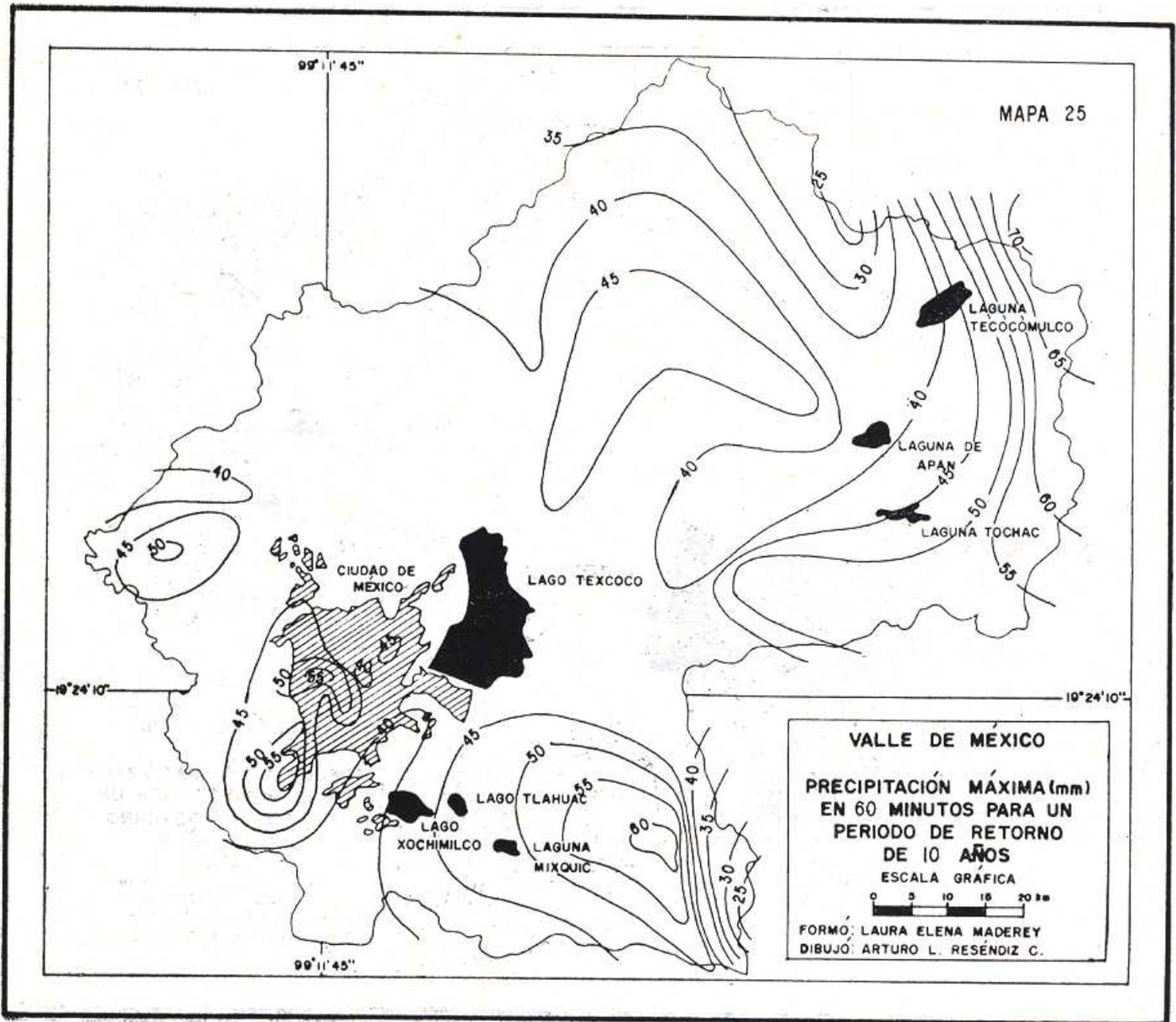


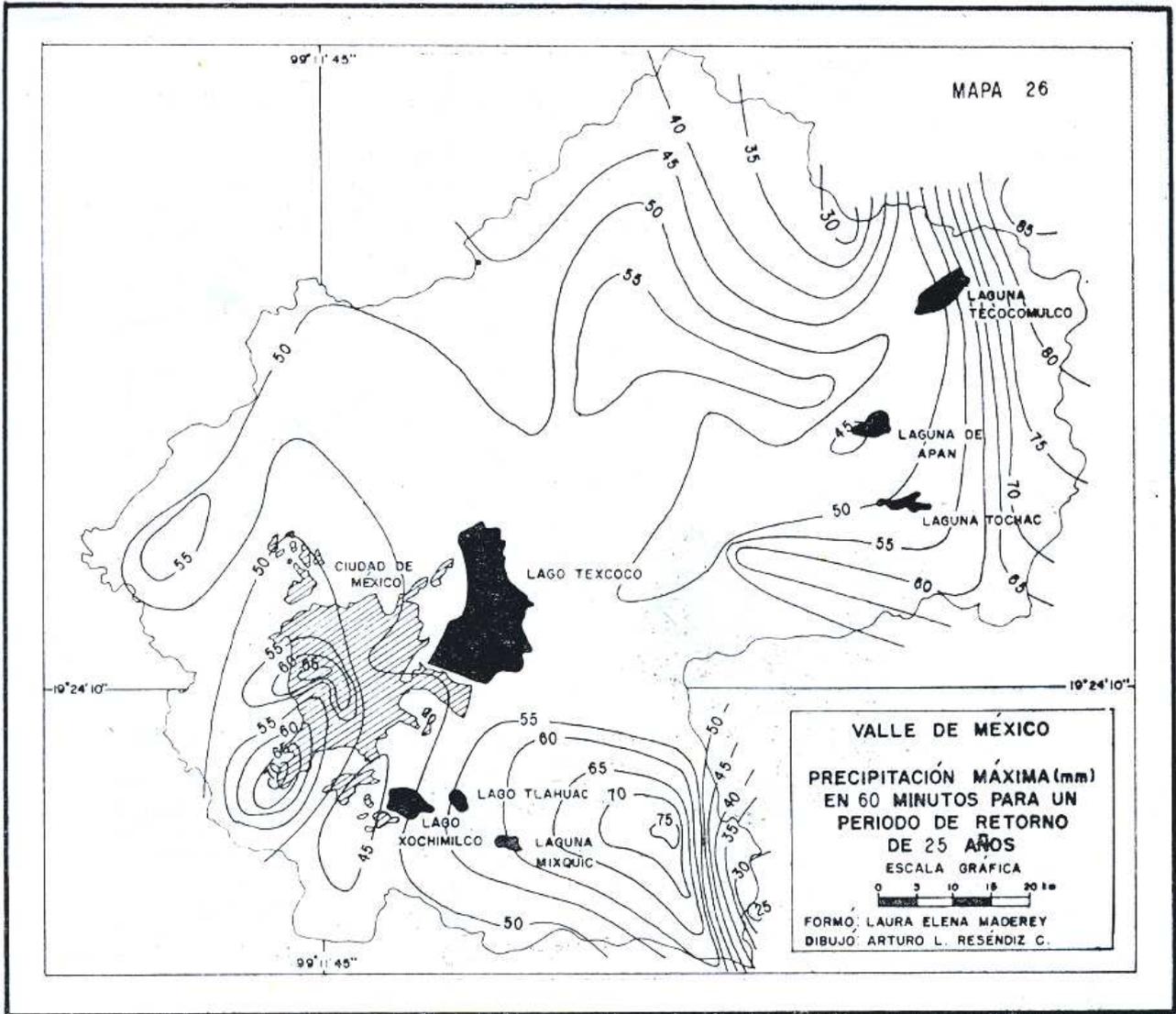


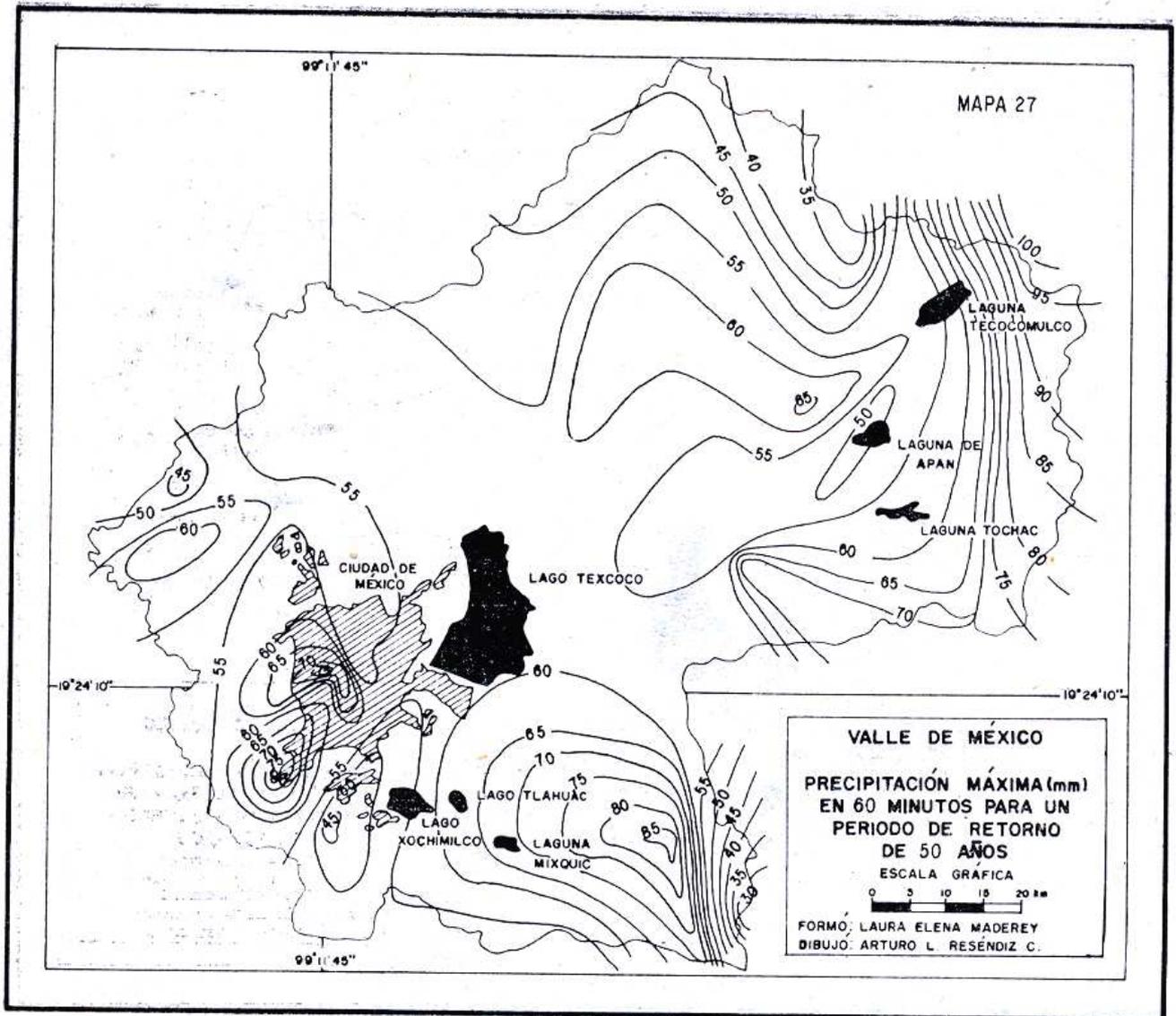


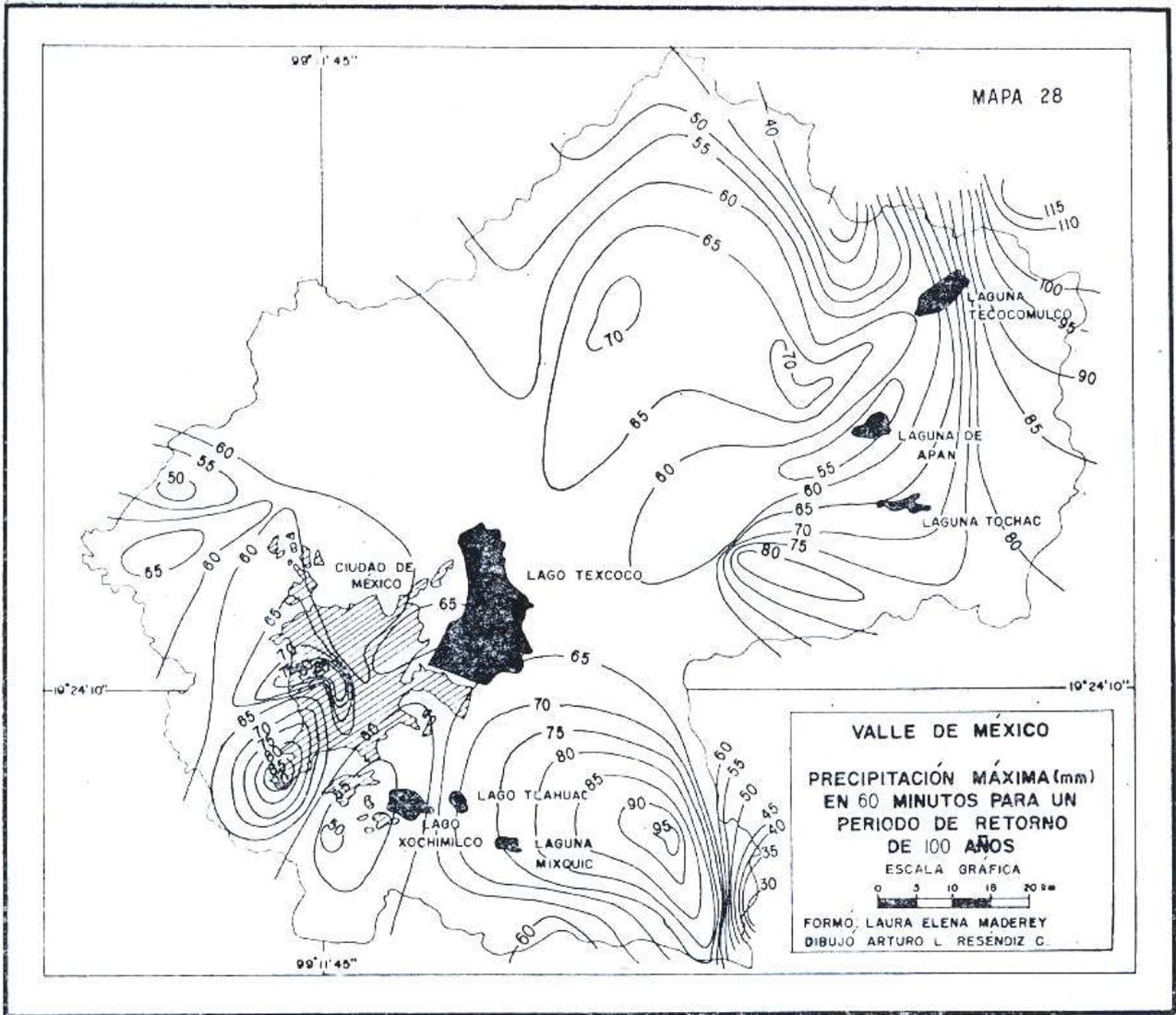




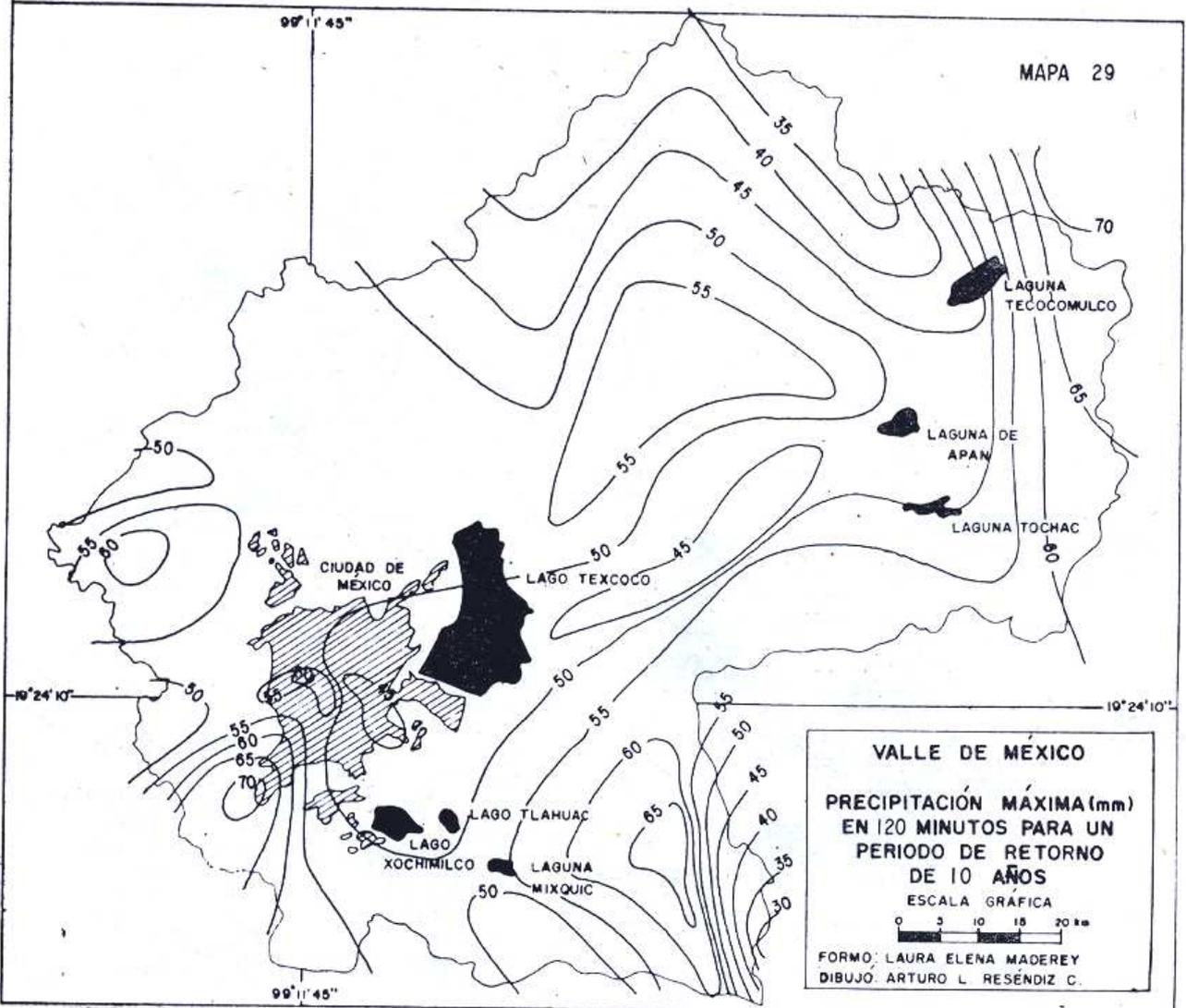


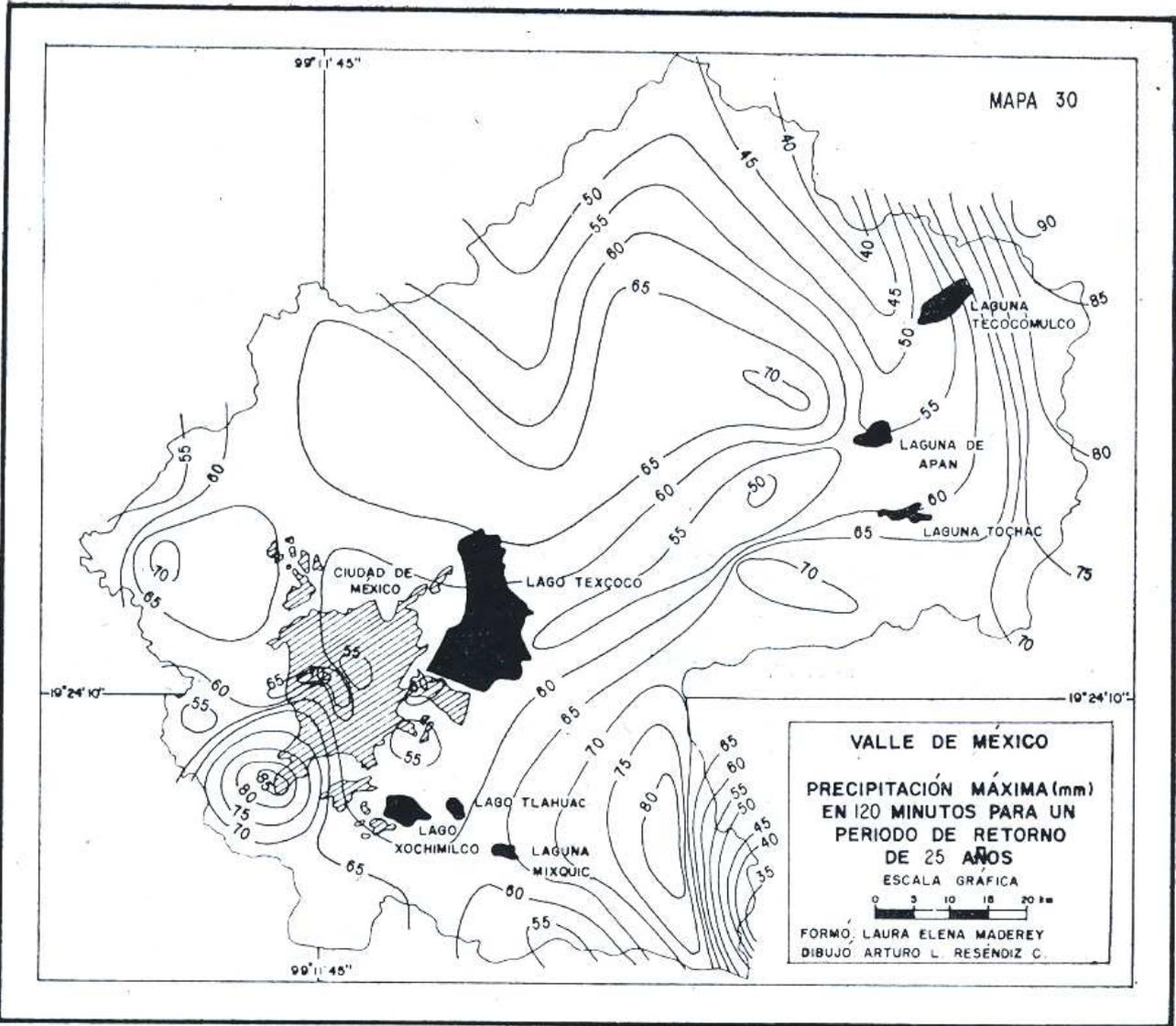


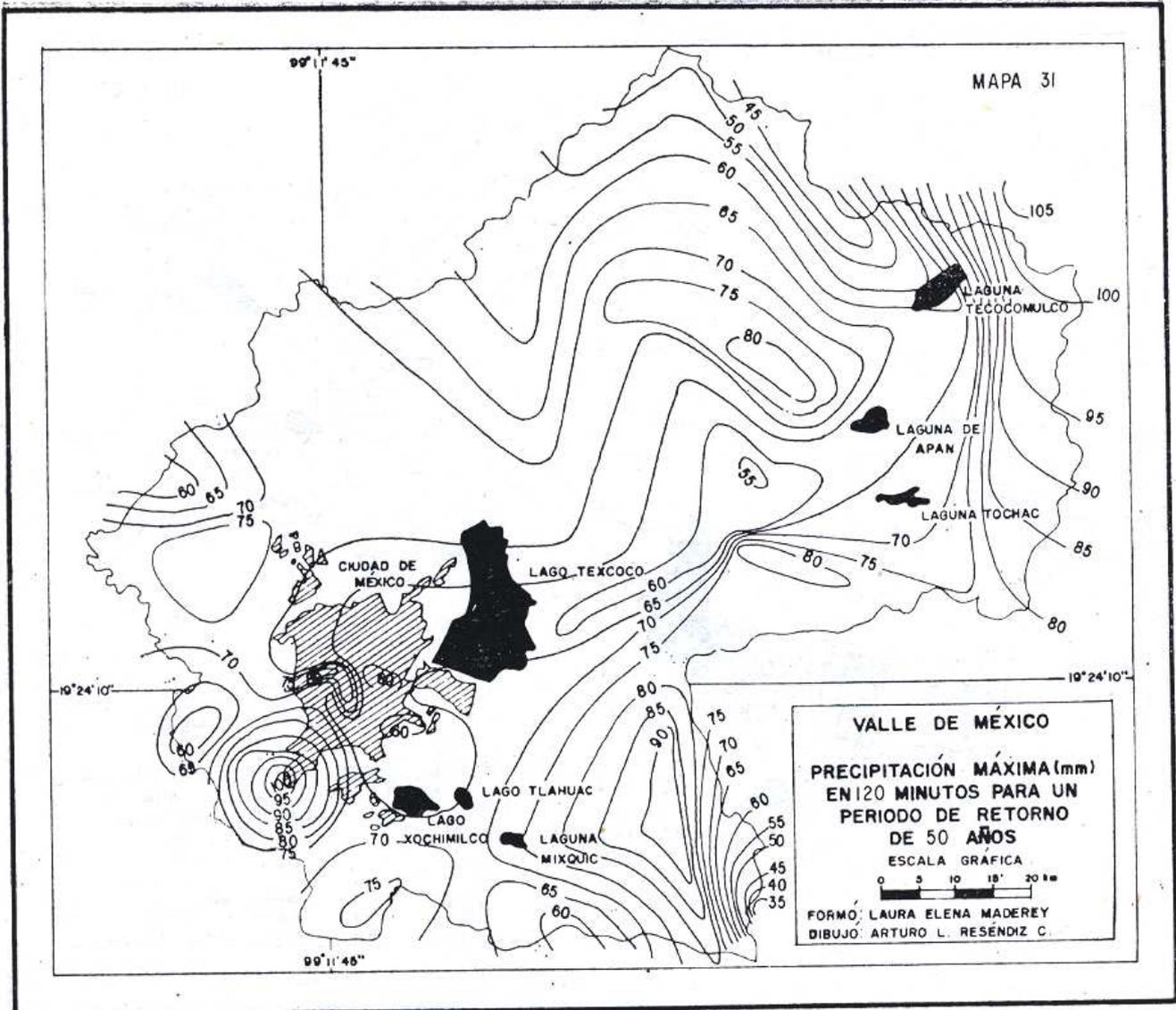


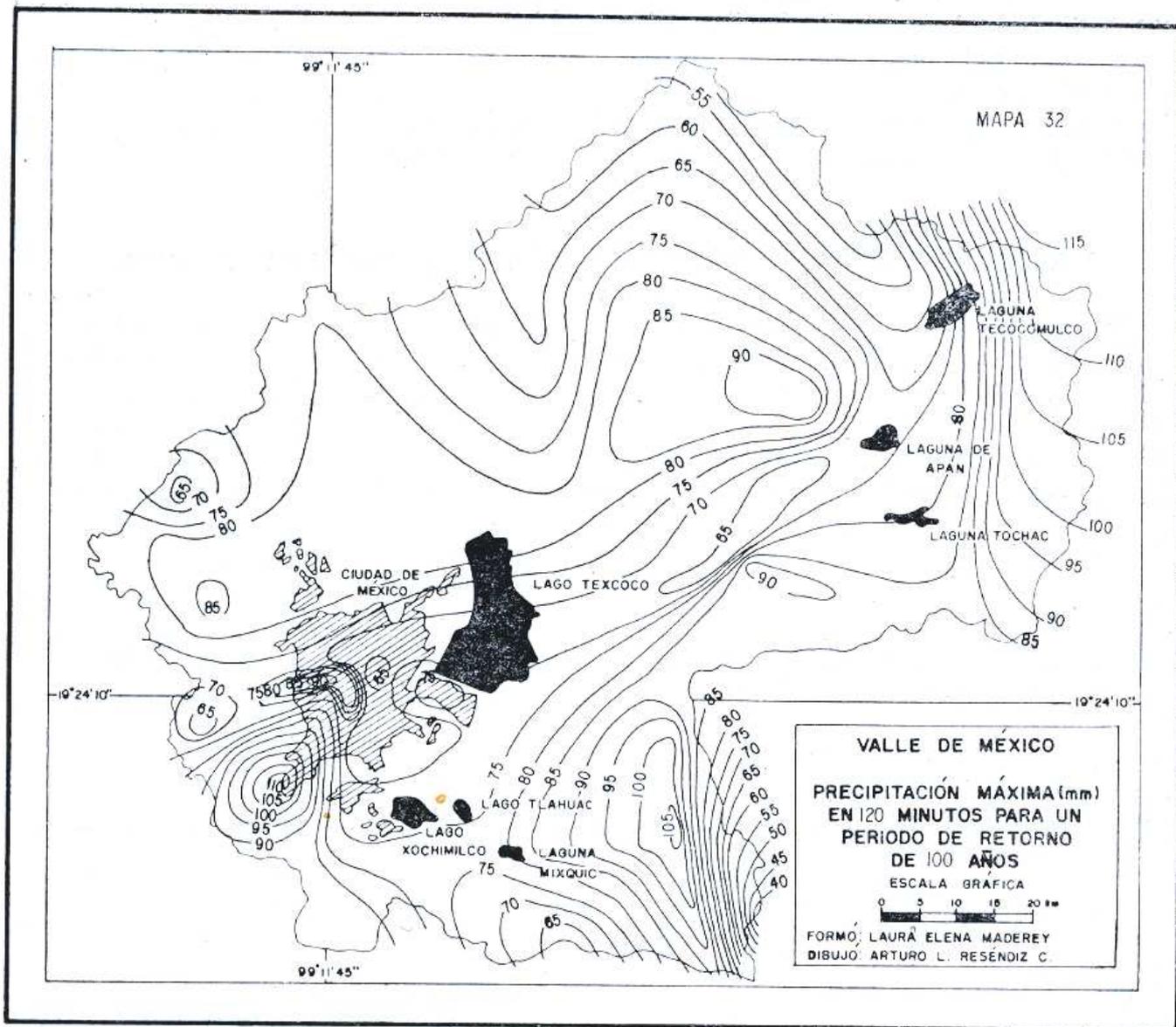


MAPA 29









dia, por lo que necesariamente, para los sitios en los que la altura de la lluvia, en las distintas duraciones, es mayor, los valores esperados tendrán que ser más grandes que en los lugares donde dicha altura es menor.

Por otra parte, con los valores deducidos para la estación meteorológica Tacubaya, la de más años de registros (43), se trazaron las curvas de intensidad máxima de lluvia —duración— frecuencia (gráfica 1) y de altura de la lluvia —duración— frecuencia (gráfica 2). Con estas curvas se verifica lo referente a que a menor duración mayor intensidad y menor altura de la lluvia, mien-

tras que a mayor duración menor intensidad y mayor altura de la lluvia.

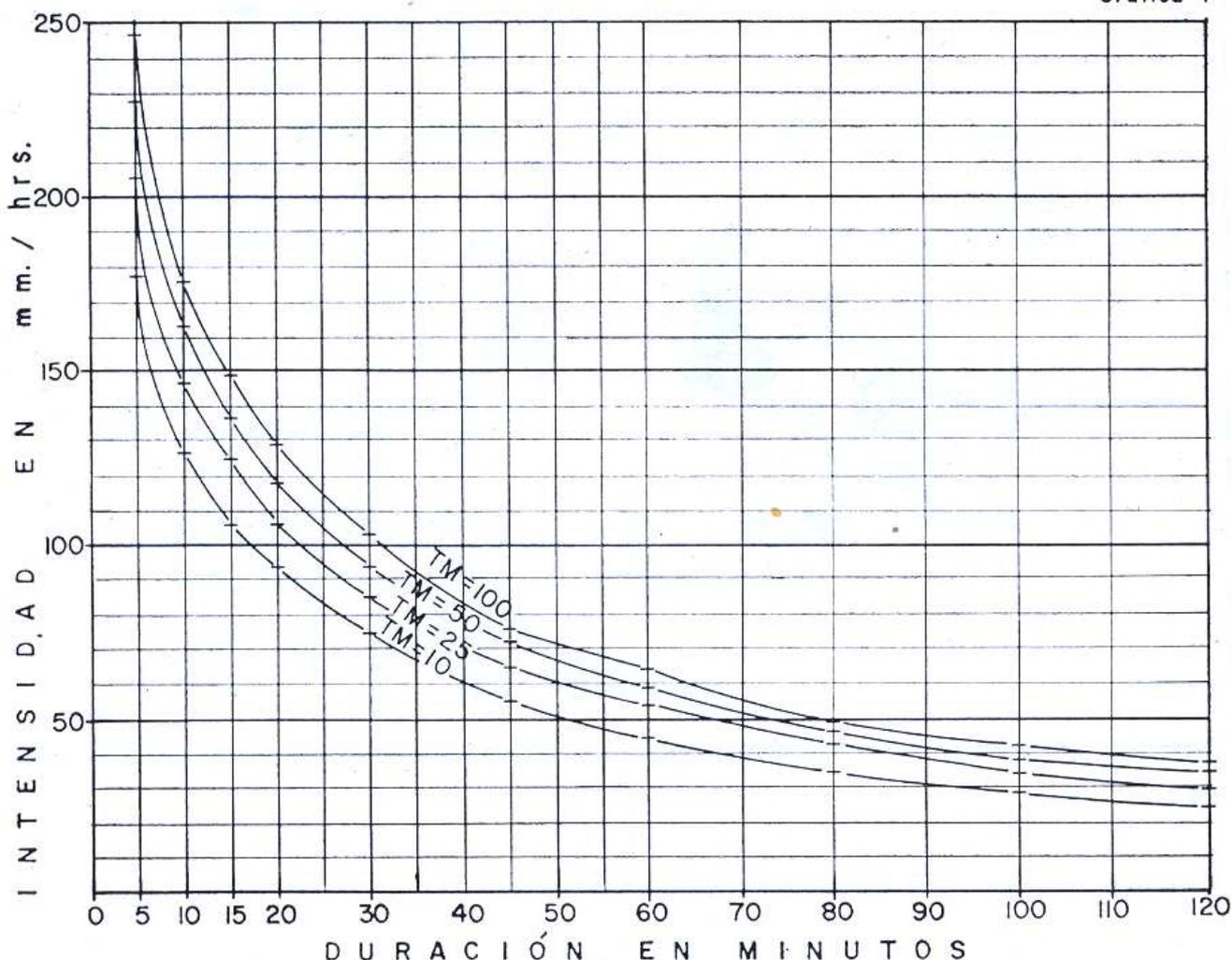
Del examen del comportamiento espacial de las intensidades máximas de precipitación aquí estudiadas, resaltan dos aspectos principales:

1. La distribución de las intensidades máximas de la lluvia se realiza preferentemente a manera de centros o células de valores altos y bajos, lo cual se encuentra íntimamente relacionado con los efectos orográfico y térmico.

Los centros o células indicadores de la ocurrencia de las mayores intensidades má-

CURVAS DE INTENSIDAD MÁXIMA DE LLUVIA - DURACIÓN - FRECUENCIA  
TACUBAYA D. F.

Gráfica 1

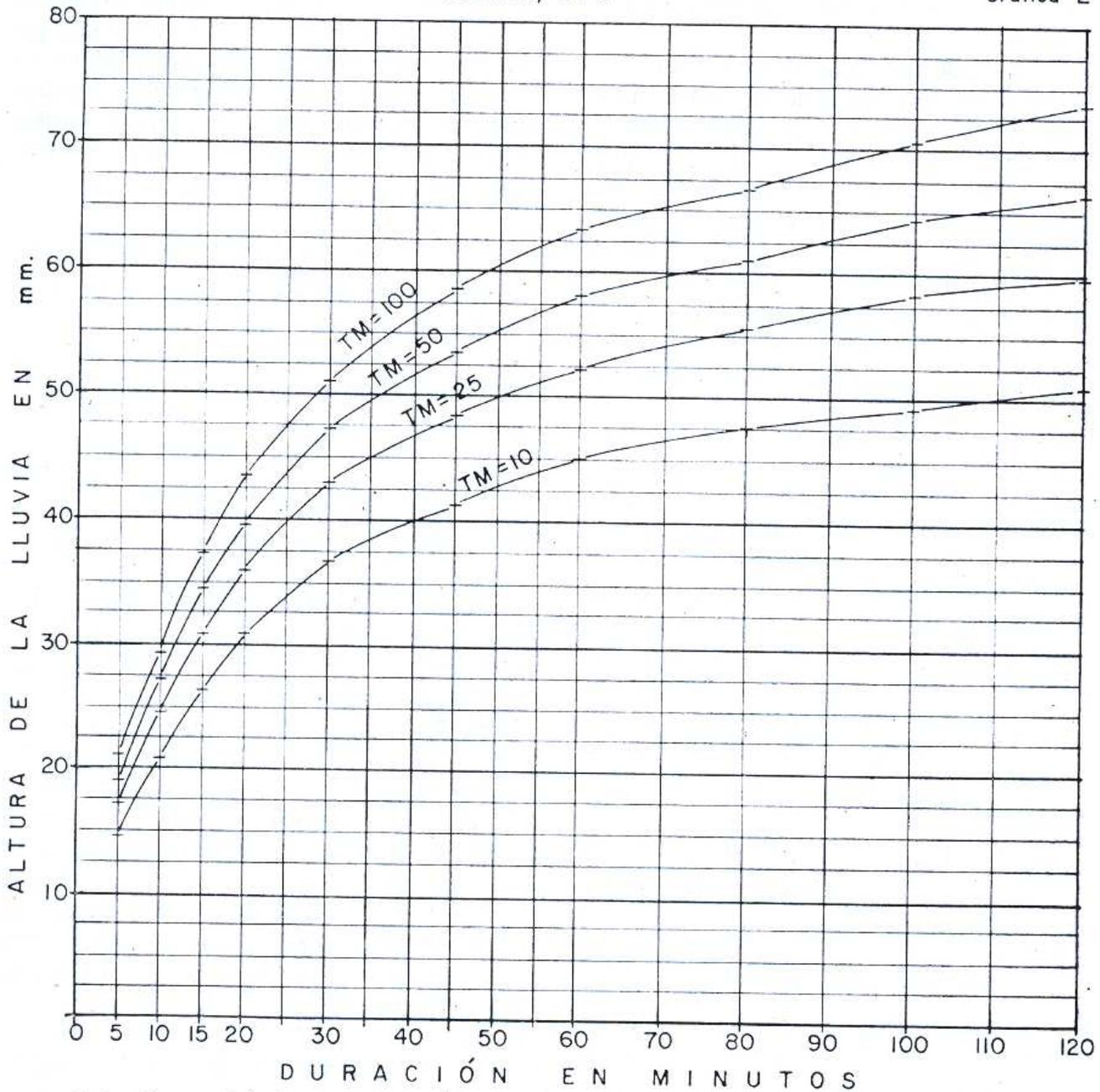


Nota: La cuadrícula la construyó el Sr. Jorge Adalberto Rivas

Formó: Gerardo Bustos T.

CURVAS DE ALTURA DE LA LLUVIA - DURACIÓN - FRECUENCIA  
TACUBAYA, D. F.

Gráfica 2



Nota: La cuadrícula la construyó el Sr. Jorge Adalberto Rivas Lobera

Formó: Gerardo Bustos T.

ximas de la precipitación, que se localizan en el noreste, fuera del límite del Valle aunque muy próximo a él, en el oeste, sobre las sierras de Monte Alto y de Las Cruces, y en el sureste, revelan cómo las masas de aire, ante la presencia del relieve se ven forzadas a depositar su humedad irregularmen-

te a lo largo de las laderas de las barreras montañosas en un área relativamente reducida.

En estas zonas, con excepción de la célula del noreste, fuera del área en estudio, el efecto térmico está combinado con el orográfico, pues las masas de aire húmedo an-

tes de encontrarse con las sierras fluyen por una superficie lo suficientemente cálida como para transformarlas en inestables y causar la convección.

En el Valle propiamente dicho, unas veces en el centro y otras desplazado hacia el norte, y en ocasiones más amplio que en otras, se forma un centro o célula de intensidad máxima de la precipitación, no uno de los de mayor valor, pero tampoco uno de los de menor intensidad máxima. Esta célula es producto de la convección local, consecuencia, como ya varias veces se ha mencionado, del contacto de las masas de aire húmedo con la superficie cálida del mismo.

El que la precipitación más intensa suceda en áreas hasta cierto punto pequeñas, se explica porque la masa de aire se condensa y precipita violentamente, incluso una sola nube puede ser motivo de una intensidad máxima de lluvia. Por esta razón las mayores intensidades se manifiestan como centros o células de lluvia máxima que, lógicamente, están compensados por centros o células, o bien áreas más extensas de lluvia mínima, como se puede comprobar en los mapas ya citados.

2. La ciudad de México ejerce una influencia notoria en la distribución de las intensidades máximas examinadas. En su parte oeste se registra uno de los valores más altos del Valle de México. El crecimiento tan acelerado de este centro urbano, tanto en extensión (actualmente ocupa aproximadamente 650 Km<sup>2</sup>) como en número de habitantes (más de 12 millones), suscita una serie de alteraciones físicas que repercuten en este tipo de fenómeno.

Es necesario llamar la atención sobre el hecho de que el crecimiento de la ciudad genera un aumento local de la temperatura, y si a esto se agrega que dicho crecimiento se lleva a cabo principalmente hacia el sur y oeste, o sea hacia las zonas montañosas, se puede suponer que la reacción de las masas de aire húmedo al invadir esta superficie, frente al efecto combinado de

la orografía y la inestabilidad que aquí adquieren, es la de producir las intensas precipitaciones observadas. También es importante hacer alusión a la capa de *smog* que envuelve a la ciudad, misma que influye en la precipitación, pues las partículas de humo y polvo que lo constituyen forman núcleos higroscópicos que ayudan a mayor condensación.

### c) *Precipitación máxima en 24 horas*

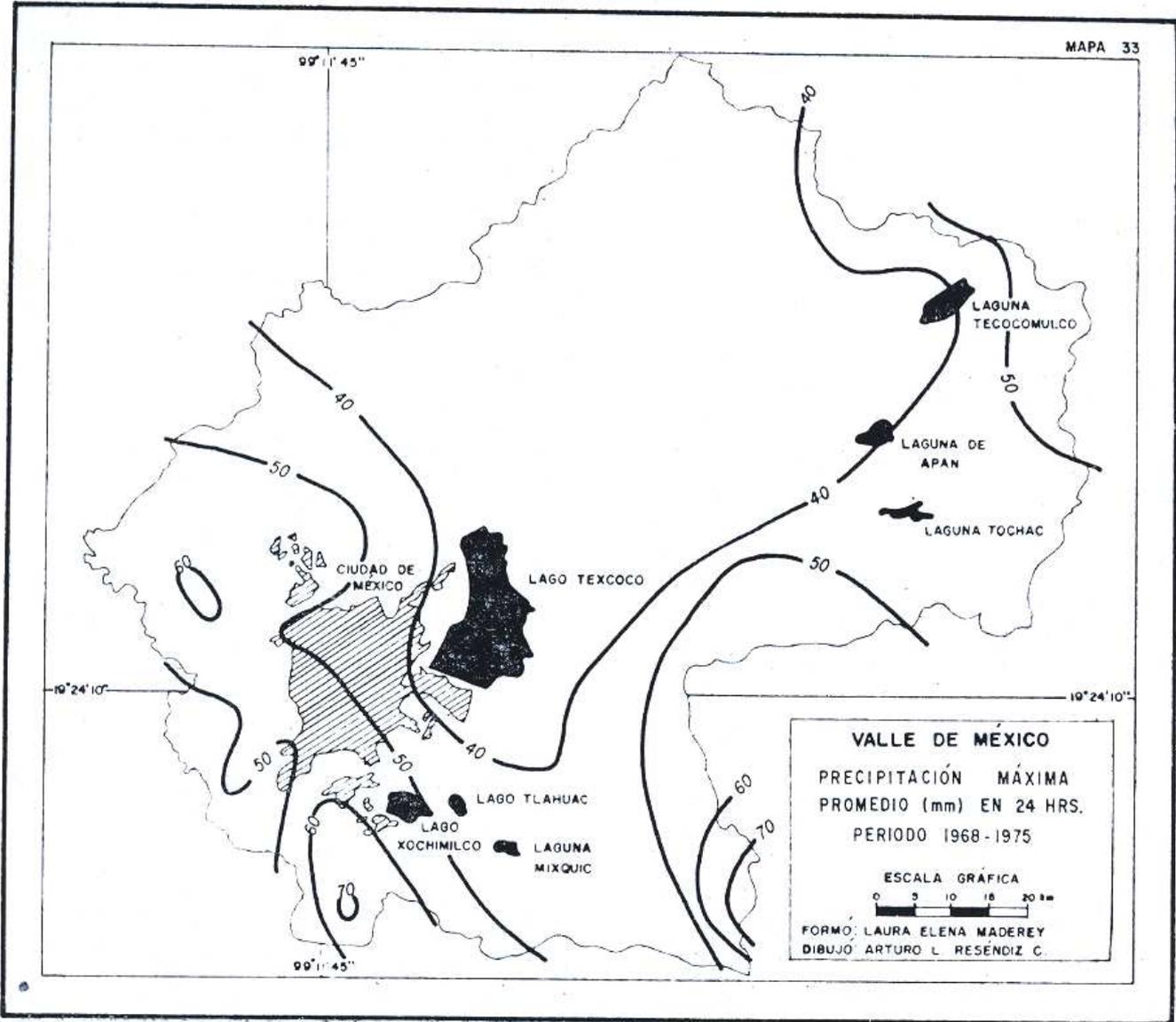
Con objeto de poder comparar la distribución de la intensidad máxima de la lluvia en las duraciones consideradas, con la de una duración más grande, se eligió como intervalo un día.

En el mapa 33 se muestran las isoyetas correspondientes a la precipitación máxima promedio caída en 24 horas durante el periodo 1968-1975.<sup>9</sup> En él se nota claramente cierta similitud de la conformación de las isolíneas a las de la precipitación media anual (mapa 3); no obstante, se manifiesta la influencia de la ciudad de México que afecta la continuidad de las isoyetas a lo largo de las sierras de Monte Alto y de Las Cruces.

Por lo que respecta a los valores de las isoyetas, éstos indican que existe una relación con el relieve de manera parecida a la que existe con la precipitación media anual, es decir, las precipitaciones más cuantiosas se localizan, en general, en las partes altas de la zona en cuestión y las más bajas hacia el norte de ésta.

La explicación de la diferencia que existe entre la distribución de la intensidad máxima de la lluvia, para duraciones relativamente cortas, y la precipitación máxima promedio en 24 horas, radica seguramente en que la primera se debe a la precipitación relativamente corta que abarca un

<sup>9</sup> La brevedad del periodo se debe a que, como los registros son muy irregulares, se optó por escoger un número de años parejo para las 50 estaciones meteorológicas con las que se trabajó. La información se obtuvo en la Comisión de Aguas del Valle de México, SARH.



área más bien pequeña, por las causas estudiadas; en cambio, la segunda es producida por una precipitación generalizada en áreas mayores, aunque bien puede causarla una precipitación intensa en su inicio, que se prolongue por varias horas, ya con una intensidad menor, pero constante, cubriendo entonces superficies más extensas, lo que determina que la lluvia se distribuya más regularmente.

#### IV. VARIACION DE LA INTENSIDAD MAXIMA DE LA PRECIPITACION EN EL TIEMPO

Al encontrar que en el centro urbano más grande del Valle de México se localiza uno de los valores más altos de la intensidad máxima de la precipitación, y teniendo en cuenta que el crecimiento de la ciudad causa alteraciones en el medio, se juzgó conveniente analizar las series de las intensidades máximas anuales, con el objeto de ver si presentaban alguna tendencia.

Para tal efecto se eligieron estaciones situadas dentro y fuera de la ciudad (13 en total), que tuvieron 15 años o más de observaciones. Se graficaron las intensidades máximas anuales correspondientes a las duraciones 5 y 60 minutos, y asimismo el valor medio de ellas. Al graficar se observó que, con excepción de Tacubaya, las demás estaciones tienen varios años de interrupción, o bien el número de años no resulta suficiente para ver fácilmente la distribución de los valores en el tiempo. A pesar de esto se pudo hacer una interpretación de lo que se vio.

En 4 estaciones pluviográficas se nota tendencia de la intensidad máxima anual de la lluvia a aumentar con el tiempo; tres de ellas se localizan dentro de la ciudad de México: Tacubaya, Departamento del D. F. y la Condesa, y una fuera del área urbana: Ciudad Sahagún, centro industrial en el Estado de México (gráfica 3). El resto de las estaciones, 2 dentro de la ciudad y 7

fuera del área urbana, no presentaron tendencia alguna.

Para representar más objetivamente la tendencia que muestran las series de intensidades máximas anuales de la lluvia se calculó la recta de regresión (gráfica 3). En realidad, la recta acusa muy poca pendiente en las 4 estaciones citadas, tanto para la duración de 5 minutos como para la de 60; no obstante, se ve claramente la tendencia de la intensidad máxima anual de la precipitación a incrementarse.

Por lo que respecta a la posición de los valores en relación con la recta que representa la media de las series, se pueden distinguir dos periodos, uno en el que la mayor parte de las intensidades máximas anuales quedan por debajo de la recta o bien se encuentran indistintamente arriba o abajo de ella, y otro en el que las intensidades examinadas tienden a ser más altas que la media o a permanecer próximas a ella.

En las estaciones situadas dentro del área urbana de la ciudad de México se advierte que el segundo periodo empieza a manifestarse aproximadamente a partir de 1958, en ambas duraciones. No sucede así en Ciudad Sahagún en donde hay menor número de años disponibles y se nota que el segundo periodo se señala a partir de 1970, para la duración de 5 minutos, y desde 1965 para la de 60 minutos.

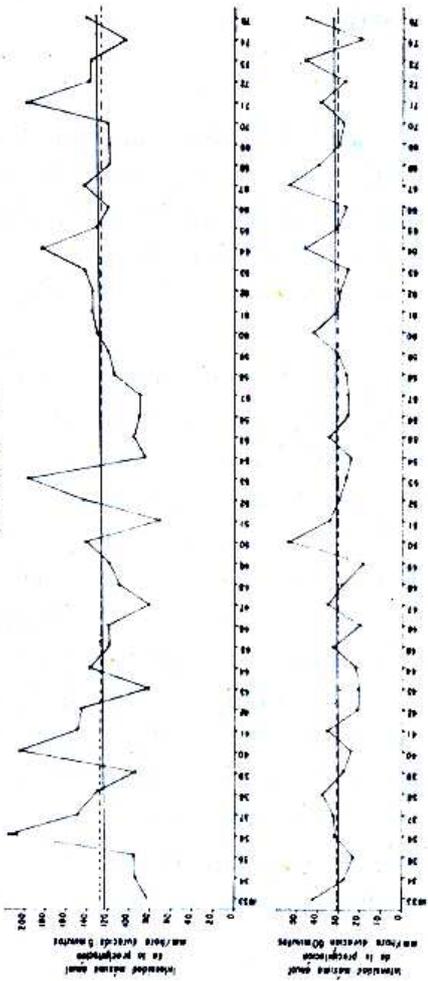
Con el fin de encontrar con qué nivel o coeficiente de confianza se puede afirmar que los dos periodos que revelan las series examinadas están formados por dos conjuntos de observaciones que no pertenecen a la misma población, es decir, que se derivan de la existencia de condiciones, en este caso ambientales, diferentes en uno y otro periodo, se aplicó la prueba "t",<sup>10</sup> llegándose a los siguientes resultados (cuadro 1):

Por lo que se ve en el cuadro 1, puede decirse que el nivel de confianza es alto y

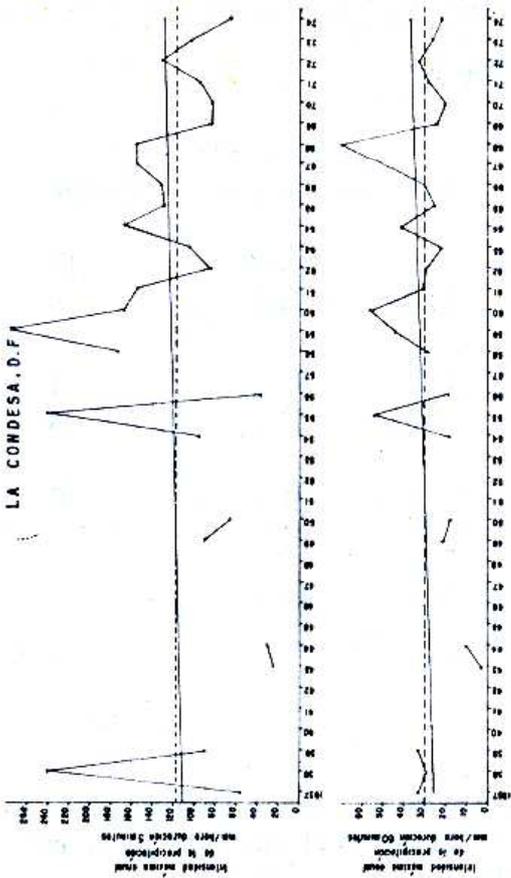
<sup>10</sup> Cole, J. P., 1975, pp. 34 y 35.

Haan, Ch. T., 1977, pp. 120-122 y 336.

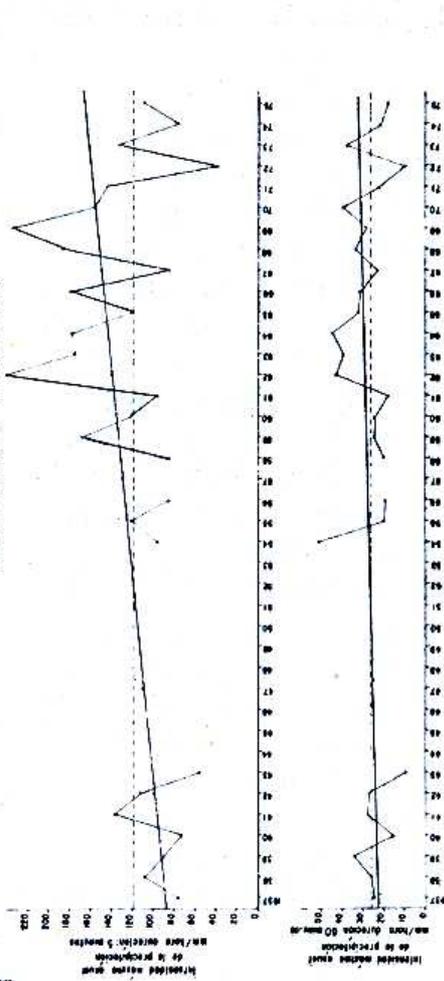
TACUBAYA . D.F.



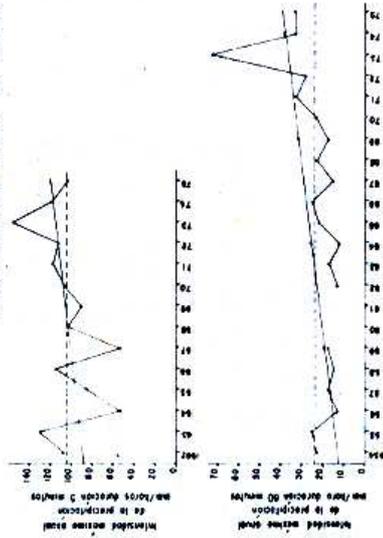
LA CONDESA . D.F.



DEPARTAMENTO DEL D.F. D.F.



CIUDAD SAHAGÚN . ESTADO DE MÉXICO



GRÁFICA 3

VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD MÁXIMA DE LA PRECIPITACIÓN EN EL TIEMPO

--- Valor Medio  
 --- Tendencia Observada  
 Formó Laura Elena Madero R.  
 Dibujó Arturo L. Reséndez Cruz

CUADRO 1

PRUEBA "t"

<i>Estación</i>	<i>Primer periodo</i>	<i>Segundo periodo</i>	<i>"t"</i>	<i>Coefficiente de confianza</i>	<i>Significancia</i>
Tacubaya	(1) 1933-1957	1958-1975	1.32	87%	13
	(2) 1933-1957	1958-1975	1.82	94%	6
Departamento del D. F.	(1) 1937-1957	1958-1975	3.20	99%	1
	(2) 1937-1957	1958-1975	2.06	97%	3
La Condesa	(1) 1937-1957	1958-1975	1.72	94%	6
	(2) 1937-1957	1958-1975	1.90	94%	6
Cd. Sahagún	(1) 1962-1969	1970-1975	2.04	94%	6
	(2) 1954-1964	1965-1975	2.30	96%	4

(1) para la duración de 5 minutos

(2) para la duración de 60 minutos

Nota: Existen varios años sin datos, por interrupción en los registros; además, el número de años de observaciones para efectuar el análisis, salvo en Tacubaya, no es precisamente el óptimo, no obstante, los resultados se toman en cuenta dada la tendencia que se observó en las series.

que, en general, la diferencia entre los dos periodos es significativa.

Por otra parte, se consideró interesante ver la frecuencia con que se presentan al año los valores más altos de la intensidad de la precipitación, para ello sólo se tomaron en cuenta dos estaciones meteorológicas, Tacubaya y Ciudad Sahagún, por ser la de más años de registro (43) y por estar fuera del área urbana de la ciudad de México, respectivamente. Se consideró el valor más bajo de cada una de las series de intensidades máximas anuales para los 5 y 60 minutos de duración, y se contó el número de veces que se presenta ese valor o uno más alto en cada año. Así, se trazó la gráfica 4 en la que se nota que, al igual que con las intensidades máximas anuales, existe una tendencia de aumento. En este caso dicha tendencia es que cada año haya mayor número de precipitaciones de gran in-

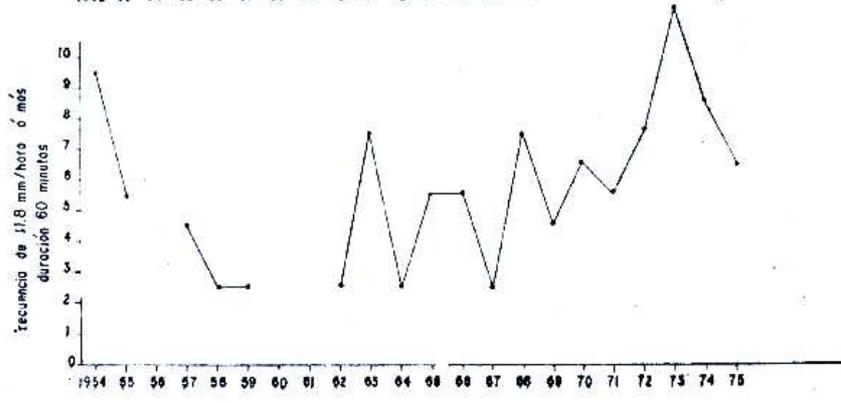
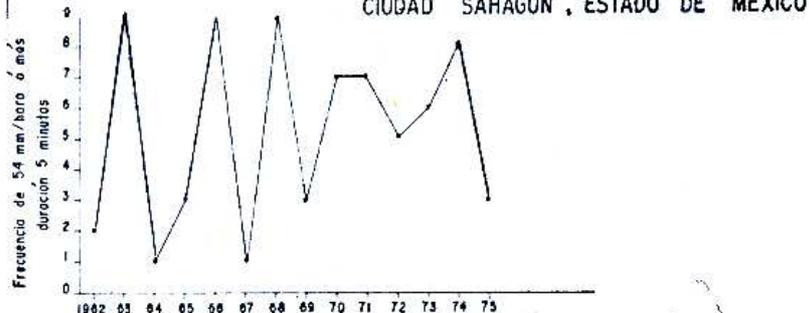
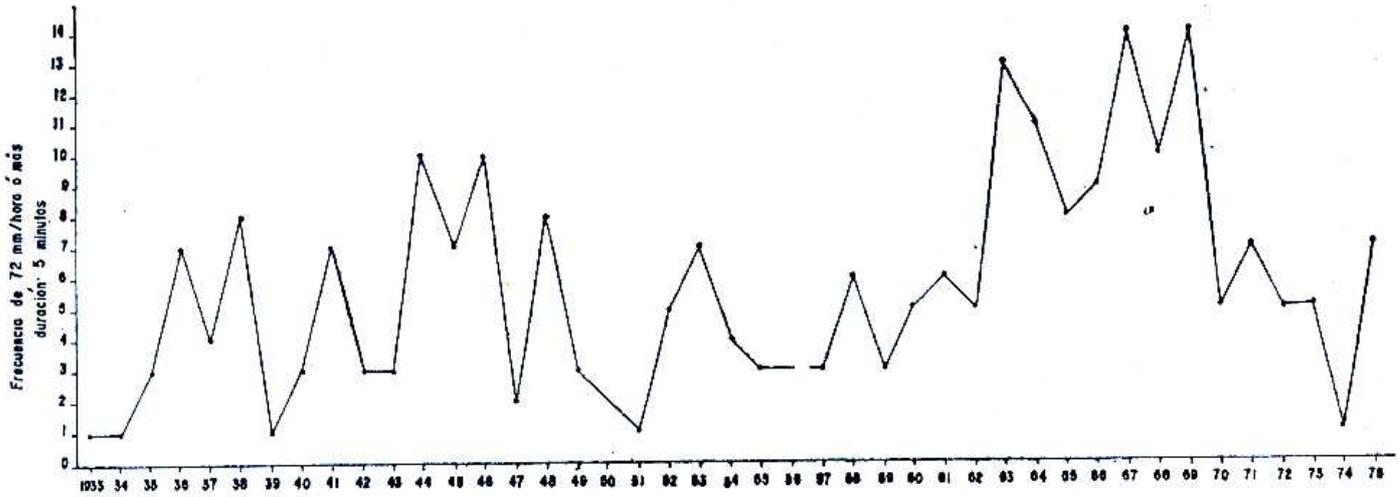
tensidad. Además, también se advierten los dos periodos de que se habló cuando se trataron las series de las intensidades máximas anuales, y se observa que el segundo igualmente, se inicia desde 1958 aproximadamente.

Los análisis efectuados con las series de intensidad máxima anual de la lluvia inducen a relacionar los resultados que se obtuvieron con las características de los lugares en donde se encuentran las estaciones meteorológicas que registraron esas series.

Ya cuando se tocó la influencia que ejerce la ciudad de México en la distribución de la intensidad máxima de la precipitación, se hizo alusión al efecto en la temperatura y aumento de la contaminación que produce el crecimiento de la ciudad.

A este respecto, el Dr. Jáuregui O., en su trabajo "La isla de lluvia de la ciudad de

TACUBAYA , D.F.



GRÁFICA 4

FRECUENCIAS DE INTENSIDADES MÁXIMAS DE LA PRECIPITACIÓN

FORMARON: Carlos Coronado G. y Gerardo Bustos T.

DIBUJÓ: Arturo L. Reséndiz Cruz

México”<sup>11</sup> concluye que, la “intensificación de la isla de calor urbana induce una mayor actividad convectiva originando un aumento en la lluvia que cae en la ciudad particularmente los días en que el aire citadino está menos contaminado”. Así, “las altas temperaturas del aire urbano, como la turbulencia, favorecen e intensifican las tormentas urbanas, mientras que los núcleos potenciales de condensación y congelación (presentes en el contaminado aire urbano) juegan un papel secundario”. Sin embargo, en los datos presentados en este trabajo también destaca el efecto de la contaminación en el incremento de precipitación, pues en el día de más contaminación atmosférica, el viernes, se acusa un aumento tanto de la precipitación media diaria como de la frecuencia de aguaceros. Se puede decir que la intensidad de la precipitación y la frecuencia de la misma aumentan en los días de mayor limpieza del aire y en los de mayor contaminación, aunque dicho aumento es más significativo en el primer caso; es decir, es más importante el efecto de la temperatura del ambiente urbano que el de la contaminación atmosférica.

Por lo que se refiere a la manera como han ido cambiando las condiciones de calentamiento y de la contaminación atmosférica en la ciudad de México, en el trabajo *Tendencias climáticas en la ciudad de México*<sup>12</sup> se asienta que las temperaturas máximas permanecen más o menos iguales; en cambio, las mínimas aumentan en los últimos años y la isla de calor definida por las isothermas medias anuales se ha extendido y sus valores han aumentado. En cuanto a la contaminación atmosférica, los contaminantes tienden a aumentar, siendo las zonas centro y norte las más afectadas.

Ciudad Sahagún, como se dijo, es un centro industrial del Valle de México, cuyas instalaciones cuentan con grandes hornos

que emiten cantidades considerables de humo, de modo que la tendencia que existe en este sitio al aumento de la intensidad máxima de la precipitación y de la frecuencia de la misma por año, es muy posible que se encuentre relacionada con la contaminación del aire, dada la observación que se hizo sobre el particular en el caso de la ciudad de México.

## V. CONCLUSIONES

Del análisis de la intensidad máxima de la precipitación emanaron interesantes relaciones de las que, a su vez, se infieren ciertos aspectos importantes de recalcar:

1. Tanto la intensidad máxima de la precipitación en intervalos cortos, como la que cae en intervalos mayores (24 h), y la precipitación media anual, observan sus máximos valores en la presencia del relieve montañoso del Valle de México; empero, la primera se registra en áreas relativamente pequeñas debido a las causas que la originan, mientras que las otras, particularmente la precipitación media anual, se distribuyen más o menos uniformemente a lo largo del relieve, con valores que aumentan a medida que crece la altitud.

2. El crecimiento de la ciudad de México ha traído consigo consecuencias que contribuyen notoriamente a que se registre en el área urbana uno de los valores más altos de la intensidad máxima de la precipitación y, además, el hecho sintomático de que se observe una tendencia de incremento, tanto de la intensidad máxima anual de la precipitación, como de la frecuencia de precipitaciones de gran intensidad, cada año.

Estos fenómenos se encuentran directamente relacionados con la deforestación en los alrededores de la ciudad, la constante extensión de la plancha de concreto, que ocasiona el crecimiento urbano, y la contaminación atmosférica que se incrementa con el tiempo. Estos factores determinan una

<sup>11</sup> Jáuregui, O. E., 1974, pp. 150-151.

<sup>12</sup> Caire L. J., Cruz N. F., González G. E., Leal A. G., Olave F. D. y Ramos G. R., 1976.

fuelle de calentamiento en el área urbana, propiciando la intensa convección y, además, un aumento en los núcleos de condensación debido principalmente a la presencia de partículas contaminantes de la atmósfera, como humo y polvo, provenientes de las industrias, exceso de vehículos y de las tolvaneras cuya causa radica en la deforestación.

3. El efecto que la contaminación atmosférica produce en la intensidad de la precipitación queda, hasta cierto punto, corroborado en Ciudad Sahagún, centro industrial en el que, a pesar de no existir valores muy altos de intensidad máxima de la lluvia, sí revela tendencias en el incremento, a

través del tiempo, de los valores y frecuencias de la mencionada intensidad.

Se considera que las conclusiones a las que se ha llegado en este trabajo son importantes porque muestran la estrecha relación que existe entre los diversos componentes de la naturaleza, aspecto fundamental para la óptima utilización de los recursos y su adecuada conservación en bien de los habitantes de una región, por lo que se insiste, una vez más, en la cuidadosa planeación que debe haber en la serie de actividades que implica el desarrollo de un área, el Valle de México en este caso, en especial la ciudad de México que alberga una cuantiosa y creciente población.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Cole, J. P. *Una Introducción al Estudio de Métodos Cuantitativos Aplicables en Geografía*. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F. 1975.
- Caire, L. J.; Cruz, N. F.; González, G. E.; Leal, A. G.; Olave, F. D. y Ramos, G. R. "Tendencias Climáticas en la Ciudad de México". *Anuario de Geografía*. Colegio de Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. Año XVI, pp. 113-154. México, D. F. 1976.
- Chow, V. T. *A General Formula for Hydrologic Frequency Analysis*. Trans. Am. Geophys. Union. Vol. 32. pp. 231-237. Abril, 1951.
- Domínguez, M. R. y Breña, A. "Análisis Climatológico para la Determinación de Tormentas de Diseño en el Valle de México". *Memorias del IV Congreso Nacional de Hidráulica* convocado por la Asociación Mexicana de Hidráulica, celebrado en Acapulco, Guerrero, del 27 al 30 de octubre de 1976. México.
- Haan, Ch. T. *Statistical Methods in Hydrology*. The Iowa State Press University. Ames, Iowa. 1977.
- Jáuregui, O. E. "La Isla de Lluvia de la Ciudad de México". *Revista Recursos Hidráulicos*. Vol. III, Núm. 2. pp. 138-151. México, D. F. 1974.
- Linsley, R. K.; Kohler, M. A. y Paulhus, J. A. *Hidrología para Ingenieros*. Mc Graw Hill Book Company. México, 1967.
- SARH. Comisión de Aguas del Valle de México. *Boletines Hidrológicos. Datos del Valle de México correspondientes a los años 1951-1975*. México, D. F.
- S.O.P. Dirección General de Servicios Técnicos. Departamento de Geotecnia. Oficina de Hidrología y Drenaje. *Modelos de Análisis de las Características de la Precipitación y de las Condiciones de la Cuenca para obtener Criterios de Diseño de Estructuras de Cruce y Drenaje de Carreteras*. México, D. F. Diciembre de 1973.
- S.O.P. Dirección General de Servicios Técnicos. *Isoyetas de la Cuenca Alta del Río Lerma*. México, D. F. Diciembre de 1974.
- Springall, G. R. *Hidrología. Análisis Estadístico y Probabilístico de Datos Hidrológicos*. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D. F. 1975.