



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**APLICACIÓN DE LA FÓRMULA RACIONAL EN LA DELEGACIÓN
GUSTAVO A. MADERO DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN HIDRÁULICA

PRESENTA:

ING. IVONNE PAVÓN IBARRA

DIRECTOR DE TESINA: **DRA. RUIZ URBANO MARÍA DEL ROSÍO**

MÉXICO, CDMX.

OCTUBRE 2017

Contenido

1. Introducción	1
2. Componentes del tema	3
2.1. Justificación	3
2.2. Objetivos	6
2.2.1. Objetivo general	6
2.2.2. Objetivos específicos	6
2.3. Hipótesis	6
3. Antecedentes	7
3.1. Precipitación	7
3.1.1. Tipos de precipitación	8
3.1.2. Medición de la precipitación	9
3.1.3. Intensidad de las lluvias	11
3.1.4. Curvas intensidad – duración – período de retorno	12
3.1.4.1. Fórmula de F. C. Bell	12
3.1.4.2. Fórmula de Cheng-Lung Chen	13
3.1.4.3. Determinación matemática de las curvas i-d-T	14
3.2. Información meteorológica	15
3.3. Escurrimiento	16
3.3.1. Definición de escurrimiento	16
3.3.2. Clasificación de suelos	18
3.3.3. Uso de suelo	20
3.3.4. Textura del suelo	21
3.3.5. Coeficiente de escurrimiento	22
3.3.6. Fórmula Racional	27
3.4. Conceptos de probabilidad y estadística	28
3.4.1. Período de Retorno	28
3.4.2. Pruebas de homogeneidad	29
3.4.2.1. Prueba estadística de Helmer	30
3.4.2.2. Prueba estadística t de Student	30
3.4.2.3. Prueba estadística de Cramer	30

3.4.3.	Prueba de bondad de ajuste	32
3.4.4.	Funciones de distribución de probabilidad	32
3.4.4.1.	Función de distribución de probabilidad Normal.....	33
3.4.4.2.	Función de distribución de probabilidad Log Normal	35
3.4.4.3.	Función de distribución de probabilidad Gumbel.....	36
4.	Caso de estudio. Gastos máximos de diseño	37
4.1.	Metodología: Visión general	37
4.2.	Descripción de la zona de estudio.....	39
4.3.	Información de estaciones meteorológicas	40
4.3.1.	Información pluviográfica	40
4.3.1.1.	Selección de precipitaciones máximas.....	42
4.3.1.2.	Selección de intensidades máximas.....	44
4.3.1.3.	Construcción de curvas i-d-T.....	45
4.3.2.	Información pluviométrica	49
4.3.2.1.	Selección de precipitaciones máximas.....	51
4.3.2.2.	Pruebas de Homogeneidad	52
4.3.2.3.	Análisis de frecuencia.....	52
4.3.2.4.	Determinación de Variables Regionales.....	53
4.3.2.5.	Estimación de curvas i-d-T.....	55
4.3.3.	Contraste entre intensidades calculadas y estimadas	61
4.4.	Información de tipos de suelo.....	68
4.5.	Gastos máximos	71
4.6.	Discusión de resultados.....	87
5.	Conclusiones y recomendaciones	89
5.1.	Conclusiones.....	89
5.2.	Recomendaciones	89
6.	Referencias.....	90
	Anexos.....	92
	Anexo I Pruebas de Homogeneidad	92
	Anexo II Análisis de Frecuencia	98

Índice de figuras

Figura 1 Daños y pérdidas por desastres naturales y antrópicos período 2000-2016 (Bitrán Bitrán, 2001).....	4
Figura 2 Daños y pérdidas por desastres naturales y antrópicos ocurridos en el año 2016 (CENAPRED, 2016)	4
Figura 3 Distribución estatal de daños y pérdidas para el año 2016 (CENAPRED, 2016).....	5
Figura 4 Relación Duración-Intensidad de una tormenta.....	11
Figura 5 Clasificación de las estaciones meteorológicas (OMM, 2015)	15
Figura 6 Tipos de escurrimiento.	17
Figura 7 Representación gráfica de la Fórmula Racional	28
Figura 8 Metodología. Visión general	38
Figura 9 Localización de la zona de estudio	40
Figura 10 Localización de estaciones meteorológicas automáticas PEMBU.....	41
Figura 11 Curvas i-d-T. Estación meteorológica automática PLANTEL 3.....	46
Figura 12 Curvas i-d-T. Estación meteorológica automática PLANTEL 9.....	47
Figura 13 Curvas i-d-T. Estación meteorológica automática PLANTEL Vallejo.....	48
Figura 14 Localización de estaciones meteorológicas climatológicas SMN-CONAGUA	50
Figura 15 Curvas i-d-T. Estación climatológica clave 9017.....	56
Figura 16 Curvas i-d-T. Estación climatológica clave 9025.....	58
Figura 17 Curvas i-d-T. Estación climatológica clave 9043.....	59
Figura 18 Curvas i-d-T. Estación climatológica clave 9062.....	61
Figura 19 Correlación de intensidades T = 2 años	62
Figura 20 Correlación de intensidades T = 5 años	63
Figura 21 Correlación de intensidades T = 10 años	63
Figura 22 Correlación de intensidades T = 20 años	64
Figura 23 Correlación de intensidades T = 50 años	64
Figura 24 Correlación de intensidades T = 100 años	65
Figura 25 Correlación de intensidades T = 500 años	65
Figura 26 Correlación de intensidades T = 1,000 años	66
Figura 27 Correlación de intensidades T = 5,000 años	66
Figura 28 Correlación de intensidades T = 10,000 años	67
Figura 29 Edafología de la zona de estudio.....	69
Figura 30 Textura del suelo de la zona de estudio.....	70
Figura 31 Uso de suelo de la zona de estudio.....	71
Figura 32 Delimitación en subregiones de la zona de estudio a partir de polígonos de Thiessen.....	72
Figura 33 Tiempo de concentración (t_c) de la zona de estudio.....	73
Figura 34 Número de escurrimiento de la zona de estudio	74
Figura 35 Corrección de número de escurrimiento de la zona de estudio.....	75
Figura 36 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 2 años	77
Figura 37 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 5 años	78
Figura 38 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 10 años	79
Figura 39 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 20 años	80
Figura 40 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 50 años	81
Figura 41 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 100 años	82
Figura 42 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 500 años	83
Figura 43 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 1,000 años	84
Figura 44 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 5,000 años	85

Figura 45 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 10,000 años 86

Índice de tablas

Tabla 1 Daños y pérdidas por desastres naturales y antrópicos período 1980 a 1999	3
Tabla 2 Clasificación de suelos	19
Tabla 3 Clasificación de tipo de suelo según su textura	22
Tabla 4 Clasificación de tipo suelo según su permeabilidad.....	24
Tabla 5 Número de escurrimiento según uso de suelo y vegetación.....	25
Tabla 6 Corrección del número de escurrimiento según la altura de precipitación cinco días antes	26
Tabla 7 Estaciones meteorológicas automáticas PEMBU en la zona de estudio.....	41
Tabla 8 Relación de registro de datos por estación meteorológica automática PEMBU	42
Tabla 9 Precipitaciones máximas para diferentes duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL 3	43
Tabla 10 Precipitaciones máximas para diferentes duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL 9	43
Tabla 11 Precipitaciones máximas para diferentes duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL Vallejo.....	44
Tabla 12 Intensidades máximas para diferentes duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL 344	
Tabla 13 Intensidades máximas para diferentes duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL 945	
Tabla 14 Intensidades máximas para diferentes duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL Vallejo.....	45
Tabla 15 Intensidades máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL 3	46
Tabla 16 Intensidades máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL 9	47
Tabla 17 Intensidades máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL Vallejo	48
Tabla 18 Estaciones climatológicas SMN-CONAGUA en la zona de estudio	49
Tabla 19 Relación de registro de datos por estación climatológica	50
Tabla 20 Precipitaciones máximas anuales. Estaciones climatológicas de la zona de estudio	51
Tabla 21 Pruebas de Homogeneidad. Estaciones climatológicas de la zona de estudio	52
Tabla 22 Prueba de bondad de ajuste de la distribución de probabilidad. Estaciones climatológicas de la zona de estudio	53
Tabla 23 Parámetros de la función de distribución de probabilidad con mejor ajuste para las estaciones climatológicas.....	53
Tabla 24 Variables regionales de las estaciones climatológicas de la zona de estudio.....	55
Tabla 25 Precipitaciones máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación climatológica clave 9017.....	55
Tabla 26 Intensidades máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación climatológica clave 9017.....	56
Tabla 27 Precipitaciones máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación climatológica clave 9025.....	57
Tabla 28 Intensidades máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación climatológica clave 9025.....	57
Tabla 29 Precipitaciones máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación climatológica clave 9043.....	58

<i>Tabla 30 Intensidades máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación climatológica clave 9043.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 31 Precipitaciones máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación climatológica clave 9062.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 32 Intensidades máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación climatológica clave 9062.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 33 Precipitación efectiva para distintos períodos de retorno y duración igual a t_c.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 34 Coeficiente de escurrimiento para distintos períodos de retorno y duración igual a t_c.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 35 Gastos máximos de diseño para distintos períodos de retorno y duración igual a t_c</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 36 Diferencias de características entre algunas estaciones meteorológicas.....</i>	<i>88</i>

1. Introducción

Los procesos de urbanización a los cuales están sujetas las ciudades tienen un impacto considerable en el medio natural donde se desarrollan. Estas modificaciones originan importantes cambios en el comportamiento hidrológico de la región con respecto a las condiciones previas al desarrollo. Ejemplos importantes a considerar de los efectos hidrológicos que conllevan dichas modificaciones, es el incremento del volumen y velocidad del escurrimiento superficial. El aumento del escurrimiento superficial es consecuencia de la disminución de las pérdidas por evapotranspiración, interceptación de la cobertura vegetal, almacenamiento superficial e infiltración, ya que se presenta un cambio en el uso de suelo.

En consecuencia, los efectos hidrológicos pueden causar inundaciones, así como daños de diversa índole tanto materiales como sanitarios, por lo que surge la necesidad de analizar y estimar los eventos de diseño con los cuales se propone el diseño y dimensionamiento de la infraestructura de las obras hidráulicas de derivación, conducción, retención, mitigación y protección.

A lo largo de los años, el análisis y estimación de eventos de diseño han constituido numerosas investigaciones en el campo de la Hidrología. Al intentar estimar eventos de diseño más allá de los registrados, se presenta el inconveniente de desconocer su magnitud y ocurrencia, que son datos fundamentales para dimensionar cualquier estructura hidráulica, considerando también que los resultados de las estimaciones son aceptados bajo un cierto riesgo, ya que se trabaja con variables aleatorias.

En cuanto a los métodos de estimación de gastos máximos se pueden distinguir varios métodos:

- Métodos empíricos.
- Métodos hidrometeorológicos

La estimación de crecientes mediante métodos hidrometeorológicos se considera confiable y eficiente, ya que transforman lluvias de diseño en gastos máximos, al tomar las condiciones físicas actuales y /o futuras de las áreas o cuencas urbanas. La aplicación de estos métodos comienza con la extracción de las características fisiográficas de la región de estudio y la construcción o estimación de las curvas intensidad-duración-período de retorno (i-d-T), según se dispone de información pluviográfica o únicamente de información pluviométrica. Las curvas i-d-T representan las características relevantes de las tormentas que ocurren en la zona.

Una vez caracterizada la cuenca y estimadas las intensidades, el siguiente paso es aplicar la Fórmula Racional para calcular los gastos máximos de diseño para los diferentes períodos de retorno asignados.

El presente trabajo está constituido por 5 capítulos cuyo objetivo es el cálculo de los gastos máximos de diseño para distintos períodos de retorno.

En el segundo capítulo se expone la justificación e importancia de calcular los gastos máximos de diseño, además del objetivo general que se pretende lograr a través de este trabajo y los objetivos específicos que se plantean en el proceso de obtención de dichos gastos.

En el tercer capítulo titulado Antecedentes, se describe el marco teórico en el cual se fundamenta la metodología empleada para el desarrollo del presente. En este contexto, se exponen los diferentes tipos de precipitación, su medición y la formación de las curvas intensidad-duración-período de retorno; se incluye una descripción del escurrimiento y como obtener el coeficiente de escurrimiento en función del uso de suelo, tipo de suelo y la cobertura vegetal. Por último, se explican algunos conceptos de probabilidad y estadística aplicables a la información de lluvias para la obtención de gastos máximos de diseño como el período de retorno, pruebas de homogeneidad, pruebas de bondad de ajuste y algunas funciones de distribución de probabilidad.

En el cuarto capítulo se presenta la descripción de la zona de estudio, la información relacionada con precipitación y tipo de suelo; también se detallan los criterios y metodología para la obtención de gastos máximos de diseño a través de la Fórmula Racional y su aplicación práctica. Posterior a ello se hace un análisis de los resultados obtenidos.

Finalmente, en el quinto capítulo se presentan las conclusiones y/o recomendaciones más importantes obtenidas durante la realización del trabajo.

2. Componentes del tema

2.1. Justificación

Debido a la ubicación geográfica, características climáticas, topográficas, orográficas e hidrológicas, por la actividad volcánica y sísmica, México es un país propenso a sufrir desastres naturales.

Tomando en consideración el período del año 1980 al 1999, los daños totales en millones de pesos, registrados en la economía mexicana, por concepto de desastres naturales y antrópicos se sintetizan en la Tabla 1:

Tabla 1 Daños y pérdidas por desastres naturales y antrópicos período 1980 a 1999

Tipo de evento	Decesos	Daños directos	Daños indirectos	Total Daños
Hidrometeorológico	2,767	41,821.85	1376.55	43,198.40
Geológico	6,097	38,415.15	4905.8	43,320.95
Antrópico	1,250	10,922.15	1269.2	12,191.35
Total	10,114	91,159.15	7,551.55	98,710.70

Fuente: (Bitrán Bitrán, 2001)

En la tabla anterior puede apreciarse que los fenómenos geológicos ocasionaron el 43.9% de los daños totales registrados en la economía por concepto de desastres naturales en ese período, en tanto que los eventos de tipo hidrometeorológico representan el 43.8%.

La tendencia histórica de costos económicos en México para el período 2000-2016 se representa en la Figura 1, donde destacan los montos elevados para años específicos, en los cuales se presentaron eventos de magnitudes considerables: en 2005, el huracán Wilma; en 2007, las inundaciones en Tabasco; en 2010, los huracanes Alex, Karl y Mathew, y en 2013, los ciclones tropicales Ingrid y Manuel.

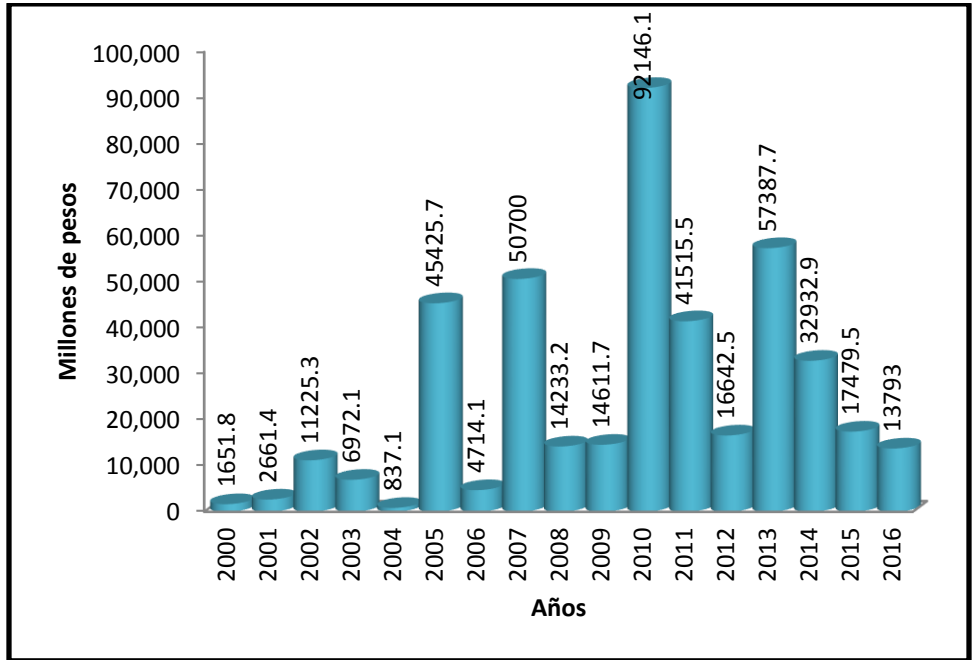


Figura 1 Daños y pérdidas por desastres naturales y antrópicos período 2000-2016 (Bitrán Bitrán, 2001)

Los daños y pérdidas estimados por desastres naturales y antrópicos ocurridos en 2016 ascendieron a 13,793 millones de pesos. Durante dicho año, el mayor monto de daños y pérdidas correspondió a los fenómenos hidrometeorológicos con 86.6% (11,947.9 millones de pesos). Del monto por desastres hidrometeorológicos el 70.5% correspondió a lluvias fuertes, mientras que el 24.6% a ciclones tropicales, el restante 4.9% correspondió a fenómenos como nevadas, heladas, fuertes vientos y tormentas severas.

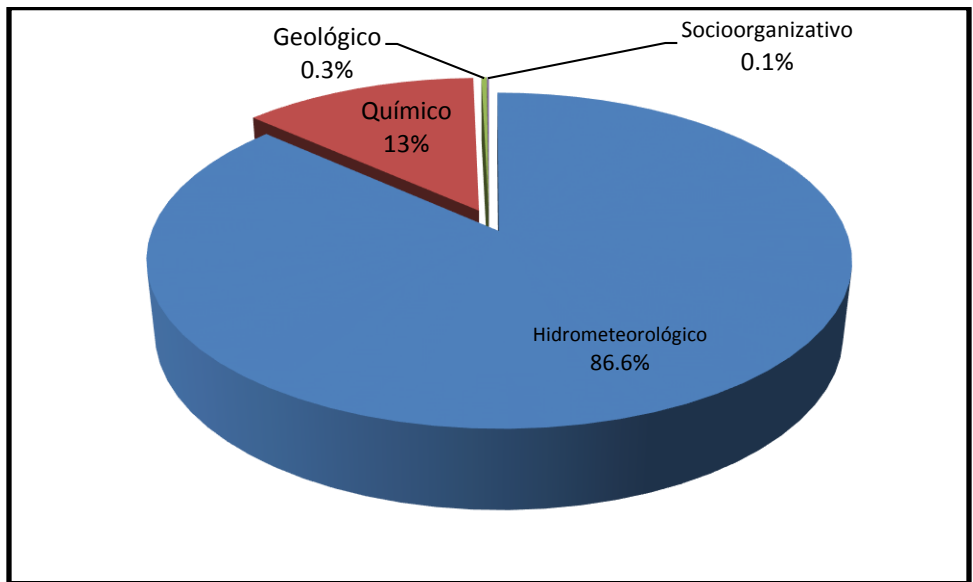


Figura 2 Daños y pérdidas por desastres naturales y antrópicos ocurridos en el año 2016 (CENAPRED, 2016)

Para el año 2016, los estados con mayores daños y pérdidas fueron Puebla, Guerrero y Durango. Las pérdidas económicas de estas tres entidades federativas alcanzaron 46.6% del total estimado. En el caso de la Ciudad de México, el monto asciende a 8.1 millones de pesos, que corresponde a la posición número 18. En la Figura 3 se aprecia la distribución estatal de daños y pérdidas para el año 2016.

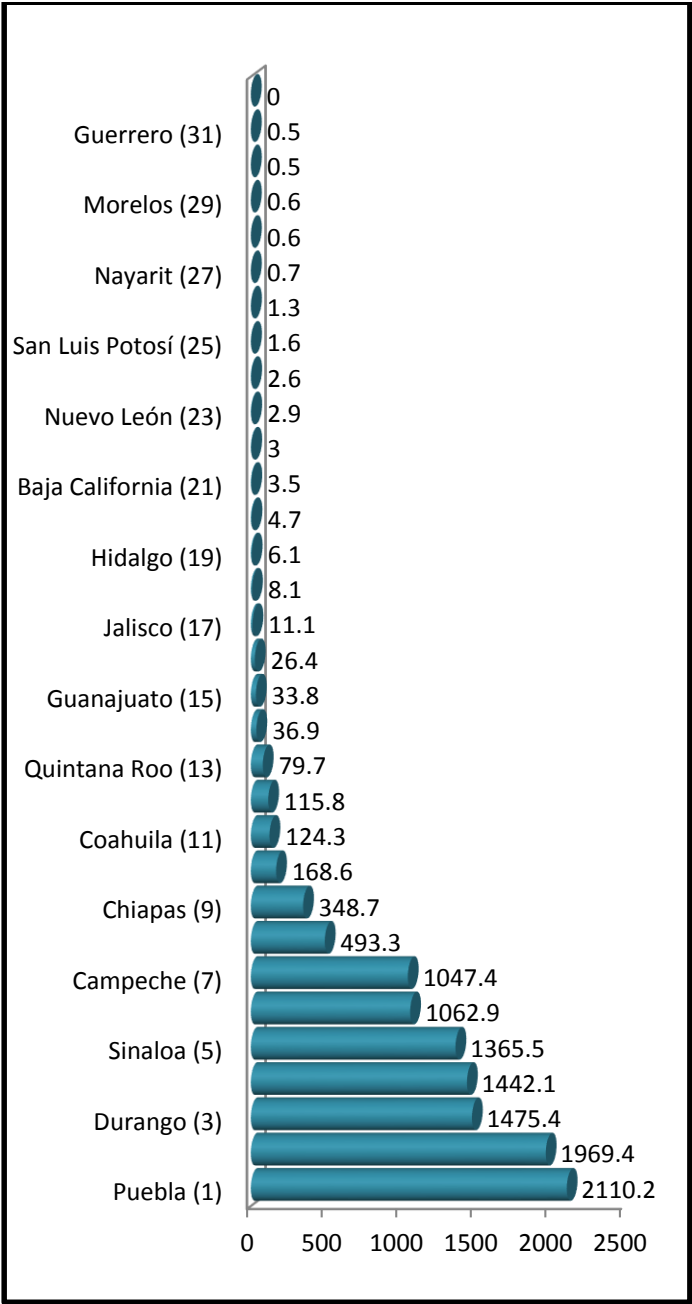


Figura 3 Distribución estatal de daños y pérdidas para el año 2016 (CENAPRED, 2016)

Haciendo un análisis de las cifras relacionadas con daños y pérdidas debidas a desastres naturales y en particular a desastres hidrometeorológicos en la República Mexicana, se hace evidente la necesidad de obtener y procesar la información para plantear y diseñar hidrológicamente las obras y medidas estructurales y no estructurales que son requeridas para evitar y/o corregir los problemas debidos a precipitación.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo general

Definir los gastos máximos de diseño para períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1000 y 10000 años de la demarcación territorial Gustavo Adolfo Madero de la Ciudad de México.

2.2.2. Objetivos específicos

- Determinar las curvas intensidad-duración-período de retorno (i-d-T) a partir de información de estaciones meteorológicas que cuentan con registros pluviográficos y registros pluviométricos para distintas duraciones y períodos de retorno.
- Comparar los resultados obtenidos de las curvas i-d-T, derivadas de registros pluviográficos con las estimadas con registros pluviométricos.
- Obtener los coeficientes de escurrimiento en la región de estudio.
- Calcular los gastos máximos de diseño para los diferentes períodos de retorno y duraciones.

2.3. Hipótesis

La comparación de las curvas intensidad-duración-período de retorno estimadas a partir de información de registros pluviográficos y registros pluviométricos presentan un comportamiento similar, lo cual se corrobora mediante una correlación entre los datos con un valor del coeficiente de determinación del orden de 0.9, lo que conlleva a que la obtención de los gastos máximos de diseño puede calcularse a través de cualquier tipo de registro sin presentar una diferencia significativa.

3. Antecedentes

3.1. Precipitación

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) define meteoros como: “el fenómeno observado en la atmósfera o sobre la superficie de la tierra, que consiste en una suspensión, una precipitación o un depósito de partículas líquidas, acuosas o no, o de partículas sólidas, o un fenómeno de la naturaleza de manifestación óptica o eléctrica”. (OMM, Atlas Internacional de Nubes: Manual de observación de nubes y otros meteoros., 1993).

De acuerdo a la naturaleza de las partículas constituyentes o a los procesos físicos que implica su ocurrencia, los meteoros han sido clasificados en cuatro grupos: hidrometeoros, litometeoros, fotometeoros y electrometeoros.

Partiendo de lo anterior, los hidrometeoros hacen referencia al conjunto de partículas de agua líquida o sólida, suspendidas en la atmósfera o cayendo a través de ella, o que son empujadas por el viento desde la superficie de la tierra, o depositadas sobre objetos que se encuentran sobre el suelo o en el aire libre.

Estos hidrometeoros, a su vez, se pueden clasificar en:

- a) Consistente en una suspensión de partículas en la atmósfera:
 - Niebla
 - Niebla helada
- b) Consistentes en la caída de un conjunto de partículas (precipitación):
 - Lluvia
 - Lluvia sobreenfriada
 - Llovizna
 - Llovizna sobreenfirada
 - Nieve
 - Cinarra
 - Nieve granulada
 - Polvo brillante
 - Granizo
 - Granizo pequeño
 - Gránulos de hielo
- c) Consistente en conjuntos de partículas levantadas por el viento
 - Ventiscas de nieve
 - Roción
- d) Consistente en un depósito de partículas
 - Depósito de gotitas de niebla
 - Rocío
 - Rocío blanco
 - Escarcha

- Cencellada blanca
 - Hielo liso
- e) Tromba

Por lo que compete a este trabajo, se tiene la siguiente descripción de los hidrometeoros consistentes en la caída de un conjunto de partículas (precipitación):

- Lluvia: precipitación de gotas de agua que caen desde una nube. El diámetro de gotas de agua varía de acuerdo a la intensidad de la precipitación y a su naturaleza.
- Lluvia sobreenfriada: lluvia con gotas a temperatura por debajo de 0 °C.
- Llovizna: precipitación uniforme de gotas de agua muy finas y muy próximas unas de otras que caen desde una nube.
- Llovizna sobreenfriada: llovizna con gotas de temperatura por debajo de 0 °C.
- Nieve: Precipitación de cristales de hielo, aislados o aglomerados, que caen desde una nube.
- Cinarra: precipitación de partículas de hielo muy pequeñas opacas y blancas que caen desde una nube. Estas partículas son bastante chatas o elongadas; su diámetro es generalmente inferior a 1 mm.
- Nieve granulada: precipitación de partículas de hielo blancas y opacas, que caen desde una nube. Estas partículas son generalmente cónicas o redondeadas. Su diámetro puede llegar a 5 mm.
- Polvo brillante: precipitación de cristales de hielo muy pequeños, que cae de un cielo claro, a menudo tan fina que parece suspendida en el aire.
- Granizo: precipitación de partículas de hielo transparentes o parcialmente o enteramente opacas (piedras de granizo), habitualmente de forma esferoidal, cónica o irregular, que caen desde una nube, ya sea por separado o aglomerados en bloques irregulares. Su diámetro se encuentra entre 5 y 50 mm.
- Granizo pequeño o cellisca: precipitación de partículas de hielo traslúcido que caen desde una nube. Casi siempre estas partículas son esféricas y a veces tienen puntas cónicas. Su diámetro puede alcanzar los 5 mm.
- Gránulos de hielo: precipitación de partículas transparentes de hielo, que caen desde una nube, de forma esférica o irregular, raramente cónica. Su diámetro es de 5 mm o menos.

3.1.1. Tipos de precipitación

La formación de precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Los tres principales mecanismos para la elevación de masas de aire son: la elevación ciclónica, la elevación orográfica y la elevación convectiva.

La precipitación ciclónica es provocada por la elevación de una masa de aire convergente en un área de baja presión. Puede estar asociada o no a la presencia de frentes; definiendo un frente como la superficie de separación entre masas de aire de diferente temperatura y densidad.

La precipitación frontal se relaciona a un frente frío o a un frente cálido. En el frente frío la masa de aire cálido es desplazada abruptamente hacia arriba por la masa de aire frío ocasionando la condensación y precipitación. En el frente cálido la masa de aire caliente asciende con una pendiente suave debido a la resistencia de la masa de aire frío, condensándose y dando lugar a la precipitación.

La precipitación no frontal resulta de la convergencia y ascenso de una masa de aire, asociada a un área de baja presión atmosférica que produce una precipitación de intensidad moderada, pero de considerable duración.

La precipitación orográfica tiene su origen cuando una masa de aire cálido y húmedo encuentra una barrera montañosa, de tal manera que es forzada a ascender. A medida que asciende, la masa de aire se enfría y condensa el exceso de agua, produciéndose la precipitación.

La precipitación convectiva es causada por la inestabilidad vertical en un centro de baja presión de una masa de aire más caliente que el que se encuentra en las zonas circundantes. La masa de aire caliente asciende, por lo que se enfría y se condensa, dando lugar a la precipitación.

3.1.2. Medición de la precipitación

La pluviometría hace referencia a las técnicas de valoración y medida de la precipitación del agua, cuyo objetivo consiste en obtener datos sobre el balance de intercambio del agua entre la Tierra y la atmósfera.

Para efectuar la pluviometría deben tomarse en consideración:

1. La forma en que llega la precipitación a la superficie terrestre
2. Las unidades en que se mide la precipitación
3. Las dificultades de las medidas de la precipitación

Para la medición y registro de precipitación se han desarrollado diversos instrumentos, la mayoría referidos a la cantidad de ésta, aunque también pueden encontrarse aparatos para la medida del diámetro de gotas y de identificación del inicio y fin de la misma.

Partiendo de la diversidad de los aparatos de medición se tiene:

- Aparatos para medir la cantidad de precipitación:
 - a) Pluviómetros

En esencia, el aparato consiste en un cilindro recto, de sección conocida, con un borde agudo horizontal (boca) y un dispositivo para recoger el agua (colector), teniendo un embudo entre el colector y la boca, cuyo objetivo es disminuir la evaporación.

Existen diversos tipos de pluviómetros de acuerdo al país en el que se implemente; en general ocupan el mismo principio, la variación radica en la altura de la boca del

aparato sobre el suelo, la situación del colector sobre la tierra o bajo la tierra, la forma de hacer la lectura, etcétera.

b) Nivómetros

Estos aparatos miden la nieve precipitada. Son parecidos a los pluviómetros con algunas modificaciones, entre ellas, la supresión del embudo para aumentar la capacidad y la colocación en el interior de dos tabiques verticales que se cortan normalmente a lo largo del eje del cilindro para evitar que el viento saque la nieve recogida.

c) Totalizadores

Los totalizadores se utilizan para medir la precipitación total en una zona aislada o escasamente habitada, durante un largo período. Estos pluviómetros se componen de un colector unido a un embudo que desemboca en un recipiente que tiene la capacidad necesaria para contener las precipitaciones estacionales.

- Aparatos para registrar la distribución en el tiempo:

d) Pluviógrafos

Consiste en un aparato que proporciona la variación de la altura de precipitación con respecto al tiempo (pluviograma). En términos generales existen tres diseños de pluviógrafos: de pesada, de cangilones y de flotador.

El pluviógrafo de pesada recoge la lluvia caída, de forma continua en un tanque que determina el peso de la misma, su equivalente en lámina se registra en una faja de papel adosada a un tambor movido por un aparato de relojería o a un sistema digital.

El pluviógrafo de cangilones consiste en un recipiente dividido en dos compartimentos, que se coloca en equilibrio inestable sobre un eje horizontal. El agua de lluvia es transferida desde un embudo colector al compartimiento superior; una vez recogido un determinado volumen, la cubeta pierde estabilidad y se inclina hacia su segunda posición de reposo. Los compartimentos están constituidos de tal forma que el agua puede salir del compartimiento inferior y dejarlo vacío, entre tanto el agua cae en el compartimiento superior que ha vuelto a su posición.

En el pluviógrafo de flotador, la precipitación recogida pasa por un recipiente que contiene un flotador; el movimiento vertical de éste, al subir el nivel del agua se transmite por un mecanismo a la pluma que traza el registro. El recipiente que almacena la precipitación debe tener las proporciones adecuadas para que haga un registro apropiado o bien, un mecanismo para vaciarlo (por lo regular se hace uso de un sifón).

- Aparatos para medir la distribución a distancia:
 - e) Radar meteorológico

La medición de la precipitación por medio de radar, se concentra en la altura y la intensidad de la precipitación. Haciendo referencia a la altura de precipitación, a través de fotografías, se aprecia el área del temporal que la produce; en dichas imágenes aparecen zonas luminosas de mayor o menor intensidad, de acuerdo con la variación de las intensidades del eco que se correlacionan con las precipitaciones acumuladas. Por lo que respecta a la intensidad de la precipitación, en las pantallas del radar meteorológico, el eco de las gotas de lluvia es distinto del producido por otros obstáculos y partículas de las nubes, por lo que éste puede ser interpretado como intensidad de la lluvia.

3.1.3. Intensidad de las lluvias

La intensidad de la precipitación es una indicación de la cantidad de lluvia que cae en el período de observación. La intensidad de la precipitación suele medirse en milímetros entre hora.

Debido a que la altura de precipitación está en función del tiempo, la intensidad de la misma depende del intervalo de tiempo considerado (duración). Para realizar el cálculo de la intensidad de lluvia es necesario conocer el registro de precipitación de una tormenta (pluviograma); a partir de éste, se define una duración, para ubicar algún segmento de curva que corresponda a dicha duración. La magnitud del desnivel del segmento de curva dividida entre la duración definida previamente, dará como resultado la intensidad de lluvia, para dicha intervalo en particular.

Al analizar la precipitación en un período suficientemente largo, se tiene como resultado que las tormentas con mayor intensidad son las más breves, las mayores intensidades sólo se dan durante un período muy corto, a medida que el tiempo es mayor, la intensidad media va disminuyendo (Figura 4).

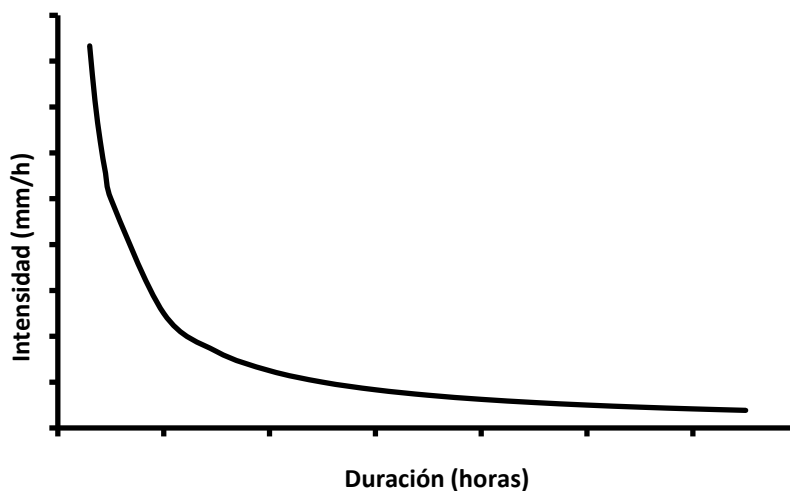


Figura 4 Relación Duración-Intensidad de una tormenta

En cuanto a la aplicación de la intensidad para la construcción y estimación de las curvas i-d-T se establecen algunas consideraciones:

- La variable en cuestión es una intensidad media, resultado de dividir la precipitación registrada en la duración definida por ese período. El cálculo de esa intensidad es, por tanto un valor que no es real, es decir, que la cifra estimada no implica que durante la ventana temporal considerada la intensidad se haya mantenido constante.
- Las precipitaciones que sirven para la obtención de las intensidades medias para las distintas duraciones, son las máximas anuales registradas para ese período.
- Los valores obtenidos para un año en particular correspondientes a distintas ventanas temporales se refieren, en general, a episodios distintos de lluvia.

3.1.4. Curvas intensidad – duración – período de retorno

La precipitación se define a través de tres variables: magnitud o lámina, duración y frecuencia. La magnitud de lluvia es la precipitación total ocurrida (en milímetros) en la duración de la tormenta; la frecuencia se expresa por el período de retorno de la lluvia o su intervalo de ocurrencia, que es el tiempo promedio en años en el cual el evento puede ser igualado o excedido por lo menos una vez en promedio. Las curvas intensidad-duración-período de retorno forman una gráfica en las que se concentran las características de las tormentas de la zona o región, con respecto a las variables mencionadas (Campos Aranda & Gómez de Luna, 1990).

Existen básicamente dos métodos con los que se puede determinar la relación entre las variables intensidad, duración y período de retorno para un sitio dado.

El primero, llamado de intensidad-período de retorno, relaciona estas dos variables para cada duración por separado mediante alguna de las funciones de distribución de probabilidad usadas en hidrología. Cuando se analiza probabilísticamente información de registros pluviográficos y se presentan los resultados en un gráfico definiendo cada curva correspondiente a un período de retorno, se dice que se hace una construcción de curvas i-d-T.

El segundo método relaciona simultáneamente las tres variables en una familia de curvas. A partir de datos de la lluvia máxima anual, se obtienen predicciones con duración de 24 horas y tales datos se utilizan conjuntamente con una fórmula empírica que representa a las curvas i-d-T, lo cual constituye un proceso de estimación de las mismas. Entre las fórmulas que se consideran para la estimación de las curvas intensidad-duración-período de retorno se encuentran las propuestas por F. C. Bell y Cheng-Lung Chen que a continuación se describen.

3.1.4.1. Fórmula de F. C. Bell

Bell (1969) determinó cocientes estables entre la precipitación con duración de una hora y un período de retorno de 10 años y la lluvia de igual ventana temporal pero con diferente período de retorno; posteriormente, combinó las relaciones duración-lluvia con los cocientes frecuencia-lluvia, para obtener una relación general de precipitación-duración-período de retorno, definida por la ecuación siguiente:

$$P_t^T = (0.21 \ln T + 0.52)(0.54t^{0.25} - 0.50)P_{60}^{10} \quad (1)$$

*para $2 \leq T \leq 100$ años
 $5 \leq t \leq 120$ minutos*

Donde:

P_t^T : Precipitación con duración t en minutos y período de retorno T , en milímetros

P_{60}^{10} : Precipitación con duración 60 minutos y período de retorno de 10 años, en milímetros

t : Duración, en minutos

Por último, tomando en cuenta que se han realizado un gran número de investigaciones para obtener la lluvia de duración de una hora y período de retorno de 2 años, Bell presenta la siguiente ecuación en función de dicha lluvia:

$$P_t^T = (0.35 \ln(T) + 0.76)(0.54t^{0.25} - 0.50)P_{60}^2 \quad (2)$$

Donde:

P_t^T : Precipitación de duración t en minutos y período de retorno T , en milímetros

P_{60}^2 : Precipitación de duración 60 minutos y período de retorno de 2 años, en milímetros

t : Duración, en minutos

3.1.4.2. Fórmula de Cheng-Lung Chen

Chen-Lung Chen (1983) propone una ecuación general de intensidad-duración-período de retorno; útil para estimaciones dentro del intervalo de 5 minutos a 24 horas y períodos de retorno mayores a un año.

$$P_t^T = \frac{a \cdot P_1^{10} \cdot \log(10^{2-F} T^{F-1}) \cdot t}{60 \cdot (t + b)^c} \quad (3)$$

Donde:

P_t^T : Precipitación, en milímetros para una duración t y un período de retorno T

T : Período de retorno, en años

t : Duración, en minutos

F : Cociente lluvia-período de retorno, que se calcula con la siguiente ecuación:

$$F = \frac{P_{24}^{100}}{P_{24}^{10}} \quad (4)$$

a, b, c : Parámetros de la tormenta que pueden variar según el cociente lluvia-duración (R), determinado a partir de la siguiente ecuación:

$$R = \frac{P_1^{Tr}}{P_{24}^{Tr}} \quad (5)$$

3.1.4.3. Determinación matemática de las curvas i - d - T

Chow et al. (1994) señalan que las curvas intensidad-duración-período de retorno no sólo se representan de manera gráfica, sino que también pueden expresarse como ecuaciones con el fin de evitar la lectura de la intensidad de lluvia de diseño en una gráfica.

El planteamiento de las primeras relaciones matemáticas, que modelan dichas curvas, data desde el inicio de los años treinta del siglo pasado, y fueron realizadas por Sherman en 1931 y Bernard en 1932 (Pereyra et al., 2004).

A continuación se presentan los modelos matemáticos que se han utilizado para estimar las curvas i - d - T .

$$i = \frac{KT^m}{(D+b)^n}, \quad \text{Modelo propuesto por Sherman (1931)}$$

$$i = \frac{KT^m}{D^n}, \quad \text{Modelo propuesto por Bernard (1932)}$$

$$i = \frac{a}{D+b}, \quad \text{Modelo propuesto por Linsley et al. (1949) para duraciones entre 5 y 20 minutos}$$

$$i = \frac{c}{D^n}, \quad \text{Modelo propuesto por Linsley et al. (1949) para duraciones superiores a 60 minutos}$$

$$i = \frac{K}{D^{n+b}}, \quad \text{Modelo propuesto por Wenzel (1982)}$$

$$i = i_1^T \frac{a}{(D+b)^c}, \quad \text{Modelo propuesto por Chen (1983)}$$

$$i = \frac{KT^m}{D^{n+b}}, \quad \text{Modelo propuesto por Chow et al. (1994)}$$

$$i = K \left\{ \frac{m - \ln[-\ln(1 - \frac{1}{T})]}{(D+b)^n} \right\}, \quad \text{Modelo propuesto por Koutsoyiannis et al. (1998)}$$

Donde a , b , c , K , m , n y b son parámetros adimensionales, i_1^T es la intensidad media de la lluvia de una hora y período de retorno de T años, T es período de retorno, D es la duración e I la intensidad máxima de precipitación.

3.2. Información meteorológica

De acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés), las estaciones de observación meteorológica son sitios donde se pueden realizar observaciones y mediciones puntuales de los diferentes elementos del tiempo y clima con el fin de establecer el comportamiento atmosférico. Las estaciones meteorológicas se pueden clasificar de acuerdo a la Figura 5.

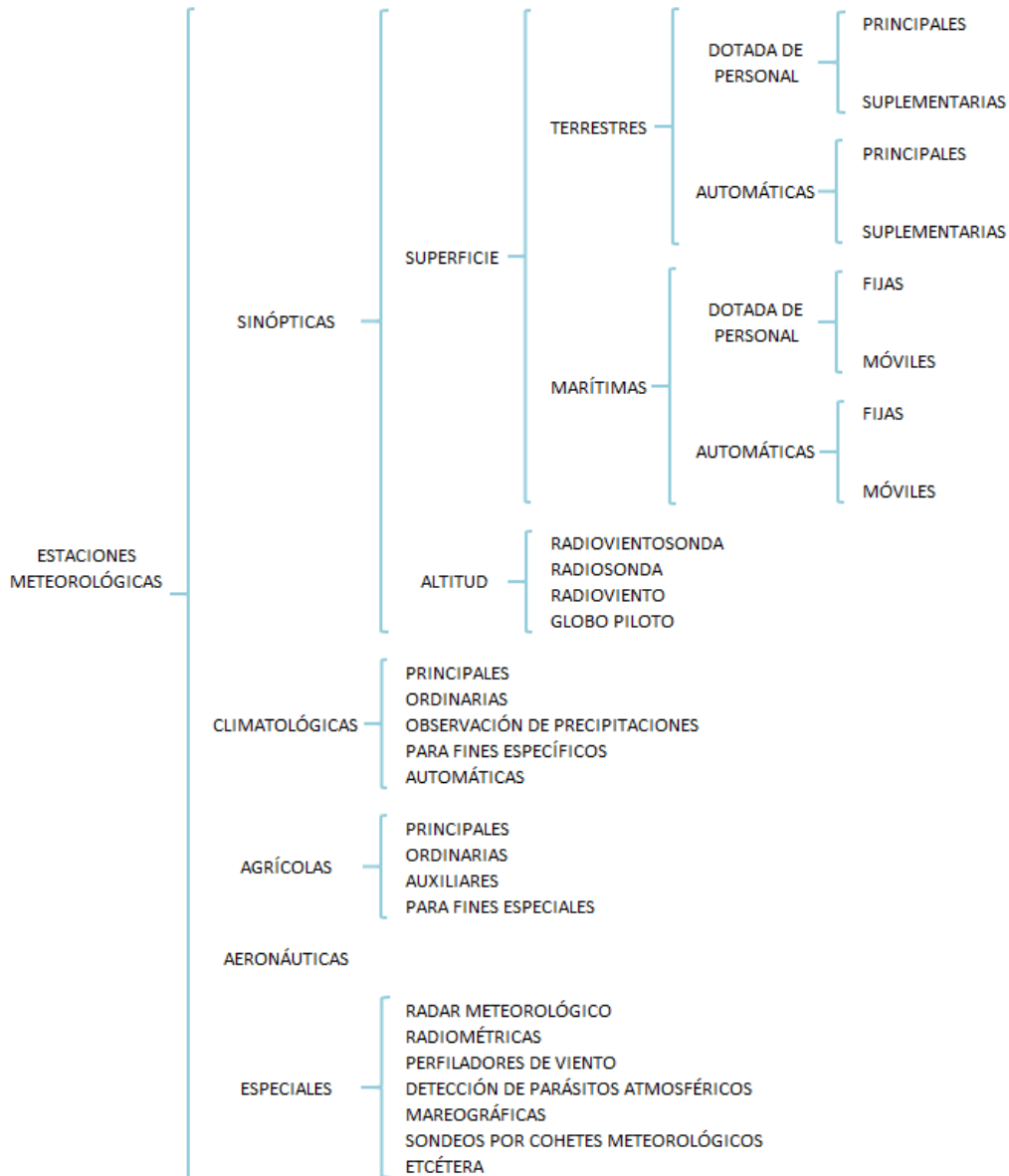


Figura 5 Clasificación de las estaciones meteorológicas (OMM, 2015)

La observación meteorológica consiste en la medición y determinación de todos los elementos que en su conjunto representan las características y variaciones de los elementos atmosféricos en un momento dado y en un determinado lugar. Los principales tipos de observaciones meteorológicas son:

- Sinópticas: Son observaciones que se efectúan a varias horas fijas del día, remitiéndole de inmediato a un centro recolector de datos.
- Climatológicas: Son observaciones que se efectúan para estudiar las condiciones atmosféricas, caracterizado por los estados y evaluaciones del tiempo en una porción determinada del espacio. Estas observaciones difieren muy poco de las sinópticas en su contenido y se realizan también en horas fijas y se complementan con registros continuos diarios o semanales.
- Aeronáuticas: Se trata de observaciones especiales que se efectúan en las estaciones meteorológicas instaladas en los aeródromos, esencialmente para satisfacer las necesidades aeronáuticas.
- Marítimas: Son observaciones que se realizan sobre buques fijos, móviles, boyas ancladas y a la deriva.
- Agrícolas: Son observaciones que están diseñadas para la monitorización de las condiciones ambientales y del suelo en todo tipo de aplicaciones agrícolas.

3.3. Esgurrimiento

3.3.1. Definición de esgurrimiento

El esgurrimiento es la parte de la precipitación que aparece en las corrientes fluviales superficiales, perennes, intermitentes o efímeras, y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores (Chow, 1964). Dependiendo de la procedencia del esgurrimiento, existen distintos tipos: esgurrimiento superficial, esgurrimiento subsuperficial y esgurrimiento subterráneo. En la Figura 6 se muestra un esgema de los elementos que constituyen los distintos tipos de esgurrimiento.



Figura 6 Tipos de escurrimiento.

- El escurrimiento superficial es la porción de precipitación que no se infiltra en ningún momento y llega a la red de drenaje moviéndose sobre la superficie del terreno por la acción de la gravedad. Corresponde a la precipitación que no queda detenida en las depresiones del suelo y que escapa a los fenómenos de evapotranspiración.
- El escurrimiento subsuperficial hace referencia a la porción de precipitación que, habiéndose infiltrado en el suelo, fluye a través de los horizontes superiores de éste hacia las corrientes de drenaje.
- El escurrimiento subterráneo corresponde a la porción de precipitación que por efecto de una percolación profunda, se lleva a cabo en los mantos acuíferos, desde donde circula hasta alcanzar la red de drenaje.

A la parte de la precipitación que contribuye directamente al escurrimiento superficial se le llama precipitación en exceso o efectiva y puede ser relacionada a una tormenta en particular.

La parte de precipitación que entra rápidamente en el cauce de las corrientes se le conoce como escurrimiento directo, es decir, el escurrimiento superficial está constituido por el escurrimiento directo.

El escurrimiento subterráneo y la parte retardada del escurrimiento subsuperficial constituyen el escurrimiento base de los ríos.

El escurrimiento está condicionado a diversos factores que determinan su proceso: meteorológicos y geomorfológicos.

Los factores meteorológicos fundamentales son la precipitación y la temperatura. En cuanto a la precipitación, los aspectos relevantes son duración, intensidad, frecuencia, tipo, distribución en el espacio, dirección del movimiento de la precipitación, precipitación antecedente y humedad del suelo. La temperatura es representativa de las pérdidas por evaporación. Otras condiciones que deben ser tomadas en cuenta son el viento, la presión y la humedad relativa.

Los factores geomorfológicos hacen referencia a la fisiografía de la región, las características físicas del terreno y los aspectos hidrológicos. La fisiografía abarca la extensión superficial, forma de la cuenca, pendiente del terreno, orientación y referencia geográfica (latitud, longitud, altitud). Las características físicas del terreno representativas son la edafología del suelo, uso de suelo, geología y topografía. Los aspectos hidrológicos se refieren a las características de la red de drenaje.

3.3.2. Clasificación de suelos

La clasificación de suelos se refiere a la agrupación con un rango de propiedades similares que pueden ser tanto químicas, físicas o biológicas. Los suelos por su naturaleza contienen elementos químicos y simultáneamente se combinan entre fases sólidas, líquidas y gaseosas. No es de extrañar las varias propuestas y esquemas distintos para armonizar y correlacionar los tipos de suelo diferentes.

La Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB por sus siglas en inglés), apoyada por diversos institutos y organizaciones internacionales, entre ellas, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), clasifica los suelos de la siguiente manera:

Tabla 2 Clasificación de suelos

1. Suelos con gruesas capas orgánicas:	Histosoles
2. Suelos con fuerte influencia humana	
Suelos con uso agrícola prolongado e intensivo:	Antrosoles
Suelos que contienen muchos artefactos:	Tecnosoles
3. Suelos con enraizamiento limitado debido a permafrost o rocosidad somera	
Suelos afectados por hielo:	Criosoles
Suelos someros o extremadamente gravillosos:	Leptosoles
4. Suelos influenciados por agua	
Condiciones alternadas de saturación-sequía, ricos en arcillas expandibles:	Vertisoles
Planicies de inundación, marismas costeras:	Fluvisoles
Suelos alcalinos:	Solonetz
Enriquecimiento en sales por evaporación:	Solonchaks
Suelos afectados por agua subterránea:	Gleysoles
5. Suelos regulados por la química de Fe/Al	
Alofano o complejos Al-humus:	Andosoles
Queluviación y quiluviación:	Podzoles
Acumulación de Fe bajo condiciones hidromórficas:	Plintosoles
Arcilla de baja actividad, fijación de P, fuertemente estructurado:	Nitisoles
Dominancia de caolinita y sesquióxidos:	Ferralsoles
6. Suelos con agua estancada	
Discontinuidad textural abrupta:	Planosoles
Discontinuidad estructural o moderadamente estructural:	Stagnosoles
7. Acumulación de materia orgánica, alta saturación con bases	
Típicamente mólico:	Chemozems
Transición a clima más seco:	Kastanozems
Transición a clima más húmedo	Phaeozems
8. Acumulación de sales menos solubles o sustancias no salinas	
Yeso:	Gipsisoles
Sílice:	Durisoles
Carbonato de calcio:	Calcisoles
9. Suelos con subsuelo enriquecido en arcilla	
Lenguas abelúvicas:	Albeluvisols
Baja saturación con bases, arcillas de alta actividad:	Alisoles
Baja saturación con bases, arcillas de baja actividad:	Acrisols
Alta saturación con bases, arcilla de alta actividad:	Luvisols
Alta saturación con bases, arcilla de baja actividad:	Lixisoles
10. Suelos relativamente jóvenes o suelos con poco o ningún desarrollo de perfil	
Con suelo superficial oscuro ácido:	Umbrisols
Suelos arenosos:	Arenosols
Suelos moderadamente desarrollados:	Cambisoles
Suelos sin desarrollo significativo de perfil:	Regosoles

Fuente: (FAO, 2016).

3.3.3. Uso de suelo

Uno de los aspectos fundamentales para la estimación del escurrimiento, debido a la presencia de una tormenta, se encuentra reflejado en el uso de suelo, es decir, está vinculado a la cobertura vegetal y forestal tal como el tipo de vegetación, el uso agrícola, tierra en descanso, área urbana, áreas impermeables, etcétera.

Derivado del uso de suelo se encuentran aquellos aspectos que modifican el escurrimiento, tales como: el porcentaje de áreas pavimentadas (carreteras, calles, estacionamientos, áreas residenciales, etc.); o en los casos de un suelo de cultivo o áreas con vegetación, factores como: el tratamiento, la densidad de la cubierta, el tipo de cultivo, etcétera; estas condiciones que afectan el escurrimiento se interpretan por medio de la condición hidrológica del suelo.

Una condición hidrológica buena implica la presencia de factores que obstruyen el escurrimiento y por tanto favorecen a la infiltración.

Los incisos siguientes describen algunas de las características que permiten establecer el uso de suelo:

- a) Áreas urbanas: para estimaciones se contemplan los siguientes aspectos:
 - *Áreas urbanas desarrolladas completamente*: incluye espacios abiertos (césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.), áreas impermeables (estacionamientos pavimentados, tejados, calzadas, calles y carreteras), distritos urbanos (áreas comerciales e industriales) y áreas residenciales.
 - *Áreas urbanas en desarrollo*: incluye las áreas recién clasificadas con poco desarrollo (sólo áreas permeables, sin vegetación).
- b) Tierras agrícolas cultivadas: uso de suelo que se clasifica de acuerdo al tipo de cultivo y en el que, además, se condiciona a la forma o tratamiento del suelo (cultivo de terraza, suelos con residuos de cultivos de cobertura, cultivo en surco recto o contorneado). La división de los suelos destinados a la agricultura se establece de la siguiente forma:
 - *Barbecho*: técnica en la que se deja de sembrar por un periodo largo de tiempo, generalmente empleada como rotación de cultivos.
 - *Cultivos en surco*: el *National Engineering Handbook* en su capítulo ocho establece que se trata de “cualquier campo de cultivo (maíz, sorgo, soja, remolacha, tomate, tulipanes) plantado en filas lo suficientemente separadas, la mayor parte de la superficie del suelo está expuesta al impacto de precipitaciones durante todo el período vegetativo”.
 - *Cultivos de grano pequeño*: los cultivos de grano pequeño (trigo, avena, cebada, lino) se planta en filas lo suficientemente cerca que la superficie del suelo no está expuesta, excepto durante la siembra y poco después.
 - *Cerca de semillas de leguminosa, legumbres por difusión o rotación de prados*: este tipo de cubierta puede permanecer durante más de un año para protección de la tierra. Corresponde a cultivos de cobertura como: alfalfa, soya perenne, frijol de monte, tréboles, etc.

- c) Suelos agrícolas: suelos correspondientes a áreas con algún tipo de cobertura vegetal, la cual se clasifica en:
- *Pasturas, praderas o semejantes*: se refiere a continuos de forraje para pastoreo.
 - *Prado*: hierba continua, protegida del pastoreo y generalmente cortado para heno.
 - *Brush*: maleza con vegetación de característica arbustiva y leñosa.
 - *Bosques combinados con hierba*.
 - *Bosques*
 - *Granjas-edificios, calles, caminos, y mucho circundantes*: se refiere a áreas rurales.
- d) Suelos áridos y semiáridos:
- *Vegetación Herbácea*: mezcla de hierba, mala hierba y arbustos leñosos (brush) de bajo crecimiento, siendo este último el de menor elemento.
 - *Roble - Álamo Temblón*: vegetación leñosa de montaña mezcla de roble, caoba de montaña, maple y otros con características leñosas.
 - *Piñón – Enebro*: piñón, enebro o ambos; hierba de sotobosque.
 - *Artemisa con hierba de sotobosque*.
 - *Arbustos o Matorral de desierto*: plantas principales que incluyen el palo verde, mezquite, saltbush, jarrilla, prieto y cactus.

3.3.4. Textura del suelo

La textura del suelo se refiere a la proporción relativa, en porcentaje, de los componentes minerales del suelo. La textura es una característica básica del suelo. Influencia sus propiedades hídricas, manifestada en la fuerza o succión con que es retenida el agua y el ámbito en que hay agua disponible.

La infiltración o velocidad con que el agua penetra en la superficie, es siempre mayor en suelos de textura gruesa (arenosa, franco arenosa, arenosa franca) que en suelos de textura fina.

A partir de la textura, los suelos pueden ser clasificados de acuerdo a su permeabilidad como Muy Alta, Buena, Media y Baja, la cual se relaciona con el grupo hidrológico. Los grupos hidrológicos de suelo definidos por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (*Soil Conservation Service – SCS*) son:

Grupo A: (Bajo potencial de escurrimiento). Suelos que tienen altas velocidades de infiltración cuando están mojados, están constituidos principalmente de arenas y gravas profundas, con drenaje bueno a excesivo. Las velocidades de transmisión del agua en éstos suelos es alta (>7.6 mm/h).

Grupo B: Suelos con moderadas velocidades de infiltración cuando están mojados, consisten principalmente en suelos con cantidades moderadas de texturas finas a gruesas, con drenaje medio y algo profundos. Son básicamente suelos arenosos. Tienen velocidades de transmisión del agua (3.8 a 7.6 mm/h).

Grupo C: Suelos que tienen bajas velocidades de infiltración cuando están mojados, con la característica de tener un estrato que impide el flujo del agua, constituido por texturas finas. Tienen velocidades de transmisión del agua (1.3 a 3.8 mm/h).

Grupo D (alto potencial de escurrimiento): Suelos que tienen muy bajas velocidades de infiltración cuando están mojados, consisten principalmente de suelos arcillosos con alto potencial de expansión, suelos con nivel freático alto y permanente, con altos estratos arcillosos cerca de su superficie, o bien, suelos someros sobre horizontes impermeables. Tienen muy bajas velocidades de transmisión del agua (0 a 1.3 mm/h).

Tabla 3 Clasificación de tipo de suelo según su textura

Tipo de suelo	Textura del suelo
A	Arenas con poco limo y arcilla; suelos muy permeables
B	Arenas finas y limos
C	Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla
D	Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos con subhorizontes de roca sana; suelos muy permeables

Fuente: (Aparicio Mijares, 2011).

3.3.5. Coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento representa la porción de la precipitación que se convierte en caudal, es decir, la relación entre el volumen de escurrimiento superficial y el volumen de precipitación total sobre un área (cuenca) determinada:

$$C = \frac{V_{ed}}{V_{ll}} = \frac{P_e}{P} \quad (6)$$

Donde:

V_{ed} : Volumen de escurrimiento directo

V_{ll} : Volumen de lluvia

P : Lluvia total

P_e : Lluvia efectiva

Cuando la edafología y el uso de suelo del área en estudio son diversos, el coeficiente de escurrimiento (C) puede obtenerse en función de las características de cada porción de área como un promedio ponderado, a partir de la siguiente expresión:

$$C = \frac{C_1A_1 + C_2A_2 + C_3A_3 + \dots + C_nA_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} \quad (7)$$

Donde:

C_1 : Coeficiente de escurrimiento correspondiente al área parcial A_1

A_1 : Área parcial i que tiene un cierto tipo de superficie

- Método de los números de escurrimiento

Existen diversos métodos para cuantificar el coeficiente de escurrimiento como lo es el desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (*Soil Conservation Service – SCS*) llamado “de los números de escurrimiento”.

En este método se relaciona la altura de lluvia total P con la altura de lluvia efectiva Pe por medio de la siguiente expresión:

$$Pe = \frac{\left[P - \frac{508}{N} + 5.08 \right]^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32} \quad (8)$$

Donde:

P : Lluvia total, cm

Pe : Lluvia efectiva, cm

N : Número de escurrimiento

El número de escurrimiento está en función del tipo de suelo, la cobertura vegetal, la pendiente del terreno y la precipitación antecedente, entre otros factores.

El tipo de suelo se estima tomando como guía la Tabla 4:

Tabla 4 Clasificación de tipo suelo según su permeabilidad

CLAVE DE CLASIFICACIÓN FAO	SUELOS	TIPO HIDROLÓGICO DE SUELO	PERMEABILIDAD	PROPIEDADES
T	Andosoles	A	Muy Alta	Arenas con poco limo y arcilla (escurrimiento mínimo)
Q	Arenosoles			
J	Fluvisoles			
O	Histosoles			
U	Ranker			
X,Y	Calcisoles (antes Xerosol y Yermosol)	B	Buena	Arenas finas y limos
I, E	Leptosoles (antes Litosoles y Rendizinas)			
Z	Solonchaks			
D	Podzoles			
F	Ferralsoles			
R	Regosoles			
H	Feozems	C	Media	Arenas muy finas, limos y bastante arcilla
K	Kastanozems			
N	Nitosoles			
C	Chernozems			
-	Alisoles	D	Baja	Arcillas en grandes cantidades, suelos poco profundos con subhorizontes casi permeables (escurrimiento máximo)
A	Acrisoles			
B	Cambisoles			
G	Gleysoles			
L	Luvisoles			
V	Vertisoles			
W	Planosoles			
S	Solonetz			
D	Podzoluvisoles			
-	Plintosoles			
-	Lixisoles			

Fuente: (Domínguez Mora, Arganis Juárez, Esquivel Garduño, & Carrizosa Elizondo, 2008)

En la Tabla 5, que se muestra a continuación, se presentan los valores de N para algunas condiciones.

Tabla 5 Número de escurrimiento según uso de suelo y vegetación

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN (INEGI)		GRUPO HIDROLÓGICO			
		A	B	C	D
AGRICULTURA (de humedad, de riego, de temporal)	Condición hidrológica mala	72	81	88	91
	Condición hidrológica regular	67	76	83	86
	Condición hidrológica buena	62	71	78	81
ÁREA SIN VEGETACIÓN APARENTE		77	86	91	94
ASENTAMIENTO HUMANO	Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.	82	88	91	93
	Condición hidrológica regular	49	69	79	84
	Condición hidrológica buena	39	61	74	80
	Residencial 50% o más área impermeable	77	85	90	92
	Residencial 50% o menos área impermeable	61	75	83	87
	Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
	Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
	Estacionamientos pavimentados, techos, accesos, etc.	98	98	98	98
	Calles y carreteras (pavimentados con cunetas y alcantarillas)	98	98	98	98
	Calles y carreteras de grava	76	85	89	91
	Calles y carreteras de tierra	72	82	87	89
BOSQUE (cultivado, de encino, encino-pino, oyamel, pino, tascate, mesófilo de montaña)	Condición hidrológica mala	45	66	77	83
	Condición hidrológica regular	36	60	73	79
	Condición hidrológica buena	25	55	70	77
CARDONAL		54	71	80	89
CHAPARRAL (ARBUSTOS)		20	48	65	73
CUERPO DE AGUA		100	100	100	100
EROSIÓN		68	79	86	89
MANGLAR		10	10	10	10
MATORRAL (con izotes, con rosetófilos acaules, inerme, desértico micrófilo, desértico rosetófilo, espinoso, crasicale, subinerme, subtropical)	Condición hidrológica mala	48	67	77	83
	Condición hidrológica regular	34	58	71	78
	Condición hidrológica buena	20	48	65	73
MEZQUITAL		68	79	86	92
NOPALERA		39	61	74	84
PALMAR		45	66	77	83
PASTIZAL (cultivado, halófilo, inducido, natural, naturalhuizachal)	Condición hidrológica mala	68	79	86	89
	Condición hidrológica regular	49	69	79	84
	Condición hidrológica buena	39	61	74	80
PLANTACIÓN FORESTAL	Condición hidrológica mala	55	73	82	86
	Condición hidrológica regular	44	65	76	82
	Condición hidrológica buena	32	58	72	79
PRADERA DE ALTA MONTAÑA		30	58	71	78
SABANA		45	66	77	83

SELVA (baja caducifolia, baja caducifolia y subcaducifolia, baja espinosa, mediana subcaducifolia)	45	66	77	83
TULAR	68	79	86	92
VEGETACIÓN HALÓFILA	68	79	100	100
VEGETACIÓN SECUNDARIA	68	79	86	89

Fuente: (Domínguez Mora, Arganis Juárez, Esquivel Garduño, & Carrizosa Elizondo, 2008)

Definición de condición hidrológica:

- Suelos agrícolas:
 - Mala: tiene menos del 25% del terreno cubierto
 - Regular: tiene entre 25 y 50% del terreno cubierto
 - Buena: tiene más del 50% del terreno cubierto
- Uso forestal:
 - Mala: tiene menos del 30% del terreno cubierto
 - Regular: tiene entre 30 y 70% del terreno cubierto
 - Buena: tiene más del 70% del terreno cubierto

Al tomar en cuenta las condiciones de humedad del suelo, debe realizarse una corrección al número de escurrimiento obtenido, según la altura de precipitación acumulada cinco días antes de la fecha en cuestión, ll_5 , de la siguiente manera:

- a) Si $ll_5 < 2.5$ cm, hacer corrección A.
- b) Si $2.5 < ll_5 < 5$ cm, no hacer corrección.
- c) Si $ll_5 > 5$ cm, hacer la corrección B.

Tabla 6 Corrección del número de escurrimiento según la altura de precipitación cinco días antes

N	N con corrección A	N con corrección B
0	0	0
10	4	22
20	9	37
30	15	50
40	22	60
50	31	70
60	40	78
70	51	85
80	63	91
90	78	96
100	100	100

Fuente: (Aparicio Mijares, 2011)

Para lluvias caídas en los cinco días anteriores inferiores a 2.5 cm, el suelo está casi seco, por lo que se disminuye el valor N, con lo que el umbral de escurrimiento aumenta, es decir, es necesario que llueva más para que se produzca escurrimiento superficial. Si, por el contrario, la lluvia caída en los cinco últimos días anteriores supera los 5 cm, se aumenta el valor de N, con lo que el umbral de escurrimiento disminuye (suelo en condiciones casi saturadas), es decir, el escurrimiento superficial se producirá antes ya que se necesita menos precipitación para terminar de saturar el suelo.

Para obtener el número de escurrimiento N en áreas con múltiples usos y tipos de suelo se hace un promedio ponderado por el área de las diferentes porciones en que se divida la cuenca.

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i N_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (9)$$

3.3.6. Fórmula Racional

Se han propuesto diversas fórmulas empíricas y semiempíricas para determinar gastos máximos con base a la intensidad de la lluvia. Una de estas fórmulas de relación lluvia-escurrimiento, que toma en cuenta el área de la cuenca y la intensidad de la precipitación, se expresa con la siguiente ecuación:

$$Q_p = 0.278 C i A_c \quad (10)$$

Donde:

Q_p : Gasto máximo, en m^3/s

C : Coeficiente de escurrimiento, adimensional

i : Intensidad media máxima de lluvia para una duración, mm/h

A_c : Área de la cuenca, en km^2

El valor del coeficiente de escurrimiento expresa la relación entre el gasto máximo por unidad de área y la intensidad media máxima de la lluvia y depende del tipo de área de drenaje, el uso de suelo, etcétera.

Para la estimación de gastos por el método racional, es necesario disponer de expresiones del tipo $i=f(d, T)$, es decir, las curvas intensidad-duración-período de retorno.

La fórmula racional está basada en una serie de hipótesis que deben tenerse en cuenta para su utilización. Dichas hipótesis son las siguientes:

- a) Supone que la lluvia es uniforme en el tiempo, es decir, una lluvia de intensidad constante durante un largo tiempo.
- b) Asume que la precipitación es uniforme en toda la extensión de la cuenca en estudio.

- c) Supone que la tormenta tiene una duración suficientemente grande para permitir que cualquier gota de agua llegue hasta la salida de la misma.
- d) La probabilidad de ocurrencia de los gastos máximos es la misma que la de las intensidades de lluvia correspondientes.

En un inicio, el gasto que sale de la cuenca se incrementará con el tiempo, pero llegará un momento en el que se alcance un punto de equilibrio, esto es, en el que el volumen que entra por unidad de tiempo por la lluvia sea el mismo que el gasto de salida de la cuenca. El tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio se denomina tiempo de concentración, y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca, si ésta fuera completamente impermeable.

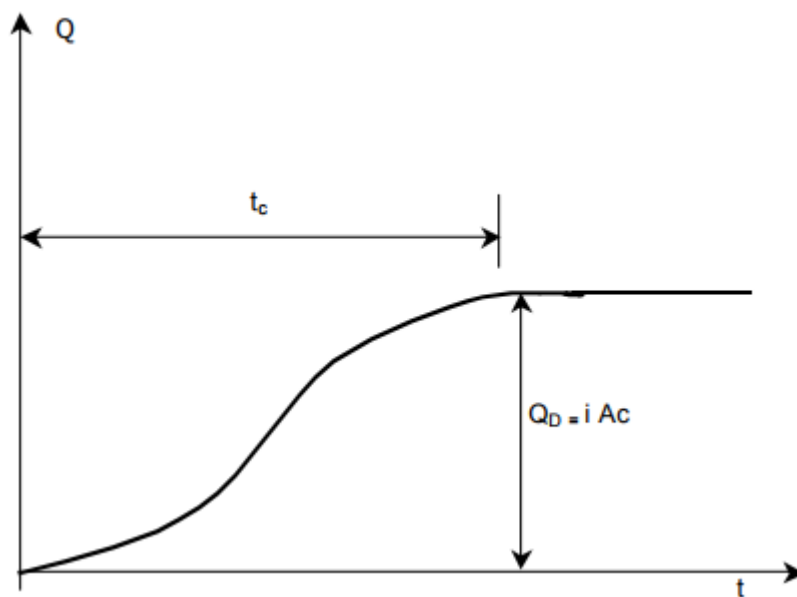


Figura 7 Representación gráfica de la Fórmula Racional

3.4. Conceptos de probabilidad y estadística

3.4.1. Período de Retorno

El período de retorno T se define como el lapso de tiempo promedio, en años, entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada (Ramírez, 2011).

A su vez, también se puede considerar como el inverso de la probabilidad de que un evento sea igualado o excedido en un año. Una excedencia es un evento con magnitud igual o mayor al valor medido, el tiempo real que pasa entre excedencias es llamado intervalo de recurrencia, el intervalo de recurrencia para un cierto evento será igual al período de retorno del evento, en la práctica los dos conceptos son sinónimos. Cuando se habla de una tormenta con período de retorno de 100 años, se entiende entonces que dicho evento será igualado o excedido en

promedio una vez cada 100 años, en el transcurso de un gran número de años, por ejemplo 1000 años (Palacios, 2010).

En hidrología, normalmente se prefiere trabajar con periodos de retorno en lugar de probabilidades, pues es un concepto que resulta más claro ya que tiene las mismas unidades (tiempo) que la vida útil de las obras y puede compararse con ésta.

Usualmente, cuando se tienen datos de un cierto período, y se desea aplicar algún método estadístico para extrapolar dichos datos a períodos de retorno mayores al de las mediciones, es necesario asignar un valor de T a cada dato registrado. Para asignar períodos de retorno a una serie de datos es común el empleo de la ley empírica de Weibull (Ramírez, 2011):

$$T = \frac{n_j + 1}{m} \quad (11)$$

$$P(X \leq x) = 1 - \frac{1}{T} \quad (12)$$

Donde

- n_j : Tamaño de la muestra
 m : Número de orden del registro ya ordenado de mayor a menor.
 $P(X \leq x)$: Probabilidad de no excedencia del evento x

La relación entre el período de retorno y la probabilidad de excedencia u ocurrencia en un año cualquiera se define mediante la siguiente expresión:

$$T = \frac{1}{P} \quad (13)$$

Por lo tanto la probabilidad P de que ocurra un evento en cualquier año se define como el inverso de su período de retorno T .

3.4.2. Pruebas de homogeneidad

Las características estadísticas de una serie hidrológica (media, desviación estándar, etcétera) pueden sufrir pérdida de homogeneidad, lo cual es producido por actividades humanas y procesos naturales dentro de la cuenca, tales como: deforestación, rectificación de cauces, construcción de embalses, incendios forestales, erupciones volcánicas. Existen pruebas estadísticas que miden la homogeneidad de una serie de datos, las cuales presentan una hipótesis nula y una regla para ser aceptada o rechazada. A continuación se describen tres de ellas.

3.4.2.1. Prueba estadística de Helmert

Consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento Q_i^j de la serie j para $i=1, 2, \dots, n_j$, con respecto a su valor medio. Si una desviación de un cierto signo es seguida de otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una secuencia S , de lo contrario se considera como un cambio C .

La serie se considera homogénea si se cumple

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n_j - 1} \quad (14)$$

3.4.2.2. Prueba estadística t de Student

Cuando la causa probable de la pérdida de homogeneidad de la serie sea un cambio abrupto en la media, esta prueba es muy útil. Si se considera una serie Q_i^j para $i=1, 2, \dots, n_j$, del sitio j , la cual se divide en dos conjuntos de tamaño $n_1 = n_2 = \frac{n_j}{2}$, entonces, el estadístico de prueba se define con la expresión:

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad (15)$$

Donde

\bar{x}_1, s_1^2 : Media y varianza de la primera parte del registro de tamaño n_1

\bar{x}_2, s_2^2 : Media y varianza de la segunda parte del registro de tamaño n_2

El valor absoluto de t_d se compara con el valor de la distribución t de Student de dos colas, y con $v = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y para un nivel $\alpha=0.05$.

Sí y sólo si, el valor absoluto de t_d es mayor que aquel de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie se considera no homogénea.

3.4.2.3. Prueba estadística de Cramer.

Esta prueba se utiliza para verificar la homogeneidad en el registro Q_i^j de la serie j para $i=1, 2, \dots, n_j$, y también para determinar si el valor medio no varía significativamente de un período de tiempo a otro. Con este propósito se consideran tres bloques: el primero, del tamaño total de la muestra n_j ; el segundo, de tamaño n_{60} (60% de los últimos valores de la muestra n_j); y el tercero, de tamaño n_{30} (30% de los últimos valores de la muestra n_j).

La prueba compara el valor de \bar{Q}^j del registro total con cada una de las medias de los bloques elegidos \bar{Q}_{60}^j y \bar{Q}_{30}^j . Para que se considere la serie analizada como estacionaria en la media, se deberá cumplir que no existe una diferencia significativa entre las medias de los bloques.

$$\bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j}, \quad \text{para la muestra analizada} \quad (16)$$

$$S_Q^j = \left[\frac{1}{(n_j - 1)} \sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - \bar{Q}^j)^2 \right]^{1/2} \quad (17)$$

$$\bar{Q}_{60}^j = \sum_{k=1}^{n_{60}} \frac{Q_k^j}{n_{60}} \quad (18)$$

$$\bar{Q}_{30}^j = \sum_{k=1}^{n_{30}} \frac{Q_k^j}{n_{30}} \quad (19)$$

$$\tau_{60}^j = \frac{\bar{Q}_{60}^j - \bar{Q}^j}{S_Q^j} \quad (20)$$

$$\tau_{30}^j = \frac{\bar{Q}_{30}^j - \bar{Q}^j}{S_Q^j} \quad (21)$$

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w [1 + (\tau_w^j)^2]} \right\}^{1/2} |\tau_w^j| ; \text{ para } w = 60 \text{ y } w = 30 \quad (22)$$

El estadístico t_w tiene distribución t de Student de dos colas con $v = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y para un nivel $\alpha=0.05$.

Sí y sólo si, el valor absoluto de t_w , para $w = 60$ y $w = 30$, es mayor que el de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie Q_i^j se considera no homogénea.

3.4.3. Prueba de bondad de ajuste

Kite (1988) propuso un estadístico que permite seleccionar la mejor opción, entre diferentes modelos, para el ajuste de una muestra de datos \bar{Q}_i^j para $i=1, 2, \dots, n_j$, para un sitio j .

Este estadístico es conocido como el error estándar de ajuste, y tiene la forma

$$EE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\hat{Q}_i^j - Q_T^j)^2}{n_j - mp} \right]^{1/2} \quad (23)$$

Donde:

Q_T^j : Son los eventos Q_i^j ordenados de mayor a menor con un período de retorno asignado

n_j : Longitud en años del registro analizado

\hat{Q}_i^j : Eventos estimados por cierta distribución de probabilidad para cada período de retorno T asignado a la muestra ordenada Q_i^j

mp : Número de parámetros de la distribución de probabilidad

La distribución de mejor ajuste será aquella que proporcione el mínimo valor del estadístico EE.

3.4.4. Funciones de distribución de probabilidad

Si se desea conocer el valor del evento para algún período de retorno, graficando los valores de los registros contra los períodos de retorno asignados se puede observar alguna tendencia relativamente definida; ahora si se quiere extender dicha tendencia hasta el período de retorno deseado se debe determinar, entre las distintas funciones de distribución de probabilidad teóricas, la que tenga mejor ajuste con los datos registrados, y usar los parámetros de la distribución para realizar la extrapolación.

En estadística existen muchas funciones de distribución de probabilidad teóricas, lo que implica la necesidad de elegir la que tenga mejor adaptación al problema en análisis.

Algunas de las funciones de distribución de probabilidad con mayor uso en hidrología son las siguientes:

- Normal
- Lognormal
- Gumbel

Para poder realizar inferencias con las distintas funciones de probabilidad es necesario realizar la estimación de sus parámetros. Cada estimador de un parámetro es una función de los valores de la muestra, los cuales son observadores de una variable aleatoria.

Las técnicas de estimación de parámetros más comunes en Hidrología son:

- Método de los momentos
- Método de máxima verosimilitud

El método de los momentos es un procedimiento sencillo para encontrar un estimador de uno o más parámetros poblacionales. Consiste básicamente en plantear un sistema de ecuaciones, cuyo tamaño depende del número de parámetros a estimar. Esto se hace al igualar los momentos poblacionales con los muestrales, también conocidos como estadísticos muestrales.

El método de máxima verosimilitud tiene como idea fundamental tomar como estimación del parámetro estudiado el valor que haga máxima la probabilidad de obtener la muestra observada.

Para el presente trabajo, la selección del método a utilizarse para la estimación de los parámetros de las funciones de probabilidad, se hizo considerando la simplicidad y practicidad de su aplicación, por consiguiente se emplea el método de los momentos.

3.4.4.1. Función de distribución de probabilidad Normal.

La función de probabilidad normal, también denominada función de Gauss, función de Gauss-Laplace o función de probabilidad de los errores, es una función de probabilidad para variables aleatorias continuas de gran aplicación en ingeniería.

La función de densidad de una distribución normal tiene varios rasgos importantes: Es una distribución que tiene forma de campana, es simétrica y puede tomar valores entre menos infinito y más infinito.

La función de distribución de probabilidad normal es:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (24)$$

La función de densidad de probabilidad normal se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (25)$$

Donde:

μ : parámetro de ubicación.

σ : parámetro de escala.

Los parámetros se calculan por el método de momentos.

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (26)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1}} \quad (27)$$

No se conoce analíticamente la integral de la ecuación por lo que es necesario recurrir a métodos numéricos para evaluarla. Por lo que se ha definido la variable estandarizada z.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (28)$$

Existe una fórmula de aproximación para calcular la variable estandarizada z.

$$U_T = v - \frac{b_0 + b_1 v + b_2 v^2}{1 + b_3 v + b_4 v^2 + b_5 v^3} \quad (29)$$

Donde:

$$b_0 = 2.515517$$

$$b_1 = 0.802853$$

$$b_2 = 0.010328$$

$$b_3 = 1.432788$$

$$b_4 = 0.189269$$

$$b_5 = 0.001308$$

Para $0 \leq \frac{1}{T} < 0.5$

$$v = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{\left(\frac{1}{T}\right)^2}\right)} \quad (30)$$

Para $0.5 < \frac{1}{T} \leq 1$

$$v = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{\left(1 - \frac{1}{T}\right)^2}\right)} \quad (31)$$

El evento de diseño se calcula como:

$$x = \hat{\mu} + \hat{\sigma}U_t \quad (32)$$

3.4.4.2. Función de distribución de probabilidad Log Normal

En esta función los logaritmos naturales de la variable aleatoria se distribuyen normalmente. La función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2} \quad (33)$$

Donde:

μ_y : parámetro de ubicación.

σ_y : parámetro de escala.

Los parámetros se calculan por el método de momentos.

$$\mu_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i \quad (34)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln x_i - \mu_y)^2}{n}} \quad (35)$$

El evento de diseño se calcula como:

$$x = e^{(U_T\sigma_y + \mu_y)} \quad (36)$$

3.4.4.3. Función de distribución de probabilidad Gumbel.

La función de distribución de probabilidad:

$$F(x) = e^{-e^{-\left[\frac{x-v}{\alpha}\right]}} \quad (37)$$

La función de densidad de probabilidad:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left[\frac{x-v}{\alpha}\right]} e^{-e^{-\left[\frac{x-v}{\alpha}\right]}} \quad (38)$$

Donde:

α : Parámetro de escala.

v : Parámetro de ubicación.

Los parámetros se calculan por el método de momentos.

$$\alpha = 0.78\sigma \quad (39)$$

$$v = \mu - 0.5772\alpha \quad (40)$$

Los eventos de diseño representados como la variable aleatoria x se expresa:

$$x = v - \alpha \left[\text{Ln} \left(-\text{Ln} \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right] \quad (41)$$

4. Caso de estudio. Gastos máximos de diseño

4.1. Metodología: Visión general

El proceso para el cálculo de los gastos máximos de diseño implica tener conocimiento de cierta información de la zona de estudio, como lo son algunas características fisiográficas, información de precipitación, vegetación existente y uso de suelo.

En lo que compete a las características fisiográficas, se requiere conocer el lapso en el cual toda la cuenca aporta al escurrimiento, es decir, el tiempo de concentración. De igual manera, otro parámetro fundamental es el área de la región estudiada, que para este caso corresponde a una de las demarcaciones territoriales de la Ciudad de México. Dicha demarcación territorial particionada de acuerdo al área de influencia de las estaciones meteorológicas, asignada a partir del método de los Polígonos de Thiessen por su practicidad y simplicidad.

En términos generales, el método de los Polígonos de Thiessen consiste en unir las estaciones más próximas mediante líneas, trazando las mediatrices de los segmentos de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos designando el área de influencia de la estación correspondiente. Estas líneas se bisectan y forman los polígonos de Thiessen, cada polígono es el área de influencia de la estación correspondiente.

La información de precipitación es utilizada para realizar la construcción y estimación de las curvas de intensidad-duración-período de retorno. Debido a la diversidad y calidad de la información con la que se cuenta en el territorio, se hace necesario desglosar en dos partes la obtención de dichas curvas a partir de datos de:

- Estaciones con pluviógrafo
- Estaciones con pluviómetro

El procedimiento utilizado para la estimación de las curvas i-d-T a partir de registros de estaciones con pluviómetro fue sugerido por Campos (1990), con la variante de calcular el cociente R a través de una ecuación polinomial de segundo grado que se obtiene de los valores encontrados por Campos (2010) en las 10 estaciones pluviográficas contrastadas para diferentes zonas geográficas del país, correlacionando estos valores de R con la altitud sobre el nivel del mar de la estación pluviométrica a procesar.

La información de la vegetación existente y uso de suelo en el caso de estudio está vinculado al escurrimiento que puede presentarse en la zona, por lo que debe considerarse en el análisis.

Así, un esquema general del proceso realizado en el presente trabajo se presenta a continuación.

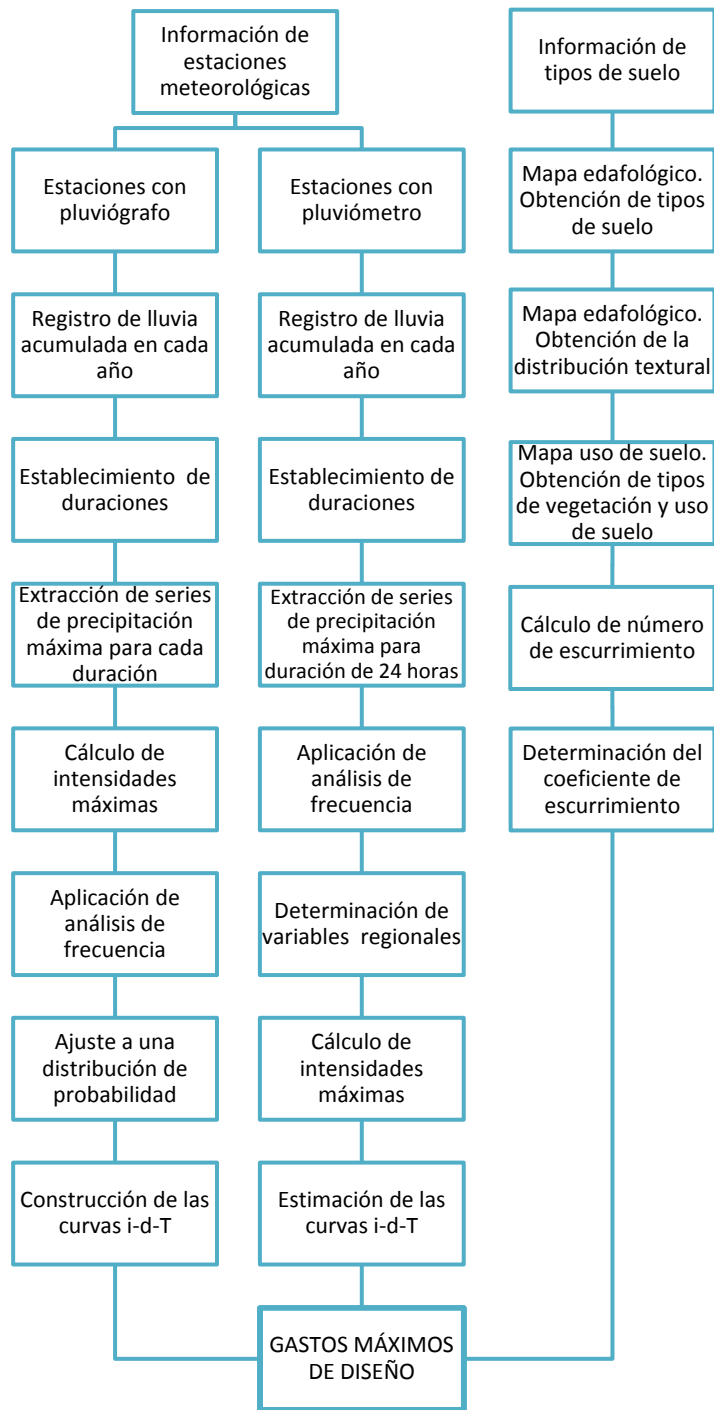


Figura 8 Metodología. Visión general

4.2. Descripción de la zona de estudio

El área de estudio comprende la región de una de las 16 demarcaciones territoriales en las que se encuentra dividida la Ciudad de México, denominada con el nombre de Gustavo Adolfo Madero. La delegación Gustavo A. Madero se localiza al noreste de la Ciudad de México. De acuerdo a su posición territorial, Colinda al norte y al este con el estado de México (municipios de Tultitlán, Coacalco de Berriozábal y Tlanepantla de Baz); al sur con las delegaciones Venustiano Carranza y Cuauhtémoc; al oeste con la delegación Azcapotzalco y el estado de México (municipios de Tlanepantla de Baz, Ecatepec de Morelos y Nezahualcóyotl).

Ubicada entre las coordenadas geográficas 19°36' y 19°27' latitud Norte y 99°03' y 99°11' longitud Oeste, la Delegación contempla una superficie de 88 km², lo cual representa el 5.8 % del total del territorio de la Ciudad de México.

El territorio se encuentra en el Eje Neovolcánico Transversal, en la subprovincia Lagos y Volcanes del Anáhuac. En cuanto a la elevación de la delegación Gustavo A. Madero, ésta oscila entre los 2220 y 2240 msnm, a excepción de la porción norte, que alberga parte de la Sierra de Guadalupe, su elevación se encuentra en el rango de 2400 a 2960 msnm. Entre sus elevaciones principales se encuentran: Cerro Picacho Grande, Cerro Chiquihuite, Cerro Zacatenco, Cerro el Guerrero, Cerro los Gachupines y Cerro Tepeyac.

La delegación cuenta con varios cauces que en la actualidad se encuentran casi en su totalidad entubados, algunos de ellos son: Río de los Remedios, Río Consulado (entubado), Río Tlanepantla, Río Peña, Río Guadalupe, Canal de desagüe (entubado).

En cuanto al clima, la región presenta dos tipos: Templado subhúmedo con lluvias en verano y semiseco templado; con una temperatura media anual de 16 °C. La precipitación media anual es de 600 milímetros, iniciando la temporada de lluvias en junio y terminando en septiembre.

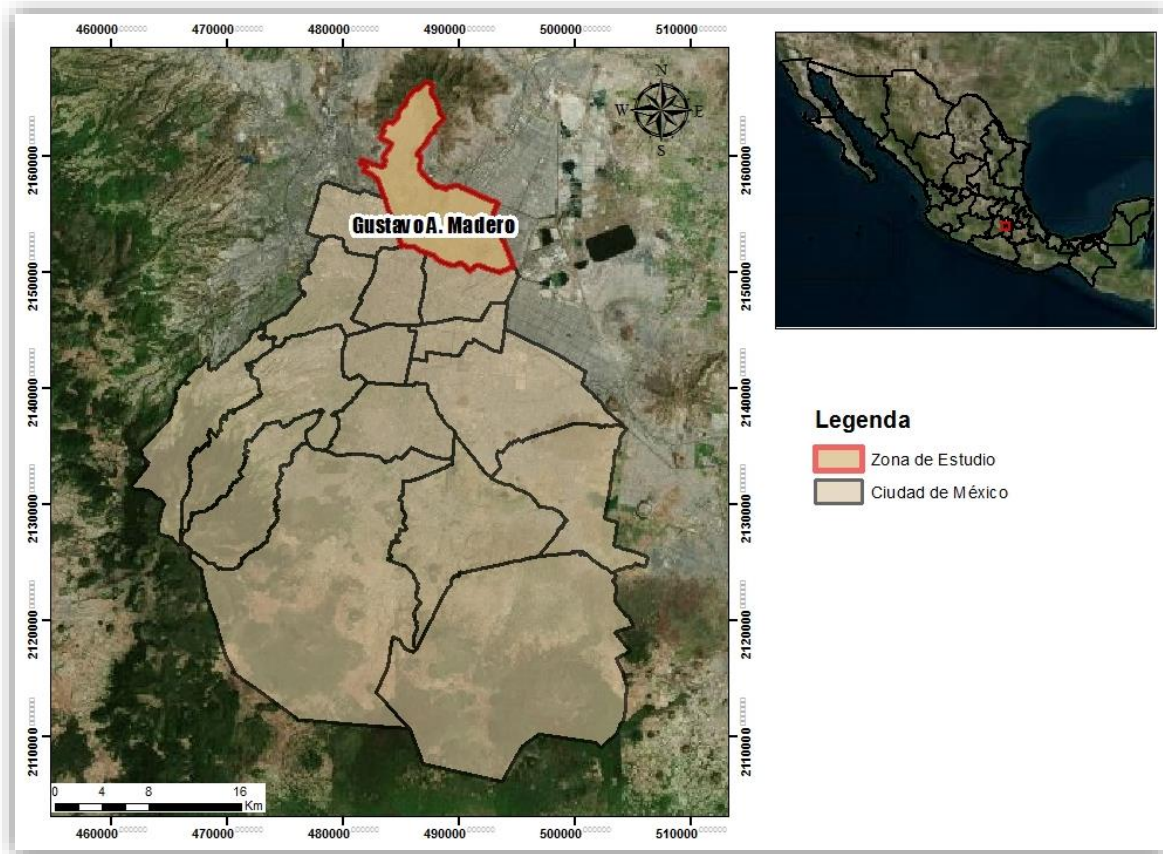


Figura 9 Localización de la zona de estudio

4.3. Información de estaciones meteorológicas

Como se menciona en la metodología, para desarrollar el presente trabajo, se hizo uso de información de estaciones meteorológicas automáticas terrestres y climatológicas, con la finalidad de construir y estimar respectivamente, las curvas intensidad-duración-período de retorno.

4.3.1. Información pluviográfica

A través del portal digital del Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario de la Universidad Nacional Autónoma de México (PEMBU), se obtuvo la información de los registros históricos de precipitación. Dichas estaciones se encuentran en la categoría de estaciones automatizadas, destinadas a medir y registrar diversas variables meteorológicas en un tiempo determinado. Cada una de las estaciones está constituida por sensores aéreos, consola y software especializado. Las variables que son registradas en dichas estaciones son: temperatura exterior, temperatura de rocío, presión atmosférica, humedad relativa exterior, magnitud y dirección del viento, precipitación, radiación solar y radiación ultravioleta (UV). El período utilizado para la medición de las distintas variables corresponde a una duración de 30 minutos, con lo cual se genera la base de datos.

Dentro del área de estudio, se cuenta con tres estaciones meteorológicas PEMBU. Su nombre, localización y años de registro se muestran en la Tabla 7:

Tabla 7 Estaciones meteorológicas automáticas PEMBU en la zona de estudio

ESTACIÓN	LOCALIZACIÓN			REGISTRO		
	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD (msnm)	DE	A	N° DE AÑOS
ESCUELA NACIONAL PREPARATORIA						
PLANTEL 3 "Justo Sierra"	19° 28' 54.3108 N	99° 5' 42.4572" W	2240	1996	2016	21
PLANTEL 9 "Pedro de Alba"	19° 29' 2.565" N	99° 7' 42.5964" W	2243	2002	2016	15
COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES						
PLANTEL Vallejo	19° 28' 57" N	99° 8' 29.958" W	2243	2003	2016	14

Fuente: Elaboración propia con datos de PEMBU, 2017

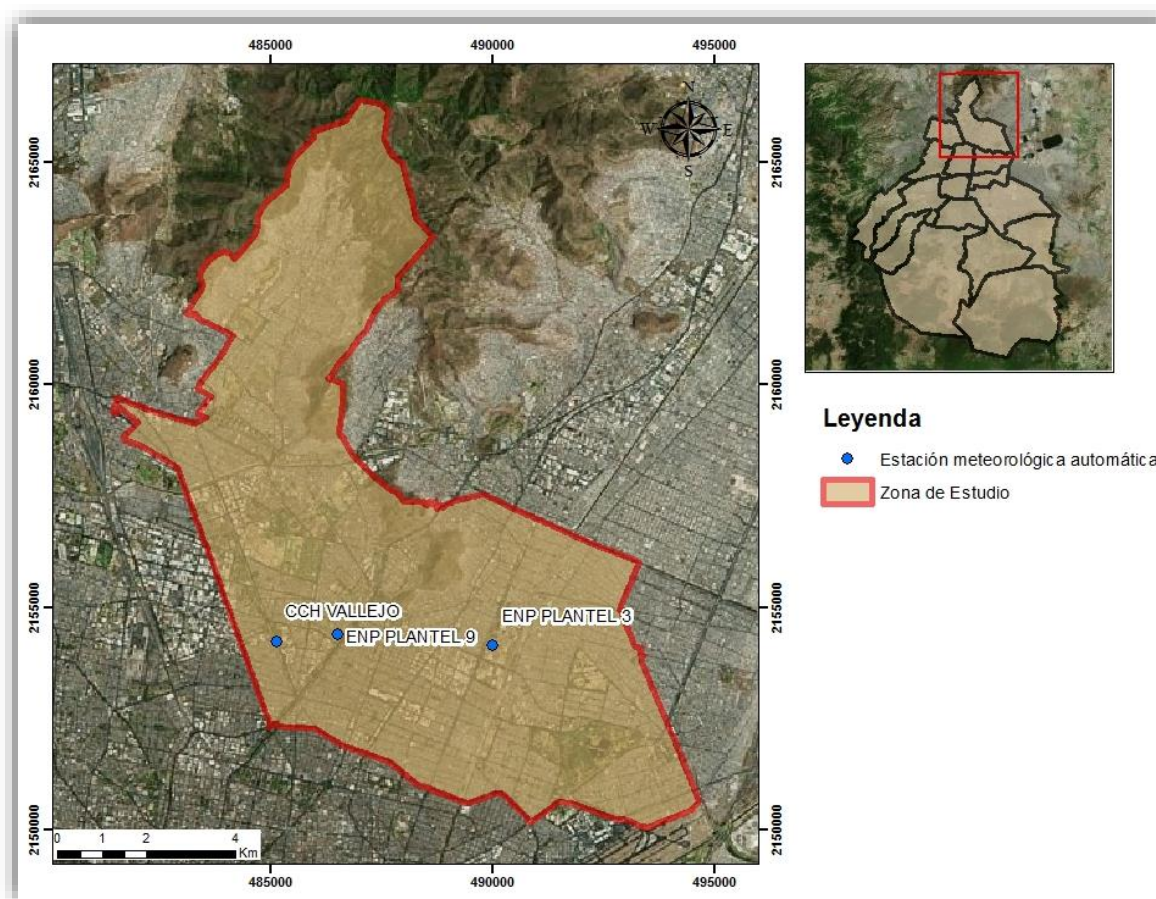


Figura 10 Localización de estaciones meteorológicas automáticas PEMBU

Tomando como criterio de selección la calidad y extensión de los registros, es decir, desechando las series anuales en las que se cuenta con información insuficiente o dudosa, finalmente se concluye que el período útil de las estaciones para la elaboración de las curvas i-d-T es el siguiente:

Tabla 8 Relación de registro de datos por estación meteorológica automática PEMBU

ESTACIÓN	REGISTRO		
ESCUELA NACIONAL PREPARATORIA	DE	A	N° DE AÑOS
PLANTEL 3 "Justo Sierra"	2004	2016	13
PLANTEL 9 "Pedro de Alba"	2009	2016	8
COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES	DE	A	N° DE AÑOS
PLANTEL Vallejo	2009	2016	8

Fuente: Elaboración propia con datos de PEMBU, 2017

4.3.1.1. Selección de precipitaciones máximas.

A partir de los archivos históricos comprendidos, se extrajeron las precipitaciones máximas para la duración de 30 min, 60 min (1 hora), 120 min (2 horas), 180 min (3 horas), 270 min (4.5 horas), 360 min (6 horas), 720 min (12 horas) y 1440 min (24 horas). Las mediciones se realizaron tomando como referencia las 00:00 horas de cada día; luego, para cada duración se utilizaron bloques que se desplazaron en intervalos de tiempo de forma discreta.

Cabe destacar el hecho de que los valores obtenidos para un año pertenecientes a distintas ventanas temporales se corresponden, en general, a episodios distintos de lluvia. Así, para un año cualquiera, el máximo anual de la precipitación para una duración de 30 minutos pudo registrarse en julio, mientras que la precipitación correspondiente a una duración de 3 horas se pudo haber generado en una tormenta del mes de septiembre.

Tabla 9 Precipitaciones máximas para diferentes duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL 3

AÑO	PRECIPITACIÓN hp (mm)							
	30 min	60 min	120 min	180 min	270 min	360 min	720 min	1440 min
2004	21.08	23.11	23.36	23.86	24.38	27.18	27.94	27.94
2005	12.19	17.27	19.81	21.34	21.34	21.34	21.34	21.59
2006	15.24	25.15	25.65	35.81	38.86	38.86	39.11	39.11
2007	30.23	38.87	42.94	43.45	43.45	43.45	43.7	43.7
2008	3.56	4.83	8.89	12.7	17.52	21.33	21.58	24.37
2009	15.75	25.91	30.99	37.6	41.15	41.15	41.15	41.15
2010	7.11	13.97	21.84	22.35	22.35	22.35	22.35	22.35
2011	29.97	37.08	39.62	40.63	40.63	40.63	40.88	40.88
2012	22.35	24.13	48	49.78	52.83	53.33	53.33	53.58
2013	28.45	38.36	40.9	42.42	43.18	43.18	43.18	43.18
2014	19.2	24.6	26.2	26.2	26.6	26.8	27	30.4
2015	22.4	24	25.2	25.6	25.6	25.8	25.8	25.8
2016	11.4	21.8	23.4	27	27.4	27.6	27.6	27.6

Fuente: Elaboración propia con datos de PEMBU, 2017

Tabla 10 Precipitaciones máximas para diferentes duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL 9

AÑO	PRECIPITACIÓN hp (mm)							
	30 min	60 min	120 min	180 min	270 min	360 min	720 min	1440 min
2009	12.7	17.02	20.07	22.61	28.46	30.49	31.76	32.27
2010	14.99	29.72	48.77	49.79	50.55	51.57	52.07	55.09
2011	18.54	28.45	31.76	33.03	33.03	33.03	33.03	33.03
2012	23.11	28.96	33.79	35.06	36.58	36.83	36.83	37.08
2013	8.89	8.89	13.73	18.56	22.62	23.63	23.63	23.63
2014	20.2	24.2	27.4	27.6	29.8	36.8	37.4	37.4
2015	21.2	24.4	26	27.4	27.6	27.6	27.6	36.6
2016	16.6	18.8	22	23.2	23.4	23.4	23.6	23.6

Fuente: Elaboración propia con datos de PEMBU, 2017

Tabla 11 Precipitaciones máximas para diferentes duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL Vallejo

AÑO	PRECIPITACIÓN hp (mm)							
	30 min	60 min	120 min	180 min	270 min	360 min	720 min	1440 min
2009	14.48	17.53	21.58	29.22	30.74	30.74	32.77	32.77
2010	21.34	37.6	56.15	56.4	57.67	57.92	58.43	63.5
2011	20.57	25.9	29.71	30.22	30.72	30.72	38.09	55.36
2012	19.3	32.77	41.66	42.93	44.45	44.7	44.7	44.95
2013	15.49	23.87	29.97	30.48	30.73	30.73	30.73	30.73
2014	16.2	19.2	23	23.2	24	36.8	38	38
2015	17	21.4	26	27.4	27.4	27.6	27.6	34.8
2016	14.4	24	24.2	24.4	24.6	24.8	24.8	24.8

Fuente: Elaboración propia con datos de PEMBU, 2017

4.3.1.2. Selección de intensidades máximas

Una vez seleccionados los valores de precipitación máxima para cada año y distintas duraciones, se calcula la intensidad máxima para cada período, la cual se logra dividiendo los valores de cada una de las series entre su duración. La variable en cuestión es una intensidad media, para la ventana temporal considerada, correspondiente a cada duración y en cada año.

Tabla 12 Intensidades máximas para diferentes duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL 3

AÑO	INTENSIDAD i (mm/h)							
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4.5 h	6 h	12 h	24 h
2004	42.16	23.11	11.68	7.95	5.42	4.53	2.33	1.16
2005	24.38	17.27	9.91	7.11	4.74	3.56	1.78	0.90
2006	30.48	25.15	12.83	11.94	8.64	6.48	3.26	1.63
2007	60.46	38.87	21.47	14.48	9.66	7.24	3.64	1.82
2008	7.12	4.83	4.45	4.23	3.89	3.56	1.80	1.02
2009	31.50	25.91	15.50	12.53	9.14	6.86	3.43	1.71
2010	14.22	13.97	10.92	7.45	4.97	3.73	1.86	0.93
2011	59.94	37.08	19.81	13.54	9.03	6.77	3.41	1.70
2012	44.70	24.13	24.00	16.59	11.74	8.89	4.44	2.23
2013	56.90	38.36	20.45	14.14	9.60	7.20	3.60	1.80
2014	38.40	24.60	13.10	8.73	5.91	4.47	2.25	1.27
2015	44.80	24.00	12.60	8.53	5.69	4.30	2.15	1.08
2016	22.80	21.80	11.70	9.00	6.09	4.60	2.30	1.15

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13 Intensidades máximas para diferentes duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL 9

AÑO	INTENSIDAD i (mm/h)							
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4.5 h	6 h	12 h	24 h
2009	25.40	17.02	10.04	7.54	6.32	5.08	2.65	1.34
2010	29.98	29.72	24.39	16.60	11.23	8.60	4.34	2.30
2011	37.08	28.45	15.88	11.01	7.34	5.51	2.75	1.38
2012	46.22	28.96	16.90	11.69	8.13	6.14	3.07	1.55
2013	17.78	8.89	6.87	6.19	5.03	3.94	1.97	0.98
2014	40.40	24.20	13.70	9.20	6.62	6.13	3.12	1.56
2015	42.40	24.40	13.00	9.13	6.13	4.60	2.30	1.53
2016	33.20	18.80	11.00	7.73	5.20	3.90	1.97	0.98

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14 Intensidades máximas para diferentes duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL Vallejo

AÑO	INTENSIDAD i (mm/h)							
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4.5 h	6 h	12 h	24 h
2009	28.96	17.53	10.79	9.74	6.83	5.12	2.73	1.37
2010	42.68	37.60	28.08	18.80	12.82	9.65	4.87	2.65
2011	41.14	25.90	14.86	10.07	6.83	5.12	3.17	2.31
2012	38.60	32.77	20.83	14.31	9.88	7.45	3.73	1.87
2013	30.98	23.87	14.99	10.16	6.83	5.12	2.56	1.28
2014	32.40	19.20	11.50	7.73	5.33	6.13	3.17	1.58
2015	34.00	21.40	13.00	9.13	6.09	4.60	2.30	1.45
2016	28.80	24.00	12.10	8.13	5.47	4.13	2.07	1.03

Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.3. Construcción de curvas i - d - T

El siguiente paso, luego de obtener las intensidades máximas para cada duración analizando las series de registros pluviográficos en busca de los valores extremos de precipitación, consiste en el ajuste de los datos de intensidad de cada ventana temporal a la función de distribución de probabilidad Gumbel.

A partir de los resultados de lo anterior citado, se realiza la estimación de las intensidades máximas para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1,000, 5,000 y 10,000 años y duraciones de 30 min, 60 min (1 hora), 120 min (2 horas), 180 min (3 horas), 270 min (4.5 horas), 360 min (6 horas), 720 min (12 horas) y 1440 min (24 horas); con lo cual se hace la representación gráfica de las curvas intensidad-duración-período de retorno.

Para la estación meteorológica automática PLANTEL 3 “Justo Sierra” se llega a los siguientes resultados:

Tabla 15 Intensidades máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL 3

T (años)	$i_{m\acute{a}x}$ (mm/h)							
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4.5 h	6 h	12 h	24 h
2	33.966	22.958	13.589	9.885	6.868	5.264	2.645	1.346
5	48.990	31.495	18.449	13.088	9.031	6.811	3.417	1.719
10	58.938	37.147	21.666	15.208	10.463	7.835	3.928	1.965
20	68.480	42.568	24.753	17.242	11.836	8.817	4.418	2.202
50	80.832	49.586	28.748	19.875	13.614	10.089	5.052	2.508
100	90.087	54.845	31.742	21.847	14.947	11.042	5.528	2.737
500	111.476	66.997	38.660	26.406	18.025	13.244	6.626	3.268
1000	120.671	72.222	41.634	28.366	19.349	14.191	7.099	3.496
5000	142.011	84.347	48.537	32.915	22.421	16.388	8.195	4.025
10000	151.200	89.568	51.509	34.874	23.744	17.334	8.667	4.252

Fuente: Elaboración propia.

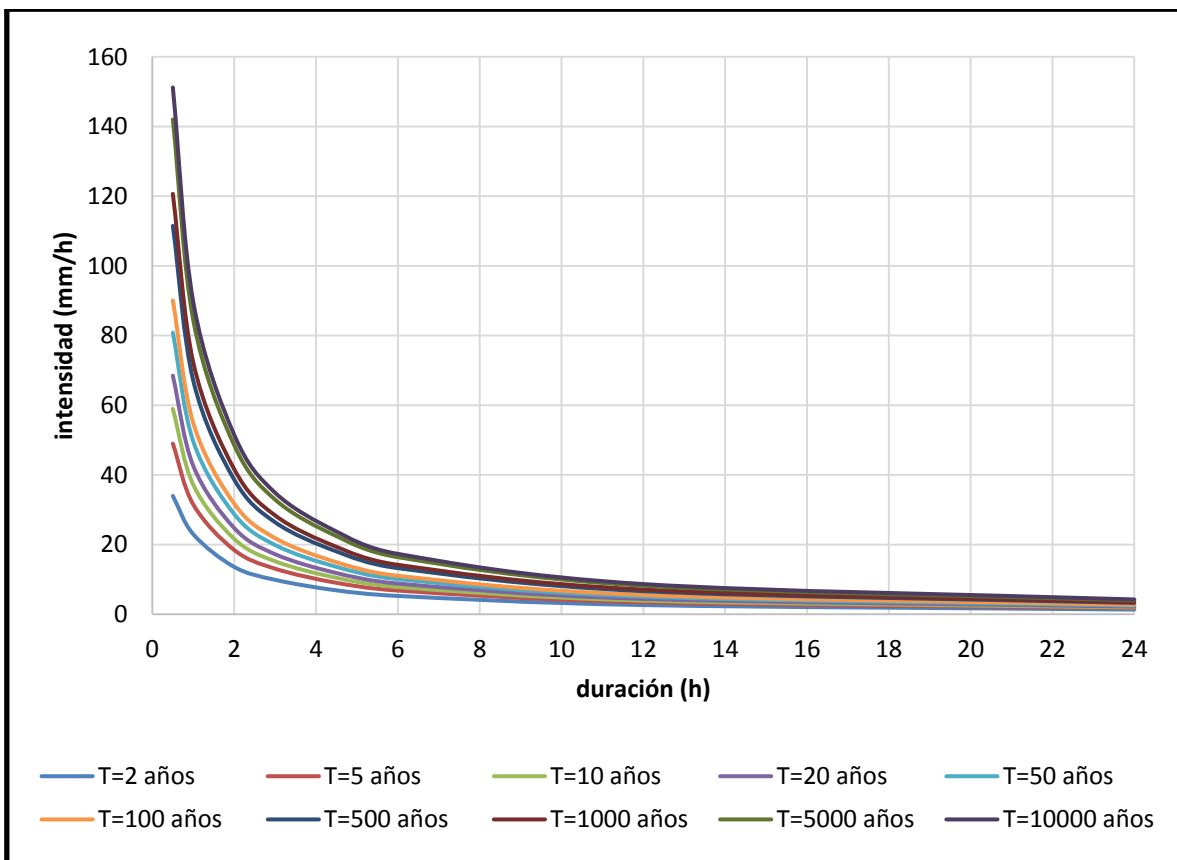


Figura 11 Curvas i-d-T. Estación meteorológica automática PLANTEL 3

Para la estación meteorológica automática PLANTEL 9 “Pedro de Alba” se llega a los siguientes resultados:

Tabla 16 Intensidades máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL 9

T (años)	$i_{\text{máx}}$ (mm/h)							
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4.5 h	6 h	12 h	24 h
2	32.506	21.369	13.099	9.350	6.674	5.235	2.643	1.384
5	40.854	27.750	17.783	12.232	8.435	6.587	3.327	1.749
10	46.381	31.975	20.884	14.141	9.602	7.482	3.780	1.990
20	51.683	36.028	23.859	15.971	10.721	8.341	4.215	2.222
50	58.545	41.273	27.709	18.341	12.169	9.452	4.778	2.522
100	63.688	45.204	30.594	20.116	13.254	10.285	5.199	2.746
500	75.572	54.288	37.262	24.220	15.762	12.210	6.173	3.266
1000	80.680	58.193	40.128	25.984	16.840	13.037	6.592	3.489
5000	92.537	67.257	46.781	30.078	19.342	14.957	7.564	4.007
10000	97.643	71.159	49.645	31.841	20.419	15.784	7.983	4.230

Fuente: Elaboración propia.

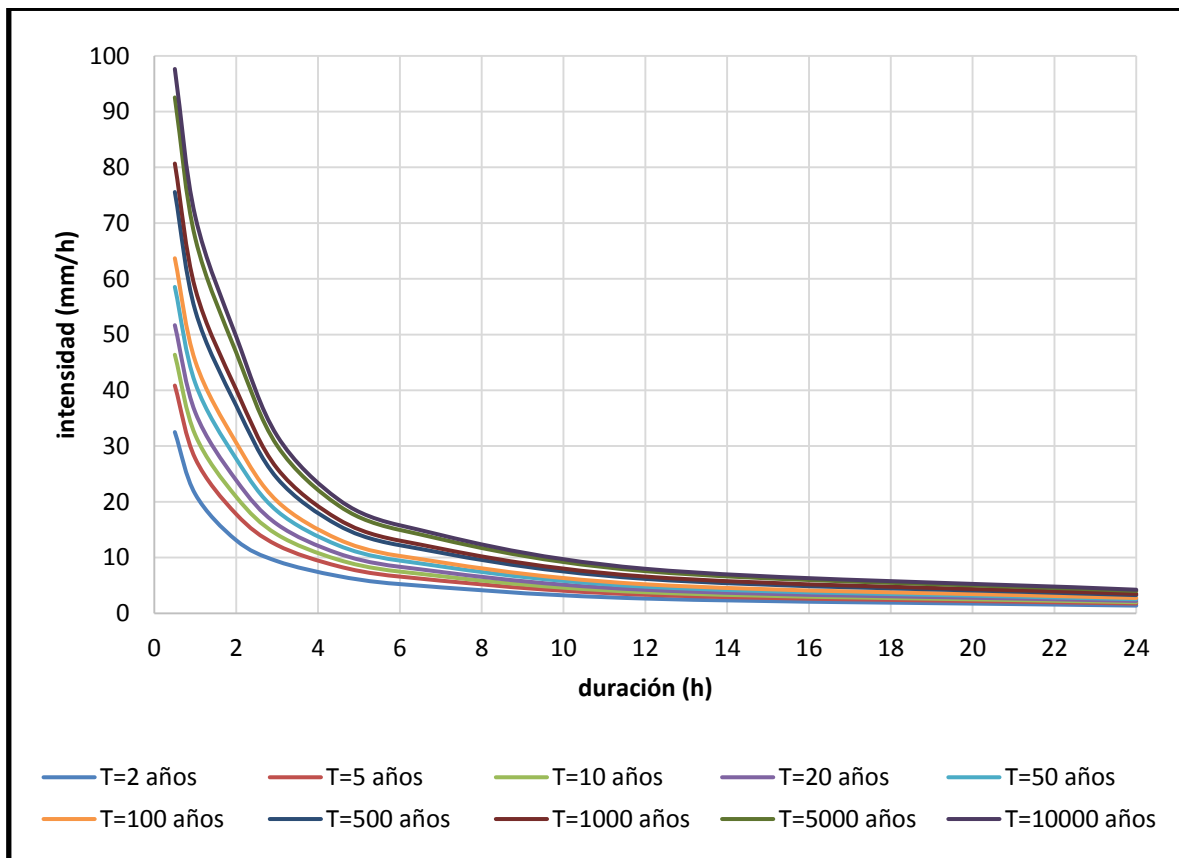


Figura 12 Curvas i-d-T. Estación meteorológica automática PLANTEL 9

Para la estación meteorológica automática PLANTEL Vallejo se llega a los siguientes resultados:

Tabla 17 Intensidades máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación meteorológica automática PLANTEL Vallejo

T (años)	$i_{\text{máx}}$ (mm/h)							
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4.5 h	6 h	12 h	24 h
2	33.800	24.166	14.799	10.398	7.087	5.618	2.926	1.602
5	38.616	30.180	20.004	13.694	9.355	7.226	3.721	2.087
10	41.805	34.162	23.451	15.877	10.857	8.291	4.248	2.407
20	44.863	37.982	26.756	17.970	12.298	9.313	4.753	2.715
50	48.822	42.926	31.035	20.680	14.162	10.635	5.406	3.113
100	51.789	46.631	34.242	22.711	15.560	11.626	5.896	3.411
500	58.645	55.193	41.651	27.403	18.788	13.916	7.027	4.101
1000	61.593	58.874	44.836	29.420	20.177	14.900	7.514	4.397
5000	68.433	67.416	52.229	34.102	23.398	17.184	8.643	5.085
10000	71.379	71.095	55.413	36.119	24.786	18.168	9.129	5.381

Fuente: Elaboración propia.

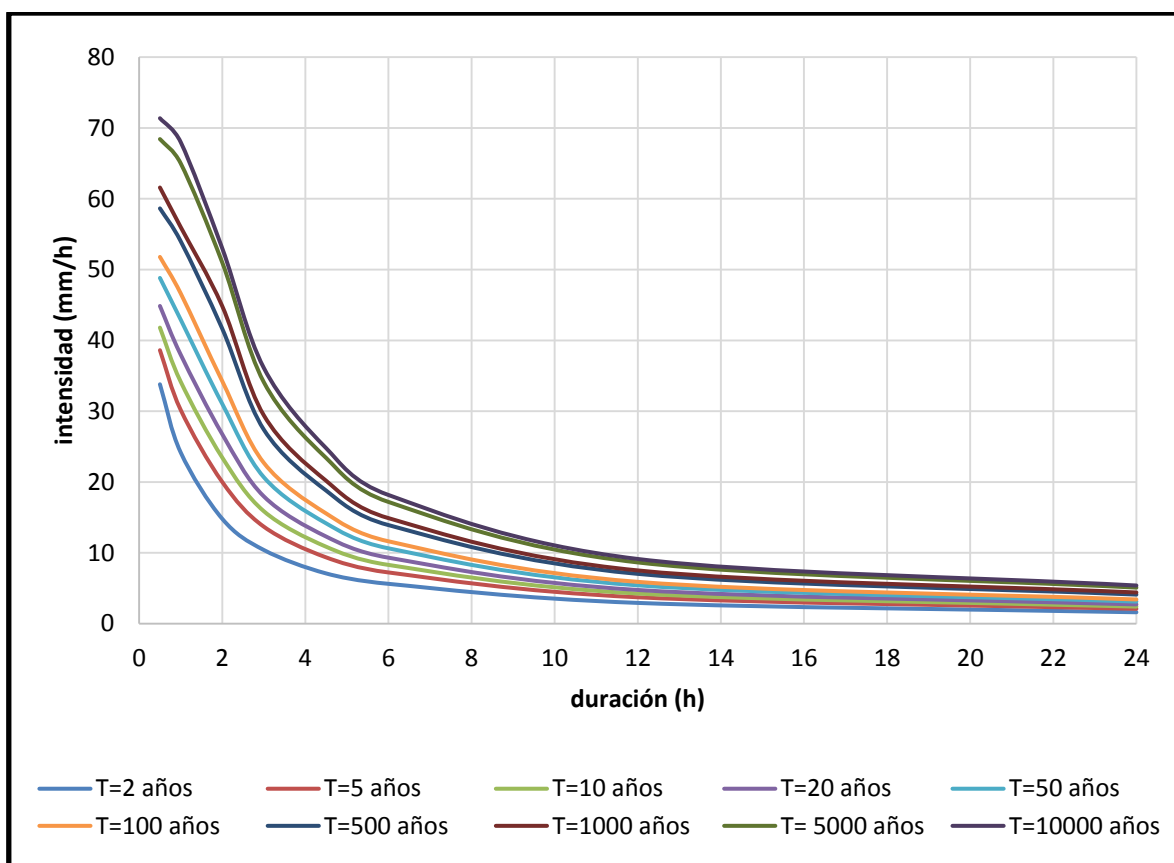


Figura 13 Curvas i-d-T. Estación meteorológica automática PLANTEL Vallejo

4.3.2. Información pluviométrica

Por medio del portal CLimate COMputing Project (CLICOM), el cual utiliza una base de datos de las estaciones climatológicas superficiales de México, administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), se extrajo la información perteneciente a la precipitación diaria de las estaciones que se encuentran en la región de estudio, es decir, la delegación Gustavo Adolfo Madero.

Las observaciones de dichas estaciones climatológicas representan los datos recopilados durante las últimas 24 horas, tomando las mediciones a las 8 am de cada día. Las variables que son registradas por las estaciones son: temperatura, precipitación, evaporación y unidades de calor.

Se muestra a continuación la información y distribución espacial de las estaciones climatológicas analizadas para el presente trabajo.

Tabla 18 Estaciones climatológicas SMN-CONAGUA en la zona de estudio

CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	ESTADO	MUNICIPIO	ORGANISMO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD (msnm)
9017	Cuatepec Barrio Bajo	Cd. De México	Gustavo A. Madero	SMN-CONAGUA	19.542222	-99.1306	2390
9025	Hacienda La Patera	Cd. De México	Gustavo A. Madero	SMN-CONAGUA	19.512778	-99.1583	2240
9029	Gran Canal km 06+250	Cd. De México	Gustavo A. Madero	SMN-CONAGUA	19.476667	-99.0914	2239
9043	San Juan de Aragón	Cd. De México	Gustavo A. Madero	SMN-CONAGUA	19.465278	-99.0792	2240
9062	Vencedora 44	Cd. De México	Gustavo A. Madero	SMN-CONAGUA	19.483333	-99.1333	2237

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN, 2017

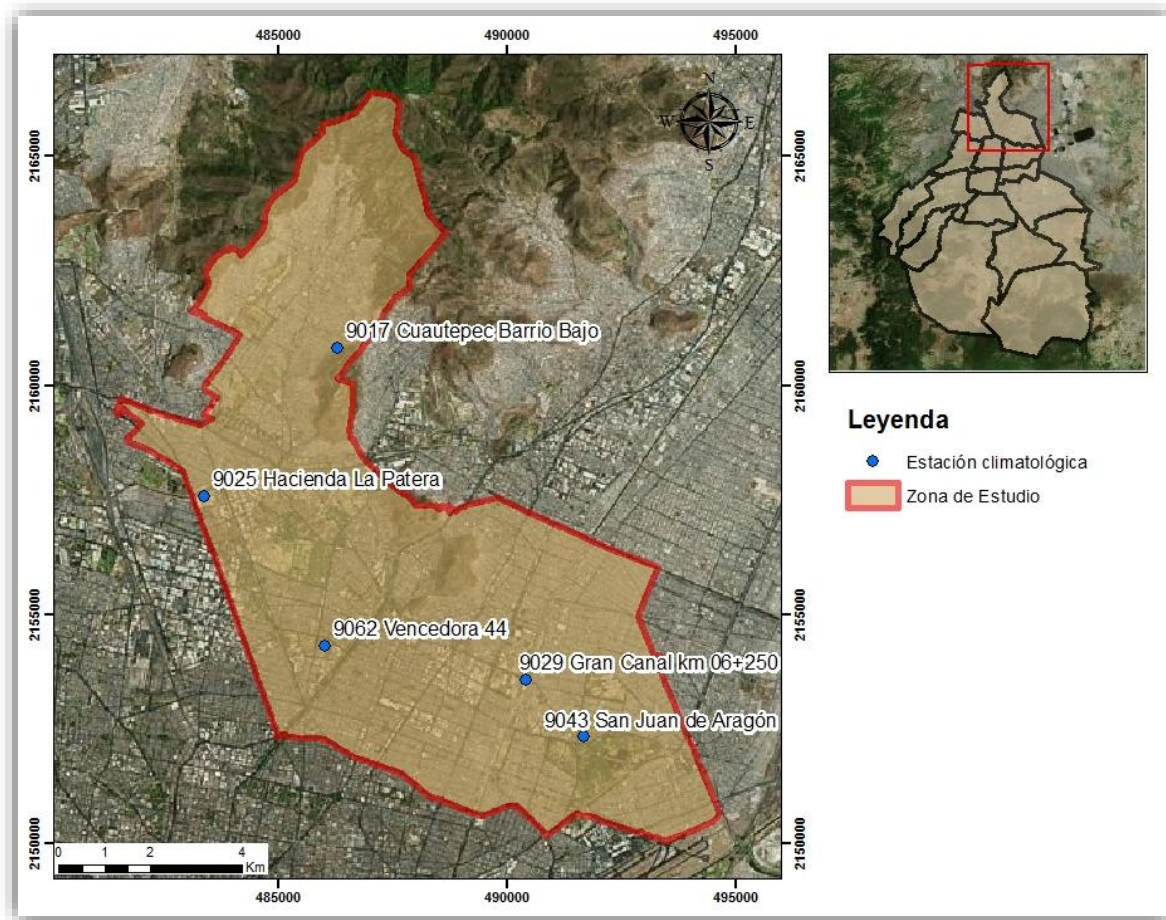


Figura 14 Localización de estaciones meteorológicas climatológicas SMN-CONAGUA

La Tabla 19 muestra el período y número de años de registro con los que cuenta cada una de las estaciones climatológicas utilizadas para el presente trabajo.

Tabla 19 Relación de registro de datos por estación climatológica

CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	REGISTRO		
		DE	A	Nº DE AÑOS
9017	Cuauhtémoc Barrio Bajo	1971	1987	17
9025	Hacienda La Patera	1961	1988	28
9029	Gran Canal km 06+250	1952	2015	63
9043	San Juan de Aragón	1954	2015	61
9062	Vencedora 44	1961	1969	9

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN, 2017

4.3.2.1. Selección de precipitaciones máximas

Partiendo de los registros anuales de la base de datos de cada estación, se hace una selección de la precipitación máxima para cada mes y a partir de esa información, se filtran los datos para determinar el valor máximo que se registró para ese año. El mismo procedimiento se realiza para cada una de las series anuales de las estaciones. Con la información recabada se ha conformado la Tabla 20:

Tabla 20 Precipitaciones máximas anuales. Estaciones climatológicas de la zona de estudio

Año	PRECIPITACIÓN $hp_{m\acute{a}x}$ (mm)				
	Est. 9017	Est. 9025	Est. 9029	Est. 9043	Est. 9062
1952			38		
1953			33		
1954			42.5	37.5	
1955			31.5	39	
1956			83.2	45	
1957			27.5	23	
1958			34	30.5	
1959			53.5	54	
1960			62.3	41	
1961		40.7	29.5	34.8	63
1962		83.3	40	38.5	47.7
1963		40.2	59.2	58.6	40
1964		45	38.9	39.6	39
1965		40	45	53.3	36.7
1966		30.2	24.5	21.4	35.2
1967		40.2	42	41.5	55.7
1968		36	56	44.5	39.8
1969		62	40.2	56	43.8
1970		44	35	40	
1971	46.7	36	41.6	40	
1972	54	80.8	36.5	30	
1973	50.3	46	43	37	
1974	30.7	40	34	30.5	
1975	69.5	32	40	27	
1976	87.9	40	36	37	
1977	47	48	42.9	27.6	
1978	37	40	30	34.5	
1979	65	24	42	31.5	
1980	80.9	40.5	44	60	
1981	48	38	36.6	27.3	
1982	46.9	39	78	59	
1983	44.7	35	38	33.4	
1984	30.7	31	37.3	62.4	
1985	42.5	30	42.5	49.5	
1986	50	38	36.5	40.6	
1987	54	30.5	63	47	
1988		42	35.8	36	
1989			34.8		
1990			33.3		
1991			45	45	
1992			41.8	10.4	
1993			36.6	38.6	
1994			37.9	37.9	
1995			47.6	48	
1996			37.3	33.1	
1997			43.9	33.7	
1998			29.8	24	
1999			51	38	
2000			36.4	49	
2001			29.4	32	
2002			63.5	72	
2003			43	39.7	
2004			40.5	32.7	
2005			50.8	45.2	
2006			52.4	35.5	
2007			64.5	63	
2008			45.6	48.1	
2009					
2010			84.5	40.12	
2011			62	60	
2012			55.8	41	
2013			57.8	55	
2014			47.1	69	
2015			56	45.2	

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.2. Pruebas de Homogeneidad

Aplicando las pruebas de homogeneidad descritas en el marco teórico, se presenta una tabla resumen para las estaciones climatológicas. El desarrollo de las pruebas puede consultarse en el ANEXO I.

Tabla 21 Pruebas de Homogeneidad. Estaciones climatológicas de la zona de estudio

Estación	PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD		
	Helmert	t de Student	Cramer
9017	SI	SI	SI
9025	SI	SI	SI
9029	NO	SI	NO
9043	SI	SI	SI
9062	SI	SI	SI

Fuente: Elaboración propia.

Con base en lo anterior, se acepta la información de las estaciones con clave 9017, 9025, 9043 y 9062 para realizar el análisis de frecuencia puntual y obtener los parámetros de la distribución de probabilidad. La estación 9029 ha sido desechada para la realización del estudio debido a que dos de las pruebas aplicadas a los datos de las series históricas han demostrado que no existe homogeneidad.

4.3.2.3. Análisis de frecuencia

El análisis de frecuencia es una herramienta cuya función es predecir el comportamiento futuro de alguna variable hidrológica en un sitio de interés, a partir de la información histórica. El método está basado en procedimientos estadísticos que permite calcular la magnitud de la variable asociada a un período de retorno. La confiabilidad depende de la calidad y longitud de la serie histórica, aunado a la incertidumbre propia de la distribución de probabilidad seleccionada.

El análisis de frecuencia realizado para las estaciones ubicadas en la región en estudio se hizo para las funciones de distribución de probabilidad Gumbel, Normal y Log-Normal. El criterio para la elección de la distribución con mejor ajuste fue a partir del mínimo error estándar. El desarrollo del análisis de frecuencia puede consultarse en el ANEXO II, por lo que únicamente se presentan los resultados del error estándar para cada estación.

Tabla 22 Prueba de bondad de ajuste de la distribución de probabilidad. Estaciones climatológicas de la zona de estudio

CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	ERROR ESTÁNDAR		
		Gumbel	Normal	Log-Normal
9017	Cuautepec Barrio Bajo	4.190	5.175	4.574
9025	Hacienda La Patera	5.603	7.142	6.311
9043	San Juan de Aragón	2.199	2.114	2.085
9062	Vencedora 44	9.293	10.139	9.430

Fuente: Elaboración propia.

Atendiendo a los datos de la tabla anterior, se establece que la mejor función de distribución de probabilidad con la que se trabajará para hacer la extrapolación de los datos para los distintos períodos de retorno es la función Gumbel.

Los parámetros de la función de distribución de probabilidad Gumbel para cada una de las estaciones climatológicas se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23 Parámetros de la función de distribución de probabilidad con mejor ajuste para las estaciones climatológicas

CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	PARÁMETRO	
		Escala (α)	Ubicación (u)
9017	Cuautepec Barrio Bajo	12.310	45.001
9025	Hacienda La Patera	10.427	35.853
9043	San Juan de Aragón	9.497	35.955
9062	Vencedora 44	7.287	40.338

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2.4. Determinación de Variables Regionales

Para poder aplicar el procedimiento descrito en la metodología, referente a la obtención de las curvas intensidad-duración-período de retorno para los registros procedentes de estaciones climatológicas, se hace necesario calcular los valores de las variables regionales de las diversas estaciones.

Resumiendo el proceso para la estimación de las variables regionales se tiene lo siguiente:

- Calcular la precipitación de 24 horas correspondiente a dos años de período de retorno. De igual manera, determinar la precipitación de 24 horas y período de retorno de 10 y 100 años con la mejor distribución, con la Ecuación (41)

$$P_t^T = v - \alpha \left[\text{Ln} \left(-\text{Ln} \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right]$$

- Obtener los cocientes lluvia-duración (R) en función de la elevación, y el cociente lluvia-frecuencia (F), necesarios para aplicar la ecuación de Chen.

$$R = 0.000000009 \cdot ELEV^2 + 0.0002 \cdot ELEV + 0.3073 \quad (42)$$

$$R = \frac{P_1^T}{P_{24}^T} \quad (43)$$

$$F = \frac{P_{24}^{100}}{P_{24}^{10}} \quad (44)$$

- Determinar los parámetros a, b y c en función del cociente lluvia-duración.

$$a = 21.03453 - 186.4683 \cdot R + 825.4915 \cdot R^2 - 1084.846 \cdot R^3 + 524.06 \cdot R^4 \quad (45)$$

$$b = 3.487775 - 68.13976 \cdot R + 389.4625 \cdot R^2 - 612.4041 \cdot R^3 + 315.8721 \cdot R^4 \quad (46)$$

$$c = 0.2677553 - 0.9481759 \cdot R + 2.109415 \cdot R^2 - 4.827012 \cdot R^3 + 2.459584 \cdot R^4 \quad (47)$$

- Calcular la precipitación de 60 minutos y un período de retorno de 10 años mediante la ecuación de Bell.

$$P_t^T = (0.35 \cdot \ln(T) + 0.76) \cdot (0.54 \cdot t^{0.25} - 0.5) \cdot P_{60}^2$$

Así, se tiene para cada una de las estaciones lo siguiente:

Tabla 24 Variables regionales de las estaciones climatológicas de la zona de estudio

CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	VARIABLES REGIONALES						
		P_{60}^2	P_1^{10}	R	F	a	b	c
9017	Cuautepec Barrio Bajo	36.337	57.065	0.734	1.398	52.008	12.808	0.905
9025	Hacienda La Patera	28.175	44.247	0.710	1.413	49.680	12.520	0.902
9043	San Juan de Aragón	28.005	43.980	0.710	1.389	49.680	12.520	0.902
9062	Vencedora 44	30.522	47.933	0.710	1.302	49.634	12.515	0.902

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2.5. Estimación de curvas $i-d-T$

Las variables regionales determinadas en el apartado anterior, permiten el cálculo de la altura de precipitación asociada a diferentes períodos de retorno y duraciones de tormenta por medio de la ecuación de Cheng-Lung Chen; a partir de las cuales se obtendrán las intensidades máximas para dichos períodos de retorno y duraciones.

Para la estación climatológica Cuautepec Barrio Bajo se llega a los siguientes resultados:

Tabla 25 Precipitaciones máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación climatológica clave 9017

T (años)	PRECIPITACIÓN hp (mm)							
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4.5 h	6 h	12 h	24 h
2	35.724	44.176	51.275	54.883	58.200	60.428	65.550	70.558
5	43.558	53.864	62.520	66.919	70.964	73.681	79.926	86.033
10	49.485	61.193	71.027	76.025	80.620	83.706	90.801	97.739
20	55.412	68.522	79.534	85.130	90.276	93.731	101.676	109.444
50	63.246	78.211	90.779	97.166	103.040	106.984	116.052	124.919
100	69.173	85.540	99.286	106.272	112.695	117.009	126.927	136.625
500	82.934	102.557	119.038	127.414	135.115	140.287	152.179	163.805
1000	88.861	109.886	127.544	136.519	144.771	150.313	163.054	175.511
5000	102.622	126.903	147.296	157.661	167.190	173.590	188.305	202.691
10000	108.549	134.232	155.803	166.766	176.846	183.616	199.180	214.397

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26 Intensidades máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación climatológica clave 9017

T (años)	INTENSIDAD i (mm/h)							
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4.5 h	6 h	12 h	24 h
2	71.447	44.176	25.638	18.294	12.933	10.071	5.463	2.940
5	87.117	53.864	31.260	22.306	15.770	12.280	6.661	3.585
10	98.970	61.193	35.514	25.342	17.916	13.951	7.567	4.072
20	110.823	68.522	39.767	28.377	20.061	15.622	8.473	4.560
50	126.493	78.211	45.390	32.389	22.898	17.831	9.671	5.205
100	138.346	85.540	49.643	35.424	25.043	19.502	10.577	5.693
500	165.869	102.557	59.519	42.471	30.026	23.381	12.682	6.825
1000	177.722	109.886	63.772	45.506	32.171	25.052	13.588	7.313
5000	205.245	126.903	73.648	52.554	37.153	28.932	15.692	8.445
10000	217.098	134.232	77.902	55.589	39.299	30.603	16.598	8.933

Fuente: Elaboración propia.

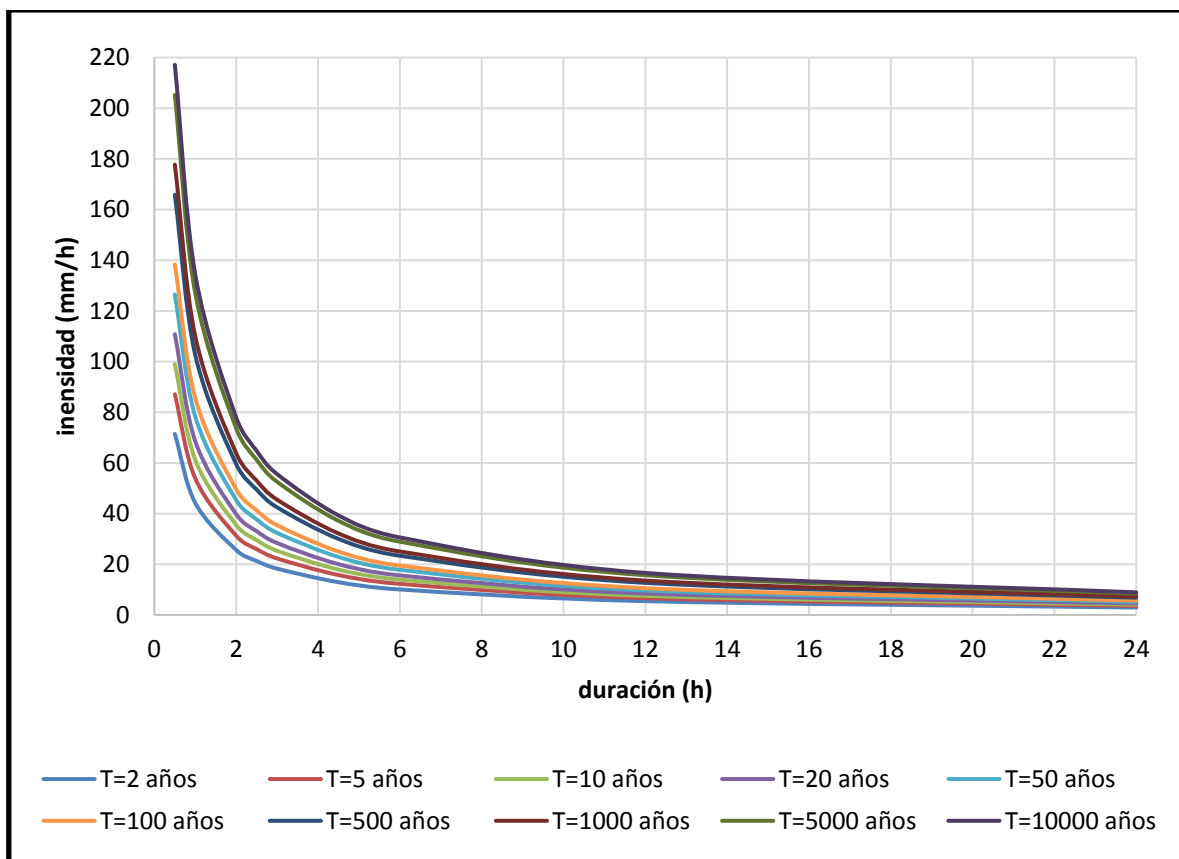


Figura 15 Curvas i - d - T . Estación climatológica clave 9017

Para la estación climatológica Hacienda La Patera se llega a los siguientes resultados:

Tabla 27 Precipitaciones máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación climatológica clave 9025

T (años)	PRECIPITACIÓN hp (mm)							
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4.5 h	6 h	12 h	24 h
2	26.579	32.847	38.145	40.858	43.368	45.062	48.981	52.842
5	32.721	40.438	46.960	50.299	53.389	55.475	60.300	65.052
10	37.368	46.180	53.628	57.442	60.970	63.352	68.862	74.289
20	42.014	51.921	60.296	64.584	68.551	71.228	77.424	83.526
50	48.156	59.512	69.110	74.025	78.572	81.641	88.743	95.737
100	52.802	65.254	75.778	81.167	86.153	89.518	97.305	104.973
500	63.590	78.586	91.260	97.751	103.755	107.808	117.185	126.421
1000	68.236	84.327	97.928	104.893	111.336	115.685	125.747	135.658
5000	79.024	97.660	113.411	121.476	128.938	133.975	145.628	157.105
10000	83.670	103.401	120.079	128.619	136.519	141.852	154.190	166.342

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28 Intensidades máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación climatológica clave 9025

T (años)	INTENSIDAD i (mm/h)							
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4.5 h	6 h	12 h	24 h
2	53.159	32.847	19.073	13.619	9.637	7.510	4.082	2.202
5	65.443	40.438	23.480	16.766	11.864	9.246	5.025	2.711
10	74.735	46.180	26.814	19.147	13.549	10.559	5.738	3.095
20	84.028	51.921	30.148	21.528	15.233	11.871	6.452	3.480
50	96.311	59.512	34.555	24.675	17.460	13.607	7.395	3.989
100	105.604	65.254	37.889	27.056	19.145	14.920	8.109	4.374
500	127.180	78.586	45.630	32.584	23.057	17.968	9.765	5.268
1000	136.472	84.327	48.964	34.964	24.741	19.281	10.479	5.652
5000	158.049	97.660	56.705	40.492	28.653	22.329	12.136	6.546
10000	167.341	103.401	60.039	42.873	30.338	23.642	12.849	6.931

Fuente: Elaboración propia.

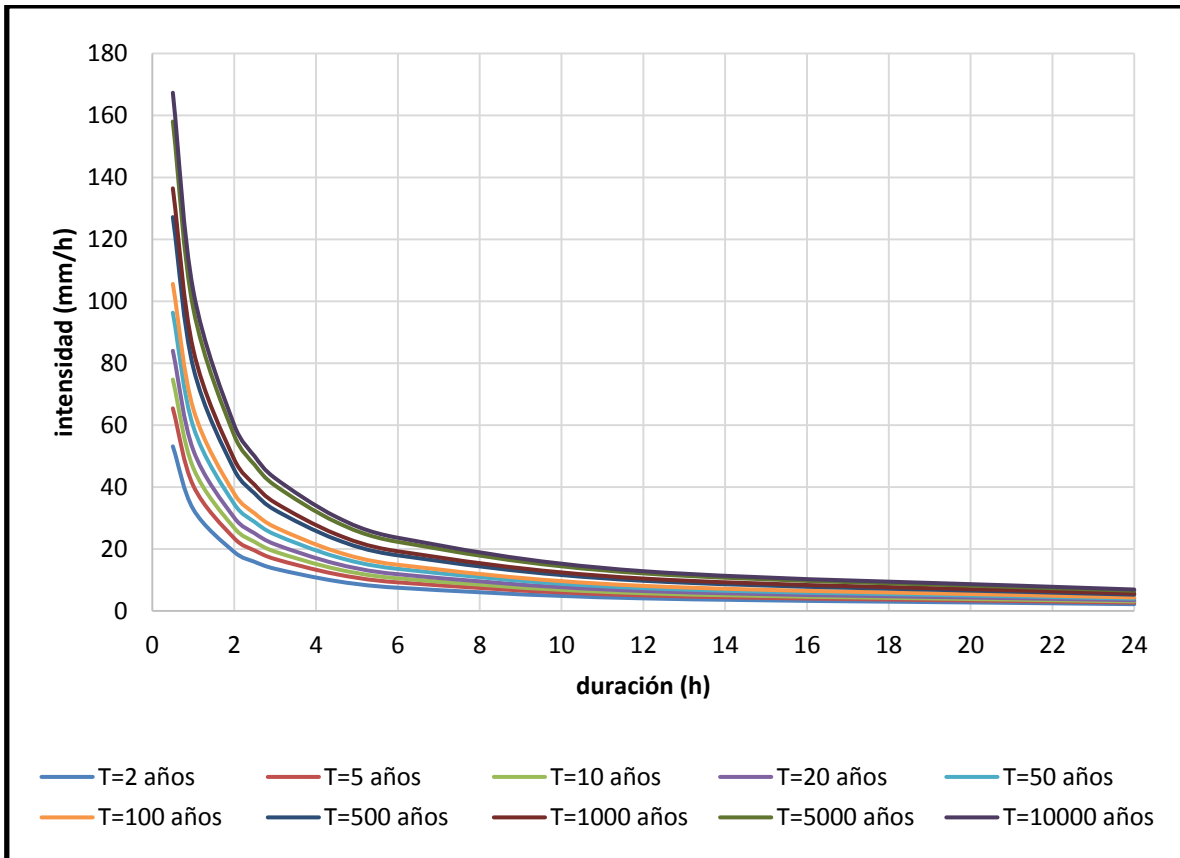


Figura 16 Curvas i-d-T. Estación climatológica clave 9025

Para la estación climatológica San Juan de Aragón se llega a los siguientes resultados:

Tabla 29 Precipitaciones máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación climatológica clave 9043

T (años)	PRECIPITACIÓN hp (mm)							
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4.5 h	6 h	12 h	24 h
2	27.036	33.412	38.801	41.560	44.113	45.836	49.823	53.750
5	32.790	40.522	47.058	50.404	53.500	55.590	60.426	65.188
10	37.142	45.901	53.304	57.095	60.602	62.969	68.446	73.841
20	41.494	51.279	59.550	63.785	67.703	70.348	76.467	82.493
50	47.248	58.390	67.807	72.629	77.091	80.102	87.069	93.932
100	51.600	63.768	74.053	79.320	84.192	87.481	95.090	102.584
500	61.706	76.257	88.557	94.855	100.681	104.614	113.713	122.675
1000	66.058	81.636	94.803	101.545	107.782	111.993	121.734	131.328
5000	76.164	94.125	109.306	117.080	124.271	129.126	140.357	151.419
10000	80.516	99.504	115.552	123.770	131.373	136.504	148.378	160.072

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30 Intensidades máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación climatológica clave 9043

T (años)	INTENSIDAD i (mm/h)							
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4.5 h	6 h	12 h	24 h
2	54.072	33.412	19.400	13.853	9.803	7.639	4.152	2.240
5	65.579	40.522	23.529	16.801	11.889	9.265	5.035	2.716
10	74.284	45.901	26.652	19.032	13.467	10.495	5.704	3.077
20	82.989	51.279	29.775	21.262	15.045	11.725	6.372	3.437
50	94.496	58.390	33.904	24.210	17.131	13.350	7.256	3.914
100	103.200	63.768	37.027	26.440	18.709	14.580	7.924	4.274
500	123.412	76.257	44.278	31.618	22.374	17.436	9.476	5.111
1000	132.117	81.636	47.401	33.848	23.952	18.665	10.144	5.472
5000	152.328	94.125	54.653	39.027	27.616	21.521	11.696	6.309
10000	161.033	99.504	57.776	41.257	29.194	22.751	12.365	6.670

Fuente: Elaboración propia.

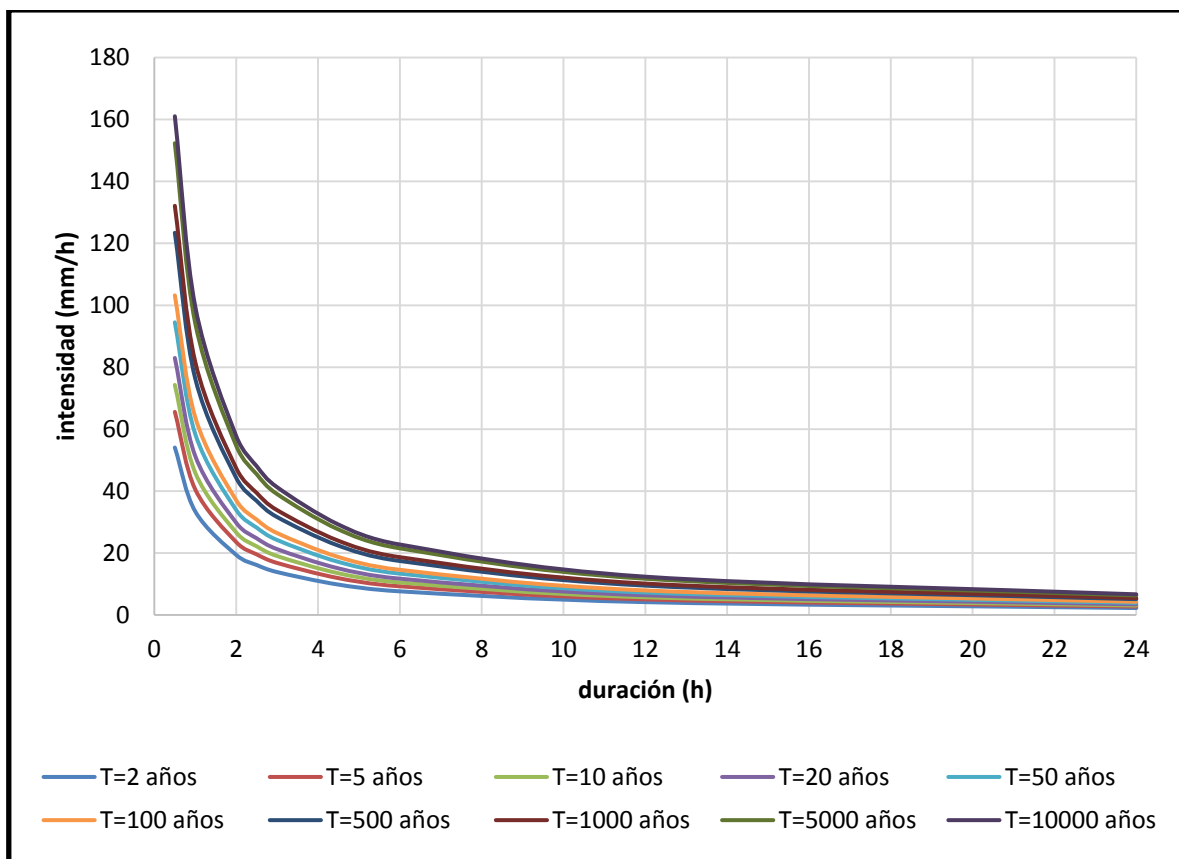


Figura 17 Curvas i - d - T . Estación climatológica clave 9043

Para la estación climatológica Vencedora 44 se llega a los siguientes resultados:

Tabla 31 Precipitaciones máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación climatológica clave 9062

T (años)	PRECIPITACIÓN hp (mm)							
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4.5 h	6 h	12 h	24 h
2	31.925	39.453	45.817	49.076	52.092	54.128	58.839	63.479
5	36.784	45.458	52.791	56.546	60.021	62.367	67.795	73.142
10	40.460	50.001	58.067	62.197	66.019	68.599	74.570	80.451
20	44.136	54.544	63.342	67.848	72.017	74.832	81.345	87.760
50	48.995	60.549	70.316	75.318	79.946	83.071	90.301	97.422
100	52.671	65.092	75.592	80.969	85.944	89.303	97.076	104.732
500	61.207	75.640	87.841	94.090	99.872	103.775	112.807	121.703
1000	64.883	80.183	93.117	99.741	105.870	110.007	119.581	129.013
5000	73.418	90.731	105.366	112.862	119.797	124.479	135.312	145.984
10000	77.094	95.273	110.642	118.513	125.795	130.711	142.087	153.294

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32 Intensidades máximas para distintos períodos de retorno y duraciones. Estación climatológica clave 9062

T (años)	INTENSIDAD i (mm/h)							
	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4.5 h	6 h	12 h	24 h
2	63.849	39.453	22.909	16.359	11.576	9.021	4.903	2.645
5	73.568	45.458	26.395	18.849	13.338	10.394	5.650	3.048
10	80.920	50.001	29.033	20.732	14.671	11.433	6.214	3.352
20	88.272	54.544	31.671	22.616	16.004	12.472	6.779	3.657
50	97.991	60.549	35.158	25.106	17.766	13.845	7.525	4.059
100	105.343	65.092	37.796	26.990	19.099	14.884	8.090	4.364
500	122.413	75.640	43.921	31.363	22.194	17.296	9.401	5.071
1000	129.765	80.183	46.558	33.247	23.527	18.335	9.965	5.376
5000	146.836	90.731	52.683	37.621	26.622	20.746	11.276	6.083
10000	154.188	95.273	55.321	39.504	27.954	21.785	11.841	6.387

Fuente: Elaboración propia.

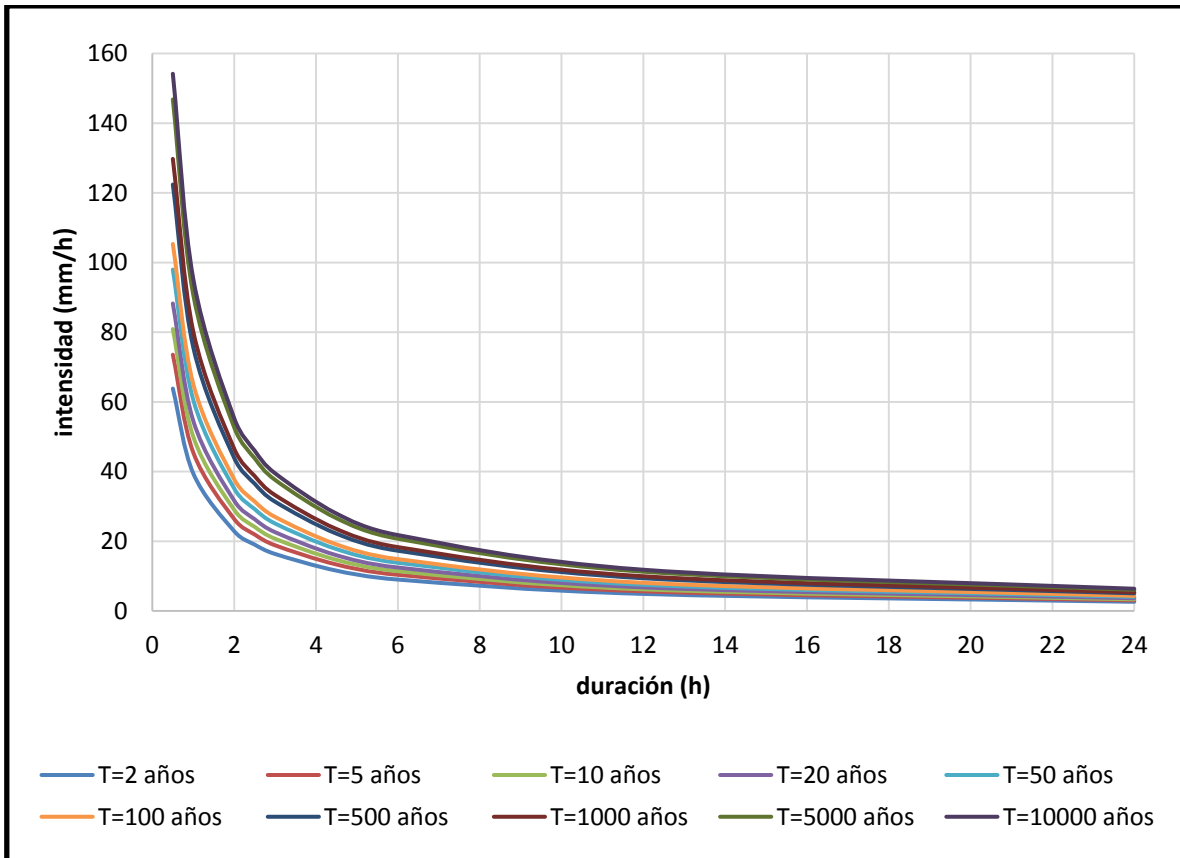


Figura 18 Curvas i-d-T. Estación climatológica clave 9062

4.3.3. Contraste entre intensidades calculadas y estimadas

Debido a que la información con la que se realiza el presente trabajo proviene de registros pluviográficos y registros pluviométricos, surge la necesidad de comparar las intensidades de precipitación obtenidas a través de dichos registros.

El análisis de correlación es la herramienta estadística que se emplea para describir el grado de relación que hay entre dos variables. De acuerdo a lo anterior, para tener una medida numérica que describa el grado o fuerza con el que dichas intensidades están relacionadas, se utiliza el coeficiente de determinación, éste es igual a la proporción de la variación total de los valores de la variable dependiente, "Y", que puede explicarse por medio de la asociación de "Y" con "X" medida por la línea de regresión estimada. El coeficiente de determinación se calcula con la siguiente expresión:

$$R^2 = \frac{[n \sum xy - (\sum x)(\sum y)]^2}{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}$$

Un R^2 igual a 1 significa un ajuste lineal perfecto, ya que la variación total de la variable “Y” es explicada por el modelo de correlación. El valor cero indica la no representatividad del modelo lineal, lo que supone que el modelo no explica nada de la variación total de la variable “Y”.

La elección de las estaciones a compararse se hizo de acuerdo a la localización y el período de registro que poseen, es decir, por la cercanía entre ellas y la similitud en los años de registro. A partir de los criterios mencionados, se ha seleccionado la estación meteorológica automática PLANTEL 3 “Justo Sierra” y la estación climatológica San Juan de Aragón con clave 9043.

Para la realización de la correlación se requiere la asignación de la variable dependiente e independiente; para este análisis se toma como criterio la confiabilidad de los valores de los registros, por lo que se propone utilizar como variable independiente las intensidades derivadas de las estaciones meteorológicas automáticas, ya que los registros pluviográficos cumplen dicha característica al contar con datos puntuales en el intervalo a considerar, es decir, no surgen de un ajuste de distribución de probabilidad.

Así, para cada uno de los períodos de retorno se presenta la correlación lineal y su respectivo coeficiente de determinación.

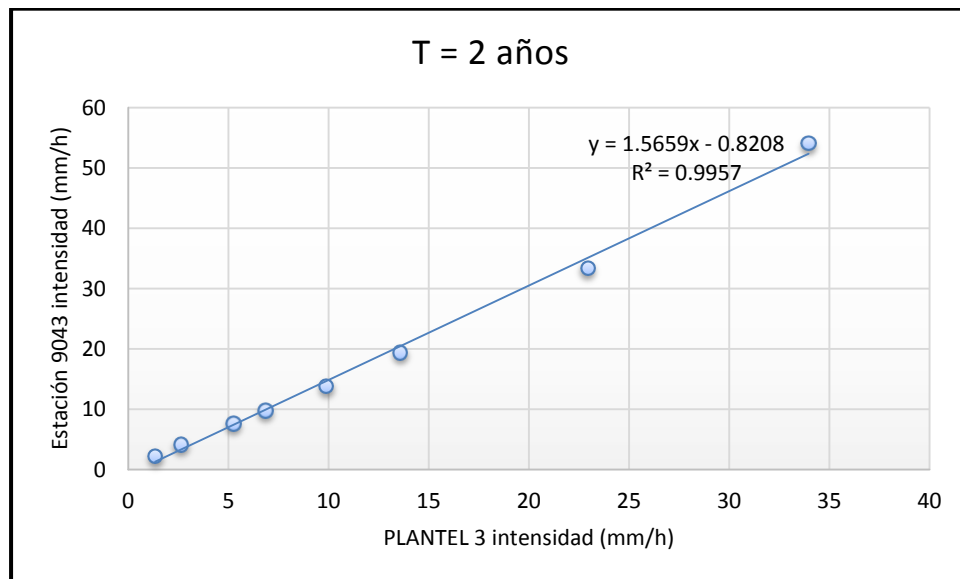


Figura 19 Correlación de intensidades T = 2 años

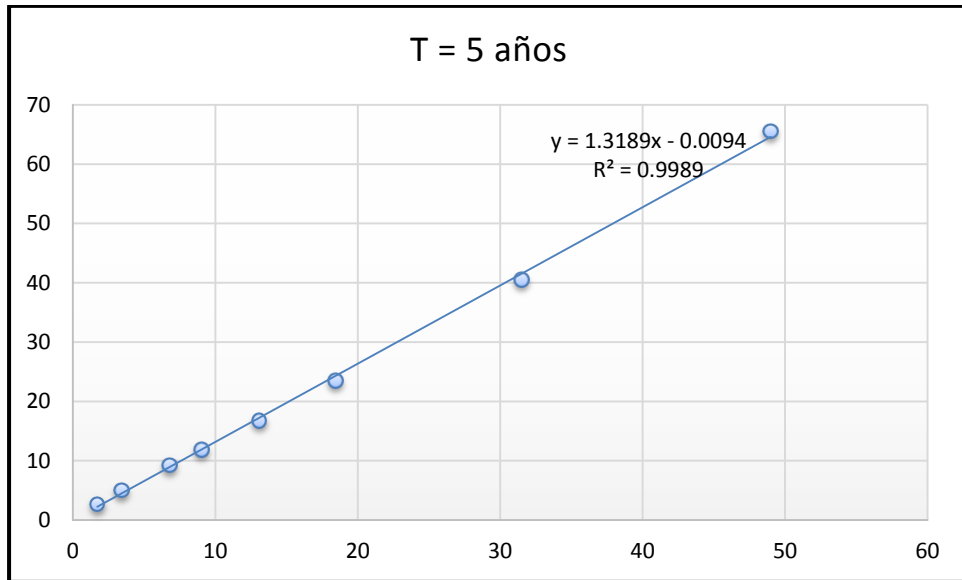


Figura 20 Correlación de intensidades T = 5 años

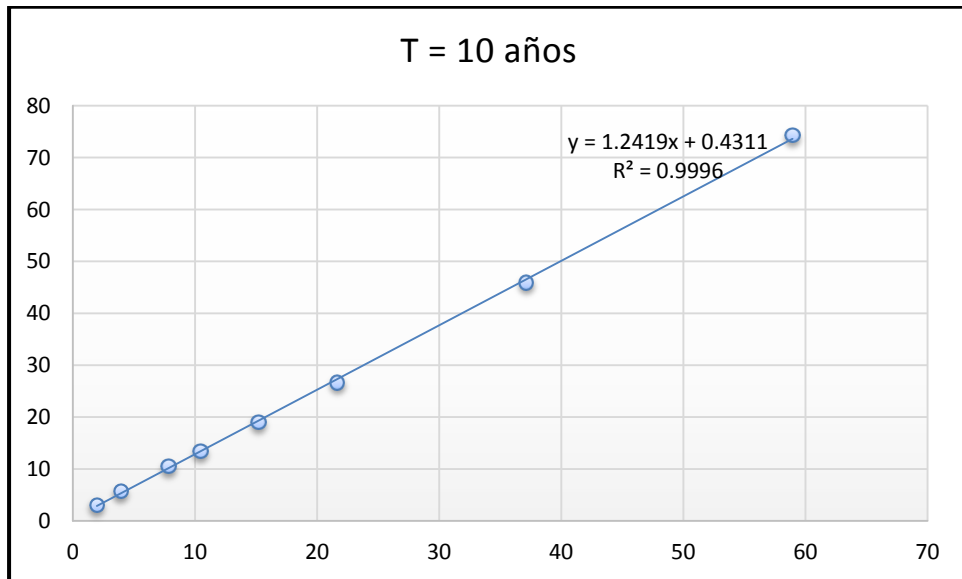


Figura 21 Correlación de intensidades T = 10 años

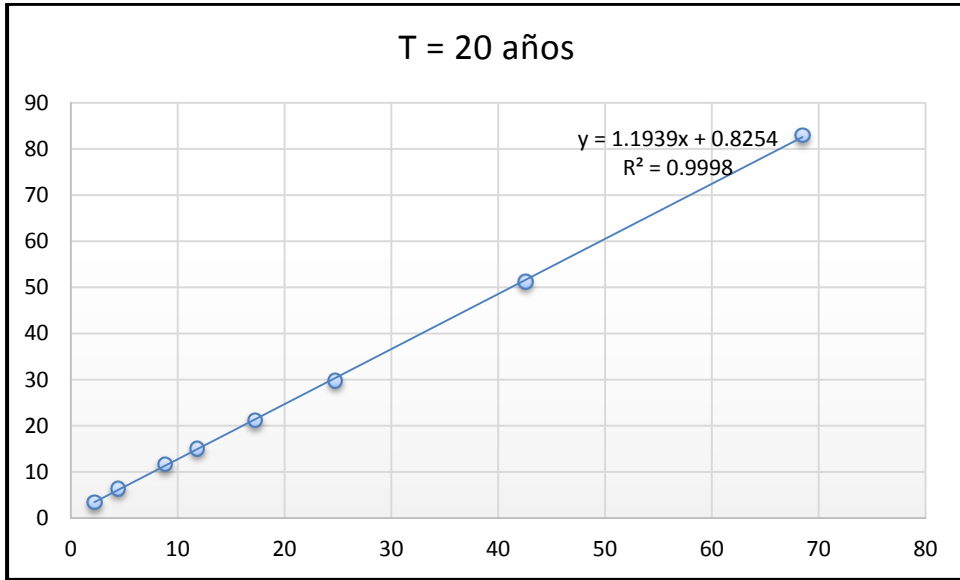


Figura 22 Correlación de intensidades T = 20 años

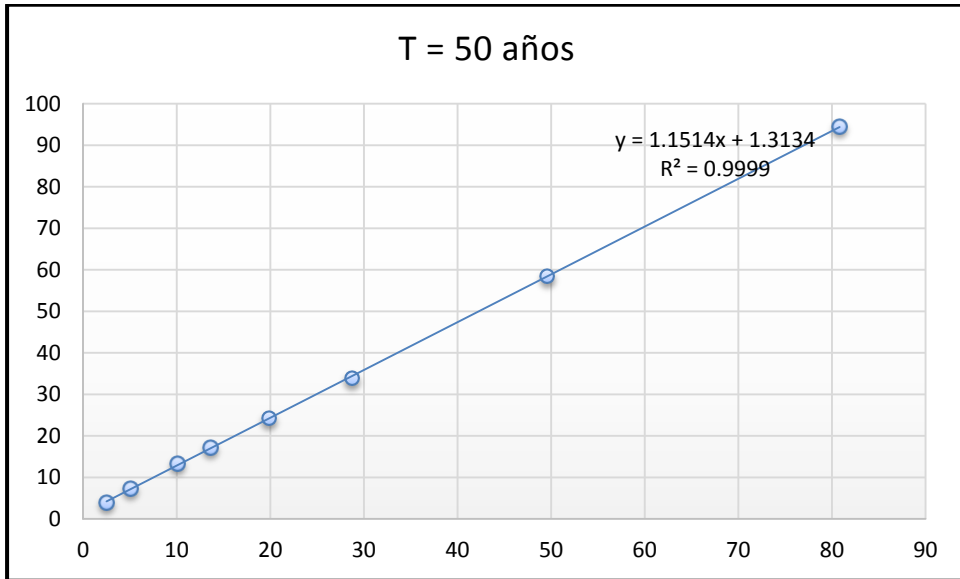


Figura 23 Correlación de intensidades T = 50 años

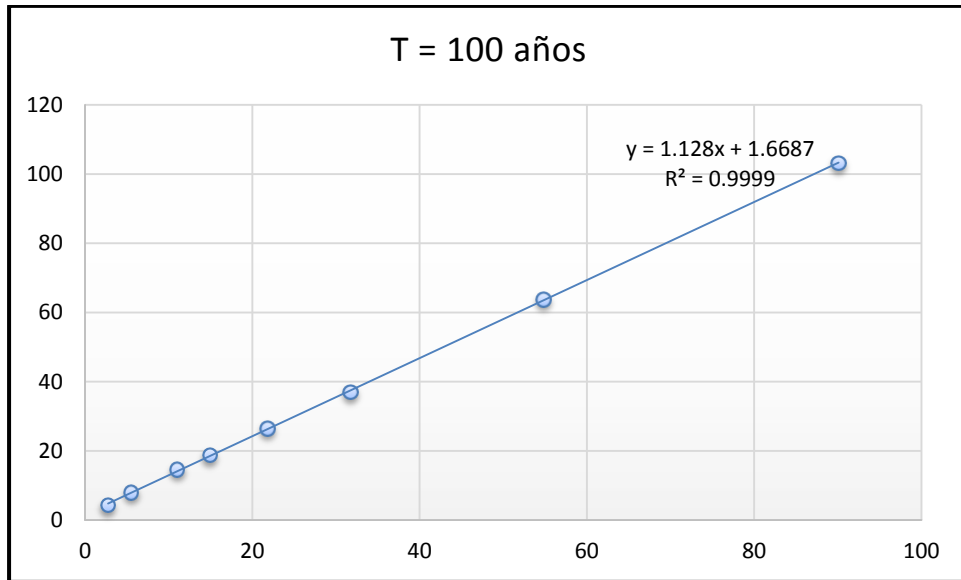


Figura 24 Correlación de intensidades T = 100 años

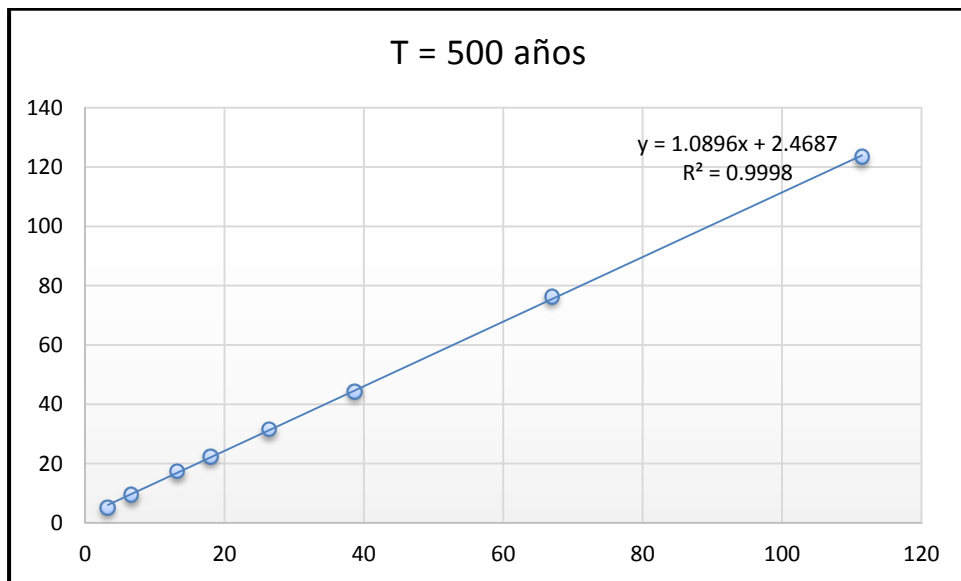


Figura 25 Correlación de intensidades T = 500 años

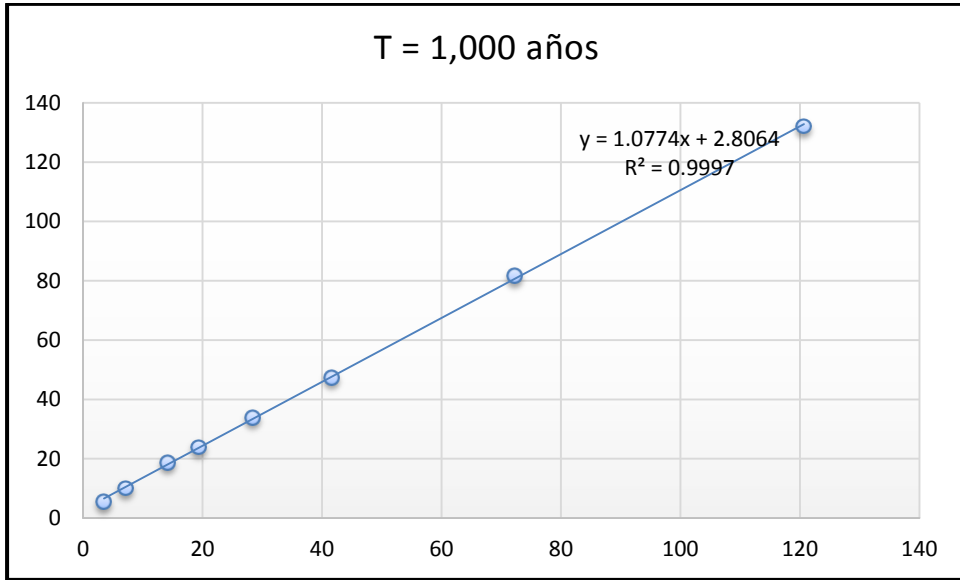


Figura 26 Correlación de intensidades T = 1,000 años

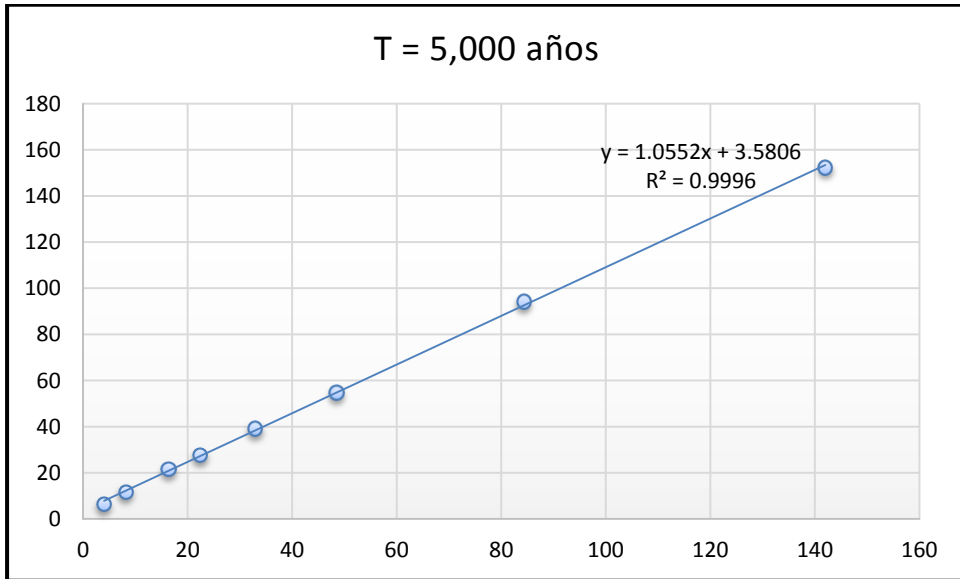


Figura 27 Correlación de intensidades T = 5,000 años

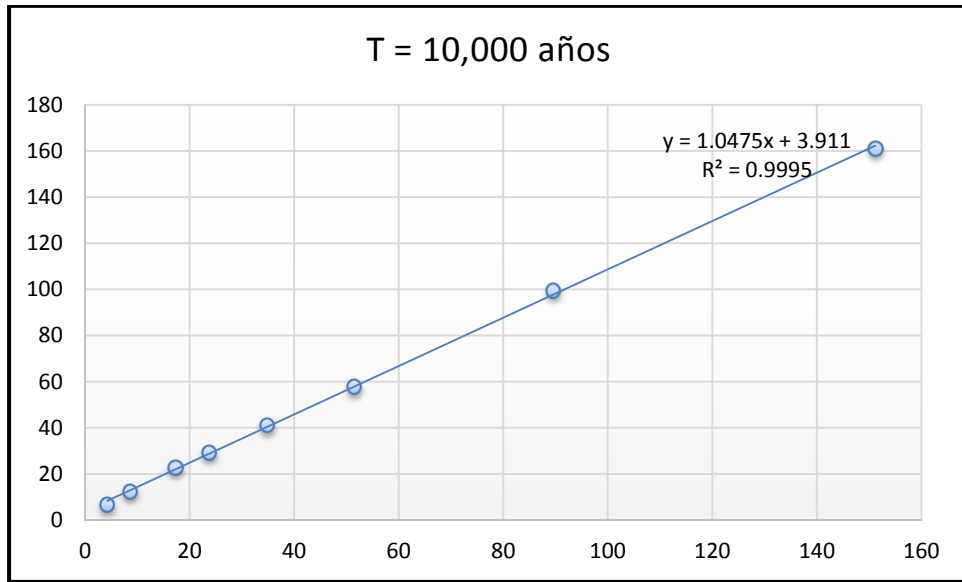


Figura 28 Correlación de intensidades T = 10,000 años

4.4. Información de tipos de suelo

Para obtener la información referente a la edafología, textura y uso de suelo de la región de estudio, se hizo acopio de los mapas elaborados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); en los cuales se proporciona información respecto a las características morfológicas, físicas y químicas de los suelos del territorio nacional.

En la carta edafológica se muestra la distribución de los suelos, clasificados de acuerdo con el sistema FAO/UNESCO (1970) modificado por la Dirección General de Geografía. En dicha clasificación se indica la textura o cantidad de arena, limo y arcilla de la parte superficial del suelo; la presencia de fases químicas como salinidad y sodicidad; y la presencia de fases físicas como roca o estratos cementados cercanos a la parte superficial del suelo o fragmentos de ellos en la superficie del mismo.

Entonces, de acuerdo al mapa edafológico, dentro de la delegación Gustavo Adolfo Madero predominan los siguientes tipos de suelo:

Feozem. Suelos oscuros ricos en materia orgánica. Se hallan en terrenos desde planos hasta montañosos y la susceptibilidad a la erosión depende principalmente de la pendiente del terreno donde se encuentren. Tienen una capacidad de infiltración media. Se encuentran en ambiente cálido a fresco, regiones moderadamente continentales, suficientemente húmedas de modo que la mayoría de los años hay alguna percolación a través del suelo, pero también con períodos en los cuales el suelo se seca; tierras llanas a onduladas; la vegetación natural es pastizal como la estepa de pastos altos y/o bosque.

Solonchak. Suelos que tienen alta concentración de sales solubles en algún momento del año. Los Solonchaks están ampliamente confinados a zonas climáticas áridas y semiáridas y regiones costeras en todos los climas. La vegetación típica para este tipo de suelos es el pastizal u otras plantas que toleran el exceso de sal (halófilas).

La distribución espacial de los distintos tipos de suelo existentes en el caso de estudio se presenta a continuación.

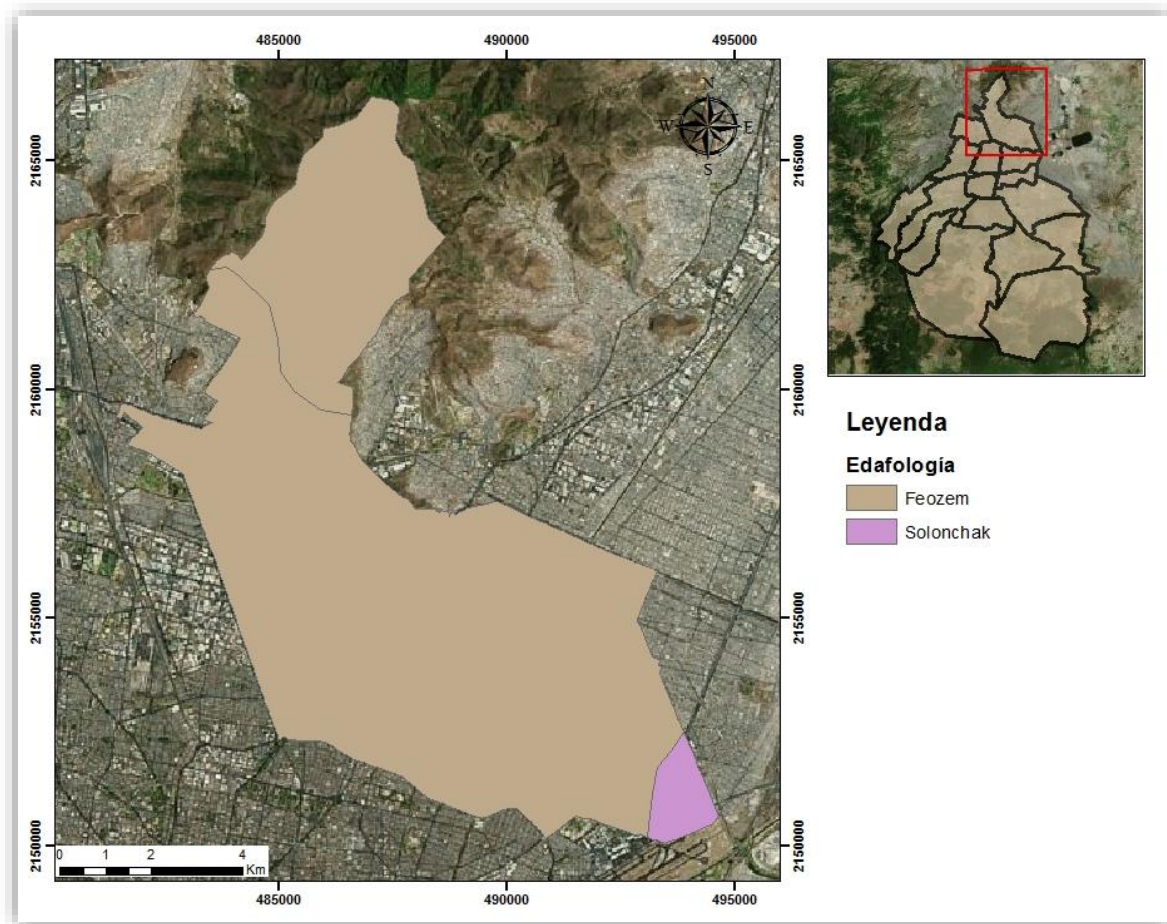


Figura 29 Edafología de la zona de estudio

Dentro de las características que muestra la carta edafológica de INEGI, se encuentra la parte referente a la textura del suelo, de acuerdo a su distribución espacial. En la Figura 30 se muestra la distribución textural presente en la región de la demarcación territorial.

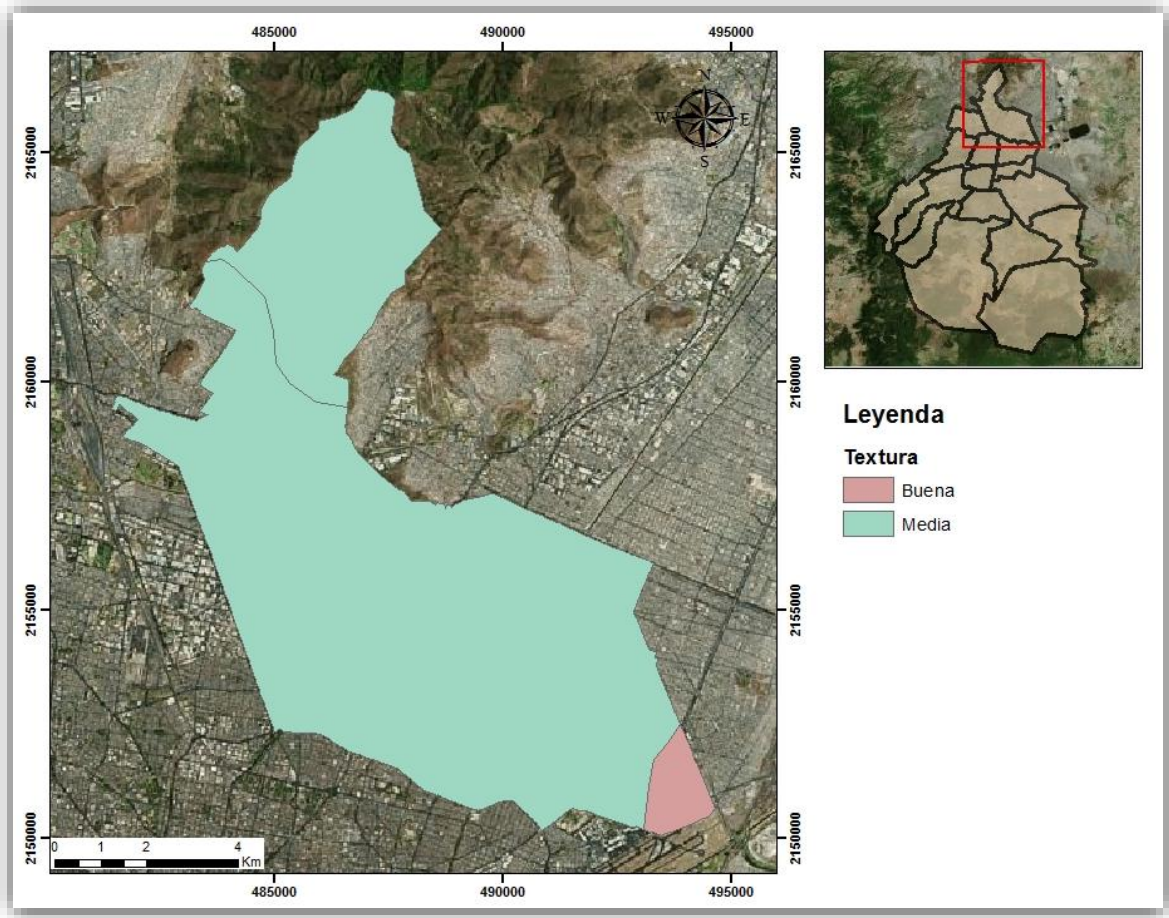


Figura 30 Textura del suelo de la zona de estudio

Para conocer el estado actual en que se encuentran los diferentes tipos de vegetación y uso de suelo se utilizaron los datos vectoriales de INEGI, donde se muestra la distribución de la vegetación natural e inducida, la localización de las áreas dedicadas a la ganadería; se representan los diferentes tipos de vegetación y las áreas de uso agrícola, pecuario y forestal. Incluye información puntual sobre especies botánicas representativas de la cubierta vegetal.

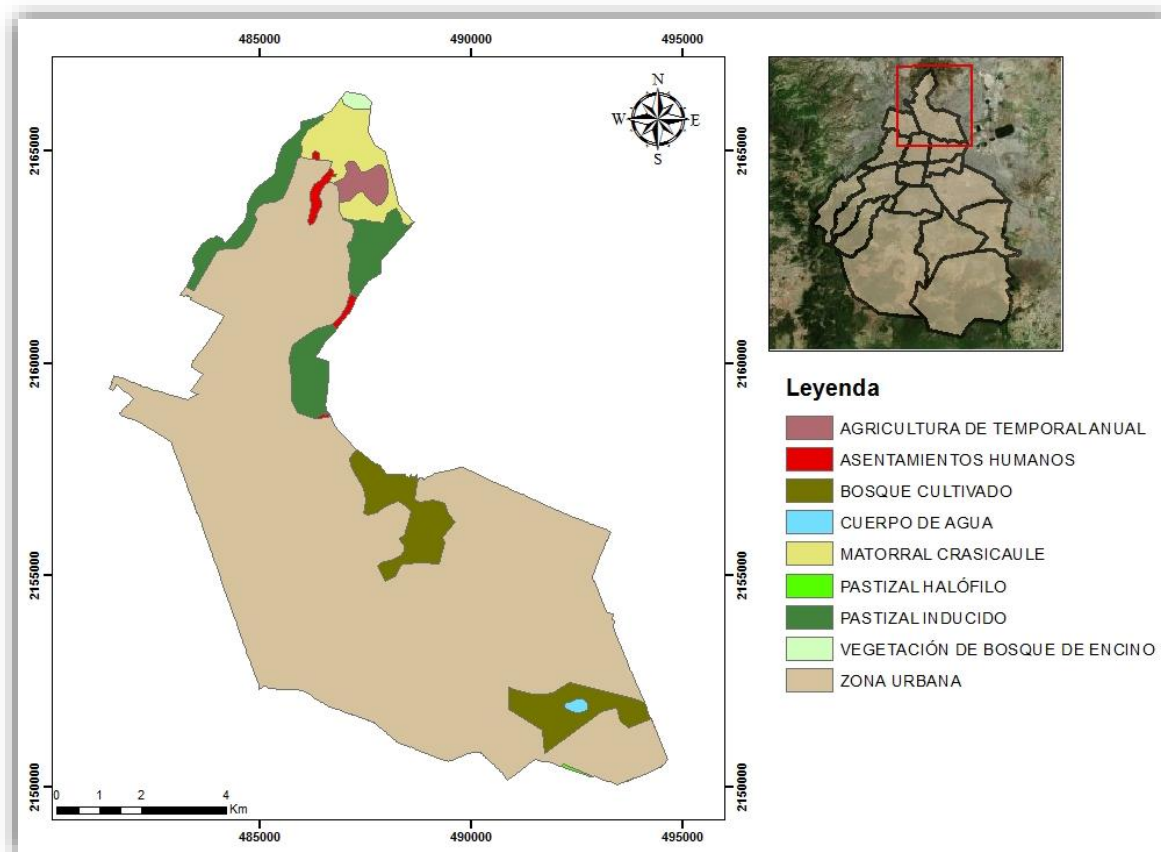


Figura 31 Uso de suelo de la zona de estudio

Se hace resaltar el hecho de que el uso de suelo en la delegación Gustavo A. Madero pertenece a zona urbana en un 84%, el 6% a pastizal, 6% a bosque, mientras que el restante se distribuye en cuerpo de agua y otro tipo de vegetación.

4.5. Gastos máximos

Para calcular los gastos máximos de diseño de la delegación Gustavo A. Madero se hace uso de la Fórmula Racional, citada en el marco teórico. Dicho método requiere información referente a intensidades medias máximas para distintos períodos de retorno y duraciones, los coeficientes de escurrimiento de cada porción que contempla los distintos tipos y usos de suelo y, así mismo, el área de las regiones.

En primer lugar se identifican las áreas de influencia de las estaciones meteorológicas, tanto automáticas como climatológicas, por medio de los polígonos de Thiessen. Con las porciones obtenidas a partir del método, se asignan los diversos valores para emplear la Fórmula Racional.

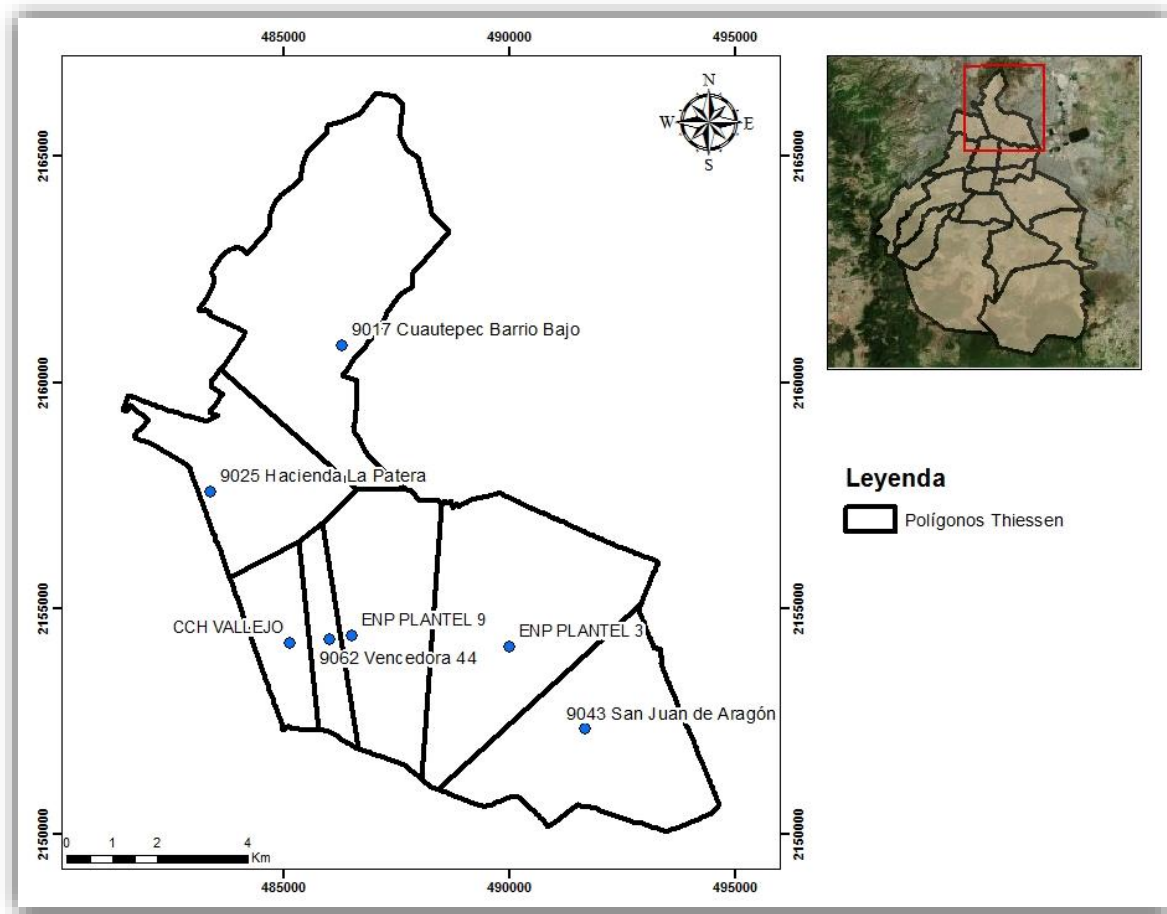


Figura 32 Delimitación en subregiones de la zona de estudio a partir de polígonos de Thiessen

De acuerdo a las consideraciones de la Fórmula Racional, otro dato indispensable para calcular los gastos máximos de diseño es la duración con la cual se trabajará, en este caso, la duración mínima sugerida es el tiempo de concentración de la demarcación territorial. La obtención del tiempo de concentración de la región se realizó por medio de un Sistema de Información Geográfica (SIG) y la fórmula de Kirpich.

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

Donde:

t_c : Tiempo de concentración, en h

L : Longitud del curso de agua más largo, en m

S : Pendiente del cauce principal

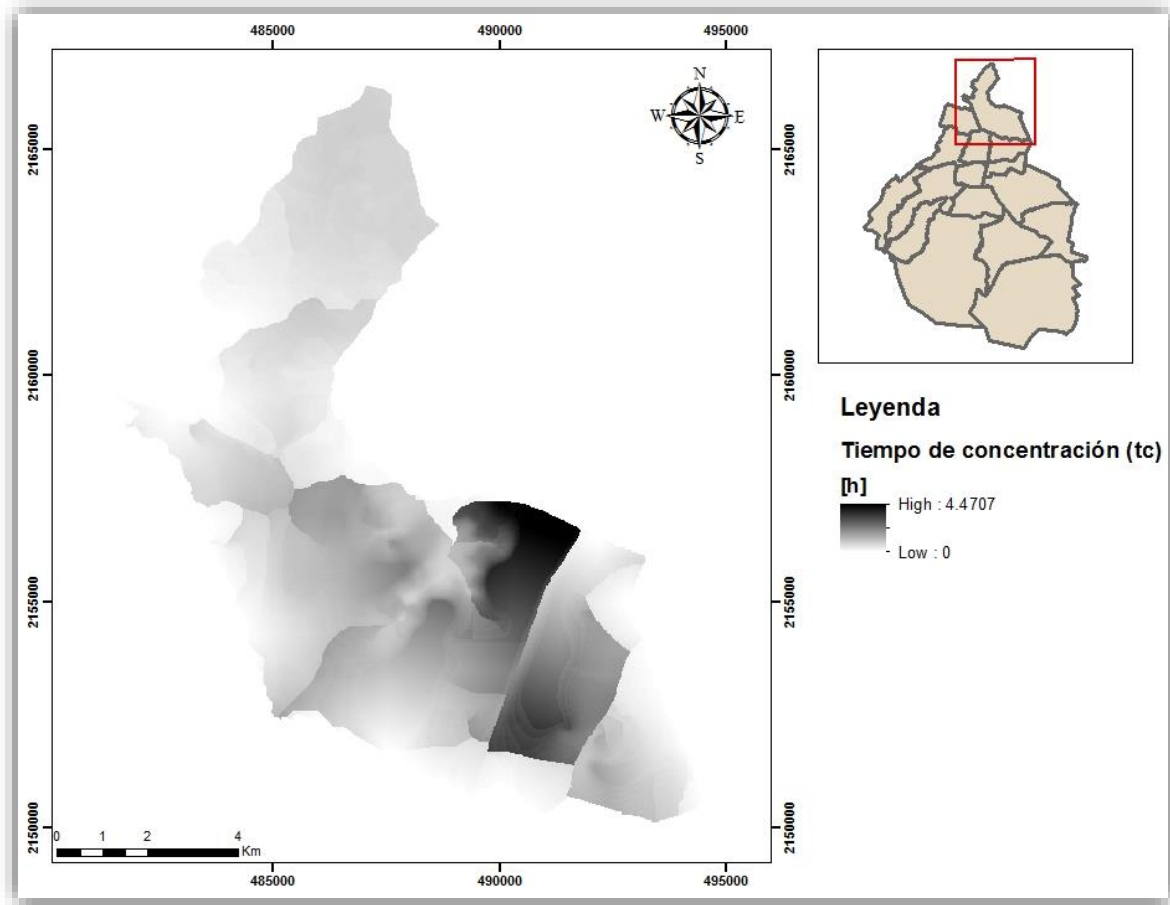


Figura 33 Tiempo de concentración (t_c) de la zona de estudio

Por consiguiente el tiempo de concentración para la delegación Gustavo A. Madero es de 4.5 horas.

La siguiente información requerida para calcular los gastos máximos de diseño corresponde al número de escurrimiento, que está en función del tipo y uso del suelo. De tal manera que se utiliza un SIG para llevar a cabo el procedimiento expuesto en el marco teórico con las capas de uso de suelo, textura de suelo y edafología. Dando como resultado lo mostrado en la Figura 34.

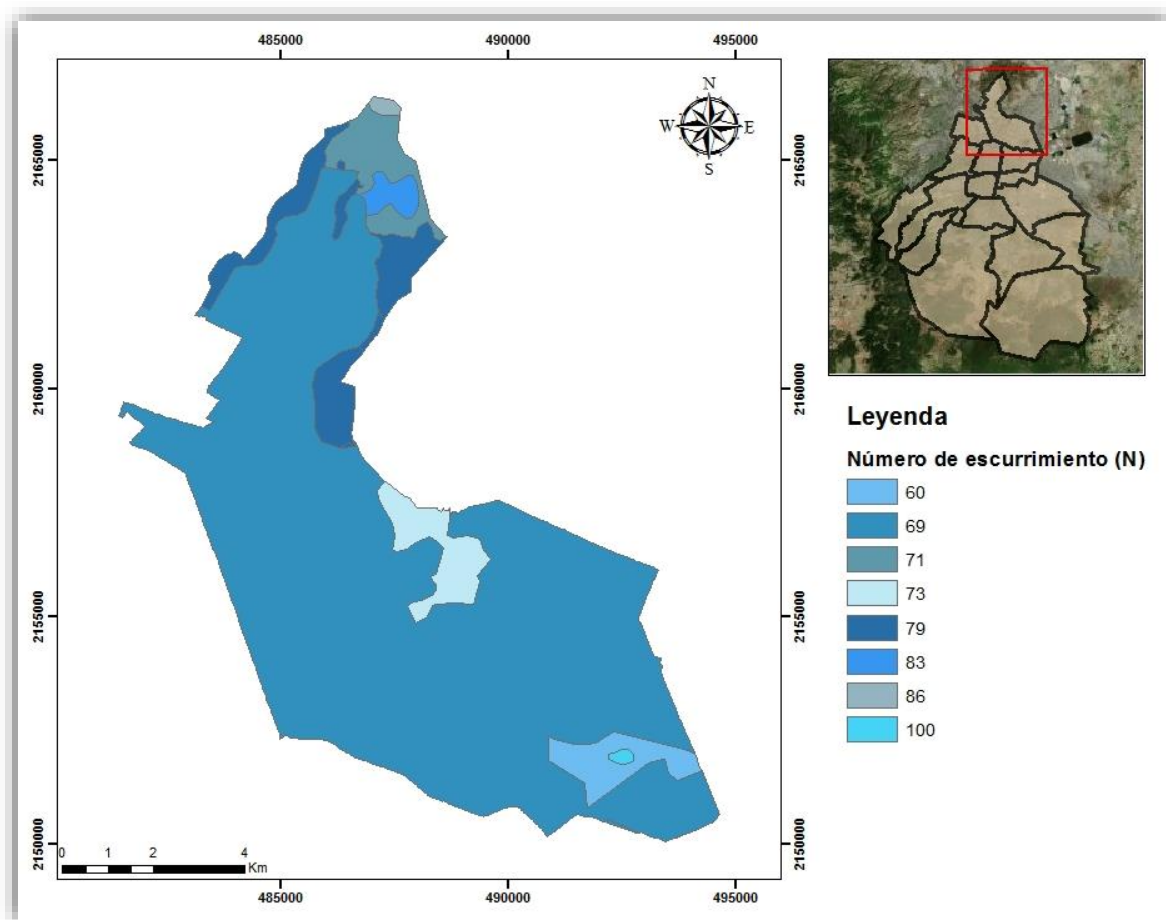


Figura 34 Número de escurrimiento de la zona de estudio

Atendiendo a que se consideran las condiciones más desfavorables, se hace la corrección para los números de escurrimiento, atribuyendo una altura de precipitación acumulada cinco días antes de la fecha en cuestión mayor a 5 cm, lo que corresponde a la corrección B citada en la Tabla 6 del apartado destinado a Coeficientes de escurrimiento.

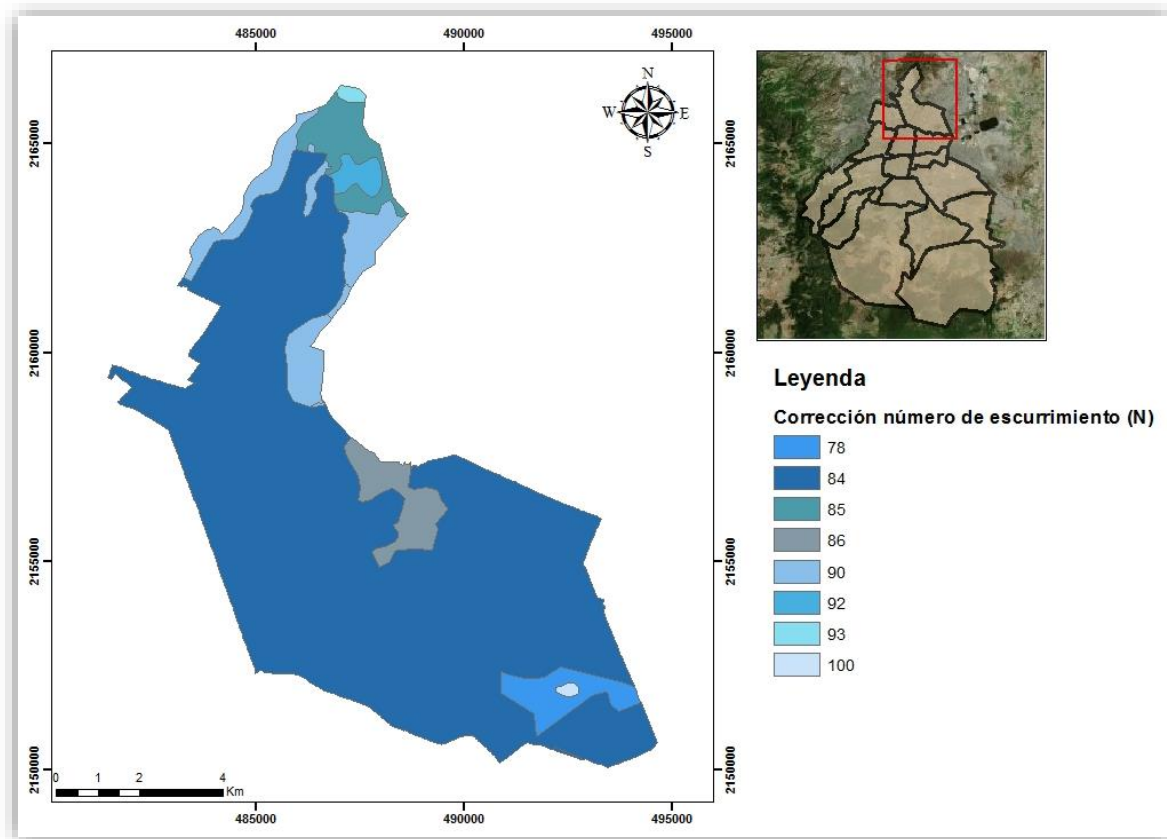


Figura 35 Corrección de número de escurrimiento de la zona de estudio

Con la información de números de escurrimiento de la zona de estudio, la precipitación total para cada período de retorno y una duración igual al tiempo de concentración, se efectúa el cálculo de la precipitación efectiva de cada estación aplicando la Ecuación 8

Tabla 33 Precipitación efectiva para distintos períodos de retorno y duración igual a t_c

T (años)	PRECIPITACIÓN EFECTIVA P_e (cm)						
	PEMBU			SMN- CONAGUA			
	PLANTEL 3	PLANTEL 9	PLANTEL VALLEJO	9017	9025	9043	9062
2	0.655	0.614	0.693	2.706	1.374	1.349	1.971
5	1.220	1.059	1.292	3.749	2.064	1.982	2.555
10	1.644	1.390	1.743	4.572	2.627	2.498	3.018
20	2.081	1.730	2.206	5.418	3.218	3.039	3.496
50	2.679	2.197	2.839	6.562	4.032	3.786	4.146
100	3.148	2.563	3.335	7.442	4.668	4.370	4.650
500	4.280	3.450	4.532	9.525	6.194	5.776	5.853
1000	4.785	3.846	5.064	10.434	6.869	6.397	6.382
5000	5.985	4.792	6.331	12.566	8.464	7.870	7.631
10000	6.512	5.209	6.887	13.491	9.161	8.515	8.176

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se hace uso de la Ecuación 6 para obtener el coeficiente de escurrimiento del área de influencia de cada estación meteorológica para los distintos períodos de retorno y una duración igual al tiempo de concentración.

Tabla 34 Coeficiente de escurrimiento para distintos períodos de retorno y duración igual a t_c

T (años)	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO C_e						
	PEMBU			SMN- CONAGUA			
	PLANTEL 3	PLANTEL 9	PLANTEL VALLEJO	9017	9025	9043	9062
2	0.212	0.204	0.217	0.465	0.317	0.306	0.378
5	0.300	0.279	0.307	0.528	0.387	0.370	0.426
10	0.349	0.322	0.357	0.567	0.431	0.412	0.457
20	0.391	0.359	0.399	0.600	0.469	0.449	0.485
50	0.437	0.401	0.446	0.637	0.513	0.491	0.519
100	0.468	0.430	0.476	0.660	0.542	0.519	0.541
500	0.528	0.486	0.536	0.705	0.597	0.574	0.586
1000	0.550	0.508	0.558	0.721	0.617	0.594	0.603
5000	0.593	0.551	0.601	0.752	0.656	0.633	0.637
10000	0.610	0.567	0.617	0.763	0.671	0.648	0.650

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se aplica la expresión de la Fórmula Racional para calcular los gastos máximos de diseño para distintos períodos de retorno y duración igual al tiempo de concentración para cada estación de acuerdo a su área de influencia. Así se tienen los siguientes resultados:

Tabla 35 Gastos máximos de diseño para distintos períodos de retorno y duración igual a t_c

T (años)	GASTO MÁXIMO (m^3/s)						
	PEMBU			SMN- CONAGUA			
	PLANTEL 3	PLANTEL 9	PLANTEL VALLEJO	9017	9025	9043	9062
2	7.682	4.547	1.993	38.970	8.666	12.949	3.853
5	14.293	7.840	3.717	53.984	13.015	19.021	4.996
10	19.272	10.296	5.013	65.841	16.568	23.976	5.901
20	24.387	12.815	6.344	78.018	20.294	29.173	6.835
50	31.401	16.271	8.167	94.490	25.428	36.343	8.107
100	36.892	18.980	9.592	107.171	29.438	41.951	9.092
500	50.169	25.551	13.036	137.158	39.065	55.438	11.443
1000	56.079	28.484	14.567	150.250	43.317	61.407	12.478
5000	70.146	35.490	18.208	180.951	53.375	75.547	14.920
10000	76.329	38.577	19.808	194.277	57.771	81.736	15.987

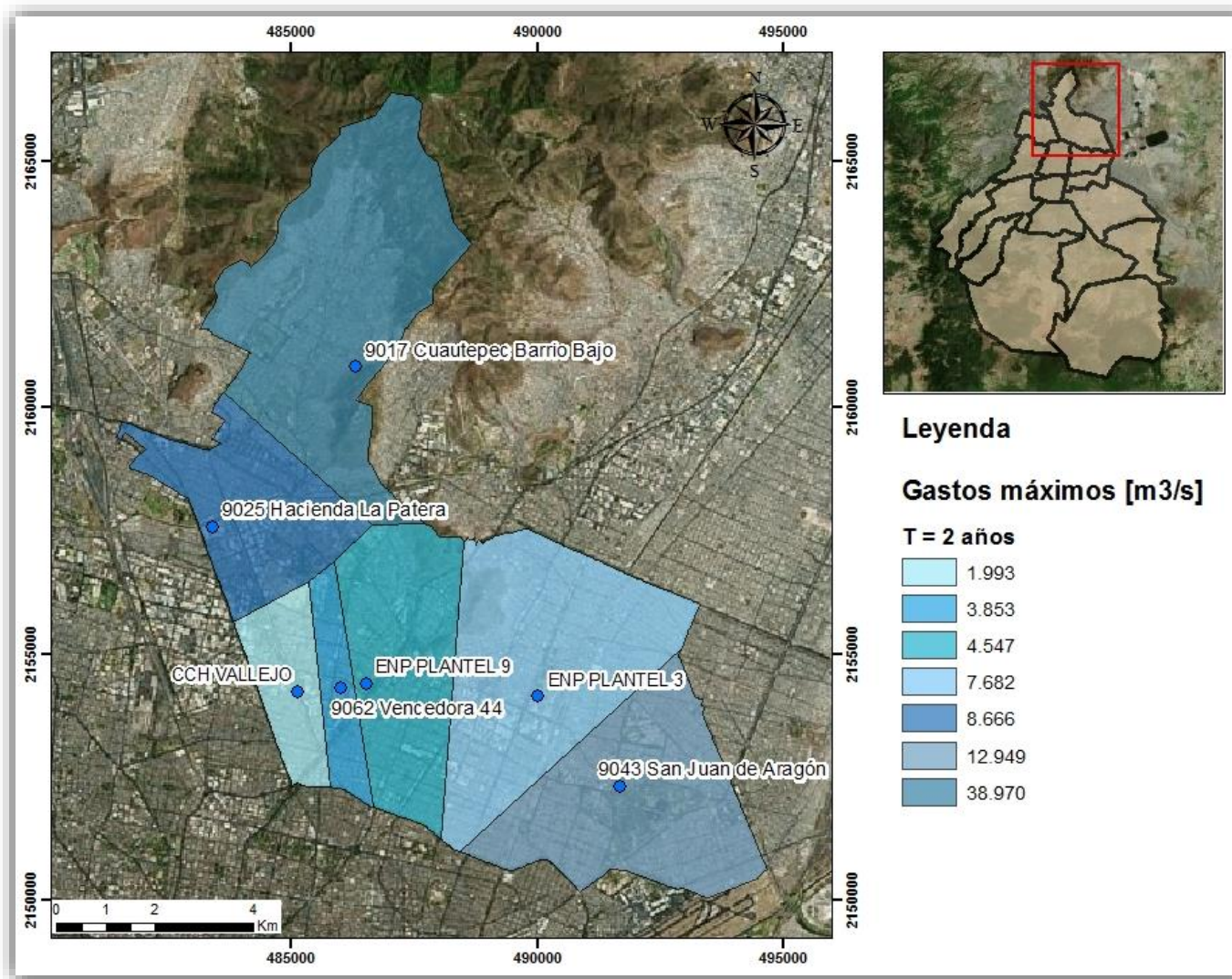


Figura 36 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 2 años

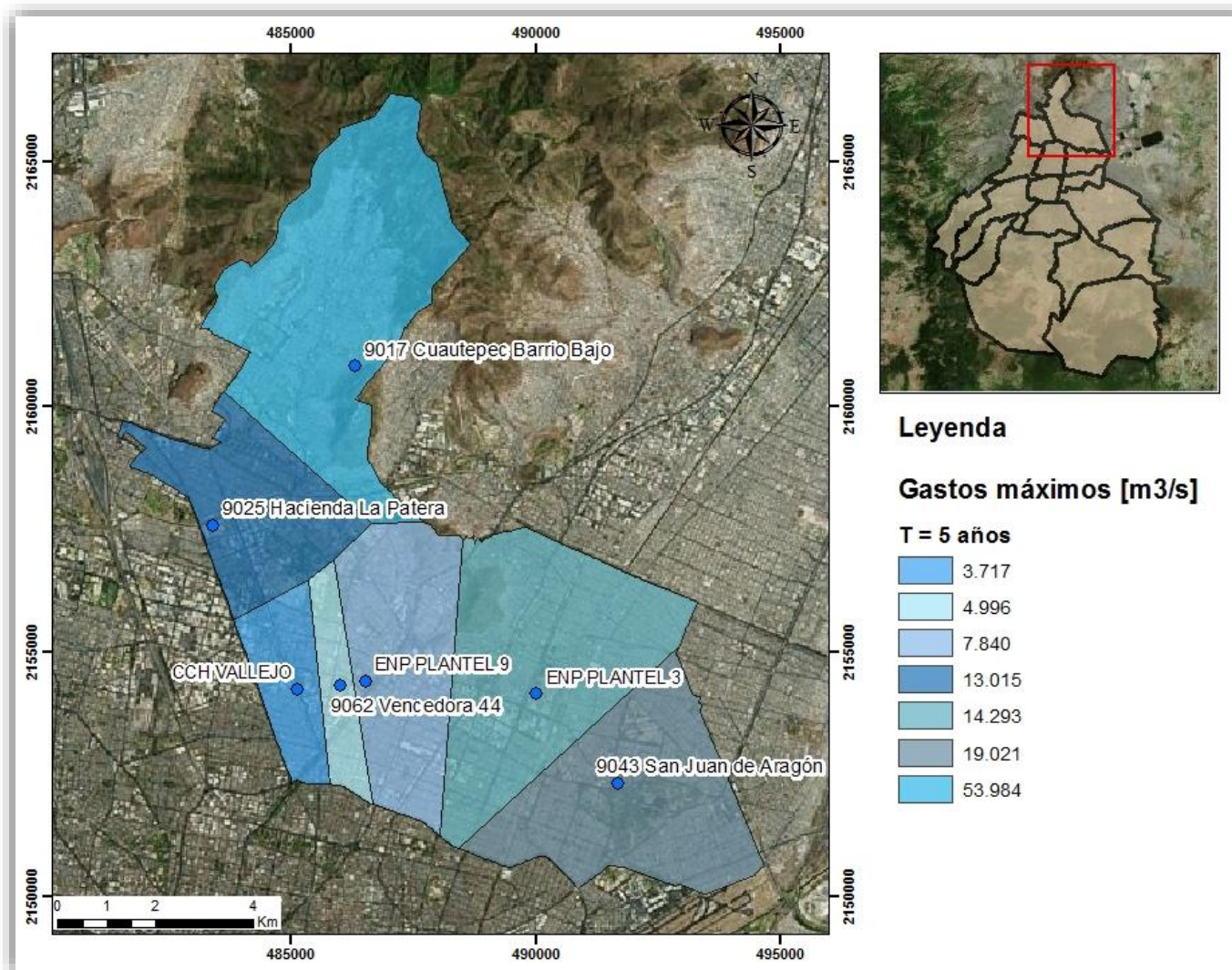


Figura 37 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 5 años

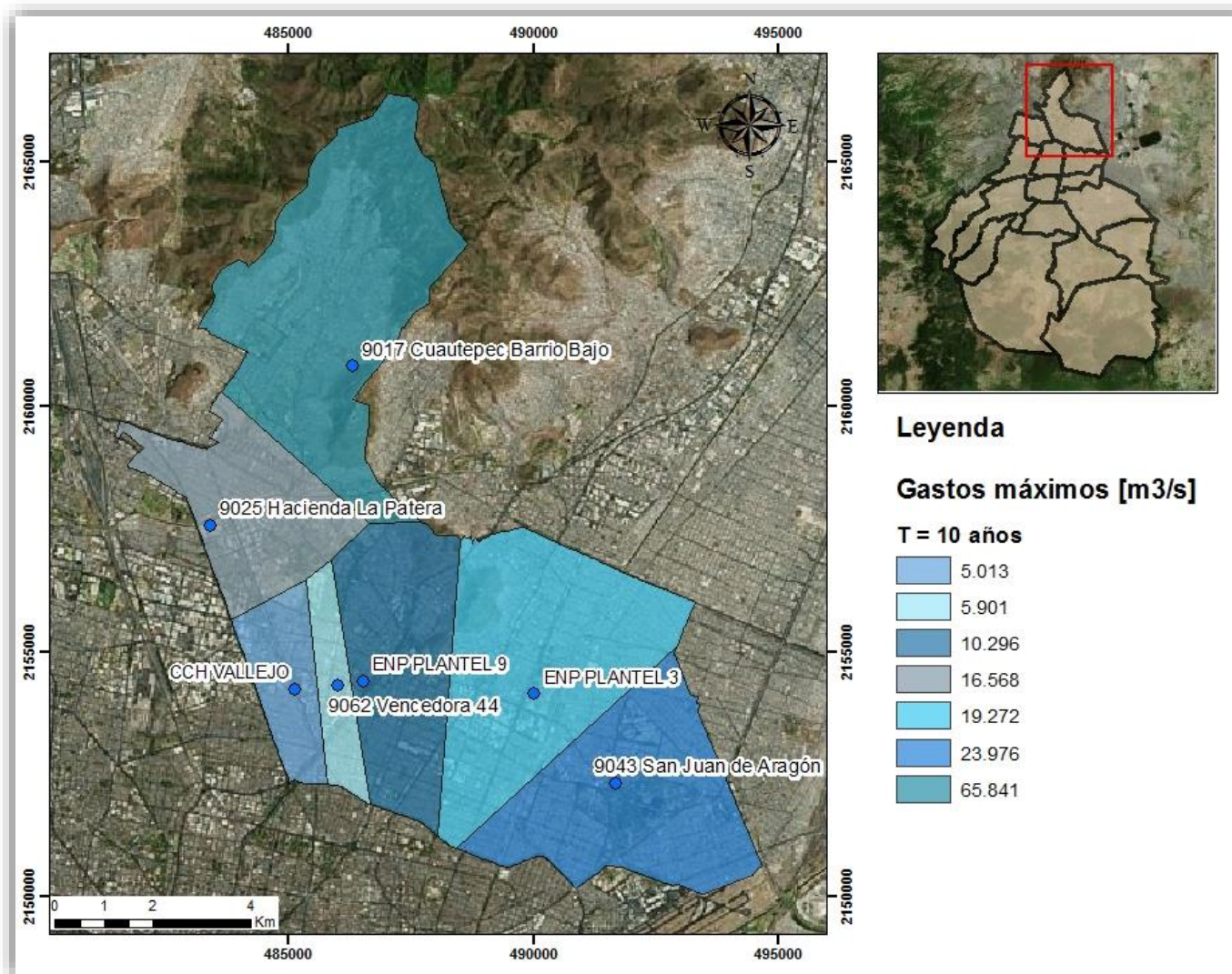


Figura 38 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 10 años

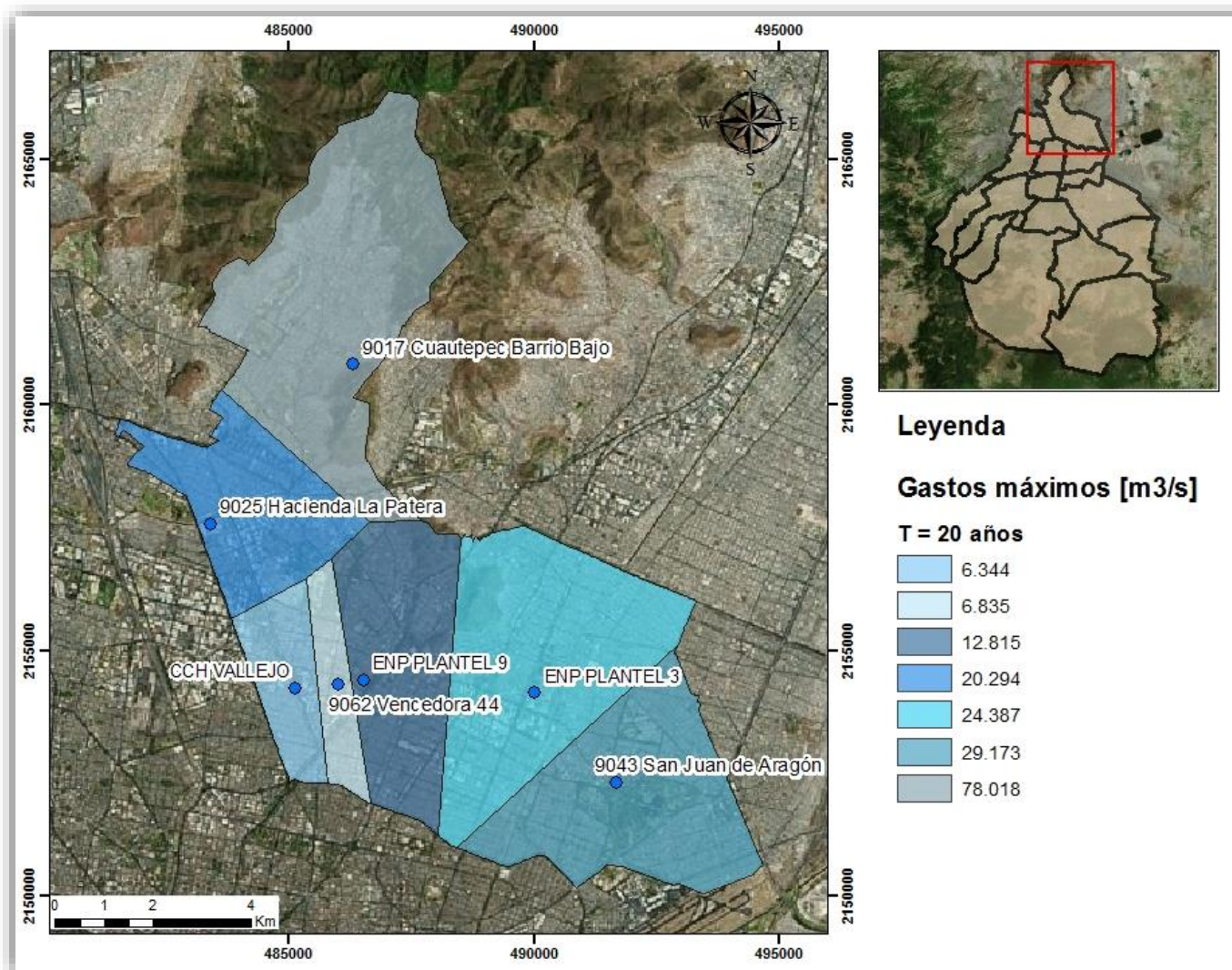


Figura 39 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 20 años

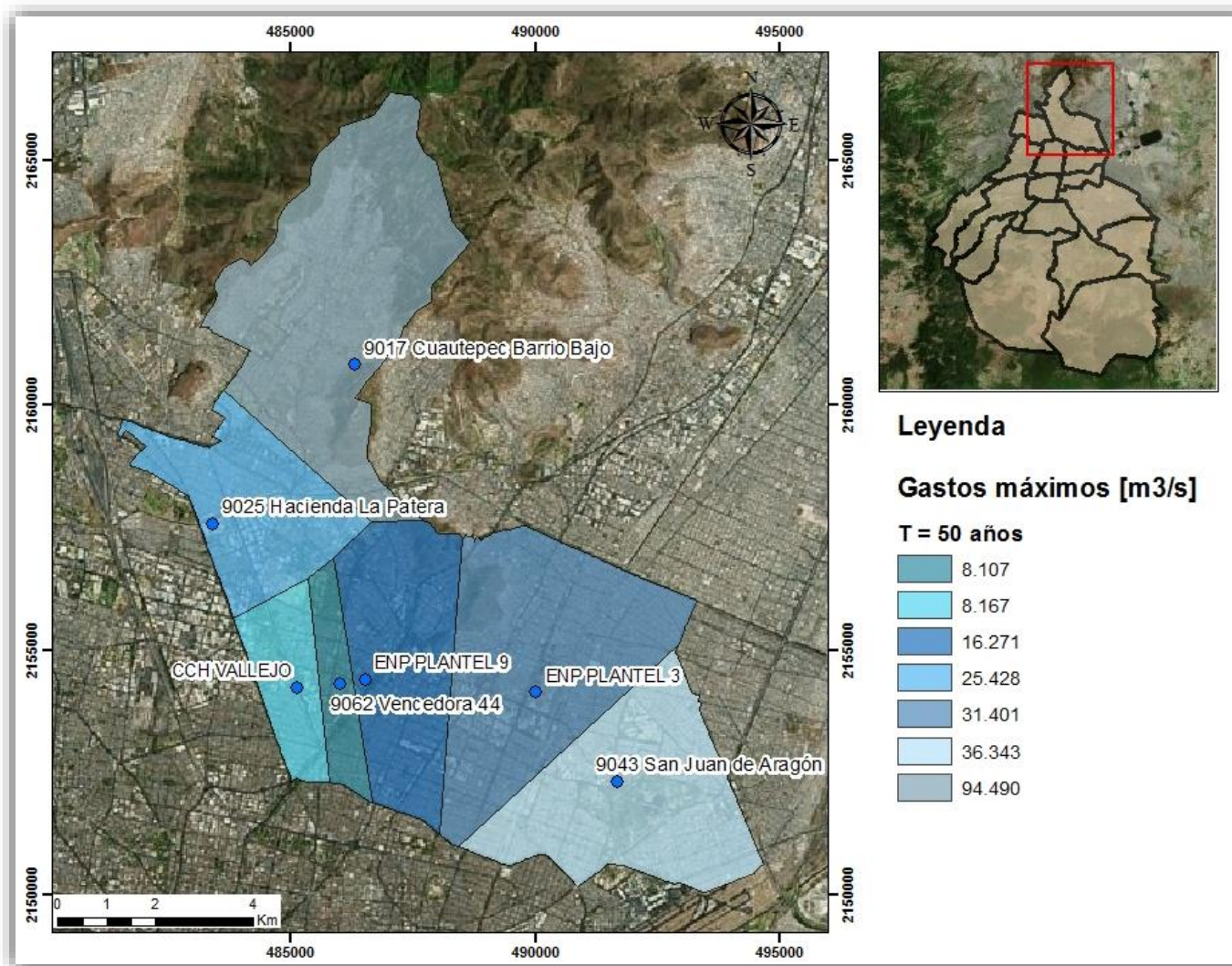


Figura 40 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 50 años

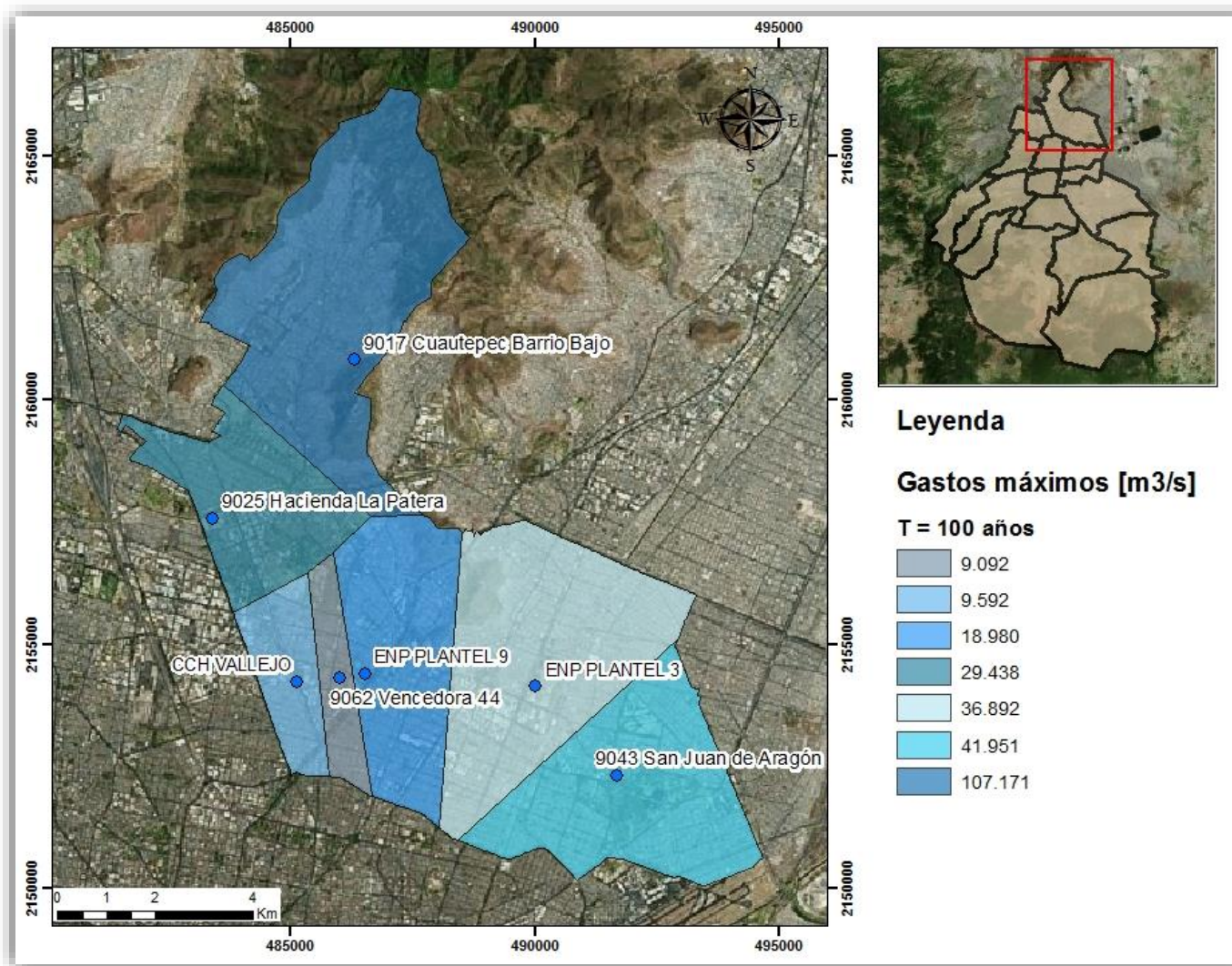


Figura 41 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 100 años

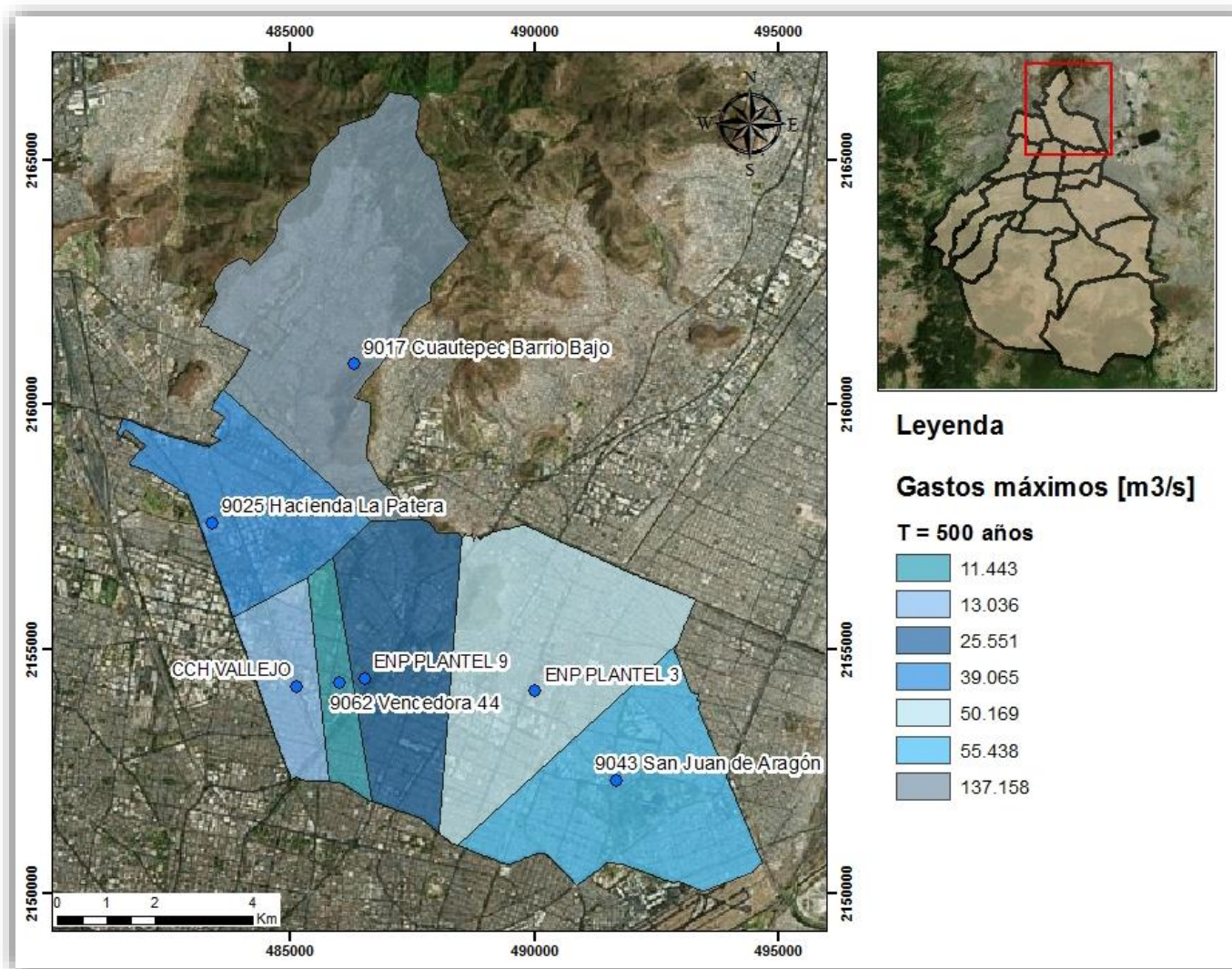


Figura 42 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 500 años

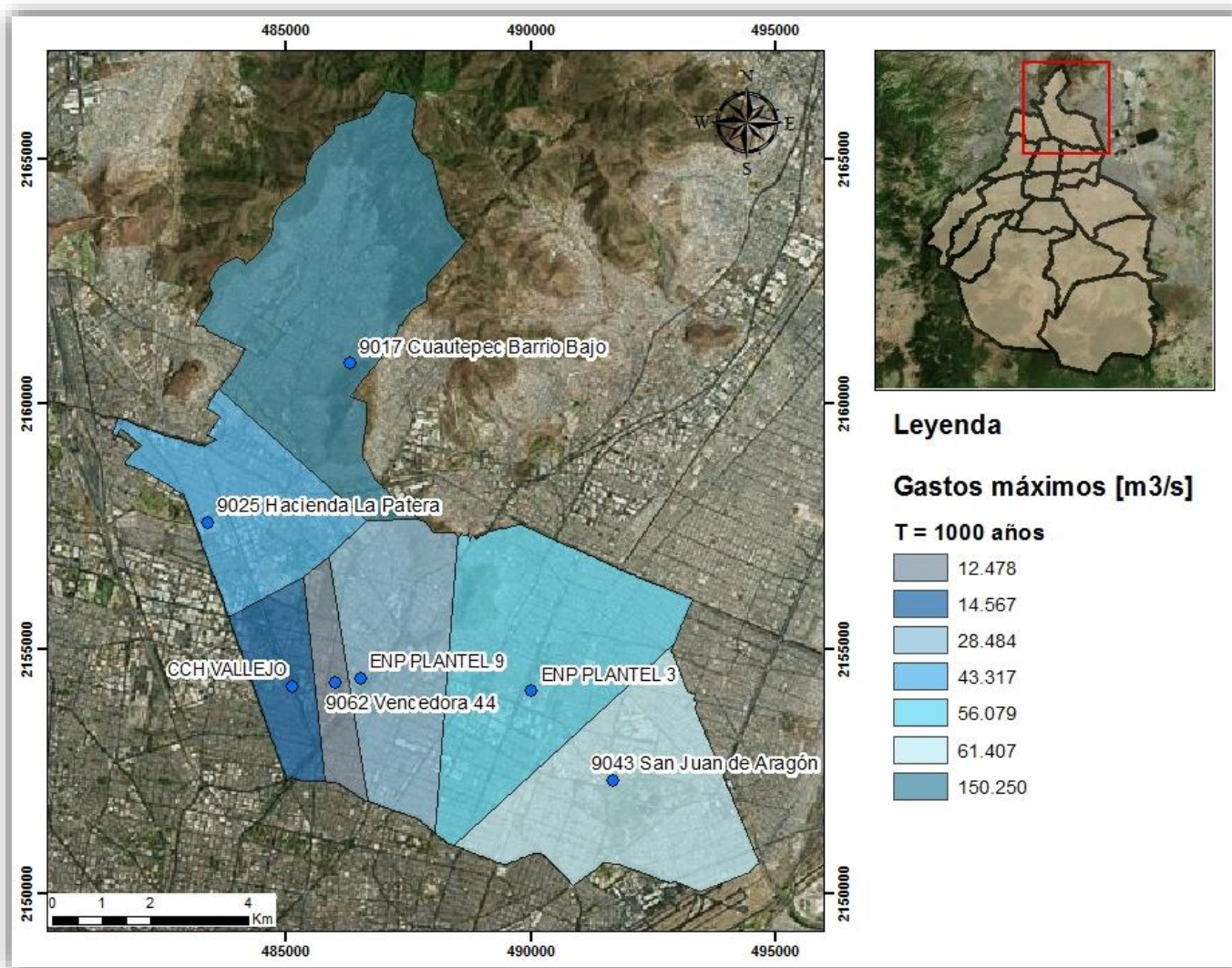


Figura 43 Gastos máximos de diseño para un periodo de retorno de 1,000 años

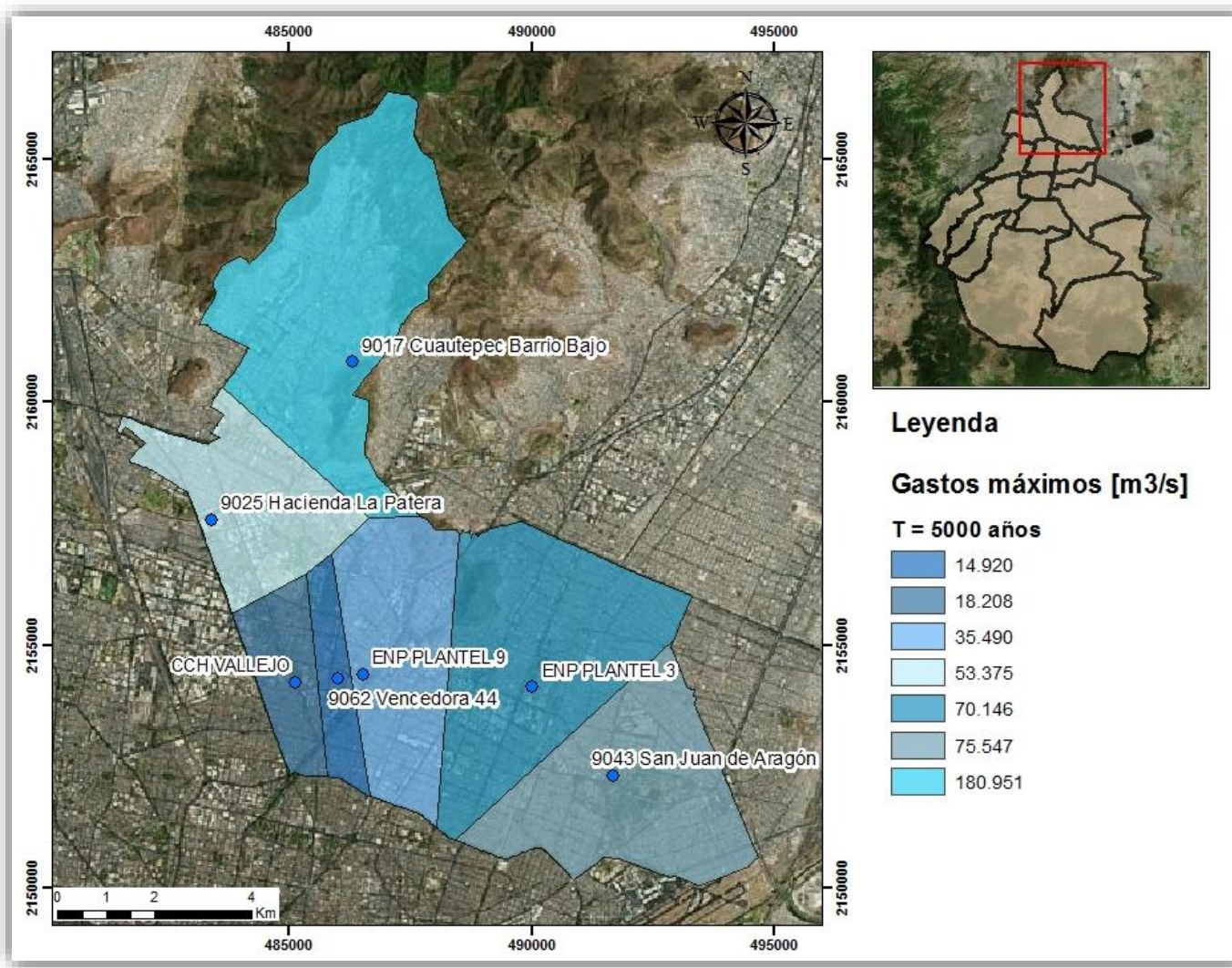


Figura 44 Gastos máximos de diseño para un periodo de retorno de 5,000 años

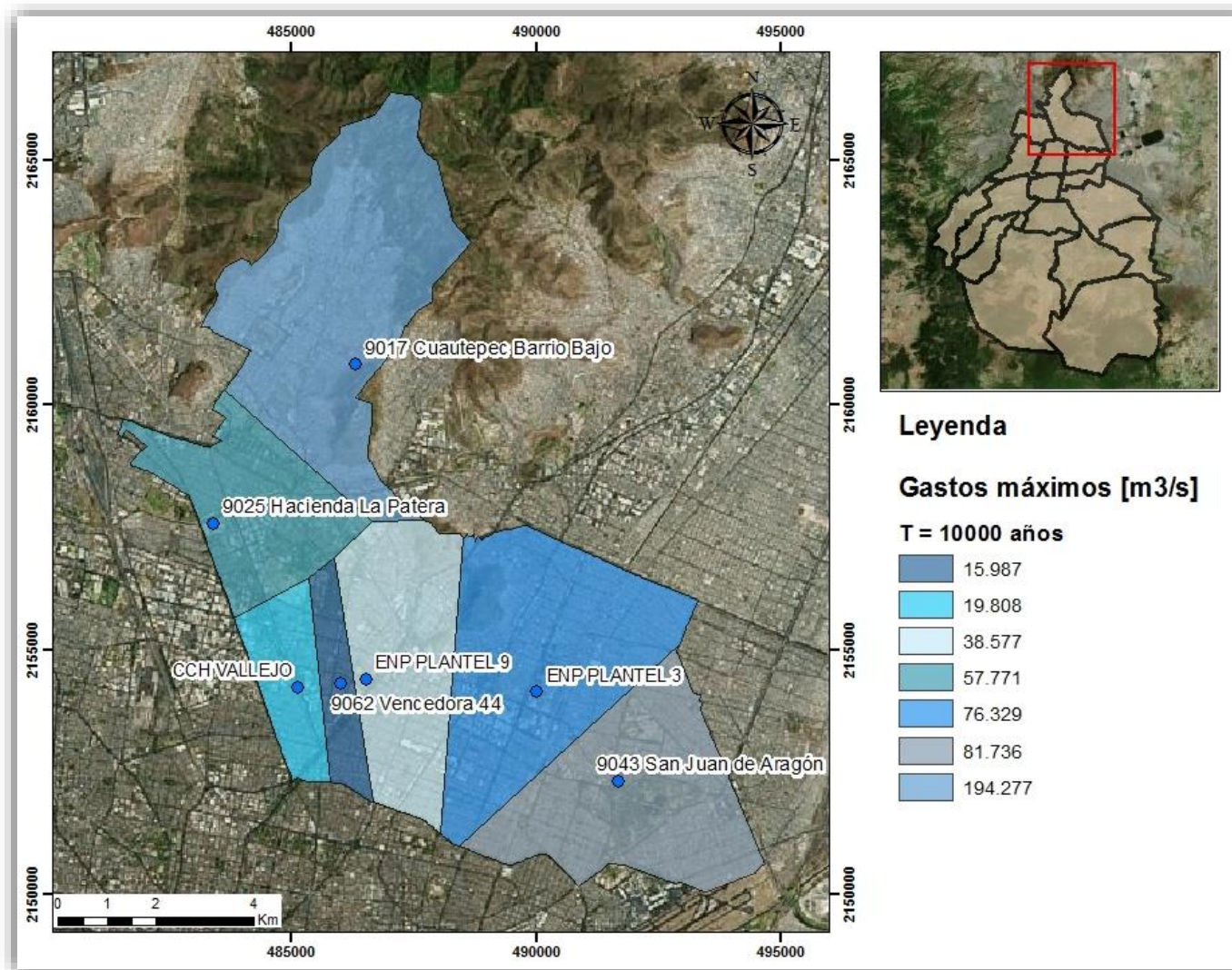


Figura 45 Gastos máximos de diseño para un período de retorno de 10,000 años

4.6. Discusión de resultados

El análisis de los resultados numéricos del coeficiente de determinación (R^2) de las intensidades máximas de precipitación para la estación meteorológica automática PEMBU PLANTEL 3 “Justo Sierra” contrastada con la estación climatológica San Juan de Aragón con clave 9043, indica que el grado de asociación máximo de las variables es de 0.9999 para los períodos de retorno de 50 y 100 años; mientras que el grado de asociación mínimo se presenta para el período de retorno de 2 años con un valor de 0.9957. El coeficiente de determinación, calculado mediante la correlación de las dos estaciones meteorológicas, para los distintos períodos de retorno es del orden de 0.9992.

Para duraciones menores, se aprecia una variación de los valores de cada estación meteorológica con relación a la línea de tendencia derivada de la correlación lineal, es decir, existe una mejor asociación de intensidades a medida que la duración aumenta.

En cuanto a los gastos máximos de diseño calculados en función de los coeficientes de escurrimiento, intensidades máximas y áreas de influencia de las estaciones meteorológicas, puede observarse que el comportamiento general de los valores de acuerdo al período de retorno es similar; a excepción del obtenido para la estación Cuauhtepac Barrio Bajo con clave 9017 que presenta mayores gastos con relación a las demás.

La diferencia significativa del valor de los gastos en la estación climatológica Cuauhtepac Barrio Bajo puede atribuirse a la ubicación de ésta, ya que se encuentra en la Sierra de Guadalupe, donde el cambio brusco de pendiente y el tipo de suelo contribuyen al aumento en el escurrimiento; aunado al área de influencia de la estación, que en proporción a las demás, cuenta con una mayor superficie. Ejemplo de lo anterior citado es que, para el período de retorno de 10 años los gastos máximos de diseño oscilan entre 5 y 24 m^3/s mientras que en la estación con clave 9017 es de 65.8 m^3/s .

Otro aspecto que se hace notar es la variación de los gastos máximos de diseño de la estación automática PEMBU PLANTEL Vallejo y la estación climatológica Vencedora 44 con clave 9062, ya que por su cercanía y características se esperaba tener un comportamiento similar (Tabla 36). Para las dos estaciones, el número de escurrimiento estimado y la altitud a la que se encuentran no difieren de manera considerable; adicional a ello, el área de influencia de la estación PLANTEL Vallejo y la estación Vencedora 44 tienen una superficie de magnitud parecida.

De acuerdo a lo anterior, para los períodos de retorno de 2 y 5 años se tienen diferencias de gastos de 2 y 1.3 m^3/s respectivamente; para los períodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años, los gastos calculados poseen una magnitud similar entre ambas estaciones. Finalmente, para los períodos de retorno de 500, 1,000, 5,000 y 10,000 años vuelven a presentarse diferencias que varían entre 2 y 4 m^3/s . En resumen, para períodos de retorno pequeños se observa una variación de los gastos máximos de diseño, así también para períodos de retorno muy grandes.

Tabla 36 Diferencias de características entre algunas estaciones meteorológicas

ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ÁREA (km ²)	ALTITUD (msnm)	NÚMERO DE ESCURRIMIENTO (N)
PLANTEL VALLEJO	4.656	2243	83.917
Vencedora 44	3.165	2237	83.917

Fuente: Elaboración propia.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

El presente trabajo buscó el cálculo de los gastos máximos de diseño en la demarcación territorial Gustavo Adolfo Madero para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1,000, 5,000 y 10,000 años.

Partiendo de información de registros pluviográficos y registros pluviométricos se construyeron y estimaron respectivamente, las curvas intensidad-duración-período de retorno, haciendo un contraste entre los diferentes tipos de información con la finalidad de aprobar o discernir la utilización de dicha información de manera conjunta. De acuerdo a lo anterior, se puede concluir que la hipótesis planteada ha sido satisfactoriamente llevada a cabo, ya que el coeficiente de determinación calculado de las estaciones con pluviógrafo y las estaciones con pluviómetro es del orden de 0.99, lo que demuestra el fuerte grado de asociación de las variables de interés.

Se hace evidente la representatividad de los valores del número de escurrimiento en el cálculo de los gastos de diseño para los distintos períodos de retorno, puesto que la variación del número de escurrimiento altera en demasía la precipitación efectiva y en consecuencia, el coeficiente de escurrimiento de cada área de influencia. Así, un dato pequeño de precipitación efectiva se traduce en un coeficiente de escurrimiento menor y un gasto máximo de diseño de pequeña magnitud como los que se presentan en los primeros períodos de retorno.

5.2. Recomendaciones

Si bien, las estimaciones de intensidad realizadas por medio de series históricas de precipitación acumulada a 24 horas tienen buena aproximación, se sugiere en la medida de lo posible la utilización de información de registros pluviográficos para tener una mayor fiabilidad en el análisis de la relación lluvia-escurrimiento.

De igual manera, se hace resaltar la importancia de la verificación de la información de precipitación; además de contar con una extensión de registros considerable que permita representar el comportamiento de la lluvia en la región de estudio.

Al obtener las curvas de intensidad-duración-período de retorno a partir de información pluviográfica en conjunto con información pluviométrica, se recomienda realizar un análisis comparativo para determinar la conveniencia de trabajar con los datos conjuntamente.

El uso de Sistemas de Información Geográfica permite trabajar con grandes volúmenes de información de diferentes fuentes lo que agiliza la obtención y representación de parámetros.

Se requiere una mayor profundización en la caracterización de uso y tipo de suelo, ya que esta información es un factor con peso importante en el cálculo de la precipitación efectiva y con ello, el coeficiente de escurrimiento.

6. Referencias

1. Aparicio Mijares, F. J. (2011). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México: Limusa.
2. Bitrán Bitrán, D. (2001). *Características del Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres ocurridos en México en el período 1980-1999*. México: CENAPRED.
3. Campos Aranda, D. F. (2010). Intensidades Máximas de lluvia para diseño hidrológico urbano en la República Mexicana. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XI(2), 179-188.
4. Campos Aranda, D. F. (2010). *Introducción a la Hidrología Urbana*. San Luis Potosí, México.
5. Campos Aranda, D. F., & Gómez de Luna, R. (1990). Procedimiento para obtener curvas i-d-Tr a partir de registros pluviométricos. *Revista Ingeniería Hidráulica en México*(mayo-agosto), 39-52.
6. CENAPRED. (2016). *Impacto Socioeconómico de los Desastres en México durante 2016. Resumen Ejecutivo*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
7. Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill.
8. Conde Rivera, R., Vita Garza, Á. L., Castro Ortiz, V. A., & López Mejía, J. R. (2014). *Construcción de Curvas i-d-Tr de las Estaciones Climatológicas de México con la Base de Datos SMN-CONAGUA*. Puebla, México: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
9. De Salas Regalado, L. (2004). *Regionalización de Leyes IDF para el Uso de Modelos Hidrometeorológicos de Estimación de Caudales*. Madrid: Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Madrid.
10. Domínguez Mora, R., Arganis Juarez, M. L., Esquivel Garduño, G., & Carrizosa Elizondo, E. (2008). *Manual del Modelo para Pronóstico de Escurrimiento*. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
11. Escalante, C., & Reyes, L. (2005). *Técnicas Estadísticas en Hidrología*. México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
12. FAO. (2016). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (2014 ed.)*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
13. Fattorelli, S., & Fernandez, P. C. (2011). *Diseño Hidrológico*. Edición Digital.
14. INEGI. (2001). *Cuaderno Estadístico Delegacional. Gustavo A. Madero (2001 ed.)*. México: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
15. INEGI. (2017). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/>

16. Maderey Rascón, L. E., & Jiménez Román, A. (2005). *Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico*. México: UNAM Instituto de Geografía.
17. OMM. (1993). *Atlas Internacional de Nubes: Manual de observación de nubes y otros meteoros*. (Vols. I, OMM - N° 407). Ginebra, Suiza: Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial.
18. OMM. (2015). *Manual del Sistema Mundial de Observación* (Vols. I - Aspectos mundiales, OMM - N° 544). Ginebra, Suiza: Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial.
19. PEMBU. (2017). *Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario de la Universidad Nacional Autónoma de México*. Obtenido de <http://www.ruoa.unam.mx/pembu/>
20. SMN. (2017). *Base de Datos Climatológica Nacional (Sistema CLICOM)*. Obtenido de <http://clicom-mex.cicese.mx/>
21. UNESCO. (2007). *Curvas Intensidad - Duración - Frecuencia, para la zona centro sur de Chile* (Vol. 7). Chile: Editorial Universidad de Talca.

Anexos

Anexo I Pruebas de Homogeneidad

Estación climatológica Cuatepec Barrio Bajo clave 9017

HELMERT

n	17
hpmáx	52.10588 mm

	Año	hp máx (mm)	hp _i - hp (mm)	S ó C
1	1971	46.7	-5.406	
2	1972	54	1.894	C
3	1973	50.3	-1.806	C
4	1974	30.7	-21.406	S
5	1975	69.5	17.394	C
6	1976	87.9	35.794	S
7	1977	47	-5.106	C
8	1978	37	-15.106	S
9	1979	65	12.894	C
10	1980	80.9	28.794	S
11	1981	48	-4.106	C
12	1982	46.9	-5.206	S
13	1983	44.7	-7.406	S
14	1984	30.7	-21.406	S
15	1985	42.5	-9.606	S
16	1986	50	-2.106	S
17	1987	54	1.894	C
		885.8		

S=	9
C=	7

S-C=	2
raiz(n-1)=	4.000

$-rz(n-1) \leq (S-C) \leq rz(n-1)$ Homogénea

t DE STUDENT

n	17
---	----

Subconjunto 1	
n ₁	8.5
X ₁	49.776
s ₁ ²	320.648
s ₁	17.907

Subconjunto 2	
n ₂	8.5
X ₂	54.435
s ₂ ²	230.752
s ₂	15.191

	Año	hp máx (mm)	Subconjunto 1	Subconjunto 2	(X _i - X ₁) ²	(X _i - X ₂) ²
1	1971	46.7	46.7		9.465	
2	1972	54	54		17.838	
3	1973	50.3	50.3		0.274	
4	1974	30.7	30.7		363.912	
5	1975	69.5	69.5		389.018	
6	1976	87.9	87.9		1453.403	
7	1977	47	47		7.709	
8	1978	37	37		163.238	
9	1979	65		65		111.613
10	1980	80.9		80.9		700.381
11	1981	48		48		41.413
12	1982	46.9		46.9		56.781
13	1983	44.7		44.7		94.776
14	1984	30.7		30.7		563.364
15	1985	42.5		42.5		142.451
16	1986	50		50		19.672
17	1987	54		54		0.189
	885.8		423.1	462.7	2404.857	1730.640

td	-0.133
v	15
t	2.131

td ≤ t Homogénea

CRAMER

n	17
hpmáx	52.106 mm
s ²	249.062
s	15.782

Subconjunto 1 (60%)	
n ₁	10
X ₁	49.970
z _{eo}	-0.135
t _{eo}	0.635

Subconjunto 2 (30%)	
n ₂	5
X ₂	44.380
z _{eo}	-0.490
t _{eo}	1.290

	Año	hp máx (mm)	Subconjunto 1	Subconjunto 2	(X _i - X) ²
1	1971	46.7			29.224
2	1972	54			3.588
3	1973	50.3			3.261
4	1974	30.7			458.212
5	1975	69.5			302.555
6	1976	87.9			1281.219
7	1977	47			26.070
8	1978	37	37		228.188
9	1979	65	65		166.258
10	1980	80.9	80.9		829.101
11	1981	48	48		16.858
12	1982	46.9	46.9		27.101
13	1983	44.7	44.7	44.7	54.847
14	1984	30.7	30.7	30.7	458.212
15	1985	42.5	42.5	42.5	92.273
16	1986	50	50	50	4.435
17	1987	54	54	54	3.588
		885.8	499.7	221.9	3984.989

v	13
t	2.131

t_{eo} <= t Homogénea

t_{so} <= t Homogénea

Estación climatológica Hacienda la Patera clave 9025

HELMERT

n	28
hpmáx	41.871429 mm

	Año	hp máx (mm)	hp _i - hp (mm)	S ó C
1	1961	40.7	-1.171	
2	1962	83.3	41.429	C
3	1963	40.2	-1.671	C
4	1964	45	3.129	C
5	1965	40	-1.871	C
6	1966	30.2	-11.671	S
7	1967	40.2	-1.671	S
8	1968	36	-5.871	S
9	1969	62	20.129	C
10	1970	44	2.129	S
11	1971	36	-5.871	C
12	1972	80.8	38.929	C
13	1973	46	4.129	S
14	1974	40	-1.871	C
15	1975	32	-9.871	S
16	1976	40	-1.871	S
17	1977	48	6.129	C
18	1978	40	-1.871	C
19	1979	24	-17.871	S
20	1980	40.5	-1.371	S
21	1981	38	-3.871	S
22	1982	39	-2.871	S
23	1983	35	-6.871	S
24	1984	31	-10.871	S
25	1985	30	-11.871	S
26	1986	38	-3.871	S
27	1987	30.5	-11.371	S
28	1988	42	0.129	C
		1172.4		

S=	16
C=	11

S-C=	5
raiz(n-1)=	5.196

$-rz(n-1) < (S-C) < rz(n-1)$ Homogénea

tSTUDENT

n	28
---	----

Subconjunto 1	
n ₁	14
X ₁	47.457
s ₁ ²	265.432
s ₁	16.292

Subconjunto 2	
n ₂	14
X ₂	36.286
s ₂ ²	38.489
s ₂	6.204

	Año	hp máx (mm)	Subconjunto 1	Subconjunto 2	(X _i - X ₁) ²	(X _i - X ₂) ²
1	1961	40.7	40.7		45.659	
2	1962	83.3	83.3		1284.710	
3	1963	40.2	40.2		52.666	
4	1964	45	45		6.038	
5	1965	40	40		55.609	
6	1966	30.2	30.2		297.809	
7	1967	40.2	40.2		52.666	
8	1968	36	36		131.266	
9	1969	62	62		211.495	
10	1970	44	44		11.952	
11	1971	36	36		131.266	
12	1972	80.8	80.8		1111.746	
13	1973	46	46		2.123	
14	1974	40	40		55.609	
15	1975	32		32		18.367
16	1976	40		40		13.796
17	1977	48		48		137.224
18	1978	40		40		13.796
19	1979	24		24		150.939
20	1980	40.5		40.5		17.760
21	1981	38		38		2.939
22	1982	39		39		7.367
23	1983	35		35		1.653
24	1984	31		31		27.939
25	1985	30		30		39.510
26	1986	38		38		2.939
27	1987	30.5		30.5		33.474
28	1988	42		42		32.653
		1172.4	664.4	508	3450.614	500.357

td	0.596
v	26
t	2.056

td <= t Homogénea

CRAMER

n	28
h _p máx	41.871 mm
s ²	178.688
s	13.367

Subconjunto 1 (60%)	
n ₁	17
X ₁	39.694
z _{eo}	-0.163
t _{eo}	1.054

Subconjunto 2 (30%)	
n ₂	8
X ₂	35.438
z _{eo}	-0.481
t _{eo}	1.630

	Año	h _p máx (mm)	Subconjunto 1	Subconjunto 2	(X _i - X) ²
1	1961	40.7			1.372
2	1962	83.3			1716.327
3	1963	40.2			2.794
4	1964	45			9.788
5	1965	40			3.502
6	1966	30.2			136.222
7	1967	40.2			2.794
8	1968	36			34.474
9	1969	62			405.159
10	1970	44			4.531
11	1971	36			34.474
12	1972	80.8	80.8		1515.434
13	1973	46	46		17.045
14	1974	40	40		3.502
15	1975	32	32		97.445
16	1976	40	40		3.502
17	1977	48	48		37.559
18	1978	40	40		3.502
19	1979	24	24		319.388
20	1980	40.5	40.5		1.881
21	1981	38	38	38	14.988
22	1982	39	39	39	8.245
23	1983	35	35	35	47.217
24	1984	31	31	31	118.188
25	1985	30	30	30	140.931
26	1986	38	38	38	14.988
27	1987	30.5	30.5	30.5	129.309
28	1988	42	42	42	0.017
		1172.4	674.8	283.5	4824.577

v	23
t	2.056

t_{eo} <= t Homogénea

t_{so} <= t Homogénea

Estación climatológica San Juan de Aragón clave 9043

HELMERT

n	59
hpmás	414.3933 mm

Año	hp máx (mm)	hp _i - hp (mm)	S ó C
1 1954	37.5	-3.936	
2 1955	39	-2.436	S
3 1956	45	3.564	C
4 1957	23	-18.436	C
5 1958	30.5	-10.936	S
6 1959	54	12.564	C
7 1960	41	-0.436	C
8 1961	34.8	-6.636	S
9 1962	38.5	-2.936	S
10 1963	58.6	17.164	C
11 1964	39.6	-1.836	C
12 1965	53.3	11.964	C
13 1966	21.4	-20.036	C
14 1967	41.5	0.064	C
15 1968	44.5	3.064	S
16 1969	56	14.564	S
17 1970	40	-14.36	C
18 1971	40	-14.36	S
19 1972	30	-11.436	S
20 1973	37	-4.436	S
21 1974	30.5	-10.936	S
22 1975	27	-14.436	S
23 1976	37	-4.436	S
24 1977	27.6	-13.836	S
25 1978	34.5	-6.936	S
26 1979	31.5	-9.936	S
27 1980	60	18.564	C
28 1981	27.3	-14.136	C
29 1982	59	17.564	C
30 1983	33.4	-8.036	C
31 1984	62.4	20.964	C
32 1985	49.5	8.064	S
33 1986	40.6	-8.836	C
34 1987	47	5.564	C
35 1988	36	-5.436	C
36 1989	45	3.564	C
37 1992	10.4	-31.036	C
38 1993	38.6	-2.936	S
39 1994	37.9	-3.536	S
40 1995	48	6.564	C
41 1996	33.1	-8.336	C
42 1997	33.7	-7.736	S
43 1998	24	-17.436	S
44 1999	38	-3.436	S
45 2000	49	7.564	C
46 2001	32	-8.436	C
47 2002	72	30.564	C
48 2003	39.7	-1.736	C
49 2004	32.7	-8.736	S
50 2005	45.2	3.764	C
51 2006	35.5	-5.936	C
52 2007	63	21.564	C
53 2008	48.1	6.564	S
54 2010	40.12	-1.316	C
55 2011	60	18.564	C
56 2012	41	-0.436	C
57 2013	55	13.564	C
58 2014	69	27.564	S
59 2015	45.2	3.764	S
	2444.72		

S _n	25
C _n	33
S _i -C _i	-8
raiz(n-1)s	7.616

-raiz(n-1) < (S-C) < raiz(n) No homogénea

DE STUDENT

n	59
---	----

Subconjunto 1	
n ₁	29.5
X ₁	38.631
s ₁ ²	117.178
s ₁	10.825

Subconjunto 2	
n ₂	29.5
X ₂	44.241
s ₂ ²	176.353
s ₂	13.280

Año	hp máx (mm)	Subconjto año 1	Subconjto año 2	(X ₁ - X ₂) ²	(X ₁ - X ₂) ³
1 1954	37.5	37.5		1.278	
2 1955	39	39		0.137	
3 1956	45	45		40.570	
4 1957	23	23		244.313	
5 1958	30.5	30.5		66.105	
6 1959	54	54		236.221	
7 1960	41	41		5.614	
8 1961	34.8	34.8		14.673	
9 1962	38.5	38.5		0.017	
10 1963	58.6	58.6		398.791	
11 1964	39.6	39.6		0.940	
12 1965	53.3	53.3		215.194	
13 1966	21.4	21.4		296.890	
14 1967	41.5	41.5		8.234	
15 1968	44.5	44.5		34.451	
16 1969	56	56		301.699	
17 1970	40	40		1.876	
18 1971	40	40		1.876	
19 1972	30	30		74.488	
20 1973	37	37		2.859	
21 1974	30.5	30.5		66.105	
22 1975	27	27		135.269	
23 1976	37	37		2.859	
24 1977	27.6	27.6		121.672	
25 1978	34.5	34.5		17.061	
26 1979	31.5	31.5		50.244	
27 1980	60	60		456.555	
28 1981	27.3	27.3		128.380	
29 1982	59	59		414.916	
30 1983	33.4		33.4	117.535	
31 1984	62.4		62.4	329.736	
32 1985	49.5		49.5	27.653	
33 1986	40.6		40.6	13.259	
34 1987	47		47	7.610	
35 1988	36		36	67.920	
36 1989	45		45	0.576	
37 1992	10.4		10.4	1145.237	
38 1993	38.6		38.6	31.825	
39 1994	37.9		37.9	40.213	
40 1995	48		48	14.127	
41 1996	33.1		33.1	124.130	
42 1997	33.7		33.7	111.120	
43 1998	24		24	409.712	
44 1999	38		38	38.955	
45 2000	49		49	22.645	
46 2001	32		32	149.851	
47 2002	72		72	770.542	
48 2003	39.7		39.7	20.624	
49 2004	32.7		32.7	133.203	
50 2005	45.2		45.2	0.919	
51 2006	35.5		35.5	76.411	
52 2007	63		63	351.887	
53 2008	48.1		48.1	14.889	
54 2010	40.12		40.12	16.986	
55 2011	60		60	248.335	
56 2012	41		41	10.506	
57 2013	55		55	115.748	
58 2014	69		69	612.990	
59 2015	45.2		45.2	0.919	
	2444.72	1139.6	1305.12	3339.574	5026.065

td	-0.499
v	57
t	2

td < t Homogénea

CRAMER

n	59
hpmás	414.393 mm
s ²	148.233
s	12.175

Subconjunto 1	
n ₁	35
X ₁	43.955
s ₁ ²	0.158
s ₁	1.464

Subconjunto 2	
n ₂	18
X ₂	45.734
s ₂ ²	0.353
s ₂	1.817

Año	hp máx (mm)	Subconjto año 1	Subconjto año 2	(X ₁ - X ₂) ²
1 1954	37.5			15.492
2 1955	39			5.934
3 1956	45			12.703
4 1957	23			339.884
5 1958	30.5			119.595
6 1959	54			157.856
7 1960	41			0.190
8 1961	34.8			44.036
9 1962	38.5			8.620
10 1963	58.6			294.605
11 1964	39.6			3.371
12 1965	53.3			140.756
13 1966	21.4			401.439
14 1967	41.5			0.004
15 1968	44.5			9.389
16 1969	56			212.112
17 1970	40			2.062
18 1971	40			2.062
19 1972	30			130.781
20 1973	37			19.677
21 1974	30.5			119.595
22 1975	27			208.396
23 1976	37			19.677
24 1977	27.6			191.433
25 1978	34.5	34.5		48.107
26 1979	31.5	31.5		98.723
27 1980	60	60		244.625
28 1981	27.3	27.3		199.825
29 1982	59	59		308.496
30 1983	33.4	33.4		64.576
31 1984	62.4	62.4		439.492
32 1985	49.5	49.5		85.023
33 1986	40.6	40.6		0.699
34 1987	47	47		30.959
35 1988	36	36		29.549
36 1989	45	45		12.703
37 1992	10.4	10.4		963.229
38 1993	38.6	38.6		8.043
39 1994	37.9	37.9		12.503
40 1995	48	48		43.087
41 1996	33.1	33.1		69.498
42 1997	33.7	33.7	33.7	59.945
43 1998	24	24	24	304.012
44 1999	38	38	38	11.806
45 2000	49	49	49	57.215
46 2001	32	32	32	89.037
47 2002	72	72	72	934.162
48 2003	39.7	39.7	39.7	3.013
49 2004	32.7	32.7	32.7	76.317
50 2005	45.2	45.2	45.2	14.169
51 2006	35.5	35.5	35.5	25.238
52 2007	63	63	63	465.009
53 2008	48.1	48.1	48.1	44.410
54 2010	40.12	40.12	40.12	1.732
55 2011	60	60	60	344.625
56 2012	41	41	41	0.190
57 2013	55	55	55	183.984
58 2014	69	69	69	759.778
59 2015	45.2	45.2	45.2	14.169
	2444.72	1517.42	823.22	8997.502

v	51
t	2

t60 < t Homogénea
t30 < t Homogénea

Estación climatológica Vencedora 44 clave 9062

HELMERT

n	9
hpmáx	44.544 mm

Año	hp máx (mm)	hp _i - hp (mm)	S ó C
1 1961	63	18.456	
2 1962	47.7	3.156	S
3 1963	40	-4.544	C
4 1964	39	-5.544	S
5 1965	36.7	-7.844	S
6 1966	35.2	-9.344	S
7 1967	55.7	11.156	C
8 1968	39.8	-4.744	C
9 1969	43.8	-0.744	S
	400.9		

S=	5
C=	3

S-C=	2
raiz(n-1)=	2.828

$-rz(n-1) < -(S-C) < rz(n-1)$ Homogénea

t DE STUDENT

n	9
---	---

Subconjunto 1	
n ₁	4.5
X ₁	42.156
S ² ₁	137.096
s ₁	11.709

Subconjunto 2	
n ₂	4.5
X ₂	46.933
S ² ₂	108.557
s ₂	10.419

Año	hp máx (mm)	Subconjunto 1	Subconjunto 2	(X _i - X ₁) ²	(X _i - X ₂) ²
1 1961	63	63		434.491	
2 1962	47.7	47.7		30.741	
3 1963	40	40		4.646	
4 1964	39	39		9.958	
5 1965	36.7		36.7		104.721
6 1966	35.2		35.2		137.671
7 1967	55.7		55.7		76.854
8 1968	39.8		39.8		50.884
9 1969	43.8		43.8		9.818
	400.9	189.7	211.2	479.836	379.949

td	-0.171
v	7
t	2.365

td <= t Homogénea

CRAMER

n	9
hpmáx	44.544 mm
s ²	87.290
s	9.343

Subconjunto 1 (60%)	
n ₁	5
X ₁	42.240
z ₆₀	-0.247
t ₆₀	0.759

Subconjunto 2 (30%)	
n ₂	3
X ₂	46.433
z ₃₀	0.202
t ₃₀	0.382

Año	hp máx (mm)	Subconjunto 1	Subconjunto 2	(X _i - X) ²
1 1961	63			340.608
2 1962	47.7			9.958
3 1963	40			20.652
4 1964	39			30.741
5 1965	36.7	36.7		61.535
6 1966	35.2	35.2		87.319
7 1967	55.7	55.7	55.7	124.446
8 1968	39.8	39.8	39.8	22.510
9 1969	43.8	43.8	43.8	0.554
	400.9	211.2	139.3	698.322

v	6
t	2.365

t₆₀ <= t Homogénea

t₃₀ <= t Homogénea

Anexo II Análisis de Frecuencia

Estación climatológica Cuauhtepc Barrio Bajo Clave 9017

MUESTRA	
n	17
x(mm)	52.106
s (mm)	15.782
g	0.942

FUNCIÓN GUMBEL			
α (mm)	12.310		
β (mm)	45.001		
E.E.	4.190	16.228	

FUNCIÓN NORMAL			
μ	52.106		
σ	15.782		
E.E	5.175	20.044	

FUNCIÓN LOG NORMAL			
μ	3.913		
σ	0.283		
E.E	4.574	17.716	

m	AÑO	hp(mm)	hp ord (mm)	Tr (años)	1/Tr	1- 1/Tr	XT (mm)	(XT-x)^2
1	1971	46.700	87.900	18.000	0.056	0.944	80.230	58.825
2	1972	54.000	80.900	9.000	0.111	0.889	71.330	91.583
3	1973	50.300	69.500	6.000	0.167	0.833	65.952	12.591
4	1974	30.700	65.000	4.500	0.222	0.778	62.001	8.994
5	1975	69.500	54.000	3.600	0.278	0.722	58.820	23.232
6	1976	87.900	54.000	3.000	0.333	0.667	56.113	4.465
7	1977	47.000	50.300	2.571	0.389	0.611	53.720	11.695
8	1978	37.000	50.000	2.250	0.444	0.556	51.542	2.378
9	1979	65.000	48.000	2.000	0.500	0.500	49.512	2.287
10	1980	80.900	47.000	1.800	0.556	0.444	47.581	0.337
11	1981	48.000	46.900	1.636	0.611	0.389	45.704	1.430
12	1982	46.900	46.700	1.500	0.667	0.333	43.843	8.162
13	1983	44.700	44.700	1.385	0.722	0.278	41.953	7.546
14	1984	30.700	42.500	1.286	0.778	0.222	39.976	6.370
15	1985	42.500	37.000	1.200	0.833	0.167	37.822	0.675
16	1986	50.000	30.700	1.125	0.889	0.111	35.311	21.257
17	1987	54.000	30.700	1.059	0.944	0.056	31.935	1.526
								263.353

v	UT	XT (mm)	(XT-x)^2
2.404	1.594	77.255	113.318
2.096	1.221	71.372	90.786
1.893	0.967	67.373	4.526
1.734	0.764	64.171	0.688
1.601	0.589	61.403	54.801
1.482	0.430	58.897	23.977
1.374	0.282	56.553	39.100
1.274	0.139	54.306	18.542
1.177	0.000	52.106	16.858
1.274	-0.139	49.906	8.444
1.374	-0.282	47.659	0.576
1.482	-0.430	45.315	1.918
1.601	-0.589	42.809	3.576
1.734	-0.764	40.041	6.046
1.893	-0.967	36.839	0.026
2.096	-1.221	32.840	4.579
2.404	-1.594	26.957	14.011
			401.772

ln(X)	(ln(X)- μ)^2	XT (mm)	(XT-x)^2
4.476	0.318	78.505	88.260
4.393	0.231	70.653	105.004
4.241	0.108	65.768	13.926
4.174	0.069	62.102	8.398
3.989	0.006	59.098	25.990
3.989	0.006	56.504	6.268
3.918	0.000	54.180	15.058
3.912	0.000	52.043	4.173
3.871	0.002	50.032	4.128
3.850	0.004	48.098	1.206
3.848	0.004	46.201	0.489
3.844	0.005	44.301	5.755
3.800	0.013	42.356	5.493
3.750	0.027	40.307	4.808
3.611	0.091	38.060	1.125
3.424	0.239	35.429	22.364
3.424	0.239	31.885	1.405
			313.849

Estación climatológica Hacienda la Patera clave 9025

MUESTRA	
n	28
x(mm)	41.871
s (mm)	13.367
g	2.087

FUNCIÓN GUMBEL			
α (mm)	10.427		
β (mm)	35.853		
E.E.	5.603	28.570	

FUNCIÓN NORMAL			
μ	41.871		
σ	13.367		
E.E.	7.142	36.416	

FUNCIÓN LOG NORMAL			
μ	3.696		
σ	0.264		
E.E.	6.311	32.182	

m	AÑO	hp(mm)	hp ord (mm)	Tr (años)	1/Tr	1- 1/Tr	XT (mm)	(XT-x)^2
1	1961	40.700	83.300	29.000	0.034	0.966	70.780	156.745
2	1962	83.300	80.800	14.500	0.069	0.931	63.365	303.974
3	1963	40.200	62.000	9.667	0.103	0.897	58.944	9.341
4	1964	45.000	48.000	7.250	0.138	0.862	55.744	59.971
5	1965	40.000	46.000	5.800	0.172	0.828	53.211	51.993
6	1966	30.200	45.000	4.833	0.207	0.793	51.096	37.156
7	1967	40.200	44.000	4.143	0.241	0.759	49.266	27.734
8	1968	36.000	42.000	3.625	0.276	0.724	47.644	31.851
9	1969	62.000	40.700	3.222	0.310	0.690	46.176	29.985
10	1970	44.000	40.500	2.900	0.345	0.655	44.828	18.728
11	1971	36.000	40.200	2.636	0.379	0.621	43.573	11.377
12	1972	80.800	40.200	2.417	0.414	0.586	42.393	4.808
13	1973	46.000	40.000	2.231	0.448	0.552	41.272	1.617
14	1974	40.000	40.000	2.071	0.483	0.517	40.198	0.039
15	1975	32.000	40.000	1.933	0.517	0.483	39.160	0.706
16	1976	40.000	40.000	1.813	0.552	0.448	38.149	3.425
17	1977	48.000	39.000	1.706	0.586	0.414	37.158	3.394
18	1978	40.000	38.000	1.611	0.621	0.379	36.177	3.322
19	1979	24.000	38.000	1.526	0.655	0.345	35.199	7.843
20	1980	40.500	36.000	1.450	0.690	0.310	34.216	3.184
21	1981	38.000	36.000	1.381	0.724	0.276	33.216	7.753
22	1982	39.000	35.000	1.318	0.759	0.241	32.187	7.914
23	1983	35.000	32.000	1.261	0.793	0.207	31.113	0.786
24	1984	31.000	31.000	1.208	0.828	0.172	29.972	1.058
25	1985	30.000	30.500	1.160	0.862	0.138	28.726	3.149
26	1986	38.000	30.200	1.115	0.897	0.103	27.312	8.342
27	1987	30.500	30.000	1.074	0.931	0.069	25.597	19.384
28	1988	42.000	24.000	1.036	0.966	0.034	23.194	0.649
								816.231

v	UT	XT (mm)	(XT-x)^2
2.595	1.819	66.187	292.838
2.313	1.484	61.706	364.565
2.130	1.262	58.745	10.593
1.990	1.090	56.438	71.199
1.875	0.945	54.498	72.219
1.775	0.817	52.793	60.736
1.686	0.702	51.250	52.561
1.605	0.595	49.823	61.194
1.530	0.494	48.481	60.545
1.459	0.399	47.203	44.936
1.392	0.307	45.973	33.331
1.328	0.217	44.778	20.955
1.267	0.130	43.606	13.000
1.207	0.043	42.448	5.992
1.207	-0.043	41.295	1.677
1.267	-0.130	40.137	0.019
1.328	-0.217	38.965	0.001
1.392	-0.307	37.770	0.053
1.459	-0.399	36.539	2.133
1.530	-0.494	35.262	0.545
1.605	-0.595	33.920	4.326
1.686	-0.702	32.493	6.285
1.775	-0.817	30.950	1.103
1.875	-0.945	29.245	3.081
1.990	-1.090	27.305	10.209
2.130	-1.262	24.998	27.065
2.313	-1.484	22.036	63.418
2.595	-1.819	17.555	41.533
			1326.114

ln(X)	(ln(X)-μ)^2	XT (mm)	(XT-x)^2
4.422	0.528	65.174	328.568
4.392	0.484	59.644	447.578
4.127	0.186	56.250	33.064
3.871	0.031	53.740	32.944
3.829	0.018	51.716	32.676
3.807	0.012	50.001	25.008
3.784	0.008	48.497	20.223
3.738	0.002	47.147	26.488
3.706	0.000	45.912	27.161
3.701	0.000	44.766	18.195
3.694	0.000	43.689	12.174
3.694	0.000	42.668	6.090
3.689	0.000	41.690	2.855
3.689	0.000	40.745	0.556
3.689	0.000	39.827	0.030
3.689	0.000	38.925	1.156
3.664	0.001	38.032	0.936
3.638	0.003	37.143	0.734
3.638	0.003	36.250	3.062
3.584	0.013	35.345	0.429
3.584	0.013	34.419	2.498
3.555	0.020	33.461	2.368
3.466	0.053	32.455	0.207
3.434	0.069	31.378	0.143
3.418	0.077	30.197	0.092
3.408	0.083	28.849	1.825
3.401	0.087	27.207	7.798
3.178	0.268	24.899	0.808
			1035.668

Estación climatológica Vencedora 44 clave 9062

MUESTRA	
n	9
x(mm)	44.544
s (mm)	9.343
g	1.189

FUNCIÓN GUMBEL			
α (mm)	7.287		
β (mm)	40.338		
E.E.	9.293	24.588	

FUNCIÓN NORMAL			
μ	44.544		
σ	9.343		
E.E.	10.139	26.824	

FUNCIÓN LOG NORMAL			
μ	3.779		
σ	0.185		
E.E.	9.430	24.950	

m	AÑO	hp(mm)	hp ord (mm)	Tr (años)	1/Tr	1- 1/Tr	XT (mm)	(XT-x)^2
1	1961	63.000	63.000	10.000	0.100	0.900	56.738	39.217
2	1962	47.700	47.700	5.000	0.200	0.800	51.269	12.737
3	1963	40.000	40.000	3.333	0.300	0.700	47.851	61.638
4	1964	39.000	39.000	2.500	0.400	0.600	45.233	38.854
5	1965	36.700	36.700	2.000	0.500	0.500	43.009	39.804
6	1966	35.200	35.200	1.667	0.600	0.400	40.975	33.353
7	1967	55.700	55.700	1.429	0.700	0.300	38.985	279.379
8	1968	39.800	39.800	1.250	0.800	0.200	36.870	8.584
9	1969	43.800	43.800	1.111	0.900	0.100	34.260	91.009
								604.577

v	UT	XT (mm)	(XT-x)^2
2.146	1.282	56.520	41.996
1.794	0.841	52.406	22.147
1.552	0.524	49.440	89.117
1.354	0.253	46.908	62.530
1.177	0.000	44.544	61.535
1.354	-0.253	42.181	48.739
1.552	-0.524	39.649	257.643
1.794	-0.841	36.683	9.717
2.146	-1.282	32.569	126.128
			719.552

ln(X)	(ln(X)- μ)^2	XT (mm)	(XT-x)^2
4.143	0.133	55.446	57.061
3.865	0.007	51.115	11.664
3.689	0.008	48.204	67.305
3.664	0.013	45.850	46.918
3.603	0.031	43.757	49.798
3.561	0.047	41.759	43.025
4.020	0.058	39.720	255.366
3.684	0.009	37.458	5.487
3.780	0.000	34.532	85.900
			622.524