



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

“INTENSIDADES DE LLUVIA PARA DISEÑO HIDRÁULICO DE OBRAS DE DRENAJE DE CARRETERAS. COMPARACIÓN ENTRE LAS CURVAS I-d-Tr OBTENIDAS POR LA SCT A PARTIR DE MEDICIONES CON PLUVIÓGRAFO Y LOS MÉTODOS INDIRECTOS DE CHEN Y DE BELL”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN
LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES

PRESENTA:

Ing. Gabriel Atala Barrero

ASESOR: Dr. Jesús Alberto Rodríguez Castro

COASESOR: Dr. Carlos Chávez Negrete

MORELIA, MICH.

MARZO 2018

Dedicatorias:

A mis padres

María Teresa Barrero Cantón (†) y

Antonio Atala Wejbe (†)

Por darme la vida, principios y valores.

A mi esposa

Rosario Landeros Mata (†)

El Amor de mi vida.

A nuestros hijos

Gabriel Atala García,

René Gustavo Díaz Landeros y

Jorge Isaac Díaz Landeros.

Regalos de Dios.

A mis hermanos

Susana Atala Barrero y

Antonio Atala Barrero.

Mi corazón siempre con ellos.

A todos mis amigos

Presentes en mí, en todo tiempo.

Agradecimientos:

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

por su distinguida planeación y organización del programa de Posgrado:
Maestría en Ingeniería del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres.

A los profesores de la Universidad:

Dr. Jorge Alarcón Ibarra

Dr. José Eleazar Arreygue Rocha

M. I. Julio Alejandro Chávez Cárdenas

Dr. Carlos Chávez Negrete

Dr. Hugo Hernández Barrios

M. I. Felipe de Jesús Jerónimo Rodríguez

M.D.U. Ing. Pedro Ángel López Monroy

Dr. Nelio Pastor Gómez

Dr. Jesús Alberto Rodríguez Castro

M. C. Ricardo Ruiz Chávez

Dr. Jaime Saavedra Rosales

Dr. Mario Salazar Amaya

por su profesionalismo, compromiso y entusiasmo al transmitir sus
conocimientos y experiencia.

Un especial reconocimiento al Dr. Jesús Alberto Rodríguez Castro,

por su excelente dirección y asesoría en la realización del presente trabajo

y al Dr. Carlos Chávez Negrete,

por la revisión completa del escrito y sus valiosos comentarios.

A la Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y
Transportes

por ser siempre un referente en mi desarrollo profesional.

Resumen.

Los escurrimientos generados por las lluvias pueden afectar las carreteras. Por ello, es necesario drenar el agua mediante puentes, alcantarillas, cunetas y contracunetas. La mayoría de estas obras de drenaje descargan cuencas pequeñas, cuya respuesta es rápida a lluvias de intensidad alta y duración corta.

El diseño hidráulico de las obras de drenaje nuevas o la revisión del funcionamiento hidráulico de obras existentes requiere de mapas de isoyetas o curvas de Intensidad de lluvia – duración – Período de retorno (I – d – T) elaboradas a partir de mediciones con pluviógrafos.

La distribución y número de pluviógrafos en México es insuficiente y por ello, ante la carencia de mediciones, se ha tendido a utilizar métodos indirectos para calcular intensidades de lluvia para duraciones cortas, a partir de alturas de lluvia para duraciones de una hora y 24 horas. Los métodos más comúnmente usados son el de Chen y el de Bell.

Con objeto de comparar y determinar el grado de concordancia, se elaboraron tres grupos de curvas I – d – T: empleando las Isoyetas I – d – T elaboradas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en 2000 y empleando los métodos indirectos de Chen y de Bell. Se analizaron los resultados obtenidos y se llegó a la conclusión de que no es conveniente usar tales métodos indirectos en el país.

Esta investigación también propone acciones para mejorar la distribución de pluviógrafos, la medición de la precipitación pluvial y su procesamiento estadístico.

Asimismo explica: la aplicación de intensidades de lluvia en los estudios hidrológicos; la cronología de los aparatos que miden directa o indirectamente la precipitación contra el tiempo; la evolución de la instrumentación pluviográfica en México de 1980 a la fecha, indicando el número de pluviógrafos y su distribución en el territorio nacional; la metodología que se aplica en la SCT para procesar estadísticamente la información pluviográfica y elaborar las Isoyetas de I–d–T y la cronología de los métodos indirectos para calcular intensidades de lluvia, dando énfasis a los de Hershfield, Bell y Chen.

Palabras clave: precipitación, intensidad de lluvia, período de retorno, pluviógrafo, pluviómetro, curvas I – d – T, isoyetas.

Abstract.

Surface runoff generated by rainfall can affect highways. Therefore, it is necessary to drain the water by means of bridges, culverts, ditches and counterditches. Most of this drainage structures drain small basins, with fast response to high intensity and short duration rainfall.

The hydraulic design of new drainage structures or the revision of the hydraulic operation of existing structures requires isohyetal maps or curves of Rainfall intensity – duration – Frequency (I – d – F) based on pluviograph measurements.

The distribution and number of pluviographs in Mexico is insufficient and due to the lack of measurements, there has been a tendency to use indirect methods to calculate rainfall intensities for short durations using 1 hour or 24 hours rainfall depths. The most commonly used methods are Chen's and Bell's.

In order to compare and determine the degree on concordance, three groups of I – d – F curves were elaborated: using the Isohyetal maps elaborated by Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) in 2000 and using the indirect methods proposed by Chen and Bell. The results obtained were analyzed and it was concluded that the use of indirect methods is not convenient in the country.

This research also proposes means of improving the distribution of pluviographs, rainfall measurement and its statistical processing.

The study explains: the application of rainfall intensities in hydrological studies; the chronology of the devices that directly or indirectly measure rainfall during time; the evolution of rainfall instrumentation in Mexico from 1980 to date, indicating the quantity of pluviographs and their distribution in the national territory; the methodology applied by SCT for the statistical processing of rainfall data; the elaboration of I – d – F isohyetal maps and the chronology of the indirect methods to calculate rainfall intensities with emphasis on Hershfield's, Bell's and Chen's methods.

Key words: rainfall, rainfall intensity, frequency (return period), pluviograph, pluviometer, I – d – F curves, isohyetal maps (I – d – F maps).

Índice general

Dedicatorias:	ii
Agradecimientos:	iii
Resumen.	iv
Abstract.	v
Índice general.....	vi
Índice de figuras.	vii
Índice de tablas.	x
Lista de acrónimos.	xiii
Introducción.....	1
Justificación.....	2
Objetivos.	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
Capítulo 1. Importancia de la información de precipitación pluvial en los estudios hidrológicos para vías terrestres.....	4
Capítulo 2. Aparatos de medición de precipitación.....	21
Capítulo 3. Proyecto de instrumentación pluviográfica para la República Mexicana.	38
Capítulo 4. Procesamiento de información pluviográfica para obtener intensidades de lluvia asociadas a duraciones y períodos de retorno.....	45
Capítulo 5. Métodos indirectos para calcular Intensidades de lluvia asociadas a duraciones y períodos de retorno.	56
5.1. Cronología de los métodos más relevantes.	56
5.2. Método de Frederick Charles Bell (1969).	71
5.3. Método de Cheng-Lung Chen (1975 y 1983).	76
Capítulo 6. Análisis comparativo de los métodos directos e indirectos.	87
6.1. Obtención de curvas I-d-T a partir de las Isoyetas I-d-T de SCT 2000. (Método directo).	87
6.2. Curvas I-d-T por el método de Chen.	96
6.3. Curvas I-d-T por el método de Bell.	108
6.4. Análisis comparativo de los métodos.	111
Conclusiones.	115
Bibliografía.	121
Apéndice A.	127

Índice de figuras.

<u>Núm.</u>	<u>Nombre</u>	<u>Pág.</u>
1.1.	Ejemplo de curvas de Intensidad de lluvia-duración-Período de retorno.	7
1.2.	Mapa de Isoyetas de I-d-T del estado de Michoacán. SCT (2000).	8
1.3.	Ejemplo ilustrativo de un hietograma de una tormenta.	9
1.4.	Hidrograma típico de una tormenta aislada. SCT (1984).	10
1.5.	Definición de Hidrograma Unitario (H.U.)	11
1.6.	Relación entre Z y d/tr (reconstruida de Chow, 1962).	16
1.7.	Hidrograma Unitario sintético Triangular SCS.	18
2.1.	Pluviómetro diseñado por Robert Hooke. Strangeways (2010).	22
2.2.	Pluviógrafo de Bevan. Symons (1879).	23
2.3.	Pluviógrafo de Kreil. Symons (1879).	24
2.4.	Diseños de pluviómetros manuales, todos con diferentes tipos de errores. Strangeways (2010).	24
2.5.	Forma y dimensiones de un pluviómetro.	25
2.6.	Pluviógrafo de A. Apps. Symons (1879).	26
2.7.	Pluviógrafo de Beckley. Symons (1871).	27
2.8.	Pluviógrafo de Höttinger. Symons (1879).	27
2.9.	Esquema de funcionamiento de un pluviógrafo de flotador.	29
2.10.	Pluviógrafo de Hellmann – Fuess. Demarée (2003).	29
2.11.	Esquema de funcionamiento de un pluviógrafo de cubeta basculante (reconstruida de Kifissiameteo, 2016).	31
2.12.	Esquema de funcionamiento de un pluviógrafo de balanza. https://theconstructor.org/water-resources/types-of-rain-gauges/12801/	32
2.13.	Radar meteorológico de la Comisión Estatal de Aguas de Querétaro. http://www.ceaqueretaro.gob.mx	33
2.14.	Cobertura de la Red Nacional de Radares Meteorológicos. http://ciclotrop.com	35
3.1.	Localización geográfica de las estaciones pluviográficas del estado de Puebla. SAHOP (1980).	42
4.1.	Curvas I-d-T de la estación Tapachula, Chis. SCT-DGST (1982).	46
4.2.	Procedimiento para obtener las intensidades máximas de lluvia.	49
4.3.	Curvas I-d-T de la Estación A.	52

4.4.	Mapa de isoyetas de I-d-T del estado de Michoacán, para d=5 min y T=50 años.	54
5.1.	Alturas de lluvia para 5 min, en pulgadas, que se espera que ocurran una vez cada 50 años. D.L. Yarnell (1935).	59
5.2.	Relación entre la intensidad de lluvia para una duración de una hora y las intensidades para 5, 15, 30, 120 y 240 minutos, según G.A. Hathaway, 1945 (Fuente: Daniel F. Campos, 1983).	60
5.3.	Relación entre la altura de precipitación media anual y la altura de precipitación para una duración de una hora y período de retorno de 2 años, según USWB (reconstruida de D.F.Campos, 1983).	62
5.4.	Gráfica d contra P_d^2 (reconstruida de D.M.Hershfield, 1962).	65
5.5.	Gráfica d contra P_d^{100} (reconstruida de D.M. Hershfield, 1962).	65
5.6.	Gráfica T contra P_1^T (reconstruida de D.M. Hershfield, 1962).	67
5.7.	Gráfica T contra P_{24}^T (reconstruida de D.M. Hershfield, 1962).	67
5.8.	Ubicación del punto A, considerado para explicar y comprobar el procedimiento que utilizó Hershfield. Mapa obtenido de http://www.worldatlas.com	68
5.9.	Alturas de lluvia de 30 min de duración, en pulgadas, que se espera que ocurran o sean rebasadas, en promedio cada 50 años. D.M Hershfield (1961).	69
5.10.	Relación altura de lluvia – duración para EUA y Australia (reconstruida de Bell, 1969).	72
5.11.	Relación altura de lluvia-frecuencia para períodos de retorno de 1, 5 y 50 años (reconstruida de Bell, 1969).	73
5.12.	Relación altura de lluvia-frecuencia para períodos de retorno de 2, 25 y 100 años (reconstruida de Bell, 1969).	74
5.13.	Datos de la Tabla 5.7 llevados a la escala de probabilidades de Gumbel.	75
5.14.	Ubicación de las 34 ciudades que seleccionó Chen para su estudio.	78
5.15.	Diagrama Altura de precipitación – duración para los EUA (reconstruida de Chen, 1975).	79
5.16.	Curvas estándar I_d^T – d para varias relaciones P_1^T / P_{24}^T (reconstruida de Chen, 1975).	81
5.17.	Relaciones entre los parámetros estándar de tormenta y valores de P_1^T / P_{24}^T (reconstruida de Chen, 1975).	82
5.18.	Relación estándar de intensidad – frecuencia para una duración de 1 h para las 34 ciudades estudiadas (reconstruida de Chen, 1975).	85
6.1.	Estaciones pluviográficas para el análisis	89

6.2.	Curvas I-d-T, Estación Copala, Gro., según Isoyetas SCT 2000.	92
6.3.	Curvas I-d-T, Estación El Palmito, Dgo., según Isoyetas SCT 2000.	92
6.4.	Curvas I-d-T, Estación Hopelchén, Camp., según Isoyetas SCT 2000.	93
6.5.	Curvas I-d-T, Estación Mexicali, B. C., según Isoyetas SCT 2000.	93
6.6.	Curvas I-d-T, Estación Tampico, Tamps., según Isoyetas SCT 2000	94
6.7.	Valores de R obtenidos para las 49 estaciones estudiadas.	98
6.8.	Valores de a_1 obtenidos para las 49 estaciones estudiadas.	99
6.9.	Valores de b_1 obtenidos para las 49 estaciones estudiadas.	100
6.10.	Valores de c_1 obtenidos para las 49 estaciones estudiadas.	101
6.11.	Curvas I-d-T, Estación Copala, Gro., obtenidas con el método de Chen.	105
6.12.	Curvas I-d-T, Estación Hopelchén, Camp., obtenidas con el método de Chen.	106
6.13.	Curvas I-d-T, Estación Tampico, Tamps., obtenidas con el método de Chen.	106
6.14.	Curvas I-d-T, Estación Copala, Gro., obtenidas con el método de Bell.	109
6.15.	Curvas I-d-T, Estación Hopelchén, Camp., obtenidas con el método de Bell.	109
6.16.	Curvas I-d-T, Estación Tampico, Tamps., obtenidas con el método de Bell.	110
6.17.	Comparación de los resultados del método de Chen con la realidad (mediciones).	113
6.18.	Comparación de los resultados del método de Bell con la realidad (mediciones).	114

Índice de tablas.

<u>Núm.</u>	<u>Nombre</u>	<u>Pág.</u>
1.1.	Coeficiente de escurrimiento, C, de la Fórmula Racional. Martínez de Azagra (2006).	13
1.2.	Selección del Número de Escurrimiento "N". Chow (1962).	17
3.1.	Estaciones pluviográficas operando normalmente en México en 1980.	39
3.2.	Densidad de pluviógrafos sugerida por la OMM (citado por SAHOP, 1980).	39
3.3.	Proyecto de Instrumentación Pluviográfica de la República Mexicana. Red de pluviógrafos para el estado de Puebla. SAHOP (1980).	41
3.4.	Evolución de pluviógrafos instalados en México de 1980 a 2016.	44
4.1.	Procedimiento para ordenar las intensidades de lluvia I_d y obtener un resumen de ellas.	50
4.2.	Resultado del análisis de distribuciones de probabilidad de intensidades máximas anuales.	51
4.3.	Intensidades de lluvia asociadas a duraciones y períodos de retorno para la Estación A.	52
4.4.	Mapas de Isoyetas I-d-T que es posible dibujar con la información obtenida hasta el inciso j	53
5.1.	Valores de e, según Kuichling y Gransky (citado por CONAGUA, 2004).	57
5.2.	Comparación entre la precipitación máxima obtenida empleando intervalos regulares de d minutos y la obtenida con medición continua, según D.L.Yarnell (1935).	60
5.3.	Relación de lluvia de cierta duración, d, respecto a la lluvia de una hora de duración, según USWB (citado por WMO, 2009).	63
5.4.	Valores de P_d^T / P_1^T obtenidos en el análisis efectuado a 33 estaciones pluviográficas.	63
5.5.	Factores empíricos para convertir series de duración parcial a series anuales. Hershfield (1961).	66
5.6.	Valores de a de la ec 5.14.	72
5.7.	Relación altura de lluvia-frecuencia para los datos de EUA y Australia. Bell (1969).	74
5.8.	Relación de la Altura de lluvia y de la Intensidad de lluvia de cierta duración, d, respecto a las de una hora de duración. Chen (1975).	77

5.9.	Valores de P_d^T e I_d^T obtenidos con la gráfica de la Figura 5.15. Chen (1975).	80
5.10.	Valores de I_d^T estándar para distintos valores de d y de P_1^T / P_{24}^T . Chen (1975).	80
5.11	Valores de los parámetros estándar de tormenta para los correspondientes valores de P_1^T / P_{24}^T , calculados a partir de las relaciones estándar $I - d$ de la Tabla 5.10 y Figura 5.16. Chen (1975).	82
6.1.	Estaciones pluviográficas seleccionadas para el análisis.	88
6.2.	Intensidades de lluvia en mm/h, obtenidas con las Isoyetas SCT 2000, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Copala.	90
6.3.	Intensidades de lluvia en mm/h, obtenidas con las Isoyetas SCT 2000, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación El Palmito.	90
6.4.	Intensidades de lluvia en mm/h, obtenidas con las Isoyetas SCT 2000, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Hopelchén.	90
6.5.	Intensidades de lluvia en mm/h, obtenidas con las Isoyetas SCT 2000, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Mexicali.	91
6.6.	Intensidades de lluvia en mm/h, obtenidas con las Isoyetas SCT 2000, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Tampico.	91
6.7.	Inconsistencias detectadas en el análisis de las curvas $I-d-T$ de las 49 estaciones pluviográficas.	94
6.8.	Cálculo de los parámetros R , a_1 , b_1 y c_1 del método de Chen para las estaciones Copala, El Palmito, Hopelchén, Mexicali y Tampico.	97
6.9.	Estaciones eliminadas del análisis comparativo y causas de su eliminación.	103
6.10.	Resumen de cálculos con el método de Chen.	104
6.11.	Intensidades de lluvia en mm/h, calculadas con el método de Chen, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Copala.	104
6.12.	Intensidades de lluvia en mm/h, calculadas con el método de Chen, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Hopelchén.	105
6.13.	Intensidades de lluvia en mm/h, calculadas con el método de Chen, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Tampico.	105

6.14.	Valores del parámetro P_1^{10} , para las estaciones Copala, Hopelchén y Tampico.	107
6.15.	Método de Bell.	107
6.16.	Intensidades de lluvia en mm/h, calculadas con el método de Bell para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Copala.	108
6.17.	Intensidades de lluvia en mm/h, calculadas con el método de Bell, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Hopelchén.	108
6.18.	Intensidades de lluvia en mm/h, calculadas con el método de Bell, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Tampico.	108
A.1.	Intensidades de lluvia obtenidas con las Isoyetas SCT 2000 y las calculadas con los métodos indirectos de Chen y de Bell para las 33 estaciones pluviográficas.	127
A.2.	Isoyetas SCT 2000 vs Chen.	133
A.3.	Isoyetas SCT 2000 vs Bell.	135

Lista de acrónimos.

CFE	Comisión Federal de Electricidad.
CILA	Comisión Internacional de Límites y Aguas.
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua.
DETENAL	Dirección de Estudios del Territorio Nacional.
DGST	Dirección General de Servicios Técnicos.
EMAS	Estaciones meteorológicas automáticas.
ENOS	Fenómeno El Niño / Oscilación del Sur.
ERIC	Extractor rápido de información climatológica.
EUA	Estados Unidos de América.
FHWA	Federal Highway Administration.
HEC – RAS	Hydrologic Engineering Center – River Analysis System.
HUT	Hidrograma unitario triangular.
IDF	Intensidad – Duración – Frecuencia.
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration.
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
MOMET	Proyecto de Modernización del Servicio Meteorológico Nacional.
NRCS	Natural Resources Conservation Service.
OMM	Organización Meteorológica Mundial (WMO).
PRISM	Parameter – elevation Regressions on Independent Slopes Model.
RADAR	Radio – detection and ranging.
RGD	Relaciones generalizadas de duración.
SAHOP	Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas
SARH	Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
SCS	USDA Soil Conservation Service.
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
SDN	Secretaría de la Defensa Nacional.
SIG	Sistema de información geográfica.
SMN	Servicio Meteorológico Nacional.
SOP	Secretaría de Obras Públicas.
SRH	Secretaría de Recursos Hidráulicos.
USDA	United States Department of Agriculture.
USWB	United States Weather Bureau.
WMO	World Meteorological Organization (OMM).

*Así como la verdad se produce por la medida,
así la medida se produce por la verdad.*

San Agustín (354 – 430)

Introducción.

Las vías terrestres son obras de infraestructura de transporte y las constituyen principalmente las carreteras.

La precipitación pluvial está siempre presente en las vías terrestres. Año con año existen pérdidas económicas y daños en las carreteras por efecto de las lluvias.

El diseño hidráulico de las obras de drenaje de vías terrestres, es decir, de los puentes, alcantarillas, cunetas, contracunetas y lavaderos, requiere del conocimiento de las intensidades de lluvia asociadas a distintas duraciones y períodos de retorno, para lo cual es indispensable medir la lluvia mediante pluviógrafos.

En el diseño hidráulico hay dos aspectos muy importantes, el primero está ligado a la cantidad de pluviógrafos, su distribución, su tiempo de servicio y la calidad de las mediciones y el segundo se refiere a los métodos que se emplean para obtener la precipitación de diseño y el escurrimiento derivado de ésta.

En lo referente al primer aspecto, existen obstáculos que impiden medir correctamente la precipitación, por un lado debido a que las Dependencias gubernamentales encargadas de tal actividad han establecido una red de estaciones pluviográficas localizada de acuerdo con necesidades que involucran en general a las grandes cuencas, dejando sin información a las pequeñas y medianas, que son las que afectan a las vías terrestres y por otro lado, debido a la escases de personal y a la falta de mantenimiento y de actualización tecnológica. Todo ello ha ocasionado que los particulares y otras Dependencias de gobierno dispongan de información insuficiente, que los estudios hidrológicos que se realicen no reflejen la realidad y que las decisiones que se tomen para la solución conceptual de los problemas carezcan de sustento.

En lo concerniente al segundo aspecto, existen en la literatura técnica una infinidad de expresiones para estimar la precipitación de diseño, todas ellas desarrolladas para ser

aplicadas en otras regiones del mundo, ninguna para las condiciones de nuestro país. Desde hace alrededor de 20 años ha sido frecuente en México emplear los métodos de Chen y de Bell para calcular intensidades de lluvia y construir curvas Intensidad – Duración – Período de retorno, por el hecho de que no existen suficientes mediciones con pluviógrafos. Sin embargo, los resultados que se obtienen no pueden comprobarse, precisamente porque no se pueden comparar con mediciones. Esto motivó a demostrar con el desarrollo del presente trabajo, el grado de convergencia o divergencia que tienen los resultados de dichos métodos al aplicarlos para las condiciones de México, respecto a las Isoyetas de Intensidad-Duración-Período de retorno para la República Mexicana SCT(2000), mismas que reflejan mediciones efectuadas con pluviógrafos.

Como resultado de esta investigación se presentan propuestas para mejorar la forma de medir y de procesar la precipitación pluvial.

Justificación.

Este trabajo surgió de la necesidad de lograr:

- a) Mayor confiabilidad de estudios hidrológicos, ya que se contaría con mejor información de intensidades de lluvia asociada a distintas duraciones y períodos de retorno;
- b) Mayor seguridad para los usuarios de vías terrestres, ya que estudios hidrológicos más confiables favorecen que el dimensionamiento de obras de drenaje sea también más confiable;
- c) Menor costo de inversión, ya que el uso de información confiable de intensidades de lluvia y la aplicación de métodos hidrológicos bien fundamentados reduce la posibilidad de proyectar obras sobradas o escasas hidráulicamente;
- d) Menor costo de conservación, ya que un mejor soporte en el diseño hidráulico de obras de drenaje reduce la probabilidad de que fallen por insuficiencia hidráulica o de que trabajen con carga hidráulica, con los costos por mantenimiento o reconstrucción que esto representa y

e) Mayor movilidad ininterrumpida de vehículos, ya que tener obras de drenaje bien diseñadas en las vías terrestres reduce la probabilidad de que existan reparaciones mayores durante su vida útil.

Objetivos.

Los objetivos de este trabajo se enfocan a mejorar el diseño hidráulico de las obras de drenaje de las vías terrestres, lo que redundará en seguridad para los usuarios y en ahorro de recursos.

Objetivo general.

Determinar la confiabilidad de los métodos indirectos de Chen y de Bell para el cálculo de intensidades de lluvia y de las curvas y mapas I – d – T de la República Mexicana obtenidos con mediciones de pluviógrafos.

Objetivos específicos.

- Describir los aparatos que han existido para medir alturas de precipitación contra tiempo y proponer ideas para medir con mayor facilidad y precisión.
- Examinar la evolución de la cantidad y distribución de pluviógrafos en la República Mexicana de 1980 a la fecha y proponer ideas para mejorarlas.
- Dar recomendaciones para que las mediciones de pluviógrafos se procesen estadísticamente en mejor tiempo y forma.

Capítulo 1. Importancia de la información de precipitación pluvial en los estudios hidrológicos para vías terrestres.

En el desarrollo de una carretera existe la necesidad de cruzar corrientes naturales de diversa magnitud. Los cruces con tales corrientes son resueltos mediante puentes, alcantarillas, vados o puentes–vado, dependiendo del tipo de carretera, del tamaño y forma de la sección transversal del río, del gasto a drenar, de la velocidad del agua, etc. A este tipo de estructuras se les conoce como obras de drenaje transversal. También existen obras de drenaje longitudinal, que son las cunetas y contracunetas, y las complementarias, que son los lavaderos y guarniciones.

Según Ven Te Chow (1962), se estima que más del 15% del costo total de las carreteras en Estados Unidos, corresponde a la construcción y mantenimiento de las alcantarillas y puentes pequeños.

La mayoría de las obras de drenaje de carreteras están ligadas a cuencas pequeñas, entendiendo como tales a aquellas que son sensibles y responden rápidamente a lluvias de intensidad alta y duración corta. En las cuencas grandes, el efecto de almacenaje del cauce es importante. Para Chow (1962) una cuenca pequeña puede variar desde unas cuantas hectáreas hasta 130 km²; el límite es la condición en la cual se pierde dicha sensibilidad de respuesta, debido al efecto de almacenaje del cauce.

Para el diseño hidráulico de las obras de drenaje es necesario efectuar estudios hidrológicos e hidráulicos.

Como se verá a lo largo de este capítulo, la información de precipitación pluvial es muy importante en los estudios hidrológicos, ya que es uno de los parámetros que más influye en los resultados.

Para el diseño hidráulico de obras de drenaje de vías terrestres, los estudios hidrológicos se centran en determinar la avenida de diseño asociada a un período de retorno, entendido este último como el lapso promedio en años en que el gasto es igualado o excedido.

Los métodos hidrológicos empleados en la determinación de avenidas se clasifican en empíricos, semiempíricos y estadísticos. Los métodos empíricos determinan el gasto

en función de características fisiográficas de la cuenca; ejemplos son los métodos de William P. Creager *et al* (1945) y de R.C. Lowry, citados por Francisco J. Aparicio (1989). Los métodos semiempíricos están basados en la relación lluvia - escurrimiento y determinan el gasto en función de las características fisiográficas de la cuenca y de una intensidad de lluvia para cierta duración y período de retorno; poseen una base teórica y coeficientes que se determinaron experimentalmente. Ejemplos son la Fórmula Racional, el método de Chow y el método del Hidrograma Unitario. Los métodos estadísticos se emplean cuando se cuenta con un registro histórico de los gastos ocurridos; suponen que los gastos máximos aforados anualmente son una muestra aleatoria de la población de gastos máximos anuales y, por lo tanto, es posible efectuar un análisis empleando distintas distribuciones de probabilidad y seleccionar la que mejor se ajuste a los datos de la muestra.

Desde luego que los métodos hidrológicos más confiables son los estadísticos, pero desafortunadamente sólo los ríos que drenan cuencas grandes que son o serán empleadas para aprovechamientos hidráulicos o generación de energía hidroeléctrica cuentan con estaciones de aforo de corrientes. Las cuencas pequeñas casi nunca son aforadas y carecen de interés para las Dependencias que instrumentan la República Mexicana con aparatos de medición. Por consiguiente, la mayoría de los estudios hidrológicos para el diseño hidráulico de puentes y alcantarillas de carreteras se realizan con métodos que contienen relaciones entre la lluvia y el escurrimiento. Los métodos hidrológicos tienen sus dificultades en su aplicación, ya sea por falta de información de gastos medidos o de intensidades de lluvia, o bien, por la incertidumbre para dar valores a los parámetros empíricos que contienen las ecuaciones.

El estudio hidráulico se centra en la obtención de la velocidad de la corriente y de la elevación de la superficie del agua en la sección del cruce, a partir del tránsito del gasto de diseño por el cauce natural que constituye el río o arroyo.

Hace algunos años, para determinar la velocidad del agua se empleaba el método de Sección y Pendiente con la ecuación de Manning (1891):

$$V = R^{2/3} S^{1/2} / n \quad (1.1)$$

donde V es la velocidad media del agua en m/s, $R = A/P$ el radio hidráulico en m, A el área hidráulica en m^2 , P el perímetro mojado en m, S la pendiente media del río en decimales y n un coeficiente de resistencia al flujo que se obtiene mediante tablas y la experiencia en campo del responsable del estudio. Para obtener el área hidráulica, se aplicaba la ecuación de continuidad:

$$Q = AV \quad (1.2)$$

donde Q es el gasto en m^3/s . Este procedimiento obligaba a buscar un tramo recto del río donde el área hidráulica fuera más o menos constante, y donde la pendiente a lo largo del río fuera también sensiblemente constante, para que se cumplieran lo más posible las condiciones de flujo uniforme, que es el que considera la ecuación de Manning. Esto no siempre resultaba sencillo, y la aplicación del método quedaba sujeta a la experiencia en campo del ingeniero responsable de los estudios. En la actualidad se usa HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), que modela el flujo de un tramo del río. Este es un programa de cómputo creado por el U.S. Army Corps of Engineers, el cual ha evolucionado hasta la versión 5.0 que se emplea en la actualidad. En el caso de puentes y alcantarillas el modelaje se realiza solucionando la ecuación unidimensional de la energía en la condición de flujo permanente y variado, lo cual se acerca más a la realidad que los métodos desarrollados para flujo uniforme.

Se explican a continuación algunas ideas y conceptos importantes de hidrología para la aplicación de los métodos hidrológicos semiempíricos.

Las mediciones de lluvia se efectúan con los aparatos denominados pluviómetros y pluviógrafos. Los primeros registran la cantidad de lluvia acumulada en determinado tiempo (casi siempre, cada 24 horas) y los pluviógrafos registran la forma en que se desarrolla la precipitación, es decir, la variación de la lluvia en el tiempo, lo cual hace posible dibujar una gráfica de alturas de precipitación contra tiempo (curva masa de una tormenta). En el capítulo 2 se describen con detalle estos aparatos de medición.

La intensidad de lluvia se define como la altura de precipitación dividida entre el tiempo en que ocurrió:

$$I = h_p / t \quad (1.3)$$

donde I es la intensidad de lluvia en mm/h, h_p es la altura de precipitación en mm y t es el tiempo en horas.

Con los pluviómetros se pueden obtener intensidades de lluvia para duraciones de 24 horas. Con los pluviógrafos se pueden obtener intensidades de lluvia para la duración que se desee, ya que éstas se obtienen a partir de la gráfica h_p contra t , que proporciona el aparato. A partir del análisis probabilístico de la información pluviográfica se obtienen gráficas que relacionan la Intensidad de lluvia, su duración y el período de retorno, I-d-T, para cada estación (Figura 1.1). El procesamiento de todas las estaciones pluviográficas posibilita dibujar Isoyetas de I-d-T, definidas éstas como los lugares geométricos de los sitios con igual intensidad de lluvia (Figura 1.2).

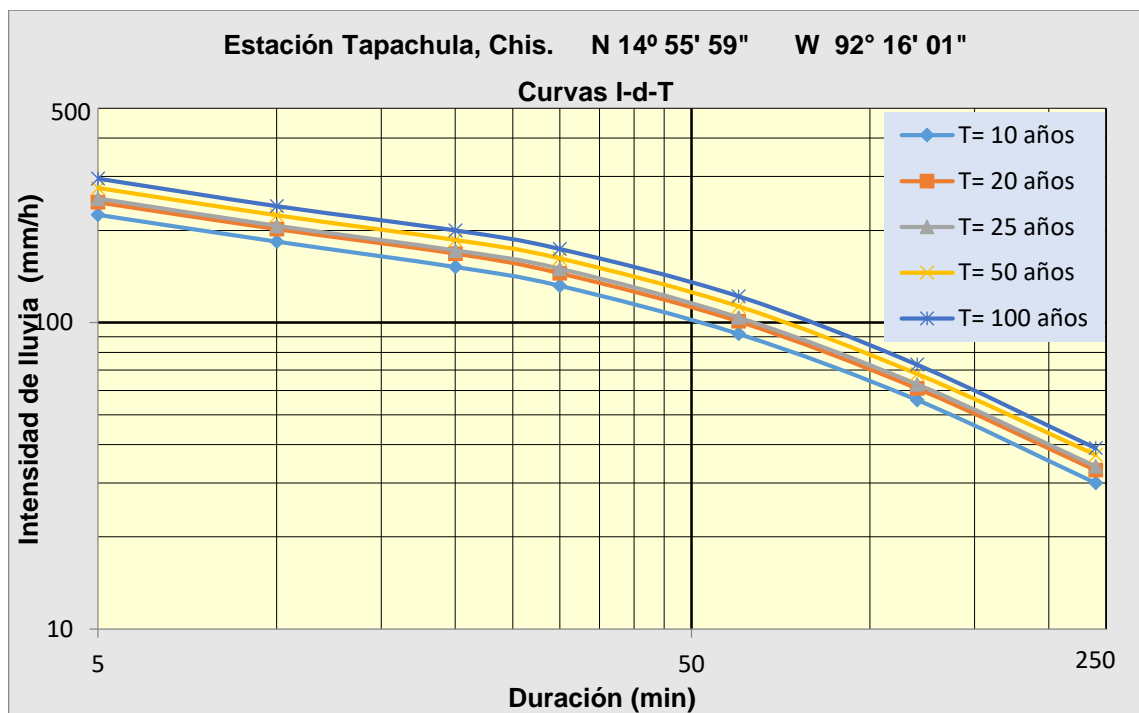


Figura 1.1. Ejemplo de curvas de Intensidad de lluvia-duración-Período de retorno.

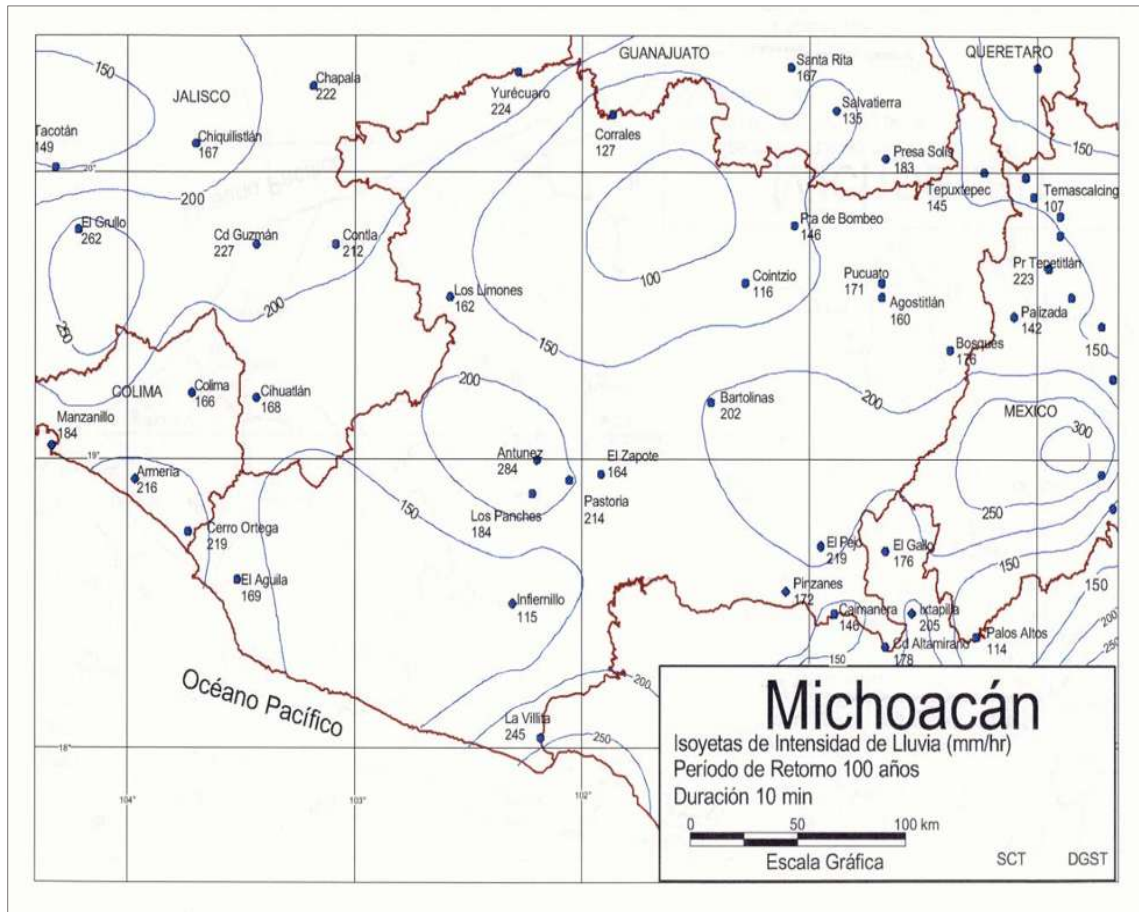


Figura 1.2. Mapa de Isoyetas de I-d-T del estado de Michoacán. SCT (2000).

Como se explicó anteriormente, la mayoría de las corrientes naturales que cruzan las carreteras están ligadas a cuencas pequeñas, que se caracterizan por ser sensibles a tormentas de corta duración e intensidad alta. En efecto, cuánto más pequeña es una cuenca, en menor tiempo contribuye toda su área al escurrimiento en su punto de desfogue y entonces la intensidad de lluvia asociada a una duración corta es la de interés en estos casos.

Así, de acuerdo con lo antes expuesto, los métodos hidrológicos semiempíricos emplean intensidades de lluvia asociadas a duraciones de lluvia cortas, que sólo se pueden obtener a partir de mediciones de pluviógrafos. La información que se obtiene a partir de pluviómetros (alturas de lluvia para $d = 24$ h) es irrelevante para estudiar la respuesta de cuencas pequeñas ante las lluvias.

El tiempo de concentración (t_c), es el tiempo que teóricamente tarda el agua en llegar desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de desfogue de la misma. Los

métodos semiempíricos involucran este parámetro. Existen muchos métodos para calcularlo, todos ellos obtenidos en otros países. Para obtener un procedimiento adecuado para las cuencas de México, es necesario instrumentar un buen número de ellas para obtener datos de lluvia (h_p contra t) y datos de escurrimiento (V y A , principalmente). Sin embargo, al carecer de esta información, en la práctica se recurre a los métodos desarrollados en otros países. Un método que se usa con relativa frecuencia es el debido a Phillip Z. Kirpich (1940), citado en Secretaría de Comunicaciones y Transportes (1984):

$$t_c = 0.0662 (L / S^{1/2})^{0.77} \quad (1.4)$$

donde t_c es el tiempo de concentración en horas, L es la longitud del cauce principal hasta el parteaguas en km y S es la pendiente media del cauce principal de la cuenca en decimales. Teóricamente, cuando la duración de la lluvia en la cuenca es igual al tiempo de concentración, toda la superficie de la cuenca está contribuyendo al escurrimiento en el punto de desfogue y en ese momento se presenta el gasto máximo.

El hietograma de una tormenta es una representación gráfica por medio de un diagrama de barras, que muestra los incrementos de lámina de lluvia para diferentes intervalos de tiempo, el cual se obtiene de la curva masa de una tormenta, que es una gráfica que representa la acumulación de la lluvia durante el tiempo que dura una tormenta. Figura 1.3.

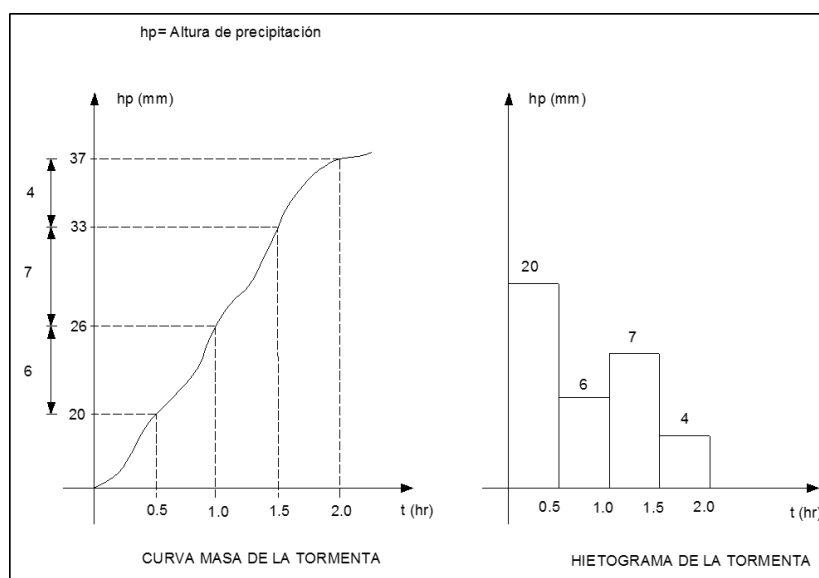


Figura 1.3. Ejemplo ilustrativo de un hietograma de una tormenta.

La precipitación en exceso o escurrimiento directo, P_e , se define como la parte de la lluvia que escurre sobre o cerca de la superficie del terreno. El resto de la precipitación total se encauza hacia los procesos de interceptación, evapotranspiración e infiltración.

Un hidrograma es una representación gráfica del caudal contra el tiempo. El tiempo base, t_b , es el que transcurre desde el inicio hasta el fin del escurrimiento directo. El tiempo de retraso, t_r , es el lapso desde el centro de masa del hietograma de la lluvia hasta el punto de pico del hidrograma. En la Figura 1.4 se ilustran estos conceptos.

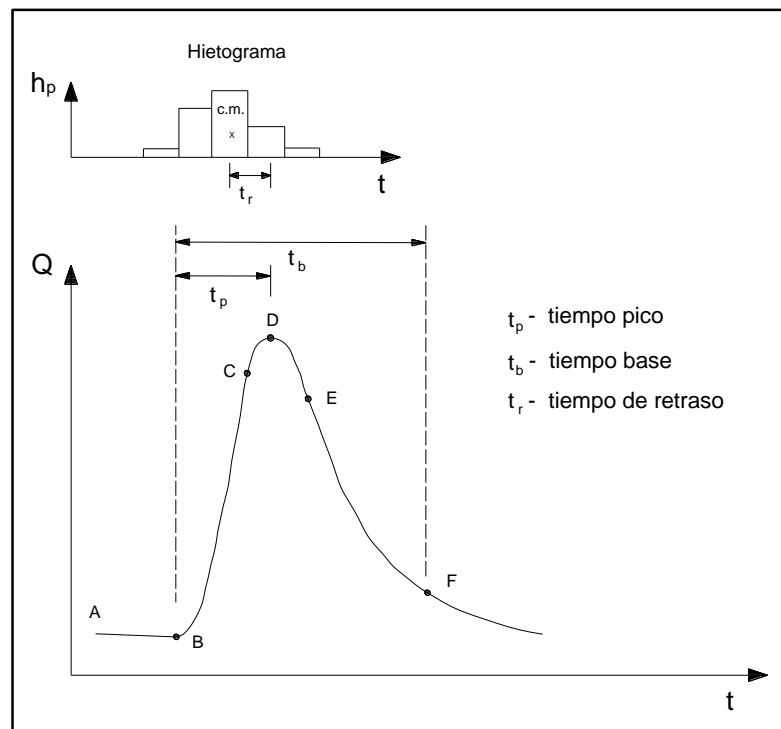


Figura 1.4. Hidrograma típico de una tormenta aislada. SCT (1984).

El concepto de t_r se introdujo para tomar en cuenta que los escurrimientos que se originan en las porciones de la cuenca más alejadas del punto de desfogue llegan más tarde y no contribuyen en el gasto máximo.

Un Hidrograma Unitario (H.U.) es el hidrograma resultante de una precipitación en exceso, P_e , igual a una unidad de altura sobre toda la cuenca, con una intensidad uniforme, para cierta duración, d . Ver Figura 1.5.

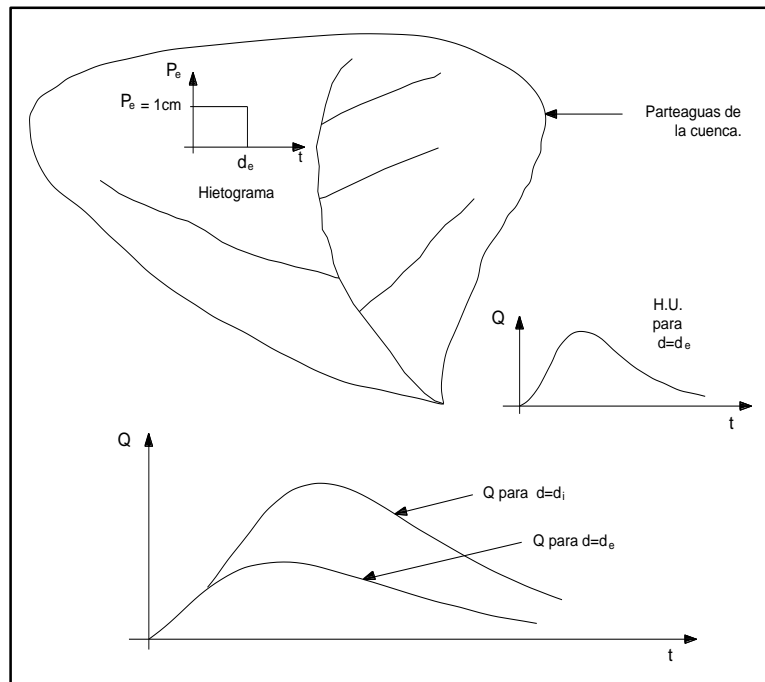


Figura 1.5. Definición de Hidrograma Unitario (H.U.)

Los métodos semiempíricos más comúnmente utilizados en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) son la fórmula Racional, el método de Chow y el método del Hidrograma Unitario Triangular, los cuales se describen a continuación:

Fórmula Racional.

Esta fórmula se le atribuye a Emil Kuichling, quien la publicó en 1889. Sin embargo, desde 1850 Thomas J. Mulvany sentó las bases para desarrollarla, al afirmar que: “En una cuenca bajo la acción de una lluvia de intensidad constante, el tiempo necesario para que se alcance el gasto máximo en el punto de desfogue puede ser el tiempo que tarda el agua desde el punto más remoto de la cuenca hasta el punto de salida, pues es cuando las aportaciones procedentes de las diferentes zonas de la cuenca llegan simultáneamente al punto de desfogue, y este tiempo debe depender de la extensión, forma y pendiente de la superficie de la cuenca. De esta manera se podría determinar la duración de la lluvia para producir un gasto máximo y en consecuencia fijar la intensidad máxima de lluvia aplicable al caso. Es evidente que al reducir el intervalo de tiempo, la intensidad de lluvia se incrementa”, citado por Rafael García B. (1991).

A pesar de que es un método basado en hipótesis que no siempre se cumplen y cuyos resultados se apartan más de la realidad cuanto mayor sea la cuenca, es muy utilizado en el mundo, por ser muy sencillo.

La fórmula Racional es:

$$Q_{\text{máx}} = 0.278 C I A \quad (1.5)$$

donde $Q_{\text{máx}}$ es el gasto máximo en m^3/s ; C es un coeficiente de escurrimiento definido como el volumen escurrido entre el volumen llovido y se obtiene mediante tablas; I es la intensidad de lluvia para una duración igual al tiempo de concentración, en mm/h ; A es el área de la cuenca en km^2 y 0.278 es un valor que homogeneiza las variables.

Las hipótesis básicas del método Racional son: a) La intensidad de lluvia es constante y la lluvia se distribuye uniformemente en toda la cuenca; b) La duración de la lluvia es igual al tiempo de concentración, $d = t_c$, con lo cual se está suponiendo que toda el área de la cuenca contribuye al escurrimiento; c) La capacidad de infiltración del terreno de la cuenca es constante en todo tiempo; d) El efecto de almacenaje del agua de escurrimiento superficial en la cuenca es despreciable; e) El período de retorno del gasto calculado es el mismo que el de la intensidad de lluvia. Ronald L. Rossmiller (1980) presenta una descripción muy completa de los parámetros que intervienen en la fórmula.

Este método ha sido ampliamente utilizado para diseño de drenaje urbano y por esta razón la mayoría de las tablas que existen para estimar el coeficiente de escurrimiento, C , consideran condiciones propias de las cuencas urbanas. Para cuencas en campo abierto, como es el caso de las asociadas al diseño de obras de drenaje de carreteras, Andrés Martínez de Azagra (2006) presenta varios métodos, ecuaciones y tablas para determinar el coeficiente de escurrimiento, C , en función de características del suelo de la cuenca, tales como su textura (arenosa, limosa, arcillosa), uso (urbano, industrial, rural), permeabilidad, humedad, pendiente y cobertura vegetal, así como características de la lluvia, tales como el tipo de precipitación pluvial (lluvia, granizo, nieve), la intensidad de lluvia, el período de retorno, etc. La Tabla 1.1 presenta uno de tales casos. Sin embargo, no debe perderse de vista lo que físicamente significa C : volumen escurrido entre volumen llovido, y aplicar siempre criterio ingenieril al estimar su valor.

Tabla 1.1 Coeficiente de escurrimiento, C, de la Fórmula Racional. Martínez de Azagra (2006).

Uso del suelo y pendiente del terreno	Textura del suelo		
	Arenosa	Arcillosa y limosa	Arcilla
Bosque			
Plano (pendiente 0 a 5%)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (pendiente 6 a 10%)	0.25	0.35	0.50
Escarpado (pendiente 11 a 30%)	0.30	0.50	0.60
Pastizales			
Plano (pendiente 0 a 5%)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (pendiente 6 a 10%)	0.16	0.36	0.55
Escarpado (pendiente 11 a 30%)	0.22	0.42	0.60
Terrenos Cultivados			
Plano (pendiente 0 a 5%)	0.30	0.50	0.60
Ondulado (pendiente 6 a 10%)	0.40	0.60	0.70
Escarpado (pendiente 11 a 30%)	0.52	0.72	0.82

La fórmula Racional se puede emplear para cuencas de hasta 25 km², considerando que su confiabilidad es menor cuanto mayor sea el área de la cuenca.

Método de Chow.

Ven Te Chow (1962) desarrolló un procedimiento para calcular el gasto en cuencas pequeñas, basándose en el concepto de hidrograma unitario e hidrograma unitario sintético. Este método considera que el máximo escurrimiento directo de una cuenca, Q_m , puede calcularse como el producto de la altura de precipitación en exceso, P_e , por el gasto máximo de un hidrograma unitario, q_m , correspondiente, es decir:

$$Q_m = q_m P_e \quad (1.6)$$

Los datos necesarios para la aplicación del método de Chow son:

- A área de la cuenca (km²),
- L longitud del cauce principal de la cuenca (m),
- S pendiente del cauce principal de la cuenca (%),
- N coeficiente de escurrimiento (adimensional). Tabla 1.2,

T periodo de retorno (años),

P_c altura de precipitación en la cuenca (mm),

P_{eb} Altura de precipitación en la estación base (mm) y

Curvas ó Isoyetas de intensidad-duración-período de retorno (I-d-T)

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

1) Suponer una duración de lluvia, d, y obtener la intensidad de lluvia, I, a partir de curvas I-d-T ó Isoyetas de I-d-T.

2) Calcular la altura de precipitación asociada a la duración d:

$$P_b = Id \quad (\text{cm}) \quad (1.7)$$

3) Calcular la altura de precipitación en exceso, P_e:

$$P_e = \frac{[P_b - (508/N) + 5.08]^2}{P_b - (2032/N) - 20.32} \quad (\text{cm}) \quad (1.8)$$

4) Calcular el factor de escurrimiento, X:

$$X = P_b / d \quad (\text{cm/h}) \quad (1.9)$$

5) Calcular el factor climático, Y:

$$Y = P_e / P_{eb} \quad (1.10)$$

En la SCT, para obtener el valor de Y se utiliza la precipitación media anual en la cuenca y en la estación pluviográfica que esté sirviendo como base para realizar el cálculo. En caso de utilizar isoyetas de I-d-T, el valor de Y es la unidad.

6) Calcular el tiempo de retraso, t_r:

$$t_r = 0.00505 (L / S^{1/2})^{0.64} \quad (\text{h}) \quad (1.11)$$

Para el método de Chow, t_r es el tiempo de pico del escurrimiento en un hidrograma unitario instantáneo, el cual se define como un hidrograma hipotético cuya duración de lluvia en exceso se aproxima a cero como un límite mientras se mantiene fija la cantidad de lluvia en exceso igual a 1 cm.

7) Calcular el cociente d/t_r

8) Calcular el factor de reducción del pico de la avenida (Z), en función del valor de d/t_r , a partir de la Figura 1.6

9) Calcular el gasto, Q_m :

$$Q_m = 2.78 A X Y Z \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1.12)$$

10) Volver al paso 1

El procedimiento es por tanteos hasta obtener el gasto máximo.

Obsérvese que la estructura de la ecuación 1.12 es similar a la que tiene la fórmula Racional (ecuación 1.5).

Chow propuso aplicar el método para cuencas de hasta 24 km², sin embargo, en México se aplica para cuencas de hasta 250 km².

Algunos inconvenientes del método son: a) la expresión para obtener el valor de t_r (ecuación 1.11) y la gráfica Z contra d/t_r (Figura 1.6) fueron deducidas empíricamente para una región de Estados Unidos; b) en cualquier caso, los resultados son muy sensibles a la variación del Número de Escurrimiento, N , por lo que es necesario determinarlo cuidadosamente.

El Número de Escurrimiento N , también denominado CN (Curve Number) es un parámetro empírico usado en Hidrología para pronosticar escurrimiento directo o infiltración. Se ha obtenido a partir de análisis empíricos de escurrimientos en cuencas pequeñas monitoreadas por United States Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS), conocido como USDA.Soil Conservation Service (SCS).

Paz-Pellat (2009), a partir de un análisis de las relaciones empíricas que emplea SCS para obtener los valores de CN, sostiene que el método no tiene ninguna base teórica o de otro tipo, más allá de su facilidad de aplicación y propone un modelo alternativo, que puede consultarse en su artículo.

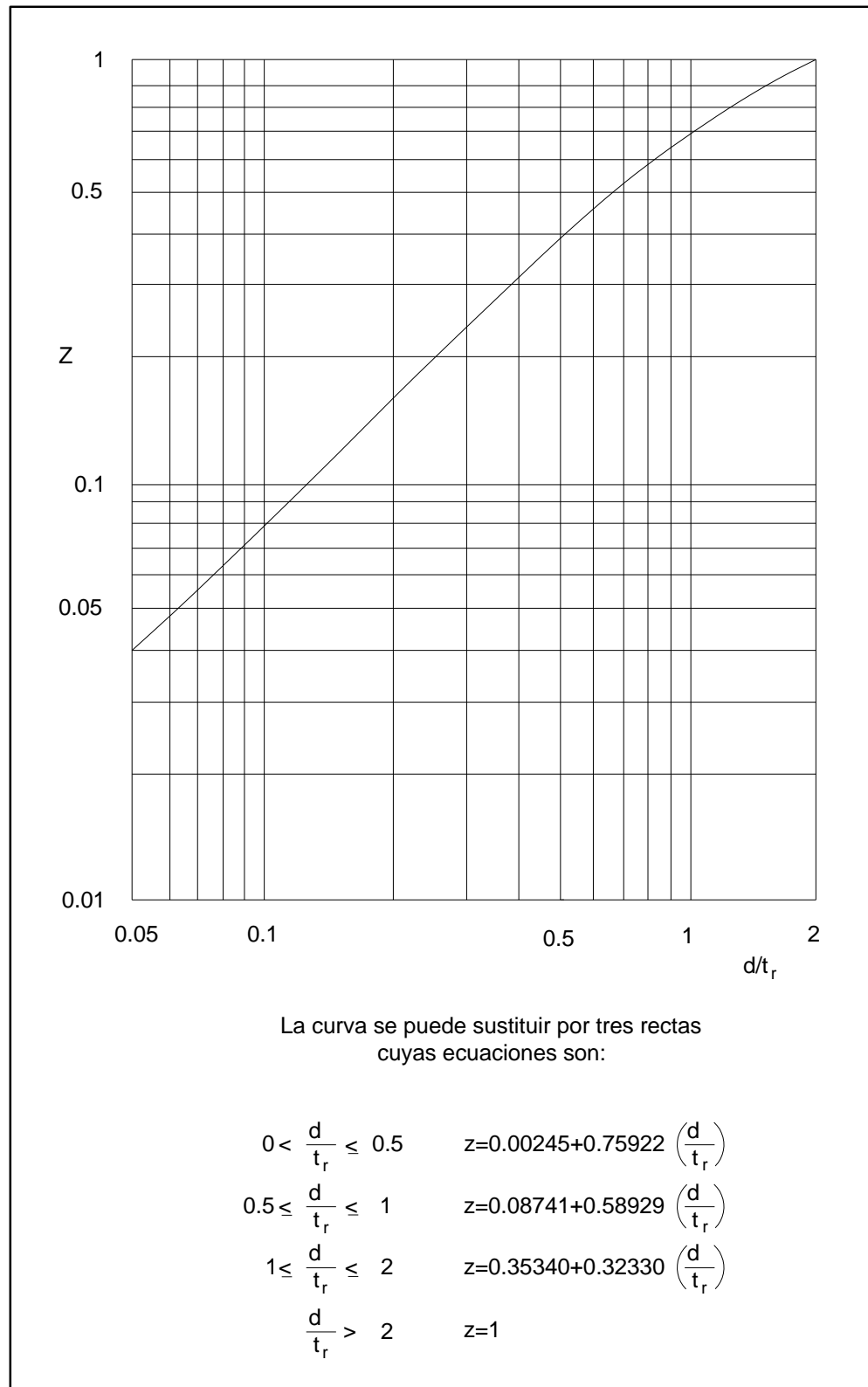


Figura 1.6 Relación entre Z y d/t_r (reconstruida de Chow, 1962).

Tabla 1.2. Selección del Número de Escurrimiento “N”. Chow (1962).

Descripción de los suelos	Tipo de suelo
Suelos con potencial de escurrimiento mínimo. Incluye gravas y arena, con poco limo y arcilla, así como loess muy permeables.	A
Suelos con infiltración media inferior a la del grupo A. Incluye arenas finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena y limo, loess permeables.	B
Suelos con infiltración media inferior a la del grupo B. Comprende arenas muy finas, suelos con gran cantidad de arcillas y coloides.	C
Suelos con potencial de escurrimiento máximo. Incluye la mayoría de las arcillas de alta plasticidad y también suelos poco profundos, con subhorizontes casi impermeables cerca de la superficie.	D

Números de escurrimiento “N”					
Uso de la tierra o cobertura	Condiciones de la superficie	Tipo de suelo			
		A	B	C	D
Barbecho (sin cultivo)	Surcos rectos	77	86	91	94
Cultivos en surcos	Surcos rectos	70	80	87	90
	Surcos a nivel	67	77	83	87
	Surcos a nivel y terrazas	64	73	79	82
	Surcos rectos	64	76	84	88
Cereales	Surcos a nivel	62	74	82	85
	Surcos a nivel y terrazas	60	71	79	82
	Surcos rectos	62	75	83	87
Leguminosas sembradas con maquinaria “a voleo” o rotación de pradera	Surcos a nivel	60	72	81	84
	Surcos a nivel y terrazas	57	70	78	82
	Pobre	68	79	86	89
Pradera natural y pastizal	Normal	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
	Surcos a nivel, pobre	47	67	81	88
	Surcos a nivel, normal	25	59	75	83
	Surcos a nivel, bueno	6	35	70	79
	Normal	30	58	71	78
Pradera (permanente)	Ralo o baja transpiración	45	66	77	83
	Normal o transpiración media	36	60	73	79
	Espeso o transpiración alta	25	55	70	77
Cascos de Hacienda	Normal	59	74	82	86
Caminos	De terracería	72	82	87	89
	Pavimentados	74	84	90	92
Bosques naturales	Muy ralo o baja transpiración	56	75	86	91
	Ralo o baja transpiración	46	68	78	84
	Normal o transpiración media	36	60	70	76
	Espeso o alta transpiración	26	52	62	69
	Muy espeso o alta transpiración	15	44	54	61
Superficie impermeable		100	100	100	100

Método del Hidrograma Unitario Triangular (HUT)

El método del Hidrograma Unitario tradicional requiere contar con un hidrograma medido a la salida de la cuenca, así como registros de precipitación. Sin embargo, la mayoría de las cuencas no tienen estaciones de aforos ni registros pluviográficos. Por ello, se han desarrollado métodos para obtener hidrogramas unitarios usando sólo datos de características generales de la cuenca. Los hidrogramas unitarios así obtenidos se denominan sintéticos.

Victor Mockus desarrolló en 1957 un hidrograma unitario sintético de forma triangular, que utiliza normalmente el SCS, Figura 1.7. Citado por Aparicio (1989).

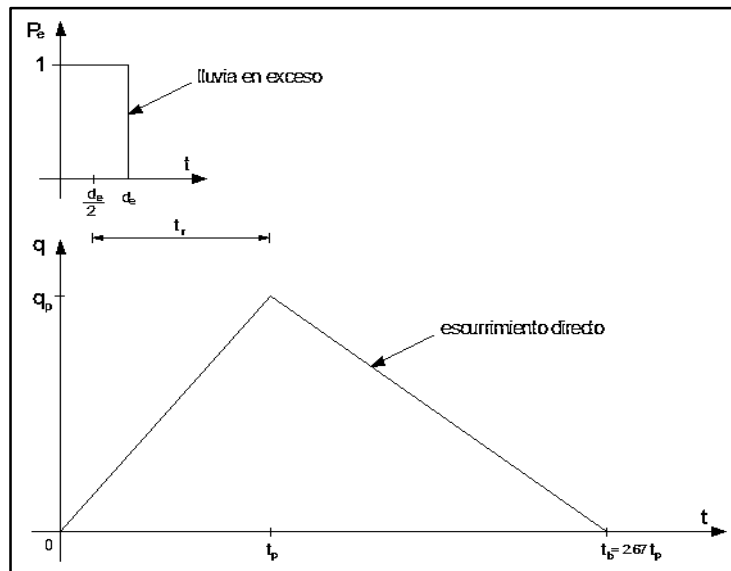


Figura 1.7. Hidrograma Unitario Sintético Triangular SCS.

Este es uno de los métodos más empleados en la actualidad en la SCT. Las variables que intervienen son las siguientes:

- A área de la cuenca
- L longitud del cauce principal de la cuenca
- S pendiente del cauce principal de la cuenca
- t_c tiempo de concentración
- N número de escurrimiento (SCS)

V_{II}	volumen llovido
P_e	precipitación en exceso
I	intensidad de lluvia
D	duración de la lluvia
V_e	volumen escurrido
Q_p	gasto pico
q_p	gasto por unidad de P_e
t_b	tiempo base
t_p	tiempo pico
t_r	tiempo de retraso

Respecto a las unidades de las variables, para las ecuaciones 1.13 a 1.15 se emplean las del Sistema Internacional de Unidades y a partir de la ecuación 1.16, las que se indican.

Las ecuaciones que componen este método se deducen a continuación:

El volumen llovido en la cuenca es:

$$V_{II} = P_e A \quad (1.13)$$

El volumen escurrido es el área bajo el hidrograma del río o arroyo:

$$V_e = t_b Q_p / 2 \quad (1.14)$$

Al igualar las ecuaciones 1.13 y 1.14 y simplificar se obtiene

$$Q_p = 2 P_e A / t_b \quad (1.15)$$

Es necesario transformar la ecuación 1.15 para considerar A en km^2 , P_e en mm , t_b en h y Q_p en m^3/s . El resultado es

$$Q_p = 0.5555 P_e A / t_b \quad (1.16)$$

El gasto por unidad de P_e (gasto unitario) es

$$q_p = Q_p / P_e = 0.5555 A / t_b \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}) \quad (1.17)$$

A partir del análisis de un gran número de hidrogramas, Mockus obtuvo:

$$t_b = 2.67 t_p \quad (1.18)$$

$$t_p = (d_e / 2) + t_r \quad (1.19)$$

$$t_r = 0.6 t_c \quad (1.20)$$

$$d_e = 2 (t_c)^{1/2} \quad \text{para cuencas grandes} \quad (1.21)$$

$$d_e = t_c \quad \text{para cuencas pequeñas} \quad (1.22)$$

El valor de t_c se puede estimar mediante la ecuación de Kirpich, ecuación 1.4.

Al sustituir la ecuación 1.18 en la ecuación 1.17 y simplificar se obtiene

$$q_p = 0.208 A / t_p \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}) \quad (1.23)$$

Al sustituir las ecuaciones 1.20 y 1.21 en la ecuación 1.19 se obtiene

$$t_p = (t_c)^{1/2} + 0.6 t_c \quad (1.24)$$

Con las ecuaciones 1.18, 1.23 y 1.24 se calculan las características del Hidrograma Unitario Triangular.

En este método las características de la lluvia están en el gasto unitario q_p , ya que

$$q_p = Q_p / P_e \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}) \quad (1.25)$$

El valor de P_e se calcula con la ecuación propuesta por Chow, ecuación 1.8, empleando la intensidad de lluvia, I , correspondiente a la duración d_e y el período de retorno de diseño, T . El gasto máximo asociado al período de retorno T , se obtiene de la ecuación 1.25 como

$$Q_p = q_p P_e (10) \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1.26)$$

Según Caltrans (2006), el método del Hidrograma Unitario Triangular se puede aplicar para áreas de cuenca de hasta 2,500 km².

Como puede observarse, la información pluviográfica siempre está presente en los métodos hidrológicos que consideran la relación lluvia – escurrimiento, que son los más utilizados en los estudios hidrológicos para obras de drenaje de vías terrestres. La carencia de este tipo de información ocasiona que los estudios no reflejen la realidad y, en consecuencia, que las decisiones que se tomen para la solución conceptual de muchos problemas de ingeniería carezcan de sustento. Ello conlleva a que las obras de drenaje resulten inadecuadas, lo que implica mayores gastos por conservación o su reconstrucción y por lo tanto, dispendio de recursos.

Dada la importancia de la precipitación pluvial en los estudios hidrológicos, en el siguiente capítulo se estudian los aparatos para medirla.

Capítulo 2. Aparatos de medición de precipitación.

La precipitación pluvial es parte del ciclo hidrológico y por lo tanto siempre ha estado presente y ha sido necesario medirla, en ocasiones porque hay que aprovecharla y en otras porque hay que prevenirse o defenderse de ella. Tener conocimiento de dónde, cuándo, cuánto y cómo llueve es imprescindible para la construcción y conservación de obras de infraestructura, el desarrollo de la agricultura y de las industrias y las labores de protección civil.

Los aparatos que más comúnmente se emplean en la actualidad para medir la precipitación son los pluviómetros y los pluviógrafos. Los primeros miden la altura de precipitación que ocurre en un determinado tiempo y los segundos registran la altura de precipitación contra tiempo. Pero medir ha requerido siempre de ingenio y perseverancia para crear los aparatos más convenientes. Se presenta una cronología a nivel mundial, de la medición de la precipitación, preparada a partir de información de Ian Strangeways (2010), Louis Dufour y Pierre Defrise (1981), Gaston Demarée (2003), George J. Symons (1871,1879), Kifissiameteo (2016) y Alcides J. León *et al* (2013):

400 A.C. India. Se llevaban registros de lluvias empleando un recipiente de 18", con objeto de determinar cuántas semillas sembrar y cuánta agua de riego se requería.

1247. China. Se llevaban registros de lluvia empleando pluviómetros contruidos con recipientes de bambú, nuevamente para mejorar la agricultura.

1441. Korea. El pluviómetro de Jang Yeong Sil, que consistía en un cilindro metálico de 30 cm de alto y una base de 15 cm de diámetro, con el cual se medía la lluvia y los resultados se enviaban a la corte. La información era utilizada para mejorar los cultivos de arroz.

1660. United Kingdom. Christopher Wren y Robert Hooke crearon un pluviómetro cuya sección geométrica era la mitad de un cubo, y formaba parte de una estación climatológica. Tal estación tenía un sistema de relojería y quedaban registradas cada 15 minutos en cinta de papel con orificios perforados, mediciones de presión barométrica, temperatura, lluvia, humedad relativa y dirección del viento, obtenidas con instrumentos inventados por Hooke.

1677. United Kingdom. Richard Towneley fue el primero en efectuar mediciones de lluvia en forma regular; las realizó de 1677 a 1703 en Lancashire, empleando un pluviómetro de 30 cm de diámetro; publicó resultados de sus mediciones mensualmente durante 15 años.

1695. United Kingdom. Robert Hooke desarrolló un pluviómetro que consistía en un recipiente que podía contener nueve litros de agua, estaba apoyado en un marco de madera y tenía en la parte superior un embudo de vidrio de 29 cm de diámetro (Figura 2.1).

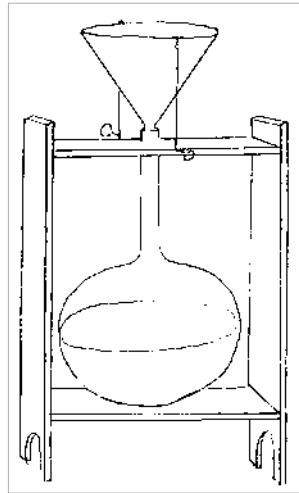


Figura 2.1. Pluviómetro diseñado por Robert Hooke. Strangeways (2010).

1736. United Kingdom. El meteorólogo Thomas Barker efectuó en Lyndon, Rutland, mediciones empleando un mismo pluviómetro y mostró, considerando varios períodos, que el promedio variaba mucho. Concluyó que es necesario medir por mucho tiempo para obtener valores medios más precisos. Realizó sus mediciones durante 60 años, de 1736 a 1796.

1750. United Kingdom. William Heberden notó que los pluviómetros más elevados captaban menos agua y decidió colocar uno en el jardín, otro en el techo de su casa y otro en la torre de la iglesia de Westminster. Efectuó mediciones durante un año y observó que el pluviómetro del techo captó el 80% comparado con el del jardín y el de la torre sólo el 50%. Esto no se lo podía explicar y especuló que las gotas de lluvia incrementan su tamaño en los últimos cientos de pies de su caída. Esta idea fue refutada por William Stanley Jevons casi un siglo más tarde.

1777. United Kingdom. D. Dobson fue el primero que colocó pluviómetros en un campo amplio y abierto. Hasta entonces todos eran colocados en los techos de casas y se pensaba que serían registros de la caída libre de la lluvia, pero los problemas que ocasiona el viento aún no se conocían. El pluviómetro tenía 30 cm de diámetro y fue parte de una investigación del fenómeno de evaporación.

1817. United Kingdom. Benjamin Bevan inventó el primer pluviógrafo de que se tiene noticia (Figura 2.2). George James Symons (1879) expuso algunas ideas respecto a su funcionamiento.

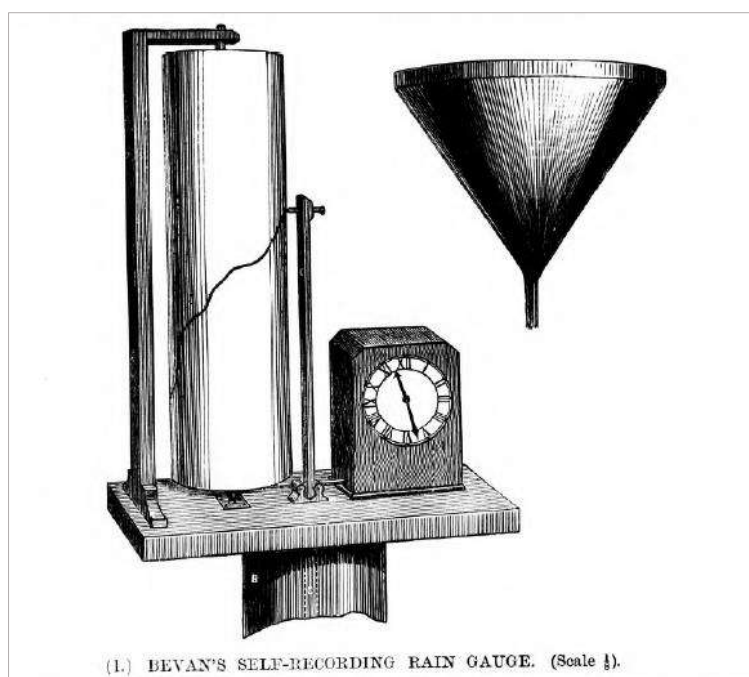


Figura 2.2. Pluviógrafo de Bevan. Symons (1879).

1837. United Kindom. Abraham Follett Osler diseñó un medidor de lluvia en peso. El recipiente receptor contaba con un sifón que vaciaba la lluvia acumulada cuando ésta alcanzaba 0.25". Symons (1879) expuso algunas ideas de su funcionamiento.

1848. Austria. Carlos Kreil desarrolló el pluviógrafo de la Figura 2.3. Symons (1879) expuso algunas ideas de su funcionamiento.

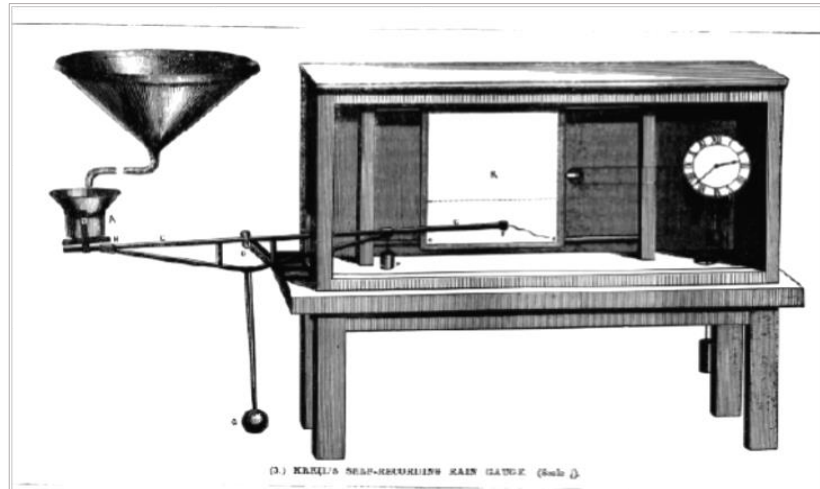


Figura 2.3. Pluviógrafo de Kreil. Symons (1879).

1859. United Kingdom. William Stanley Jevons construyó un túnel de viento y observó el flujo de aire a través de obstrucciones, usando como trazadores, tiras de papel. Con este trabajo asoció que un pluviómetro actúa como una obstrucción, ocasionando que el viento se acelere en la parte superior y arrastre gotas de lluvia que ya no capta el pluviómetro.

1865. United Kingdom. Michael Foster Ward y Charles Higman Griffith realizaron pruebas para investigar el mejor diámetro de pluviómetros y la altura a la que deben colocarse; compararon alrededor de 50. Las pruebas confirmaron los efectos del viento y resultó como más adecuado el pluviómetro estándar de 5 plg colocado 1 pie arriba del suelo.

1865 a la fecha. Se han desarrollado un gran número de pluviómetros, con diámetros distintos y formas variadas; se muestran algunos de ellos en la Figura 2.4.

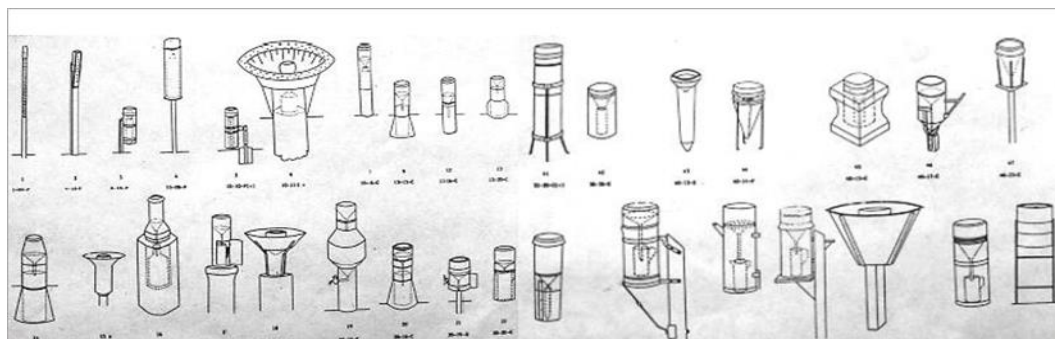


Figura. 2.4. Diseños de pluviómetros manuales, todos con diferentes tipos de errores. Strangeways (2010).

Los pluviómetros se basan en la idea de medir en mm la altura que alcanzaría el agua en un suelo horizontal e impermeable. Son recipientes cilíndricos cuya tapa es un embudo receptor (vaso receptor) que conecta a una probeta graduada de sección transversal 10 veces menor que la tapa (vaso medidor). Así, 1 cm de la probeta corresponde a 1 mm de altura de lluvia y además, equivale a 1 lt/m², porque 1 mm de agua sobre un área de 1 m² ocupa un volumen de 1 lt. Ver Figura 2.5.

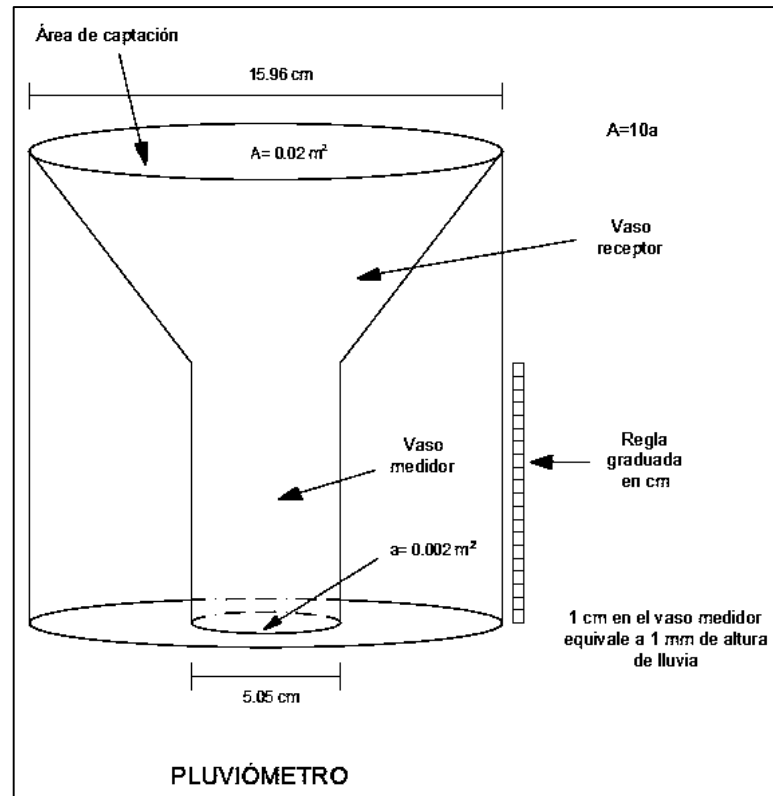


Figura 2.5. Forma y dimensiones de un pluviómetro.

Así, una precipitación de 5 mm medida en un pluviómetro significa que si toda el agua de lluvia se acumulara en un terreno plano sin escurrirse ni evaporarse, la altura de la capa de agua sería de 5 mm y ocuparía un volumen de 5 lt/m² de terreno.

En los pluviómetros normalmente se toman lecturas cada 12 o 24 horas. Permiten conocer la lámina de agua acumulada en esos lapsos de tiempo. La Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés ó OMM, por sus siglas en español) recomienda que los pluviómetros sean totalmente impermeables para que no tengan filtraciones ni pérdidas. La precipitación captada puede estar en forma de lluvia, nieve o granizo.

El modelo de pluviómetro más conocido es el diseñado por Gustav Hellmann, que consta de un embudo de acero galvanizado, cuyo borde es de bronce, de 15.96 cm de diámetro. En el embudo suele introducirse una cruceta metálica para evitar que los copos de nieve sean expulsados por la turbulencia del viento durante la precipitación. Las lecturas de la lámina de agua precipitada se hacen en la probeta graduada, misma que da una precisión de 0.1 mm. Deben colocarse en una zona libre de obstáculos. La OMM recomienda que se coloquen a una distancia no menor de dos veces la altura del objeto más alto. La precisión de los aparatos ha evolucionado y en la actualidad existen pluviómetros automáticos, que registran las alturas de lluvia cada determinado tiempo y las transmiten a una central remota.

1866. United Kingdom. A. Apps creó el pluviógrafo de la Figura 2.6. Symons (1879) expuso algunas ideas de su funcionamiento.



Figura 2.6. Pluviógrafo de A. Apps. Symons (1879).

1869. United Kingdom. Robert Beckley inventó el pluviógrafo de la Figura 2.7. Symons (1871 y 1879) expuso algunas ideas de su funcionamiento.

1877. Suiza. Höttinger desarrolló el pluviógrafo de la Figura 2.8. Symons (1879) expuso algunas ideas de su funcionamiento

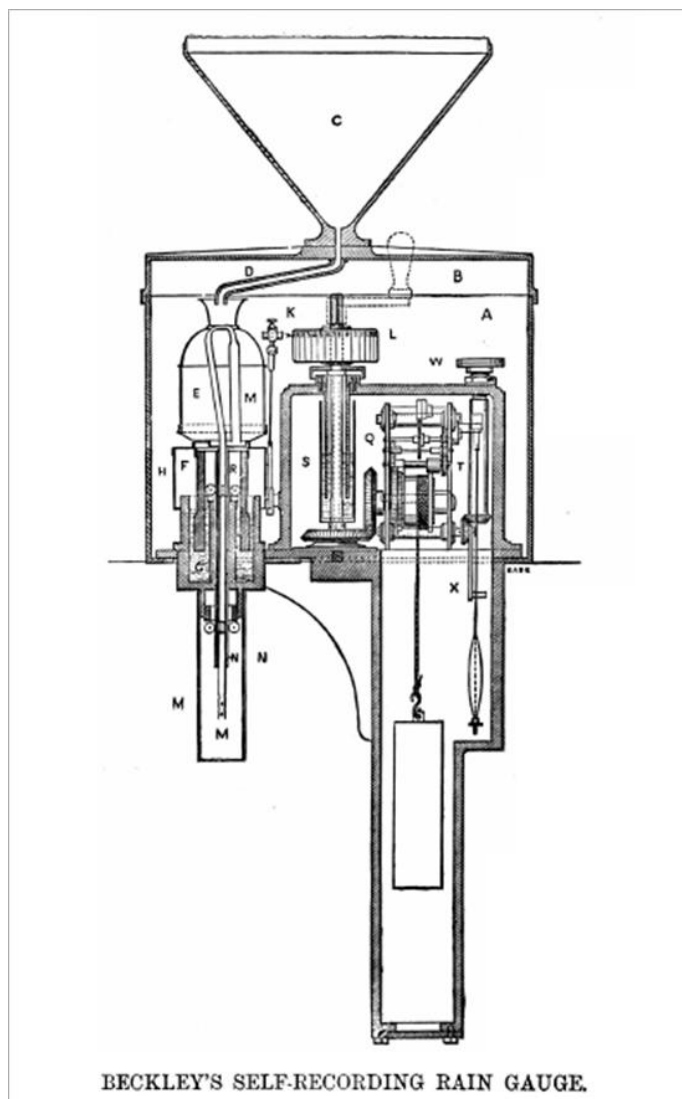


Figura 2.7. Pluviógrafo de Beckley. Symons (1871).

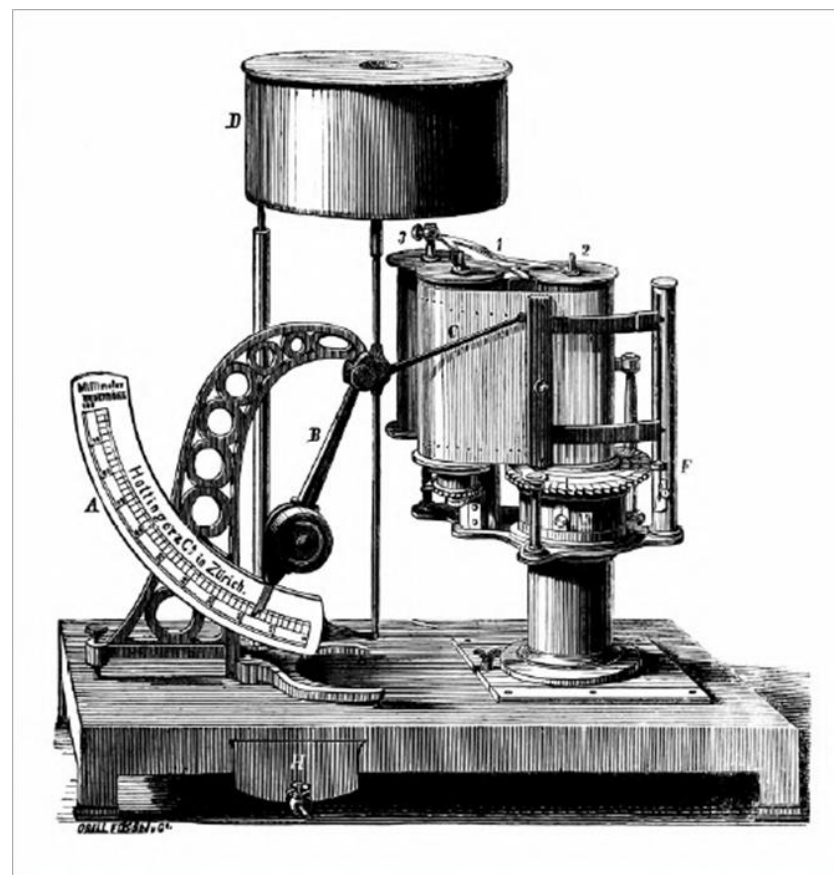


Figura 2.8. Pluviógrafo de Höttinger. Symons (1879).

1879. United Kingdom. Symons (1879) explicó con detalle el funcionamiento de 28 pluviómetros desarrollados en Europa y en América entre 1817 y 1879.

1879. Bélgica. Francois Van Rijsselberghe desarrolló un pluviógrafo que denominó “météographe universel”, el cual efectuaba una grabación electromagnética de la variación del nivel del agua en el aparato, algo notable para la época.

1893. Bélgica. Henry-Joseph Walravens. Creó el primer intento de pluviógrafo de cubeta basculante: cuando el cubo recibía una cantidad de agua correspondiente a una altura de lluvia de 0.1 mm, se balanceaba y se vaciaba; una plumilla describía una línea recta cuando no estaba lloviendo y pequeños escalones cuando llovía. La abertura de la sección de captación del pluviógrafo era de 36 cm.

1898. Alemania. Pluviógrafo de flotador de Gustav Hellmann y Rudolf Fuess. Este aparato ha sido el precursor de muchos pluviómetros con flotador. El principio en que se basó se describe a partir de la Figura 2.9. Este tipo de pluviógrafo consta de un recipiente cilíndrico con un flotador que sube según sea captada el agua y una gráfica montada en un cilindro que gira mediante un sistema de relojería. El movimiento del flotador mueve al mismo tiempo una plumilla que dibuja una gráfica en un papel graduado montado en el cilindro. Al llenarse el recipiente y alcanzar la elevación de un sifón autocebante, se vacía el agua, el flotador baja hasta el nivel de la base del recipiente y se repite el proceso hasta que la lluvia cesa. El vaciado debe ser eficiente, porque mientras el flotador desciende sigue lloviendo y el pluviógrafo no está registrando esa lluvia; por lo tanto, debe ser cuestión de segundos que se vacíe totalmente el agua. El recipiente tiene una capacidad de 10 mm de lluvia; si la lluvia es muy intensa, se llena muy rápido y la gráfica que dibuja la plumilla tiene una pendiente muy alta, ya que tarda poco tiempo en llenarse; si la lluvia tiene una intensidad baja, tarda mucho en llenarse y la pendiente de la gráfica es muy baja; cuando cesa la lluvia, la gráfica es una línea horizontal. La gráfica del pluviógrafo se llama pluviograma y a partir de ella, eliminando las caídas verticales, se obtiene la curva masa de la tormenta. El agua descargada por el sifón es almacenada en un recipiente para medir la cantidad total de precipitación. En la Figura 2.10 se muestra un pluviógrafo de Hellmann-Fuess.

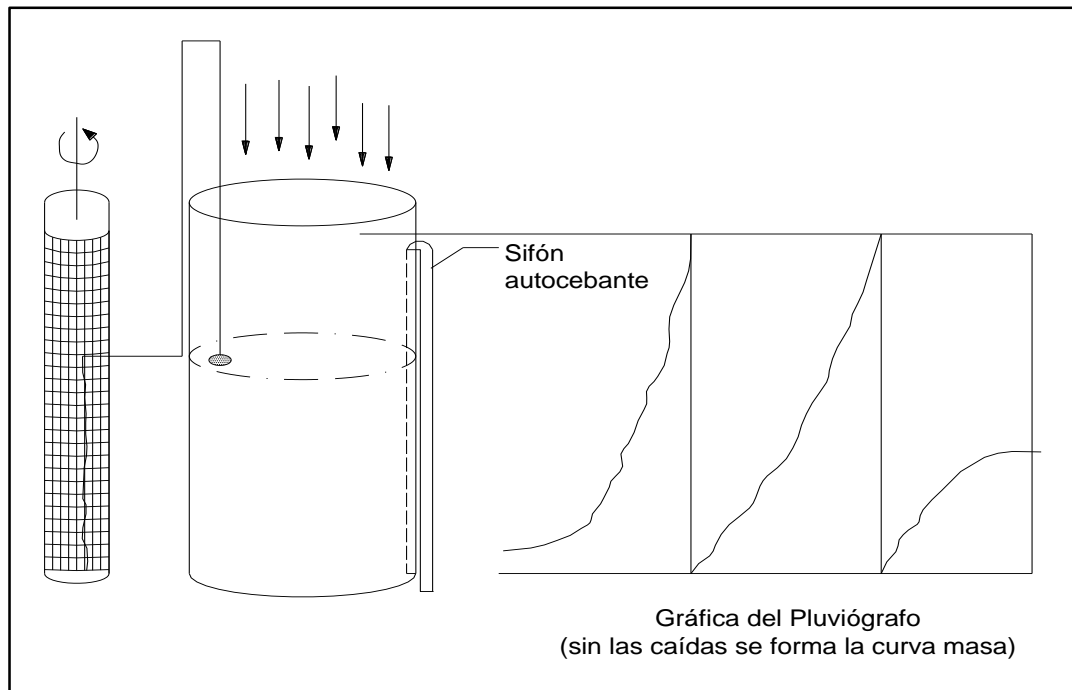


Figura 2.9. Esquema de funcionamiento de un pluviógrafo de flotador

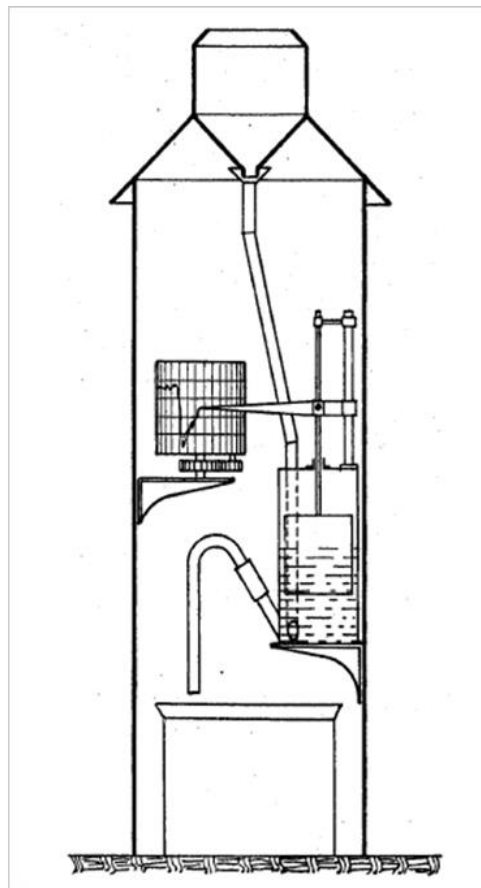


Figura 2.10. Pluviógrafo de Hellmann – Fuess. Demarée (2003).

1938. Estados Unidos de América. Ralph R. Chappell y Rutger B. Colt diseñaron un pluviógrafo de flotador, siguiendo muchas de las ideas del pluviógrafo de Hellmann-Fuess y lo patentaron. Fue la primera patente de un pluviógrafo. En la actualidad se comercializan muchos tipos de pluviógrafos de flotador, aunque han ido cayendo en desuso por el dibujo con tinta en una gráfica, que ahora se está sustituyendo por dispositivos electrónicos. Giovanni Sandoval *et al* (2010) presentaron un sistema computarizado para medir digitalmente el nivel del agua en el pluviógrafo mediante sensores y enviar las mediciones a una central remota para su análisis y visualización de las alturas de lluvia contra tiempo (pluviogramas) y estar en posibilidad de consultarlos en una página web. Irving A. González *et al* (2016) plantearon a partir del pluviógrafo de Hellmann, la construcción de un pluviógrafo semiautomático con una aplicación de software para analizar y presentar los datos; la automatización del pluviógrafo se logró mediante un sistema electrónico que contiene un sensor de nivel de líquidos, un módulo de control del tiempo y un microcontrolador; el software permite interpretar la información captada por el circuito electrónico, realizar consultas de los datos registrados por el pluviógrafo, describir mediante tablas cada tormenta y generar pluviogramas y hietogramas.

1953. Estados Unidos de América. John C. Kurtyka (1953) presentó un análisis exhaustivo de los métodos e instrumentos para medir la precipitación y una investigación bibliográfica de más de 1000 artículos técnicos.

1966. Estados Unidos de América. George Barker Alan diseñó un pluviógrafo denominado de cubeta basculante, siguiendo las ideas de Christopher Wren y Henry Walravens, y lo patentó. Es el más utilizado en la actualidad en los Estados Unidos de América (EUA), porque obtiene en forma sistemática la intensidad de lluvia. Mide la precipitación mediante un mecanismo de cubos de idénticas proporciones, calibrados, que indican el volumen de precipitación mediante una acción de conmutación, la cual vacía la lluvia colectada en uno de los cubos y pone al otro cubo listo para continuar el proceso de medición. La conmutación del mecanismo del balancín de las cubetas se genera cuando el peso de la precipitación almacenada en uno de los dos cubos provoca un desbalance respecto al otro cubo que forma la estructura, causando que se vacíe el agua contenida en el primer cubo. Cada vaciado de las cubetas activa un interruptor magnético que cierra un circuito generador de un pulso eléctrico que se

registra y se muestra en un contador enmarcado en la pared del pluviógrafo. Este tipo de pluviógrafos ha ido evolucionando y ahora los pulsos eléctricos pueden ser enviados a una central remota y dibujar automáticamente una gráfica de mediciones. El principio en que se basan se describe en la Figura 2.11 y como puede observarse, se trata de mediciones indirectas, ya que el número de pulsos eléctricos se traduce a intensidades de lluvia. Por lo tanto, es vital su correcta calibración y mantenimiento en todo tiempo. En lo que respecta a las cantidades totales de precipitación, se obtienen volúmenes menores que los reales, ya que cuando la lluvia es muy intensa, muchas gotas caen en el cubo cuando está por moverse; esto obliga a aplicar algoritmos para corregir el error.

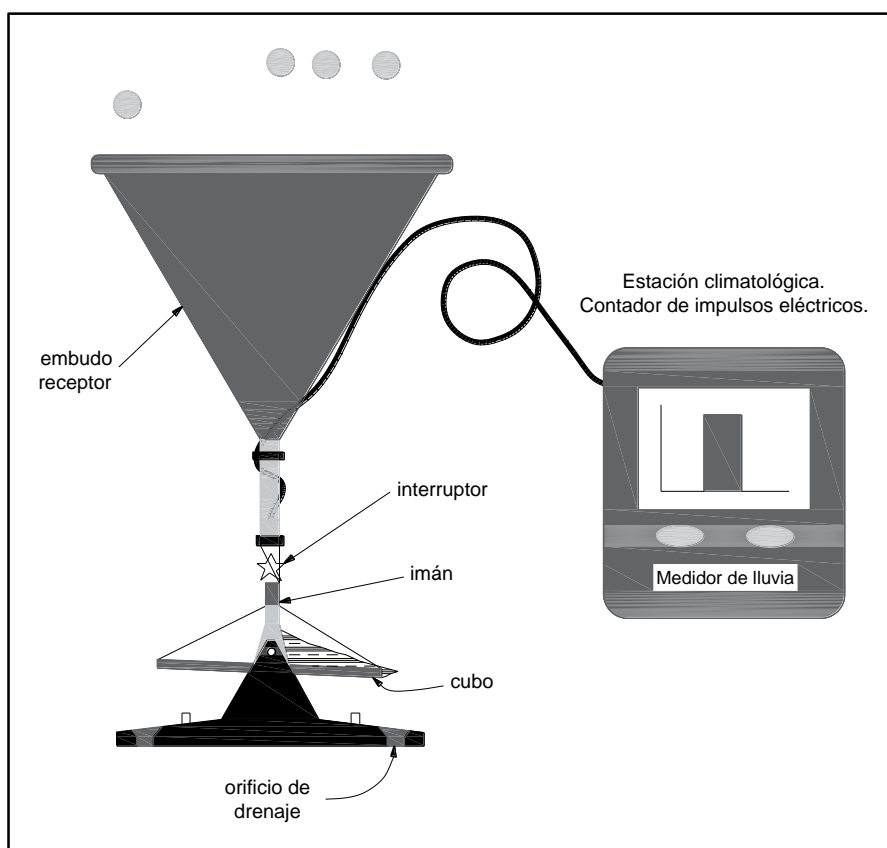


Figura 2.11. Esquema de funcionamiento de un pluviógrafo de cubeta basculante (reconstruida de Kifissiameteo, 2016).

Pluviógrafos de balanza. No se conoce con precisión el año en que comenzaron a utilizarse. En estos aparatos la lluvia se colecta en un recipiente en el cual el peso del agua acciona un mecanismo conectado al dispositivo registrador y una plumilla dibuja una gráfica en un papel montado en un cilindro que gira mediante un mecanismo de

relojería. El pluviógrafo proporciona una gráfica de lluvia acumulada contra tiempo; resulta útil cuando se miden alturas de nieve. Este tipo de pluviógrafo retoma las ideas de A.F. Osler de 1837, y desde entonces se han diseñado muchos pluviómetros de balanza. Un ejemplo es el que se muestra en la Figura 2.12.

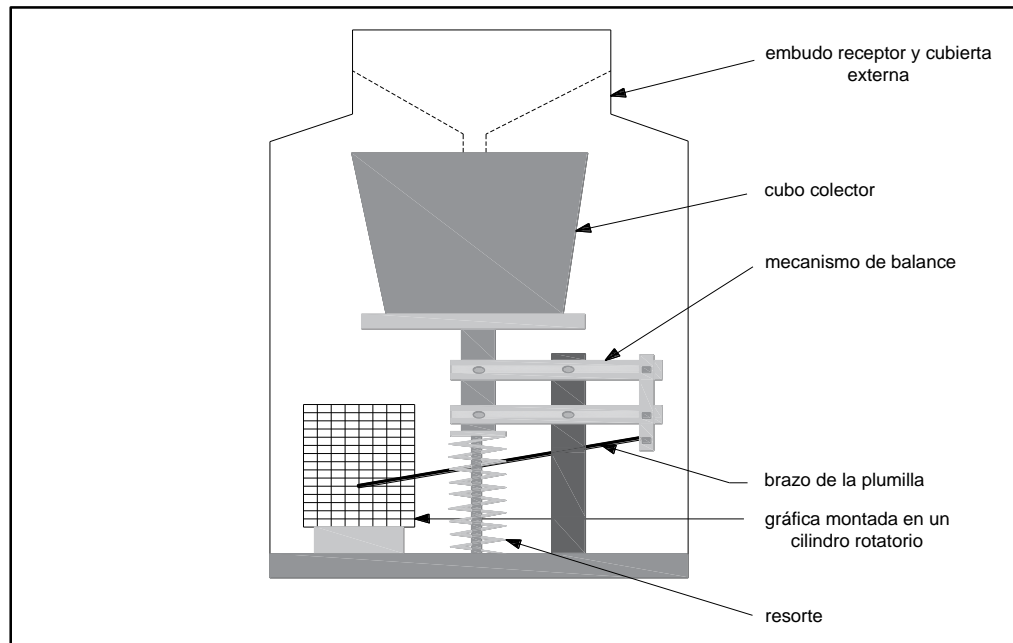


Figura 2.12. Esquema de funcionamiento de un pluviómetro de balanza.
<https://theconstructor.org/water-resources/types-of-rain-gauges/12801/>

Medidores ópticos de lluvia. Se desconoce el año en que empezaron a usarse, pero datan de la década de 1970. Son un derivado de instrumentos de visibilidad, ya que las gotas de lluvia que caen son detectadas por sus efectos en un rayo horizontal de luz emitido por el aparato. Son sensores de la tasa de precipitación, que permiten derivar las cantidades totales de lluvia. La conversión a intensidad de lluvia a partir de la señal de luz brillante se realiza mediante un algoritmo, mismo que tiene sus limitaciones en cuanto a precisión. La información es registrada en el sitio o es transmitida a una central remota.

En la actualidad se producen gran cantidad y variedad de pluviómetros y pluviómetros automatizados y es necesario mantenerlos calibrados para que siempre reporten las alturas e intensidades de lluvia que realmente ocurren. En algunas investigaciones se efectúan simultáneamente mediciones con aparatos manuales y automatizados, para estudiar las imprecisiones que ambos pueden tener.

En México existen en la actualidad 3,343 pluviómetros funcionando normalmente y 389 pluviógrafos con más de 8 años de registros, muchos de ellos ubicados en Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS). SCT (2016).

Tanto los pluviómetros como los pluviógrafos están sujetos a errores por diversas causas: a) producen mediciones puntuales, sólo representativas de la zona inmediata del aparato; b) el viento modifica el ángulo de caída de la lluvia; c) el tamaño de las gotas de lluvia influye en el ángulo de caída de la lluvia y las gotas muy pequeñas las arrastra fácilmente el viento; d) cuanto mayor sea la velocidad del viento, menor será la superficie efectiva de captación del aparato, aunque también la turbulencia inducida por la superficie del suelo en las inmediaciones del aparato induce un movimiento descendente que contrarresta el problema del ángulo de caída y mejora la capacidad de captación. The COMET Program (2015).

Radar meteorológico. (RADAR = RAdio Detection And Ranging). Es un dispositivo que se emplea para la medición y seguimiento de fenómenos atmosféricos constituidos por agua en forma de lluvia, granizo y nieve. Como ejemplo, ver Figura 2.13. Permite determinar la posición, distancia, densidad y dimensiones de una “masa” de lluvia a partir de la emisión de ondas electromagnéticas y la recepción de ondas que se reflejan en dicha masa.



Figura 2.13. Radar meteorológico de la Comisión Estatal de Aguas de Querétaro. <http://www.ceaqueretaro.gob.mx>

Se originó en la U.S. Army Air Corps al finalizar la Segunda Guerra Mundial y desde entonces ha sido estudiado y perfeccionado (American Meteorological Society, 1990). Con los radares es posible conocer en tiempo real las condiciones meteorológicas, observar la posición y movimiento de las áreas de precipitación, estimar la intensidad de la lluvia y la dirección y velocidad del viento. Asimismo, calcular la Precipitación Máxima Probable (PMP) dentro de un rango de alcance. Una desventaja de los radares es la interpretación de la reflexión de la onda emitida, ya que ésta debe ser calibrada para que pueda traducirse a intensidad de lluvia. Se emplean principalmente los radares Doppler, ya que pueden detectar tanto el movimiento de las gotas de lluvia como la intensidad de lluvia y con el análisis de ambos datos es posible determinar la estructura de las tormentas y su potencial. Las imágenes de radar permiten pronosticar la trayectoria e intensidad de huracanes y tormentas extremas y alertar a la población. La Red Nacional de Radares Meteorológicos de México está formada por 13 radares operados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN): Acapulco, Altamira, Alvarado, Cancún, Cuyutlán, Catedral, El Mozotal, Guasave, Los Cabos, Obregón, Puerto Angel, Palmito y Sabancuy, ver Figura 2.14. Se utiliza también la información que genera el radar Querétaro y seis radares más, ubicados en la frontera México - Estados Unidos controlados por la National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA: Brownsville, El Paso, Laughlin Air Force Base, San Diego, Tucson y Yuma.

La reflectividad del radar es la que define la intensidad de lluvia. Las gotas grandes de lluvia son más achatadas que las gotas pequeñas, reflejan más energía de vuelta al instrumento y por lo tanto exageran las estimaciones de la intensidad de lluvia; algo similar ocurre con las tormentas de granizo. La distribución de tamaños de las gotas de lluvia puede variar considerablemente en espacio y tiempo, por lo que el radar debe ser capaz de aplicar relaciones de corrección entre la reflectividad y la intensidad de lluvia. El radio de alcance ideal de radares es de 230 km, pero en caso de tener terreno accidentado ese radio debe reducirse a veces a menos de 100 km. En los sitios en que el terreno es plano y la red de radares es suficientemente densa se puede obtener una buena cobertura. Cuando el radar muestrea la atmósfera a más de 3 km de altura, las precipitaciones de algunos sistemas no se detectan. Las barreras topográficas impiden la capacidad de muestreo del radar, aunque tengan un radio de cobertura de 230 km. Es un hecho que la mejor cobertura de radar se obtiene con las precipitaciones

convectivas y líquidas en regiones con escasos accidentes del terreno. The COMET Program (2015).



Figura 2.14. Cobertura de la Red Nacional de Radares Meteorológicos. <http://ciclotrop.com>

Michel Rosengaus (1995) describió con detalle los radares meteorológicos, sus componentes, funcionamiento, procesamiento digital, aplicaciones y limitaciones.

La climatología de la precipitación ayuda a estimar la precipitación en los sitios donde se carece de mediciones o éstas son escasas. La herramienta más usada en EUA es el modelo denominado PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model), que conjunta observaciones del clima a partir de una amplia red de monitoreo, para desarrollar datos que reflejen lo más posible los patrones climáticos espaciales actuales y revelar patrones a corto y a largo plazo. El modelo toma en cuenta factores como la ubicación, altitud, proximidad a la costa, topografía, etc. El procedimiento resulta útil para los casos en que los datos de lluvia son escasos o

dispersos, o existen gradientes de elevación. Considera que la elevación es el principal determinante de los patrones de precipitación y que existe una relación entre las isoyetas y las curvas de nivel. Desarrolla una función de regresión entre la precipitación y la elevación utilizando datos de estaciones en las inmediaciones y se creó un algoritmo para dividir automáticamente el terreno en facetas topográficas con varias categorías de orientación de la pendiente (W, NW, N, S, etc.). PRISM Climate Group (2016).

Aún en este tema de los radares meteorológicos están presentes los pluviógrafos, ya que para su calibración hidrológica, es decir, para graduar la relación entre la reflectividad y la intensidad de lluvia, es necesario contar con una red de pluviógrafos con un buen número de años de registros.

Rosengaus (1999) afirmó que las intensidades máximas de lluvia siempre resultan suavizadas y subestimadas por el radar meteorológico, y aumenta este efecto con la distancia radial. Obsérvese que tales intensidades máximas son las que están ligadas a duraciones cortas de lluvia y son las que en un momento dado producen la falla de obras de drenaje de las vías terrestres. Esto hace notar la importancia de tener una red de pluviógrafos bien distribuida en el territorio nacional.

Del desarrollo de este capítulo, se desprende que la precipitación se puede medir en forma directa mediante pluviómetros y pluviógrafos, o indirecta mediante plataformas de percepción remota, como los radares.

Con frecuencia las mediciones pluviométricas y pluviográficas, por ser directas se consideran como una verdad absoluta. Sin embargo, en los pluviómetros y pluviógrafos se producen errores inherentes a los propios aparatos y errores ocasionados por características de la precipitación y del viento. Además, los pluviómetros y pluviógrafos no representan el detalle espacial.

La percepción remota a base de radares meteorológicos permite obtener medidas indirectas que cubren regiones extensas y pueden brindar una excelente resolución espacial y temporal. Sin embargo, las estimaciones de precipitación pueden llegar a contener errores relacionados con los sensores y las características propias de la precipitación.

Por lo tanto, las mediciones de lluvia directas y las indirectas son sistemas complementarios. Las primeras son mediciones puntuales sobre el terreno, mientras que las segundas miden a una cierta altura sobre el terreno y detectan la estructura espacial de las tormentas.

Las Normas Mexicanas “*NMX-AA-166/1-SCFI-2013. Estaciones meteorológicas, climatológicas e hidrológicas – Parte 1: Especificaciones técnicas que deben cumplir los materiales e instrumentos de medición de las estaciones meteorológicas automáticas y convencionales*” y “*NMX-AA-166/2-SCFI-2015. Especificaciones técnicas que deben cumplir el emplazamiento y exposición de los instrumentos de medición de las estaciones meteorológicas automáticas y convencionales*” establecen todos los requisitos que deben cumplir las instalaciones y los aparatos de medición de la precipitación pluvial en México. Secretaría de Economía (2013 y 2015).

Capítulo 3. Proyecto de instrumentación pluviográfica para la República Mexicana.

A principios de la década de 1980 la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) dependiente de la entonces Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP), desarrolló un proyecto de instrumentación pluviográfica para la República Mexicana y lo puso a la consideración de la entonces Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Dicho trabajo fue motivado por la necesidad de contar con valores de intensidades de lluvia asociadas a distintas duraciones y períodos de retorno, para realizar estudios hidrológicos más confiables para el diseño de obras de drenaje de carreteras, vías férreas, aeropuertos, puertos, zonas urbanas, etc. En el VI Congreso Nacional de Hidráulica se presentó un resumen de dicho proyecto (Gabriel Atala y Arturo M. Monforte, 1980).

Las Dependencias del Gobierno Federal que principalmente han instalado y controlado estaciones pluviográficas han sido las relacionadas con recursos hidráulicos y con generación de energía hidroeléctrica, estableciendo una red de estaciones de acuerdo con sus necesidades, que en general son casi siempre las grandes cuencas. En éstas, los escurrimientos son medidos mediante estaciones de aforo y las principales cuencas están instrumentadas por las Dependencias mencionadas.

En 1980 la red pluviográfica nacional estaba constituida por 477 aparatos operando normalmente, con una distribución muy deficiente, ya que el 51% de ellos se localizaba en la cuarta parte del territorio, además de que en cada Estado la distribución era también deficiente. En la Tabla 3.1 se anotan los estados de la República Mexicana, su extensión territorial (Área, A), el número de estaciones de medición (N) y la densidad de pluviógrafos (A/N) que había en 1980.

La OMM recomendaba con base en mediciones realizadas en todo el mundo, la densidad de pluviógrafos más conveniente, en función de las características topográficas y climatológicas de cada región (ver Tabla 3.2).

Tabla 3.1. Estaciones pluviográficas operando normalmente en México en 1980. SAHOP (1980).

Estados	Área (km ²)	N	A/N	Estados	Área (km ²)	N	A/N
Aguascalientes	5,589	2	2,794.5	Nayarit	27,621	5	5,524.2
Baja California	70,113	18	3,895.2	Nuevo León	64,555	18	3,586.4
BCS	73,667	14	5,261.9	Oaxaca	95,364	38	2509.6
Campeche	51,833	4	12,958.3	Puebla	33,919	12	2,826.6
Coahuila	151,571	5	30,314.2	Querétaro	11,769	4	2,942.3
Colima	5,455	5	1,091.0	Q. Roo	50,350	3	16,783.3
Chiapas	73,887	35	2,111.1	SLP	62,848	18	3,491.6
Chihuahua	247,087	11	22,462.5	Sinaloa	58,092	11	5,281.1
Durango	119,648	19	6,297.3	Sonora	184,934	14	13,209.6
Guanajuato	30,589	18	1,699.4	Tabasco	24,661	15	1,644.1
Guerrero	63,794	25	2,551.8	Tamaulipas	79,229	26	3,047.3
Hidalgo	20,987	15	1,399.1	Tlaxcala	3,914	9	434.9
Jalisco	80,137	26	3082.2	Veracruz	72,815	28	2,600.5
Edo de México	21,461	37	580.0	Yucatán	39,340	4	9,835.0
Michoacán	59,864	28	2,138.0	Zacatecas	75,040	7	10,720.0
Morelos	4,941	6	823.5	Totales	1,965,074	477	4,119.7

Tabla 3.2. Densidad de pluviógrafos sugerida por la OMM (citado por SAHOP, 1980).

Tipo de región	Tolerancia normal (km ²) (área por estación)	Tolerancia bajo dificultades * (km ²) (área por estación)
Zonas planas, temperatura mediterránea, zonas tropicales	600-900	900-1000
Zonas montañosas	100-250	250-2000
Zonas áridas y polares	1500-10000	

* Se refiere a problemas de comunicación en las regiones.

Como puede observarse, la red de pluviógrafos que existía en México en 1980 no cumplía las recomendaciones de la OMM, lo que motivó a desarrollar el proyecto de instrumentación pluviográfica.

En la elaboración del proyecto, el aspecto climatológico se atendió mediante cartas de climas de la República editadas por la Dirección de Estudios del Territorio Nacional (DETENAL). Se consideraron los climas cálido, templado y el seco o desértico.

El aspecto topográfico se estudió con el empleo de cartas editadas por la Secretaría de la Defensa Nacional (SDN), aumentando o disminuyendo el número de pluviógrafos de acuerdo con lo accidentado del terreno.

El aspecto de comunicación se analizó utilizando mapas de carreteras editados por la SAHOP. En este rubro, las facilidades de comunicación fueron decisivas, ya que las zonas marginadas no permitirían su inspección rutinaria a un costo razonable. Esto obligó a dejar algunas zonas de gran extensión sin instrumentación.

Considerando los aspectos anteriores, se obtuvo como resultado del proyecto la promesa de instalar 577 nuevos aparatos, que con los 477 existentes conformarían una red pluviográfica nacional adecuadamente distribuida.

Para disminuir el costo de operación de los pluviógrafos, se propuso ubicarlos en los campamentos de distintas Dependencias oficiales, en cabeceras de Municipio y en poblaciones en que podían ser controlados por personal de las Presidencias y Delegaciones Municipales. En el caso de poblaciones pequeñas, se propuso coordinar el control por medio de las escuelas de las localidades. Lo importante era procurar al máximo posible que los pluviógrafos quedaran a salvo de cualquier persona o animal que pudiera destruirlos. Desde luego que se seguirían los lineamientos establecidos por la SARH y el SMN, por ser los responsables de la instrumentación y operación de la red climatológica del país.

No se propusieron estaciones pluviográficas cerca de la frontera con Estados Unidos, ya que era posible aprovechar la información existente en los estados de California, Arizona, Nuevo México y Texas.

Como ejemplo, en la Tabla 3.3 y la Figura 3.1 se muestra cómo quedó la red de pluviógrafos para el estado de Puebla. En la Figura 3.1 los círculos verdes indican estaciones pluviográficas existentes y los rojos, estaciones propuestas.

Tabla 3.3. Proyecto de Instrumentación Pluviográfica de la República Mexicana. Red de pluviómetros para el estado de Puebla. SAHOP (1980).

Estación	Coordenadas		Años de registro	Fuente	Municipio	Comunicación
	Latitud	Longitud				
Aljojuca	19°06'	97°32'	-	-	Aljojuca	1
Analco	19°35'	97°53'	-	-	Ixtacamaxtitlán	2
Atlixco	18°55'	98°25'	-	-	Atlixco	1
Balcón del diablo	18°50'	98°06'	24	1	-	-
Caltepec	18°12'	97°29'	19	1	-	-
Cuesta Blanca	18°50'	97°28'	2	1	-	-
Chiautla	18°17'	98°35'	-	-	Chiautla	1
Chignahuapan	19°51'	98°04'	1	1	-	-
El Carmen	20°05'	98°07'	15	1	-	-
Izúcar de Matamoros	18°35'	98°29'	-	-	-	-
La Ceiba	20°25'	97°54'	-	-	-	-
Metlaltoyuca	20°45'	98°51'	-	-	Metlaltoyuca	2
Oriental	19°20'	97°38'	-	-	-	-
Palmar de Bravo	18°51'	97°33'	4	1	-	-
Petlalcingo	18°58'	97°55'	-	-	Petlalcingo	1
Puebla	19°01'	98°11'	8	2	-	-
San Francisco Tepango	18°50'	98°44'	-	-	Santiago Atzitzihuacán	2
San Lorenzo Teotipilco	18°25'	97°28'	8	1	-	-
San Martín Atexcal	18°24'	97°44'	-	-	San Martín Atexcal	2
Santiago Zautla	19°43'	97°40'	26	3	-	-
Tecamachalco	18°53'	97°43'	31	1	-	-
Tehuiztingo	18°20'	98°17'	-	-	-	-
Telpatlán	18°31'	97°08'	19	1	-	-
Tenampulco	20°10'	97°25'	-	-	Tenampulco	2
Teotlalcingo	19°14'	98°30'	-	-	Teotlalcingo	3
Tlatlauqui	19°53'	97°29'	28	3	-	-
Zacapala	18°34'	98°05'	-	-	Zacapala	2
Zapotitlán	19°59'	97°43'	-	-	Zapotitlán	3
Zoquitlán	18°22'	97°00'	-	-	Zoquitlán	3

Fuente: 1 Dirección General de Estudios, SARH; 2 Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional, SARH; 3 Comisión Federal de Electricidad; 4 SAHOP

Comunicaciones: 1 Camino pavimentado; 2 Camino revestido; 3 Terracería; 4 Brecha; 5 FC; 6 Aeropuerto

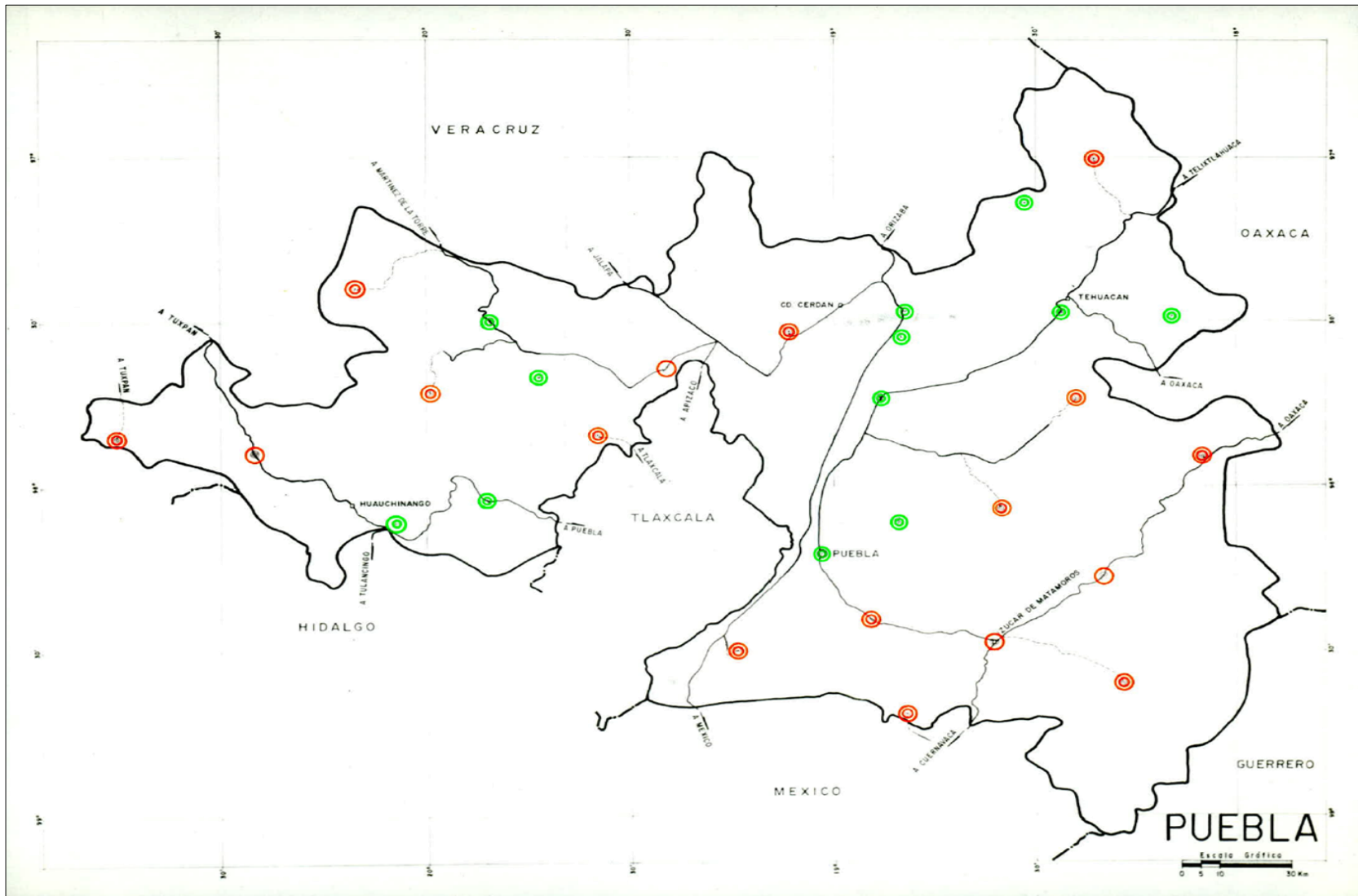


Figura 3.1 Localización geográfica de las estaciones pluviográficas del estado de Puebla. SAHOP (1980).

La información pluviográfica obtenida se procesaría estadísticamente de manera periódica para dibujar curvas I-d-T y mapas de Isoyetas de I-d-T. Estas acciones permitirían conocer con buena aproximación la precipitación para fines de diseño en cualquier punto del territorio nacional. Así, a un bajo costo, se tendría valiosa información para cualquier organismo federal, estatal o particular cuyas actividades estuvieran relacionadas con el agua.

Se planteó que era posible adquirir los aparatos en el mercado nacional, se evaluó la inversión inicial y los costos por la operación y mantenimiento y se determinó que era un proyecto rentable, ya que las inversiones eran de poca monta comparadas con los beneficios que obtendría el país en general.

El proyecto de instrumentación pluviográfica no se llevó a cabo en campo. A través de los años la red de pluviógrafos se ha ido modificando, debido a que algunas estaciones fueron suspendidas y a que también se instalaron nuevas estaciones. La Tabla 3.4 muestra la evolución de pluviógrafos instalados en la República Mexicana y que tenían más de 8 años de registros en los años que se indican. Se observa que en 1980 existían más pluviógrafos con más de ocho años de registros que en 2016 y además, como ya se dijo, en ese lapso muchos fueron eliminados definitivamente y muchos otros fueron instalados.

La Tabla 3.4 indica también que en los estados de Guerrero, Oaxaca, Tabasco y Veracruz, en los cuales año con año existen afectaciones a las carreteras por efecto de las lluvias, el número de pluviógrafos instalados ha decrecido drásticamente. La reducción de la información pluviográfica inevitablemente sacrifica la calidad de los estudios hidrológicos que se realicen para solucionar los problemas de drenaje que se producen.

Tabla 3.4. Evolución de pluviómetros instalados en México de 1980 a 2016.

Estado	1980	1990	2000	2016
Aguascalientes	2	2	2	3
BC	18	11	15	17
BCS	14	10	10	10
Campeche	4	2	2	7
Coahuila	5	5	10	7
Colima	5	4	4	4
Chiapas	35	31	46	35
Chihuahua	11	3	19	14
DF	-	13	54	10
Durango	19	10	12	6
Edo de México	37	34	50	41
Guanajuato	18	14	14	7
Guerrero	25	22	35	8
Hidalgo	15	14	14	11
Jalisco	26	16	20	19
Michoacán	28	16	21	22
Morelos	6	2	3	4
Nayarit	5	4	6	7
Nuevo León	18	18	18	17
Oaxaca	38	32	44	16
Puebla	12	9	18	11
Querétaro	4	3	3	8
Q. Roo	3	2	2	5
SLP	18	11	10	7
Sinaloa	11	9	9	11
Sonora	14	13	14	18
Tabasco	15	10	10	6
Tamaulipas	26	23	23	23
Tlaxcala	9	5	7	4
Veracruz	28	24	27	18
Yucatán	4	4	4	7
Zacatecas	7	6	6	6
Totales	477	382	528	389

Fuentes: SAHOP 1980, SCT 1990, SCT 2000, SCT 2016

Es conveniente retomar ideas del proyecto de instrumentación pluviométrica descrito en este capítulo, ya que se mejoraría la red de pluviómetros del país en cuanto a su tamaño, distribución, operación y mantenimiento.

Capítulo 4. Procesamiento de información pluviográfica para obtener intensidades de lluvia asociadas a duraciones y períodos de retorno.

Como se ha explicado en los capítulos precedentes, las curvas I-d-T son un importante recurso para el diseño hidráulico de obras de drenaje de vías terrestres. Por ello, la Dirección General de Servicios Técnicos ha asumido la responsabilidad de elaborarlas desde 1970 hasta la fecha a través de la Secretaría de Obras Públicas (SOP), la SAHOP y la SCT. En las décadas de 1970 y 1980, cuando era necesario efectuar estudios hidrológicos para el diseño hidráulico de algún puente, se buscaba la información de pluviógrafos de la estación más cercana al cruce, en dependencias del Gobierno Federal que operaran tales aparatos, como la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), la SARH, el SMN, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA). Así, en un lapso del orden de 20 años se construyeron curvas I-d-T de más de 200 estaciones pluviográficas. En un principio se dibujaron en papel con escala aritmética y después en papel con escala logarítmica. A manera de ilustración, en la Figura 4.1 se presentan las curvas I-d-T de la estación Tapachula, Chis., preparadas en 1982. El procedimiento para su elaboración en esos años era diferente al que se emplea en la actualidad, ya que con el desarrollo de la tecnología se han facilitado los análisis y se ha mejorado la presentación de resultados.

Como se comentó en el capítulo 3, el proyecto de instrumentación pluviográfica nunca se llevó a la práctica. Tampoco se elaboraron por parte de alguna de las Dependencias antes citadas, curvas I-d-T, ni isoyetas de I-d-T empleando la información pluviográfica disponible. Por tal motivo, en la SCT, a través de la DGST, se decidió elaborar las curvas I-d-T de las estaciones que tuvieran más de ocho años de registros, para posteriormente construir Isoyetas de I-d-T para todo el país. En 1990 la SCT publicó por primera vez las Isoyetas de I-d-T, en 2000 las actualizó y está por publicar una nueva actualización. SCT (1990, 2000 y 2016). En las tres ediciones, para la frontera norte se consideraron las isoyetas elaboradas en EUA para los estados de California, Arizona, Nuevo México y Texas.

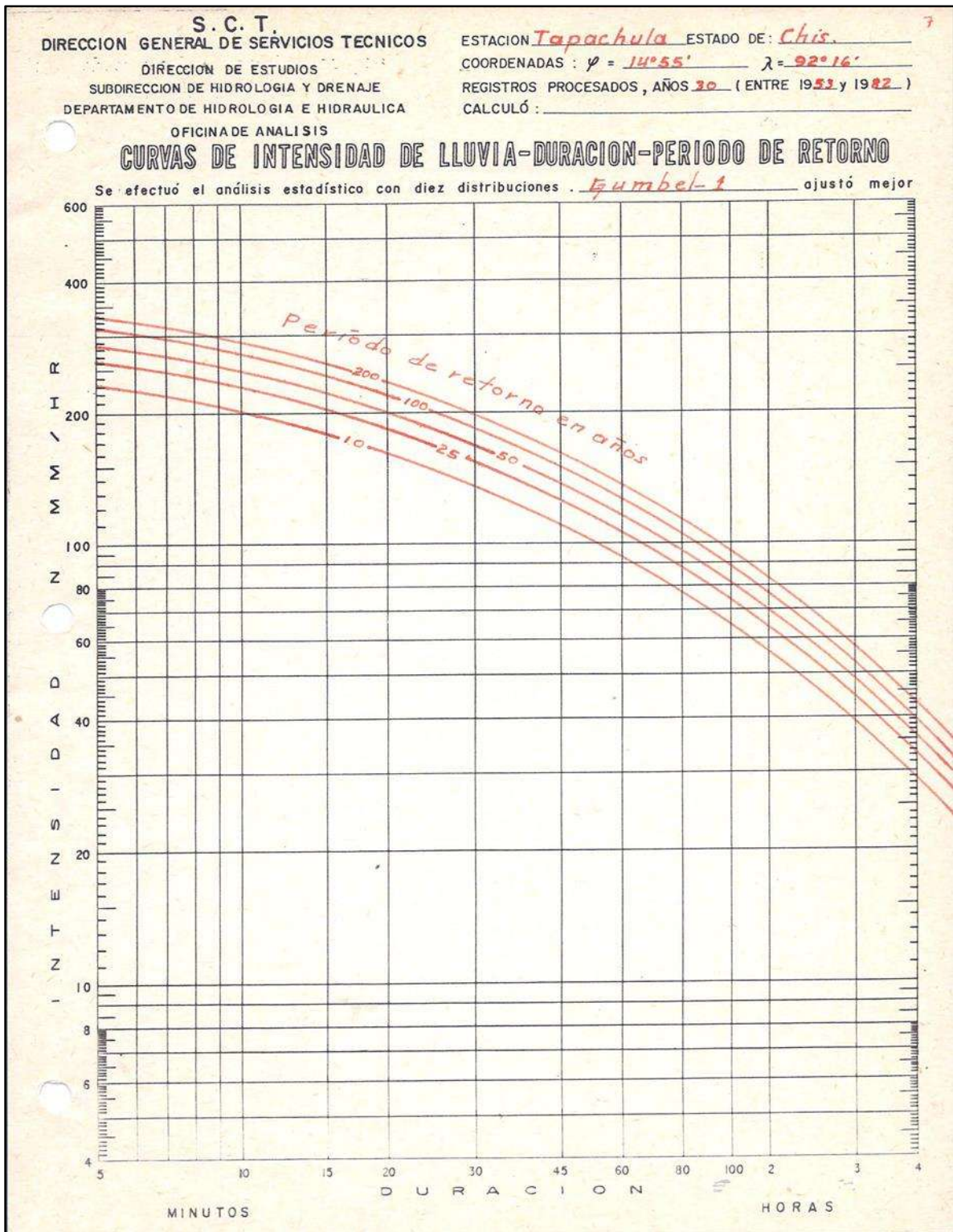


Figura 4.1. Curvas I-d-T de la estación Tapachula, Chis. SCT-DGST (1982).

El procedimiento actual para elaborar curvas I-d-T y las Isoyetas de I-d-T a partir de mediciones de pluviógrafos es el siguiente:

- a) Recopilar pluviogramas en las Dependencias que operan pluviógrafos, observándolos cuidadosamente para identificar los que reportan lluvias intensas, es decir, aquellos en que la línea de la gráfica h_p contra t tiene pendientes ascendentes muy altas, lo cual indica una fuerte variación de la altura de lluvia con respecto al tiempo, según se explicó en el capítulo 2 al describir el pluviógrafo de Hellmann-Fuess. Este tipo de pluviogramas son importantes, ya que indican las intensidades de lluvia para duraciones cortas, que son las que con frecuencia afectan a las obras de drenaje de vías terrestres, pero desde luego es necesario que en la selección de pluviogramas se consideren todos aquellos que puedan contener intensidades máximas para todas las duraciones que se estudien. Existen pluviómetros instalados en Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), en los que se toman lecturas a cada 10 minutos. En virtud de que estos aparatos no tienen un registro continuo, no siempre registran los valores máximos de la intensidad de lluvia, porque pueden ocurrir en los lapsos de 10 minutos en que no se efectúa medición alguna.
- b) Seleccionar de cada estación, para cada uno de los años de registros, los pluviogramas con los que se puedan obtener alturas máximas de lluvia para duraciones de 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 90, 120, 150, 180, 210 y 240 minutos. Por supuesto, es posible que existan varios pluviogramas por año y de ellos se obtengan las intensidades máximas de lluvia para las distintas duraciones. Esto significa que las intensidades máximas de lluvia anual para las distintas duraciones se obtienen a partir de varios pluviogramas de tormentas que ocurren durante el año. Podría suceder que un pluviograma sea útil por proporcionar la intensidad máxima en 5 minutos y otro, por ejemplo, por proporcionar la intensidad máxima para otras dos duraciones, etc. Se complementa la información con las EMAS sólo en los casos en que no existan pluviógrafos o que los que existan tengan información escasa.
- c) Obtener a partir de los pluviogramas, la curva masa de cada una de las tormentas.
- d) En cada curva masa, obtener para cada duración la intensidad máxima de lluvia (I_d). Las intensidades máximas se obtienen al determinar en la curva masa, para cada

duración (d), el incremento máximo de altura de lluvia (Δh_p) y con él se calcula la intensidad de acuerdo con la siguiente expresión:

$$I_d = \Delta h_p / d$$

En los casos en que se haya recopilado más de una curva masa por año, se selecciona como intensidad máxima de lluvia para cada duración (I_d), la de mayor magnitud.

El trabajo de los incisos c y d se puede facilitar mediante un programa en formato Excel, que podría ser una macro, que permita:

- capturar la curva masa de cada tormenta en dos columnas: hora y h_p acumulada en mm;
- dividir la duración total de cada tormenta en duraciones de 1 min; con esto se obtiene la altura de lluvia minuto por minuto;
- sumar las columnas de lluvia de acuerdo con la duración que se necesite. Por ejemplo, para $d = 5$ min:
 - suma las alturas de lluvia de los primeros 5 min;
 - recorre 1 min para hacer la sumatoria de los siguientes 5 min, y así sucesivamente;
 - localiza el valor máximo de h_p para 5 min y calcula la intensidad máxima, $I_{m\acute{a}x} = h_{p m\acute{a}x} / (5/60)$. Se divide la duración de 5 minutos entre 60 para obtener la intensidad en mm/h;
 - se repite el proceso para las demás duraciones de lluvia.

e) Así, para cada una de las curvas masa, se obtienen las intensidades máximas I_5 , I_{10} , I_{15} , I_{20} , I_{30} , I_{40} , I_{60} , I_{90} , I_{120} , I_{150} , I_{180} , I_{210} e I_{240} .

Con objeto de que el procedimiento descrito anteriormente sea más comprensible, se apoya con un ejemplo. Supóngase que la Estación A tiene 8 años de registros y se recopilaron diez pluviogramas, los cuales son representativos de las intensidades de lluvia para las duraciones citadas en el inciso b. En la Figura 4.2 se presenta el pluviograma de cada tormenta, la curva masa correspondiente y la forma como se calcula la intensidad para distintas duraciones.

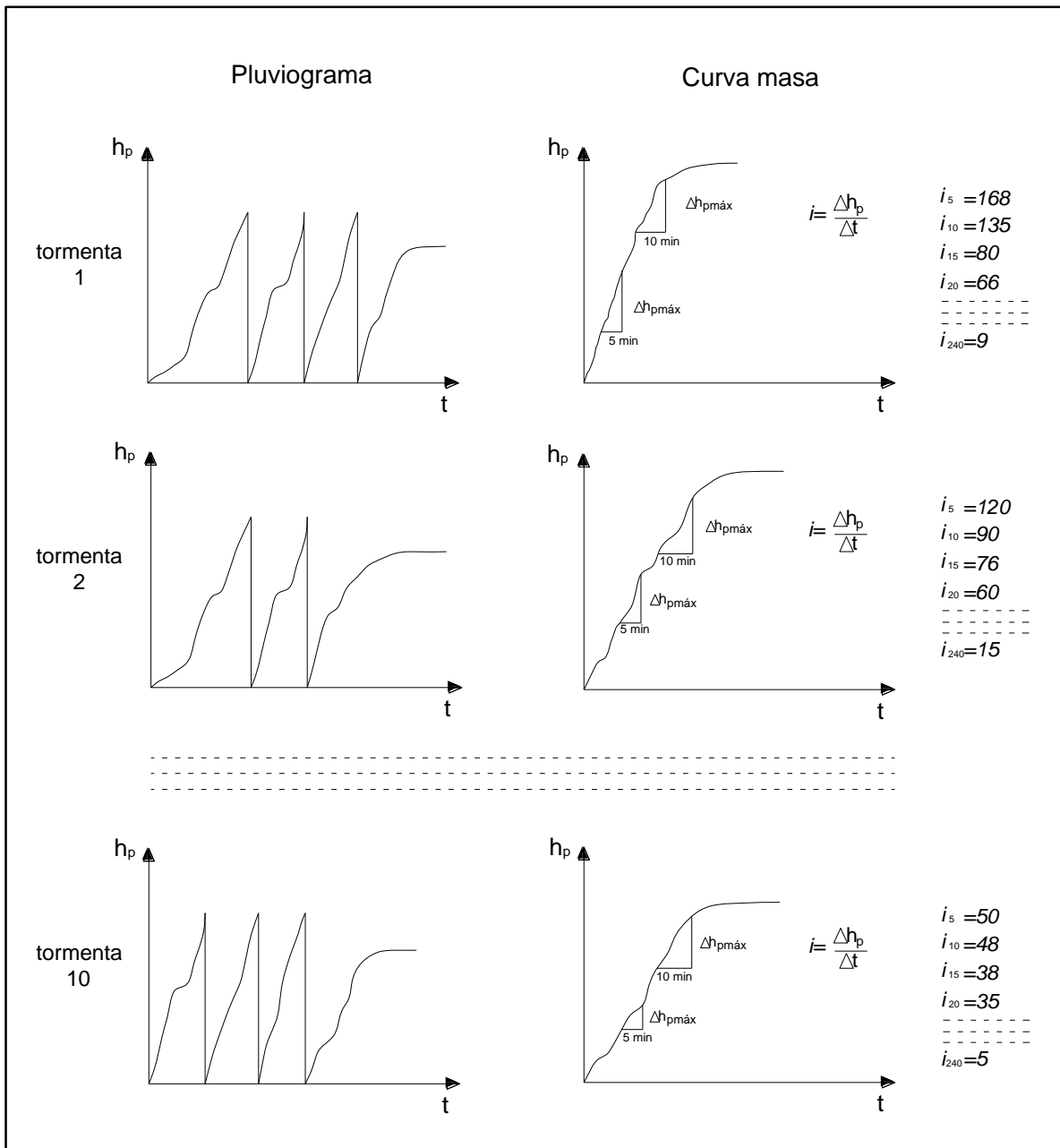


Figura 4.2. Procedimiento para obtener las intensidades máximas de lluvia.

f) Preparar un resumen de las intensidades de lluvia máximas obtenidas para cada uno de los años de registro. Siguiendo con el ejemplo, en las Tablas 4.1(a) a 4.1(c) se presenta el procedimiento para ordenar las intensidades I_d y elaborar el resumen:

Tablas 4.1. Procedimiento para ordenar las intensidades de lluvia I_d y obtener un resumen de ellas.

(a)

Año	N_T	m	I_5
2009	3	1	180
	4		175
2007	1	2	168
2012	8	3	120
2011	6	4	120
	7		117
2008	2	5	120
2010	5	6	120
2014	10	7	50
2013	9	8	48

↓

Año	N_T	m	I_{10}
2009	3		145
	4	1	150
2007	1	2	135
2012	8	3	104
2008	2	4	90
2011	6		87
	7	5	90
2010	5	6	80
2014	10	7	48
2013	9	8	44

↓

Año	N_T	m	I_{240}
2009	3	1	16
	4		15
2008	2	2	15
2012	8	3	14
2011	6		9
	7	4	11
2010	5	5	10
2007	1	6	9
2013	9	7	8
2014	10	8	5

↓

(b)

Año	N_T	m	I_5
2009	3	1	180
2007	1	2	168
2012	8	3	120
2011	6	4	120
2008	2	5	120
2010	5	6	120
2014	10	7	50
2013	9	8	48

↓

Año	N_T	m	I_{10}
2009	4	1	150
2007	1	2	135
2012	8	3	104
2008	2	4	90
2011	7	5	90
2010	5	6	80
2014	10	7	48
2013	9	8	44

↓

Año	N_T	m	I_{240}
2009	3	1	16
2008	2	2	15
2012	8	3	14
2011	7	4	11
2010	5	5	10
2007	1	6	9
2013	9	7	8
2014	10	8	5

↓

(c)

m	I_5
1	180
2	168
3	120
4	120
5	120
6	120
7	50
8	48

↓

m	I_{10}
1	150
2	135
3	104
4	90
5	90
6	80
7	48
8	44

↓

m	I_{240}
1	16
2	15
3	14
4	11
5	10
6	9
7	8
8	5

Notación:

N_T = número de tormenta

m = número de orden de mayor a menor de las intensidades I_d

En las Tablas 4.1(a) el ejemplo indica que para 2011 hubo dos intensidades máximas calculadas, correspondientes a las tormentas 6 y 7 y se seleccionó la mayor de las dos. Las Tablas 4.1(c), que muestran la relación entre m e I_d , constituyen muestras

aleatorias de intensidades máximas anuales. Es un hecho que cuanto más grandes sean las muestras, más representativas serán de la población de intensidades máximas anuales.

g) Efectuar un análisis de distribuciones de probabilidad a las muestras aleatorias $m-I_d$ y determinar a cual distribución se ajustan más. Para el ejemplo se aplicaron las distribuciones de probabilidad Exponencial, Gamma 2p, Gumbel 1p, Gumbel 2p, Normal, Log-Normal, Nash y Pearson III y se utilizó como prueba de bondad de ajuste el criterio de mínimos cuadrados. Los resultados se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Resultado del análisis de distribuciones de probabilidad de intensidades máximas anuales.

Muestra aleatoria		Mejor ajuste a distribución ____
m	I_5	Pearson III
m	I_{10}	Nash
m	I_{15}	Pearson III
m	I_{20}	Pearson III
m	I_{30}	Pearson III
m	I_{40}	Nash
m	I_{60}	Pearson III

Muestra aleatoria		Mejor ajuste a distribución ____
m	I_{90}	Pearson III
m	I_{120}	Nash
m	I_{150}	Nash
m	I_{180}	Nash
m	I_{210}	Nash
m	I_{240}	Nash

Cada muestra aleatoria se ajustó a una distribución de probabilidad. Para todas las muestras en conjunto existe una tendencia a alguna de ellas, que en este caso es la de Nash. Por ello, para construir las curvas I-d-T se aplicó esta distribución a todas las muestras $m-I_d$. Con este criterio se garantiza que para cada una de las curvas, es decir, para $T = \text{constante}$, I_d sea inversamente proporcional a la duración d , que es una condición necesaria en las curvas I-d-T (si se aplicaran las distribuciones de probabilidad que resultaron de mejor ajuste para cada una de las muestras, no se cumpliría tal condición). Este procedimiento es el que se ha acostumbrado emplear en la SCT. Se llegó a los resultados mostrados en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Intensidades de lluvia asociadas a duraciones y períodos de retorno para la Estación A.

T (años)	Duraciones (min)												
	5	10	15	20	30	40	60	90	120	150	180	210	240
5	162	131	101	83	69	60	44	33	27	23	19	17	15
10	196	159	121	98	83	71	53	40	33	27	23	20	18
25	239	195	146	117	99	86	64	48	40	33	28	24	21
50	271	222	165	131	111	96	72	55	46	38	32	27	24
100	302	248	183	144	124	107	80	61	51	42	35	30	27
200	334	274	201	158	136	118	88	68	57	47	39	33	29
500	375	309	226	177	152	132	98	76	64	53	44	37	33
1000	407	335	244	190	164	142	106	83	70	57	48	39	35

h) Dibujar las curvas I-d-T. A partir de los valores de la Tabla 4.3, se obtuvo la gráfica de la figura 4.3.

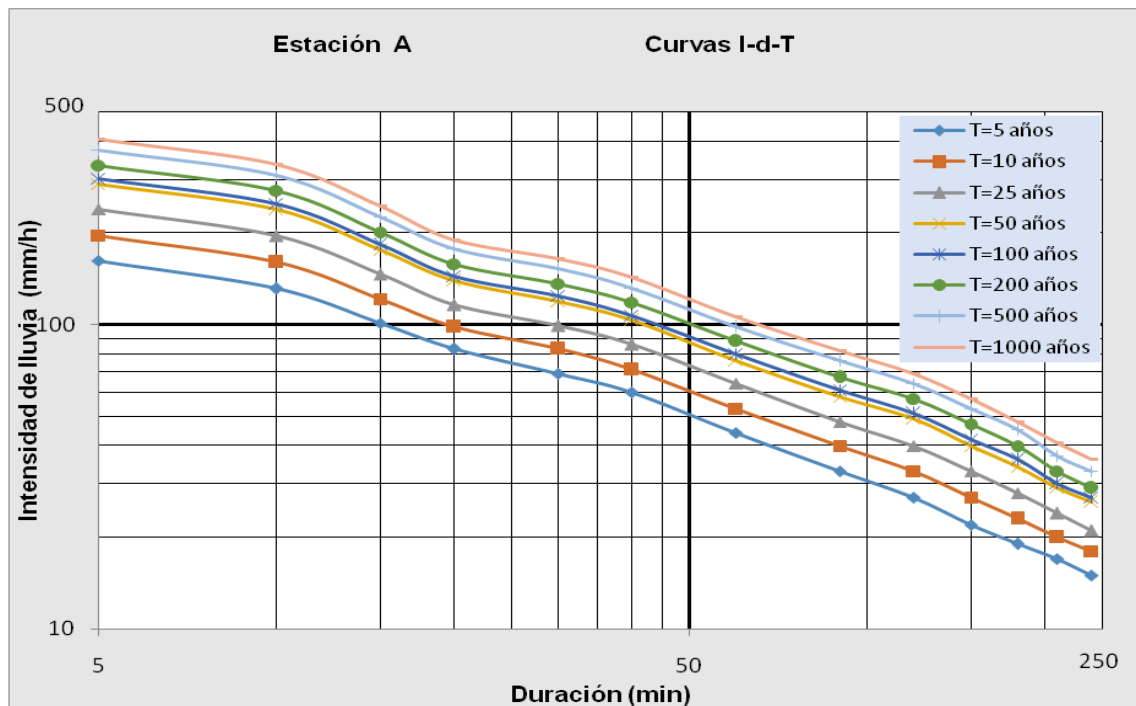


Figura 4.3. Curvas I-d-T de la Estación A.

i) El proceso del inciso a al h se repite para cada una de las estaciones pluviográficas que se estén empleando para construir los mapas de isoyetas de I-d-T.

j) Finalmente, con tablas similares a la 4.3 obtenidas para cada una de las estaciones pluviográficas analizadas, es posible construir las curvas I-d-T y con el conjunto de todas ellas, los mapas de isoyetas para cada entidad federativa del país. Ver Tabla 4.4

Tabla 4.4. Mapas de Isoyetas de I-d-T que es posible dibujar con la información obtenida hasta el inciso j

d (min)	T (años)							
5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240	5	10	25	50	100	200	500	1000

La Tabla 4.4 indica que se dibujarán mapas de isoyetas de duraciones de 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 90, 120, 150, 180, 210 y 240 minutos para los períodos de retorno indicados en dicha tabla (13 mapas para cada período de retorno). El dibujo de isoyetas es análogo al dibujo de curvas de nivel en una planta topográfica. En total, por cada estado se dibujarán 104 mapas. Para la interpolación de valores de intensidad de lluvia se puede utilizar un software apropiado, como Surfer, Global Mapper ó ARCGIS.

En la Figura 4.4 se presenta a manera de ejemplo el mapa de Isoyetas de intensidades de lluvia del estado de Michoacán, para una duración de 5 minutos y período de retorno de 50 años. SCT (2000).

En los mapas de isoyetas de la República Mexicana existen regiones con escasa o nula información pluviográfica. Por tal motivo, al emplear los mapas es necesario observar la cantidad y distribución de las estaciones pluviográficas en que se basaron los dibujos de las isoyetas, emplear criterio profesional para interpretar los resultados obtenidos y asignarles un grado de confiabilidad.

Para una mejor interpretación de los mapas de isoyetas es recomendable que en los puntos que indican la ubicación de las estaciones pluviográficas se anote no sólo el valor de la intensidad de lluvia, sino también el número de años de registros.

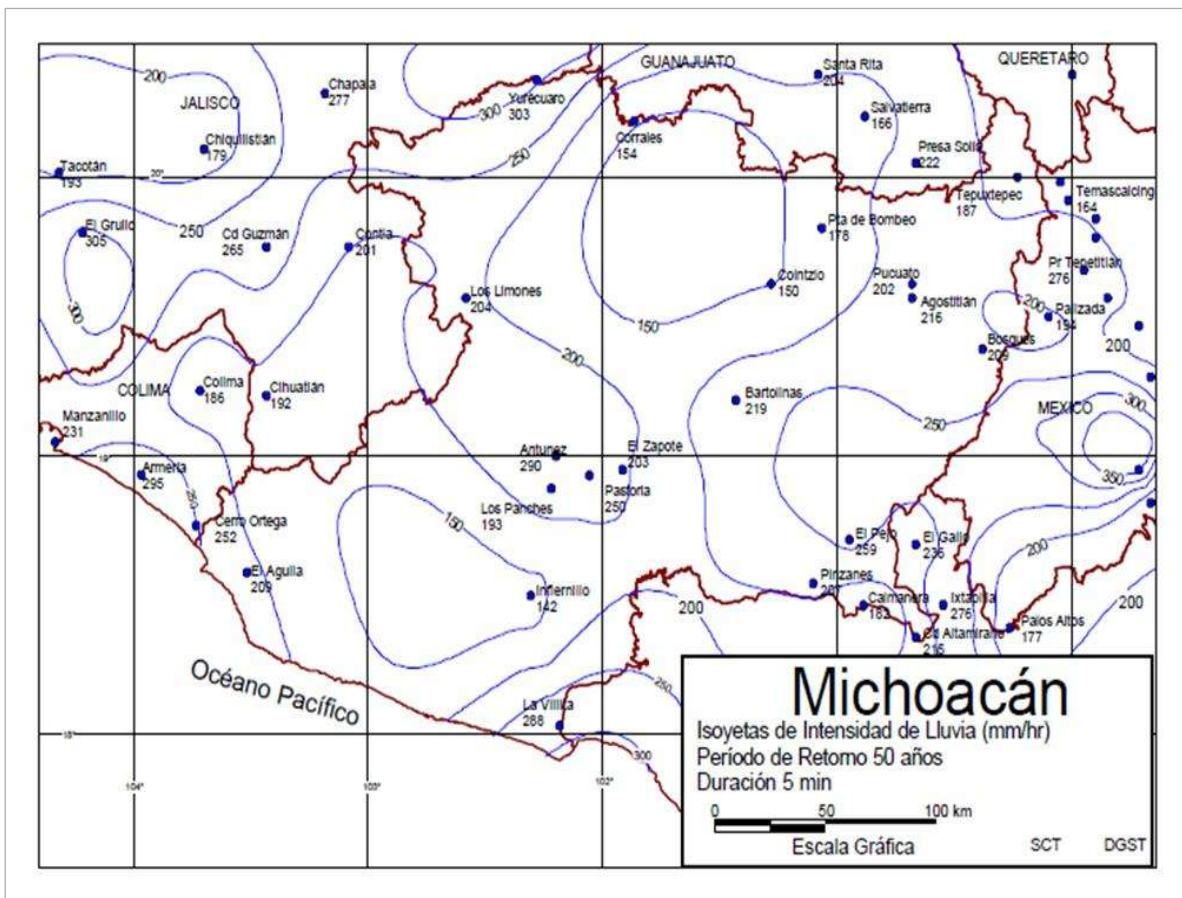


Figura 4.4. Mapa de isoyetas de I-d-T del estado de Michoacán, para $d=5$ min y $T=50$ años.

Un buen diseño y construcción de las curvas I-d-T es indispensable para tomar medidas o decisiones que pueden reducir el daño y riesgos ocasionados por lluvias extremas, permitiendo a los ingenieros realizar diseños más confiables de las obras públicas relacionadas con las vías terrestres (O. Cervantes y J. Landeros, 2004).

La medición y el procesamiento estadístico de la precipitación pluvial son indispensables, por las razones que a continuación se explican:

Cada región del planeta tiene características propias de precipitación pluvial. En México existen lluvias estacionales, orográficas, convectivas, ciclónicas, las debidas a frentes fríos y las ocasionadas por el fenómeno El Niño / Oscilación del Sur (ENOS).

Está presente también el cambio climático, que se debe principalmente al incremento de emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de las industrias, vehículos de transporte y de acciones como la deforestación y los cambios de uso de suelo. El

cambio climático tiene como consecuencias, lluvias extremas en cualquier época del año, incremento de precipitación en zonas lluviosas y decremento en zonas secas, aunque a este respecto existen opiniones diversas de investigadores que estudian el fenómeno.

Xuebin Zhang *et al* (2007) afirman, de acuerdo con estudios realizados por ellos, que el cambio climático no ha sido detectado en la precipitación a nivel global, en parte debido a que los cambios en la precipitación en diferentes regiones se cancelan mutuamente y, por lo tanto, no se reflejan en la tendencia media global de la precipitación.

La CONAGUA (2010) manifestó que para poder establecer estrategias de adaptación al cambio climático es indispensable contar con información meteorológica y climática de la mejor calidad. Esto reitera la necesidad de que la propia CONAGUA mejore la red de pluviógrafos nacional en cuanto a tamaño y distribución.

Hoy por hoy no se conocen con precisión todos los mecanismos del fenómeno de precipitación pluvial, ni se tiene cabal conocimiento de todos los factores que la producen y por lo tanto, resulta adecuado considerar que la distribución espacio temporal de la lluvia es un fenómeno aleatorio y queda sujeto a las leyes de la probabilidad. Luego entonces, también es adecuado el tratamiento probabilístico que se hace de las mediciones de pluviógrafos, para obtener curvas I-d-T y mapas de isoyetas de I-d-T. Sin embargo, para obtener resultados confiables, es necesario continuar midiendo la precipitación pluvial empleando pluviógrafos de última tecnología y mejorar constantemente la distribución de tales aparatos de medición en la República Mexicana.

Obtener curvas I-d-T e Isoyetas de I-d-T y mantenerlas actualizadas es fundamental para proyectos de obras de drenaje, no sólo de vías terrestres, sino también de aeropuertos, puertos, zonas urbanas, zonas industriales, etc. También es vital conservar en bases de datos todos los registros de las mediciones que se van efectuando, ya que representan la historia de las lluvias.

Capítulo 5. Métodos indirectos para calcular Intensidades de Lluvia asociadas a duraciones y períodos de retorno.

Desde hace muchos años diversos autores han propuesto ecuaciones para calcular alturas de precipitación e intensidades de lluvia. En algunos casos simplemente las ecuaciones corresponden a ajustes estadísticos de los datos de duración contra altura de precipitación o duración contra intensidad de lluvia, llevando como parámetro interno al período de retorno. En otros casos se trata de fórmulas generalizadas Intensidad – Duración - Frecuencia (IDF) obtenidas para regiones grandes.

Respecto al ajuste de curvas, más que un método indirecto es una forma de expresar resultados de métodos directos (mediciones). En el caso de fórmulas generalizadas sí corresponden a métodos indirectos, ya que sin contar con registros de pluviógrafo y bajo ciertas hipótesis, plantean relaciones IDF para calcular precipitaciones e intensidades de lluvia.

5.1. Cronología de los métodos más relevantes.

Uno de los primeros métodos fue el propuesto a fines del siglo XIX por Emil Kuichling y C.E. Gransky (citado por SARH, 1987 y por CONAGUA, 2004). Sus estudios los enfocaron a la aplicación en la fórmula Racional. Propusieron que:

$$P_a = K d^{1-e} / (1 - e) \quad (5.1)$$

$$I_p = K / [(1 - e) d^e] \quad (5.2)$$

$$K = (1 - e) P_{24} / [(1 - e) d_{24}] = (1 - e) P_{24} / 24^{1-e} \quad (5.3)$$

donde

P_a - precipitación acumulada en la cuenca o en una estación en un tiempo a (mm)

P_{24} - precipitación acumulada en la cuenca o en una estación en 24 horas (mm)

I_p - intensidad de lluvia (mm/h)

K - parámetro que considera las condiciones de lluvia en la cuenca para una duración de 24 horas

d - duración de la lluvia (h)

e - parámetro que toma en cuenta la distribución de la lluvia en el tiempo en la cuenca (adimensional)

La distribución de la lluvia en el tiempo es variable, pudiendo ser intensa al principio, moderada al final o tender a ser uniforme en toda su duración, o bien, moderada al inicio, e intensa en un lapso intermedio o al final. En cuencas pequeñas, la distribución que se tenga al inicio es crítica. En cuencas grandes, no tiene influencia la distribución de la lluvia.

El parámetro e puede tener diversos valores. Así, e = 0 corresponde a una lluvia uniforme, ya que en tal caso, de acuerdo con las ecuaciones 5.1 y 5.2:

$$P_a = K d$$

y

$$I_p = K$$

A medida que aumenta el valor de e, la lluvia va siendo más intensa al principio hasta convertirse en tormenta violenta. Es recomendable emplear valores de e comprendidos entre 0.45 y 0.8, en función del tiempo de concentración de la cuenca, t_c , de acuerdo con la Tabla 5.1.

Para la aplicación de este método, es necesario: contar con un registro de alturas máximas de lluvia anual para duraciones de 24 horas; efectuar un análisis de distribuciones de probabilidad y con ello determinar alturas de lluvia (P_{24}), para distintos períodos de retorno. Asimismo, es necesario determinar el valor de t_c (ecuación 1.4), el valor de e (Tabla 5.1) y el valor de K (ecuación 5.3) y obtener los valores de P_a e I_p para distintas duraciones, d, y períodos de retorno.

Tabla 5.1. Valores de e, según Kuichling y Gransky (citado por CONAGUA, 2004).

e	Magnitud de la cuenca	t_c (h)
0.45 – 0.50	Muy grande	Mayor de 48
0.50 – 0.55	Grande	24 – 48
0.55 – 0.60	Mediana	6 – 24
0.60 – 0.70	Pequeña	1 – 6
0.70 – 0.80	Muy pequeña	Menor de 1

Este método lo establecieron Kuichling y Gransky para aplicar la fórmula Racional considerando que la intensidad de lluvia y el tiempo de concentración están estrechamente relacionados, idea que ha sido estudiada por otros autores; véanse por ejemplo Jorge J. Vélez y Adriana Botero (2011) y María L. Betancor (2012).

Todas las fórmulas IDF son ecuaciones empíricas en las cuales la intensidad de lluvia es la variable dependiente y otros parámetros, como la duración de la lluvia y la frecuencia, son variables independientes. Generalmente suponen que la intensidad de lluvia es inversamente proporcional a la duración de la tormenta elevada a una potencia o ligada a un factor de escala (Le Minh Nhat *et al*, 2006). A continuación se presentan cronológicamente las principales relaciones matemáticas que se han empleado.

Ecuación de Talbot, que corresponde al ajuste a una hipérbola (citado por Ignasi Fernández, 2009):

$$I = a / (d + b) \quad (5.4)$$

donde I es la intensidad de lluvia, d es la duración para un período de retorno T determinado y a, b y c son parámetros cuyo valor depende del lugar de estudio y de las condiciones meteorológicas. Esta definición de variables también es para las ecuaciones 5.5 a 5.7.

Ecuación de Montana, que corresponde al ajuste a una función potencial (citado por Ignasi Fernández, 2009):

$$I = ad^c \quad (5.5)$$

Ecuación de Sherman (1905, 1931). Combinó las ecuaciones de Talbot y de Montana (citado por Le Minh Nath *et al*, 2006, e Ignasi Fernández, 2009):

$$I = a / (d + b)^c \quad (5.6)$$

Ecuación de Merrill M. Bernard (1932), (citado por Le Minh Nath *et al*, 2006):

$$I = a / d^c \quad (5.7)$$

David L. Yarnell (1935) estudió datos de tormentas ocurridas en EUA entre 1888 y 1933, recopiladas de 208 estaciones pluviométricas, que medían en forma

automatizada cantidades acumuladas de lluvia en intervalos de 5 minutos. Analizó en total 28,077 tormentas y construyó mapas de isoyetas de altura de lluvia - duración - período de retorno (P-d-T) para duraciones de 5, 10, 15 y 30 minutos y 1, 2, 4, 8, 16 y 24 horas, para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, para todo el territorio de EUA. Publicó en total 60 mapas de isoyetas de P-d-T. En la Figura 5.1 se presenta como ejemplo el mapa correspondiente a una duración de 5 min y período de retorno de 50 años.

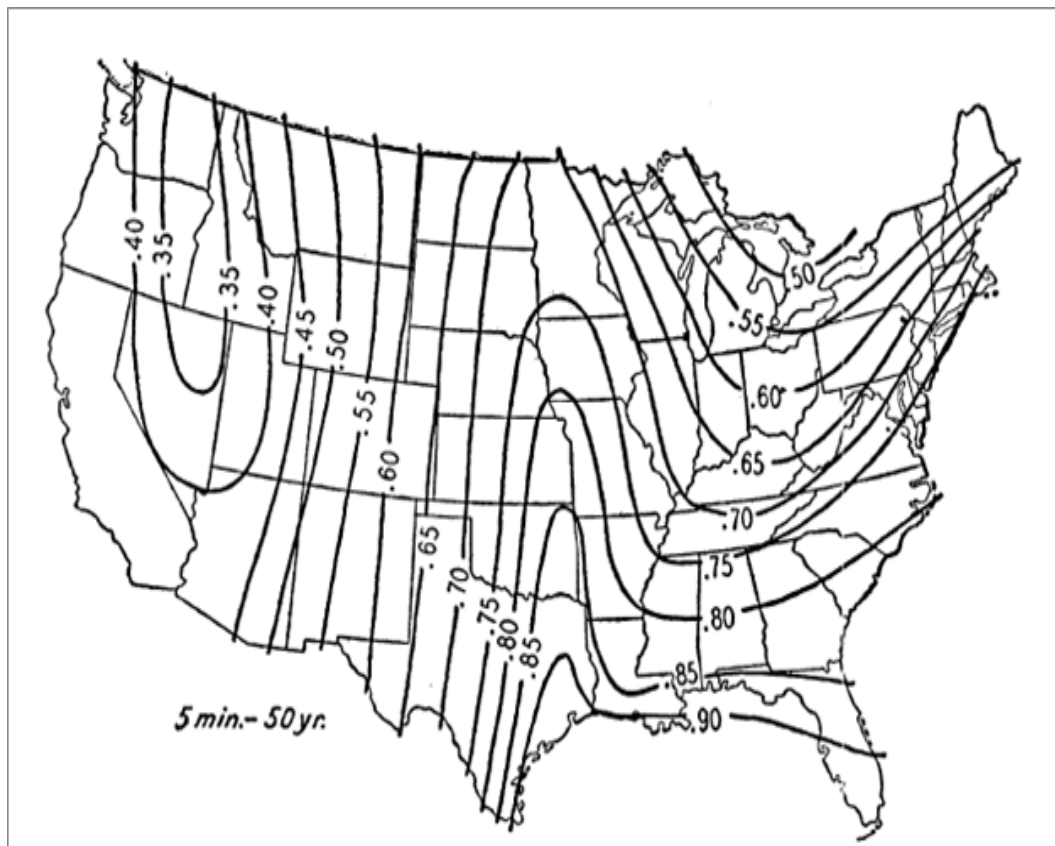


Figura 5.1. Alturas de lluvia para 5 min, en pulgadas, que se espera que ocurran una vez cada 50 años. D.L. Yarnell (1935).

Según D.L. Yarnell, la precipitación máxima para una duración d resulta mayor cuando se considera un registro o medición continua que cuando se emplean intervalos regulares de tiempo. Sus observaciones se resumen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Comparación entre la precipitación máxima obtenida empleando intervalos regulares de (d) minutos y la obtenida con medición continua, según D.L.Yarnell (1935).

d (min)	Precipitación máxima para una duración (d) obtenida empleando intervalos regulares de d, en min	Precipitación máxima para una duración (d), obtenida con un registro continuo
5	P_5	1.05 a 1.08 P_5
60	P_{60}	1.04 a 1.05 P_{60}
120	P_{120}	1.09 a 1.12 P_{120}

Gail Abner Hathaway (1945) utilizó los datos recabados por D.L.Yarnell y estableció una relación gráfica entre la intensidad con duración de una hora y las intensidades correspondientes a diferentes duraciones (Figura 5.2).

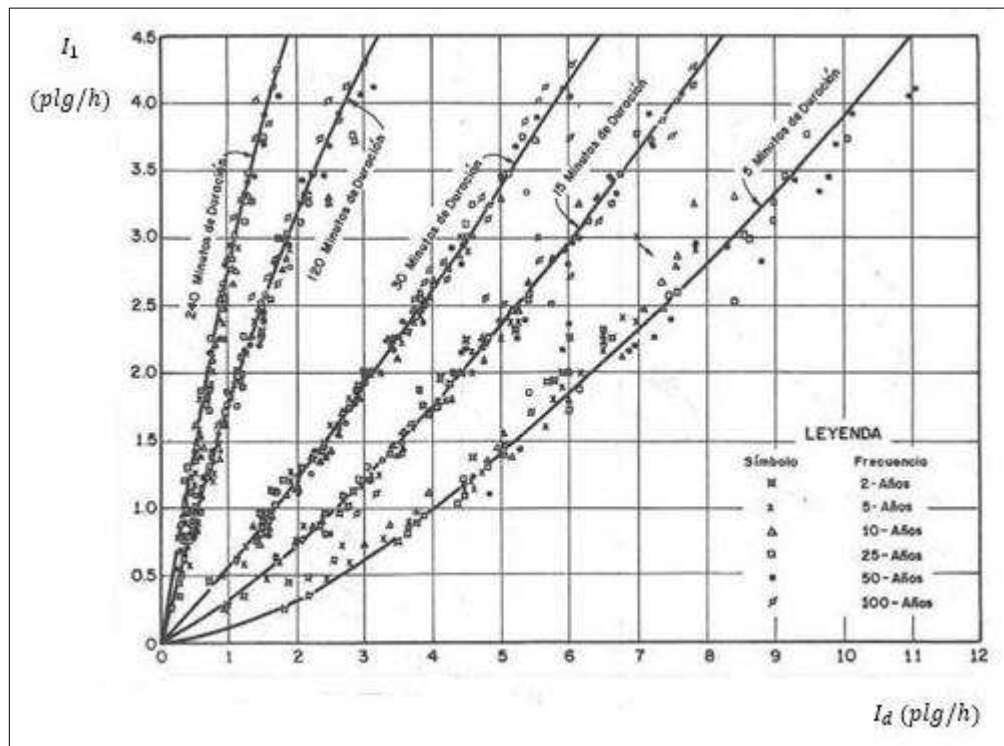


Figura 5.2. Relación entre la intensidad de lluvia para una duración de una hora y las intensidades para 5, 15, 30, 120 y 240 minutos, según G.A. Hathaway, 1945. (Fuente: Daniel F. Campos, 1983).

Aparentemente la gráfica de la Figura 5.2 indica que existe una relación bien definida entre las intensidades de una hora y las intensidades con diferentes duraciones y que dicha relación es la misma para cualquier período de retorno, para cierta duración, por

ejemplo, la curva de 5 min. Sin embargo, al analizar la gráfica es evidente que los valores de la intensidad de lluvia sí dependen fuertemente del período de retorno, ya que los puntos que corresponden a un mismo período de retorno quedan dispersos en la gráfica y no es posible alinearlos a una curva. Así, por ejemplo, para una lluvia horaria de 2.5 plg/h (63.5 mm/h), la intensidad de lluvia para una duración de 5 min y período de retorno de 25 años queda en un rango entre 7.4 y 8.4 plg/h (188.0 y 213.4 mm/h).

Ernest George Bilham (1936) presentó una fórmula general para el Reino Unido (citado por Ronald Edward Manley, 1992):

$$n = 1.25 d (R + 0.1)^{-3.55} \quad (5.8)$$

donde

n - número de eventos en 10 años

R - altura de precipitación (plg)

d - duración (h)

La ecuación 6.8 era válida para duraciones de 5 minutos a 2 horas y se basó en datos de sólo 12 estaciones con 10 años de registros. Con el empleo de una mayor cantidad de datos, Denys Johnstone Holland (1967) propuso una versión simplificada de la ecuación 5.8:

$$n = d R^{-3.14} \quad (5.9)$$

válida para duraciones mayores de 25 horas (citado por R. E. Manley, 1992).

Según U.S. Weather Bureau (USWB), la lluvia de duración t en minutos tiene un cociente consistente con la lluvia de una hora para un mismo período de retorno, es decir,

$$P_d^T / P_1^T = \text{constante} \quad (5.10)$$

Asimismo, las lluvias de una hora de duración y período de retorno de dos años están relacionados como lo indica la gráfica de la Figura 5.3. Este criterio del USWB fue expandido en los EUA por Brian M. Reich (1963), (citado por Daniel F. Campos, 1983).

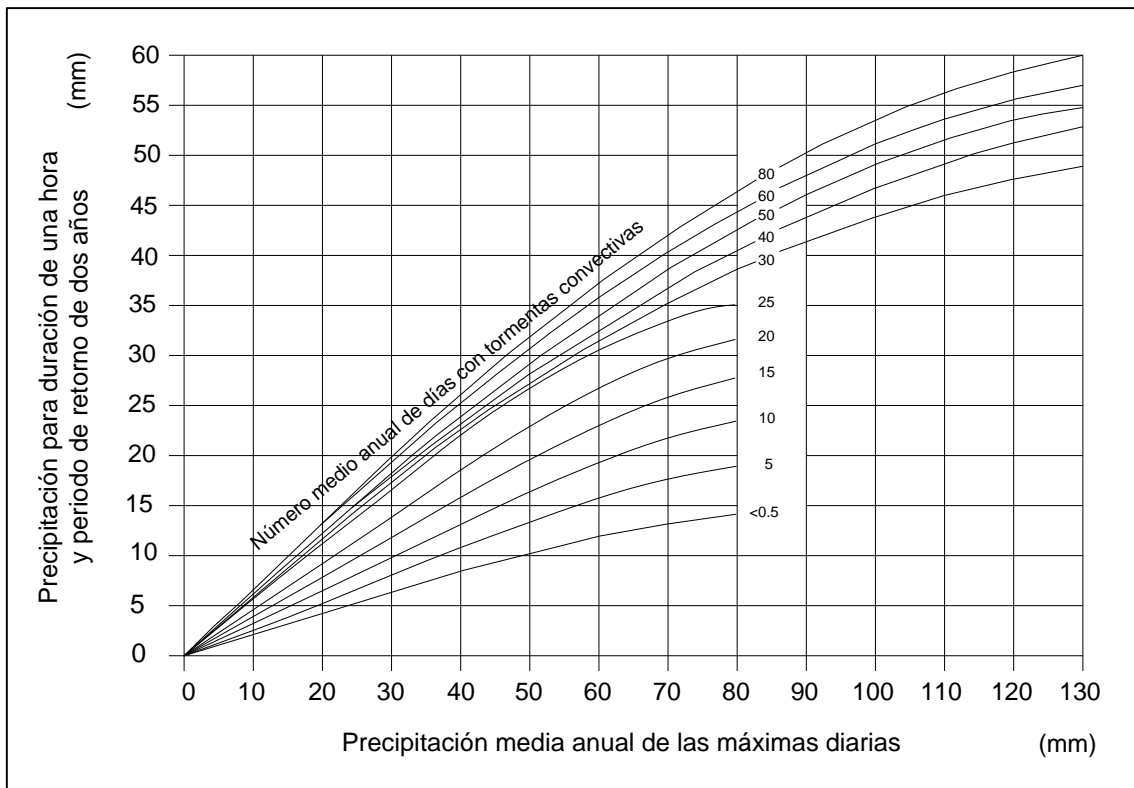


Figura 5.3. Relación entre la altura de precipitación media anual y la altura de precipitación para una duración de una hora y período de retorno de 2 años, según USWB (reconstruida de D.F.Campos, 1983).

El propio B.M. Reich sugirió que las relaciones precipitación - duración de EUA pueden ser válidas para todo el mundo (citado por Frederick C. Bell, 1969). Sin embargo, la sugerencia de B.M. Reich, reforzada posteriormente por F.C. Bell es muy aventurada, ya que el origen de las lluvias es muy variado, es multifactorial y depende mucho de cada región de la Tierra.

Según la Figura 5.3, conocidas la lluvia media anual de los máximos diarios y la duración de la lluvia de interés, se puede obtener la lluvia para duración de una hora y período de retorno de dos años. Asimismo, según la USWB las alturas de precipitación para duraciones menores de una hora se calculan mediante la Tabla 5.3. Frederick C. Bell (1969) afirmó que estas relaciones se cumplen muy bien en EUA, son independientes del período de retorno y los errores en promedio oscilan entre 5 y 8%.

Tabla 5.3. Relación de lluvia de cierta duración, d , respecto a la lluvia de una hora de duración, según USWB (citado por WMO, 2009).

Duración, d (min)	5	10	15	30
P_d / P_{60}	0.29	0.45	0.57	0.79

Así, de acuerdo con la Tabla 5.3, si la altura de precipitación para una duración de una hora y período de retorno de 10 años es 70 mm, la altura de precipitación para una duración de 15 min y período de retorno de 10 años es $0.57 (70) = 40$ mm

Este tipo de relaciones puede arrojar resultados erróneos en algunas regiones. Por ejemplo, en aquellas en que la mayor parte de la lluvia ocurre en conexión con tormentas eléctricas, la Tabla 5.3 tiende a dar resultados escasos y en aquellas en que la mayor parte de la lluvia es resultado de influencia orográfica y escasa actividad convectiva, tiende a dar resultados exagerados, WMO (2009).

En un análisis realizado por el autor de este trabajo empleando datos de 33 estaciones pluviográficas de México, no se observó una clara tendencia en cuanto a la ecuación 5.10, ya que no siempre resulta constante y además no se cumple lo que expresa la Tabla 5.3. En la Tabla 5.4 se presenta un resumen de resultados del análisis.

Tabla 5.4. Valores de P_d^T / P_1^T obtenidos en el análisis efectuado a 33 estaciones pluviográficas de México.

P_d^T / P_1^T	d (min)				
	5	10	20	30	60
máx.	0.44	0.60	0.80	0.90	1
mín.	0.18	0.28	0.48	0.60	1
Media de las 33 estaciones	0.25	0.40	0.61	0.75	1
Desviación estándar, σ	0.06	0.08	0.08	0.07	0

En la tabla anterior, la desviación estándar de los datos de las muestras, σ , indica que no se contradice en gran forma lo que expresa la ecuación 5.10, sin embargo, los valores mínimos y máximos discrepan notablemente respecto a la media. Este análisis refuerza la idea expresada por la WMO (2009).

David M. Hershfield (1961) desarrolló para EUA mapas de isoyetas de $P-d-T$, que se publicaron en el documento Technical Paper No.40 del USWB (1961). Construyó mapas de isoyetas para duraciones de 30 min y 1, 2, 3, 6, 12 y 24 h y períodos de retorno de 1, 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, para todo EUA, es decir, elaboró en total 49 mapas de isoyetas. Empleó prácticamente las mismas estaciones de la USWB que utilizó D.L Yarnell en 1935 (200 estaciones), con datos de altura de lluvia con información de 1890 a 1958. También utilizó 2,081 estaciones con datos de alturas de lluvia por hora, de 1940 a 1958; 1,350 estaciones con datos de alturas máximas de lluvia en 24 h, de 1940 a 1958; 4,835 estaciones con mediciones efectuadas una vez al día, no registradas oficialmente, de 1897 a 1958, que fueron empleadas para ayudar a definir el régimen de lluvias de 24 horas y el régimen para duraciones más cortas empleando relaciones empíricas. Como se verá posteriormente, el método de Hershfield fue la base del método de Cheng-Lung Chen (1975, 1983) y por lo tanto, se juzgó conveniente explicarlo con detalle.

La forma como procedió Hershfield fue la siguiente:

En cuanto a la duración de las lluvias observó a partir de análisis estadísticos realizados por él y sus colaboradores, que $P_{1d}^T \approx 1.13 P_{1c}^T$ y que $P_{24d}^T \approx 1.13 P_{24c}^T$, donde P_{1d}^T y P_{24d}^T son las precipitaciones máximas para 1 hora y 24 horas y período de retorno T , respectivamente, empleando mediciones de cierta duración d , y P_{1c}^T y P_{24c}^T son las precipitaciones máximas para 1 hora y 24 horas y período de retorno T , empleando mediciones continuas. Obtuvo para cada una de las 200 estaciones de la USWB los valores de P_1^2 , P_{24}^2 , P_1^{100} y P_{24}^{100} y los llevó a dos gráficas: d contra P_d^2 y d contra P_d^{100} . En tales gráficas, la separación de las líneas verticales la obtuvo a partir del análisis de datos de las 200 estaciones de la USWB. Posteriormente unió con una recta el punto P_1^2 con el punto P_{24}^2 y el punto P_1^{100} con el punto P_{24}^{100} . Luego obtuvo, interpolando sobre las rectas, los valores P_2^2 , P_3^2 , P_6^2 , P_{12}^2 , P_2^{100} , P_3^{100} , P_6^{100} y P_{12}^{100} . A estas gráficas las denominó "Relaciones generalizadas de duración", RGD, (ver Figuras 5.4 y 5.5). Como ejemplo se ha dibujado en las gráficas una recta que une los puntos P_1^2 con P_1^{100} y P_{24}^2 con P_{24}^{100} que corresponden a un lugar en el que se conocen tales precipitaciones.

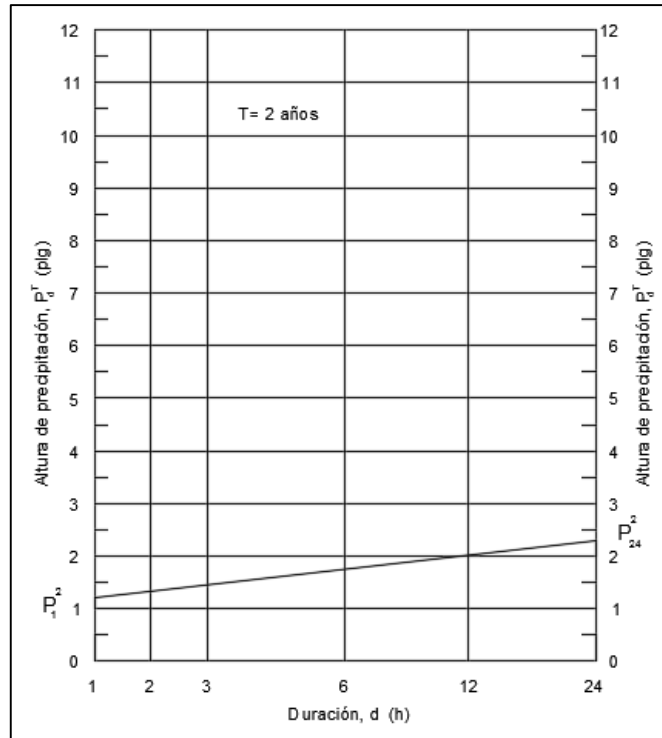


Figura 5.4. Gráfica d contra P_d^2 (reconstruida de D.M. Hershfield, 1962).

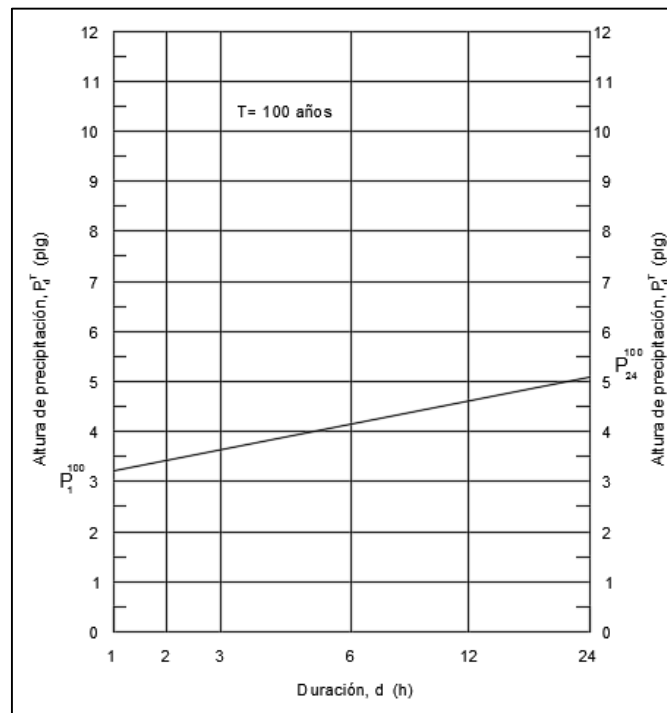


Figura 5.5. Gráfica d contra P_d^{100} (reconstruida de D.M. Hershfield, 1962).

Empíricamente Hershfield comprobó la validez de este criterio mediante gráficas P_d^T observadas contra P_d^T obtenidas con las RGD, cuyo resultado fue que los puntos se aproximaban a una recta a 45°.

Para obtener P_{30}^T , Hershfield sugirió emplear la relación empírica $P_{30} = 0.79 P_{60}^T$

En cuanto al período de retorno de las lluvias, a partir de una muestra aleatoria de tormentas registradas en las 200 estaciones de la USWB, Hershfield obtuvo factores empíricos para convertir mediciones de lluvia en intervalos de tiempo a mediciones de lluvia en series anuales (ver Tabla 5.5).

Tabla 5.5. Factores empíricos para convertir series de duración parcial a series anuales. Hershfield (1961).

Período de retorno, T (años)	Factor de conversión
2	0.88
5	0.96
10	0.99

Hershfield también llevó los valores de P_1^2 , P_1^{100} , P_{24}^2 y P_{24}^{100} a gráficas T contra P_1^T y T contra P_{24}^T , diseñadas a partir de análisis de datos. Posteriormente unió con una recta el punto P_1^2 con el punto P_1^{100} y el punto P_{24}^2 con el punto P_{24}^{100} . Luego obtuvo, interpolando sobre las rectas, los valores de P_1^5 , P_1^{10} , P_1^{25} , P_1^{50} , P_1^{100} , P_{24}^5 , P_{24}^{10} , P_{24}^{25} y P_{24}^{50} . A estas gráficas las denominó “Relaciones de Frecuencia” (ver Figuras 5.6 y 5.7). En tales gráficas, la separación de las líneas verticales, la obtuvo Hershfield a partir del análisis de datos de las 200 estaciones de la USWB. Como ejemplo se ha dibujado en las gráficas una recta que une los puntos P_1^2 con P_1^{100} y P_{24}^2 con P_{24}^{100} que corresponden a un lugar en el que se conocen tales precipitaciones.

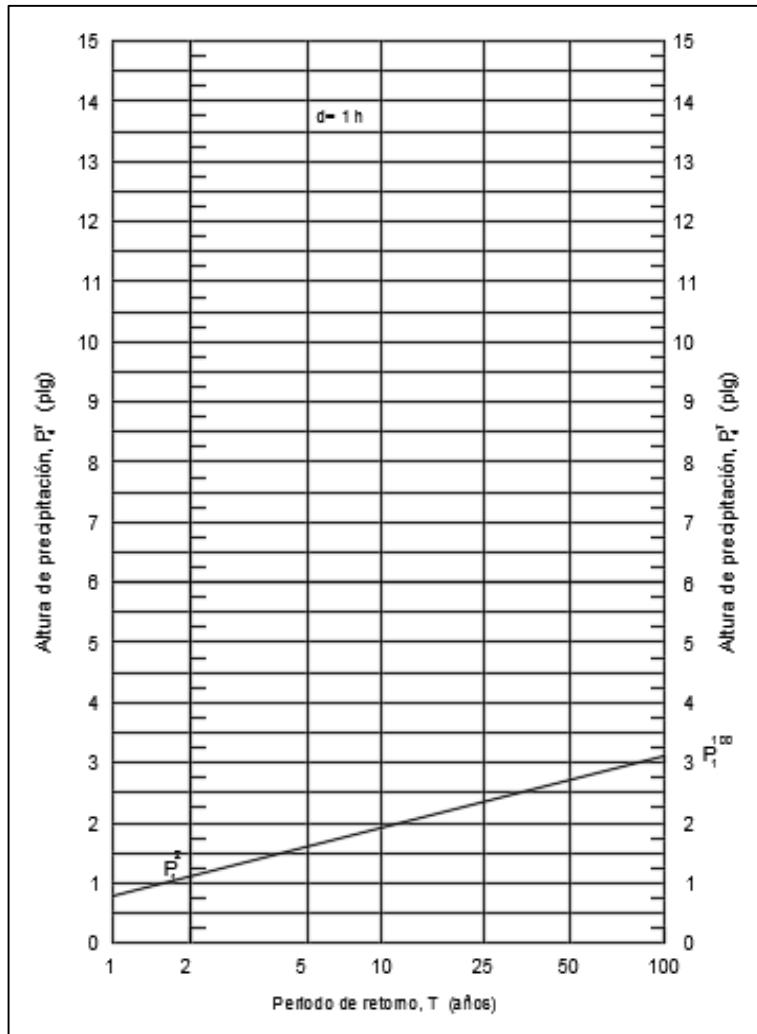


Figura 5.6. Gráfica T contra P_1^T (reconstruida de D.M. Hershfield, 1962).

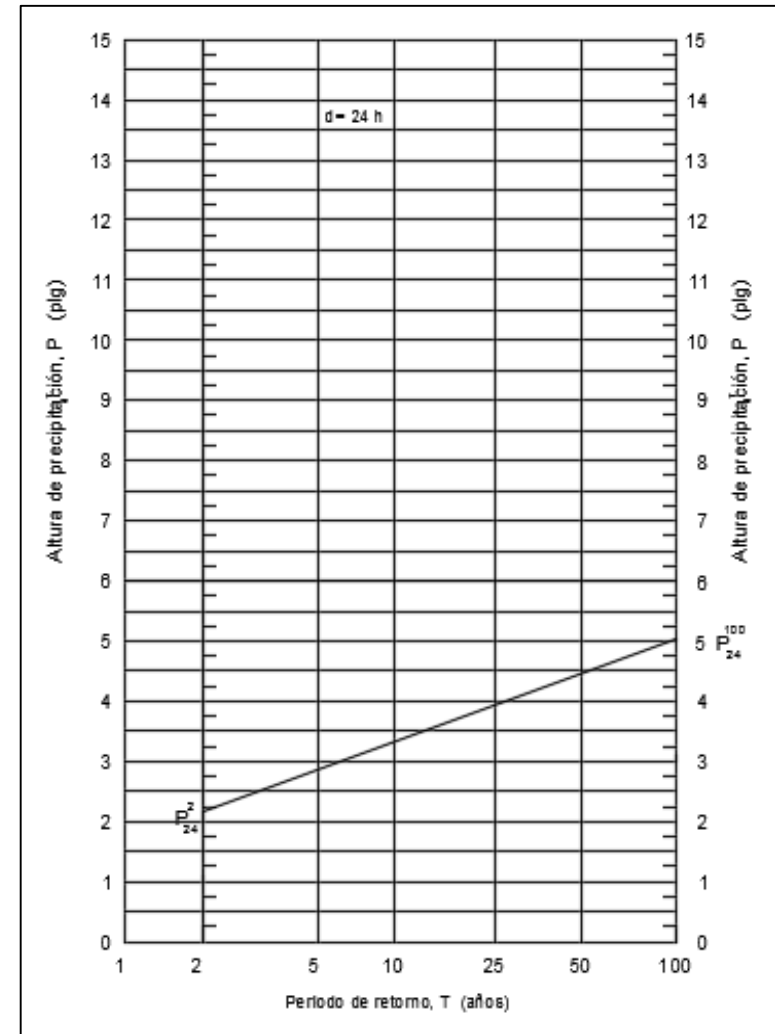


Figura 5.7. Gráfica T contra P_{24}^T (reconstruida de D.M. Hershfield, 1962).

Este proceso significa que Hershfield creó los mapas de isoyetas de precipitaciones P_1^2 , P_{24}^2 , P_1^{100} y P_{24}^{100} y a partir de ellos obtuvo los 45 mapas restantes. En otras palabras, consideró que para cualquier lugar de EUA se puede obtener P_d^T para $1 < d < 24$ h y $2 < T < 100$ años si se conocen P_1^2 , P_{24}^2 , P_1^{100} y P_{24}^{100} , lo cual, a juicio del autor de este trabajo, es una afirmación bastante incierta.

En las Figuras 5.4 a 5.7 realmente se vaciaron los valores de precipitación P_1^2 , P_{24}^2 , P_1^{100} y P_{24}^{100} , obtenidos a partir de los mapas de isoyetas de Hershfield para el punto de coordenadas geográficas $41^\circ 00' 10''$ Lat. N, $102^\circ 03' 10''$ Long. W, ubicado en los límites entre Colorado y Nebraska (punto A de la Figura 5.8). Se dibujaron las rectas según se explicó antes y se verificó que los puntos a lo largo de ellas coinciden con los valores de precipitación de los demás mapas de isoyetas de Hershfield.



Figura 5.8. Ubicación del punto A, considerado para explicar y comprobar el procedimiento que utilizó Hershfield. Mapa obtenido de <http://www.worldatlas.com>

Para obtener P para $d = 5, 10$ y 15 min se debe multiplicar P_{30} por $0.37, 0.57$ y 0.72 , respectivamente. Para obtener P_d para $T > 100$ años se debe dibujar una gráfica T contra P_d y extrapolar.

En la Figura 5.9 se presenta uno de los 49 mapas de isoyetas que obtuvo Hershfield, el correspondiente a una duración de 30 min y período de retorno de 50 años.

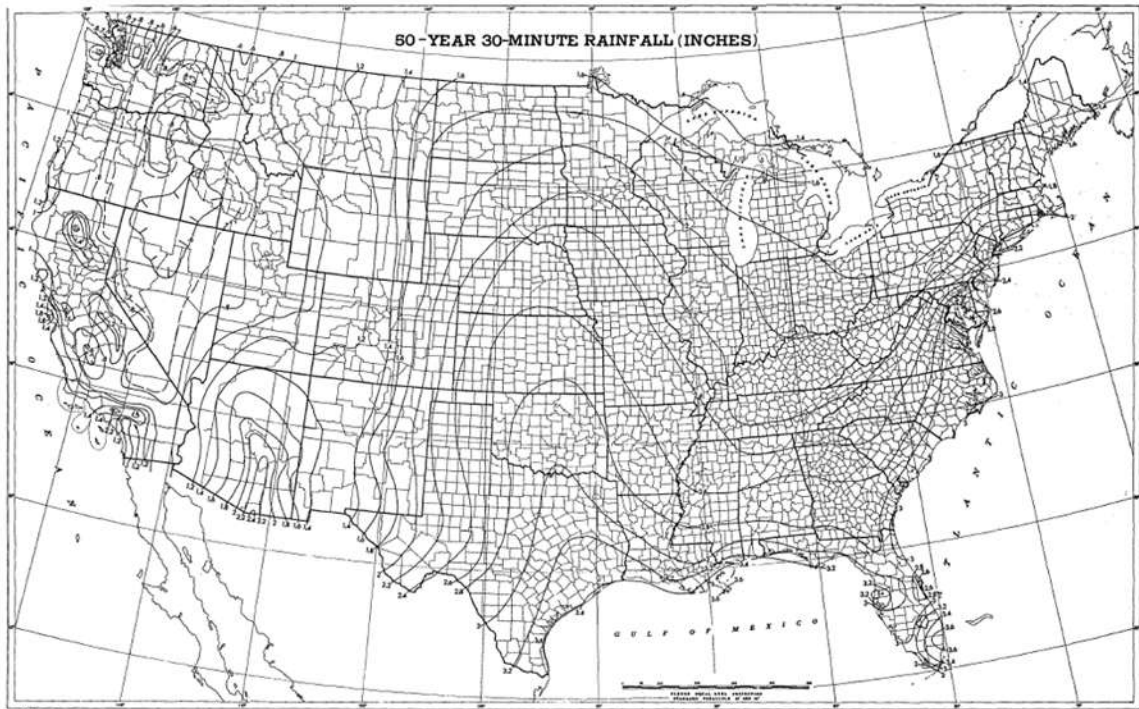


Figura 5.9. Alturas de lluvia de 30 min de duración, en pulgadas, que se espera que ocurran o sean rebasadas, en promedio cada 50 años. D.M Hershfield (1961).

Comparando los mapas de isoyetas obtenidos por Yarnell (1935) y los obtenidos por Hershfield (1961), se observa que para la zona oriental de EUA las diferencias fueron, cuando más, del 10%, pero para la zona montañosa de occidente los mapas de Hershfield dieron resultados hasta tres veces mayores.

Frederick C. Bell (1969) presentó una fórmula generalizada IDF, usando P_1^{10} como base, válida para duraciones de lluvia, d , de 5 a 120 minutos y períodos de retorno, T , de 2 a 100 años. Este fue el primer método indirecto, en el cual con sólo contar con la precipitación para una hora de duración y 10 años de período de retorno, se pronostican relaciones IDF. En la sección 5.2 se describe y comenta el método de Bell.

Harry G. Wenzel (1982) presentó la siguiente ecuación (citada por Ven Te Chow *et al*, 1988):

$$I = a / d^c + b \quad (5.11)$$

donde I es la intensidad de lluvia en mm/h, d la duración de la lluvia en horas y a , b y c son coeficientes que varían según el lugar y el período de retorno.

Cheng-Lung Chen (1975 y 1983) desarrolló otra fórmula generalizada IDF, ahora aplicable a cualquier lugar de Estados Unidos, usando tres alturas de precipitación como base, P_1^{10} , P_{24}^{10} y P_1^{100} , que según argumenta, describen la variación geográfica de la precipitación. La fórmula es válida, según Chen, para duraciones de lluvia de 5 minutos a 24 horas y períodos de retorno mayores de un año. Este método ha sido muy usado en México desde hace más de 15 años, en virtud de carecer de suficientes mediciones con pluviógrafos. De hecho, en el diseño hidráulico de obras de drenaje de vías terrestres (puentes y alcantarillas) se emplea con frecuencia. En la sección 5.3 se describe y comenta el método de Chen.

Umesh C. Kothyari y Ramchandra J. Garde (1992) propusieron una fórmula generalizada IDF para la India, en virtud de que ecuaciones como la de Bell y de Chen no arrojaban buenos resultados para ese país. Sus análisis los realizaron a partir de mediciones de 78 estaciones pluviográficas y desarrollaron la siguiente expresión, basándose en la ecuación de Bernard (ecuación 5.7):

$$I_d^T = C T^{0.2} (P_{24}^2)^{0.33} / d^{0.71} \quad (5.12)$$

donde I_d^T es la intensidad de lluvia en mm/h, P_{24}^2 es la altura de precipitación en mm, d la duración de la lluvia en horas, T el período de retorno en años y C es un parámetro que depende de la zona geográfica de la India en que se aplique el método (son cinco zonas y el valor de C varía de 7.1 a 9.1). Según Kothyari y Garde, P_{24}^2 describe la variación de I_d^T geográficamente.

Rodrigo Vargas (1997 y 1999) realizó análisis de lluvias en Colombia y observó que los métodos de Bell y de Chen no reflejaban la realidad. Por ello, realizó un estudio partiendo del método de Kothyari y Garde (1992), empleando información de 165 estaciones, y obtuvo la siguiente ecuación:

$$I_d^T = a T^b M^e N^f P^g / d^c \quad (5.13)$$

siendo I_d^T la intensidad de lluvia en mm/h, d la duración de la lluvia en horas, T el período de retorno en años, M el promedio del valor máximo anual de precipitación diaria en mm, N el número de días con lluvia al año y P la precipitación media anual en mm. El método considera la división de Colombia en cinco regiones: Andina, Caribe,

Pacífico, Orinoquia y Amazonia. Para cada una de las regiones hay un grupo de parámetros a, b, c, f y g, que se obtienen mediante tablas.

Narendra K. Goel y Shibayan Sarkar (2007) efectuaron una descripción completa de los principales métodos desarrollados en el mundo para estimar intensidades de lluvia.

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (2017) presenta para cada estado de EUA la ubicación de las estaciones climatológicas, los registros de lluvia en forma tabular y el resultado de análisis estadísticos en gráficas T contra P con intervalos de confianza, d contra P para distintos valores de T (curvas Precipitación – Duración – Período de retorno) y T contra P para distintos valores de d. En sus análisis estadísticos el NOAA considera duraciones desde 5 min hasta varios días y períodos de retorno de 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años. La actualización estadística es prácticamente al mes en curso.

Los métodos indirectos más difundidos y más aplicados en México para obtener relaciones IDF generalizadas son el de Bell y el de Chen y por ello se explican a continuación con mayor detalle.

5.2. Método de Frederick Charles Bell (1969).

Principalmente dos ideas motivaron a Bell a desarrollar ecuaciones empíricas generalizadas para estimar alturas de lluvia. La primera era que, según argumentaba, efectuar análisis de frecuencias de datos de lluvia para ajustarlos a alguna distribución de probabilidad y efectuar extrapolaciones no era adecuado, ya que la información disponible era escasa. La segunda era que los valores extremos de la mayoría de las lluvias están asociados a lluvias convectivas, y las propiedades físicas de tales lluvias son las mismas en todo el mundo.

Bell tomó como punto de partida las relaciones P_d / P_{60} para duraciones de 5, 10, 15 y 30 min obtenidas por la USWB (Tabla 5.3) con la intención de obtener relaciones para $d > 2$ h. Su análisis consideró datos de 157 estaciones con más de 40 años de registros, USWB (1955), y siete estaciones de Australia con más de 30 años de registros, Institution of Engineers (1958). Graficó la ecuación 5.10, llevando P_1^T en las

abscisas, P_d^T en las ordenadas y las duraciones de lluvia como parámetro interno. Para duraciones de 5, 15 y 30 min sólo incorporó a la gráfica los datos de Australia y para duraciones de dos horas, los de EUA y de Australia (Figura 5.10). Obsérvese que empleó en su estudio mediciones de lluvia obtenidas más de diez años antes de la publicación de su artículo en 1969.

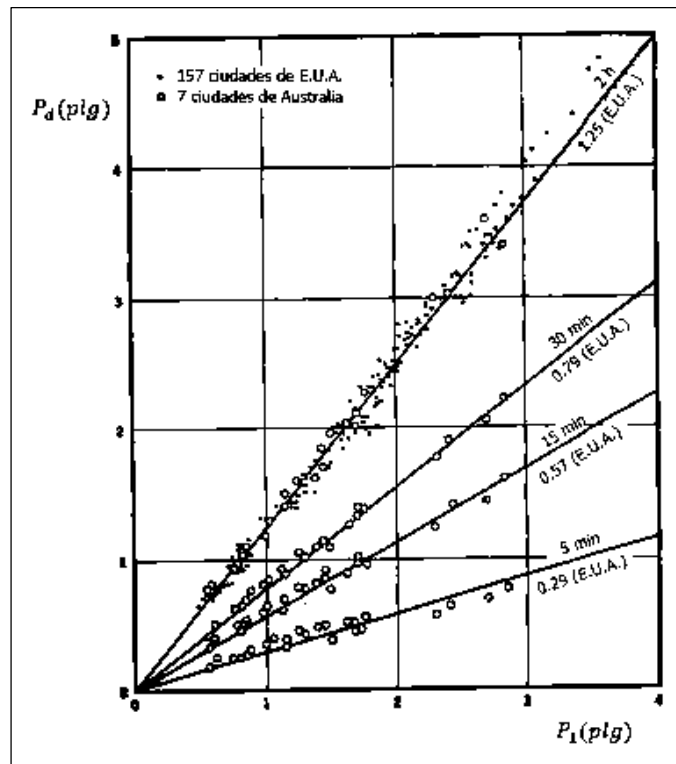


Figura 5.10. Relación altura de lluvia-duración para EUA y Australia (reconstruida de Bell, 1969).

Las líneas de ajuste de la gráfica de la Figura 5.10 quedan representadas por la siguiente ecuación:

$$P_d^T = a P_1^T \quad (5.14)$$

donde los valores de a quedan definidos según la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Valores de a de la ecuación 5.14.

d (min)	5	10	15	30	120
a	0.29	0.45	0.57	0.79	1.25

Bell también realizó un análisis de frecuencia de alturas de lluvia de EUA, Australia, Sudáfrica, Hawaii, Alaska y Puerto Rico. Para ello, calculó P_1^{10} y P_1^T para valores de $T = 1, 2, 5, 25, 50$ y 100 años, graficó en un plano cartesiano los puntos (P_1^{10}, P_1^T) para cada valor de T y obtuvo la recta que mejor se ajustó al conjunto de puntos. Así, obtuvo las gráficas de las Figuras. 5.11 y 5.12. Cabe señalar que en ambas gráficas la gran mayoría de los puntos corresponden a los EUA y son muy escasos los de Sudáfrica, Hawaii, Alaska y Puerto Rico. Por lo tanto, al estudio de Bell le faltó considerar prácticamente todo el continente americano, Asia, Europa y Africa. A partir de estas gráficas obtuvo la pendiente de cada recta, P_1^T / P_1^{10} , y la desviación estándar, σ , de los datos (Tabla 5.7). No obstante que los valores de σ son reducidos, para cada valor de P_1^{10} los valores máximos y mínimos de P_1^T llegan a ser notablemente distintos.

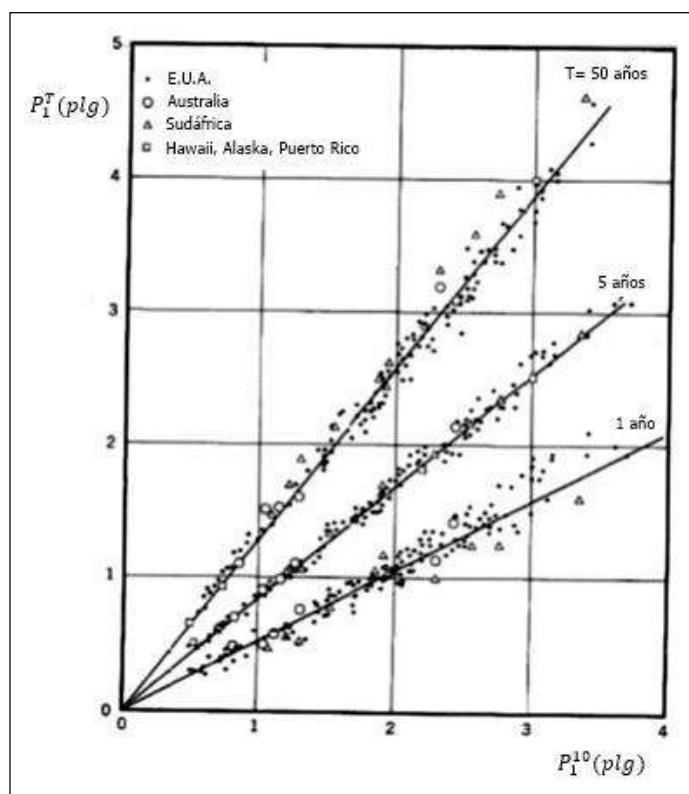


Figura 5.11. Relación altura de lluvia - frecuencia para períodos de retorno de 1, 5 y 50 años (reconstruida de Bell, 1969).

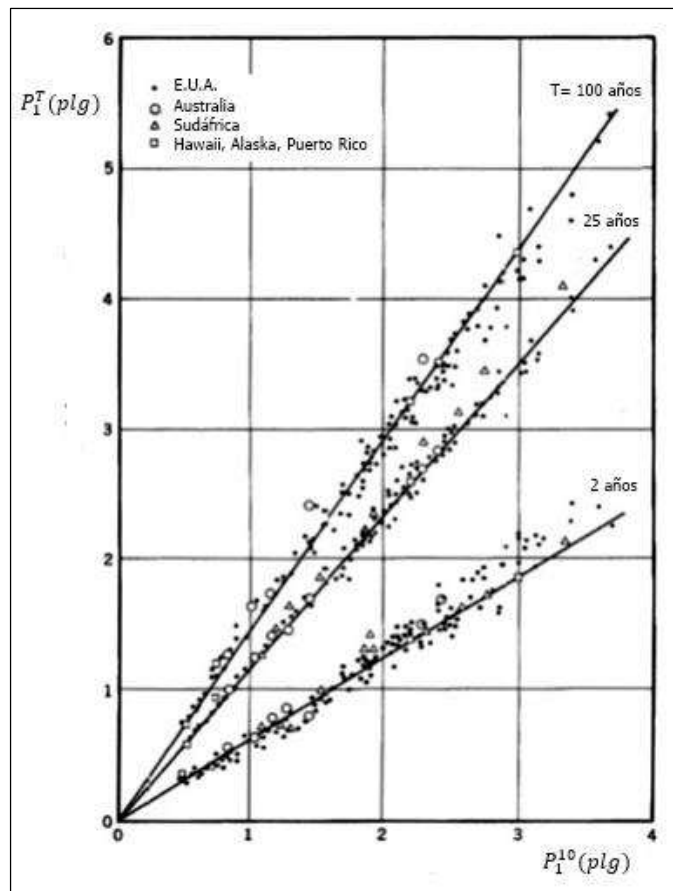


Figura 5.12. Relación altura de lluvia-frecuencia para períodos de retorno de 2, 25 y 100 años (reconstruida de Bell, 1969).

Tabla 5.7. Relación altura de lluvia-frecuencia para los datos de EUA y Australia. Bell (1969)

T	EUA		Australia	
	P_1^T / P_1^{10}	σ	P_1^T / P_1^{10}	σ
1	0.54	0.05	0.52	0.05
2	0.63	0.05	0.65	0.05
5	0.85	0.03	0.85	0.05
25	1.17	0.05	1.18	0.03

De acuerdo con las Figuras. 5.11 y 5.12 y la Tabla 5.7, conocido P_1^{10} es posible conocer P_1^T , siendo T el período de retorno de interés.

Bell consideró justificado usar la distribución de probabilidades de Gumbel para describir frecuencias de valores extremos, llevó a una gráfica de probabilidad de Gumbel los pares de valores (P_1^T / P_1^{10} , T) de la Tabla 5.7 y según él los puntos así

definidos se alineaban sensiblemente a una recta, lo que significaba que se ajustaban a la ley de Gumbel. Con objeto de corroborar los resultados de Bell, se graficaron los puntos en la escala de probabilidad de Gumbel (Figura 5.13), y se observó que no todos los puntos se alinean a una recta.

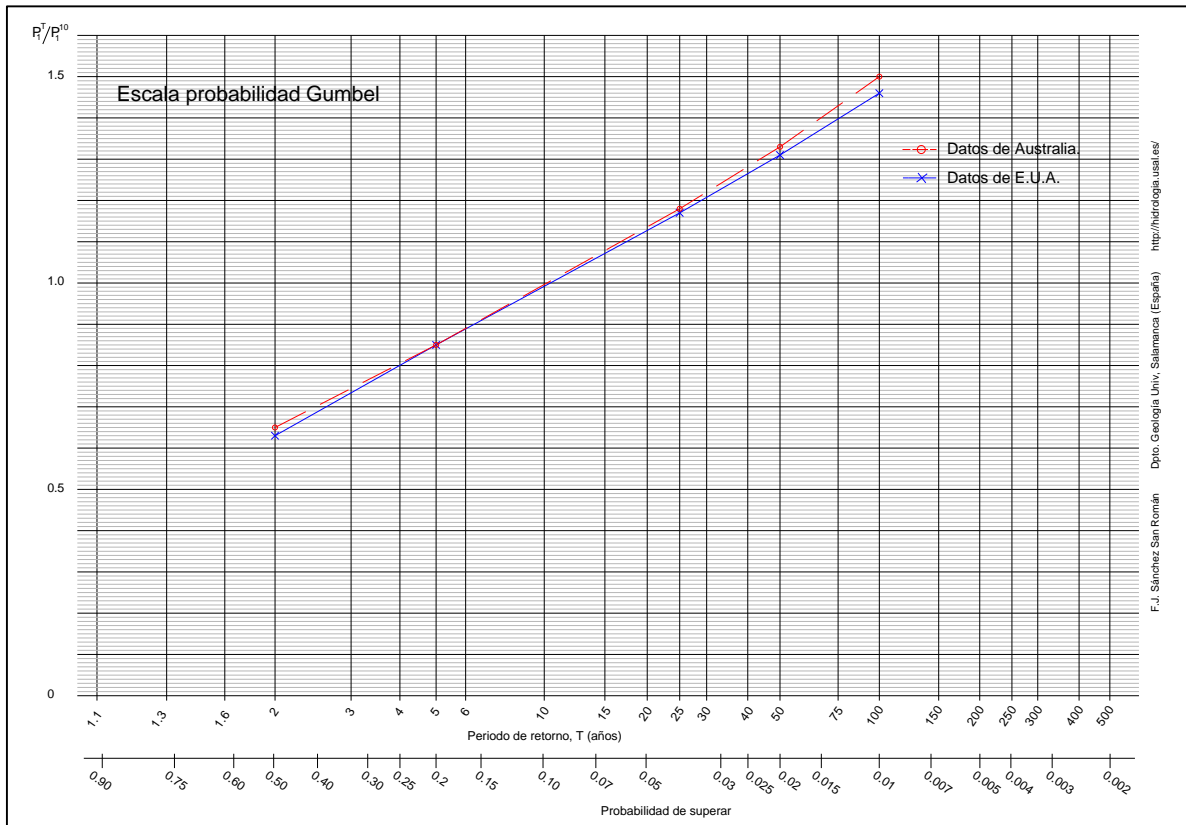


Figura 5.13. Datos de la Tabla 5.7 llevados a la escala de probabilidades de Gumbel.

Bell propuso la siguiente ecuación que, según argumentaba, describía razonablemente bien la distribución de frecuencias de la gráfica de la Figura 5.13:

$$P_1^T / P_1^{10} = 0.21 \ln T + 0.52 \quad \text{para } 2 \leq T \leq 100 \text{ años} \quad (5.15)$$

Para calcular P_d^T / P_1^T en función de la duración, d , propuso la ecuación 5.16 (no dijo en que se basó para proponerla, pero se observa que describe la Tabla 5.3):

$$P_d^T / P_1^T = 0.54 d^{0.25} - 0.50 \quad \text{para } 5 \leq d \leq 120 \text{ min} \quad (5.16)$$

Al despejar el valor de P_1^T de la ecuación 5.15 y sustituirlo en la ecuación 5.16 se obtiene:

$$P_d^T = (0.21 \ln T + 0.52) (0.54 d^{0.25} - 0.50) P_1^{10} \quad (5.17)$$

para $2 \leq T \leq 100$ años y $5 \leq d \leq 120$ min

Por la forma como se obtuvo la ecuación 5.17, ésta considera que se cumplen simultáneamente $P_d^T / P_1^T = \text{constante}$ y $P_1^T / P_1^{10} = \text{constante}$.

Para aplicar la ecuación 5.17 es necesario obtener el valor de P_1^{10} , para lo cual se requiere de información pluviográfica.

Para obtener la intensidad de lluvia, I_d^T , se aplica la ecuación:

$$I_d^T = 60 P_d^T / d \quad (5.18)$$

En síntesis, el método de Bell lo constituyen las ecuaciones 5.17 y 5.18, donde P_d^T y P_1^{10} están en mm, I en mm/h, d en min y es aplicable para los rangos de valores de T y d indicados en la ecuación 5.17.

5.3. Método de Cheng-Lung Chen (1975 y 1983).

La Universidad de Utah y la Administración Federal de Carreteras de EUA (FHWA) realizaron estudios para conocer la distribución espacial y temporal de la lluvia para el diseño de los sistemas de alcantarillado de autopistas urbanas. Los estudios estuvieron a cargo de Cheng-Lung Chen, profesor de la Universidad, con la supervisión de Dah-Cheng Woo por la FHWA.

Chen pretendió describir los patrones de tormenta de EUA a partir de las relaciones I-d-T del estudio realizado por Hershfield (1961) y obtener ecuaciones generalizadas de patrones de tormentas de diseño. Desarrolló la hipótesis de que existía una relación consistente entre la intensidad de lluvia para una duración de una hora, I_1 , y la intensidad de lluvia para duraciones más cortas y se dio a la tarea de probar la hipótesis. Con anterioridad Hershfield (1961), por la forma como obtuvo sus mapas de isoyetas, propuso que existía una relación entre P_1^2 , P_{24}^2 , P_1^{100} y P_{24}^{100} con cualquier otro valor de P_d^T . Chen propuso que un valor de P_d^T cualquiera se podía obtener si se conocía P_1^T y consideró conveniente estandarizar los mapas de isoyetas de Hershfield con objeto de derivar fórmulas estándar de I-d-T, y en esto enfocó sus estudios.

Adoptó para su estudio la ecuación de Sherman (ecuación 5.6). A partir de análisis de lluvias observó que el parámetro b de la ecuación de Sherman no siempre era mayor de cero. Observó que para todo el territorio de EUA al oeste de las Montañas Rocosas $b > 0$, al este de las Montañas Rocosas $b < 0$ y para las Islas Hawaii $b = 0$. Por lo tanto, decidió modificar la ecuación de Sherman para que siempre se cumpla $b > 0$:

$$I = a / (d \pm b)^c \quad (5.19)$$

Al obtener logaritmos de ambos miembros de la ecuación 5.19, se tiene:

$$\log I = \log a - c \log (d \pm b) \quad (5.20)$$

Para obtener las alturas de lluvia asociadas a distintos valores de T en varios puntos geográficos de EUA y poder construir relaciones estándar de Intensidad – Duración, seleccionó 34 ciudades, de las cuales 23 eran las más pobladas de EUA en 1975 y 11 eran ciudades importantes de la zona oeste de EUA, como se muestra en el mapa de la Figura 5.14.

A partir de los mapas de isoyetas de Hershfield, obtuvo para cada una de las ciudades los valores de P_d^T para $d = 1, 2, 3, 6, 12$ y 24 h y para $T = 1, 2, 5, 10, 25$ y 100 años. Para duraciones menores de una hora empleó los valores de P_d^T de la Tabla 5.3 y para obtener los de I_d^T los dividió entre la duración, d , en horas (Tabla 5.8).

Tabla 5.8. Relación de la Altura de lluvia y de la Intensidad de lluvia de cierta duración, d , respecto a las de una hora de duración. Chen (1975).

$d(\text{min})$	P_d^T / P_1^T	I_d^T / I_1^T
5	0.292	3.51
10	0.450	2.70
15	0.569	2.28
30	0.790	1.58
60	1.000	1.00

Para cada una de las 34 ciudades Chen obtuvo también valores de I_d^T , I_d^T / I_1^T para $d = 5, 10, 15, 30$ y 60 min y $2, 3, 6, 12$ y 24 h y $T = 1, 2, 5, 10, 25, 50$ y 100 años.

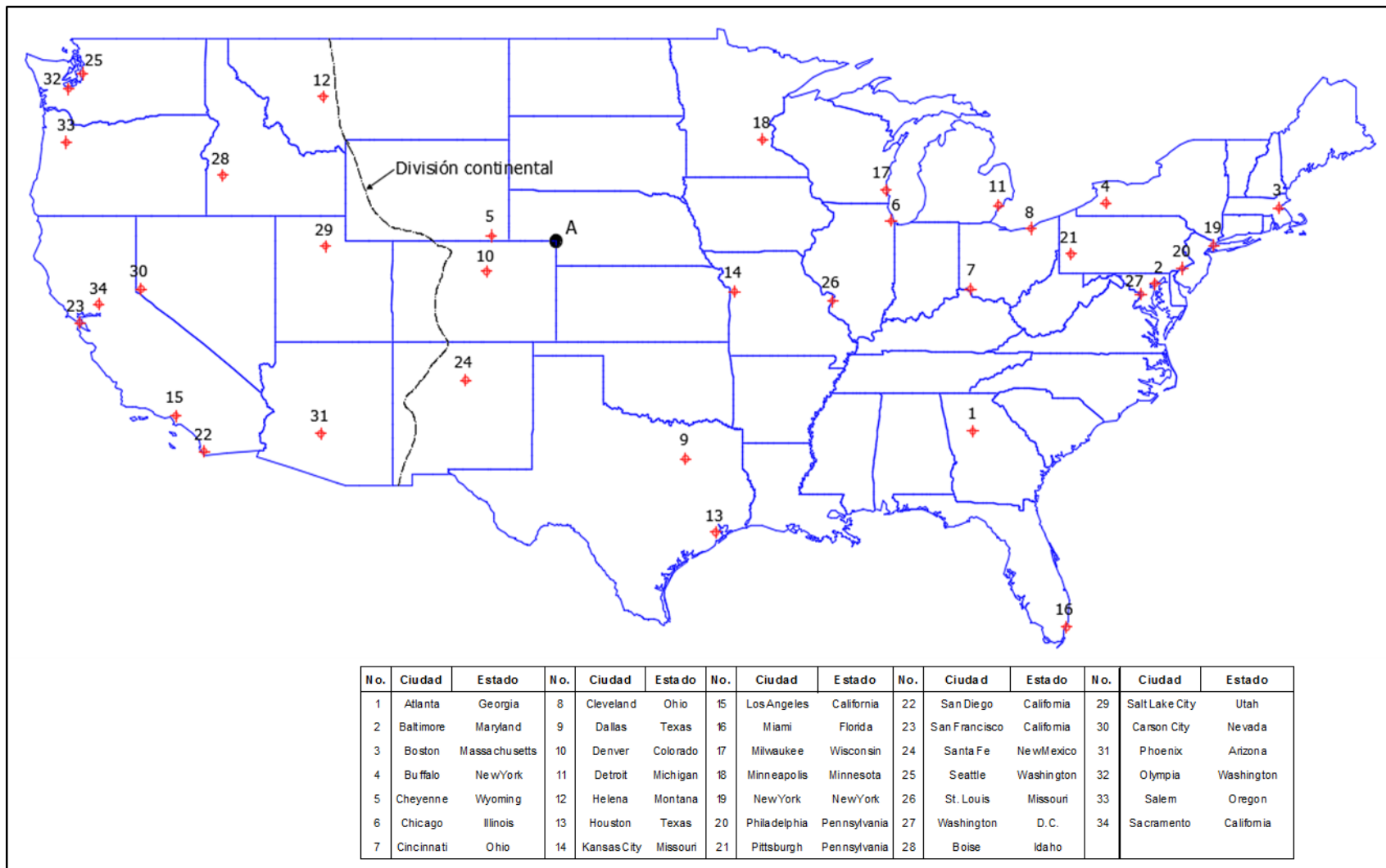


Figura 5.14. Ubicación de las 34 ciudades que seleccionó Chen para su estudio.

A partir de los mapas de isoyetas de Hershfield, Chen observó que P_1^T / P_{24}^T variaba de 0.10 a 0.60, y que al oeste de EUA a partir de la división continental era inferior a 0.4 y al este, mayor de 0.4, y por lo tanto, el promedio para todo EUA era 0.4. Esta aseveración de Chen carece de fundamento, ya que al oeste de la división continental se encuentra el 28% del territorio de EUA y al este, el 72% y no queda claro en que se basó Chen para establecer el valor promedio de 0.4.

Chen consideró en forma arbitraria un valor de $P_1^T = 1$ plg para crear una gráfica d (min) contra P (plg) e ilustrar los límites superior, promedio e inferior de la relación P_1^T / P_{24}^T (ver Figura 5.15).

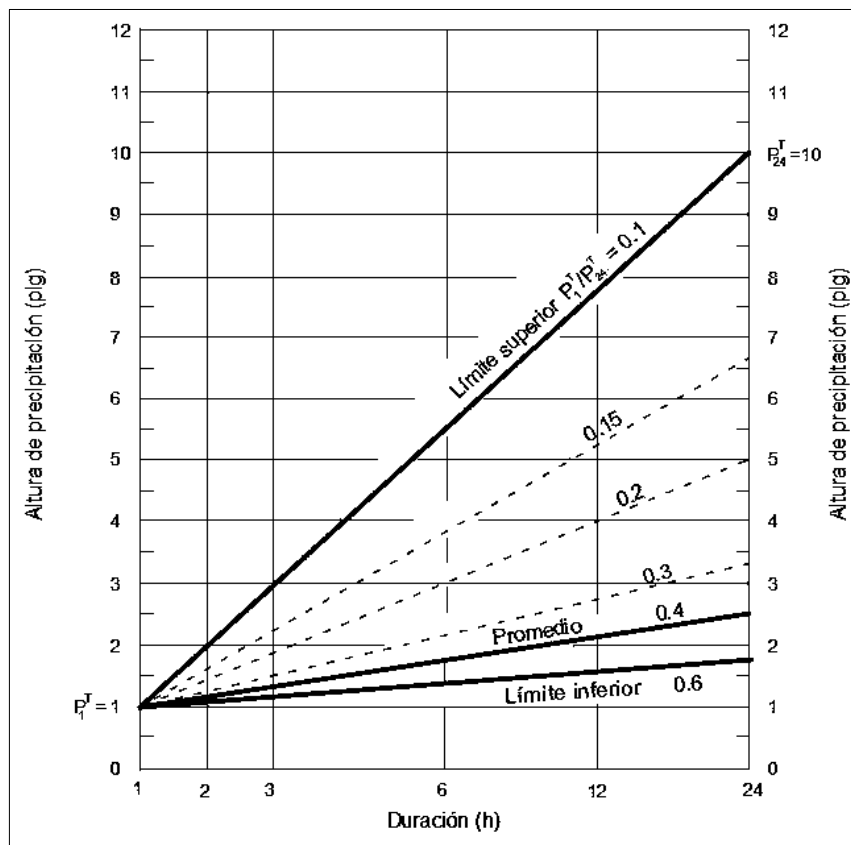


Figura 5.15. Diagrama Altura de precipitación – duración para los EUA (reconstruida de Chen, 1975).

En la Figura 5.15 el primer eje vertical se refiere a valores de P_1^T , que según la gráfica siempre valen 1 plg, y el último eje vertical se refiere a valores de P_{24}^T , que según la gráfica están comprendidos entre 1.7 y 10 plg.

El autor del presente trabajo comprobó a partir de los datos que presenta el propio Chen (1975), en el Apéndice A de su artículo, que para las 34 ciudades que estudió se cumple $0.24 \leq P_1^T \leq 4.90$ plg y $1.0 \leq P_{24}^T \leq 13.45$ plg, lo cual no queda representado en la gráfica de la Figura 5.15 y por lo tanto, ésta es inadmisibles.

A partir de la Figura 5.15, Chen construyó la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Valores de P_d^T e I_d^T obtenidos con la gráfica de la Figura 5.15. Chen (1975).

d (h)	Lím.Sup. $P_1^T / P_{24}^T = 0.1$		Prom. $P_1^T / P_{24}^T = 0.4$		Lím.Inf. $P_1^T / P_{24}^T = 0.6$	
	P_d^T	$I_d^T = P_d^T / d$	P_d^T	$I_d^T = P_d^T / d$	P_d^T	$I_d^T = P_d^T / d$
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	2.0	1.0	1.25	0.625	1.1	0.55
3	3.0	1.0	1.4	0.467	1.2	0.4
6	5.5	0.917	1.75	0.292	1.4	0.233
12	7.75	0.646	2.1	0.175	1.55	0.129
24	10.0	0.417	2.5	0.104	1.667	0.069

Unidades: P_d^T en plg, I_d^T en plg/h

Incorporó los datos de la Tabla 5.8 para considerar duraciones de 5, 10, 15 y 30 minutos en el cálculo de I_d^T y construyó la Tabla 5.10.

Tabla 5.10. Valores de I_d^T estándar para distintos valores de d y de P_1^T / P_{24}^T . Chen (1975).

P_1^T / P_{24}^T	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.60
d						
5 min	3.51	3.51	3.51	3.51	3.51	3.51
10	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70
15	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28
30	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58
1 h	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	1.0	0.85	0.75	0.65	0.625	0.55
3	1.0	0.767	0.65	0.517	0.467	0.40
6	0.917	0.65	0.50	0.375	0.292	0.233
12	0.646	0.438	0.333	0.229	0.175	0.129
24	0.417	0.278	0.208	0.139	0.104	0.0694

Unidades: I_d^T en plg/h

De la Tabla 5.10 se pueden obtener intensidades a partir de las duraciones, por lo que también presentó la relación I – d en forma gráfica (Figura 5.16).

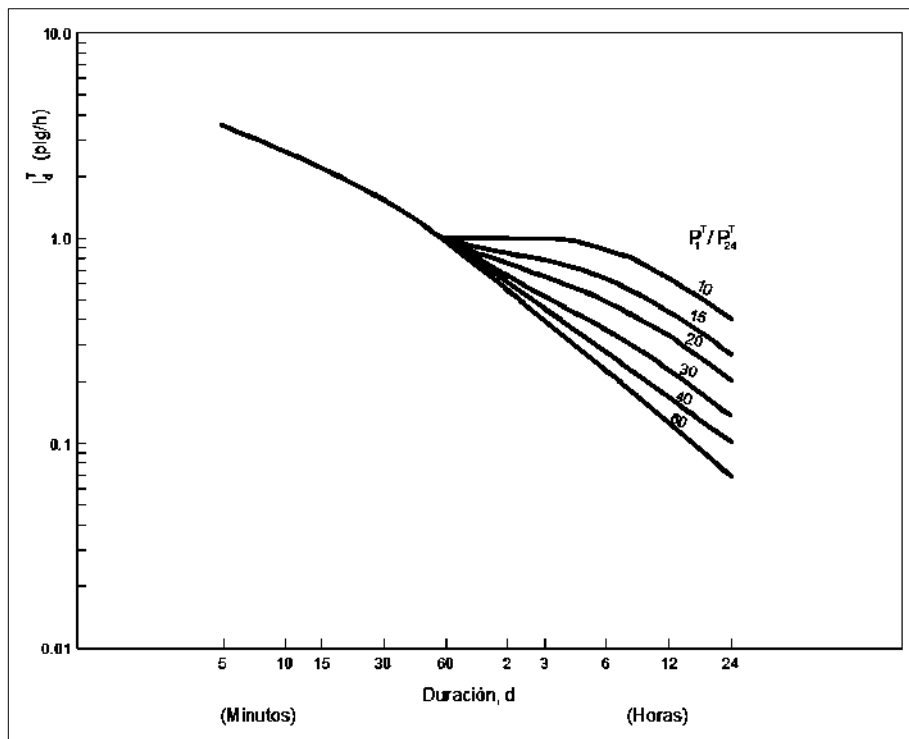


Figura 5.16. Curvas estándar $I_d^T - d$ para varias relaciones P_1^T / P_{24}^T (reconstruida de Chen, 1975).

Se observa que la Figura 5.16 no es aceptable, ya que propone que los patrones de lluvia en EUA se modifican drásticamente a partir de $d = 60$ min.

Según Chen los parámetros a , b y c de la ecuación de Sherman (ecuación 5.6) para las curvas estándar $I_d^T - d$ podían evaluarse empleando el método de mínimos cuadrados con la ayuda de una técnica de optimización. Investigó las posibles relaciones entre tales parámetros y la razón P_1^T / P_{24}^T . Argumentaba que si existían tales relaciones podían utilizarse para estimar los valores de a , b y c para cualquier lugar de EUA sin necesidad de recurrir a los mapas de isoyetas de Hershfield. Para que el procedimiento fuera válido, Chen empleó dos mapas de isoyetas de Hershfield, el correspondiente a $T = 10$ años y $d = 1$ h y el de $T = 10$ años y $d = 24$ horas y con ellos calculó la relación P_1^T / P_{24}^T . Aplicando el método de mínimos cuadrados y la técnica de optimización al conjunto de datos de la Tabla 5.9 para la misma relación P_1^T / P_{24}^T , obtuvo los valores de los “parámetros estándar de tormenta” a_1 , b_1 y c_1 (ver Tabla 5.11).

Tabla 5.11. Valores de los parámetros estándar de tormenta para los correspondientes valores de P_1^T / P_{24}^T , calculados a partir de las relaciones estándar I - d de la Tabla 5.10 y Figura 5.16. Chen (1975).

Parámetros estándar de tormenta	P_1^T / P_{24}^T					
	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.60
a_1	4.58	6.57	8.91	14.35	22.57	40.01
b_1	-2.84	-0.80	1.04	4.12	7.48	11.52
c_1	0.309	0.420	0.507	0.632	0.738	0.872

Además, graficó los valores de a_1 , b_1 y c_1 contra P_1^T / P_{24}^T (Figura 5.17).

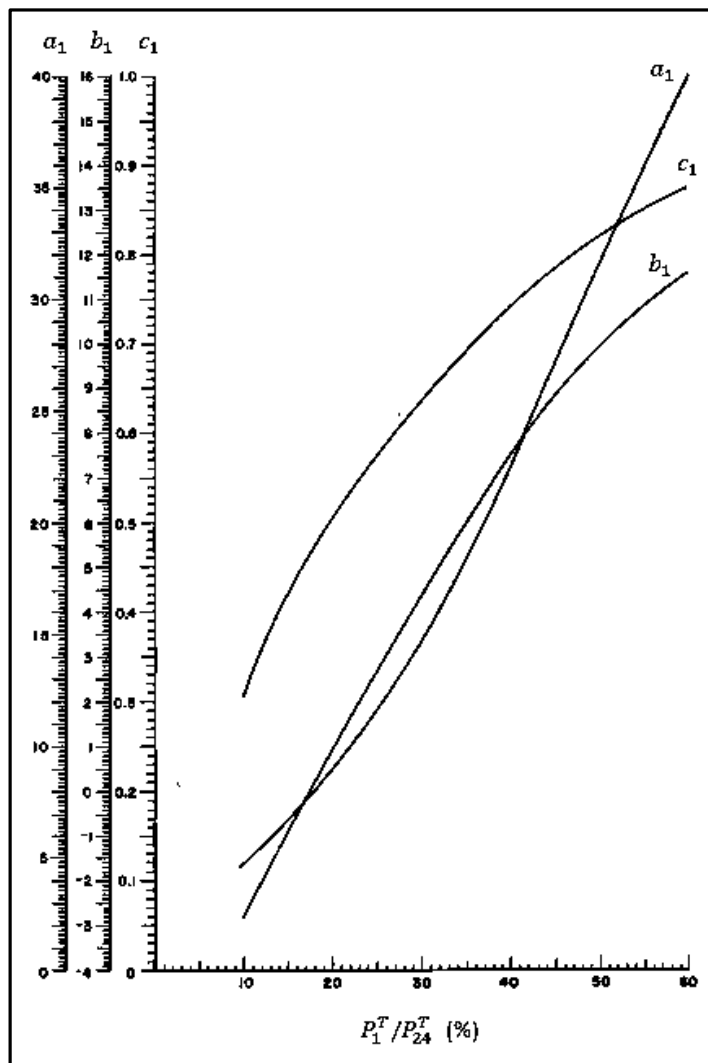


Figura 5.17. Relaciones entre los parámetros estándar de tormenta y valores de P_1^T / P_{24}^T (reconstruida de Chen, 1975).

Según Chen, la relación estándar $I - d$, que parece ser independiente de T , se puede escribir matemáticamente siguiendo el modelo de Sherman (ecuación 5.6):

$$I_d^T / I_1^T = a_1 / (d + b_1)^{c_1} \quad (5.21)$$

El autor de este trabajo destaca que Sherman consideraba que $a / (d + b)^c$ describía el comportamiento de la intensidad de lluvia, no de una relación entre dos intensidades de lluvia. Chen supone con la ecuación 5.21 que el comportamiento de I_d^T es idéntico al de I_d^T / I_1^T .

De la ecuación 5.21

$$a_1 I_1^T = I_d^T (d + b_1)^{c_1} \quad (5.22)$$

Chen presentó también la ecuación de Sherman (ecuación 5.6) como

$$I_d^T = a / (d + b_1)^{c_1} \quad (5.23)$$

Esto significa que para una relación entre dos intensidades de lluvia (ecuación 5.21) consideró en la ecuación de Sherman el coeficiente a_1 y para una intensidad de lluvia cualquiera (ecuación 5.23) consideró el coeficiente a . No explicó en qué se basó para este planteamiento y por qué involucró en ambas ecuaciones los parámetros b_1 y c_1 .

A partir de la ecuación 5.23, se obtiene

$$I_d^T (d + b_1)^{c_1} = a \quad (5.24)$$

Al sustituir la ecuación 5.24 en la ecuación 5.22 obtuvo:

$$a = a_1 I_1^T \quad (5.25)$$

Con esto Chen evaluó a , b y c de la ecuación de Sherman (ecuación 5.6) y la escribió como:

$$I_d^T = a_1 I_1^T / (d + b_1)^{c_1} \quad (5.26)$$

Los valores de a_1 , b_1 y c_1 se obtienen con la Figura 5.17, conocida la relación P_1^T / P_{24}^T .

No hay que perder de vista que el objetivo primordial de Chen era transformar los 49 mapas de Hershfield a una ecuación.

En su análisis de frecuencias, Hershfield (1961) empleó un diagrama de frecuencias semiempírico para calcular alturas de lluvia para períodos de retorno de 2 a 100 años (Figuras 5.4 a 5.7) y con ello construyó sus 49 mapas de isoyetas. Chen consideró que entonces debía procederse al contrario, es decir, que la relación $I - T$ a formular a partir de los mapas de isoyetas, debía ser independiente de la duración y aproximarse a una línea recta en papel log - normal. Para examinar esto, obtuvo los valores de I_d^T / I_d^{10} para las 34 ciudades estudiadas y encontró que tales valores variaban notablemente para cada uno de los períodos de retorno analizados (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años). Para ilustrar esto, presentó en una gráfica semilogarítmica T contra I_d^T / I_d^{10} el caso particular I_1^T / I_1^{10} para las 34 ciudades analizadas (Figura 5.18), donde se observa que los rangos de variación del parámetro I_1^T / I_1^{10} para los distintos valores de T es grande. Por ejemplo, para el caso de $T = 100$ años, los valores máximo y mínimo resultaron de 1.33 y 1.63, respectivamente. Chen dibujó la recta que mejor se ajustó al centro de cada uno de los rangos y que, según afirmó, de ninguna manera representaba la relación promedio entre T y I_1^T / I_1^{10} . A pesar de las discrepancias, Chen supuso que la relación estándar de Intensidad – Frecuencia era independiente de la duración y aproximada a la recta en papel semilogarítmico mostrada en la Figura 5.18.

Chen no explica por qué consideró el caso particular $d = 1$ h en la Figura 5.18 como la relación estándar de intensidad – frecuencia para desarrollar su método.

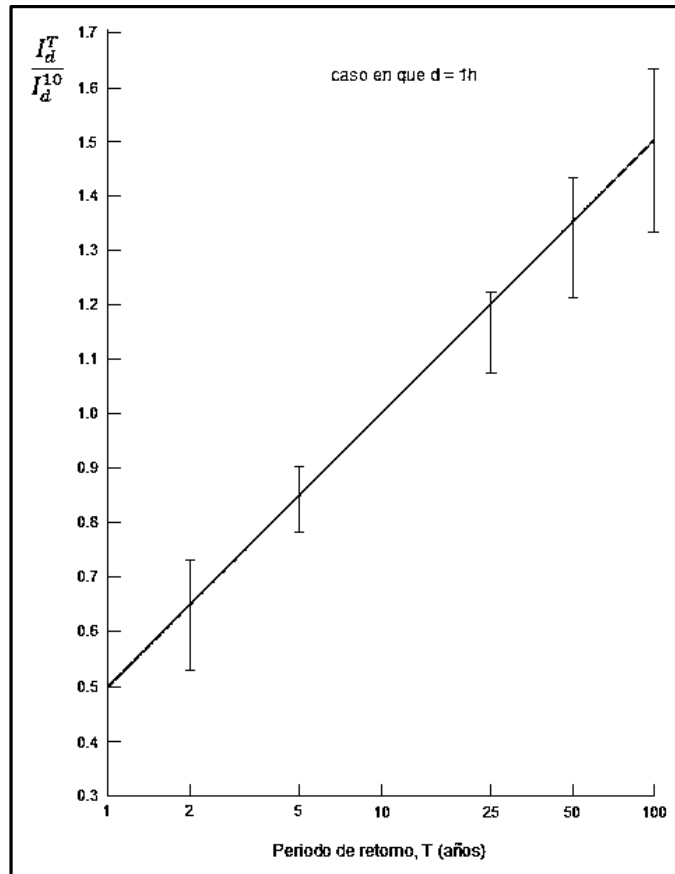


Figura 5.18. Relación estándar de intensidad – frecuencia para una duración de 1 h para las 34 ciudades estudiadas (reconstruida de Chen, 1975).

La ecuación de la recta de la Figura 5.18 se puede obtener si se conoce un punto y la pendiente de ésta, según la expresión general: $y - y_1 = m (x - x_1)$, siendo m la pendiente de la recta y (x_1, y_1) el punto conocido de la recta. En este caso, el punto conocido es $p (\log 10, 1)$ y la pendiente es (ver Figura 5.18):

$$m = (I_d^{100} / I_d^{10} - 1) / (\log 100 - \log 10) \quad (5.27)$$

Con esto, la ecuación de la recta es:

$$(I_d^T / I_d^{10}) - 1 = [(I_d^{100} / I_d^{10} - 1) / (\log 100 - \log 10)] (\log T - \log 10) \quad (5.28)$$

Al desarrollar algebraicamente esta ecuación, considerando $F = I_d^{100} / I_d^{10}$, y al simplificar se obtiene

$$I_d^T / I_d^{10} = (F - 1) \log T + 2 - F \quad (5.29)$$

Aplicando las leyes de los logaritmos, esta ecuación se puede escribir como

$$I_d^T / I_d^{10} = \log (10^{2-F} T^{F-1}) \quad (5.30)$$

Al despejar I_d^T y evaluar la ecuación para $d = 1$ h se tiene

$$I_1^T = I_1^{10} \log (10^{2-F} T^{F-1}) \quad (5.31)$$

Sustituyendo esta ecuación en la ecuación 5.26 se obtiene

$$I_d^T = a_1 I_1^{10} \log (10^{2-F} T^{F-1}) / (d + b_1)^{c_1} \quad (5.32)$$

Esta ecuación es la que propuso Chen para calcular intensidades de lluvia.

Para obtener alturas de precipitación, la ecuación 5.32 se puede expresar como

$$I_d^T = P_d^T / d = a_1 (P_1^{10} / 60) \log (10^{2-F} T^{F-1}) / (d + b_1)^{c_1} \quad (5.33)$$

Despejando P_d^T de esta ecuación se obtiene

$$P_d^T = a_1 P_1^{10} \log (10^{2-F} T^{F-1}) d / [60 (d + b_1)^{c_1}] \quad (5.34)$$

De acuerdo con lo anterior, para calcular I_d^T en mm/h se puede emplear la siguiente ecuación:

$$I_d^T = 60 P_d^T / d \quad (5.35)$$

En síntesis, el método de Chen lo constituyen las ecuaciones 5.34 y 5.35, donde P_d^T y P_1^{10} están en mm, I en mm/h, d en min y es aplicable para $5 \leq d \leq 1440$ min y $5 \leq T \leq 100$ años.

Como puede observarse, el método de Cheng – Lung Chen contiene planteamientos deficientes, parte de supuestos e hipótesis que no se cumplen en la realidad y es un intento de sustituir los mapas de isoyetas de Hershfield, que datan de hace 56 años, por una ecuación aplicable a todo EUA. Por ello, y tomando en consideración que las condiciones meteorológicas de EUA y de México son muy distintas, no es confiable aplicarlo para la República Mexicana.

Capítulo 6. Análisis comparativo de los métodos directos e indirectos.

Con el fin de evaluar la bondad de los métodos indirectos de Bell (1969) y de Chen (1975 y 1983), se compararon con el método directo Isoyetas de Intensidad – Duración - Período de Retorno para la República Mexicana (2000), obtenidas a partir de mediciones con pluviógrafos. Para ello, fue necesario elaborar curvas I-d-T con los tres métodos y efectuar un minucioso análisis. Se describen en este capítulo los procedimientos utilizados para generar tales curvas y los resultados obtenidos.

6.1. Obtención de curvas I-d-T a partir de las Isoyetas I-d-T de SCT 2000. (Método directo).

En este método se construyeron las curvas I-d-T basándose en las Isoyetas publicadas por la SCT en el año 2000. Para tal efecto, se procedió de la siguiente manera:

- a) Se analizaron los mapas de isoyetas I-d-T de SCT 2000 para seleccionar las estaciones pluviográficas cuya ubicación definiera una cobertura lo más amplia posible en la República Mexicana. Al mismo tiempo, se revisó la base de datos denominada Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC), desarrollada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), la cual se consultó a través de una aplicación preparada por el Servicio Meteorológico Nacional en la plataforma Google Earth. CONAGUA (2010).
- b) En la selección de las estaciones pluviográficas se consideraron sólo aquellas que tuvieran en la base de datos ERIC, información pluviométrica en cuanto a alturas máximas de lluvia para duraciones de 24 horas, con bastantes años de registro y continuidad en el mismo. Así, se seleccionaron en total 49 estaciones (ver Tabla 6.1 y Figura 6.1). De las estaciones seleccionadas, la que tuvo menos años de registros hasta 1999 fue El Palmito, Dgo. (28 años) y la que tuvo más, Zacualtipán, Hgo. (77 años).

Tabla 6.1. Estaciones pluviográficas seleccionadas para el análisis.

Núm	Clave SMN	Estación	Estado	Núm	Clave SMN	Estación	Estado
1	7006	Altamirano	Chis.	26	2033	Mexicali	B.C.
2	6001	Armería	Col.	27	20070	Miahuatlán	Oax.
3	18035	Camacho	N.L.	28	30216	Naranjal	Ver.
4	12019	Cd Altamirano	Gro.	29	24045	Nogal Oscuro	S.L.P.
5	23032	Chetumal	Q Roo.	30	8106	Norogachi	Chih.
6	31007	Chicxulub	Yuc.	31	10054	Peña del Águila	Dgo.
7	16022	Cointzio	Mich.	32	25074	Potrerrillos	Sin.
8	12022	Copala	Gro.	33	26024	Presa A Ruiz Cortines	Son.
9	8038	Creel	Chih.	34	5026	Presa Coyote	Coah.
10	25015	Culiacán	Sin.	35	26069	Presa La Angostura	Son.
11	8044	Delicias	Chih.	36	21035	Puebla	Pue.
12	32013	El Achique	Zac.	37	5033	Sabinas	Coah.
13	10021	El Palmito	Dgo.	38	5048	Saltillo	Coah.
14	14059	El Tuito	Jal.	39	28086	San Fernando	Tamps
15	14066	Guadalajara	Jal.	40	26082	San Isidro	Son.
16	26139	Hermosillo II	Son.	41	19058	Sta. Catarina	N.L.
17	4013	Hopelchén	Camp.	42	2060	Santa Cruz	B.C.
18	26045	Imuris	Son.	43	28111	Tampico	Tamps
19	20039	Ixtepec	Oax.	44	7200	Tapachula	Chis.
20	25046	Jaina	Sin.	45	20157	Tepelmeme	Oax.
21	18018	Jesús María	Nay.	46	28114	Tula	Tamps
22	26048	La Estrella	Son.	47	7176	Tuxtla Gtz.	Chis.
23	3074	La Paz	B.C.S.	48	27054	Villahermosa	Tab.
24	11095	León	Gto.	49	13042	Zacualtipan	Hgo
25	30102	Mtz d la Torre	Ver.				

Estaciones pluviográficas seleccionadas para el análisis

No.	ESTACIÓN
1	Altamirano, Chis.
2	Armería, Col.
3	Camacho, N.L. (Linares, N.L.)
4	Cd. Altamirano, Gro.
5	Chetumal (DGE), Q. Roo.
6	Chicxulub Puerto, Yuc.
7	Cointizo, Mich.
8	Copala, Gro.
9	Creel (CFE), Chih.
10	Culiacán, Sin.
11	Delicias (DGE), Chih.
12	El Achique, Zac.
13	El Palmito, Dgo.
14	El Tuerto, Jal.
15	Guadalupe (DGE), Jal.
16	Hermosillo II (DGE), Son.
17	Hopelchén, Camp.
18	Imuris (SMN), Son.
19	Ixtepec, Oax.
20	Jaina, Sin.
21	Jesús María, Nay.
22	La Estrella, Son.
23	La Paz (DGE), B. C.S.
24	León, Gto.
25	Martínez de la Torre, Ver.
26	Mexicali (DGE), B.C.
27	Miahuatlán (SMN), Oax.
28	Naranja, Ver.
29	Nogal Oscuro, S.L.P.
30	Norogachi (CFE), Chih.
31	Peña del Águila, Dgo.
32	Potrerillos, Sin.
33	Presa A. Ruiz Cortines, Son.
34	Presa Coyote (Torreón, Coah.)
35	Presa La Angostura, Son.
36	Puebla (DGE), Pue.
37	Sabinas, Coah.
38	Saltillo (DGE), Coah.
39	San Fernando, Tamps.
40	San Isidro, Son.
41	Santa Catarina, N.L.
42	Santa Cruz, B.C.
43	Tampico, Tamps.
44	Tapachula (DGE), Chis.
45	Tepelmeme, Oax.
46	Tula, Tamps.
47	Tuxtla Gutiérrez (CFE), Chis.
48	Villahermosa, Tab.
49	Zacualtipán, Hgo.



Figura 6.1. Estaciones pluviográficas para el análisis.

c) A partir de los mapas de Isoyetas se construyó para cada estación pluviográfica seleccionada, una tabla que contiene las intensidades de lluvia para distintas duraciones y períodos de retorno. Esto constituye la información de los mapas de isoyetas expresada en forma tabular, para cada una de las estaciones. Como ejemplo, se presentan los datos de las estaciones Copala, El Palmito, Hopelchén, Mexicali y Tampico (Tablas 6.2 a 6.6).

Tabla 6.2. Intensidades de lluvia en mm/h, obtenidas con las Isoyetas SCT 2000, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Copala.

T (años)	duración (min)						
	5	10	20	30	60	120	240
10	148	118	100	89	67	46	30
20	159	126	107	96	73	50	32
25	162	129	109	98	74	51	33
50	171	135	114	103	79	54	35
100	179	141	119	108	83	56	37

Tabla 6.3. Intensidades de lluvia en mm/h, obtenidas con las Isoyetas SCT 2000, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación El Palmito.

T (años)	duración (min)						
	5	10	20	30	60	120	240
10	164	118	83	67	43	25	14
20	190	135	95	78	50	29	16
25	198	141	99	81	52	30	16.5
50	223	159	112	92	59	34	18
100	201	144	120	89	46	27	20

Tabla 6.4. Intensidades de lluvia en mm/h, obtenidas con las Isoyetas SCT 2000, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Hopelchén.

T (años)	duración (min)						
	5	10	20	30	60	120	240
10	301	198	123	99	68	42	26
20	365	233	140	111	77	47	30
25	386	244	146	116	80	49	31
50	449	279	163	128	89	55	35
100	512	313	180	141	98	61	39

Tabla 6.5. Intensidades de lluvia en mm/h, obtenidas con las Isoyetas SCT 2000, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Mexicali.

T (años)	duración (min)						
	5	10	20	30	60	120	240
10	74	70	40	35	32	16	9
20	76	75	44	38	34	20	11
25	85	81	50	42	50	22	12
50	88	85	60	50	54	29	16
100	90	87	72	63	57	31	19

Tabla 6.6. Intensidades de lluvia en mm/h, obtenidas con las Isoyetas SCT 2000, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Tampico.

T (años)	duración (min)						
	5	10	20	30	60	120	240
10	170	137	104	87	63	44	30
20	184	148	112	94	68	48	33
25	189	151	114	96	69	49	34
50	201	160	121	102	74	52	37
100	211	168	127	107	78	55	40

Por medio de estas tablas fue posible verificar la congruencia de los valores de la intensidad de lluvia asentados en los mapas de isoyetas. Así, por ejemplo, para la estación Tepelmeme, Oax., se observó que para duraciones de 120 y 240 minutos los valores de la intensidad de lluvia son iguales, lo cual es una incongruencia que se debió al redondeo de cifras. Para resolver este tipo de incongruencias se agregó un decimal a los valores de I. También se detectaron errores de redondeo en las estaciones Cointzio, Creel, El Palmito, Guadalajara, Imuris, Norogachi, Presa Adolfo Ruiz Cortines, Presa La Angostura, y San Isidro. Estos errores fueron corregidos agregando un decimal más. Como ejemplo, ver Tabla 6.3.

- d) A partir de las tablas citadas en el inciso c, se construyeron las curvas I-d-T de las 49 estaciones pluviográficas. Enseguida se presentan las curvas de las estaciones Copala, El Palmito, Hopelchén, Mexicali y Tampico (Figuras 6.2 a 6.6).

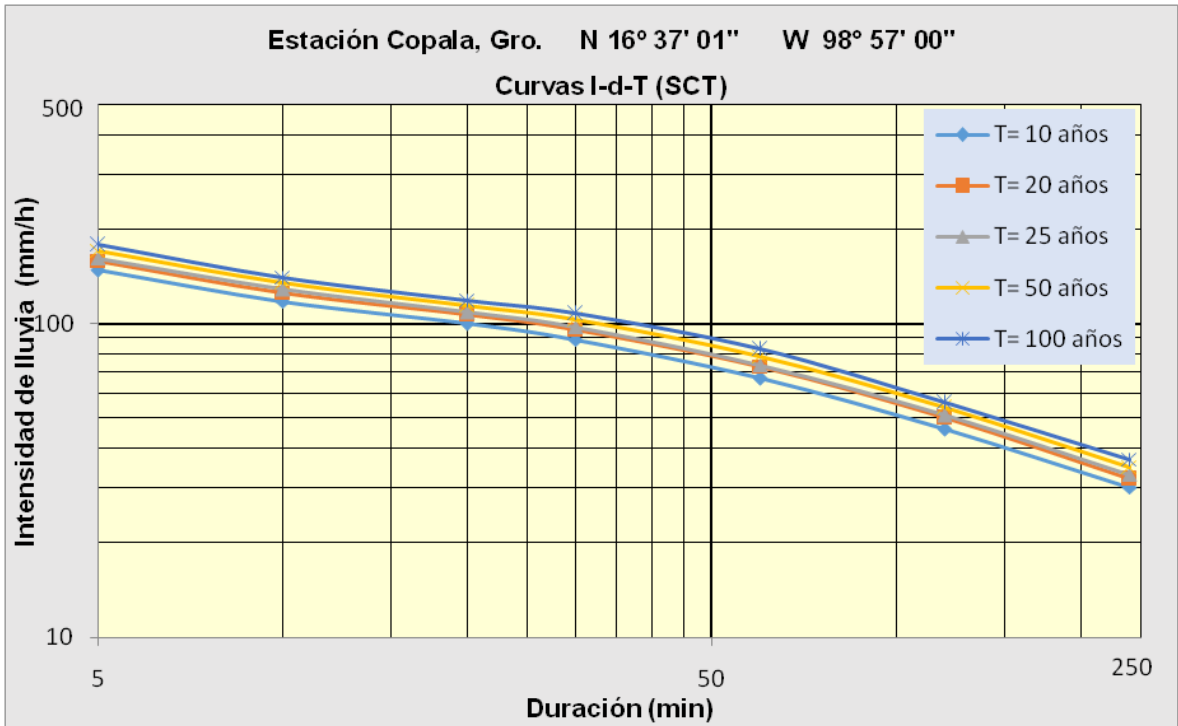


Figura 6.2. Curvas I-d-T, Estación Copala, Gro., según Isoyetas SCT 2000.

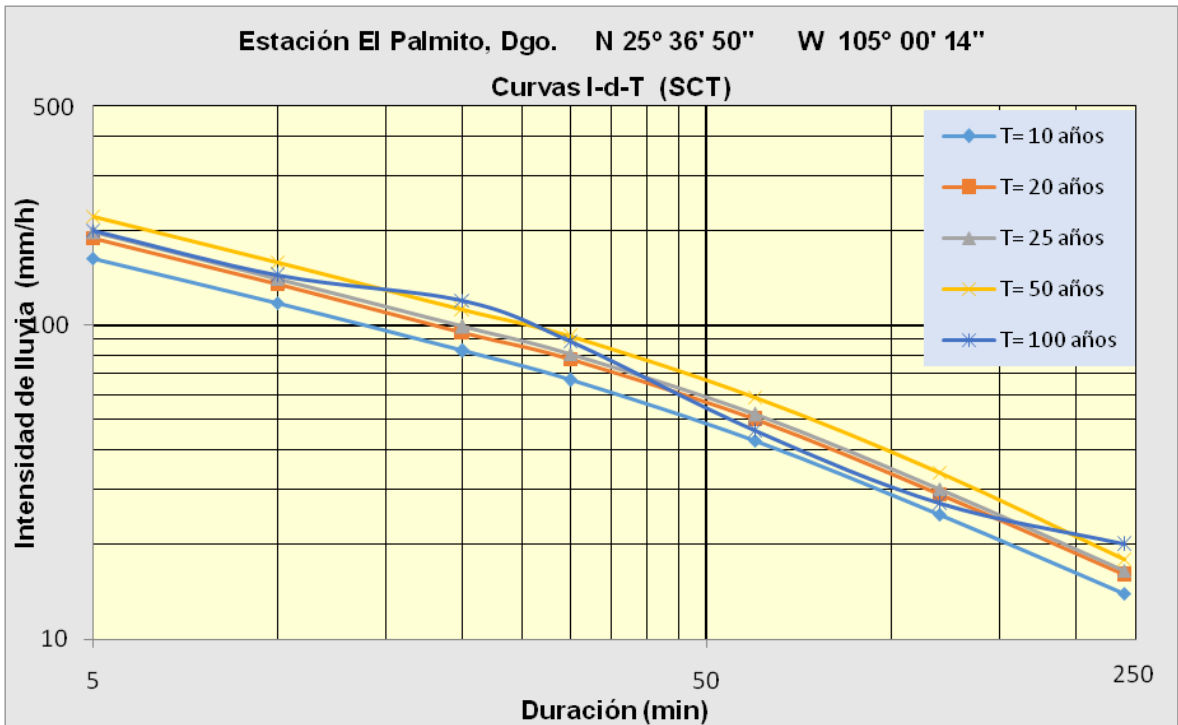


Figura 6.3. Curvas I-d-T, Estación El Palmito, Dgo., según Isoyetas SCT 2000.

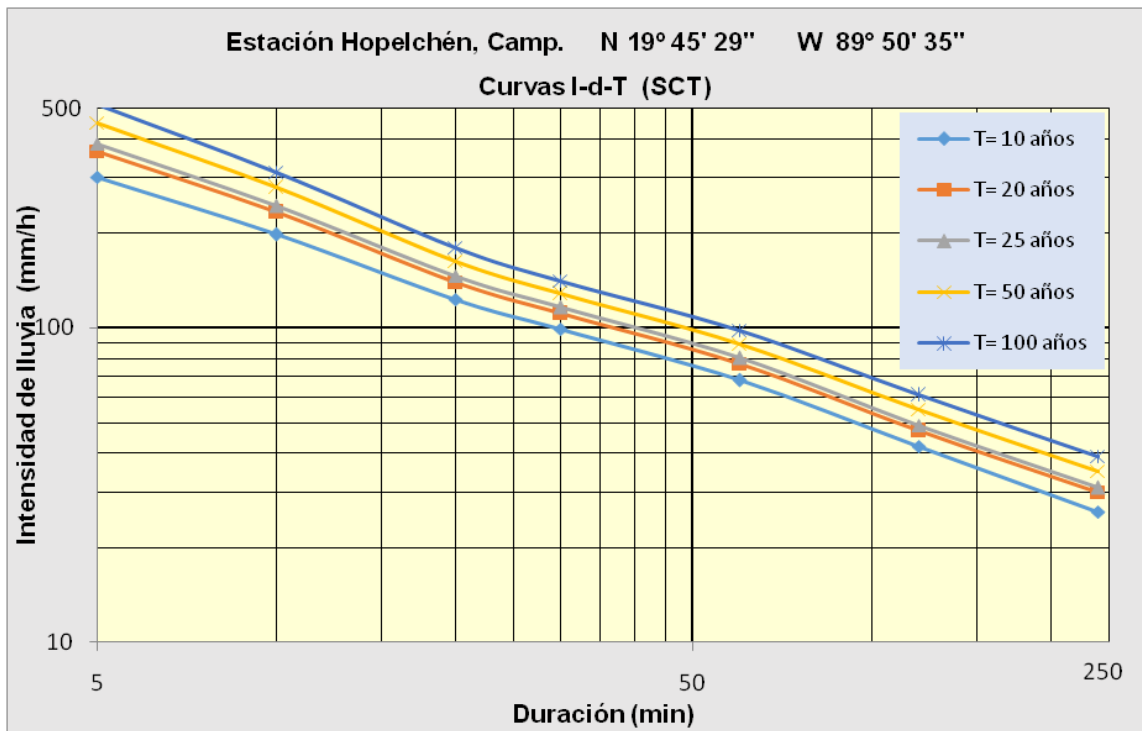


Figura 6.4. Curvas I-d-T, Estación Hopelchén, Camp., según Isoyetas SCT 2000.

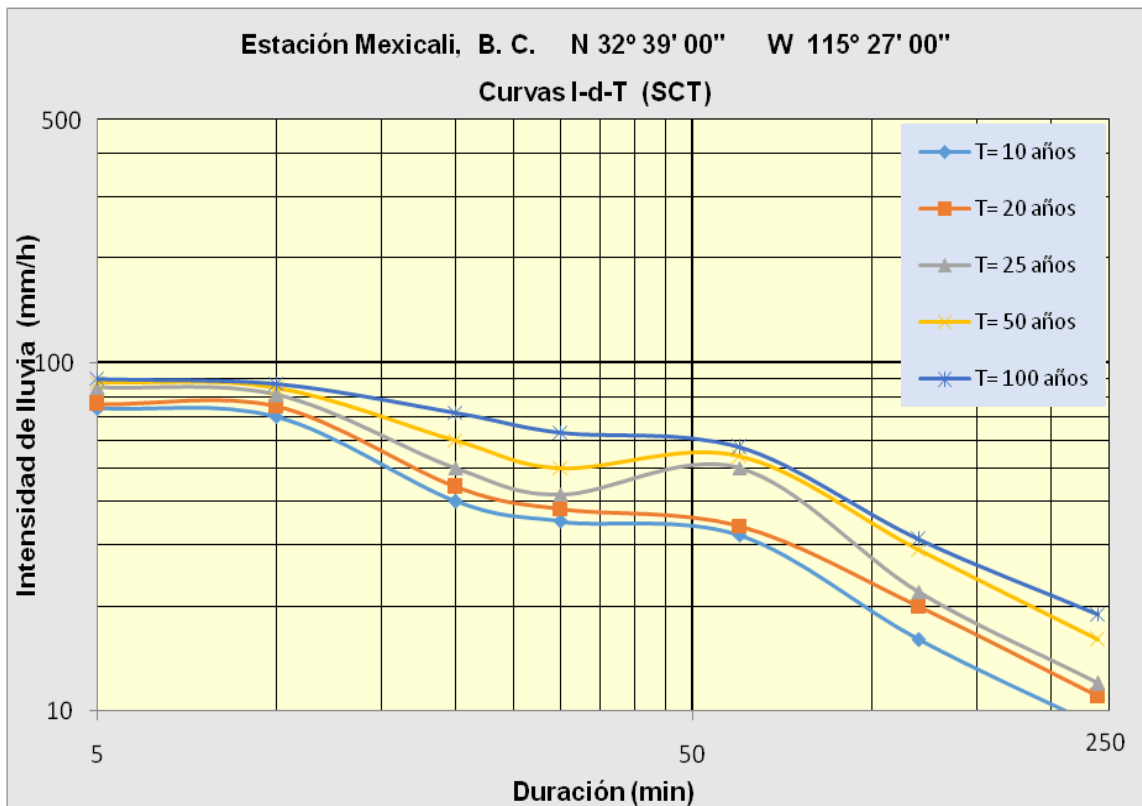


Figura 6.5. Curvas I-d-T, Estación Mexicali, B.C., según Isoyetas SCT 2000.

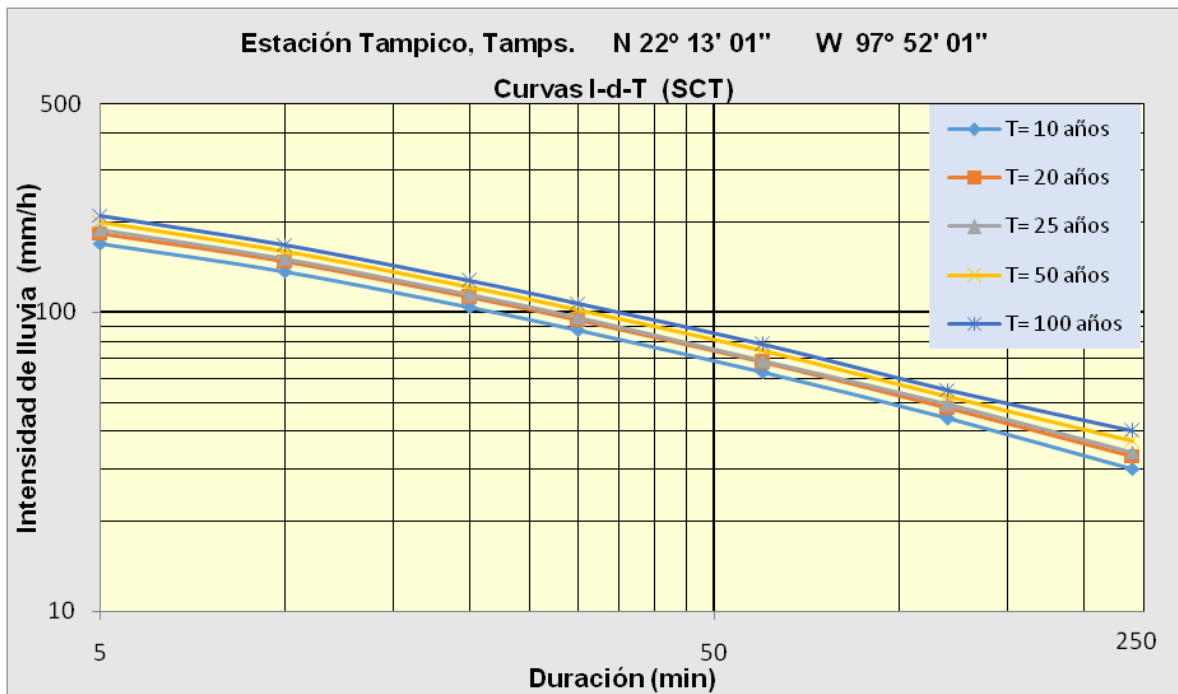


Figura 6.6. Curvas I-d-T, Estación Tampico, Tamps., según Isoyetas SCT 2000.

e) Con objeto de identificar inconsistencias en las curvas I-d-T, se analizaron las 49 estaciones pluviográficas, observándose inconsistencias en ocho de ellas, lo que obligó a eliminarlas. En la Tabla 6.7 se indican los motivos de la eliminación.

Tabla 6.7. Inconsistencias detectadas en el análisis de las curvas I-d-T de las 49 estaciones pluviográficas.

Estación pluviográfica	Inconsistencias detectadas
Creel	El valor de I no es inversamente proporcional a la duración
Mexicali	
Norogachi	
El Palmito	Se cruzan las curvas
El Tuito	
Guadalajara	
Jaina	
San Isidro	El valor de I no es inversamente proporcional a la duración y además se cruzan las curvas

- f) Del análisis efectuado se observa que existen inconsistencias en los mapas de Isoyetas SCT 2000, en las zonas en que se encuentran las estaciones Creel, El Palmito, El Tuito, Guadalajara, Jaina, Mexicali, Norogachi y San Isidro. Se recomienda siempre que se desarrollen isoyetas de I-d-T verificar que los valores de la intensidad de lluvia sean inversamente proporcionales a la duración y que para un valor constante de la duración, los valores de la intensidad de lluvia sean directamente proporcionales al período de retorno.
- g) El siguiente paso fue recopilar las Precipitaciones Máximas Anuales en cada uno de los pluviómetros. Se consideraron los datos desde su primer año de registros hasta 1999, ya que en 2000 se publicaron las Isoyetas de I-d-T. Se analizó la información de cada estación y se eliminaron los años en que la información resultaba insuficiente y poco representativa, como es el caso en que sólo había registros de los meses de secas o eran escasos los de meses lluviosos. Algunas estaciones pluviométricas tienen un gran número de años de registros, por ejemplo, Zacualtipán, Hgo. (1923-1999) y San Isidro, Son. (1930-1999).
- h) Se realizó un análisis de ajuste de distribuciones de probabilidad de las precipitaciones máximas anuales para cada una de las estaciones pluviométricas. Se consideraron las distribuciones Exponencial, Gamma 2p, Gumbel 1p, Gumbel 2p, Normal, Log-Normal, Nash y Pearson III. Como prueba de bondad de ajuste se aplicó el criterio de mínimos cuadrados. De esta manera, se definió cuál distribución de probabilidad se ajustaba mejor a las alturas de precipitación observadas. Una vez que se obtuvo el mejor ajuste para cada una de las estaciones, se estimaron las alturas de precipitación correspondientes a períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1000, 5000 y 10000 años.
- i) Los registros de precipitación pluvial máxima en intervalos de medición de 24 horas pueden arrojar errores, debido a que la duración de la precipitación puede extenderse más allá del intervalo de medición (24 horas). En virtud de que la duración de la precipitación ocurre en forma aleatoria, la magnitud de dicho traslape puede evaluarse con base en las leyes de probabilidad. Leonard L. Weiss (1964) obtuvo la relación de las cantidades máximas promedio de los intervalos de

confianza y las cantidades máximas registradas para los intervalos reales y las cantidades máximas promedio registradas para el intervalo de observación. Para un intervalo aislado, obtuvo que el factor de ajuste es de aproximadamente 14%.

Por lo tanto, de acuerdo con Weiss, los resultados obtenidos en el inciso h se multiplicaron por 1.14. Cabe mencionar que este factor realmente se había considerado al construir los mapas de isoyetas que publicó la USWB (D.M. Hershfield, 1961).

En el capítulo 5 se describió primero el método de Bell y después el de Chen, ya que el criterio fue seguir el orden cronológico en que fueron publicados. En el presente capítulo se presenta primero el método de Chen y después el de Bell, ya que este orden permitió seleccionar las estaciones que en definitiva quedarían sujetas a análisis y comparación.

6.2. Curvas I-d-T por el método de Chen.

La construcción de las curvas I-d-T con el método de Chen se describe a continuación:

a) Se obtuvieron los valores de la precipitación para una hora de duración ($d = 1$ h) y período de retorno (T), es decir, P_1^T , a partir de las Isoyetas de I-d-T. Asimismo, se obtuvieron los valores de la precipitación para duración de 24 horas ($d = 24$ h) y período de retorno (T), es decir, P_{24}^T , a partir del análisis estadístico de las precipitaciones de 24 horas de duración. Se calculó el valor de R para el período de retorno T , es decir, R^T , efectuando el cociente P_1^T/P_{24}^T . Se calculó el valor de R mediante el promedio de los valores de R^T obtenidos previamente, es decir, $R = (R^{10}+R^{20}+R^{25}+R^{50}+R^{100})/5$. Con los valores de R se obtuvieron los parámetros a_1 , b_1 y c_1 mediante la gráfica de la Figura 5.17, misma que sólo es aplicable cuando se cumple que $0.1 \leq R \leq 0.6$. En la Tabla 6.8 se presenta el cálculo de los parámetros antes citados, para las estaciones Copala, El Palmito, Hopelchén, Mexicali y Tampico y en las Figuras 6.7 a 6.10, los resultados obtenidos para las 49 estaciones analizadas.

Tabla 6.8. Cálculo de los parámetros R, a₁, b₁ y c₁ del método de Chen para las estaciones Copala, El Palmito, Hopelchén, Mexicali y Tampico.

T	Parámetros	Estaciones				
		Copala	El Palmito	Hopelchén	Mexicali	Tampico
10	P ₁ ¹⁰	67	43	68	32	63
	P ₂₄ ¹⁰	265.36	70.79	166.00	49.47	219.59
	R ¹⁰ = P ₁ ¹⁰ /P ₂₄ ¹⁰	0.25	0.61	0.41	0.65	0.29
20	P ₁ ²⁰	73	50	77	34	68
	P ₂₄ ²⁰	313.20	80.35	195.87	62.66	254.85
	R ²⁰ = P ₁ ²⁰ /P ₂₄ ²⁰	0.23	0.62	0.39	0.54	0.27
25	P ₁ ²⁵	74	52	80	50	69
	P ₂₄ ²⁵	328.37	83.38	205.45	67.12	266.03
	R ²⁵ = P ₁ ²⁵ /P ₂₄ ²⁵	0.23	0.62	0.39	0.75	0.26
50	P ₁ ⁵⁰	79	59	89	54	74
	P ₂₄ ⁵⁰	375.11	92.73	235.18	81.74	300.48
	R ⁵⁰ = P ₁ ⁵⁰ /P ₂₄ ⁵⁰	0.21	0.64	0.38	0.66	0.25
100	P ₁ ¹⁰⁰	83	46	98	57	78
	P ₂₄ ¹⁰⁰	421.51	102.00	264.97	97.60	334.68
	R ¹⁰⁰ = P ₁ ¹⁰⁰ /P ₂₄ ¹⁰⁰	0.20	0.45	0.37	0.58	0.23

$R = (R^{10} + R^{20} + R^{25} + R^{50} + R^{100}) / 5$	0.224	0.588	0.388	0.636	0.260
a ₁	9.882	39.471	21.000	N/A	11.525
b ₁	1.722	11.500	7.020	N/A	2.889
c ₁	0.534	0.872	0.724	N/A	0.586

Valores de R del método de Chen

No.	ESTACIÓN	PARÁMETRO			
		R	a ₁	b ₁	c ₁
1	Altamirano, Chis.	0.466	28.000	9.111	0.796
2	Armería, Col.	0.288	13.760	4.000	0.624
3	Camacho, N.L. (Linares, N.L.)	0.491	30.047	9.861	0.812
4	Cd. Altamirano, Gro.	0.635	N/A	N/A	N/A
5	Chetumal (DGE), Q. Roo.	0.287	13.365	3.936	0.620
6	Chicxulub Puerto, Yuc.	0.339	16.588	5.333	0.671
7	Cointizo, Mich.	0.373	19.647	6.556	0.714
8	Copala, Gro.	0.224	9.882	1.722	0.534
9	Creel (CFE), Chih.	0.302	14.588	4.389	0.635
10	Culiacán, Sin.	0.423	24.294	8.028	0.762
11	Delicias (DGE), Chih.	0.638	N/A	N/A	N/A
12	El Achique, Zac.	0.721	N/A	N/A	N/A
13	El Palmito, Dgo.	0.588	39.471	11.500	0.872
14	El Tuito, Jal.	0.384	20.882	6.912	0.722
15	Guadajajara (DGE), Jal.	0.585	39.294	11.494	0.870
16	Hermosillo II (DGE), Son.	0.514	32.529	10.306	0.834
17	Hopelchén, Camp.	0.388	21.000	7.020	0.724
18	Imuris (SMN), Son.	0.544	34.882	10.722	0.848
19	Ixtepeç, Oax.	0.310	15.060	4.611	0.640
20	Jajma, Sin.	0.327	16.000	5.000	0.664
21	Jesus Maria, Nay.	1.030	N/A	N/A	N/A
22	La Estrella, Son.	0.488	29.824	9.517	0.810
23	La Paz (DGE), B.C.S.	0.406	22.950	7.580	0.744
24	León, Gto.	0.643	N/A	N/A	N/A
25	Martínez de la Torre, Ver.	0.313	15.176	4.667	0.650
26	Mexicali (DGE), B.C.	0.636	N/A	N/A	N/A
27	Miahuatlán (SMN), Oax.	0.258	11.525	2.889	0.586
28	Naranjal, Ver.	0.216	9.765	1.508	0.532
29	Nogal Oscuro, S.L.P.	0.491	30.047	9.861	0.812
30	Norogachi (CFE), Chih.	0.303	14.706	4.417	0.640
31	Peña del Águila, Dgo.	0.858	N/A	N/A	N/A
32	Potrerillos, Sin.	0.434	25.353	8.336	0.768
33	Presa A. Ruiz Cortines, Son.	0.478	28.941	9.417	0.801
34	Presa Coyote (Torreón, Coah.)	0.464	27.880	9.000	0.794
35	Presa La Angostura, Son.	0.201	9.059	1.167	0.510
36	Puebla (DGE), Pue.	0.771	N/A	N/A	N/A
37	Sabinas, Coah.	0.435	25.706	8.450	0.775
38	Saltillo (DGE), Coah.	0.526	33.470	10.500	0.835
39	San Fernando, Tamps.	0.388	21.000	7.020	0.724
40	San Isidro, Son.	0.512	32.176	10.278	0.824
41	Santa Catarina, N.L.	0.396	22.235	7.361	0.735
42	Santa Cruz, B.C.	0.398	22.588	7.444	0.738
43	Tampico, Tamps.	0.258	11.525	2.889	0.586
44	Tapachula (DGE), Chis.	0.502	31.350	10.000	0.824
45	Tepelememe, Oax.	0.390	21.882	7.222	0.734
46	Tula, Tamps.	0.416	23.765	7.861	0.751
47	Tuxtla Gutiérrez (CFE), Chis.	0.704	N/A	N/A	N/A
48	Villahermosa, Tab.	0.346	17.235	5.508	0.684
49	Zacualtipán, Hgo.	0.171	7.412	-0.207	0.450



Figura 6.7. Valores de R obtenidos para las 49 estaciones estudiadas.

Valores de a_1 del método de Chen

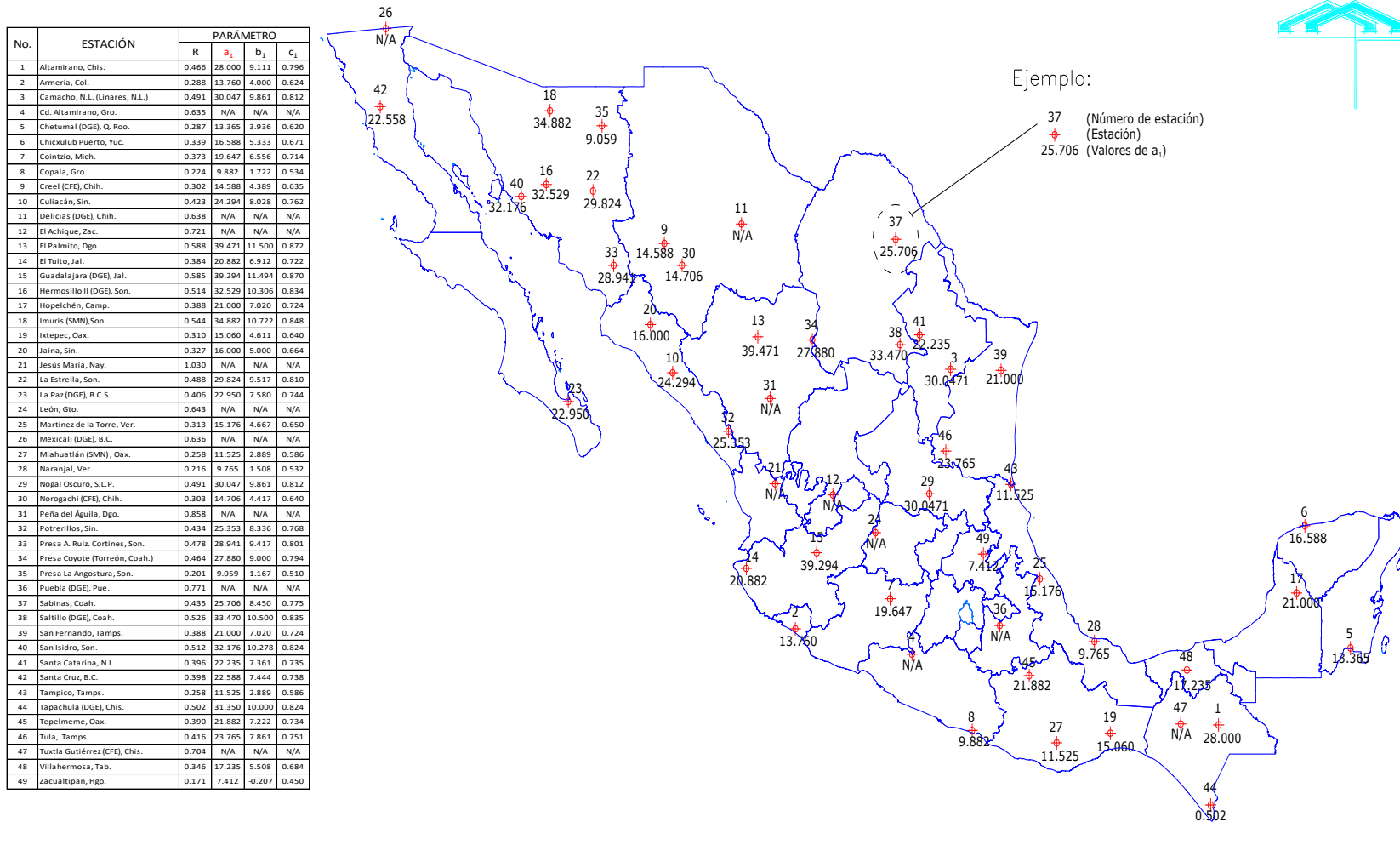


Figura 6.8. Valores de a_1 obtenidos para las 49 estaciones estudiadas.

Valores de b_1 del método de Chen

No.	ESTACIÓN	PARÁMETRO			
		R	a_1	b_1	c_1
1	Altamirano, Chis.	0.466	28.000	9.111	0.796
2	Armería, Col.	0.288	13.760	4.000	0.624
3	Camacho, N.L. (Linares, N.L.)	0.491	30.047	9.861	0.812
4	Cd. Altamirano, Gro.	0.635	N/A	N/A	N/A
5	Chetumal (DGE), Q. Roo.	0.287	13.365	3.936	0.620
6	Chiculub Puerto, Yuc.	0.339	16.588	5.333	0.671
7	Cointzio, Mich.	0.373	19.647	6.556	0.714
8	Copala, Gro.	0.224	9.882	1.722	0.534
9	Creeel (CFE), Chih.	0.302	14.588	4.389	0.635
10	Culiacán, Sín.	0.423	24.294	8.028	0.762
11	Delicias (DGE), Chih.	0.638	N/A	N/A	N/A
12	El Achique, Zac.	0.721	N/A	N/A	N/A
13	El Palmito, Dgo.	0.588	39.471	11.500	0.872
14	El Tuito, Jal.	0.384	20.882	6.912	0.722
15	Guadalajara (DGE), Jal.	0.585	39.294	11.494	0.870
16	Hermosillo II (DGE), Son.	0.514	32.529	10.306	0.834
17	Hopelchén, Camp.	0.388	21.000	7.020	0.724
18	Imuris (SMN), Son.	0.544	34.882	10.722	0.848
19	Ixtépec, Oax.	0.310	15.060	4.611	0.640
20	Jaina, Sín.	0.327	16.000	5.000	0.664
21	Jesús María, Nay.	1.030	N/A	N/A	N/A
22	La Estrella, Son.	0.488	29.824	9.517	0.810
23	La Paz (DGE), B.C.S.	0.406	22.950	7.580	0.744
24	León, Gto.	0.643	N/A	N/A	N/A
25	Martínez de la Torre, Ver.	0.313	15.176	4.667	0.650
26	Mexicali (DGE), B.C.	0.636	N/A	N/A	N/A
27	Miahuatlán (SMN), Oax.	0.258	11.525	2.889	0.586
28	Naranjal, Ver.	0.216	9.765	1.508	0.532
29	Nogal Oscuro, S.L.P.	0.491	30.047	9.861	0.812
30	Norogachi (CFE), Chih.	0.303	14.706	4.417	0.640
31	Peña del Águila, Dgo.	0.858	N/A	N/A	N/A
32	Potrerrillos, Sín.	0.434	25.353	8.336	0.768
33	Presa A. Ruiz, Cortines, Son.	0.478	28.941	9.417	0.801
34	Presa Coyote (Torreón, Coah.)	0.464	27.880	9.000	0.794
35	Presa La Angostura, Son.	0.201	9.059	1.167	0.510
36	Puebla (DGE), Pue.	0.771	N/A	N/A	N/A
37	Sabinas, Coah.	0.435	25.706	8.450	0.775
38	Saltillo (DGE), Coah.	0.526	33.470	10.500	0.835
39	San Fernando, Tamps.	0.388	21.000	7.020	0.724
40	San Isidro, Son.	0.512	32.176	10.278	0.824
41	Santa Catarina, N.L.	0.396	22.235	7.361	0.735
42	Santa Cruz, B.C.	0.398	22.588	7.444	0.738
43	Tampico, Tamps.	0.258	11.525	2.889	0.586
44	Tapachula (DGE), Chis.	0.502	31.350	10.000	0.824
45	Tepelmeme, Oax.	0.390	21.882	7.222	0.734
46	Tula, Tamps.	0.416	23.765	7.861	0.751
47	Tuxtla Gutiérrez (CFE), Chis.	0.704	N/A	N/A	N/A
48	Villahermosa, Tab.	0.346	17.235	5.508	0.684
49	Zacualtipan, Hgo.	0.171	7.412	-0.207	0.450



Figura 6.9. Valores de b_1 obtenidos para las 49 estaciones estudiadas.

Valores de c_1 del método de Chen

No.	ESTACIÓN	PARÁMETRO			
		R	a_1	b_1	c_1
1	Altamirano, Chis.	0.466	28.000	9.111	0.796
2	Armería, Col.	0.288	13.760	4.000	0.624
3	Camacho, N.L. (Linares, N.L.)	0.491	30.047	9.861	0.812
4	Cd. Altamirano, Gro.	0.635	N/A	N/A	N/A
5	Chetumal (DGE), Q. Roo.	0.287	13.365	3.936	0.620
6	Chiculub Puerto, Yuc.	0.339	16.588	5.333	0.671
7	Cointzio, Mich.	0.373	19.647	6.556	0.714
8	Copala, Gro.	0.224	9.882	1.722	0.534
9	Creel (CFE), Chih.	0.302	14.588	4.389	0.635
10	Cuicatán, Sin.	0.423	24.294	8.028	0.762
11	Delicias (DGE), Chih.	0.638	N/A	N/A	N/A
12	El Achique, Zac.	0.721	N/A	N/A	N/A
13	El Palmito, Dgo.	0.588	39.471	11.500	0.872
14	El Tuito, Jal.	0.384	20.882	6.912	0.722
15	Guadalupe (DGE), Jal.	0.585	39.294	11.494	0.870
16	Hermosillo II (DGE), Son.	0.514	32.529	10.306	0.834
17	Hopelchén, Camp.	0.388	21.000	7.020	0.724
18	Imuris (SMM), Son.	0.544	34.882	10.722	0.848
19	Ixtepéc, Oax.	0.310	15.060	4.611	0.640
20	Jaina, Sin.	0.327	16.000	5.000	0.664
21	Jesús María, Nay.	1.030	N/A	N/A	N/A
22	La Estrella, Son.	0.488	29.824	9.517	0.810
23	La Paz (DGE), B.C.S.	0.406	22.950	7.580	0.744
24	León, Gto.	0.643	N/A	N/A	N/A
25	Martínez de la Torre, Ver.	0.313	15.176	4.667	0.650
26	Mexicali (DGE), B.C.	0.636	N/A	N/A	N/A
27	Miahuatlán (SMN), Oax.	0.258	11.525	2.889	0.586
28	Naranjal, Ver.	0.216	9.765	1.508	0.532
29	Nogal Oscuro, S.L.P.	0.491	30.047	9.861	0.812
30	Norogachi (CFE), Chih.	0.303	14.706	4.417	0.640
31	Peña del Águila, Dgo.	0.858	N/A	N/A	N/A
32	Potrerrillos, Sin.	0.434	25.353	8.336	0.768
33	Presa A. Ruiz Cortines, Son.	0.478	28.941	9.417	0.801
34	Presa Coyote (Torreón, Coah.)	0.464	27.880	9.000	0.794
35	Presa La Angostura, Son.	0.201	9.059	1.167	0.510
36	Puebla (DGE), Pue.	0.771	N/A	N/A	N/A
37	Sabinas, Coah.	0.435	25.706	8.450	0.775
38	Saltillo (DGE), Coah.	0.526	33.470	10.500	0.835
39	San Fernando, Tamps.	0.388	21.000	7.020	0.724
40	San Isidro, Son.	0.512	32.176	10.278	0.824
41	Santa Catarina, N.L.	0.396	22.235	7.361	0.735
42	Santa Cruz, B.C.	0.398	22.588	7.444	0.738
43	Tampico, Tamps.	0.258	11.525	2.889	0.586
44	Tapachula (DGE), Chis.	0.502	31.350	10.000	0.824
45	Tepelememe, Oax.	0.390	21.882	7.222	0.734
46	Tula, Tamps.	0.416	23.765	7.861	0.751
47	Tuxtla Gutiérrez (CFE), Chis.	0.704	N/A	N/A	N/A
48	Villahermosa, Tab.	0.346	17.235	5.508	0.684
49	Zacualtipan, Hgo.	0.171	7.412	-0.207	0.450



Figura 6.10. Valores de C_1 obtenidos para las 49 estaciones estudiadas.

En la Figura 6.7 se observa que de las 49 estaciones, en 9 no se cumplió la restricción de que $0.1 \leq R \leq 0.6$ y por lo tanto, en esos casos no es posible aplicar el método de Chen. Esto significa que tuvo que eliminarse el 18.4% de las estaciones sólo porque el archivo histórico de mediciones de precipitación no se ajustó al parámetro R.

Daniel F. Campos (2008 y 2011) presentó dos grupos de ecuaciones para calcular los valores de a_1 , b_1 y c_1 en función de R y evitar el uso de la Figura 5.17. El primer grupo lo publicó en 2008 y es aplicable cuando $0.1 \leq R \leq 0.6$ y el segundo en 2011 y sustituye al primero para $0.2 \leq R \leq 0.7$:

D.F.Campos (2008):

$$\begin{aligned} a_1 &= -2.297536 + 100.0389R - 432.5438R^2 + 1256.228R^3 - 1028.902R^4 \\ b_1 &= -9.845761 + 96.94864R - 341.4349R^2 + 757.9172R^3 - 598.7461R^4 \\ c_1 &= -0.06498345 + 5.069294R - 16.08111R^2 + 29.09596R^3 - 20.06288 R^4 \end{aligned} \quad (6.1)$$

D.F.Campos (2011):

$$\begin{aligned} a_1 &= -2.297536 + 100.0389R - 432.5438R^2 + 1256.228R^3 - 1028.902R^4 \\ b_1 &= -9.845761 + 96.94864R - 341.4349R^2 + 757.9172R^3 - 598.7461R^4 \\ c_1 &= -0.06498345 + 5.069294R - 16.08111R^2 + 29.09596R^3 - 20.06288 R^4 \end{aligned} \quad (6.2)$$

Cabe destacar que Chen en sus estudios consideró que $0.1 \leq R \leq 0.6$ y, por lo tanto, el rango que planteó Campos para su segundo grupo de ecuaciones carece de sustento para $R > 0.6$.

Se aplicaron los dos grupos de ecuaciones a las estaciones en estudio en el presente trabajo y sus resultados se compararon con los que se obtienen con la Figura 5.17. Se observó que para el parámetro a_1 el error máximo fue de 12.1%, para b_1 de 308% y para c_1 de 2.2%, y corresponden a la estación Zacualtipán, Hgo., en la cual $R = 0.171$.

b) De las 49 estaciones consideradas en el análisis, 16 quedaron eliminadas, debido a las inconsistencias señaladas en la Tabla 6.7 y a que no en todas las estaciones se cumplió que $0.1 \leq R \leq 0.6$, quedando en definitiva 33 estaciones para el análisis comparativo de los tres métodos (Isoyetas SCT 2000, Chen y Bell). En la Tabla 6.9 se presenta la lista de las estaciones eliminadas y las causas de su eliminación.

Tabla 6.9. Estaciones eliminadas del análisis comparativo y causas de su eliminación.

Estación	Numeral	Causas de su eliminación
Cd. Altamirano	3	<p>1. En las curvas I-d-T de SCT 2000 no siempre se cumple que I sea inversamente proporcional a d.</p> <p>2. En las curvas I-d-T de SCT 2000 no siempre se cumple que para un valor constante de d los valores de I sean directamente proporcionales a T.</p> <p>3. No se cumple que $0.1 \leq R \leq 0.6$</p>
Creel	1	
Delicias	3	
El Achique	3	
El Palmito	2	
El Tuito	2	
Guadalajara	2	
Jaina	2	
Jesús María	3	
León	3	
Mexicali	1,3	
Norogachi	1	
Peña del Águila	3	
Puebla	3	
San Isidro	1,2	
Tuxtla Gutiérrez	3	

c) Se aplicaron las ecuaciones de Chen presentadas en la sección 5.3. En la Tabla 6.10 se muestran los parámetros de la ecuación de Chen para los cálculos de las estaciones Copala, Hopelchén y Tampico.

Tabla 6.10. Resumen de cálculos con el método de Chen.

Ecuaciones de Chen (ecuaciones 5.34 y 5.35):	
Alturas de lluvia:	$P_d^T = (a_1 P_1^{10} \log(10^{2-F} T^{F-1}) d) / (60(d+b_1)^{c_1})$, en mm
Intensidades de lluvia:	$I_d^T = 60 P_d^T / d$, en mm/h

Parámetros	Estaciones		
	Copala	Hopelchén	Tampico
a_1	9.882	21.000	11.525
b_1	1.722	7.020	2.889
c_1	0.534	0.724	0.586
P_{24}^{100}	421.51	264.97	334.68
P_{24}^{10}	265.36	166.00	219.59
$F = P_{24}^{100} / P_{24}^{10}$	1.59	1.60	1.52

Con esto quedan expresadas las ecuaciones de Chen en función de la duración de la lluvia, d , y el período de retorno, T . En las Tablas 6.11 a 6.13 se presentan los resultados de la aplicación del método de Chen en las estaciones Copala, Hopelchén y Tampico.

Tabla 6.11. Intensidades de lluvia en mm/h, calculadas con el método de Chen, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Copala.

T (años)	duración (min)						
	5	10	20	30	60	120	240
10	239.35	177.86	127.94	104.52	73.25	50.97	35.34
20	281.75	209.36	150.61	123.03	86.23	60.00	41.60
25	295.40	219.51	157.90	128.99	90.41	62.91	43.61
50	337.80	251.01	180.57	147.51	103.38	71.94	49.87
100	380.19	282.52	203.23	166.02	116.36	80.97	56.13

Tabla 6.12. Intensidades de lluvia en mm/h, calculadas con el método de Chen, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Hopelchén.

T (años)	duración (min)						
	5	10	20	30	60	120	240
10	235.98	183.45	131.28	104.52	68.01	42.81	26.45
20	278.34	216.37	154.84	123.27	80.21	50.49	31.19
25	291.97	226.97	162.42	129.31	84.14	52.96	32.72
50	334.32	259.90	185.99	148.07	96.35	60.65	37.47
100	376.68	292.82	209.55	166.83	108.55	68.33	42.22

Tabla 6.13. Intensidades de lluvia en mm/h, calculadas con el método de Chen, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Tampico.

T (años)	duración (min)						
	5	10	20	30	60	120	240
10	216.43	162.33	115.94	93.75	64.12	43.30	29.05
20	250.58	187.94	134.23	108.54	74.24	50.14	33.63
25	261.57	196.18	140.12	113.31	77.50	52.33	35.11
50	295.72	221.79	158.41	128.10	87.61	59.17	39.69
100	329.86	247.40	176.70	142.89	97.73	66.00	44.27

Con los resultados mostrados en las Tablas 6.11 a 6.13 se dibujaron las curvas I-d-T, según el método de Chen (Figuras 6.11 a 6.13).

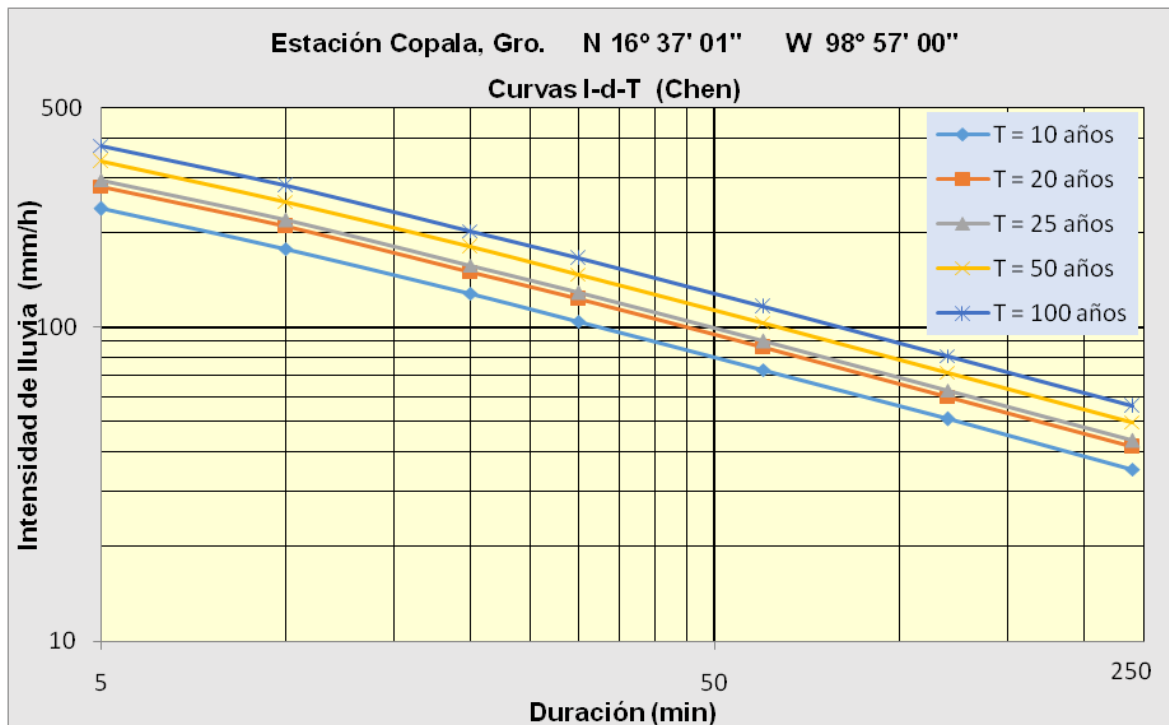


Figura 6.11. Curvas I-d-T, Estación Copala, Gro., obtenidas con el método de Chen.

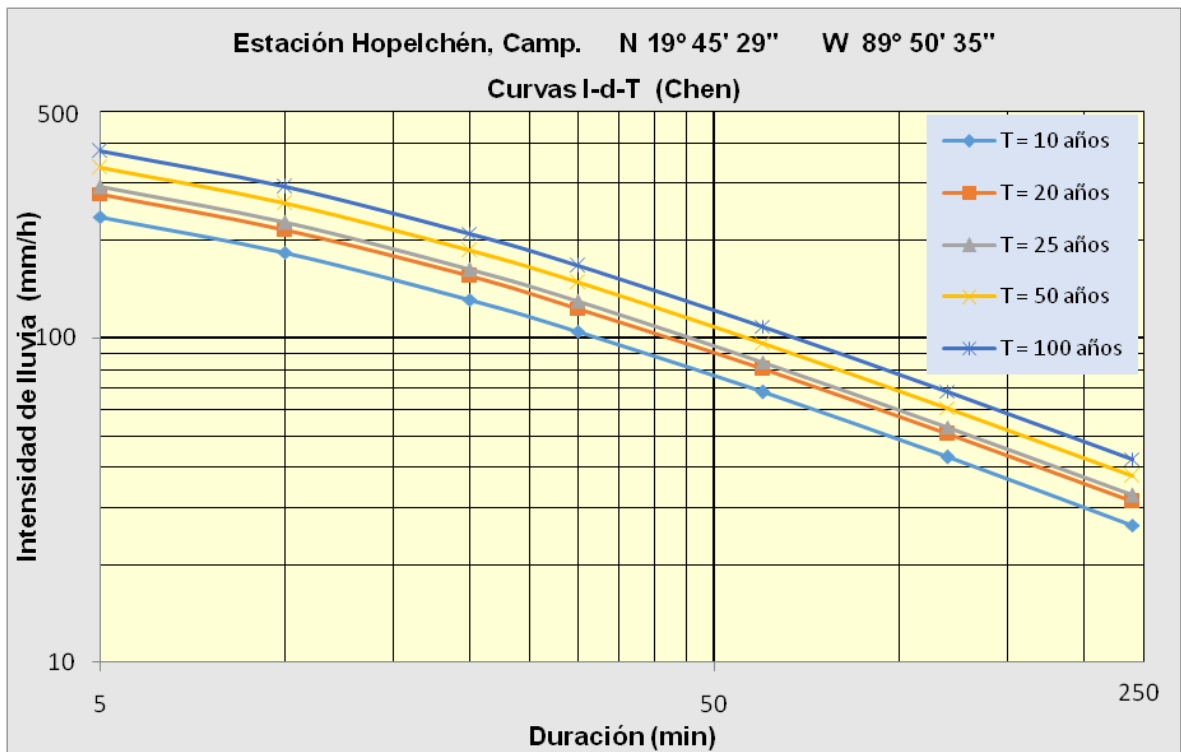


Figura 6.12. Curvas I-d-T, Estación Hopelchén, Camp., obtenidas con el método de Chen.

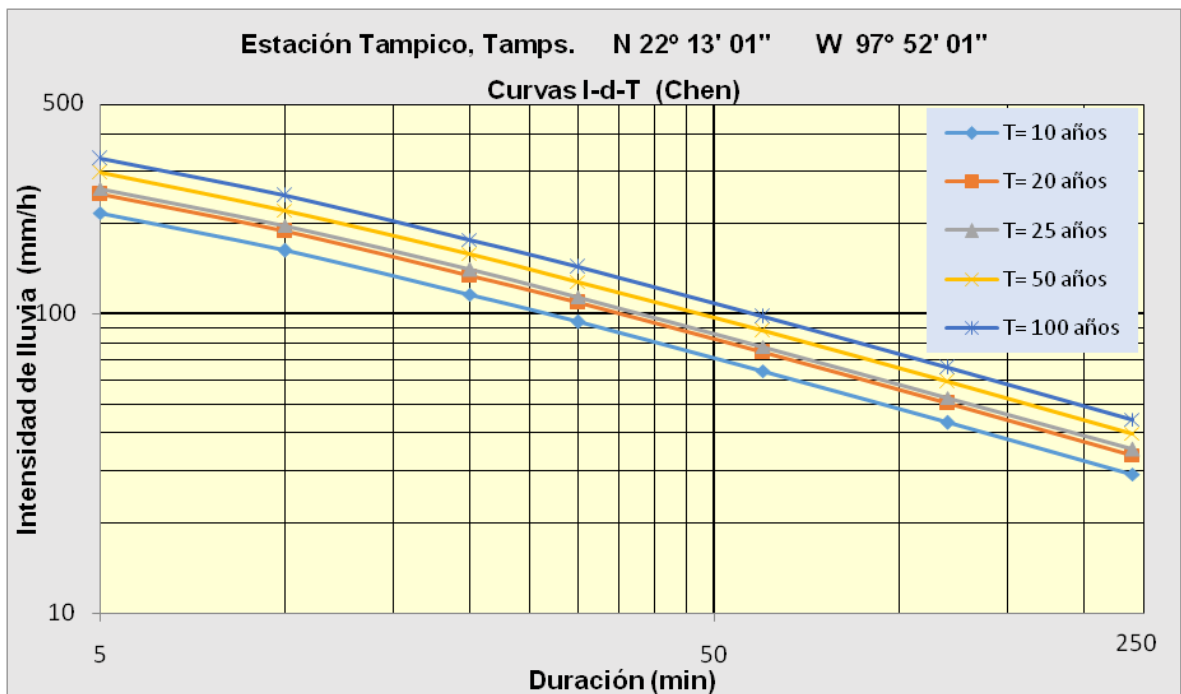


Figura 6.13. Curvas I-d-T, Estación Tampico, Tamps., obtenidas con el método de Chen.

6.3. Curvas I-d-T por el método de Bell.

La construcción de las curvas I-d-T con el método de Bell se describe a continuación:

- a) De acuerdo con la explicación del método de Bell en la sección 5.2, las principales restricciones del método son que $2 \leq T \leq 100$ años y $5 \leq d \leq 120$ min. La información disponible para las 33 estaciones en estudio cubre ambos rangos de aplicación del método.

Las Isoyetas SCT 2000 consideran intensidades de lluvia para duraciones de 5, 10, 20, 30, 60, 120 y 240 min. Las intensidades para duraciones de 240 min, por quedar fuera del rango de aplicación del método, no fueron consideradas.

- b) Se obtuvieron los valores de la precipitación para una hora de duración y período de retorno de 10 años (P_1^{10}), a partir de las Isoyetas SCT 2000. Como ejemplo, en la Tabla 6.14 se presentan los valores de P_1^{10} para las estaciones Copala, Hopelchén y Tampico.

Tabla 6.14. Valores del parámetro P_1^{10} en mm, para las estaciones Copala, Hopelchén y Tampico.

Parámetro	Estaciones		
	Copala	Hopelchén	Tampico
P_1^{10}	67	68	63

- c) Se aplicaron las ecuaciones de Bell presentadas en la sección 5.2, las cuales se presentan en la Tabla 6.15.

Tabla 6.15. Método de Bell.

Ecuaciones de Bell (ecuaciones 5.17 y 5.18):	
Alturas de lluvia:	$P_d^T = (0.21 \ln T + 0.52) (0.54 d^{0.25} - 0.50) P_1^{10}$, en mm
Intensidades de lluvia:	$I_d^T = 60 P_d^T/d$, en mm/h

Con los parámetros de la Tabla 6.14 las ecuaciones de Bell quedan expresadas en función de la duración de la lluvia, d, y el período de retorno, T. En las Tablas 6.16 a

6.18 se presentan los resultados obtenidos con la aplicación del método de Bell para las estaciones Copala, Hopelchén y Tampico.

Tabla 6.16. Intensidades de lluvia en mm/h, calculadas con el método de Bell para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Copala.

T (años)	duración (min)					
	5	10	20	30	60	120
10	248.10	185.68	129.49	102.71	67.43	43.28
20	284.08	212.62	148.27	117.61	77.21	49.55
25	295.67	221.29	154.32	122.40	80.36	51.57
50	331.65	248.22	173.10	137.30	90.14	57.85
100	367.64	275.15	191.88	152.20	99.92	64.13

Tabla 6.17. Intensidades de lluvia en mm/h, calculadas con el método de Bell, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Hopelchén.

T (años)	duración (min)					
	5	10	20	30	60	120
10	251.80	188.46	131.42	104.24	68.44	43.92
20	288.32	215.79	150.49	119.36	78.37	50.29
25	300.08	224.59	156.62	124.23	81.56	52.34
50	336.60	251.93	175.69	139.35	91.49	58.71
100	373.13	279.26	194.75	154.47	101.42	65.09

Tabla 6.18. Intensidades de lluvia en mm/h, calculadas con el método de Bell, para distintas duraciones y períodos de retorno, para la estación Tampico.

T (años)	duración (min)					
	5	10	20	30	60	120
10	233.28	174.60	121.76	96.58	63.41	40.69
20	267.12	199.92	139.42	110.59	72.60	46.59
25	278.02	208.08	145.11	115.10	75.56	48.49
50	311.85	233.40	162.77	129.10	84.76	54.40
100	345.69	258.73	180.43	143.11	93.96	60.30

Con los datos de estas tablas, se dibujaron las curvas I-d-T (Figuras 6.14 a 6.16).

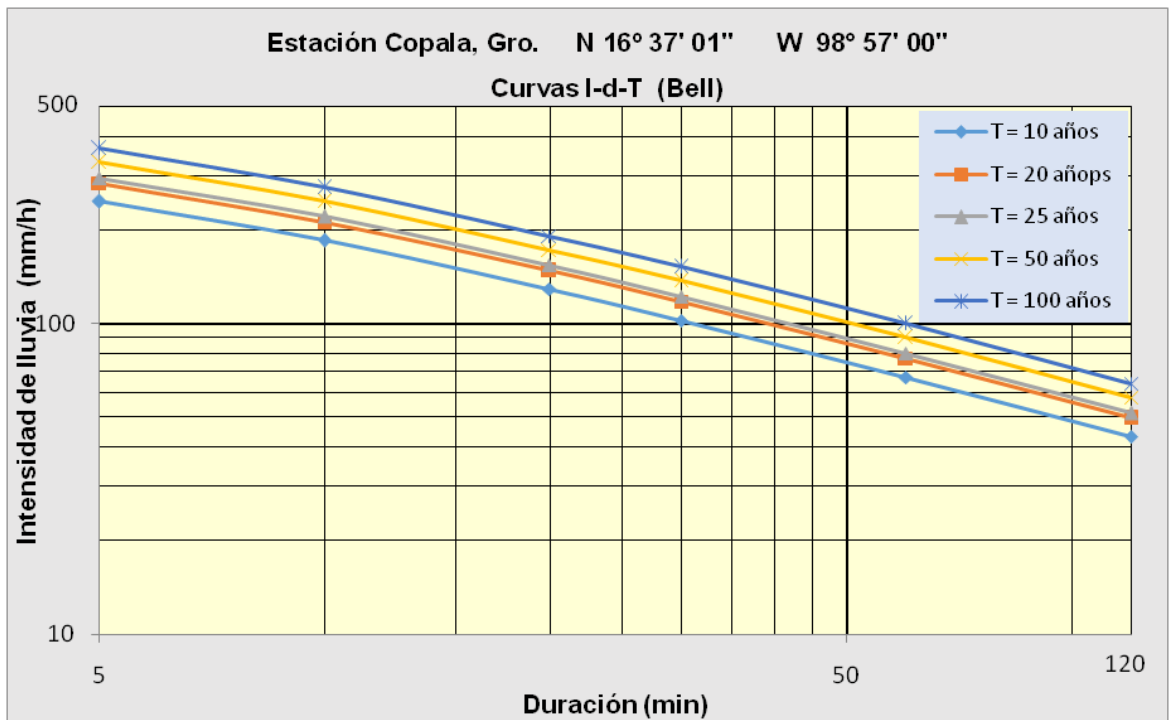


Figura 6.14. Curvas I-d-T, Estación Copala, Gro., obtenidas con el método de Bell.

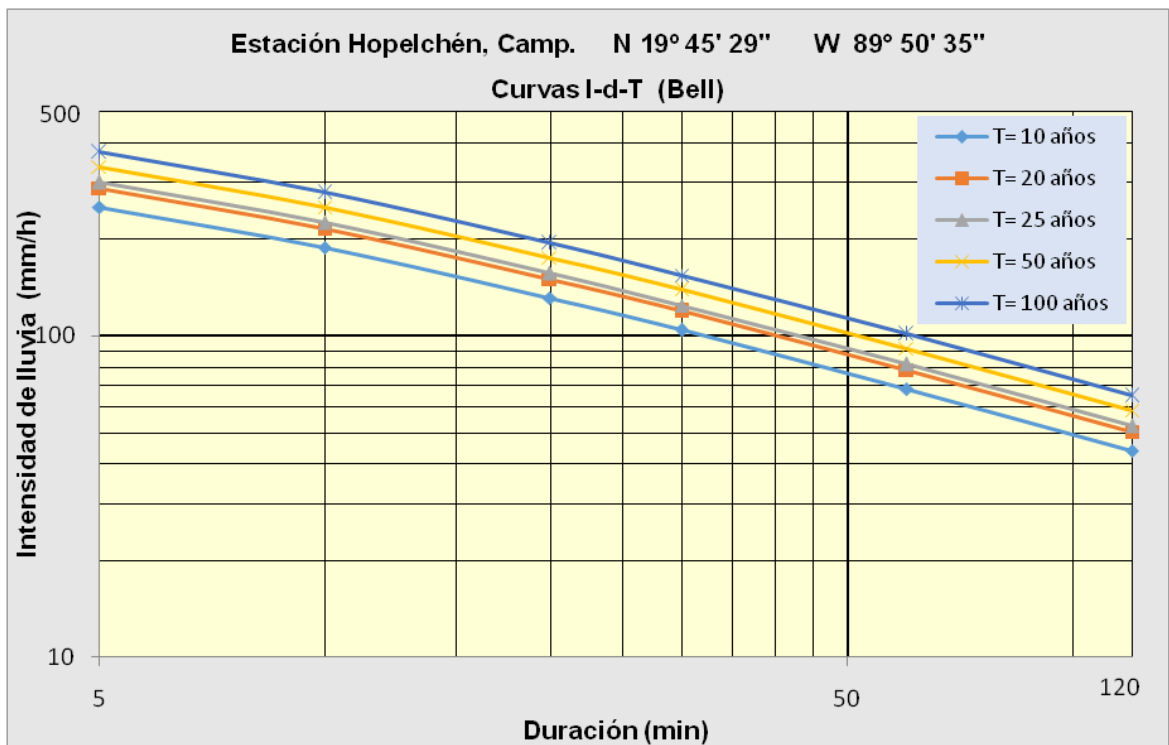


Figura 6.15. Curvas I-d-T, Estación Hopelchén, Camp., obtenidas con el método de Bell.

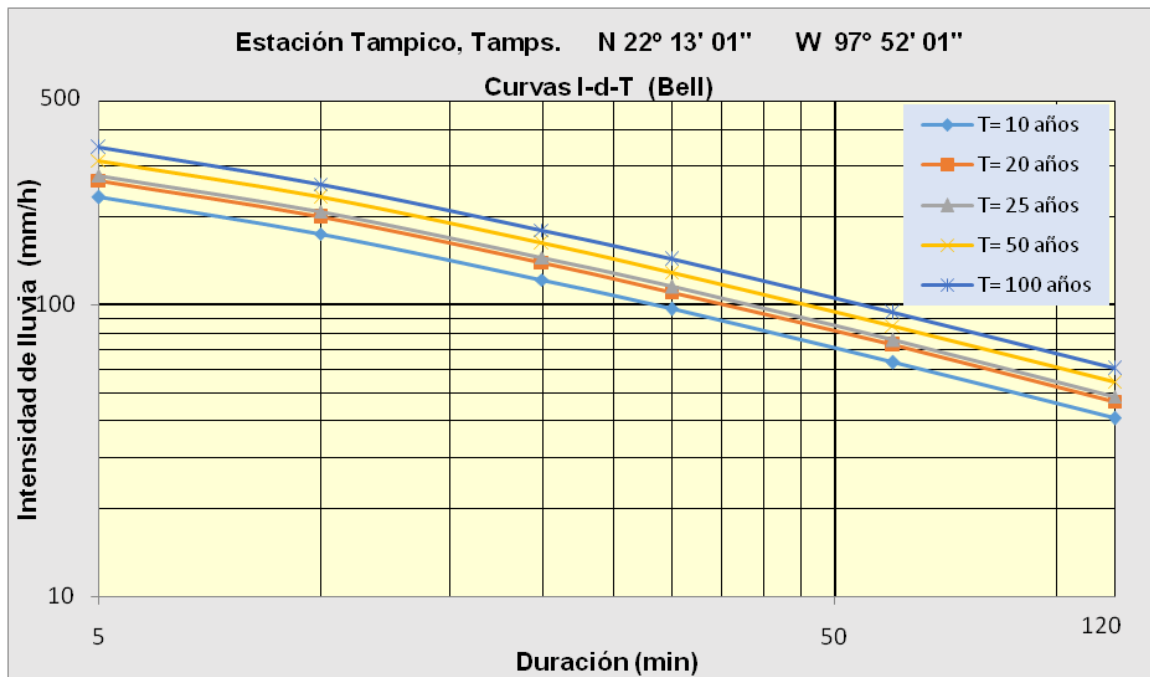


Figura 6.16. Curvas I-d-T, Estación Tampico, Tamps., obtenidas con el método de Bell.

Hasta aquí la construcción de curvas i-d-T con las Isoyetas SCT 2000, y con los métodos de Chen y de Bell.

6.4. Análisis comparativo de los métodos.

Como se expresó a través de la Tabla 6.9, de las 49 estaciones pluviográficas consideradas inicialmente en el análisis tuvieron que eliminarse 16, quedando finalmente 33 estaciones, que son las que se emplearán para el análisis comparativo de los métodos.

En el Apéndice A de este trabajo, en la Tabla A.1, se presentan los valores de las intensidades de lluvia obtenidas con las Isoyetas SCT 2000 y calculadas con los métodos de Chen y de Bell para las 33 estaciones pluviográficas.

De una revisión de los valores de I calculados con los métodos de Chen y de Bell, se observa que en muchos casos discrepan enormemente de los valores medidos (Isoyetas I-d-T de SCT 2000). También se observa que no existen tendencias en

cuanto a los resultados según sea la elevación sobre el nivel del mar, el clima, la orografía, etc.

Considerando como base los valores medidos, que son los obtenidos con las Isoyetas SCT 2000, se calcularon las diferencias (e) que presentan con los valores calculados con los métodos de Chen y de Bell. Así, siguiendo la nomenclatura de la Tabla A.1:

$$e = 100 (ISCT - Chen) / ISCT \quad (6.3)$$

$$e = 100 (ISCT - Bell) / ISCT \quad (6.4)$$

Una tolerancia razonable entre valores medidos y calculados de I es $e = \pm 15\%$, tomando en consideración que a partir de un análisis realizado aplicando los métodos hidrológicos Racional, Chow e Hidrograma Unitario, presentados en el capítulo 1, se observó que cuando se incrementa o se reduce el valor de la intensidad de lluvia en 15% y se mantienen sin cambio el resto de los parámetros que intervienen en las ecuaciones, los gastos que se obtienen se incrementan o se reducen, cuando más, en un 30%.

En el Apéndice A de este trabajo, en la Tabla A.2, se presentan los casos en que comparando las Isoyetas SCT 2000 con el método de Chen se obtiene $e < -15\%$ (celdas color azul), aquellos en que $e > 15\%$ (celdas color amarillo) y los casos en que $-15\% \leq e \leq 15\%$ (celdas color blanco). En la Tabla A.3 se presenta algo similar comparando ISCT 2000 con el método de Bell. Estas tablas permiten visualizar cómo resultaron las intensidades de lluvia calculadas con los métodos indirectos de Chen y de Bell respecto a la realidad, que son las mediciones con pluviógrafo procesadas estadísticamente y expresadas mediante Isoyetas de I-d-T.

De un análisis de la Tabla A.2 se desprende que en el 36.4% de los cálculos con el método de Chen se tuvieron errores $e < -15\%$, en el 7.7% errores $e > 15\%$ y en el 55.9% errores $-15\% \leq e \leq 15\%$. Aunque resultó que casi en el 56% de los casos los errores fueron de -15% a 15%, hubo cálculos de $e > 15\%$ con errores grandes, de hasta 163%.

Al examinar la Tabla A.3 se observa que en el 32.0% de los cálculos con el método de Bell se tuvieron errores $e < -15\%$, en el 8.4% errores $e > 15\%$ y en el 59.6% errores

$-15\% \leq e \leq 15\%$. Aunque resultó que casi en el 60% de los casos los errores fueron de -15% a 15%, hubo cálculos de $e > 15\%$ con errores grandes, de hasta 105%.

Las Figuras 6.17 y 6.18 constituyen otra presentación de la información de las Tablas A.2 y A.3, agregando la localización geográfica de cada una de las estaciones estudiadas.

Laura A. Ibañez, *et al* (2011) construyeron curvas I-d-T a partir de tormentas máximas anuales de pluviógrafo y de pluviómetro registradas entre 1975 y 2005 en la estación meteorológica Chapingo, Méx. El análisis con datos de pluviógrafo lo efectuaron empleando regresión lineal múltiple y el análisis con datos de pluviómetro, empleando el método de Chen. Obtuvieron que los errores de estimar curvas I-d-T con pluviómetro en vez de pluviógrafo se incrementan a medida que se incrementa el período de retorno y que, en general, la ecuación obtenida a partir de pluviómetro subestima la real del pluviógrafo. Plantean como ejemplo el diseño de una obra de drenaje de carreteras para un período de retorno de 50 años, en la cual el tiempo de concentración de la cuenca sea de 15 minutos; de acuerdo con sus resultados, emplear la ecuación del pluviógrafo implica usar para diseño una intensidad de 202 mm/h, mientras que emplear la ecuación del pluviómetro implica usar 116 mm/h. Ibañez *et al* destacan que las relaciones empíricas del método de Chen fueron desarrolladas para condiciones de EUA, por lo que no son confiables para México.

Valores de intensidad de lluvia obtenidos con el método de Chen comparados con los valores de las Isoyetas I-d-T de SCT2000

No.	ESTACIÓN	% de valores de I		
		Excedidos	En rango	Escasos
1	Altamirano, Chis.	28.6	57.1	14.3
2	Armeria, Col.	71.4	28.6	0.0
3	Camacho, N.L. (Linares, N.L.)	40.0	60.0	0.0
4	Cd. Altamirano, Gro.	0.0	0.0	0.0
5	Chetumal (DGE), Q. Roo.	28.6	71.4	0.0
6	Chiculub Puerto, Yuc.	74.3	25.7	0.0
7	Coimbatl, Mich.	60.0	40.0	0.0
8	Copala, Gro.	94.3	5.7	0.0
9	Creel (CFE), Chih.	0.0	0.0	0.0
10	Culliacán, Sin.	45.7	54.3	0.0
11	Delicias (DGE), Chih.	0.0	0.0	0.0
12	El Achique, Zac.	0.0	0.0	0.0
13	El Palmito, Dgo.	0.0	0.0	0.0
14	El Tuito, Jal.	0.0	0.0	0.0
15	Guadalajara (DGE), Jal.	0.0	0.0	0.0
16	Hermosillo II (DGE), Son.	28.6	71.4	0.0
17	Hopelchén, Camp.	8.6	77.1	14.3
18	Imuris (SMN), Son.	0.0	82.9	17.1
19	Istepec, Oax.	34.3	65.7	0.0
20	Jaina, Sin.	0.0	0.0	0.0
21	Jesús María, Nay.	0.0	0.0	0.0
22	La Estrella, Son.	14.3	85.7	0.0
23	La Paz (DGE), B.C.S.	17.1	82.9	0.0
24	León, Gto.	0.0	0.0	0.0
25	Martínez de la Torre, Ver.	5.7	91.4	2.9
26	Mexicali (DGE), B.C.	0.0	0.0	0.0
27	Miahuatlán (SMN), Oax.	28.6	17.1	54.3
28	Naranjal, Ver.	57.1	42.9	0.0
29	Nogal Oscuro, S.L.P.	28.6	71.4	0.0
30	Norogachi (CFE), Chih.	0.0	0.0	0.0
31	Peña del Águila, Dgo.	0.0	0.0	0.0
32	Potrerrillos, Sin.	51.4	42.9	5.7
33	Presa A. Ruiz Cortines, Son.	65.7	34.3	0.0
34	Presa Coyote (Torreón, Coah.)	0.0	71.4	28.6
35	Presa La Angostura, Son.	28.6	11.4	60.0
36	Puebla (DGE), Pue.	0.0	0.0	0.0
37	Sabinas, Coah.	2.9	97.1	0.0
38	Saltillo (DGE), Coah.	28.6	71.4	0.0
39	San Fernando, Tamps.	42.9	57.1	0.0
40	San Isidro, Son.	0.0	0.0	0.0
41	Santa Catarina, N.L.	37.1	62.9	0.0
42	Santa Cruz, B.C.	28.6	40.0	31.4
43	Tampico, Tamps.	60.0	40.0	0.0
44	Tapachula (DGE), Chis.	42.9	57.1	0.0
45	Tepelmeme, Oax.	40.0	45.7	14.3
46	Tula, Tamps.	0.0	91.4	8.6
47	Tuxtla Gutiérrez (CFE), Chis.	0.0	0.0	0.0
48	Villahermosa, Tab.	40.0	60.0	0.0
49	Zacualtipan, Hgo.	65.7	31.4	2.9



Figura 6.17. Comparación de los resultados del método de Chen con la realidad (mediciones).

Valores de intensidad de lluvia obtenidos con el método de Bell comparados con los valores de las Isoyetas I-d-T de SCT2000

No.	ESTACIÓN	% de valores de I		
		Excedidos	En rango	Escasos
1	Altamirano, Chis.	56.7	43.3	0.0
2	Armeria, Col.	53.3	46.7	0.0
3	Camacho, N.L. (Linares, N.L.)	36.7	63.3	0.0
4	Cd. Altamirano, Gro.	76.7	23.3	0.0
5	Chetumal (DGE), Q. Roo.	6.7	93.3	0.0
6	Chicxulub Puerto, Yuc.	33.3	66.7	0.0
7	Coimbatón, Mich.	34.5	65.5	0.0
8	Copala, Gro.	70.0	30.0	0.0
9	Creel (CFE), Chih.	0.0	0.0	0.0
10	Cullacán, Sin.	56.7	43.3	0.0
11	Delicias (DGE), Chih.	33.3	66.7	0.0
12	El Achique, Zac.	3.3	70.0	26.7
13	El Palmito, Dgo.	0.0	0.0	0.0
14	El Tuito, Jal.	0.0	0.0	0.0
15	Guadalajara (DGE), Jal.	0.0	0.0	0.0
16	Hermosillo II (DGE), Son.	36.7	63.3	0.0
17	Hopelchén, Camp.	0.0	83.3	16.7
18	Imuris (SMN), Son.	13.3	76.7	10.0
19	Ixtepet, Oax.	33.3	66.7	0.0
20	Jaina, Sin.	0.0	0.0	0.0
21	Jesús María, Nay.	13.8	86.2	0.0
22	La Estrella, Son.	16.7	83.3	0.0
23	La Paz (DGE), B.C.S.	0.0	86.7	13.3
24	León, Gto.	16.7	83.3	0.0
25	Martínez de la Torre, Ver.	20.0	70.0	10.0
26	Mexicali (DGE), B.C.	0.0	0.0	0.0
27	Miahuatlán (SMN), Oax.	6.7	33.3	60.0
28	Naranjal, Ver.	46.7	46.7	6.6
29	Nogal Oscuro, S.L.P.	33.3	66.7	0.0
30	Norogachi (CFE), Chih.	0.0	0.0	0.0
31	Peña del Águila, Dgo.	0.0	36.7	63.3
32	Potrerrillos, Sin.	60.0	40.0	0.0
33	Presa A. Ruiz Cortines, Son.	66.7	33.3	0.0
34	Presa Coyote (Torreón, Coah.)	13.3	50.0	36.7
35	Presa La Angostura, Son.	10.0	16.7	73.3
36	Puebla (DGE), Pue.	0.0	83.3	16.7
37	Sabinas, Coah.	0.0	100.0	0.0
38	Saltillo (DGE), Coah.	13.3	50.0	36.7
39	San Fernando, Tamps.	33.3	66.7	0.0
40	San Isidro, Son.	0.0	0.0	0.0
41	Santa Catarina, N.L.	43.3	56.7	0.0
42	Santa Cruz, B.C.	33.3	53.3	13.3
43	Tampico, Tamps.	66.7	33.3	0.0
44	Tapachula (DGE), Chis.	63.3	36.7	0.0
45	Tepehmete, Oax.	0.0	100.0	0.0
46	Tula, Tamps.	0.0	100.0	0.0
47	Tuxtla Gutiérrez (CFE), Chis.	62.1	37.9	0.0
48	Villahermosa, Tab.	50.0	50.0	0.0
49	Zacualtipán, Hgo.	0.0	100.0	0.0



Figura 6.18. Comparación de los resultados del método de Bell con la realidad (mediciones).

Conclusiones.

La precipitación pluvial es una variable muy importante en el diseño de obras de drenaje de vías terrestres (puentes, alcantarillas, cunetas y contracunetas).

Es de vital importancia contar permanentemente con mediciones fidedignas de la lámina de lluvia en el tiempo, mediante pluviógrafos. La carencia en cuantía y calidad de esta información ocasiona que con frecuencia las obras que se proyecten resulten antieconómicas, ya sea por escasos o por exceso de área hidráulica.

En México, los pluviógrafos más usados han sido los de flotador, que registran la evolución del nivel del agua en su cilindro receptor durante la precipitación. Por su costo y mantenimiento se ha tendido a sustituirlos por pluviógrafos de cubeta basculante, mismos que no miden niveles de agua en el tiempo, sino que asocian el número de balanceos de las cubetas a una intensidad de lluvia, lo cual simplemente es una obtención indirecta de la intensidad y no una medición. Otra tendencia ha sido sustituirlos por los pluviómetros de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), que miden la lámina de precipitación acumulada cada 10 minutos. Estas mediciones son de carácter puntual, no representan la evolución de la lámina de lluvia en todo tiempo y no siempre registran los valores correspondientes a las máximas intensidades de lluvia, porque pueden ocurrir en los lapsos de 10 minutos en que no se efectúa medición alguna. Por lo tanto, no es conveniente emplear pluviógrafos de cubeta basculante ni pluviómetros de EMAS para determinar alturas de precipitación con respecto al tiempo y con ellas elaborar curvas I-d-T.

Es necesario modernizar las estaciones actuales y que las de reciente creación cuenten con tecnología de punta para asegurar la continuidad y calidad en las mediciones. Para ello, se propone que se diseñe un pluviógrafo formado por un cilindro que tenga un sensor en su pared interior, que registre los niveles de agua, y que a través de un sistema inteligente basado en circuitos electrónicos realice el procesamiento de los datos y almacene los resultados para su posterior extracción, ya sea en el sitio o por medios telemétricos. El aparato registraría permanentemente los niveles de agua medidos y la hora en que ocurren. Se pretende que al alcanzar el nivel del agua en el cilindro un valor de $h_p = 10$ cm, se abra automáticamente la base inferior

del cilindro para vaciarlo, y se repita el proceso. Este sistema de vaciado sería mucho más eficiente que el de sifón autocebante de los pluviógrafos de flotador y permitiría que prácticamente no haya interrupción en las mediciones de altura de lluvia contra tiempo. La energía eléctrica necesaria para operarlos podría obtenerse parcialmente de la luz solar a que estén expuestos durante el día. Con las mediciones recibidas en una central remota, se elaborarían los pluviogramas y las curvas masa de las tormentas en archivos electrónicos. Así, los registros de h_p contra t recibidos se podrían procesar estadísticamente en tiempo real y obtener curvas I-d-T y mapas de isoyetas de I-d-T que estarían permanentemente actualizados. Los datos procesados a través del tiempo estarían siempre seguros y disponibles para determinar los valores de I asociados a distintas duraciones y períodos de retorno, simplemente dando como dato las coordenadas geográficas del sitio de interés. El procesamiento de la información en tiempo real es perfectamente factible, de acuerdo con las ideas expresadas en este trabajo, donde se explicó con detalle y de manera sencilla el procedimiento que se utiliza en la SCT para elaborar curvas I-d-T y mapas de isoyetas de I-d-T.

Desafortunadamente el *Proyecto de instrumentación pluviográfica de la República Mexicana* realizado en 1980 no se llevó a cabo en campo y desde entonces a la fecha la red de pluviógrafos nacional se ha ido modificando, debido a la cancelación definitiva de algunas estaciones y a la instalación de nuevas en otros sitios. Así, en 1980 existían 477 pluviógrafos con más de ocho años de registros y en 2016, sólo 389. Por lo tanto, se recomienda que la CONAGUA, que es la Dependencia del gobierno encargada de instalar y administrar estaciones pluviográficas, desarrolle un programa para ampliar la red de estaciones y se tenga una adecuada densidad y distribución en la república, considerando para ello las ideas expuestas en el Proyecto de instrumentación pluviográfica presentado en este trabajo. Se recomienda también que sea la CONAGUA y no la SCT, la que se encargue de construir los mapas de Isoyetas de I-d-T, por ser de su competencia. Se propone que estos trabajos formen parte del Proyecto de Modernización del Servicio Meteorológico Nacional (MOMET), que desarrollan conjuntamente la CONAGUA y la OMM.

La gráfica I_d contra I, llevando como parámetros internos d y T , elaborada por Hathaway carece de sustento, ya que los datos que sirvieron para construirla

presentan gran dispersión y, por lo tanto, la propia gráfica indica que no existe tal relación entre I_d e I .

La ecuación propuesta por la USWB, que expresa que P_d^T / P_1^T es constante, y según Reich y Bell es válida para todo el mundo, no se justifica, porque en cada región el origen de las lluvias más desfavorables es distinto e intervienen muchos factores, como la latitud, altitud, temperatura, viento, etc. En este trabajo se realizó un análisis empleando datos de 33 estaciones pluviográficas de México, que mostró que no existe una clara tendencia en tal ecuación. También mostró que no se cumple lo que expresa la tabla propuesta también por la USWB, que asocia $d < 1$ h a valores de P_d / P_1 .

Con respecto a los 49 mapas de isoyetas de P-d-T construidas por Hershfield (1961) con base en datos de 200 estaciones, el procedimiento empleado equivale a considerar que para cualquier lugar de EUA es posible obtener el valor de P_d^T para $1 \leq d \leq 24$ h y $2 \leq T \leq 100$ años con sólo conocer los valores P_1^2 , P_{24}^2 , P_1^{100} y P_{24}^{100} , lo cual es incorrecto, porque no es posible que sólo esos cuatro valores de precipitación sean las variables independientes de un fenómeno tan complejo.

Bell argumenta haber obtenido una ecuación universal, con el razonamiento de que los valores extremos de la mayoría de las lluvias están asociados a lluvias convectivas y que las propiedades de éstas son las mismas en todo el mundo. Sin embargo, sus gráficas P_1^T contra P_d^T y P_1^{10} contra P_1^T las construyó con datos que en su mayoría son de EUA, considerando solamente algunos de Australia, Sudáfrica, Hawaii, Alaska y Puerto Rico, lo que significa que excluyó la parte central y sur del continente americano, Asia, Europa y África. Por consiguiente, dicha ecuación no es aplicable a todo el mundo. Por otro lado, Bell asevera que la relación T contra P_1^T / P_1^{10} se ajusta a una distribución Gumbel, lo cual no es rigurosamente cierto. Las ecuaciones que obtuvo finalmente consideran que se cumplen simultáneamente $P_d^T / P_1^T = \text{constante}$ y $P_1^T / P_1^{10} = \text{constante}$. Se observa que para obtener el valor de P_1^{10} es necesario tener información pluviográfica, de la que normalmente se carece al aplicar métodos indirectos. En conclusión, el método de Bell se basa en hipótesis que no se cumplen, no considera datos de la República Mexicana y no es apropiado aplicarlo a nuestro país.

El método de Chen es una transformación de los 49 mapas de isoyetas de Hershfield a una sola ecuación, por lo que los inconvenientes de tales mapas, expuestos en líneas anteriores, lo son también para el método de Chen. Se suman a esto varias inconsistencias en el desarrollo de su método:

Observó en los mapas de isoyetas de Hershfield, que al oeste de EUA a partir de la división continental $P_{1T} / P_{24T} < 0.4$ y al este $P_{1T} / P_{24T} > 0.4$ y por lo tanto el promedio para EUA valía 0.4, lo cual matemáticamente es incorrecto, ya que el área al oeste de la división continental es el 20% de la superficie total de EUA.

La relación d contra I_d^T , llevando P_{1T} / P_{24T} como parámetro interno es inaceptable, porque propone que los patrones de lluvia en EUA se modifican drásticamente a partir de una duración $d = 60$ min.

La ecuación que propone Chen no expresa lo que indica el modelo de Sherman y así como la expresa equivale a suponer que el comportamiento de I_d^T es idéntico al de I_d^T / I_1^T .

La gráfica que relaciona T contra I_d^T / I_d^{10} , para el caso en que $d = 1$ h, equivale a una gráfica T contra I_1^T / I_1^{10} . No aclara por qué usó la intensidad de lluvia asociada a $T = 10$ años. En esta gráfica se observa que para cada valor de T existe un amplio rango de valores de I_1^T / I_1^{10} . Chen ajustó una recta que pase dentro de tales rangos y que pase por el punto $(\log 10, 1)$. Aunque afirmó que la recta dibujada no representaba la relación promedio entre T y I_1^T / I_1^{10} , obtuvo su ecuación y de ahí dedujo las ecuaciones finales de su método.

En conclusión, de acuerdo con lo antes explicado, el método de Chen parte de supuestos e hipótesis que no se cumplen en la realidad y además, sólo es un intento por representar las isoyetas de Hershfield (1961) con una sola ecuación aplicable a todo EUA, lo que no tiene nada que ver con las lluvias que ocurren en México y por lo tanto, no es útil aplicarlo. Más aún, el empleo del parámetro P_{24T} es irrelevante para estudiar la respuesta de cuencas pequeñas ante las lluvias, porque no es lo mismo que se precipite una cierta cantidad de agua en 24 horas en llovizna ligera a que esa misma cantidad caiga en 10 minutos en un fuerte aguacero. En el primer caso, tal vez una obra de drenaje resulte suficiente, pero para el segundo es muy probable que sea insuficiente y falle.

No es justificable que por falta de mediciones de precipitación pluvial con pluviógrafos se elaboren curvas I-d-T y mapas de isoyetas de I-d-T empleando métodos indirectos, ya que sus resultados no pueden comprobarse y la naturaleza de ellos no siempre se ajusta a las características de la región que se esté estudiando. Se reitera la necesidad de contar con una red bien distribuida de pluviógrafos que midan y registren permanentemente la precipitación pluvial y un banco de datos de mediciones de la variación de la lluvia en el tiempo.

En el análisis comparativo de los métodos directos e indirectos presentado en este trabajo fue necesario construir tres grupos de curvas I-d-T: a partir de las Isoyetas SCT2000, utilizando el método de Bell y utilizando el método de Chen. Las conclusiones son:

Los mapas de Isoyetas SCT tienen incongruencias en cuanto a valores; por ejemplo, para una misma estación pluviográfica y un valor de $T = \text{constante}$, dos duraciones diferentes reportan el mismo valor de I ; en algunos casos el valor de I no es inversamente proporcional a d , y en otros, se cruzan curvas en la gráfica I-d-T. De esto se desprende que es muy importante que al construir curvas I-d-T se cuide que para $T = \text{constante}$, se cumpla que I sea inversamente proporcional a d y que para $d = \text{constante}$, I sea directamente proporcional a T .

En cuanto al método de Chen y para las estaciones estudiadas, las ecuaciones propuestas por D.F.Campos para obtener los valores de a_1 , b_1 y c_1 llegaron a producir errores de más de 300% respecto a la gráfica propuesta por Chen. Para poder aplicar el método de Chen fue necesario usar las Isoyetas SCT2000 para obtener los valores de P_1^T .

Para aplicar el método de Bell, también fue necesario usar las Isoyetas SCT2000 para obtener valores de P_1^{10} .

Del análisis comparativo de los tres métodos se considera que la realidad queda expresada por las mediciones (Isoyetas SCT 2000) y son precisamente contra las que se compararon los métodos de Chen y de Bell. Como resultado, se observaron grandes discrepancias de los resultados de Chen y de Bell con la realidad, ya que sólo el 55.9% de los cálculos con el método de Chen tuvo errores aceptables, de $\pm 15\%$

(pero hay errores de hasta 163%), y en el caso del método de Bell, el 59.6% tuvo errores de $\pm 15\%$ (pero hay errores de hasta 105%).

Medir la precipitación pluvial es indispensable para comprender cómo evoluciona ésta en espacio y tiempo, en cuanto a volumen, duración e intensidad. También es necesario conocer cómo evoluciona respecto a alteraciones en el medio ambiente, tales como la deforestación, cambios de uso de suelo y la emisión de gases de efecto invernadero, mismos que generan cambios climáticos que inevitablemente influyen en la precipitación. Por lo tanto, la naturaleza interdependiente de los parámetros ligados a la precipitación obliga también a medirlos y todo ello contribuye a conocer más el fenómeno.

Siempre es mejor medir la precipitación pluvial que estimarla a partir de métodos indirectos. y por supuesto, medir tiene un costo que es necesario pagar.

Bibliografía.

Bibliografía consultada:

Aparicio, F.J., *Fundamentos de Hidrología de superficie*. Ed. Limusa, 1989, México.

Atala, G., Monforte, A.M., *Proyecto de instrumentación pluviográfica de la República Mexicana*. VI Congreso Nacional de Hidráulica, Vol. II, Mérida, Yuc., pp 331-343, 1980, México.

Atala, G., *Importancia de la información pluviográfica en el diseño de obras de drenaje en caminos*. Reunión Latinoamericana sobre Tecnología de Carreteras para Países en Desarrollo, 1981, México.

Bell, F.C. *Generalized Rainfall-Duration-Frequency relationships*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.95, HY1, pp 311-327, 1969, USA.

Betancor, M.L., *Análisis teórico-experimental de los tiempos de concentración en diferentes microcuencas del Uruguay*, Tesis de Posgrado en Ciencias Agrarias, Universidad de la República, Facultad de Agronomía, 61 pp, 2012, Uruguay.

California Department of Transportation (Caltrans), *Highway Design Manual*, Chapter 810 Hydrology, Topic 819 – Estimating Design Discharge, pp 810-824, 2006, USA.

Campos, D.F. *Procesos del ciclo hidrológico*, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, 1983, México.

Campos, D.F., *Calibración del método Racional en ocho cuencas rurales menores de 1650 km² de la Región Hidrológica No.10 (Sinaloa), México*. Agrociencia, No. 42, 2008, pp 615-627, México.

Campos, D.F., *Identificación del número N mediante el método del HUT, en siete cuencas del alto río Grijalva, México*. Ingeniería, Investigación y Tecnología, Vol. XII, núm.3, FI- UNAM, 2011, pp 269-276, México.

Cervantes O., Landeros J. *Curvas de intensidad - duración - periodo de retorno de las tormentas máximas registradas en Tacubaya D. F.* XVIII Congreso Nacional de Hidráulica. Asociación Mexicana de Hidráulica, 2004, México.

Chen, C. *Urban storm runoff inlet hydrograph study Volume 4; Syntetic storms for design of urban highway drainage facilities*. Utah State University, Utah Water Research Laboratory, Report Paper 561, 120 pp, 1975, USA.

Chen, C. *Rainfall Intensity- Duration- Frequency formulas*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.109, No.12, pp 1603-1621, 1983, USA.

Chow, V.T. *Hydrologic determination of waterway áreas for the design of drainage structures in small drainage basins*. University of Illinois. Engineering Experiment Station Bulletin No. 462, 1962, USA.

Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., *Hidrología Aplicada*, Ed. McGraw Hill, pp 465-471, 1988, EUA.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Gerencia de Ingeniería de Ríos 1987, Gerencia Regional del Balsas, *Instructivo de hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria asociada a la delimitación de la zona federal*, pp 53-54, 2004, México.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), *Estaciones Climatológicas en Google Earth*, Manual de usuario, 17 pp, ene 2010, México.

Demarée, G.R. *Le pluviographe centenaire du plateau d'Uccle: son histoire, ses données et ses applications*. La Houille Blanche, No.4, Aoút 2003, pp 95-102, 2003, France.

Dufour, L, Defrise, P., *Histoire de la météorologie in Belgique*. Bulletin de la Société Royale Belge d'Astronomié, de Météorologie et de Physique du Globe. Ciel et Terre, Vol.97, No.1, janvier-février 1981, p 11, 1981, Belgique.

Fernández, I., *Diseño asistido del sistema de sumideros de una población*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, pp 13-16, 2009, España.

García, B.R. *Efecto de las variaciones temporales de la intensidad de precipitación en el hidrograma de la crecida generada*. Revista de Obras Públicas, dic. 1991, pp 13-21, España.

Goel, N.K. y Sarkar, S., *Design flood analysis for hidropower projects. Module 3: Regional rainfall Intensity – Duration – Frequency relationships*. National Thermal Power Corporation Limited (NTPC Limited), Aug 20-25, 2007, India.

González, I.A., Lugo, O. y Ayala, J., *Diseño y desarrollo de un pluviógrafo semiautomático tipo Hellmann*, Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Vol.7, Núm.10, ene-feb 2016, pp 95-101, México.

Hershfield, D.M. *Rainfall frequency atlas of the United States for durations from 30 minutes to 24 hours and return periods from 1 to 100 years*, Technical Paper No.40, U.S. Department of Commerce, Weather Bureau, Washington, D.C., 1961, USA.

Ibañez, L.A., Cabrera, A.L., Arteaga, R. y Vázquez, M.A. *Relaciones intensidad-duración-frecuencia de la lluvia registrada en Chapingo, México*, Ingeniería Agrícola y Biosistemas 3(1): 25-32, 2011, México.

Kifissiameteo, *Weather, Lighting & Storm Detector Station*, 2016. Grecia. Recuperado de: http://www.kifissiameteo.gr/Lesson08_Instrument_RainGauge.html

Kothyari, U.C., Garde, R.J., *Rainfall intensity duration frequency formula for India*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.18, HY2, pp 323-336, 1992, USA.

Kurtyka, J.C. *Precipitation measurements study*, Illinois State Water Survey Division, Investigation No.20, 1953, USA.

León, A.J., Hernández, A., Garrido, M., Andalia, A.I. *Captación de lluvia con pluviógrafos de cubeta y su postprocesamiento*. Centro de Investigaciones Hidráulicas. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXXIV, No.2, May-Ago 2013, pp 73-87, Cuba.

Manley, R.E. *Bell's formula - a reappraisal*, VIII journées hydrologiques - Orstom, sept 1992, pp 121-131, United Kingdom.

Manning, R. *On the flow of water in open channels and pipes*. Transactions of Institution of Civil Engineers of Ireland, Vol.20, pp 161-207, 1891. Supplement, Vol.24, pp 179-207, 1895. Ireland.

Martínez de Azagra, P.A., *Método de los coeficientes de escorrentía. Mauco Generalizado*, oasification.com, 2006, España.

Nath, L.M., Tachikawa, Y., Sayama, T., Takara, K. *Derivation of rainfall Intensity-Duration- Frequency relationships for short duration rainfall from daily data*. International Symposium on Managing Watter Supply for Growing Demand. Technical Documents in Hydrology, No.6, Oct. 2006, Bangkok, Thailand.

Nath, L.M., Tachikawa, Y., Takara, K. *Establishment of Intensity- Duration- Frequency curves for precipitation in the monsoon area of Vietnam*. Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto University, No.49B, 2006, Japan.

NOAA, *Atlas 14, Precipitation – Frequency Atlas of the United States, Volume 6, Version 2*, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weathet Service, Office of Water Prediction, 2017, USA. Recuperado de: <http://www.nws.noaa.gov/ohd/hdsc/index.html>

Paz-Pellat, F., *Mitos y falacias del método hidrológico del número de curva del SCS/NRCS*, Agrociencia, Vol.43, No.5, jul-ago 2009, México.

PRISM Climate Group. *Northwest Alliance for Computational Science and Engineering*. 2016. USA.

Rosengaus, M.M. *Fundamentos de radares meteorológicos: Aspectos clásicos*, Ingeniería Hidráulica en México, Vol.X, Núm.1, pp 55-74, ene-abr 1995, México.

Rosengaus, M.M. *Fundamentos de radares meteorológicos: Aspectos modernos*, Ingeniería Hidráulica en México, Vol.X, Núm.2, pp 59-78, may-ago 1995, México.

Rosengaus, M.M. *Sobre el error en la estimación de lluvia utilizando radar meteorológico*, Ingeniería del Agua, Vol.6, Núm.2, Junio 1999, pp 185-198, México.

Rossmiller, R.L. *Some coments on the Rational Formula*, 75 pp, 1980, USA.

Sandoval, G., Tobar, J., Mosquera, V.H. y González, M.J., *Pluviógrafo electrónico con transmisión de datos inalámbrica*, Revista colombiana de tecnologías de avanzada, Universidad de Pamplona, IIDTA, dic. 2010, Colombia.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Instructivo de hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria*, 1987, México.

Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. Dirección General de Servicios Técnicos, *Proyecto de instrumentación pluviográfica para la República Mexicana*. México, 1980.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Dirección General de Servicios Técnicos. Información interna, 1982, México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Dirección General de Servicios Técnicos, *Métodos hidrológicos para previsión de escurrimientos*. Cap. 4, p 43, pp 114-116, 1984, México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Dirección General de Proyectos, Servicios Técnicos y Concesiones, *Isoyetas de Intensidad – Duración – Frecuencia*. República Mexicana. México, 1990.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Dirección General de Servicios Técnicos. *Isoyetas de Intensidad – Duración – Período de Retorno para la República Mexicana*, Tomo I. México. 2000.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Dirección General de Servicios Técnicos. Información interna, 2016. México.

Secretaría de Economía, NMX-AA-166/1-SCFI-2013. Recuperado de:
<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/nmx-aa-166-1-scfi-2015.pdf>

Secretaría de Economía, NMX-AA-166-2-SCFI-2015. Recuperado de:
http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa166-2-Proy2015_05.pdf

Strangeways, I. *A history of raingauges*. TerraData, Wallingford, Oxfordshire. Weather - May 2010, Vol.65, No.5. USA.

Symons, G.J. *Symons's monthly metoological magazine*. LXIV, may-1871, United Kingdom.

Symons, G.J. *The distribution of rain over the British Isles during the year 1878, as observed at about 2000 stations in Great Britain and Ireland. It includes the description of all known forms of self-recording rain gauges*. Ed. Edward Stanford, Charing Cross, S.W. 1879. United Kingdom.

The COMET Program. University Corporation for Atmospheric Research (UCAR). *Estimación de la precipitación: medición*, 2015, USA.

U.S. Army Corps of Engineers. *HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center. River Analysis System)*. Version 5.0, 2016, USA.

United States Weather Bureau. *Rainfall intensity-frequency-duration curves for selected stations*. Technical Paper No.25, 1955, USA.

Vargas, R. *Curvas sintéticas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*. Universidad de los Andes, UNIANDES, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Tesis de Ingeniería Civil, pp 187-200, 1997, Bogotá, Colombia.

Vargas, R. y Díaz-Granados, M. *Curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*. Universidad de los Andes, UNIANDES, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, 1999, Bogotá, Colombia.

Vélez, J.J., Botero, A., *Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de La Quebrada San Luis, Manizales*, Revista Dyna, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Vol. 78, No.165, 2011, Medellín, Colombia.

Weiss, L.L, *Ratio of true fixed-interval maximum rainfall*. Journal of the Hydraulics Division, Vol. 90, Issue 1, pp 77-82, 1964, USA.

World Meteorological Organization (WMO). *Guide to hydrological practices*, Vol.II, WMO- No.168, Sixth edition, 2009, pp II.5.20-II.5-23, 2009, Switzerland.

Yarnell, D.L. *Rainfall intensity-frequency data*, U.S. Department of Agriculture, Miscellaneous Publication No.204, August 1935, Washington, D.C., USA.

Zhang, X., Zwiers, F., Hegerl, G., Lambert, F.H., Gillett, N., Solomon, S., Scott, P., Nosowa, T. *Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends*, *Nature (International weekly journal of science)*, Vol.488, jul 2007, United Kingdom.

Bibliografía citada no consultada:

Bernard, M.M. *Formulas for rainfall intensities of long duration*. Transactions ASCE, Vol.96, Paper No.1801, pp 592-624, 1932, USA.

Bilham, E.G. *Classification of heavy falls in short periods*. *British Rainfall 1935*, pp 262-280, 1936, United Kingdom.

Creager, W.P., Justin, J.D., Hinds, J., *Engineering for dams, general design*, Vol.1, New York: John Wiley and Sons, 1945, USA.

Hathaway, G.A. *Design drainage facilities*. Transactions of the ASCE, Vol.110, 1945, pp 697-730, 1945, USA.

Holland, D.J. *Rain intensity frequency relationships in Britain, 1967*. *British Rainfall 1961, Part III*, pp 43-51, 1967, United Kingdom. Institution of Engineers. *First report of the stormwater standards committee*, 1958, Australia.

Kirpich, Z.P. *Time of concentration of small agricultural watersheds*. Civil Engineering Vol.10, Núm.6, p 362, 1940, USA.

Kuichling, E. *The relation between the rainfall and the discharge of sewer sin populous districts*. Transactions ASCE, Vol.20, pp 1-56, 1889, USA.

Mulvany, T.J. *On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations on the relation on rainfall and flood discharges in a given catchment*. Transactions of Institution of Civil Engineers Ireland, 4(2), 1850, p 18, Ireland.

Reich, B.M. *Short duration rainfall intensity estimates and other design aids for regions of sparse data*, Journal of Hydrology, Vol.1, No.1, pp 3-28, 1963, USA.

Sherman, C.W. *Frequency and intensity of excessive rainfalls at Boston, Massachusetts*, Transactions ASCE, Vol.95, No.1, pp 951-960, 1931, USA.

Sherman, C.W. *Maximum rates of rainfall at Boston*. Transactions ASCE, Vol. LIV, Issue 1, pp 173-180, 1905, USA.

Universidad Nacional Experimental del Tachira (UNET). *Método Racional para predicción del caudal máximo en ríos y quebradas*. Cap. II. 1998. San Cristóbal, Venezuela. Recuperado de:

https://uvirtual.unet.edu.ve/pluginfile.php/325842/mod_resource/content/1/M%C3%A9todo%20CIA.pdf

Wenzel, H.G., *Rainfall for urban stormwater design in urban storm water hydrology*, ed. by David F. Kibler, Water Resources Monograph 7, American Geophysical Union, Washington, D.C., 1982, USA.

Apéndice A.

Tabla A.1. Intensidades de lluvia obtenidas con las Isoyetas SCT 2000 y las calculadas con los métodos indirectos de Chen y de Bell para las 33 estaciones pluviográficas.

7006 Altamirano, Chis.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	118	113	102	78	56	33	32.5
	Chen	190.68	149.78	107.14	84.70	53.84	32.74	19.4
	Bell	207.36	155.20	108.23	85.85	56.36	36.17	
20	ISCT	132	126	114	87	62	36	35.5
	Chen	209.28	164.39	117.59	92.96	59.09	35.93	21.293
	Bell	237.44	177.71	123.93	98.30	64.54	41.42	
25	ISCT	137	130	118	90	63	37	36.5
	Chen	215.27	169.09	120.96	95.62	60.78	36.96	21.903
	Bell	247.12	184.96	128.98	102.31	67.17	43.11	
50	ISCT	148	141	127	97	68	39	38.5
	Chen	233.87	183.70	131.41	103.88	66.03	40.15	23.795
	Bell	277.20	207.47	144.68	114.76	75.34	48.35	
100	ISCT	159	151	136	103	73	41	40.5
	Chen	252.47	198.31	141.86	112.15	71.28	43.34	25.688
	Bell	307.28	229.98	160.38	127.21	83.52	53.60	

6001 Armería, Col.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	209	143	112	89	74	48	29
	Chen	258.47	196.19	140.15	112.77	76.00	50.30	32.97
	Bell	274.02	205.08	143.02	113.44	74.48	47.80	
20	ISCT	246	165	130	116	88	56	35
	Chen	319.57	242.56	173.28	139.43	93.96	62.19	40.76
	Bell	313.76	234.83	163.76	129.90	85.28	54.73	
25	ISCT	258	172	136	122	93	60	36
	Chen	339.24	257.49	183.95	148.02	99.75	66.02	43.27
	Bell	326.56	244.41	170.44	135.19	88.76	56.96	
50	ISCT	295	194	154	139	107	68	42
	Chen	400.34	303.87	217.08	174.68	117.71	77.91	51.07
	Bell	366.30	274.15	191.19	151.65	99.56	63.90	
100	ISCT	330	216	172	156	120	77	48
	Chen	461.44	350.25	250.21	201.34	135.68	89.80	58.86
	Bell	406.05	303.90	211.93	168.10	110.36	70.83	

19035 Camacho, NL								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	215	171	141	121	84	50	26
	Chen	282.08	222.90	160.07	126.60	80.27	48.52	28.52
	Bell	311.05	232.80	162.35	128.77	84.54	54.26	
20	ISCT	245	196	165	143	101	60	31
	Chen	336.40	265.82	190.89	150.98	95.73	57.86	34.01
	Bell	356.16	266.57	185.90	147.45	96.81	62.13	
25	ISCT	254	205	173	150	107	64	32
	Chen	353.88	279.63	200.81	158.82	100.70	60.87	35.78
	Bell	370.69	277.44	193.48	153.46	100.75	64.66	
50	ISCT	283	230	198	174	125	74	38
	Chen	408.20	322.55	231.63	183.20	116.16	70.21	41.27
	Bell	415.80	311.20	217.02	172.14	113.02	72.53	
100	ISCT	311	256	224	197	143	85	43
	Chen	462.51	365.47	262.45	207.58	131.62	79.56	46.76
	Bell	460.92	344.97	240.57	190.82	125.28	80.40	

23032 Chetumal, Q.Roo								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	220	179	136	110	72	45	29
	Chen	247.51	187.90	134.37	108.22	73.07	48.48	31.86
	Bell	266.61	199.54	139.15	110.38	72.46	46.51	
20	ISCT	260	214	162	131	84	52	34
	Chen	303.57	230.46	164.80	132.73	89.62	59.45	39.07
	Bell	305.28	228.48	159.34	126.38	82.98	53.25	
25	ISCT	273	225	170	138	87	54	36
	Chen	321.61	244.16	174.59	140.62	94.95	62.99	41.39
	Bell	317.73	237.80	165.84	131.54	86.36	55.42	
50	ISCT	313	259	196	158	99	61	41
	Chen	377.67	286.72	205.03	165.12	111.50	73.97	48.61
	Bell	356.40	266.74	186.02	147.55	96.87	62.17	
100	ISCT	353	293	221	178	110	67	45
	Chen	433.73	329.27	235.46	189.63	128.04	84.95	55.82
	Bell	395.07	295.69	206.20	163.56	107.38	68.91	

31007 Chicxulub Puerto, Yuc.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	179	149	111	92	64	41	23
	Chen	221.53	169.99	121.37	97.08	64.27	41.51	26.45
	Bell	236.99	177.37	123.69	98.11	64.41	41.34	
20	ISCT	204	171	128	107	75	48	28
	Chen	287.66	220.74	157.60	126.07	83.46	53.90	34.35
	Bell	271.36	203.10	141.63	112.34	73.76	47.33	
25	ISCT	212	178	133	112	79	51	29
	Chen	308.95	237.07	169.26	135.40	89.64	57.89	36.89
	Bell	282.43	211.38	147.41	116.92	76.76	49.26	
50	ISCT	237	199	150	126	90	58	34
	Chen	375.09	287.82	205.50	164.38	108.82	70.29	44.79
	Bell	316.80	237.11	165.35	131.15	86.11	55.26	
100	ISCT	261	221	166	140	100	66	38
	Chen	441.22	338.57	241.73	193.36	128.01	82.68	52.68
	Bell	351.18	262.83	183.29	145.38	95.45	61.26	

16022 Cointzio, Mich.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	129	96	69	54	33	18	10
	Chen	112.97	87.39	62.37	49.64	32.36	20.45	12.71
	Bell	122.20	91.46	63.78	50.59	33.21	21.32	
20	ISCT	139	103	74	58	35	20	11
	Chen	140.84	108.95	77.75	61.89	40.35	25.50	15.84
	Bell	139.92	104.72	73.03	57.93	38.03	24.41	
25	ISCT	141	105	76	59	36	20.5	11.5
	Chen	149.81	115.89	82.71	65.83	42.92	27.12	16.85
	Bell	145.63	108.99	76.01	60.29	39.58	25.40	
50	ISCT	150	111	80	62	37	21	12
	Chen	177.69	137.46	98.09	78.08	50.90	32.17	19.98
	Bell	163.35	122.26	85.26	67.63	44.40	28.49	
100	ISCT	157	116	84	65	39	22	12.5
	Chen	205.56	159.02	113.48	90.33	58.89	37.22	23.12
	Bell	181.08	135.52	94.51	74.96	49.22	31.59	

12022 Copala, Gro.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	148	118	100	89	67	46	30
	Chen	239.35	177.86	127.94	104.52	73.25	50.97	35.34
	Bell	248.10	185.68	129.49	102.71	67.43	43.28	
20	ISCT	159	126	107	96	73	50	32
	Chen	281.75	209.36	150.61	123.03	86.23	60.00	41.60
	Bell	284.08	212.62	148.27	117.61	77.21	49.55	
25	ISCT	162	129	109	98	74	51	33
	Chen	295.40	219.51	157.90	128.99	90.41	62.91	43.61
	Bell	295.67	221.29	154.32	122.40	80.36	51.57	
50	ISCT	171	135	114	103	79	54	35
	Chen	337.80	251.01	180.57	147.51	103.38	71.94	49.87
	Bell	331.65	248.22	173.10	137.30	90.14	57.85	
100	ISCT	179	141	119	108	83	56	37
	Chen	380.19	282.52	203.23	166.02	116.36	80.97	56.13
	Bell	367.64	275.15	191.88	152.20	99.92	64.13	

25015 Culiacán, Sin.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	164	136	112	93	66	39	24
	Chen	226.73	177.02	126.47	100.23	64.35	39.74	24.01
	Bell	244.39	182.91	127.56	101.18	66.43	42.63	
20	ISCT	184	153	126	105	75	43	26
	Chen	260.39	203.30	145.24	115.11	73.90	45.65	27.58
	Bell	279.84	209.44	146.06	115.85	76.06	48.81	
25	ISCT	190	158	130	108	77	44	27
	Chen	271.23	211.76	151.29	119.90	76.98	47.55	28.73
	Bell	291.25	217.99	152.02	120.58	79.16	50.80	
50	ISCT	206	172	142	118	85	47	29
	Chen	304.89	238.04	170.07	134.79	86.53	53.45	32.29
	Bell	326.70	244.52	170.52	135.25	88.80	56.99	
100	ISCT	221	185	153	138	91	50	31
	Chen	338.55	264.32	188.84	149.67	96.09	59.35	35.86
	Bell	362.15	271.05	189.02	149.93	98.43	63.17	

26139 Hermosillo, Son.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	197	163	128	108	72	40	22
	Chen	240.67	190.13	136.15	107.33	67.49	40.34	23.40
	Bell	266.61	199.54	139.15	110.38	72.46	46.51	
20	ISCT	225	189	150	127	85	47	26
	Chen	276.96	218.79	156.67	123.51	77.66	46.42	26.93
	Bell	305.28	228.48	159.34	126.38	82.98	53.25	
25	ISCT	234	197	156	133	89	50	27
	Chen	288.64	228.02	163.28	128.72	80.93	48.38	28.07
	Bell	317.73	237.80	165.84	131.54	86.36	55.42	
50	ISCT	262	222	178	152	102	57	31
	Chen	324.92	256.68	183.80	144.90	91.11	54.46	31.60
	Bell	356.40	266.74	186.02	147.55	96.87	62.17	
100	ISCT	289	246	199	170	114	64	35
	Chen	361.20	285.34	204.33	161.08	101.28	60.54	35.12
	Bell	395.07	295.69	206.20	163.56	107.38	68.91	

4013 Hopelchén, Camp.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	301	198	123	99	68	42	26
	Chen	235.98	183.45	131.28	104.52	68.01	42.81	26.45
	Bell	251.80	188.46	131.42	104.24	68.44	43.92	
20	ISCT	365	233	140	111	77	47	30
	Chen	278.34	216.37	154.84	123.27	80.21	50.49	31.19
	Bell	288.32	215.79	150.49	119.36	78.37	50.29	
25	ISCT	386	244	146	116	80	49	31
	Chen	291.97	226.97	162.42	129.31	84.14	52.96	32.72
	Bell	300.08	224.59	156.62	124.23	81.56	52.34	
50	ISCT	449	279	163	128	89	55	35
	Chen	334.32	259.90	185.99	148.07	96.35	60.65	37.47
	Bell	336.60	251.93	175.69	139.35	91.49	58.71	
100	ISCT	512	313	180	141	98	61	39
	Chen	376.68	292.82	209.55	166.83	108.55	68.33	42.22
	Bell	373.13	279.26	194.75	154.47	101.42	65.09	

26045 Imuris, Son.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	174	132	101	80	47	26	14
	Chen	158.51	125.42	89.81	70.72	44.29	26.30	15.14
	Bell	174.04	130.26	90.84	72.05	47.30	30.36	
20	ISCT	202	152	119	95	55	30	17
	Chen	180.55	142.86	102.30	80.56	50.45	29.96	17.25
	Bell	199.28	149.15	104.01	82.50	54.16	34.76	
25	ISCT	210	158	124	100	57	31	17.5
	Chen	187.65	148.47	106.32	83.72	52.43	31.14	17.93
	Bell	207.41	155.23	108.25	85.87	56.37	36.18	
50	ISCT	238	178	142	114	65	35	19
	Chen	209.69	165.91	118.81	93.56	58.59	34.80	20.03
	Bell	232.65	174.13	121.43	96.32	63.23	40.58	
100	ISCT	265	197	159	128	73	40	22
	Chen	231.73	183.35	131.30	103.39	64.74	38.46	22.14
	Bell	257.90	193.02	134.61	106.77	70.10	44.99	

20039 Ixtepec, Oax.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	191	139	113	96	66	45	30
	Chen	233.56	178.64	127.95	102.87	68.99	45.31	29.43
	Bell	244.39	182.91	127.56	101.18	66.43	42.63	
20	ISCT	223	161	131	111	76	52	35
	Chen	273.25	208.99	149.69	120.35	80.71	53.01	34.43
	Bell	279.84	209.44	146.06	115.85	76.06	48.81	
25	ISCT	234	168	137	116	80	54	36
	Chen	286.02	218.77	156.69	125.97	84.48	55.49	36.04
	Bell	291.25	217.99	152.02	120.58	79.16	50.80	
50	ISCT	266	189	155	131	90	61	41
	Chen	325.71	249.12	178.44	143.45	96.21	63.19	41.04
	Bell	326.70	244.52	170.52	135.25	88.80	56.99	
100	ISCT	297	210	172	145	100	68	46
	Chen	365.40	279.48	200.18	160.93	107.93	70.89	46.04
	Bell	362.15	271.05	189.02	149.93	98.43	63.17	

26048 La Estrella, Son.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	193	134	104	85	54	29	16
	Chen	184.43	145.12	103.80	81.95	51.86	31.33	18.42
	Bell	199.96	149.66	104.37	82.78	54.35	34.88	
20	ISCT	232	155	121	98	63	33	18
	Chen	214.89	169.09	120.94	95.49	60.43	36.51	21.46
	Bell	228.96	171.36	119.50	94.79	62.23	39.94	
25	ISCT	244	162	126	103	65	35	19
	Chen	224.70	176.80	126.46	99.85	63.19	38.17	22.44
	Bell	238.30	178.35	124.38	98.65	64.77	41.57	
50	ISCT	282	184	142	116	74	39	21
	Chen	255.16	200.77	143.61	113.38	71.75	43.35	25.48
	Bell	267.30	200.06	139.52	110.66	72.65	46.63	
100	ISCT	320	205	158	128	82	43	23
	Chen	285.62	224.74	160.75	126.92	80.32	48.52	28.53
	Bell	296.31	221.77	154.65	122.67	80.54	51.69	

3074 La Paz, BCS								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	148	111	82	66	40	23	12
	Chen	139.53	108.78	77.81	61.81	39.94	24.90	15.20
	Bell	148.12	110.86	77.31	61.32	40.26	25.84	
20	ISCT	179	135	100	80	48	28	15
	Chen	171.27	133.52	95.51	75.87	49.03	30.56	18.66
	Bell	169.60	126.94	88.52	70.21	46.10	29.58	
25	ISCT	189	143	105	85	51	29	16
	Chen	181.49	141.49	101.21	80.40	51.95	32.38	19.77
	Bell	176.52	132.11	92.13	73.08	47.98	30.79	
50	ISCT	220	167	123	99	59	34	18
	Chen	213.22	166.23	118.90	94.46	61.04	38.04	23.23
	Bell	198.00	148.19	103.34	81.97	53.82	34.54	
100	ISCT	251	190	140	113	67	38	21
	Chen	244.96	190.97	136.60	108.51	70.12	43.71	26.69
	Bell	219.49	164.27	114.56	90.87	59.66	38.29	

30102 Martínez de la Torre, Ver.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	242	175	129	106	76	55	27
	Chen	263.96	201.30	143.58	115.09	76.74	50.09	32.31
	Bell	281.42	210.63	146.89	116.51	76.49	49.09	
20	ISCT	283	203	150	124	89	65	33
	Chen	303.22	231.25	164.94	132.21	88.16	57.54	37.12
	Bell	322.24	241.18	168.19	133.41	87.59	56.21	
25	ISCT	296	212	156	129	94	69	34
	Chen	315.87	240.89	171.82	137.72	91.83	59.94	38.67
	Bell	335.38	251.01	175.05	138.85	91.16	58.50	
50	ISCT	336	240	177	146	107	79	40
	Chen	355.13	270.84	193.18	154.84	103.25	67.39	43.48
	Bell	376.20	281.56	196.36	155.75	102.25	65.62	
100	ISCT	375	267	197	163	119	89	45
	Chen	394.40	300.79	214.54	171.96	114.67	74.84	48.28
	Bell	417.02	312.11	217.66	172.64	113.35	72.74	

20070 Miahuatlán, Oax.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	103	84	57	43	25	14	9
	Chen	85.89	64.42	46.01	37.20	25.45	17.18	11.53
	Bell	92.57	69.29	48.32	38.32	25.16	16.15	
20	ISCT	125	102	69	52	29	16	10
	Chen	99.08	74.31	53.08	42.92	29.35	19.82	13.30
	Bell	106.00	79.33	55.33	43.88	28.81	18.49	
25	ISCT	133	107	72	55	31	17	11
	Chen	103.33	77.50	55.35	44.76	30.61	20.67	13.87
	Bell	110.32	82.57	57.58	45.67	29.99	19.24	
50	ISCT	155	125	84	63	35	19	12
	Chen	116.52	87.39	62.42	50.47	34.52	23.31	15.64
	Bell	123.75	92.62	64.59	51.23	33.64	21.59	
100	ISCT	177	143	95	72	40	21	13
	Chen	129.71	97.28	69.48	56.19	38.43	25.95	17.41
	Bell	137.18	102.67	71.60	56.79	37.29	23.93	

30216 Naranja, Ver.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	193	152	118	96	73	53	35
	Chen	263.17	194.33	139.33	113.72	79.67	55.46	38.48
	Bell	270.31	202.31	141.09	111.91	73.47	47.15	
20	ISCT	231	179	139	112	85	63	41
	Chen	308.01	227.44	163.07	133.09	93.24	64.91	45.04
	Bell	309.52	231.66	161.55	128.14	84.13	53.99	
25	ISCT	243	188	146	118	89	66	43
	Chen	322.44	238.10	170.71	139.33	97.61	67.95	47.15
	Bell	322.14	241.10	168.14	133.37	87.56	56.19	
50	ISCT	281	215	166	133	101	75	49
	Chen	367.27	271.20	194.45	158.70	111.18	77.40	53.71
	Bell	361.35	270.45	188.60	149.60	98.22	63.03	
100	ISCT	318	241	186	149	113	84	55
	Chen	412.11	304.31	218.18	178.08	124.75	86.85	60.26
	Bell	400.56	299.79	209.07	165.83	108.87	69.87	

24045 Nogal Oscuro, SLP								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	162	128	100	86	58	36	21
	Chen	194.77	153.91	110.52	87.41	55.43	33.50	19.69
	Bell	214.77	160.74	112.10	88.91	58.37	37.46	
20	ISCT	186	146	115	100	68	42	25
	Chen	223.09	176.28	126.59	100.13	63.49	38.37	22.56
	Bell	245.92	184.06	128.36	101.81	66.84	42.90	
25	ISCT	193	151	119	104	71	44	27
	Chen	232.21	183.49	131.77	104.22	66.08	39.94	23.48
	Bell	255.95	191.56	133.59	105.96	69.57	44.65	
50	ISCT	216	169	134	117	81	51	30
	Chen	260.53	205.87	147.84	116.93	74.14	44.82	26.34
	Bell	287.10	214.88	149.85	118.86	78.03	50.08	
100	ISCT	239	187	148	131	91	57	34
	Chen	288.86	228.25	163.91	129.64	82.20	49.69	29.20
	Bell	318.25	238.19	166.11	131.75	86.50	55.51	

25074 Potrerillos, Sin.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	180	142	124	103	75	51	30
	Chen	260.06	203.64	145.78	115.58	74.14	45.70	27.52
	Bell	277.72	207.86	144.95	114.97	75.48	48.44	
20	ISCT	200	158	139	115	85	60	35
	Chen	296.99	232.56	166.48	131.99	84.67	52.19	31.43
	Bell	318.00	238.00	165.98	131.65	86.43	55.47	
25	ISCT	206	163	144	118	89	63	37
	Chen	308.88	241.87	173.15	137.28	88.06	54.27	32.69
	Bell	330.97	247.71	172.75	137.02	89.96	57.73	
50	ISCT	226	178	160	130	99	72	42
	Chen	345.81	270.80	193.85	153.69	98.59	60.76	36.60
	Bell	371.25	277.86	193.77	153.70	100.91	64.76	
100	ISCT	245	193	175	142	109	80	47
	Chen	382.74	299.72	214.55	170.10	109.12	67.25	40.51
	Bell	411.54	308.01	214.80	170.37	111.86	71.79	

26024 Presa A. Ruiz Cortines, Son.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	205	151	118	96	63	34	18
	Chen	215.08	169.44	121.48	96.10	61.07	37.08	21.92
	Bell	233.28	174.60	121.76	96.58	63.41	40.69	
20	ISCT	220	160	125	101	67	37	20
	Chen	249.33	196.42	140.83	111.40	70.80	42.99	25.41
	Bell	267.12	199.92	139.42	110.59	72.60	46.59	
25	ISCT	225	163	127	102	68	37.5	20.5
	Chen	260.35	205.11	147.05	116.33	73.93	44.89	26.54
	Bell	278.02	208.08	145.11	115.10	75.56	48.49	
50	ISCT	237	171	132	106	71	39	21
	Chen	294.60	232.09	166.40	131.63	83.65	50.79	30.03
	Bell	311.85	233.40	162.77	129.10	84.76	54.40	
100	ISCT	248	178	137	110	74	41	22
	Chen	328.85	259.07	185.74	146.93	93.38	56.70	33.52
	Bell	345.69	258.73	180.43	143.11	93.96	60.30	

5026 Presa Coyote, Coah.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	115	97	71	54	32	17	11
	Chen	109.75	86.12	61.56	48.66	30.93	18.82	11.17
	Bell	118.49	88.69	61.85	49.06	32.21	20.67	
20	ISCT	142	121	87	66	38	20	12
	Chen	129.32	101.48	72.54	57.33	36.45	22.18	13.16
	Bell	135.68	101.55	70.82	56.17	36.88	23.67	
25	ISCT	151	128	92	70	40	21	13
	Chen	135.62	106.42	76.07	60.12	38.22	23.26	13.80
	Bell	141.21	105.69	73.71	58.46	38.38	24.63	
50	ISCT	178	151	108	81	46	24	15
	Chen	155.19	121.78	87.05	68.80	43.74	26.61	15.79
	Bell	158.40	118.55	82.68	65.58	43.05	27.63	
100	ISCT	205	174	123	92	51	27	17
	Chen	174.76	137.13	98.02	77.47	49.25	29.97	17.78
	Bell	175.59	131.42	91.65	72.69	47.72	30.63	

26069 Presa La Angostura, Son.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	118	74	40	27	14	8	4
	Chen	50.15	37.05	26.74	21.95	15.56	10.98	7.73
	Bell	51.84	38.80	27.06	21.46	14.09	9.04	
20	ISCT	135	87	45	30	16	9	5
	Chen	57.70	42.63	30.76	25.25	17.91	12.64	8.89
	Bell	59.36	44.43	30.98	24.57	16.13	10.35	
25	ISCT	140	90	47	32	16.5	9.5	5.5
	Chen	60.13	44.42	32.06	26.32	18.66	13.17	9.27
	Bell	61.78	46.24	32.25	25.58	16.79	10.78	
50	ISCT	154	101	52	35	28	10	6
	Chen	67.68	50.00	36.09	29.62	21.00	14.82	10.43
	Bell	69.30	51.87	36.17	28.69	18.84	12.09	
100	ISCT	167	112	56	38	29	11	6.5
	Chen	75.23	55.58	40.11	32.93	23.35	16.48	11.60
	Bell	76.82	57.49	40.10	31.80	20.88	13.40	

5033 Sabinas, Coah.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	166	135	101	77	50	29	15
	Chen	171.49	134.23	95.96	75.98	48.59	29.84	17.89
	Bell	185.15	138.57	96.64	76.65	50.32	32.30	
20	ISCT	189	154	114	87	57	33	18
	Chen	189.14	148.04	105.83	83.80	53.59	32.91	19.73
	Bell	212.00	158.67	110.65	87.77	57.62	36.98	
25	ISCT	196	160	118	90	59	35	19
	Chen	194.82	152.49	109.01	86.32	55.20	33.89	20.33
	Bell	220.65	165.14	115.16	91.35	59.97	38.49	
50	ISCT	218	178	132	99	66	39	21
	Chen	212.46	166.30	118.89	94.13	60.20	36.96	22.17
	Bell	247.50	185.24	129.18	102.46	67.27	43.17	
100	ISCT	240	196	145	108	72	43	23
	Chen	230.11	180.11	128.76	101.95	65.20	40.03	24.01
	Bell	274.36	205.34	143.20	113.58	74.57	47.86	

5048 Saltillo, Coah.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	175	136	99	78	44	23	12
	Chen	149.34	118.25	84.86	66.97	42.16	25.21	14.63
	Bell	162.93	121.94	85.04	67.45	44.28	28.42	
20	ISCT	207	162	117	94	53	27	14
	Chen	195.07	154.46	110.85	87.48	55.07	32.93	19.10
	Bell	186.56	139.63	97.37	77.24	50.71	32.54	
25	ISCT	217	171	123	99	56	28	15
	Chen	209.79	166.11	119.22	94.08	59.22	35.41	20.55
	Bell	194.17	145.32	101.34	80.38	52.78	33.87	
50	ISCT	249	196	141	114	64	33	17
	Chen	255.53	202.32	145.20	114.59	72.13	43.13	25.02
	Bell	217.80	163.01	113.68	90.17	59.20	37.99	
100	ISCT	280	222	159	120	73	37	19
	Chen	301.26	238.53	171.19	135.09	85.04	50.85	29.50
	Bell	241.43	180.70	126.01	99.95	65.62	42.11	

28086 San Fernando, Tamps.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	191	154	124	104	67	40	20
	Chen	232.51	180.75	129.35	102.98	67.01	42.18	26.06
	Bell	248.10	185.68	129.49	102.71	67.43	43.28	
20	ISCT	213	173	141	120	76	45	23
	Chen	271.92	211.39	151.27	120.43	78.36	49.33	30.48
	Bell	284.08	212.62	148.27	117.61	77.21	49.55	
25	ISCT	220	179	147	124	79	47	24
	Chen	284.61	221.25	158.33	126.05	82.02	51.63	31.90
	Bell	295.67	221.29	154.32	122.40	80.36	51.57	
50	ISCT	241	197	163	139	88	53	26
	Chen	324.02	251.89	180.25	143.51	93.38	58.78	36.31
	Bell	331.65	248.22	173.10	137.30	90.14	57.85	
100	ISCT	262	215	180	154	97	58	29
	Chen	363.43	282.52	202.17	160.96	104.74	65.93	40.73
	Bell	367.64	275.15	191.88	152.20	99.92	64.13	

19058 Santa Catarina, NL								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	140	107	78	65	47	28	17
	Chen	164.62	128.25	91.80	73.01	47.34	29.64	18.20
	Bell	174.04	130.26	90.84	72.05	47.30	30.36	
20	ISCT	165	124	90	76	55	33	20
	Chen	190.59	148.48	106.29	84.54	54.81	34.32	21.07
	Bell	199.28	149.15	104.01	82.50	54.16	34.76	
25	ISCT	173	130	94	79	58	35	21
	Chen	198.95	155.00	110.95	88.24	57.22	35.83	21.99
	Bell	207.41	155.23	108.25	85.87	56.37	36.18	
50	ISCT	198	147	107	90	67	40	25
	Chen	224.93	175.23	125.43	99.76	64.69	40.50	24.87
	Bell	232.65	174.13	121.43	96.32	63.23	40.58	
100	ISCT	222	164	119	101	75	45	28
	Chen	250.90	195.47	139.92	111.29	72.16	45.18	27.74
	Bell	257.90	193.02	134.61	106.77	70.10	44.99	

2060 Santa Cruz, BC								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	74	62	55	47	32	24	16
	Chen	112.45	87.64	62.73	48.97	32.30	20.20	12.38
	Bell	118.49	88.69	61.85	49.06	32.21	20.67	
20	ISCT	89	74	67	57	38	29	19
	Chen	124.45	96.99	69.42	55.20	35.75	22.35	13.70
	Bell	135.68	101.55	70.82	56.17	36.88	23.67	
25	ISCT	94	78	71	60	40	30	20
	Chen	128.31	100.01	71.58	56.91	36.86	23.05	14.12
	Bell	141.21	105.69	73.71	58.46	38.38	24.63	
50	ISCT	108	90	82	69	46	35	23
	Chen	140.32	109.36	78.27	62.24	40.31	25.20	15.45
	Bell	158.40	118.55	82.68	65.58	43.05	27.63	
100	ISCT	123	102	94	79	52	39	26
	Chen	152.32	118.72	84.97	67.56	43.76	27.36	16.77
	Bell	175.59	131.42	91.65	72.69	47.72	30.63	

28111 Tampico, Tamps.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	170	137	104	87	63	44	30
	Chen	216.43	162.33	115.94	93.75	64.12	43.30	29.05
	Bell	233.28	174.60	121.76	96.58	63.41	40.69	
20	ISCT	184	148	112	94	68	48	33
	Chen	250.58	187.94	134.23	108.54	74.24	50.14	33.63
	Bell	267.12	199.92	139.42	110.59	72.60	46.59	
25	ISCT	189	151	114	96	69	49	34
	Chen	261.57	196.18	140.12	113.31	77.50	52.33	35.11
	Bell	278.02	208.08	145.11	115.10	75.56	48.49	
50	ISCT	201	160	121	102	74	52	37
	Chen	295.72	221.79	158.41	128.10	87.61	59.17	39.69
	Bell	311.85	233.40	162.77	129.10	84.76	54.40	
100	ISCT	211	168	127	107	78	55	40
	Chen	329.86	247.40	176.70	142.89	97.73	66.00	44.27
	Bell	345.69	258.73	180.43	143.11	93.96	60.30	

7200 Tapachula, Chis.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	225	184	152	132	92	56	30
	Chen	309.69	244.33	174.94	138.02	87.03	52.26	30.49
	Bell	340.67	254.97	177.81	141.03	92.59	59.42	
20	ISCT	247	202	168	145	101	61	33
	Chen	346.54	273.40	195.75	154.44	97.38	58.47	34.11
	Bell	390.08	291.95	203.60	161.49	106.02	68.04	
25	ISCT	254	207	172	150	104	63	34
	Chen	358.40	282.76	202.45	159.72	100.72	60.47	35.28
	Bell	405.99	303.86	211.90	168.08	110.35	70.82	
50	ISCT	275	224	186	162	113	68	37
	Chen	395.24	311.83	223.26	176.14	111.07	66.69	38.91
	Bell	455.40	340.84	237.69	188.53	123.78	79.44	
100	ISCT	295	240	200	174	122	73	39
	Chen	432.09	340.90	244.08	192.56	121.43	72.91	42.54
	Bell	504.82	377.82	263.48	208.99	137.21	88.06	

20157 Tepelmeme, Oax.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	156	116	81	62	42	26	25.5
	Chen	146.34	113.78	81.30	64.62	41.87	26.22	16.10
	Bell	155.52	116.40	81.17	64.39	42.27	27.13	
20	ISCT	176	134	95	72	50	30	29.5
	Chen	188.84	146.82	104.91	83.39	54.03	33.83	20.78
	Bell	178.08	133.28	92.95	73.72	48.40	31.06	
25	ISCT	182	140	99	76	52	32	31.5
	Chen	202.53	157.46	112.52	89.43	57.95	36.28	22.28
	Bell	185.34	138.72	96.74	76.73	50.38	32.33	
50	ISCT	202	158	113	86	60	36	35.5
	Chen	245.03	190.50	136.13	108.20	70.11	43.90	26.96
	Bell	207.90	155.60	108.51	86.07	56.51	36.26	
100	ISCT	221	175	126	96	68	41	40.5
	Chen	287.53	223.54	159.74	126.96	82.27	51.51	31.63
	Bell	230.46	172.48	120.29	95.41	62.64	40.20	

28114 Tula, Tamps.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	153	111	75	59	38	24	13
	Chen	132.63	103.64	74.22	58.95	38.03	23.64	14.38
	Bell	140.71	105.31	73.44	58.25	38.25	24.54	
20	ISCT	180	129	87	69	43	28	16
	Chen	153.51	119.95	85.90	68.23	44.02	27.35	16.64
	Bell	161.12	120.59	84.10	66.70	43.79	28.10	
25	ISCT	189	135	91	71	45	29	17
	Chen	160.23	125.20	89.66	71.22	45.95	28.55	17.37
	Bell	167.69	125.51	87.52	69.42	45.58	29.25	
50	ISCT	216	152	102	80	51	33	19
	Chen	181.10	141.51	101.34	80.49	51.93	32.27	19.63
	Bell	188.10	140.78	98.18	77.87	51.13	32.81	
100	ISCT	242	170	113	89	56	37	21
	Chen	201.97	157.82	113.02	89.77	57.92	35.99	21.89
	Bell	208.51	156.06	108.83	86.32	56.67	36.37	

27054 Villahermosa, Tab.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	233	188	140	122	85	53	33
	Chen	293.16	224.64	159.83	127.47	83.85	53.75	33.96
	Bell	314.75	235.57	164.28	130.30	85.55	54.90	
20	ISCT	269	214	157	138	96	60	37
	Chen	341.96	262.03	186.43	148.69	97.80	62.69	39.62
	Bell	360.40	269.74	188.11	149.20	97.96	62.87	
25	ISCT	280	223	163	144	99	62	39
	Chen	357.66	274.07	195.00	155.52	102.29	65.57	41.44
	Bell	375.10	280.74	195.78	155.29	101.95	65.43	
50	ISCT	314	249	180	159	110	68	43
	Chen	406.46	311.45	221.60	176.73	116.25	74.52	47.09
	Bell	420.75	314.91	219.61	174.19	114.36	73.39	
100	ISCT	348	275	197	175	120	75	47
	Chen	455.25	348.84	248.20	197.95	130.20	83.46	52.74
	Bell	466.41	349.08	243.44	193.09	126.77	81.36	

13042 Zacualtipan, Hgo.								
T	Mét	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
10	ISCT	168	116	75	60	39	24	12
	Chen	142.80	103.54	75.43	62.76	45.87	33.55	24.55
	Bell	144.41	108.08	75.38	59.79	39.25	25.19	
20	ISCT	187	130	83	67	43	26	13
	Chen	178.02	129.07	94.04	78.23	57.18	41.83	30.61
	Bell	165.36	123.76	86.31	68.46	44.95	28.84	
25	ISCT	193	134	85	69	45	27	14
	Chen	189.35	137.29	100.03	83.21	60.82	44.49	32.55
	Bell	172.10	128.81	89.83	71.25	46.78	30.02	
50	ISCT	212	147	93	76	49	30	15
	Chen	224.57	162.82	118.63	98.69	72.13	52.76	38.61
	Bell	193.05	144.49	100.76	79.92	52.47	33.67	
100	ISCT	230	160	100	82	54	33	17
	Chen	259.78	188.35	137.23	114.17	83.44	61.04	44.66
	Bell	214.00	160.16	111.69	88.59	58.16	37.33	

Tabla A.2. Isoyetas SCT 2000 vs Chen.

Estación	T	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
7006	10	■	■					■
	20	■	■					■
	25	■	■					■
	50	■	■					■
	100	■	■					■
6001	10	■	■	■	■			
	20	■	■	■	■			■
	25	■	■	■	■			■
	50	■	■	■	■			■
	100	■	■	■	■		■	■
19035	10	■	■					
	20	■	■	■				
	25	■	■	■				
	50	■	■	■				
	100	■	■	■				
23032	10							
	20	■						
	25						■	
	50						■	■
	100					■	■	■
31007	10	■						■
	20	■	■	■	■			■
	25	■	■	■	■			■
	50	■	■	■	■			■
	100	■	■	■	■		■	■
16022	10							■
	20						■	■
	25						■	■
	50	■	■	■	■		■	■
	100	■	■	■	■		■	■
12022	10	■	■	■	■			■
	20	■	■	■	■	■		■
	25	■	■	■	■	■		■
	50	■	■	■	■	■		■
	100	■	■	■	■	■		■
25015	10	■	■					
	20	■	■	■				
	25	■	■	■				
	50	■	■	■				
	100	■	■	■			■	■
26139	10	■	■					
	20	■	■					
	25	■	■					
	50	■	■					
	100	■	■					
4013	10	■						
	20	■						
	25	■						
	50	■			■			
	100	■		■	■			
26045	10							
	20			■				
	25			■				
	50		■	■				
	100		■	■				
20039	10	■	■					
	20	■	■					
	25	■	■					
	50	■	■	■				
	100	■	■	■				
26048	10							■
	20							■
	25							■
	50							■
	100							■
3074	10							■
	20							■
	25							■
	50							■
	100						■	■
30102	10		■					■
	20							
	25							
	50							
	100						■	
20070	10	■	■	■			■	■
	20	■	■	■			■	■
	25	■	■	■			■	■
	50	■	■	■			■	■
	100	■	■	■			■	■
30216	10	■	■	■	■			
	20	■	■	■	■			
	25	■	■	■	■			
	50	■	■	■	■			
	100	■	■	■	■			
24045	10	■	■					
	20	■	■					
	25	■	■					
	50	■	■					
	100	■	■					

Estación	T	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
25074	10	■	■	■				
	20	■	■	■				
	25	■	■	■	■			
	50	■	■	■	■		■	
	100	■	■	■	■		■	

Estación	T	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
26024	10							■
	20		■				■	■
	25	■	■	■			■	■
	50	■	■	■	■	■	■	■
	100	■	■	■	■	■	■	■

Estación	T	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
5026	10							
	20	■	■					
	25	■	■					
	50	■	■	■				
	100	■	■	■				

Estación	T	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
26069	10	■	■	■	■		■	■
	20	■	■	■	■		■	■
	25	■	■	■	■		■	■
	50	■	■	■	■	■	■	■
	100	■	■	■	■	■	■	■

Estación	T	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
5033	10							■
	20							
	25							
	50							
	100							

Estación	T	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
5048	10							■
	20						■	■
	25						■	■
	50						■	■
	100					■	■	■

Estación	T	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
28086	10	■	■					■
	20	■	■					■
	25	■	■					■
	50	■	■					■
	100	■	■					■

Estación	T	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
19058	10	■	■	■				
	20	■	■	■				
	25	■	■	■				
	50		■	■				
	100		■	■				

Estación	T	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
2060	10	■	■					■
	20	■	■					■
	25	■	■					■
	50	■	■					■
	100	■	■				■	■

Estación	T	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
28111	10	■	■					
	20	■	■	■				
	25	■	■	■	■			
	50	■	■	■	■	■		
	100	■	■	■	■	■	■	

Estación	T	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
7200	10	■	■	■				
	20	■	■	■				
	25	■	■	■				
	50	■	■	■				
	100	■	■	■				

Estación	T	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
20157	10							■
	20				■			■
	25				■			■
	50	■	■	■	■	■	■	■
	100	■	■	■	■	■	■	■

Estación	T	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
28114	10							
	20							
	25	■						
	50							
	100	■						

Estación	T	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
27054	10	■	■					
	20	■	■	■				
	25	■	■	■				
	50	■	■	■				
	100	■	■	■				

Estación	T	d (min)						
		5	10	20	30	60	120	240
13042	10	■				■	■	■
	20				■	■	■	■
	25			■	■	■	■	■
	50			■	■	■	■	■
	100	■	■	■	■	■	■	■

Tabla A.3. Isoyetas SCT 2000 vs Bell.

Estación	T	d (min)					
		5	10	20	30	60	120
7006	10	■	■				
	20	■	■				■
	25	■	■				■
	50	■	■	■	■		■
	100	■	■	■	■		■
6001	10	■	■	■	■		
	20	■	■	■	■		
	25	■	■	■	■		
	50	■	■	■	■		
	100	■	■	■	■		
19035	10	■	■	■	■		
	20	■	■	■	■		
	25	■	■	■	■		
	50	■	■	■	■		
	100	■	■	■	■		
23032	10	■					
	20	■					
	25						
	50						
	100						
31007	10	■	■				
	20	■	■				
	25	■	■				
	50	■	■				
	100	■	■				
16022	10						■
	20						■
	25						■
	50					■	■
	100	■	■		■	■	■
12022	10	■	■	■	■		
	20	■	■	■	■		
	25	■	■	■	■		
	50	■	■	■	■		
	100	■	■	■	■	■	
25015	10	■	■				
	20	■	■	■			
	25	■	■	■			■
	50	■	■	■			■
	100	■	■	■			■
26139	10	■	■				■
	20	■	■				
	25	■	■				
	50	■	■				
	100	■	■				
4013	10	■					
	20	■					
	25	■					
	50	■					
	100	■					
26045	10						■
	20						■
	25						■
	50				■		■
	100		■	■			
20039	10	■	■				
	20	■	■				
	25	■	■				
	50	■	■				
	100	■	■				
26048	10						■
	20						■
	25						■
	50						■
	100						■
3074	10						
	20						
	25						
	50		■	■			
	100		■	■			
30102	10	■	■				
	20	■	■				
	25	■	■				■
	50	■	■				■
	100	■	■				■
20070	10		■	■			■
	20	■	■	■			■
	25	■	■	■			■
	50	■	■	■			■
	100	■	■	■			■
30216	10	■	■	■	■		
	20	■	■	■	■		
	25	■	■	■	■		
	50	■	■				■
	100	■	■				■
24045	10	■	■				
	20	■	■				
	25	■	■				
	50	■	■				
	100	■	■				

Estación	T	d (min)					
		5	10	20	30	60	120
25074	10	■	■	■			
	20	■	■	■			
	25	■	■	■	■		
	50	■	■	■	■		
	100	■	■	■	■		

Estación	T	d (min)					
		5	10	20	30	60	120
26024	10		■				■
	20	■	■				■
	25	■	■				■
	50	■	■	■	■	■	■
	100	■	■	■	■	■	■

Estación	T	d (min)					
		5	10	20	30	60	120
5026	10						■
	20	■	■				■
	25	■	■	■			■
	50	■	■	■			■
	100	■	■	■			■

Estación	T	d (min)					
		5	10	20	30	60	120
26069	10	■	■	■	■		
	20	■	■	■	■		■
	25	■	■	■	■		■
	50	■	■	■	■	■	■
	100	■	■	■	■	■	■

Estación	T	d (min)					
		5	10	20	30	60	120
5033	10						
	20						
	25						
	50						
	100						

Estación	T	d (min)					
		5	10	20	30	60	120
5048	10						■
	20			■	■		■
	25	■	■	■			■
	50	■	■	■			■
	100	■	■	■			■

Estación	T	d (min)					
		5	10	20	30	60	120
28086	10	■	■				
	20	■	■				
	25	■	■				
	50	■	■				
	100	■	■				

Estación	T	d (min)					
		5	10	20	30	60	120
19058	10	■	■	■			
	20	■	■	■			
	25	■	■	■			
	50	■	■	■			
	100	■	■	■			

Estación	T	d (min)					
		5	10	20	30	60	120
2060	10	■	■				
	20	■	■				■
	25	■	■				■
	50	■	■				■
	100	■	■				■

Estación	T	d (min)					
		5	10	20	30	60	120
28111	10	■	■	■			
	20	■	■	■	■		
	25	■	■	■	■		
	50	■	■	■	■		
	100	■	■	■	■	■	

Estación	T	d (min)					
		5	10	20	30	60	120
7200	10	■	■	■			
	20	■	■	■			
	25	■	■	■			
	50	■	■	■	■		■
	100	■	■	■	■		■

Estación	T	d (min)					
		5	10	20	30	60	120
20157	10						
	20						
	25						
	50						
	100						

Estación	T	d (min)					
		5	10	20	30	60	120
28114	10						
	20						
	25						
	50						
	100						

Estación	T	d (min)					
		5	10	20	30	60	120
27054	10	■	■	■			
	20	■	■	■			
	25	■	■	■			
	50	■	■	■			
	100	■	■	■			

Estación	T	d (min)					
		5	10	20	30	60	120
13042	10						
	20						
	25						
	50						
	100						