



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

EVALUACIÓN DE INFRAESTRUCTURA VERDE PARA REDUCIR
INUNDACIONES URBANAS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
CARMEN HERNÁNDEZ PASTOR

TUTOR PRINCIPAL
DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. DE MÉXICO, NOVIEMBRE, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Fuentes Mariles Oscar Arturo

Secretario: Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana

1er. Vocal: Dr. Pedrozo Acuña Adrián

2do. Vocal: Dr. Pozos Estrada Óscar

3er. Vocal: Dr. Breña Naranjo José Agustín

Lugar donde se realizó la tesis:
Instituto de Ingeniería de la UNAM, Ciudad de México.

Tutor de Tesis:

Dr. Adrián Pedrozo Acuña

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos, ser mi inspiración.
A Geovanny, por ser mi apoyo y motor.

A la UNAM, por ser mi fuente de conocimiento, mi alma máter.

Al CONACYT, por permitirme estudiar un posgrado.

Al Instituto de Ingeniería, por abrirme las puertas y darme
herramientas para este proyecto.

A mis profesores, por compartirme su conocimiento que fue parte
fundamental e indispensable en mi formación.

A mis sinodales, por enriquecerme con sus aportes, y contribuir a la
mejora de este trabajo.

ÍNDICE

OBJETIVOS	2
1. INFRAESTRUCTURA VERDE	3
1.1 Generalidades	4
1.2 Azoteas verdes	5
Características generales	5
Elementos componentes de una cubierta naturada	9
Beneficios	12
Mantenimiento	13
1.3 Captación de agua pluvial	13
Características generales	13
Elementos componentes	15
Beneficios	17
Mantenimiento	18
1.4 Parques inundables	18
Características generales	18
Elementos componentes	20
Beneficios	20
2. ZONA DE ESTUDIO	21
2.1 Descripción de la zona de estudio	21
2.2 Ubicación	21
2.3 Clima	23
2.4 Riesgos de inundación	24
3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO	25
3.1 Procesamiento de la información	26
3.2 Análisis de frecuencias	28
3.2.1 Análisis de independencia	28
Análisis de homogeneidad	29
3.2.2 Relleno anual	34
3.2.3 Análisis regional hidrológico	37
3.2.4 Análisis de correlación y regresión	43
3.2.5 Relleno diario	44

3.2.6	Pruebas de homogeneidad e independencia de serie rellena	45
3.3	Teoría distribucional.....	45
3.3.1	Estimación de serie máxima anual en sitio de interés	46
3.3.2	Distribución normal	47
3.3.3	Distribución Log Normal 2p.....	47
3.3.4	Distribución LogNormal 3p.....	48
3.3.5	Distribución Gamma de 2p	48
3.3.6	Distribución Gamma de 3p	49
3.3.7	Distribución Gumbel (Tipo 1).....	49
3.3.8	Distribución general de valores extremos.....	50
3.3.9	Distribución Log Pearson Tipo III	50
3.3.10	Pruebas de bondad de ajuste	51
3.3.11	Eventos de diseño.....	51
4	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (Tc).....	52
5	CURVAS INTENSIDAD – DURACIÓN – FRECUENCIA	53
5.1	Hietogramas de diseño.....	64
6	MODELO HIDRODINÁMICO	66
6.1	Descripción del modelo.....	66
6.2	Solución numérica	67
6.3	Implementación y calibración del modelo.....	70
7.	EVALUACIÓN DE INFRAESTRUCTURA.....	72
7.1	Validación del modelo.....	73
7.2	Modelación del escurrimiento natural (condiciones normales).....	75
7.3	Modelación con Capacidad de Agua Pluvial	77
7.4	Modelación con Azotea verde.....	79
7.5	Modelación con Parques inundables	81
7.6	Análisis de resultados.....	82
8.	CONCLUSIONES	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Azotea verde.....	6
Figura 2 Azotea verde (directa).....	7
Figura 3 Azotea verde (indirecta).....	7
Figura 4 Capas componentes de las azoteas verdes.....	12
Figura 5 Elementos componentes de las azoteas verdes.....	12
Figura 6 Sistema de captación de agua pluvial.....	14
Figura 7 Elementos componentes del sistema de captación de agua pluvial.....	16
Figura 8 Fotografía de sistema básico.....	17
Figura 9 Fotografía Parque inundable la Marjar.....	19
Figura 10 Fotografía Parque inundable la Marjar.....	19
Figura 11 Esquema de Parque inundable.....	20
Figura 12 Ubicación de CDMX.....	21
Figura 13 Delimitación de la cuenca de estudio.....	22
Figura 14 Ubicación de cuenca de estudio.....	22
Figura 15 Ciudad de México (Foto).....	23
Figura 16 Inundación en la Ciudad de México.....	24
Figura 17 Inundación en la Ciudad de México ocurrida en el año 1952.....	25
Figura 18 Delimitación de polígonos de Thiessen.....	25
Figura 19 Delimitación de zona urbana de trabajo.....	26
Figura 20 Delimitación de zona urbana de trabajo.....	46
Figura 21 Carta LIDAR.....	70
Figura 22 Drenaje de la cuenca.....	72
Figura 22 Área de captación (0.1 km ²).....	74
Figura 23 Área de captación (0.2 km ²).....	75
Figura 24 Áreas inundadas.....	76
Figura 26 Áreas inundadas.....	77
Figura 27 Áreas inundadas.....	78
Figura 28 Áreas inundadas.....	79
Figura 28 Áreas inundadas.....	80
Figura 29 Áreas inundadas.....	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Componentes de infraestructura verde.....	4
Tabla 2. Clasificación de servicios ecosistémicos proporcionados por la infraestructura verde.....	5
Tabla 3. Características de azoteas verdes.....	8
Tabla 4. Porcentaje de desagüe de agua pluvial en azoteas naturadas.....	8
Tabla 5. Estaciones dentro de zona de estudio.....	26
Tabla 6. Registro máximo anual de estaciones de zona de estudio.....	27
Tabla 7. Resultados del análisis de independencia.....	29
Tabla 8. Estadísticos de Prueba de Pettitt.....	32
Tabla 9 Estadísticos de Prueba Normal Estándar.....	32
Tabla 10. Estadísticos de Prueba para Buishand.....	33
Tabla 11. Resultados de la prueba de homogeneidad.....	33
Tabla 12 Estaciones que cumplen homogeneidad e independencia.....	33
Tabla 13 Coordenadas UTM de las estaciones de análisis.....	34

Tabla 14 Matriz de distancia entre estaciones.....	35
Tabla 15 Cálculo de coeficientes de relleno.....	36
Tabla 16 Base de datos rellena.....	36
Tabla 17 Tipo de distribución de cada estación.....	38
Tabla 18 Regiones homogéneas GVE.....	39
Tabla 19 Resultados prueba de coeficiente de variación.....	40
Tabla 20 Regiones homogéneas CV.....	40
Tabla 21 Atributos característicos de las estaciones.....	42
Tabla 22 Regiones homogéneas.....	42
Tabla 23 Resumen de regiones formadas.....	43
Tabla 24 Región de zona de estudio (9020).....	43
Tabla 25 Series rellenas.....	44
Tabla 26 Resultado de pruebas de homogeneidad e independencia de series rellenas.....	45
Tabla 26 Serie de precipitación máxima anual de la zona de estudio.....	46
Tabla 28 Resultado de ajuste de distribuciones de probabilidad.....	51
Tabla 29 Resultado de eventos de diseño.....	52
Tabla 30 Tiempo de concentración calculado.....	53
Tabla 31 Factores de Conversión para Duraciones Menores a 1 h.....	55
Tabla 32 Valores de precipitación para cálculo de coeficiente R.....	55
Tabla 33 Valor numérico de curvas i-d-T.....	56
Tabla 34 Valores de intensidades de diseño.....	64
Tabla 35 Ejemplo de método para elaboración de hietograma Tr 2 años.....	65
Tabla 36 Hietogramas de diseño.....	66
Tabla 36 Áreas inundadas en condiciones normales (km ²).....	76
Tabla 38 Áreas inundadas con captación de agua pluvial (0.1 km ²).....	77
Tabla 39 Áreas inundadas con captación de agua pluvial (0.2 km ²).....	78
Tabla 40 Áreas inundadas con azotea verde (0.1 km ²).....	80
Tabla 40 Áreas inundadas con azotea verde (0.2 km ²).....	80
Tabla 42 Áreas inundadas con parques inundables (0.1 km ²).....	82
Tabla 43 Áreas inundadas con parques inundables (0.2 km ²).....	82
Tabla 44 Áreas de reducción de inundación (0.1 km ²).....	83
Tabla 45 Áreas de reducción de inundación (0.2 km ²).....	84
Tabla 46. Catálogo de conceptos azotea verde.....	85
Tabla 47. Catálogo de conceptos.....	86

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Ubicación espacial de las estaciones.....	35
Gráfica 2 Gráfico de distribución GVE.....	39
Gráfica 3 Gráfico de distribución CV.....	40
Gráfica 4 Relación empírica para lluvia en ausencia de registros pluviográficos.....	54
Gráfica 5 Hietograma de diseño.....	65
Gráfica 6 Curvas de mitigación de área de inundación.....	83
Gráfica 7 Curvas de mitigación de área de inundación.....	84
Gráfica 8 Porcentaje de la normal.....	89

INTRODUCCIÓN

En esta tesis se presenta el trabajo realizado para la evaluación de los efectos que tiene la implementación de la infraestructura verde como medio de mitigación de inundaciones en zonas urbanizadas.

También se detalla la metodología empleada y los aspectos propios de cada tipo de infraestructura evaluada.

La problemática principal analizada, radica en la presencia de inundaciones súbitas en zona urbana, que tienen su principal origen en los cambios de uso de suelo y cambios en las condiciones de impermeabilidad de los suelos.

Como propuesta de solución se analizan estructuras que facilitan la captación y cambios de uso de suelo y paisaje.

La selección de mejor alternativa incluye, entre otras cosas:

- Características de la infraestructura
- Requisitos constructivos
- Mantenimiento
- Funcionalidad
- Costos
- Metodología de diseño

La metodología consiste en realizar un análisis de zona actual, en esta etapa se verifican las áreas potenciales de inundación, apoyada de mapas de riesgo existentes.

También es necesario verificar la planificación territorial de la ciudad, verificar la escala de la solución: nodo, núcleo, barrio, región, etc.

Como primer paso es la ubicación de la zona de estudio, misma en donde se implementarán los tres tipos de infraestructura, para poder comparar el comportamiento de la inundación con cada medida implementada; y de esta manera, emitir una evaluación.

El siguiente paso es la determinación de los eventos de diseño, calculados a través de un enfoque probabilístico, usando la técnica estadística del análisis de frecuencias, a partir de la base de datos de precipitación de las estaciones climatológicas de la CONAGUA.

Posteriormente, se describe la aplicación de la alternativa de solución, a partir de un análisis comparativo de la medida en que cada uno de los tipos de infraestructura verde, produce una reducción del área de inundación dentro de la cuenca.

Con ayuda del modelo hidrodinámico, se determinan los diferentes escenarios con probabilidad de ocurrencia, obtenidos con la modelación de flujos y simulaciones.

Finalmente, obtendremos los resultados de las simulaciones, que nos permitirán evaluar el área inundada y serán el parteaguas para la evaluación del nivel de eficiencia de los diferentes tipos de infraestructura.

En este apartado, se evaluará el grado de eficiencia de los diferentes tipos de infraestructura, con respecto a su capacidad para reducir afectaciones por inundaciones, de acuerdo al área de captación y a los costos asociados.

OBJETIVOS

- Desarrollar la curva área de mitigación-Tr-tipo de infraestructura
- Evaluar el área óptima requerida que represente una diferencia entre el nivel de inundación en condiciones normales y una vez implementada la Infraestructura.
- Evaluar el tipo de infraestructura de acuerdo a su beneficio-costos.

1. INFRAESTRUCTURA VERDE

La infraestructura verde constituye una alternativa al uso de soluciones altamente tecnológicas e ingenieriles para atender contrariedades urbanas, tales como inundaciones, escasez de agua, regulación térmica y falta de espacio público.

Es multifuncional, a diferencia de la infraestructura gris, que solo contribuye a la solución de uno solo de los problemas, debido a su carácter monofuncional.

Ventajas: Capacidad para realizar diferentes funciones en la misma zona espacial, lo cual significa que puede promover soluciones que benefician a todos o escenarios que ofrecen prerrogativas a un amplio abanico de partes interesadas, así como a la sociedad en general.

Son una herramienta que enfrenta el cambio climático en las ciudades.

TIPOS

1. Ecosistema de llanura inundable sano.
2. Parque urbano (corredor de aire frío, absorción de escurrimiento, recreación).
3. Humedales.
4. Estuario multifuncional.
5. Explanada filtradora a mantos acuíferos.
6. Alternativas de infraestructura para infiltración:
 - a) Zona con pavimentos porosos o adoquinados
 - b) Subdrenes de percolación
 - c) Campos de infiltración
 - d) Pozos de infiltración
 - e) Trincheras de infiltración
 - f) Estanques de infiltración
 - g) Incrementar rugosidad de la superficie
 - h) Evitar el flujo de agua sobre superficies impermeables continuas o contiguas y redirigir las bajadas pluviales hacia almacenamientos temporales que cambien el régimen de la descarga
 - i) Parques intercomunales

1.1 Generalidades

Uno de los modos más eficaces de construir una infraestructura verde es mediante la ordenación territorial, que permite investigar las interacciones entre diferentes usos del suelo a lo largo de una amplia zona geográfica.

En la Tabla 1 se destacan los componentes del paisaje que pueden utilizarse como infraestructura verde y en la Tabla 2 los servicios ecosistémicos que pueden prestar.

Tabla 1. Componentes de infraestructura verde

Escala de barrio	Escala de ciudad	Escala regional
Calles arboladas	Ríos y llanuras de inundación	Áreas Silvestres Protegidas
Techos y paredes verdes	Parques intercomunales	Parques nacionales
Plazas de barrio	Canales urbanos	Bordes costeros y playas
Jardines privados	Lagunas	Senderos estratégicos y de larga distancia
Espacios abiertos institucionales	Bosques urbanos	Bosques
Estanques y arroyos	Parques naturales	Fajas de resguardo en líneas de alta tensión
Derechos de paso de caminos	Frentes de agua continuos	Red de carreteras y ferrocarriles
Peatonales y ciclo rutas	Plazas municipales	Cinturón verde designado
Cementerios	Cerros	Tierras agrícolas
Pistas deportivas	Grandes espacios recreativos	Ríos y llanuras de inundación
Zanjas de inundación	Esteros	Canales
Pequeños bosques	Terrenos abandonados	Campo abierto
Áreas de juego	Bosques comunitarios	Cordones montañosos
Quebradas	Sitios mineros en abandono	Territorio de propiedad común
Patios de la escuela	Tierras agrícolas	Acueductos y gaseoductos
Huertos	Vertederos	Fallas geológicas
Terrenos abandonados		Lagos

Fuente: Elaboración propia en base a EEA, 2011 y Landscape Institute, 2009.

Tabla 2. Clasificación de servicios ecosistémicos proporcionados por la infraestructura verde

Servicios de Regulación	Servicios de Provisión	Servicios Culturales
Regulación del clima local	Cultivos	Recreación, turismo y ecoturismo
Regulación de la calidad del aire	Forraje	Inspiración y belleza escénica
Infiltración y drenaje de aguas	Ganado	Conocimiento de los sistemas
Purificación del agua	Fibra	Experiencia espiritual y religiosa
Regulación de la erosión	Madera	Patrimonio y diversidad cultural

Servicios de Regulación	Servicios de Provisión	Servicios Culturales
Protección ante riesgos naturales	Leña	Patrimonio natural y biodiversidad
Polinización	Acuicultura	Valor educativo
Control de plagas y enfermedades	Alimentos y vegetación	Integración social
Descomposición de orgánicos	Medicamentos y bioquímicos	Salud mental y física de personas
Reducción del ruido	Agua fresca y potable	
Regulación de gases (+O ₂ y -CO ₂)	Recursos minerales	
Secuestro de carbono	Recursos energéticos abióticos	
Provisión de hábitat	Recursos genéticos	
Formación de suelo, Fotosíntesis, Producción Primaria, Ciclo de Nutrientes, Ciclo del Agua		
Servicios de soporte		

Fuente: Elaboración propia en base a MEA (2005), Bolund y Hunhammar (1999), Hernández-Morcillo, Plieninger y Bieling (2013), Kandziora, Burkhard, y Müller (2005 y 2013) y Niemelä *et al.* (2010).

1.2 Azoteas verdes

Características generales

La azotea verde (Figura 1) surge como una alternativa sustentable ante la acelerada urbanización, es un tipo de infraestructura de retención.



Figura 1 Azotea verde

Una azotea verde es una superficie donde se siembran las plantas y estas crecen sobre la azotea de algún edificio o de casas (Urbieta, 2005). La azotea verde se puede construir con macetas en donde se siembran arbolitos, arbustos, hortalizas y plantas; esto permite ir transformando espacios grises en espacios vivos y armónicos; además de utilizar los productos que se pueden cosechar para nuestra alimentación y salud.

Se trata de un espacio en la parte superior de las casas o edificios, donde se dedica espacio a la vegetación o elementos naturales. Tener una azotea de este tipo sirve como impermeabilizante y aislante del ruido.

Por otro lado, se van quedando atrás las construcciones con grandes jardines y los edificios van ganando terreno, empobreciendo el paisaje. Según el Consejo Mexicano de Edificación Sustentable, los edificios representan el 65% del consumo total de energía, emiten el 30% de gases de efecto invernadero y consumen el 35% del agua (Álvarez, 2009).

Es por eso, que es necesario buscar alternativas viables y rentables para reverdecer las áreas que se han perdido por la urbanización, y las azoteas y muros verdes son una alternativa real para contrarrestar este efecto (Álvarez, 2009). Además, que se ocupan espacios que están siendo desaprovechados. Esta alternativa ha ido ganando terreno a nivel internacional y representa una solución que tiene grandes beneficios económicos, ambientales y sobre todo en la salud de la población.

Actualmente existen dos tipos de Azoteas verdes, la indirecta y la directa. Una **Azotea verde directa** consiste en un sistema compuesto por una membrana anti raíces que se extiende en la superficie de la azotea junto con un sistema de drenado. En cualquier tipo de techo se puede instalar una azotea verde, siempre cuando pueda soportar una carga de aproximadamente 110 kilos por cada metro cuadrado (Urbieta, 2005).



Figura 2 Azotea verde (directa)

La Azotea Verde indirecta (Figura 3) se instala con el uso de recipientes como charolas, llantas u otros materiales de reúso que permitan simular macetas donde pueda desarrollarse la vegetación.



Figura 3 Azotea verde (indirecta)

Algunas de las características generales de las azoteas verdes, se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Características de azoteas verdes

	NATURACIÓN EXTENSIVA	NATURACIÓN SEMI-INTENSIVA	NATURACIÓN INTENSIVA
Mantenimiento	Bajo	Periódicamente	Alto
Riego	No	Periódicamente	Regularmente
Vegetación	Hierbas y pastos	Hierbas y arbustos	Césped, arbustos y árboles
Sistema de acumulación	60 a 200 mm	120 a 250 mm	150 a 400 mm en garajes subterráneos > 1000 mm
Peso	60 a 150 kg / m ²	120 a 210 kg / m ²	180 a 500 kg/m ²
Costos	Bajo	Medio	Alto
Uso	Capa de protección ecológica	Techo Verde diseñado	Parque como jardín

Dependiendo de varios aspectos como: el espesor, la intensidad de la lluvia, las azoteas naturadas almacenan una parte importante de la precipitación anual, por ello es importante tener un buen sistema de drenaje, el cual se alimentará principalmente del sustrato, pero si la lluvia es intensa y la capa del sustrato muy fina será mayor el caudal a drenar.

En la tabla 4 se muestran los porcentajes de desagüe de agua pluvial en las superficies de azoteas naturadas, es decir, el porcentaje expresado será el que no puede ser retenido por la vegetación, por ejemplo, en el sistema de vegetación extensivo el 30% de la precipitación es retenido por la vegetación, mientras que el 70% será desalojado y descargado al drenaje (Mora, 2012).

Tabla 4. Porcentaje de desagüe de agua pluvial en azoteas naturadas

TIPO DE NATURACIÓN	% DE DESAGÜE
Extensivo	Espesor mayor a 10 cm 30%, Espesor menor de 10 cm 50%
Semi-intensivo	40%
Intensivo	70%

Normativa Mexicana

- Plan verde
- Asociación Internacional de Azoteas Verdes (IGRA) (www.igra-world.com)
- NTC (AZOTEAS VERDES)
- NADF-013-RNAT-2007

Especificaciones técnicas de proyecto y ejecución para cubiertas naturadas

Para satisfacer los requerimientos de calidad y seguridad en una cubierta naturada se deberán seguir las siguientes especificaciones durante los procesos de proyecto y ejecución. Estas especificaciones deberán ser atendidas y supervisadas por el encargado responsable del proyecto y el encargado responsable de la construcción de una naturación de tal modo que garanticen su aplicación.

Requerimientos mínimos a satisfacer

La naturación y sus elementos constituyentes deberán satisfacer por lo menos los requerimientos siguientes:

- Estabilidad y resistencia mecánica: Las obras para naturación deben ser estables y resistentes ante las acciones consideradas en el cálculo estructural de la edificación, de acuerdo a lo establecido en el Reglamento de Construcciones para la CDMX y sus Normas Técnicas Complementarias. Se deberá garantizar el correcto comportamiento estático y estructural de la construcción en su conjunto y procurar que sus componentes sean considerados en el análisis estructural.
- Impermeabilidad: Los sistemas de naturación deben impedir el paso del agua al interior de la edificación protegiéndola de los agentes climáticos previsibles garantizando la evacuación total del agua excedente, una vez alcanzado el estado de saturación del sistema.
- Resistencia a la acción de las raíces sobre la estructura: la naturación debe proyectarse y construirse con los materiales adecuados, garantizando que las raíces de la capa de vegetación no penetren la membrana impermeabilizante para evitar daños a la estructura de la edificación (SEMARNAT, 2008).

Elementos componentes de una cubierta naturada

Una cubierta naturada está constituida por los siguientes componentes básicos, los cuales se enlistan en el orden del proceso constructivo.

- Estructura soportante (puede servir de soporte base y de elemento que forma la pendiente)
- Membrana impermeabilizante anti-raíz
- Desagües
- Capa drenante
- Capa filtrante
- Capa de substrato
- Capa de vegetación

Aspectos constructivos

La norma ambiental para el Distrito Federal (NADF-013-RNAT-2007), establece que las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en la Ciudad de México.

Para garantizar una correcta planeación y ejecución de una naturación, es necesario conocer características específicas de los elementos constructivos, la edificación y la zona en que se encuentra, para ello es necesario contar con la siguiente información previo a la etapa de planeación y/o proyecto.

Información arquitectónica y física de la edificación:

- Altitud y altura de la edificación.
- Dimensiones de la superficie a naturar.
- Pendiente de la superficie a naturar.
- Ubicación de los accesos a la superficie que se va a naturar.
- Ubicación y estado de las instalaciones que discurren por la superficie a naturar.
- Ubicación y estado de las juntas estructurales (para el caso de cubiertas naturadas).
- Ubicación y estado de las tomas de agua de riego más cercanas a la superficie a naturar.
- Ubicación y estado de los elementos singulares (tales como tubos, ductos, muertes, etc.) y demás elementos constructivos de la superficie a naturar.
- Ubicación y estado de los puntos de desagüe, sumideros y/o bajadas de agua.
- Porción o porciones de la superficie a naturar protegida(s) del agua de lluvia por elementos constructivos.
- Porción o porciones de la superficie a naturar que reciben sombra de construcciones y/o vegetación aledaña o de los elementos constructivos de la propia edificación durante la mayor parte del día.

- Orientación de la superficie a naturar en relación al asoleamiento y vientos dominantes.

Información estructural:

- Carga máxima admisible, dimensiones y altura de la superficie a naturar y sus elementos portantes.
- Ubicación y estado de los elementos estructurales de la planta inferior inmediata a la cubierta (para el caso de cubiertas naturadas).

Información sobre la vegetación:

- Vegetación adaptada a las condiciones físicas y climáticas de la zona.
- Vegetación endémica de la zona.

ELEMENTOS PRINCIPALES (Figuras 4 y 5)

- Techo en condiciones
- Impermeabilizante

Es una capa que evita las filtraciones de agua a través del concreto.

Antes de empezar a colocar las macetas en tu azotea o terraza, necesitas asegurarte que esté bien impermeabilizada.

- Capa aislante

Aísla las capas de la vegetación, del concreto e impermeable.

- Capa de drenaje, aireación, almacenamiento de agua y barrera para raíces

Después de verificar que el techo soporte el peso, de impermeabilizarlo y aislarlo, se coloca una cubierta de neopreno, que es un material que no permite que las raíces perforen las losas y evita que el agua se drene manteniendo la humedad. Encima del neopreno se coloca la tierra para las plantas.

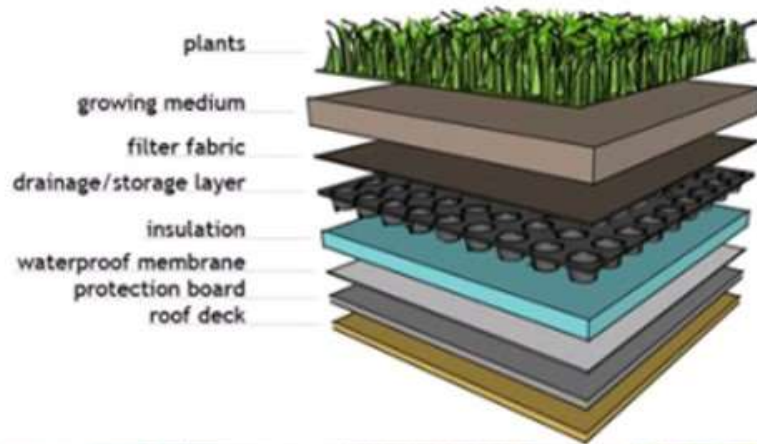


Figura 4 Capas componentes de las azoteas verdes



Figura 5 Elementos componentes de las azoteas verdes

- Maceta/recipiente contenedor
- Tierra/ abono orgánico
- Vegetación

Beneficios

A pesar de las dificultades y costos que pueda representar la implementación de los techos verdes, son muchos los beneficios y ventajas que tienen su establecimiento, entre estos beneficios y ventajas podemos mencionar los siguientes:

- El espacio verde recuperado ayuda a purificar el aire y reducir los gases contaminantes en el entorno.
- Reduce el nivel de ruido.
- Regula el clima local, pues ayuda a regular la temperatura interior de las casas, manteniéndolas frescas en verano y bloqueando el frío en invierno.
- Al tener una mayor superficie con follaje, se contribuye a la retención de polvo contaminante en el aire.

- Es un espacio para cultivar alimentos.
- Aprovecha el agua de lluvia y la luz solar.
- Reduce las aguas de lluvias, anegaciones y contaminación del agua.
- Reducen los niveles de gases con efecto invernadero
- Evitar los impactos provenientes por el calor o el frío excesivos
- Se convierte en un refugio para la vida humana, flora y fauna.
- Las plantas también son aislantes acústicos bajan el gasto en impermeabilización además de que añaden atractivo visual.
- Permite el cultivo de hortalizas y flores, convirtiéndose en un espacio productivo.
- Se convierte en un ecosistema para aves e insectos polinizadores
- Ofrece una actividad para relajarnos y salir de la tensión al cuidar las plantas y tener contacto con lo verde.
- Es una oportunidad de reconectarnos con la naturaleza y el trabajo con la tierra.
- Creación de ecosistemas de especial interés.
- Se reduce el consumo y costos de energía eléctrica por refrigeración (reducción del uso de aire acondicionado).
- Los techos verdes tienen una vida más larga que los tradicionales.
- Los beneficios económicos de una azotea verde se muestran en el incremento de entre un 15 y un 20% en el valor del inmueble. Garantiza una vida más larga a la estructura del edificio; reduce los costos de energía; capta agua pluvial que puede ser reutilizada para riego; garantiza la impermeabilización hasta por 30 años y aumenta la tasa de retención de los inquilinos gracias al aumento en confort.

Mantenimiento

La naturación deberá de ser regada cada 2 o 3 días, de acuerdo a la estación (invierno o verano) y a la especie de la planta.

1.3 Captación de agua pluvial

Características generales

El objetivo es captar el agua de lluvia para abastecer los hogares de colonias que presentan altos niveles de precariedad hídrica.

Un sistema de captación pluvial consiste básicamente en tres componentes: el sistema de recolección, el sistema de distribución y el sistema de almacenamiento (Figura 6). Un cuarto componente, un filtro o first-flush, puede agregarse para garantizar la calidad del agua.



Figura 6 Sistema de captación de agua pluvial

La cosecha de agua de lluvia ha sido considerada como una práctica urbana sustentable (Meera y Mansoor Ahammed, 2006; Farahbakhsh et al., 2009). La tecnología es sencilla, fácil de implementar y sin impedimentos mayores para su transferencia. Por lo tanto, el desarrollo de programas para la instalación masiva de sistemas de captación de agua pluvial puede tener un gran impacto ecológico, económico y social.(Ortiz Moreno, Jorge Adrián; Arroyo Zambrano, Tania; Fuentes Gutiérrez, 2015).

Para determinar la cantidad de agua que puede obtenerse utilizando un sistema de captación pluvial, es necesario conocer la precipitación promedio de la zona y la superficie de captura.

De acuerdo a datos del Sistema Meteorológico Nacional (S/A) la precipitación promedio nacional para el periodo 1941-2005 es de 773.5 mm anuales. De acuerdo a expertos regionales, las viviendas de interés social medio cuentan con azoteas de aproximadamente 50 a 70 m² de superficie. Promediando nuevamente, se considera una superficie de captura de 60 m² por cada vivienda. De acuerdo a los datos mencionados, cada vivienda podría capturar un aproximado de 46,404 litros al año. En septiembre del 2011 INFONAVIT llevaba 261,295 créditos marcados como Hipoteca Verde y pretendía cerrar el año con más de 337,000 créditos. Considerando que el número de créditos verdes fuera constante a futuro, que todas las viviendas de cada año implementaran sistemas de captación pluvial, y de acuerdo a los promedios de precipitación y de superficie de captura, existiría un potencial de captura de 15,638.148,000 hm³ de agua al año. Tomando en cuenta un consumo de 150 litros por persona y familias de cuatro integrantes, el potencial de captura podría cubrir el 21% de la demanda total anual de las nuevas áreas urbanas, si se cuenta con infraestructura para un almacenamiento adecuado (CONAGUA, 2016).

En cada sitio donde se desee implementar un sistema de captación se deberá verificar la precipitación media anual del sitio, de tal manera que, para garantizar un abastecimiento de agua durante todo el año, se deberá tener una precipitación igual o mayor a los 1,500 mm como valor medio anual.

Elementos componentes

Dentro de la captación se incluirán las canaletas o elementos de recolección del agua captada (Figuras 7 y 8) que conduzcan el agua hasta el inicio de la tubería de conducción, podrá ser una canaleta de PVC o lámina metálica de cualquier forma de sección transversal. Dichas canaletas deberán estar perfectamente aseguradas de tal manera que se garantice que no derramarán el agua captada.

- Área de Captación: Será el área destinada para que el agua de lluvia precipitada sobre ella sea conducida para su almacenamiento y aprovechamiento.
- Canaletas de captación: Elementos colocados aguas abajo del área de captación que recolectarán y dirigirán el agua captada hacia la tubería de conducción.
- Conducción: Conjunto de tuberías que reciben el agua de las canaletas y entrega el agua captada hasta el tanque o depósito de almacenamiento.
- Filtro de hojas o escombros: Dispositivo colocado en las canaletas o en la conducción, que prevenga la acumulación de hojas, ramas pequeñas o cualquier otro escombros arrastrado por el agua que escurre desde la captación.



Figura 7 Elementos componentes del sistema de captación de agua pluvial

1. Separador de primeras lluvias
2. Filtro de hojas
3. Reductor de turbulencias
4. Dosificador de cloro
5. Pichancha flotante
6. Filtro contra sedimentos
7. Filtro de carbón activado
8. Cisterna de casa



Figura 8 Fotografía de sistema básico

Beneficios

La captación de agua de lluvia tiene beneficios ambientales amplios como:

- Reducir el flujo de agua a los drenajes, lo que se traduce en menos inundaciones.
- Disminuir la cantidad de energía para bombear y transportar agua a las viviendas.
- Facilitar el acceso al servicio hídrico en viviendas entre 5 y 8 meses del año.
- Contribuir a la no sobreexplotación del acuífero y a su recuperación al reducir la demanda.

La captación de agua de lluvia es una alternativa para el abastecimiento del recurso hídrico en la vivienda. Mediante ella los usuarios de las ciudades pueden independizarse total o parcialmente de la red pública de agua potable (dependiendo de la zona), en muchas ocasiones insuficiente. La instalación de sistemas de cosecha de lluvia ofrece beneficios muy valiosos en áreas donde, aunque haya mucha precipitación, el agua es escasa debido a la inexistencia de mecanismos permanentes de abastecimiento; en este caso puede representar grandes ahorros económicos al evitar el gasto en la obtención de agua mediante pipas o, por otro lado, hacerla accesible a quienes no pueden pagar por ella. Debido a que es necesario utilizar grandes cantidades de energía para transportar el agua a las viviendas y, como ya se comentó anteriormente, la producción de energía en México es altamente dependiente de las fuentes de energías no renovables, la captación de agua pluvial puede constituirse como una alternativa para la mitigación de gases de efecto invernadero. Al obtenerse el recurso in situ se disminuye el gasto energético por transporte y potabilización del agua, así como el desperdicio de agua por fugas en casi un 40%; asimismo, como el agua ya no se está canalizando hacia el drenaje sino que se está almacenando, se puede inferir que representa un factor que podría amortiguar la magnitud de las inundaciones. (Ortiz Moreno, Jorge Adrián; Arroyo Zambrano, Tania; Fuentes Gutiérrez, 2015)

La implementación de sistemas de captación pluvial en las nuevas áreas urbanas del país representaría una estrategia de mitigación de gases de efecto invernadero; reduciría la vulnerabilidad de éstas a la escasez de agua; evitaría las pérdidas por fugas en las redes de distribución; disminuiría la presión sobre las fuentes convencionales como pozos subterráneos, presas y ríos; así como también podría

constituir un significativo ahorro económico para los organismos encargados de la potabilización y distribución del agua, de esta manera el presupuesto salvado podría invertirse en mejorar la calidad del agua y evitar desperdicios.

Mantenimiento

Una de las características de la captación de agua pluvial, es que necesita de mantenimiento para preservar en óptimas condiciones la infraestructura y procurar un óptimo funcionamiento.

- Barrer y lavar el techo, procurando que se encuentre lo más limpio posible.
- Evitar tener animales de compañía u objetos en desuso en el techo, para evitar ensuciar el agua.
- Después de cada lluvia, debe drenarse el separador de primeras lluvias, esto reduce en un 75% la suciedad en el agua de lluvia.
- Corar el agua de lluvia almacenada, para eliminar microorganismos presentes.
- Mantener limpios los filtros del sistema.

1.4 Parques inundables

Características generales

La infraestructura denominada parque inundable consiste en una adecuación de una extensión de terreno que permita tener múltiples funciones (figuras 9 y 10).



Figura 9 Fotografía Parque inundable la Marjar



Figura 10 Fotografía Parque inundable la Marjar

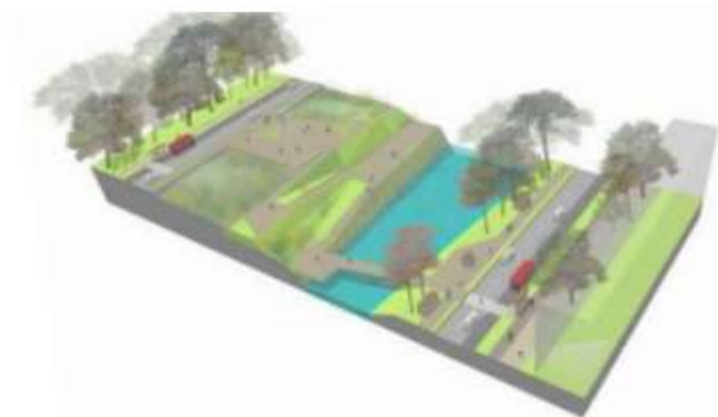
El punto fuerte del parque reside en su doble función: ofrecer un entorno verde para el disfrute de ciudadanos y aves mientras que se aporta una solución urbana inteligente para hacer frente a las precipitaciones.

Mantener un funcionamiento de espacio público en tiempo de secas, y adecuar para que, en tiempo de lluvias, sea un terreno inundable, que no tenga mayores daños por la corriente del agua, y que pasando la temporada de huracanes se utilice de manera normal.

Técnicamente la solución de Parque Inundable se basa en el escurrimiento superficial de las aguas, combinando canales abiertos zonas con lagunas permanentes y amplios parques (Figura 11). La idea detrás es que es que cuando el cauce de aguas vea sobrepasada su capacidad se comienzan a inundar controladamente los parques conduciendo aguas lluvias en distintos niveles.

“Entendiendo los problemas como posibilidades, el parque se caracteriza por no inhibir la posibilidad de inundación, el que puede usarse inclusive en esos casos.” En general, estos parques inundables se diseñan para que 24 horas después de finalizar la tormenta y/o crecida vuelvan a estar vacíos y utilizables.

Se busca generar que el observador no vea una inundación como un problema, sino como una solución.



Fuente: <http://www.plataformaarquitectura.cl/2013/01/27/mencion-segunda-etapa-parque-metropolitano-la-carlota-colectivo1061/> mención segunda etapa parque metropolitano la carlota- plataforma arquitectura

Figura 11 Esquema de Parque inundable

Elementos componentes

Un vaso de retención temporal de aguas fluviales de 45.000 m³ de capacidad funciona como gran depósito que garantiza el funcionamiento hidráulico del parque.

Una vez recogida el agua pluvial, ésta el agua se desvía mediante un colector para acabar vertiéndose sobre el gran estanque, que se desborda por sus orillas e inunda el vaso lentamente.

Pero el ciclo no acaba ahí, cuando la lluvia cesa, el agua retenida se devuelve a la red de saneamiento mediante unas compuertas, donde seguirá su camino.

- planta de tratamiento de lodos activados y
- humedales artificiales
- colectores internos
- infraestructura para captación de agua de lluvia

Beneficios

Un espacio público con diseño hidráulico y paisajismo incorporado, que busca conducir y regular las inundaciones del zanjón en períodos de lluvias y, al mismo tiempo, generar un espacio urbano recreacional y de esparcimiento para los habitantes.

- Controlar los desbordes, el principal cauce recolector de aguas de lluvia, evitando que se inunden calles y viviendas.
- Generar una renovación urbana y entregar un espacio recreacional y de esparcimiento.

Como ejemplo de beneficios, el parque hídrico La Quebradora es un proyecto pionero capaz de mitigar inundaciones, infiltrar agua al acuífero y captar agua pluvial para el abastecimiento de la población.

2. ZONA DE ESTUDIO

2.1 Descripción de la zona de estudio

Originalmente buena parte del territorio de la actual Ciudad de México, fue ocupado por el sistema de lagos de la cuenca de México. Esta se formó hace más de un millón de años con la aparición de la sierra de Chichinauhtzin, que represó a los ríos que corrían hacia el sur y produjo que las aguas se acumularan formando un gran lago;

Al oriente de la sierra de las cruces se encuentra el volcán Ajusco, que es la cumbre más elevada del Distrito Federal, y da su nombre a la serranía que cierra la cuenca de México por el sur. Está cadena montañosa pertenece al Eje Neovolcánico y también recibe el nombre de sierra de Ajusco-Chichinauhtzin. Entre otros, forman parte de ella los volcanes Xitle, Chichinauhtzin, Tláloc y Teuhtli.

2.2 Ubicación

Se localiza en el Valle de México (Figura 12), a una altitud media de 2240 m s. n. m. Tiene una superficie de 1495 km².



Figura 12 Ubicación de CDMX

Se delimitó la cuenca de estudio (Figura 13).

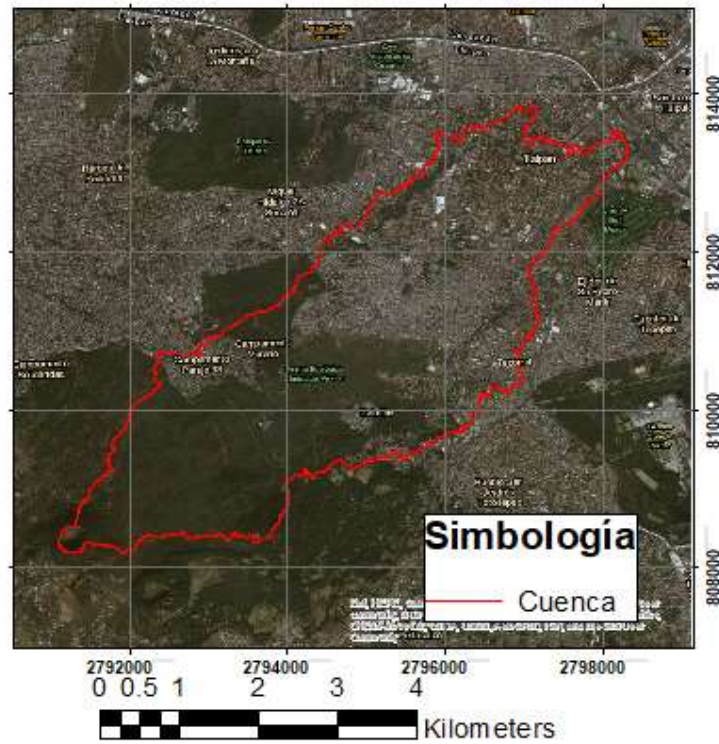


Figura 13 Delimitación de la cuenca de estudio

La cuenca se encuentra en la delegación Tlalpan (Figura 14).

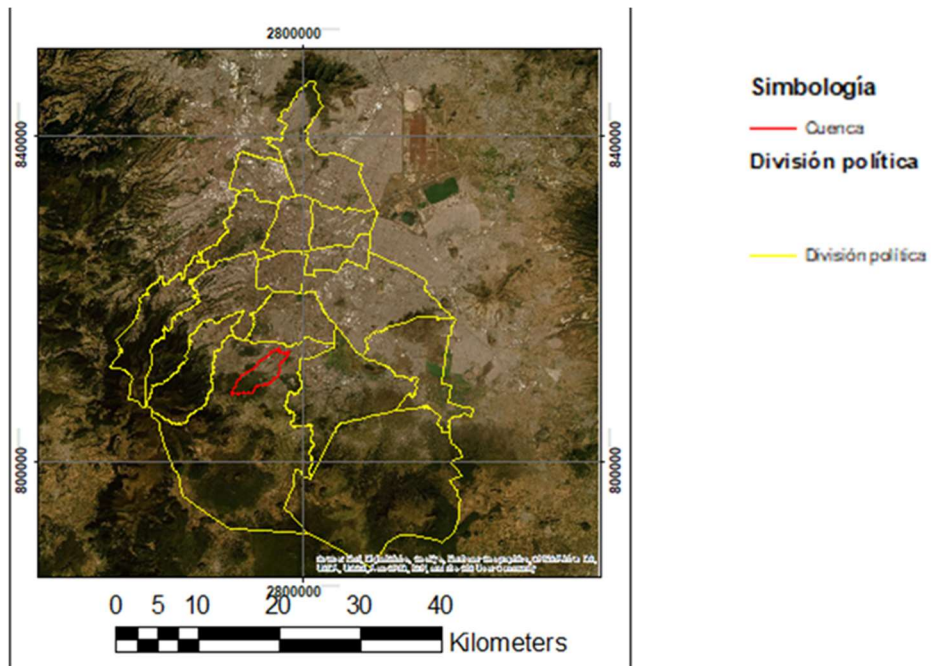


Figura 14 Ubicación de cuenca de estudio

2.3 Clima

Por su altura sobre el nivel del mar, la Ciudad de México (Figura 15) posee climas que van desde el templado hasta el frío húmedo y tundra alpina en las partes más altas de las sierras del sur.

Durante gran parte del año, en la ciudad predominan los días de nubosidad escasa o nula.



Figura 15 Ciudad de México (Foto)

La zona urbana presenta un clima templado lluvioso, 16,6 °C de media, la temperatura más alta, mayor a 25°C, se presenta en los meses de marzo a mayo y la más baja, alrededor de 5°C, en el mes de enero.,

La temporada húmeda en la ciudad abarca de mayo a noviembre, si bien la pluviosidad es mayor entre los meses de junio y agosto. El patrón de las lluvias indica que son más abundantes mientras mayor sea la altitud de un sitio. Por ello, las partes bajas cercanas al vaso del lago de Texcoco suelen ser más secas que las cumbres del Ajusco. De igual manera, la altitud condiciona la temperatura y los ecosistemas en la Ciudad de México.

Las lluvias se presentan en verano, la precipitación total anual es variable: en la región seca es de 600 mm y en la parte templada húmeda (Ajusco) es de 1 200 mm anuales.

En la ciudad pueden ocurrir fenómenos meteorológicos extremos, como granizadas, que habitualmente se presentan entre mayo y septiembre con una frecuencia anual promedio de nueve episodios.

2.4 Riesgos de inundación

Debido a la ubicación y condiciones climatológicas y topográficas, la Ciudad de México ha sufrido constantes inundaciones a lo largo de su historia (Figura 16).

Se tienen registros desde el reinado de Moctezuma Ilhuicamina quinto rey tlatoani de los aztecas, en cuyo reinado se vivió una gran inundación en la que Tenochtitlan quedó cubierta de agua.

En el verano de 1553 llovió por más de 20 horas, lo que ocasionó el desbordamiento del lago de Texcoco, que inundó la ciudad hasta niveles de 2 metros.



Figura 16 Inundación en la Ciudad de México

En 1629, durante la época de la colonia, se presentó una precipitación con duración de 36 horas, la fuerte lluvia produjo una inundación que ocasionó que la ciudad se quedara sumergida durante cinco años.

En 1856 la ciudad se volvió a inundar, en algunos lugares los niveles de agua alcanzaron los tres metros, para poder enfrentar el problema se lanzó una convocatoria para realizar un diseño del desagüe.

Se construyó el Gran Canal durante el Porfiriato, sin embargo, en 1951, el canal se desbordó y a ciudad volvió a quedar inundada (Figura 17) (Romero, 2017).



Figura 17 Inundación en la Ciudad de México ocurrida en el año 1952

3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

Debido a la naturaleza aleatoria de los fenómenos hidrológicos, es necesario modelarlos a través de un enfoque probabilístico. Para estimar la probabilidad de ocurrencia de cierto evento se utiliza la técnica estadística del análisis de frecuencias y las estaciones climatológicas se determinaron a partir de una primera regionalización a partir de la elaboración de los polígonos de Thiessen (Figura 18) (Escalante Sandoval and Reyes Chávez, 2002).

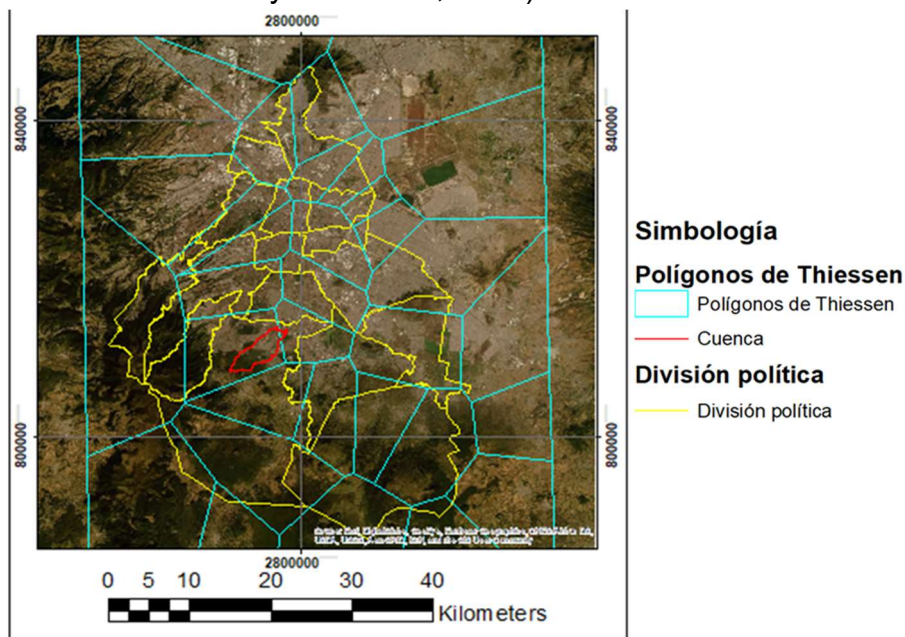


Figura 18 Delimitación de polígonos de Thiessen.

A partir de la delimitación de la cuenca, se definió la zona urbana de estudio para acotar el espacio de trabajo y reducir los tiempos de modelación (Figura 19).

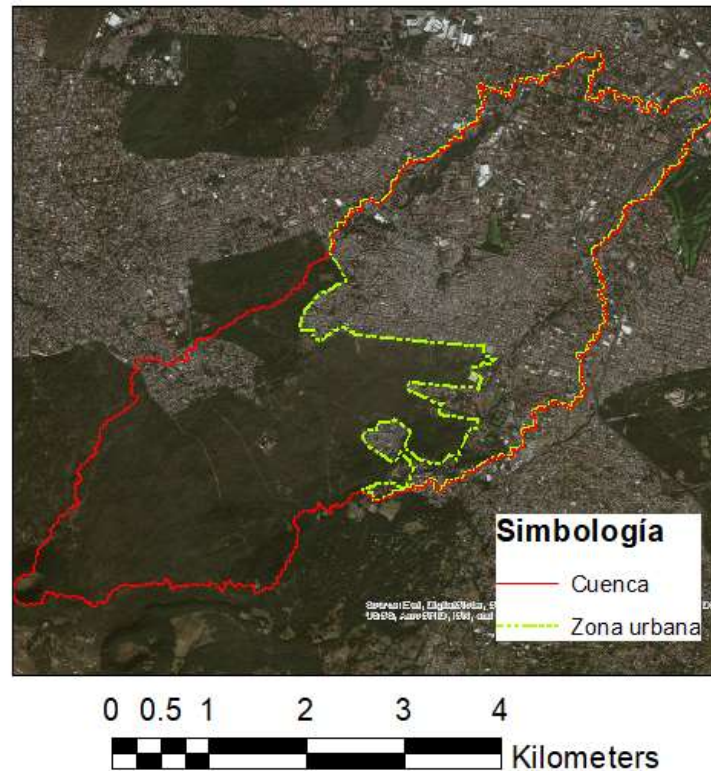


Figura 19 Delimitación de zona urbana de trabajo

El análisis hidrológico se hace con el objetivo de determinar el caudal de diseño. Como primer paso, es necesario obtener toda la información pluviográfica disponible para realizar un análisis adecuado, que permita calcular de forma acertada posibles eventos futuros.

3.1 Procesamiento de la información

3.1.1 Análisis de información pluviométrica

A partir de la zona de estudio, se hizo la selección de las estaciones pluviométricas dentro de un radio de 15 km.

Las estaciones ubicadas dentro de la región formada, se presentan en la tabla 5:

Tabla 5. Estaciones dentro de zona de estudio

Estación	Nombre	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
9004	Calvario 61	Tlalpan	19.203	-99.149	2,726

9014	Colonia Santa Úrsula Coapa	Coyoacán	19.303	-99.148	2,256
9020	Desviación Alta Al Pedregal	Tlalpan	19.297	-99.182	2,296
9022	El Guarda	Tlalpan	19.134	-99.173	2,990
9041	San Francisco Tlalnepantla	Xochimilco	19.197	-99.129	2,620
9051	Tláhuac	Tláhuac	19.263	-99.004	2,240
9071	Colonia Educación	Coyoacán	19.334	-99.132	2,250

3.1.2 Extracción de registros

De las estaciones identificadas para el análisis hidrológico, se extrajeron las series de datos máximos diarios en cada una de las estaciones, para determinar la calidad de la información pluviométrica con la que se cuenta.

Por lo que se seleccionó un periodo común de datos, de por lo menos 10 años, en cada una de las series de datos.

A cada serie (tabla 6) se le aplicó el conjunto de pruebas de homogeneidad e independencia.

Tabla 6. Registro máximo anual de estaciones de zona de estudio

Año/Estación	9004	9014	9020	9022	9041	9051	9071
1980	41.13	48.59	33.90	74.58	54.47	49.72	
1981	45.20	65.54	51.42	54.24	40.91	30.51	
1982	40.91		35.60	38.42	58.42	23.73	47.46
1983	44.07	66.67	42.94	39.55		67.80	48.59
1984	46.22	55.71	72.32	48.59	61.02	38.42	48.03
1985	61.81	63.28	55.94	48.59	51.98	24.86	
1986	68.93	47.01	58.08	57.63	53.11	37.29	34.24
1987	58.76	38.42	50.40	67.80		31.64	36.16
1988	70.96	73.45	70.63	65.54	90.40		74.58
1989	71.53	63.85	32.77	14.69	89.27		
1990	75.032			63.28			
1991	42.714		42.94	45.2			76.275
1992	44.07						45.2
1993	68.365	60.455		58.76			51.98
1994	27.911						35.03

1995	57.63	77.179					
1996	56.5	53.449	46.895	33.9		18.08	32.77
1997	36.725	43.505		49.72		42.94	45.2
1998	71.642	89.835		71.19	105.09	33.9	68.026
1999	0			47.46		34.465	
2000	50.85						
2001	68.93			54.24	105.09	40.68	47.46
2002	53.11	82.49		71.19	65.54	29.38	35.934
2003	70.625			88.14	48.59	44.07	
2004	58.76		61.02				40.341
2005	76.049	40.68	53.11	61.02	68.93	28.815	31.414
2006	75.145	65.54		61.02	68.93	48.59	49.72
2007	64.071	54.24		61.02		71.755	
2008	68.93	42.94		57.63	56.5	25.425	
2009			58.76				
2010	61.359		17.515				
2011	72.32		9.04		49.72		
2012	60.342			0		40.68	
2013	87.914	48.59			48.025	41.81	
2014	72.885	23.73			54.24	40.115	

A las series de datos de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se les aplicó un análisis de frecuencia.

3.2 Análisis de frecuencias

3.2.1 Análisis de independencia

Las series serán ajustadas a distribuciones de probabilidad por lo que requiere estar compuesta por variables aleatorias, es decir la serie debe ser independiente y para comprobarlo se usa la prueba de Anderson.

$$r_k = \frac{1 \pm 1.96\sqrt{N-k-1}}{N-k} \quad (1)$$

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2} \quad (2)$$

Para: $K = 1, 2, \dots, l/3$

Donde

l Es la longitud total del registro

Este test considera que una serie es independiente si a lo más el 10% de los valores de r_k sobrepasan los límites de r_k .

El resultado del análisis de independencia, se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados del análisis de independencia

Estación	9004	9014	9020	9022	9041	9051	9071
Independencia	No cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

El resultado indica que la serie 9004 no es independiente, por lo que no es apta para el análisis regional. Las demás estaciones son independientes, por lo que son consideradas para el análisis regional.

Análisis de homogeneidad

Las características estadísticas de las series hidrológicas se afectan cuando las series presentan tendencias en la media o la varianza o cuando ocurren saltos positivos o negativos, tales anomalías son producidas por la pérdida de homogeneidad.

La falta de homogeneidad es inducida por la deforestación, cambios de uso de suelo o vegetación, rectificación de cauces, construcción de embalses y reforestación.

Prueba Estadística de t De Student

Cuando la causa probable de la pérdida de la homogeneidad de la serie sea un cambio abrupto en la media, la prueba del estadístico t es muy útil. Si se considera una serie de tamaño n , la cual se divide en dos conjuntos de tamaño $n_1 = n_2 = n/2$, entonces el estadístico de prueba se define con la expresión:

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad (3)$$

Donde:

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

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

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

Si y solo sí, 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 homogénea.

Prueba Estadística De Cramer

Esta prueba se utiliza con el propósito de verificar la homogeneidad en el registro en estudio, y también para determinar si el valor medio no varía significativamente de un periodo de tiempo a otro. Con este propósito se consideran tres bloques, el primero, del tamaño total de la muestra n ; el segundo de tamaño n_{60} (60% de los últimos valores de la muestra n); y el tercero de tamaño n_{30} (30% de los últimos valores de la muestra n).

La prueba compara el valor de la media, \bar{x} , del registro total con cada una de las medidas de los bloques elegidos \bar{x}_{60} y \bar{x}_{30} . 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.

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 $\alpha = 0.05$.

Si y solo sí, 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 tanto la serie x_i se considera no homogénea.

$$t_w = \left[\frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w(1 + (\tau_w^j)^2)} \right]^{1/2} |\tau_w^j| \quad \text{para } w = 60 \text{ y } 30 \quad (4)$$

Prueba De Helmert

Esta prueba es no paramétrica y consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento Q_j^i de la serie j para $j = 1, 2, 3, \dots, n_j$ con respecto al valor medio \bar{Q}_j . Si una desviación de un cierto signo es seguida de otra del mismo signo, entonces se forma una secuencia "S", de lo contrario se considera como un cambio "C".

La serie se considera homogénea si:

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (NS - NC) \leq \sqrt{n_j - 1} \quad (5)$$

Dónde:

n_j = Tamaño de la muestra

N = número de secuencias

NC = número de cambios.

Prueba De Pettitt

Es una prueba no paramétrica basada en rangos, que se emplea para identificar un punto de cambio en una serie de tiempo. Una vez que se detecta el punto de cambio la serie se divide en 2 intervalos para determinar su tendencia. Las 2 muestras $(Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_t)$ y $(Q_{t+1}, Q_{t+2}, Q_{t+3}, \dots, Q_t)$ vienen de la misma población.

La prueba estadística $U_{t,N}$ está dada por la ecuación 6:

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N \text{sign}(Q_i - Q_j) \quad (6)$$

Si k designa el valor de k_n tomado de la serie analizada con la hipótesis nula, la probabilidad de excedencia del valor k estará dada:

$$\text{prob}(k_n > k) \approx 2 \exp\left(\frac{-6k^2}{N^3 + N^2}\right) \quad (7)$$

Para un riesgo α de primer orden.

Si $prob(k_n > k)$ es inferior, la hipótesis nula se rechaza.

El punto de cambio más significativo es donde $|U_{i,N}|$ es el máximo de k_n .

Los estadísticos de prueba de Pettitt se observan en la tabla 8.

Tabla 8. Estadísticos de Prueba de Pettitt

PROB (%)	20	30	40	50	70	100
1	71	133	208	293	488	841
5	57	107	167	235	393	677

Prueba Normal Estándar

Es una prueba paramétrica que asume como hipótesis nula que las series son independientes e idénticamente distribuidas (homogéneas). La hipótesis alterna considera que hay una fecha de cambio en la media de los datos.

Sea \bar{Q} la media de la serie y Q_j la serie por examinar.

La prueba es:

$$T(k) = kZ_1^{-2} + (n - k)Z_2^{-2} \quad (8)$$

para $k = 1, \dots, n$

Donde:

$$Z_1 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{Q_i - \bar{Q}}{s} \quad (1)$$

$$Z_2 = \frac{1}{n - k} \sum_{i=k+1}^n \frac{Q_i - \bar{Q}}{s} \quad (2)$$

El estadístico de prueba T_0 se define como:

$$T_0 = \max T(k) \quad 1 \leq k \leq n \quad (11)$$

Si T_0 es superior al valor crítico la hipótesis nula se rechaza (tabla 9).

Tabla 9 Estadísticos de Prueba Normal Estándar.

PROB (%)	20	30	40	50	70	100
1	9.56	10.45	11.01	11.38	11.89	12.32
5	6.95	7.65	8.1	8.45	8.8	9.15

Los estadísticos de prueba de Buishand se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Estadísticos de Prueba para Buishand

N	Q/(N) ^{0.5}		
	10%	5%	1%
10	1.05	1.14	1.24
20	1.1	1.22	1.42
30	1.12	1.24	1.46
40	1.13	1.26	1.5
50	1.14	1.27	1.52
100	1.17	1.29	1.55
∞	1.22	1.36	1.63

Finalmente, los resultados de las pruebas de homogeneidad e independencia, se muestran como resumen en la tabla 11.

Tabla 11. Resultados de la prueba de homogeneidad

Estación	9004	9014	9020	9022	9041	9051	9071
Independencia	No cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
t de student	No cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
Cramer	No cumple	Cumple	Cumple	Cumple	No cumple	Cumple	Cumple
Helmert	Cumple	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	No cumple	No cumple
Pettitt	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple
Normal Estándar	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple

Luego de aplicar las pruebas de homogeneidad e independencia, las estaciones que cumplen con estos dos criterios, se muestran en la tabla 12:

Tabla 12 Estaciones que cumplen homogeneidad e independencia

Estación	9014	9020	9022	9041	9051	9071

Los resultados de las pruebas indican que, para algunas pruebas, las series son homogéneas o no homogéneas, la homogeneidad da una primera perspectiva del tipo de distribución que mejor se acomoda a las series, y en este caso, será necesario analizar diferentes modelos para verificar si la serie proviene de un solo tipo de fenómenos, o de más.

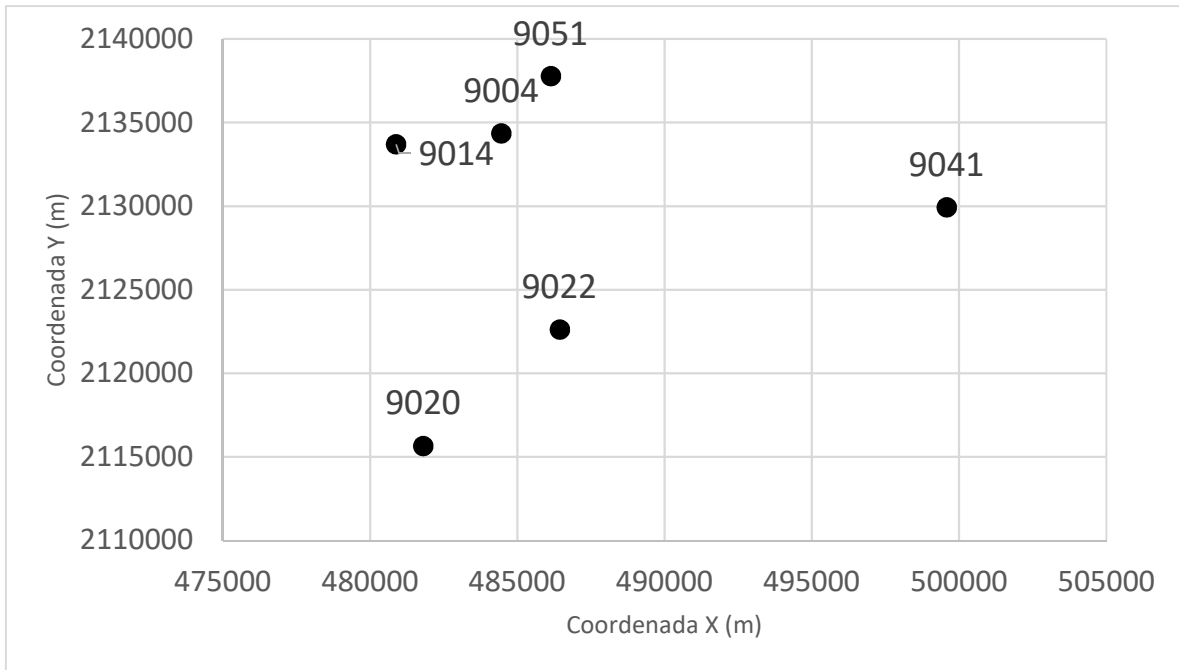
3.2.2 Relleno anual

El análisis regional requiere una base de datos con un periodo común de 10 años como mínimo para garantizar una buena regionalización, por lo que el periodo seleccionado para el análisis regional, es de 1980 a 1989, con una longitud de 10 años de registro (tabla 16).

Para rellenar los datos que faltaban para complementar la base de datos de las seis estaciones presentadas en la tabla 12; se usó información de precipitación máxima anual, para llevar a cabo el relleno de los datos faltantes en los registros anuales, mediante el método de interpolación de la distancia inversa en conjunto con el método de Thiessen, mismo que requiere únicamente de las coordenadas de las estaciones en UTM.

Tabla 13 Coordenadas UTM de las estaciones de análisis

Estación	9014	9020	9022	9041	9051	9071
X	484451.4	480878.7	481806.4	486438.8	499579.7	486135
Y	2134360.9	2133700.4	2115663.4	2122630.3	2129928.2	2137789.8



Gráfica 1 Ubicación espacial de las estaciones

Sean x_j y y_j las coordenadas de un punto j en un espacio bidimensional y P_j una función de esas coordenadas, que denota el proceso observado en n estaciones de medición. La variable j es el sub-índice que indica el sitio al cual se refiere el proceso medido $j=1,2,3, n$. P_e es una estimación del proceso en un punto de coordenadas x_e, y_e .

$$d_{ej} = \sqrt{(x_e - x_j)^2 + (y_e - y_j)^2} \quad (12)$$

A continuación, se muestran las distancias entre estaciones (Tabla 14)

Tabla 14 Matriz de distancia entre estaciones

d_{ej}	1	2	3	4	5	6
EST	9014	9020	9022	9041	9051	9071
9014	0.00	3633.24	18883.66	11897.76	15764.34	3819.93
9020	3633.24	0.00	18060.84	12387.97	19077.65	6659.72
9022	18883.66	18060.84	0.00	8366.41	22789.79	22545.83
9041	11897.76	12387.97	8366.41	0.00	15031.39	15162.54
9051	15764.34	19077.65	22789.79	15031.39	0.00	15574.49

9071	3819.93	6659.72	22545.83	15162.54	15574.49	0.00
-------------	---------	---------	----------	----------	----------	------

Posteriormente, se usó el método de interpolación de la distancia inversa con $\beta = 1$ para el relleno del periodo común de 1980 a 1989.

$$w_j = \frac{\left[\frac{1}{d_{ej}}\right]^\beta}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{d_{ei}}\right]^\beta} \quad (13)$$

$$P_e = w_1P_1 + w_2P_2 + \dots + w_nP_n \quad (14)$$

Como ejemplo, se presentan los coeficientes de relleno de la estación 9020 (Tabla 15), en función de las demás estaciones, para un valor de $B=1$.

Tabla 15 Cálculo de coeficientes de relleno

j	dej	1/dej	(1/dek) ^ B	wj
9014	3633.242	0.00028	0.00028	0.4483
9022	18060.842	0.00006	0.00006	0.0902
9041	12387.971	0.00008	0.00008	0.1315
9051	19077.654	0.00005	0.00005	0.0854
9071	6659.721	0.00015	0.00015	0.2446
	suma		0.00061	1.00000

Finalmente se muestra la base de datos rellena, necesaria para continuar con el análisis hidrológico (Tabla 16).

Tabla 16 Base de datos rellena

Año/Estación	9004	9014	9020	9022	9041	9051	9071
1980	41.13	48.59	33.90	74.58	54.47	49.72	46.90
1981	45.20	65.54	51.42	54.24	40.91	30.51	53.49
1982	40.91	41.81	35.60	38.42	58.42	23.73	47.46
1983	44.07	66.67	42.94	39.55	28.82	67.80	48.59
1984	46.22	55.71	72.32	48.59	61.02	38.42	48.03
1985	61.81	63.28	55.94	48.59	51.98	24.86	88.14
1986	68.93	47.01	58.08	57.63	53.11	37.29	34.24
1987	58.76	38.42	50.40	67.80	54.24	31.64	36.16
1988	70.96	73.45	70.63	65.54	90.40	53.11	74.58
1989	71.53	63.85	32.77	14.69	89.27	58.15	56.20

3.2.3 Análisis regional hidrológico

A continuación, se define el procedimiento determinado para el análisis regional hidrológico de las estaciones climatológicas seleccionadas y mostradas en la tabla 12.

Delimitación de regiones homogéneas

Para mejorar la estimación de eventos de diseño (en sitios con longitud de registro < 30 años) o para obtenerlas en sitios no aforados es necesario realizar un análisis regional hidrológico.

La delimitación regional se ha sustentado en construir áreas geográficamente continuas, límites políticos o administrativos. Sin embargo, si la variabilidad espacial de las características fisiográficas o hidrológicas es grande, la consideración de homogeneidad no se puede garantizar.

El objetivo principal de la regionalización es de establecer el número de sitios que pertenecen a la misma región meteorológicamente homogénea.

Los sitios no necesariamente son geográficamente vecinas, es decir, lo son en un espacio multidimensional.

-Técnica de distribución GVE

Se obtienen para los sitios disponibles y para la misma longitud de registro el valor del parámetro “ β ” y se agrupan conforme a este valor.

En donde “ β ” representa el parámetro de forma, mismo que puede tener valores negativos, positivos e incluso iguales a cero.

Para estimar una región homogénea, las muestras deben de comprender un periodo común de registro similar, para tener las mismas condiciones temporales.

$$F(x) = e^{-\left[1 - \left(\frac{x-u}{\alpha}\right)^\beta\right]^{\frac{1}{\beta}}} \quad (15)$$

Si $\beta = 0 \rightarrow$ Distribución Gumbel

Si $\beta < 0 \rightarrow$ Distribución Fréchet

Si $\beta > 0 \rightarrow$ Distribución Weibull

$\beta \rightarrow$ parámetro de forma que puede obtenerse por momentos L

$$\hat{\beta} = 7.859E + 2.9554E^2 \quad (16)$$

Donde

$$E = \left\{ \frac{2\hat{\beta}_1 - \beta_0}{3\hat{\beta}_2 - \hat{\beta}_0} \right\} - \left[\frac{\ln(2)}{\ln(3)} \right] \quad (17)$$

Donde β_0 , β_1 y β_2 son los momentos de probabilidad pesada

$$\hat{\beta}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (18)$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n x_i(n-i) \quad (19)$$

$$\hat{\beta}_2 = \frac{1}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n x_i(n-i)(n-i-1) \quad (20)$$

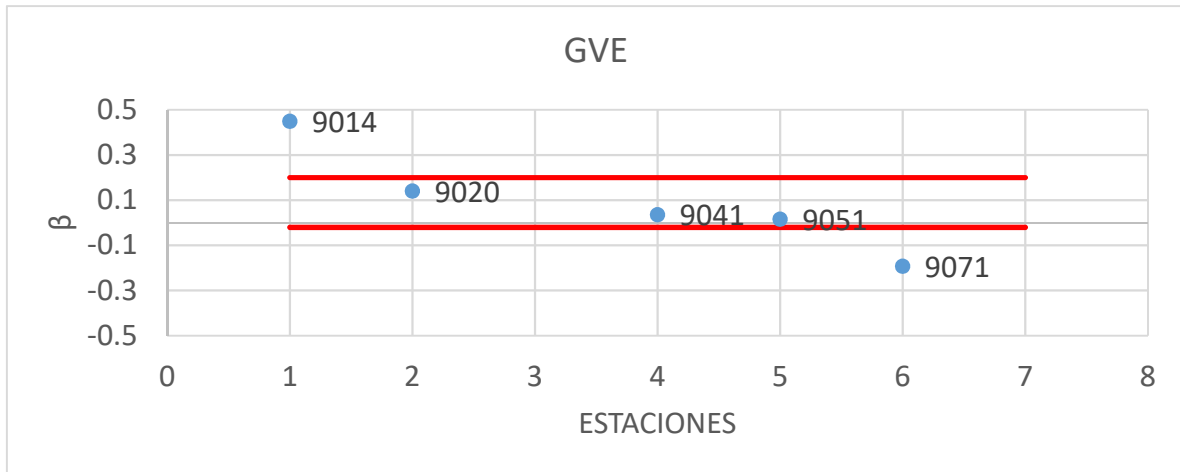
Y se obtiene considerando la muestra de cada serie ordenada de mayor a menor.

El periodo común comprende los años de 1980 a 1989, comprendiendo una muestra con una extensión de 10 años (tabla 16).

Los valores obtenidos de β para cada una de las estaciones, al aplicar la distribución GVE, se muestran en la tabla 17:

Tabla 17 Tipo de distribución de cada estación

No.	EST	β	TIPO
1	9014	0.4501	WEIBULL
2	9020	0.1418	WEIBULL
3	9022	0.5589	WEIBULL
4	9041	0.0369	WEIBULL
5	9051	0.0170	WEIBULL
6	9071	-0.1923	FRECHET



Gráfica 2 Gráfico de distribución GVE

Definiéndose así tres regiones homogéneas (Tabla 18).

Tabla 18 Regiones homogéneas GVE

REGIONES HOMOGÉNEAS		
RH1	9014	WEIBULL
RH2	9071	FRECHET
RH3	9020	WEIBULL
	9041	WEIBULL
	9051	WEIBULL

Técnica de delimitación con el coeficiente de variación de momentos L

Los momentos L son:

$$\lambda_1 = \beta_0$$

$$\lambda_2 = 2\beta_1 - \beta_0$$

$$\lambda_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0$$

Coefficiente de variación – L

$$CV_L = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

Pasos:

- 1) Se elige la variable a modelar
- 2) Se obtienen los CV-L de cada sitio
- 3) Se obtiene la media de los CV_L
- 4) Se obtiene la desviación estándar de los CV_L
- 5) Se obtienen los límites

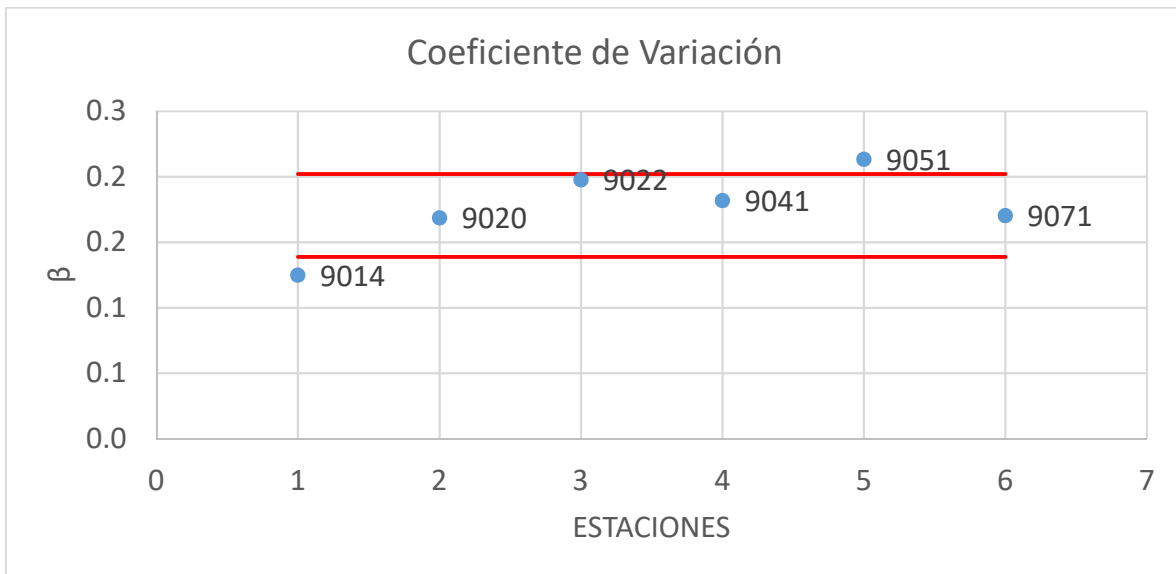
$$\begin{aligned} \text{Límite Superior} &= \bar{X}_{CV-L} + S_{CV-L} \\ \text{Límite Inferior} &= \bar{X}_{CV-L} - S_{CV-L} \end{aligned}$$

Los resultados se muestran en la tabla 19:

Tabla 19 Resultados prueba de coeficiente de variación

EST	No.	LIM. INF	CV	LIM. SUP.
9014	1	0.138841	0.1251	0.2021
9020	2	0.138841	0.1688	0.2021
9022	3	0.138841	0.1978	0.2021
9041	4	0.138841	0.1820	0.2021
9051	5	0.138841	0.2135	0.2021
9071	6	0.138841	0.1705	0.2021

Posteriormente se construye la gráfica del coeficiente de variación CV. Los grupos se forman por la concentración de puntos.



Gráfica 3 Gráfico de distribución CV

De acuerdo a la gráfica de coeficientes, se pueden establecer por lo menos tres regiones (tabla 20):

Tabla 20 Regiones homogéneas CV

CV

REGIONES HOMOGÉNEAS	
RH1	9051
RH2	9022
	9041
	9071
RH3	9014

Método de delimitación de la Distancia Euclidiana

En esta técnica se considera que cada sitio es el centro de su propia región. La identificación de una región de influencia se apoya en la medición de la distancia Euclidiana en un espacio de atributos multidimensionales.

El conjunto de atributos o características fisiográficas y climatológicas se relaciona con las características de los eventos extremos. También se define una función de peso que refleja la importancia relativa de cada sitio dentro de la región.

$$D_{bj} = \left[\sum_{i=1}^P (C_j^i - C_b^i)^2 \right]^{1/2}$$

$$C_j^i = \frac{x_j^i}{s(x^i)}$$

$$C_b^i = \frac{x_b^i}{S(x^i)}$$

Donde:

D_{bj} = Distancia Euclidiana entre el sitio b y el sitio j.

P= Número de atributos considerados

Como atributos se puede considerar

- a) Precipitación media anual
- b) Lluvia media de las máximas en 24 horas
- c) Lluvia media de cada mes
- d) Número de días con lluvia apreciable (hp>1mm)

C_j^i y C_b^i = Valores estandarizados de los atributos i, en las estaciones b y j.

x_j^i = Valor del atributo i en el sitio j.

x_b^i = Valor del atributo i de la estación base "e".

$S(x^i)$ = Desviación estándar del atributo i considerando todos los sitios.

El proceso estandarizado elimina unidades de cada atributo y reduce cualquier diferencia de escala dentro del rango de valores.

De todos los sitios comprometidos, se sacan los atributos característicos más importantes (tabla 21) y se determina su desviación estándar.

Tabla 21 Atributos característicos de las estaciones

Característica	Unidad	9014	9020	9022	9041	9051	9071
H media Enero	mm	0.678	0.408	0.447	0.528	0.182	0.681
H apreciable	mm	37	29	24	23	32	25
H media anual	mm	1.070	0.776	0.556	0.601	0.964	0.945
H media agosto	mm	2.516	1.171	0.591	0.947	1.355	1.123
H media sept	mm	2.379	2.811	1.456	1.503	3.903	1.220

Posteriormente se determinaron C_j^i y C_b^i y finalmente se determinó la distancia Euclidiana para cada una de las estaciones.

Las distancias se ordenan de mayor a menor para cada estación, se saca la media y se selecciona todas las estaciones que estén por debajo de la media.

De esta manera, se obtienen las siguientes regiones homogéneas (tabla 22).

Tabla 22 Regiones homogéneas

9014		9020		9071	
9004	R1	9014	R1	9004	R1
9022		9071		9014	
9041		9004	9051		
9020	R2	9022	R2	9020	R2
9051		9041		9022	
9071		9051			

9022		9041		9051	
9004	R1	9004	R1	9014	R1
9014		9014		9022	
9051		9051		9041	
9020	9020	9071			
9041	R2	9022	R2	9004	R2
9071		9071		9020	

Resultados de regionalización

Haciendo un resumen de las estaciones que se formaron para cada prueba, se tiene la siguiente tabla 23:

Tabla 23 Resumen de regiones formadas

	9014	9020	9022	9041	9051	9071
GVE		x		x	x	
CV			x	x		x
D. EUCLIDIANA						
9014		x	x	x		
9020			x	x	x	
9022		x		x		x
9041		x	x	x		x
9051		x			x	
9071		x	x			x
	0	6	5	6	4	4

En donde se muestra el número de coincidencias que hubo con la estación 9020, que es la más cercana a la zona de estudio, por lo que la región quedó conformada por las estaciones que tienen más repeticiones, estas se muestran en la tabla 24:

Tabla 24 Región de zona de estudio (9020)

Región homogénea	9020
	9022
	9041

3.2.4 Análisis de correlación y regresión

Una vez definida la región hidrológica, se procede al relleno de datos faltantes de las estaciones pertenecientes a la región.

Por lo que se evaluó entre los métodos de Thiessen, Interpolación Polinomial, Distancia Inversa B=1 y B=2 y el Método de Interpolación Multicuadrática; para determinar el modelo para relleno regional.

Resultado del modelo regional para relleno

Luego de aplicar los modelos de relleno de este apartado, se determinó que el método de relleno para la región, es el Método de Interpolación Inversa con B=1.

Por lo que se procedió al relleno diario de las series de precipitación, para cada una de las estaciones pertenecientes a la región.

3.2.5 Relleno diario

La transferencia de datos se realizó con las estaciones pertenecientes a la región homogénea, se calcularon los coeficientes w_j necesarios para cada combinación de datos requerida y el relleno se realizó por cada dato diario para el periodo de 1980 a 2014, garantizando un registro de datos de 36 años para cada una de las estaciones, siendo el periodo mínimo de 30 años.

Finalmente se maximizaron los datos de precipitación media diaria, multiplicando por un coeficiente de 1.13 y se extrajo el máximo anual de cada serie.

La serie rellena se muestra en la tabla 25.

Tabla 25 Series rellenas

Año	9020	9022	9041
1980	33.9	54.466	49.72
1981	51.42	40.91	30.51
1982	35.60	58.42	23.73
1983	42.94	35.18	67.80
1984	72.32	61.02	38.42
1985	55.94	51.98	24.86
1986	58.08	53.11	37.29
1987	50.40	54.24	31.64
1988	70.63	90.40	53.11
1989	32.77	89.27	66.95
1990	59.89	62.36	66.93
1991	42.94	30.96	31.80
1992	105.09	26.87	32.67
1993	71.76	44.07	52.34
1994	71.76	26.05	23.00
1995	80.23	20078.81	51.74
1996	46.90	45.20	42.09
1997	62.15	67.80	42.94
1998	50.85	105.09	33.90
1999	81.36	44.07	34.47
2000	106.79	107.35	40.80
2001	45.20	105.09	40.68
2002	48.59	65.54	29.38

2003	70.06	48.59	44.07
2004	61.02	45.20	44.36
2005	53.11	68.93	28.82
2006	51.98	68.93	48.59
2007	73.45	78.54	71.76
2008	49.72	56.50	25.43
2009	58.76	0.00	0.00
2010	17.52	61.02	22.60
2011	9.04	49.72	62.83
2012	33.85	56.50	40.68

3.2.6 Pruebas de homogeneidad e independencia de serie rellena

Una vez extraído la serie de precipitación máxima anual de la región homogénea, se procedió a verificar que el relleno de datos no haya influido de forma negativa en la naturaleza de los eventos, por lo que se aplicaron las pruebas de homogeneidad e independencia a cada una de las series, para verificar la calidad de la información.

El resultado de las pruebas se muestra en la tabla 26:

Tabla 26 Resultado de pruebas de homogeneidad e independencia de series rellenas

Estación	9020	9022	9041
Independencia	Cumple	Cumple	Cumple
t de student	Cumple	No Cumple	Cumple
Cramer	Cumple	Cumple	Cumple
Helmert	No Cumple	No Cumple	Cumple
Pettitt	Cumple	No Cumple	Cumple
Normal Estándar	Cumple	Cumple	Cumple

Por lo que se verifica que no se ha modificado la calidad de la serie original.

3.3 Teoría distribucional

Para la evaluación de los tipos de infraestructura, es necesario determinar una avenida de diseño, la cual puede estimarse a partir del análisis de la precipitación

al construir las llamadas curvas i-d-T, para ello, se debe analizar a la lluvia en términos de la probabilidad de que cierto evento sea igualado o excedido.

En los siguientes incisos se presentan las diferentes teorías de distribución probabilística usadas en este análisis, así como las formulas usadas para el cálculo de sus parámetros, ya sea por momentos, máxima verosimilitud o momentos - L. La teoría escogida es la que menor Error Estándar de Ajuste (EEA) presente y se comporte adecuadamente a la tendencia de datos.

3.3.1 Estimación de serie máxima anual en sitio de interés

De acuerdo al trazo de los polígonos de Thiessen (Figura 20), se determinó la serie máxima anual correspondiente a la ubicación de la zona de estudio, a la cual se le aplicaron las distribuciones para el cálculo de eventos de diseño.

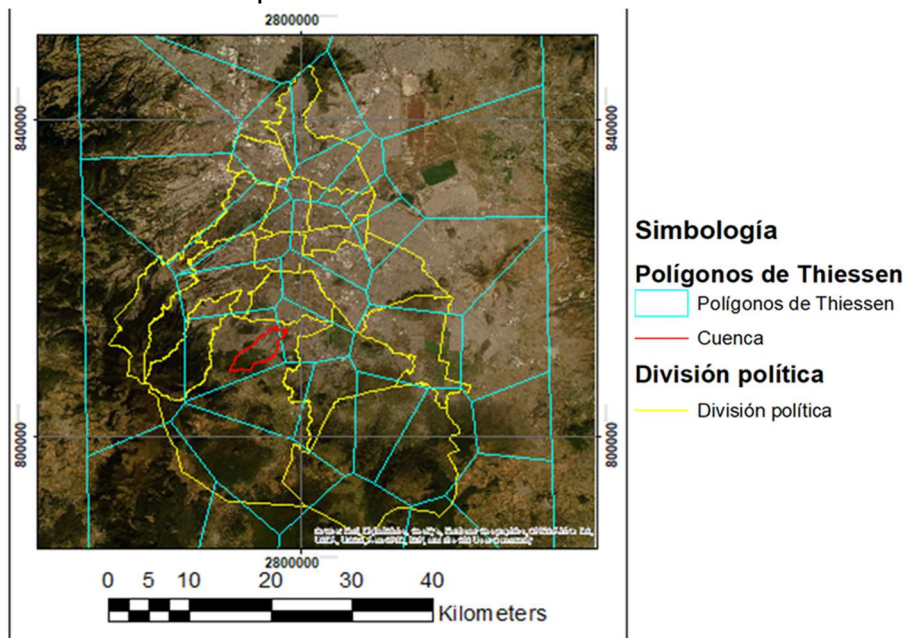


Figura 20 Delimitación de zona urbana de trabajo

La estación que tiene influencia sobre la cuenca definida para la zona de estudio, es la 9020. La serie definida para la zona de análisis, es la siguiente:

Tabla 27 Serie de precipitación máxima anual de la zona de estudio

Año	9020	Año	9020
1980	33.9	1997	62.15

1981	51.42
1982	35.60
1983	42.94
1984	72.32
1985	55.94
1986	58.08
1987	50.40
1988	70.63
1989	32.77
1990	59.89
1991	42.94
1992	105.09
1993	71.76
1994	71.76
1995	80.23
1996	46.90

1998	50.85
1999	81.36
2000	106.79
2001	45.20
2002	48.59
2003	70.06
2004	61.02
2005	53.11
2006	51.98
2007	73.45
2008	49.72
2009	58.76
2010	17.52
2011	9.04
2012	33.85

3.3.2 Distribución normal

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad -\infty < x < \infty \quad (31)$$

Donde:

μ parámetro de ubicación Parámetro de ubicación
 σ Parámetro de escala

- Eventos de diseño

$$\hat{X}_T = \mu + \sigma \hat{U}_T$$

3.3.3 Distribución Log Normal 2p

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(x)-\mu_y}{\sigma_y}\right]^2}, \text{ para } x > 0 \quad (3.324)$$

Donde:

m_y Parámetro de ubicación

σ_y Parámetro de escala

$\gamma > 0$

- Eventos de diseño

$$\hat{X}_T = e^{\{\mu_y + \sigma_y U_T\}}$$

3.3.4 Distribución LogNormal 3p

$$f(x) = \frac{1}{(x - x_0)\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(x-x_0)-\mu_y}{\sigma_y}\right]^2}, x > x_0 \quad (3.33)$$

Donde:

x_0 Parámetro de ubicación

μ_y Parámetro de escala

σ_y Parámetro de forma

- Parámetros de Momentos y Máxima Verosimilitud

- Eventos de diseño

\hat{x}_0 Se obtiene al resolver:

$$\hat{X}_T = \hat{X}_0 + e^{\{\mu_y + \sigma_y U_T\}}$$

3.3.5 Distribución Gamma de 2p

$$f(x) = \frac{x^{\beta-1} e^{-\frac{x}{\alpha}}}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)}, \quad x > 0 \quad (3.34)$$

Donde:

a Parámetro de escala

b Parámetro de forma

$G(b)$ Función Gamma completa

- Eventos de diseño

$$\hat{X}_T = \alpha\beta \left\{ 1 - \frac{1}{9\beta} + U_T \sqrt{\frac{1}{9\beta}} \right\}^3$$

3.3.6 Distribución Gamma de 3p

$$f(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left(\frac{x - x_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)}, \quad \alpha > 0 \quad (3.355)$$

$$x_0 \leq x < \infty$$

Donde:

x_0 Parámetro de ubicación

α parámetro de escala Parámetro de escala

β Parámetro de forma

- Eventos de diseño

$$\hat{X}_T = \hat{x}_0 + \hat{\alpha}\hat{\beta} \left\{ 1 - \frac{1}{9\hat{\beta}} + U_T \sqrt{\frac{1}{9\hat{\beta}}} \right\}^3$$

3.3.7 Distribución Gumbel (Tipo 1)

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

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left[\frac{x-v}{\alpha}\right]} e^{-e^{-\left[\frac{x-v}{\alpha}\right]}} \quad (3.366)$$

$$-\infty < x < \infty, \alpha > 0$$

Donde:

v : Parámetro de ubicación

α : Parámetro de escala

- Eventos de diseño

$$X_T = \hat{v} - \hat{\alpha} \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]$$

3.3.8 Distribución general de valores extremos

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left[1 - \left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)^\beta\right]^{\frac{1}{\beta}}} \left[1 - \left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)^\beta\right]^{\frac{1}{\beta}-1} \quad (3.37)$$

Donde:

μ Parámetros de ubicación

α Parámetro de escala

β Parámetro de forma

Si

$\beta = 0$ $-\infty < x < \infty$ *distribucion Tipo I (Gumbel)*

$\beta < 0$ $\mu + \frac{\alpha}{\beta} \leq x \leq \infty$ *distribucion tipo II (Frechet)*

$\beta < 0$ $-\infty \leq x \leq \mu + \frac{\alpha}{\beta}$ *distribucion tipo III (Weibull)*

- Eventos de diseño

$$\widehat{X}_T = \hat{\mu} + \frac{\hat{\alpha}}{\beta} \{1 - [-\ln(F(x))]^\beta\}$$

3.3.9 Distribución Log Pearson Tipo III

$$f(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta) x} \left[\frac{\ln x - y_0}{\alpha} \right]^{\beta-1} e^{-\left[\frac{\ln x - y_0}{\alpha} \right]}; x > 0 \quad (3.38)$$

Donde:

Y_0 Parámetro de ubicación

α Parámetro de escala

b Parámetro de forma

- Eventos de diseño

\hat{y}_0 Se obtiene al resolver

$$F(\hat{y}_0) = \sum_{i=1}^n (\ln x_i - \hat{y}_0) - n \ln(\hat{\alpha}) - n\Psi(\beta) = 0$$

$$\hat{X}_T = e^{\left\{ \hat{y}_0 + \hat{\alpha}\beta \left[1 - \frac{1}{9\beta} + \hat{U}_T \sqrt{\frac{1}{9\beta}} \right]^3 \right\}}$$

3.3.10 Pruebas de bondad de ajuste

Error Estándar De Ajuste

En teoría, una prueba de bondad de ajustes debe ser útil para discriminar entre diferentes modelos probabilísticos ajustados a una sola muestra. Desde los años setenta se ha popularizado un índice o estadístico cuantitativo que permite seleccionar objetivamente la distribución de probabilidades que mejor se ajusta a los datos, se conoce como Error Estándar de Ajuste (EEA) y su fórmula general es:

$$EEA = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{n - np}} \quad (3.397)$$

En donde, n es el número de datos de la muestra o serie anual de máximos, Q_i son los datos ordenados de menor a mayor, \hat{Q}_i son los gastos máximos estimados con el modelo probabilístico que se prueba, para una probabilidad de no excedencia definida y np es el número de parámetros de ajuste.

3.3.11 Eventos de diseño

Luego de aplicar las distribuciones para la serie de eventos calculada para la zona de estudio, el resultado se presenta en la tabla 28 de resumen:

Tabla 28 Resultado de ajuste de distribuciones de probabilidad

Distribución	EEA		
	Momentos	Máx. Ver.	Momentos - L
NORMAL	4.56		4.65
LOGNORMAL-2	7.27		
LOGNORMAL-3	7.39	4.56	
GAMMA-2	4.71	4.64	4.70

GAMMA-3	4.50	4.58	
LOG PEARSON III		3.65	
GUMBEL	5.10	5.29	4.94
DISTRIBUCIÓN GENERAL DE VALORES EXTREMOS	41.65		4.65

De acuerdo a los resultados del error estándar de ajuste, hay dos distribuciones que cumplen con el menor error, las cuales son Normal momentos L y Distribución General de Valores Extremos por momentos L, cuyo error es el mínimo con respecto a las demás distribuciones y métodos de estimación de parámetros, con un valor de 4.65.

Los eventos de diseño calculados ($\dot{X}T$) para diferentes periodos de retorno (tabla 29), así como sus límites de confianza para el 95%, son los siguientes:

Tabla 29 Resultado de eventos de diseño

T	Normal (M. - L)	GVE (M. - L)
2	56.24	55.14
5	73.66	73.67
10	82.78	83.83
20	90.30	92.24
50	98.77	101.47
100	104.42	107.35
500	115.84	118.18
1000	120.23	121.86
5000	129.54	128.68
10000	133.24	131.00

Sin embargo, debido a que la serie es homogénea, la distribución seleccionada será GVE.

4 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (T_c)

Para el empleo de la fórmula racional la duración de la tormenta se define igual al tiempo de concentración de la cuenca (tabla 30). Existen algunas fórmulas para su obtención:

Kirpich

$$t_c = 0.0195 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (4.18)$$

t_c = tiempo de concentración en min

L= Longitud del cauce (m)

S= Pendiente del cauce que se calcula con Taylor- Schartz (%)

Tabla 30 Tiempo de concentración calculado

Tiempo de concentración		
L	10.543	km
S	0.0623	m/m
Kirpich	71.09	min

5 CURVAS INTENSIDAD – DURACIÓN – FRECUENCIA

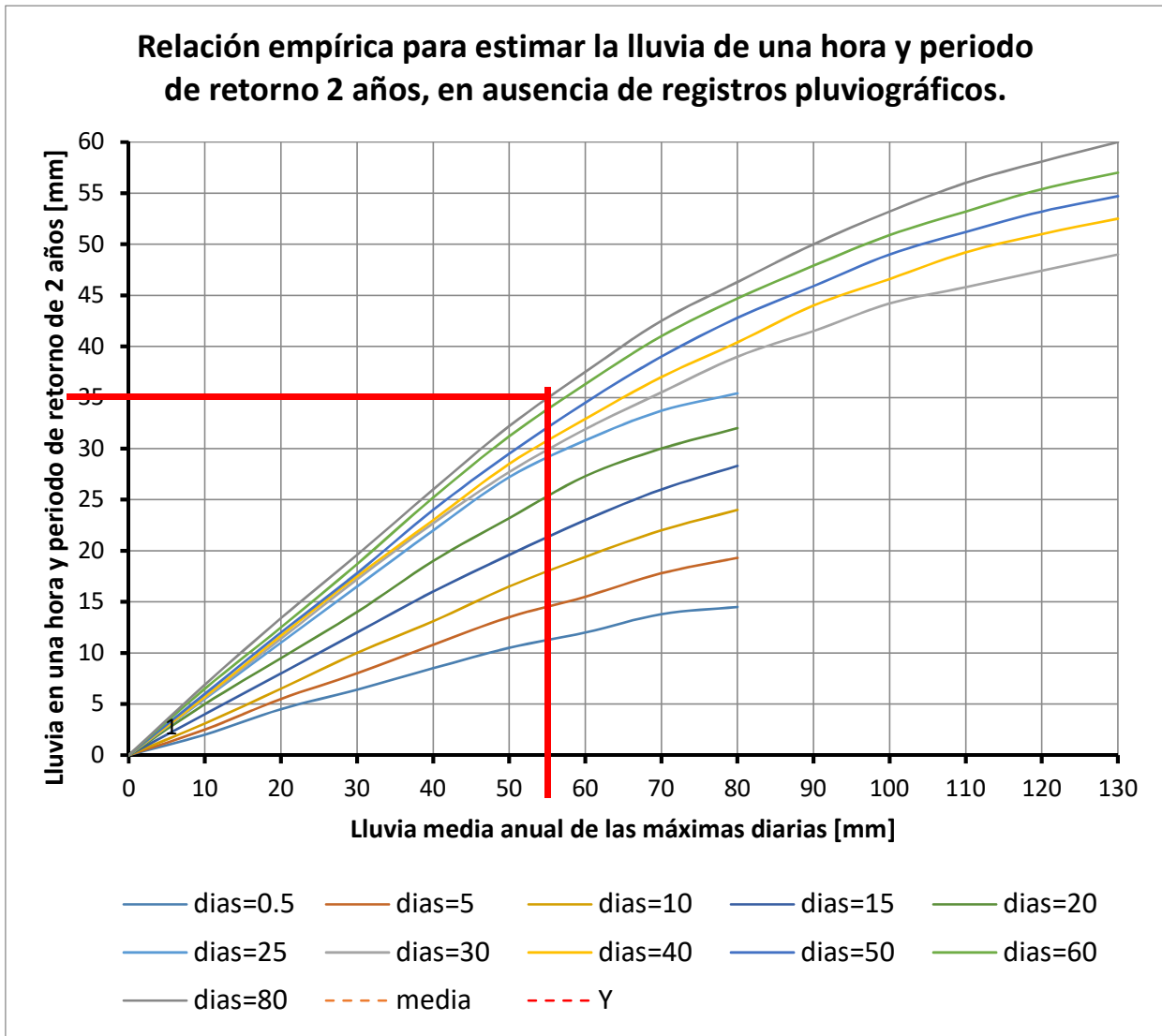
Este método requiere que las lluvias registradas sean maximizadas al multiplicarlas por la constante de 1.13 transformándolas en lluvias máximas diarias de 24 horas. Posteriormente, este registro se ordena de mayor a menor y se le asigna un periodo de retorno mediante la ley empírica de Weibull, a esta ley se le calcula probabilidad de no excedencia.

Con el objetivo de obtener las lluvias de determinado periodo de retorno se aplica el análisis de frecuencias de eventos extremos máximos y se selecciona aquella que tenga el mejor valor que depende del criterio de Bondad de Ajuste, por ejemplo, el mínimo “Error Estándar”.

De la serie de datos (de la cual se extrajo el registro de máximas diarias), se obtiene para cada año el número de tormentas mayores a 1 mm (lluvias significativas) y a partir de ese registro se calcula la media de las lluvias significativas por año (NMATS).

El número promedio de lluvia apreciable para el registro la zona de estudio, es de 105 lluvias anuales, y el promedio de precipitación máxima es de 56.24 mm. Con estos valores se entra a la gráfica y se cruza con la curva del número de días de precipitación apreciable anual.

Así se determina el valor de la lluvia de 1 hora y periodo de retorno de 2 años “ $H_{p1h}^{T=2}$ ”.



Gráfica 4 Relación empírica para lluvia en ausencia de registros pluviográficos

Con la distribución de probabilidad de mayor ajuste se determina la lluvia “ $H_{p_{24h}^{T=2}}$ años” con estos dos valores se obtiene la relación R.

$$R = \frac{H_{p_{1hora}^{T=2 \text{ años}}}}{H_{p_{24horas}^{T=2 \text{ años}}}} \quad (4.29)$$

Como esta relación no cambia con el periodo de retorno, entonces es posible obtener los valores de lluvia de una hora para diferentes periodos de retorno $T=2, 5, 10, 20, 50, 100, 500$ y 1000 años, multiplicando el valor de la precipitación calculada con el análisis de frecuencias, por la relación R como sigue:

$$H_{p_{1hora}^{T=2 \text{ años}}} = R H_{p_{24horas}^{T=2 \text{ años}}} \quad (4.310)$$

Donde los valores $Hp_{24horas}^T$ para T = 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500 y 1000 años se obtienen con la distribución de mejor ajuste.

Para duraciones menores a una hora se deberán emplear las siguientes relaciones (tabla 31):

Tabla 31 Factores de Conversión para Duraciones Menores a 1 h.

Duración [min]	10	20	30	40	50	60
C	0.32	0.54	0.71	0.82	0.91	1

Donde la constante C depende de la duración en minutos

Después de obtener las curvas Hp- d -T, se pueden transformar fácilmente con la expresión:

$$i_d^T = \frac{Hp_d^T}{d}$$

Resultados de las curvas i-d-T

El valor del coeficiente de relación R de lluvia de 2 a 24 horas para Tr 2 años, es igual a 0.6347.

Tabla 32 Valores de precipitación para cálculo de coeficiente R

$Hp^{T=2}_{24h}$	55.14	mm
$Hp^{T=2}_{1h}$	35	mm
R	0.6347	

Los resultados de los valores de las curvas i-d-T, se muestran en la tabla 33.

Tabla 33 Valor numérico de curvas i-d-T

i-d-T		T									
[hr]	[min]	2	5	10	20	50	100	500	1000	5000	10000
0.2	10	67.2	89.8	102.2	112.4	123.7	130.8	144.0	148.5	156.8	159.7
0.3	20	56.7	75.8	86.2	94.8	104.3	110.4	121.5	125.3	132.3	134.7
0.5	30	49.7	66.4	75.6	83.1	91.5	96.8	106.5	109.8	116.0	118.1
0.7	40	43.1	57.5	65.4	72.0	79.2	83.8	92.3	95.1	100.5	102.3
0.8	50	38.2	51.1	58.1	63.9	70.3	74.4	81.9	84.5	89.2	90.8
1	60	35.0	46.8	53.2	58.5	64.4	68.1	75.0	77.4	81.7	83.2
2	120	17.9	24.0	27.3	30.0	33.0	34.9	38.4	39.6	41.9	42.6
3	180	12.3	16.4	18.6	20.5	22.5	23.9	26.3	27.1	28.6	29.1
4	240	9.4	12.6	14.3	15.7	17.3	18.3	20.2	20.8	22.0	22.3
5	300	7.7	10.3	11.7	12.9	14.2	15.0	16.5	17.0	18.0	18.3
6	360	6.6	8.8	10.0	11.0	12.1	12.8	14.1	14.5	15.3	15.6
7	420	5.8	7.7	8.7	9.6	10.6	11.2	12.3	12.7	13.4	13.7
8	480	5.1	6.9	7.8	8.6	9.5	10.0	11.0	11.4	12.0	12.2
9	540	4.7	6.2	7.1	7.8	8.6	9.1	10.0	10.3	10.9	11.1
10	600	4.3	5.7	6.5	7.2	7.9	8.3	9.2	9.5	10.0	10.2
11	660	4.0	5.3	6.0	6.7	7.3	7.7	8.5	8.8	9.3	9.5
12	720	3.7	5.0	5.7	6.2	6.8	7.2	8.0	8.2	8.7	8.8
13	780	3.5	4.7	5.3	5.9	6.4	6.8	7.5	7.7	8.2	8.3
14	840	3.3	4.4	5.0	5.5	6.1	6.5	7.1	7.3	7.7	7.9
15	900	3.2	4.2	4.8	5.3	5.8	6.1	6.8	7.0	7.4	7.5
16	960	3.0	4.0	4.6	5.0	5.5	5.9	6.4	6.6	7.0	7.1
17	1020	2.9	3.9	4.4	4.8	5.3	5.6	6.2	6.4	6.7	6.8

18		1080	2.8	3.7	4.2	4.6	5.1	5.4	5.9	6.1	6.5	6.6
19		1140	2.7	3.6	4.1	4.5	4.9	5.2	5.7	5.9	6.2	6.3
20		1200	2.6	3.4	3.9	4.3	4.8	5.0	5.5	5.7	6.0	6.1
21		1260	2.5	3.3	3.8	4.2	4.6	4.9	5.4	5.5	5.8	5.9
22		1320	2.4	3.2	3.7	4.1	4.5	4.7	5.2	5.4	5.7	5.8
23		1380	2.4	3.2	3.6	3.9	4.3	4.6	5.1	5.2	5.5	5.6
24		1440	2.3	3.1	3.5	3.8	4.2	4.5	4.9	5.1	5.4	5.5

Finalmente, las intensidades calculadas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 100, 500, 1000, 5000 y 10000 y una duración de 71.09 minutos (1.18 horas), se muestran en la tabla 34.

Tabla 34 Valores de intensidades de diseño

tr	i (mm/h)
2	31.85
5	42.55
10	48.41
20	53.27
50	58.61
100	62.00
500	68.26
1000	70.38
5000	74.32
10000	75.66

El análisis de frecuencias de los gastos máximos anuales se emplea para proveer la magnitud de un evento Q_T , de cierto periodo de retorno “Tr”, sirve como ayuda en la planeación y manejo de las cuencas hidrológicas. Sin embargo, el proyectista no sólo debe estimar la magnitud del evento de diseño, sino que también debe de proporcionar la probabilidad de excedencia, con el fin de fijar la seguridad del funcionamiento de la obra o bien el riesgo de falla (Escalante Sandoval y Reyes Chávez 2002).

5.1 Hietogramas de diseño

Una vez determinado el evento máximo asociado a una lluvia, es necesario conocer la evolución de esa intensidad pico a lo largo de una duración, en este caso, el tiempo de concentración.

El hietograma de diseño refleja la distribución de las precipitaciones que se producen a lo largo de la duración del evento, asociadas a un periodo de retorno o probabilidad de ocurrencia.

Existen procedimientos que se basan en las curvas intensidad-duración-periodo de retorno, como el método de bloques alternos (tabla 35) (Chow, et al 1994).

Paso 1. Se determina el evento de intensidad para diferentes periodos de retorno, asociado a la duración del evento.

Paso 2. Se propone un Δt menor a la duración total del evento. La duración total se divide en el Δt propuesto, definiéndose n intervalos.

Paso 3. Se calcula el valor de la precipitación (P), multiplicando el valor de la intensidad, por el valor del intervalo de tiempo (Δt) propuesto.

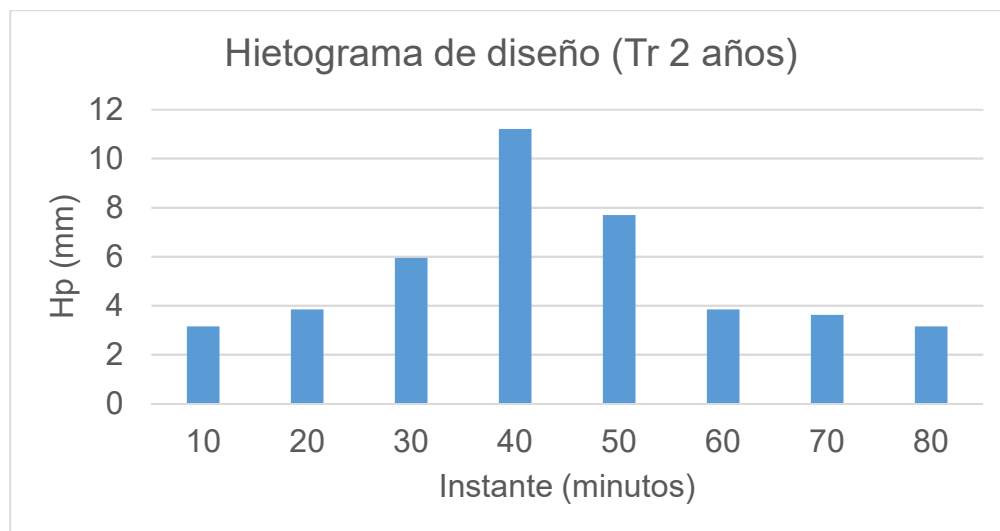
Paso 4. Se calcula la precipitación efectiva, $\Delta P = P_{i+1} - P_i$, definiéndose así n bloques de precipitación efectiva.

Tabla 35 Ejemplo de método para elaboración de hietograma Tr 2 años

Instante	Intensidad	Precipitación	Precipitación efectiva
(min)	(mm/h)	(mm)	(mm)
10	67.200	11.2	11.2
20	56.700	18.9	7.7
30	49.700	24.85	5.95
40	43.050	28.7	3.85
50	38.220	31.85	3.15
60	35.000	35	3.15
70	33.29	38.84	3.84
80	31.85	42.46	3.62

Paso 5. Se ordena de mayor a menor.

Paso 6. Se reordena alternando los valores, dejando el bloque de máximo valor en medio de la serie (gráfica 5).



Gráfica 5 Hietograma de diseño

Repetiendo el mismo procedimiento para los eventos correspondientes a los otros periodos de retorno, se obtienen los datos de cada uno de los bloques de los Hietogramas (tabla 36).

Tabla 36 Hietogramas de diseño

Instante	Tr 2	Tr 5	Tr 10	Tr 20	Tr 50	Tr 100	Tr 500	Tr 1000
(min)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
10	3.15	4.21	4.79	5.27	5.80	6.13	6.75	6.96
20	3.84	5.13	5.84	6.43	7.07	7.48	8.24	8.49
30	5.95	7.95	9.05	9.95	10.95	11.58	12.75	13.15
40	11.20	14.96	17.03	18.73	20.61	21.81	24.00	24.75
50	7.70	10.29	11.71	12.88	14.17	14.99	16.50	17.02
60	3.85	5.14	5.85	6.44	7.09	7.50	8.25	8.51
70	3.62	4.84	5.50	6.06	6.66	7.05	7.76	8.00
80	3.15	4.21	4.79	5.27	5.80	6.13	6.75	6.96

6 MODELO HIDRODINÁMICO

Como parte de las herramientas que permitirán evaluar los criterios necesarios para la toma de decisiones, es importante considerar modelos que permitirán servir de apoyo para evaluar el comportamiento del flujo en la cuenca de estudio, cuando se excede la capacidad de este, entre otras variables importantes.

Si bien, el modelo no representa el funcionamiento hidráulico con toda exactitud, sí da una idea aproximada de él.

La importancia de concebir modelos y estrategias de modelación específicas para el ámbito de la hidrología urbana, reside en que las cuencas son cada vez más afectadas por los componentes urbanos, modificando escurrimiento en magnitud y dirección principalmente, generando a su vez que el tiempo en que se producen los escurrimientos máximos sean menores a los naturales.

La importancia de la modelación: Crear una representación/simulación de la inundación de un sitio y aplicar diferentes escenarios para evaluar la escala de la inundación y determinar los posibles impactos con cada uno de ellos.

6.1 Descripción del modelo

Itzī es un modelo hidrológico e hidráulico dinámico, completamente distribuido que simula:

- Procesos hidrológicos como lluvia e infiltración.
- La superficie 2D fluye en una cuadrícula de trama regular utilizando ecuaciones simplificadas de aguas someras.

Todos los datos de entrada se pueden representar como ráster temporales, lo que permite el uso de lluvia de radar o coeficientes de fricción variables. Esos pueden usar referencias de tiempo relativas o absolutas. Una referencia de tiempo absoluto es útil para modelar eventos históricos.

Está orientado principalmente para simulaciones continuas, por lo que tiene en cuenta los procesos de precipitación, infiltración, evapotranspiración, escurrimiento superficial y en canales.

Itzī viene con un módulo de hidrología que gestiona la infiltración directa, la lluvia y las pérdidas de suma global. La infiltración puede ser representada por una cantidad definida por el usuario o estimada usando la fórmula Green-Ampt.

Los procesos hidráulicos de superficie están representados por dos modelos:

- Un modelo de inercia parcial amortiguada, basado en una simplificación de las ecuaciones de Saint-Venant
- Un modelo de enrutamiento de lluvia que gestiona los flujos por debajo de un umbral determinado

6.2 Solución numérica

El comportamiento de un fluido viscoso está gobernado por las Ecuaciones de Navier Stokes. Estas ecuaciones fueron deducidas en 1821 por Claude Navier y años más tarde, de modo independiente, por George Stokes en 1845. Las ecuaciones de Navier Stokes forman un sistema hiperbólico de leyes de conservación no lineales y, debido a su complejidad, no poseen solución analítica.

En muchos flujos existentes en la naturaleza, las dimensiones horizontales son claramente predominantes; si además la variación en la vertical de las componentes horizontales de la velocidad es pequeña y apenas existen aceleraciones verticales, con frecuencia puede describirse satisfactoriamente el flujo por medio de unas ecuaciones en dos dimensiones, resultado de integrar en la vertical las ecuaciones 3D para flujo incompresible; las nuevas ecuaciones en dos dimensiones (conocidas como ecuaciones de aguas someras o de Saint

Venant) estudiarán flujos en superficie libre, turbulentos y no permanentes en los que la profundidad del fluido es pequeña en relación a las dimensiones horizontales.

A pesar de las fuertes hipótesis empleadas en la obtención de las ecuaciones de aguas someras, al resolverlas se obtienen resultados muy próximos a la realidad, incluso en casos en que no se cumplen algunas de esas hipótesis. En particular, la versión para flujos unidimensionales de estas ecuaciones simplificadas es de uso habitual en el estudio del flujo en canales abiertos.

Las hipótesis que consideran en las ecuaciones de aguas someras son:

- a) La pendiente del fondo es pequeña
- b) La curvatura de las líneas de corriente es pequeña, por lo que la distribución de presiones puede considerarse hidrostática.
- c) El movimiento principal de las partículas ocurre en planos horizontales.
- d) La distribución en la vertical de las componentes en x, y de la velocidad (u,v), es prácticamente uniforme. Esto permite, al integrar en la vertical, sustituir u y v por sus valores medios.
- e) Las fuerzas de masa que actúan son la gravedad en dirección vertical y la fuerza de Coriolis, en el plano horizontal, por lo que $F=(f_v,-f_u,-g)$, siendo $f=2\Omega\sin\theta$.
- f) La aceleración vertical de las partículas se considera despreciable frente a g.
- g) La pérdida de energía por fricción en los contornos, en flujo no permanente, puede evaluarse mediante fórmulas empíricas válidas para flujo permanente, como las de Chézy o Manning.
- h) Se considera despreciable la variación de v_t con la profundidad.

El modelo Itzi está basado en la solución del sistema de ecuaciones de aguas someras en dos dimensiones, que consiste en tres ecuaciones:

- Ecuación de continuidad
- Dos ecuaciones de conservación de momentum en dos direcciones ortogonales

La ecuación local de continuidad (ecuación 28):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (6.1)$$

Las ecuaciones de momentum para las componentes “x” y “y”, son (ecuación 29 y 30):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(V_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(V_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \quad (6.3)$$

En donde:

x,y,z- coordenadas cartesianas

η -elevación de la superficie

u,v,w- componentes de la velocidad en dirección x,y,z

f = 2 Ω sin \varnothing parámetro de Coriolis (Ω - velocidad angular de la Tierra y \varnothing - latitud)

g-aceleración gravitacional

ρ_0 -densidad del agua

S-Magnitud de la descarga en los puntos fuente

u_s, v_s -velocidad de descarga hacia el cuerpo de agua

Green-Ampt

El método de Green-Ampt, extendido para su aplicación a fenómenos de lluvia natural por Mein y Larson (1973) y Chu (1978), es un método muy aplicado en hidrología para estimar la cantidad de agua que infiltra en el suelo y el exceso de agua que queda disponible en superficie para el fenómeno de escorrentía. Este método aporta sin embargo sólo información válida sobre el proceso superficial de infiltración (en la interface suelo-atmósfera), pero no sobre el de redistribución, movimiento del agua en el interior del suelo al cesar la infiltración.(Del and Entre, 2005).

El modelo original de Green y Ampt (1911) describe la infiltración de agua en un suelo bajo condiciones de encharcamiento permanente y las siguientes hipótesis: (a) suelo encharcado con una lámina de agua somera desde el principio ($t \geq 0$); (b) suelo profundo y homogéneo, con un contenido inicial de humedad uniforme en profundidad θ_i ; y (c) frente de avance de humedad plano (flujo en forma de “pistón”), es decir el agua se mueve saturando el suelo (humedad a saturación, θ_s) a la misma

velocidad en toda la sección del suelo, definido por una succión S_{av} [L] en el frente de avance. Con estas hipótesis de partida y aplicando (Del and Entre, 2005).

la Ley de Darçy entre la superficie del suelo (con $h_o \approx 0$) y el punto a profundidad $Z=Z(t)$ [L] donde se encuentra el frente de avance, se obtiene la expresión de la tasa de infiltración del suelo o infiltración potencial (bajo condiciones de encharcamiento), $f_p [LT^{-1}]$,

$$f_p = K_s \left(\frac{S_{av} M}{F} + 1 \right) \quad (6.4)$$

donde $K_s [LT^{-1}]$, es la conductividad hidráulica saturada de Darçy; $M = (\theta_s - \theta_i)L = ML$ es la porosidad "llenable" de agua; y $F_p [L]$ es la infiltración acumulada que para el caso del perfil rectangular es $F_p = (\theta_s - \theta_i)L = ML$, con $f_p = \frac{dF_p}{dt}$.

6.3 Implementación y calibración del modelo

Itzi requiere de tres entradas

- Modelo digital de elevación (figura 21)



Figura 21 Carta LIDAR

- Raster de rugosidad
- Raster de lluvia

La topografía del modelo se construyó con un modelo digital de alta resolución (DEM) tipo superficie con resolución de 5m (Figura 21), el cual es un registro de las elevaciones existentes sobre el nivel del mar, derivado de la obtención de puntos (mediante tecnología LiDAR) ajustada al terreno mediante procesos geodésicos, de la que se seleccionan aquellos puntos que corresponden únicamente al terreno, generando una "nube de puntos clasificada" a la que se le aplica una interpolación a los puntos clasificados del último retorno y habiendo eliminado aquellos puntos que no pertenecen al terreno como los reflejados por infraestructura, vegetación y objetos aéreos como nubes o pájaros.

Para calcular la infiltración, es necesario alimentar el modelo con un modelo digital de porosidad efectiva, presión capilar y conductividad hidráulica.

Condiciones de frontera

Por defecto, Itzi assume que todas las fronteras están cerradas, es decir, el dominio funciona como un vaso en donde el flujo no puede salir.

Por lo que se definió una condición de frontera tipo 4, que tiene como característica la definición de una altura de agua dentro del dominio, que se define como una frontera abierta que permite la salida del flujo, evitando un comportamiento similar a un vaso cerrado.

El valor del tirante definido a lo largo de puntos, fue de cero.

Metodología de simulación

1. Se definió la región con un raster tipo lidar con resolución de 5 m.
2. Se definió la cuenca de estudio a partir de un punto de drenaje (Figura 22).

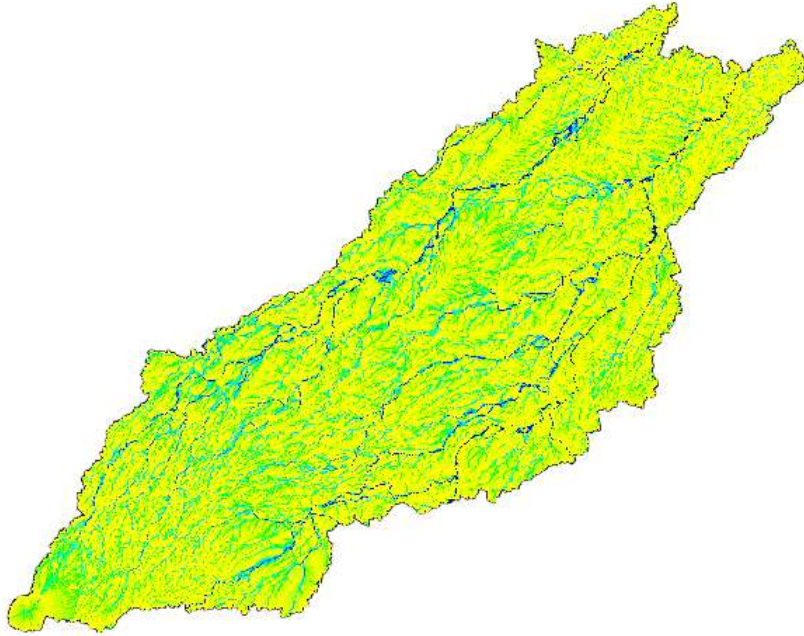


Figura 22 Drenaje de la cuenca

3. Se define la región de trabajo para que los cálculos del modelo hidrodinámico se realicen únicamente en la zona de interés, a partir de una máscara.
4. Se definieron las condiciones de frontera tipo 4 a lo largo del parteaguas de la cuenca, con un valor de cero.
5. La modelación se realizó con lluvia variable, para lo cual, se hizo registro de mapas temporales de lluvia, usando la información de los hietogramas de diseño para diferentes periodos de retorno.
6. Se realizó la corrida de cada uno de los eventos de diseño y de las condiciones en donde se implementan los tres tipos de infraestructura.

7. EVALUACIÓN DE INFRAESTRUCTURA

En este capítulo se realiza la interpretación de los distintos escenarios que arrojaron las simulaciones.

Con el modelo de flujo se simuló el escurrimiento hidráulico de la cuenca definida en la zona sur del Valle de la Ciudad de México, con el propósito de predecir el comportamiento de los escurrimientos con avenidas extraordinarias y su efecto en la Ciudad de México, para delimitar las áreas con riesgo a inundación.

Para este trabajo de tesis, fue necesario realizar:

- 1 simulación del escurrimiento natural en la cuenca
- 6 simulaciones para los periodos de retorno de 5, 10, 20, 50, 100, 500 y 1000 años, implementando en el modelo los tres tipos de infraestructura a evaluar (azote verde, captación de agua lluvia y parque inundable).

Los parámetros que se obtuvieron fueron los siguientes:

- Profundidad total del agua (m)
- Área de inundación (m²)

El parámetro importante para determinar los niveles de inundación es la profundidad total del agua (total water depth), que corresponden a los valores máximos de profundidad del agua alcanzados en cada uno de los escenarios de la simulación.

7.1 Validación del modelo

Validar un modelo es obtener un grado de confianza en el mismo, la cual se confirma con resultados positivos en un conjunto de test que proporcionan esa confianza, que puede perderse por un solo test negativo. La validez puede hacerse con la realización de un conjunto de pruebas que se hacen a lo largo de la construcción del modelo:

- Hipótesis
- Formulación
- Resolución numérica
- Aplicación

Para tener un margen de comparación y establecer un análisis más objetivo de los resultados obtenidos, es necesario calibrar los resultados del modelo; la que consiste en lograr la reproducción aceptable de las condiciones reales del sistema.

El procedimiento que se determinó para calibrar el modelo de flujo de inundación, fue construir el modelo y simular con el hidrograma del evento que se presentó el día 16 de julio de 2019, cuya información se tiene registrada en la base de datos del Observatorio Hidrológico del Instituto de Ingeniería, de la estación "La Joya". Para llevar a cabo este proceso, primeramente, se hicieron pruebas con el hietograma perteneciente al evento de revisión, cuya magnitud pertenece a un periodo de retorno de 50 años.

Con ayuda de la información recabada del evento del día 16 de julio, se procedió a determinar si los resultados obtenidos de la simulación del evento, son semejantes a la inundación ocurrida en la ciudad debida a la precipitación de ese día.

Se pueden lograr aproximaciones con simulaciones por computadora, para las cuales, se puede cuantificar el impacto físico esperado de un fenómeno, mediante simplificaciones que requieren validación y calibración previas. Estos modelos son desarrollados por instituciones de investigación del país, entre las que se encuentra el Instituto de Ingeniería de la UNAM y otros, quienes han desarrollado diversas investigaciones sobre estos temas; sin embargo, la calibración de los mismos se deberá hacer tras evaluar los daños y pérdidas ocasionados por un fenómeno y compararlos con los resultados obtenidos de escenarios previos, con el resultado de estas comparaciones, los modelos serán mejorados y se acercarán más a la realidad (Melorose, Perroy and Careas, 2015).

En conclusión, el modelo de simulación representa adecuadamente el modelo conceptual.

Las siguientes modelaciones (Captación de agua pluvial y azoteas verdes) consideran las siguientes condiciones:

- Área de captación bruta de 0.65 km^2 y una captación efectiva de 0.1 km^2 .

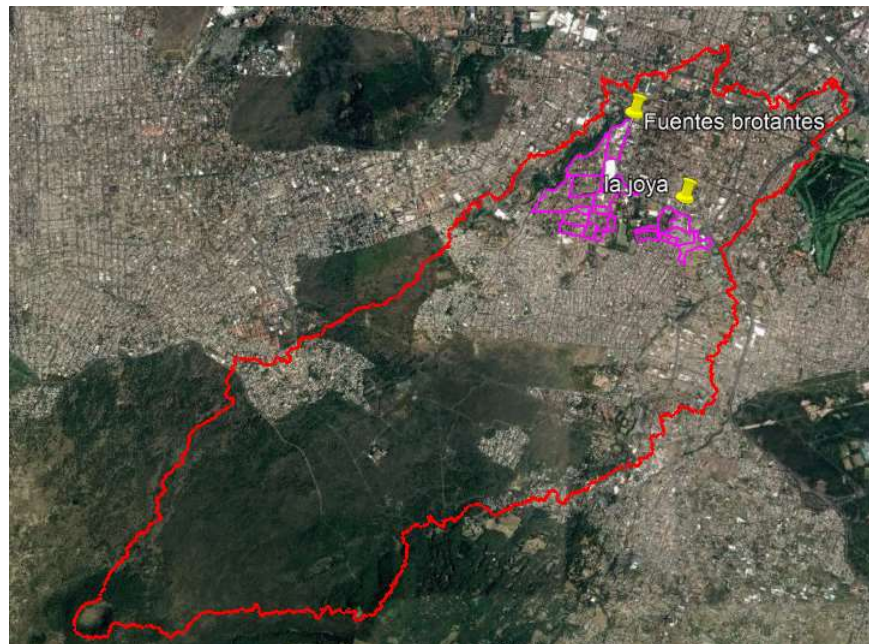


Figura 23 Área de captación (0.1 km^2)

- Área de captación bruta de 1.05 km² y una captación efectiva de 0.2 km.



Figura 24 Área de captación (0.2 km²)

7.2 Modelación del escurrimiento natural (condiciones normales)

Se realizaron 7 simulaciones con un Modelo Digital de Elevaciones tipo Lidar con resolución de 5 m, para periodos de retorno de 5, 10, 20, 50, 100, 500 y 1000 años.

La cuenca tiene un área de 11.89 km², se consideró como umbral para inundación, un tirante de 10 centímetros de profundidad, descartando los tirantes menores.

Las áreas de inundación correspondientes a cada periodo de retorno, son las siguientes:

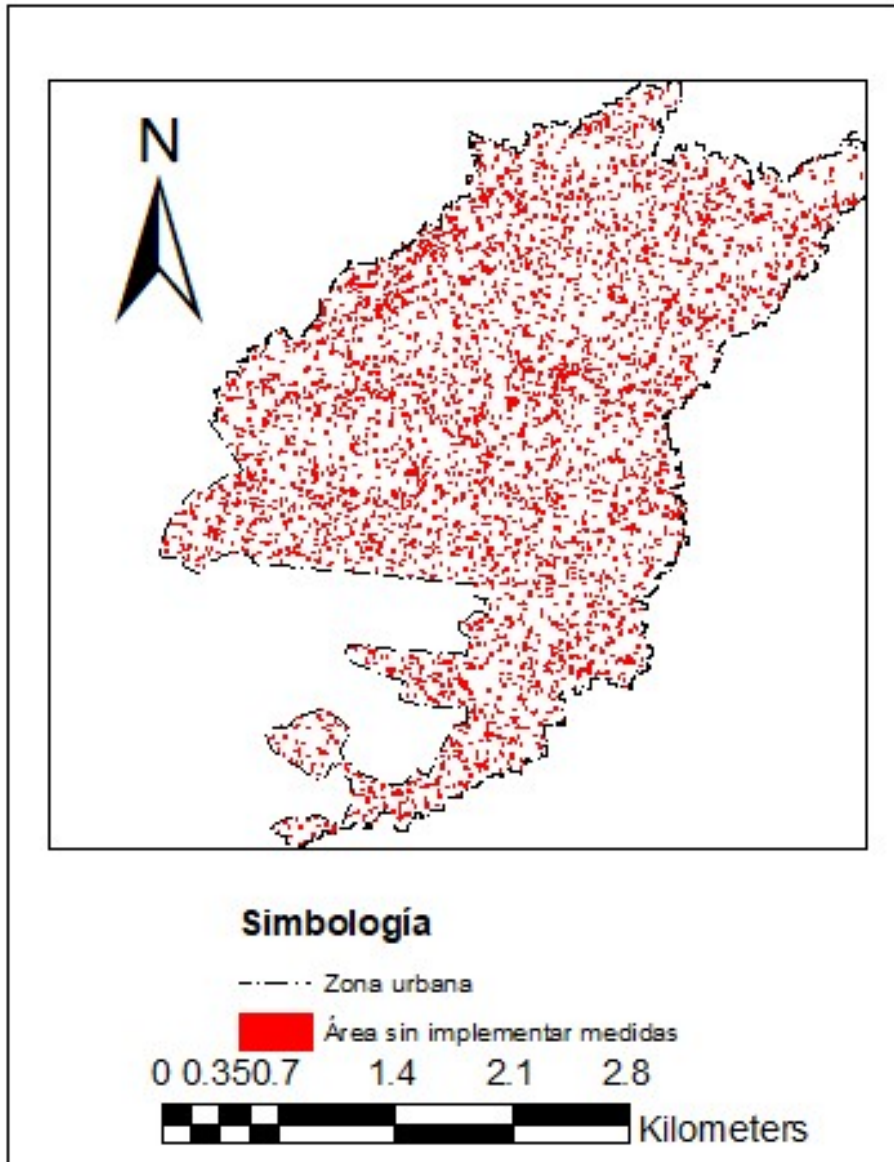


Figura 25 Áreas inundadas

Tabla 37 Áreas inundadas en condiciones normales (km²)

Área inundada en condiciones normales	
Tr (años)	Área (km²)
5	0.187
10	0.239
20	0.284
50	0.340
100	0.369

500	0.432
1000	0.451

7.3 Modelación con Capacidad de Agua Pluvial

El tipo de infraestructura denominada “azotea verde”, se modela con la misma condición de captación de los demás tipos de infraestructura, profundidad de 10 cm y altura de captación efectiva de 3 centímetros, debido a que, por sus características, el 70% de la precipitación escurre hacia el drenaje, mientras que el 30% es retenido.

- 0.1 km² de captación

Los resultados de las simulaciones, se muestran en la figura 26, en donde se resalta con rojo el área de inundación sin implementar la captación de agua pluvial y el área azul corresponde a las áreas inundadas una vez implementada la captación de agua pluvial. La tabla 38 muestra las áreas inundadas.

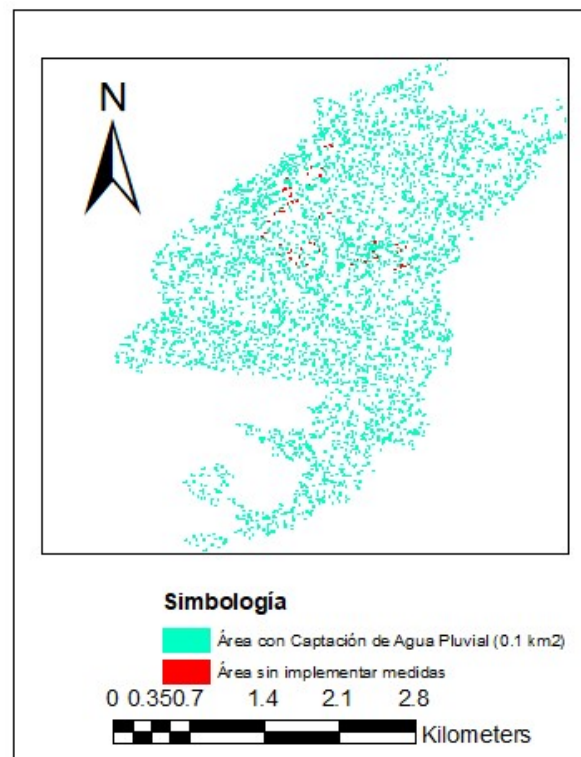


Figura 26 Áreas inundadas

Tabla 38 Áreas inundadas con captación de agua pluvial (0.1 km²)

Área inundada con 0.1 km ² captación de agua pluvial	
Tr (años)	Área (km ²)
5	0.186
10	0.239
20	0.283
50	0.338
100	0.367
500	0.428
1000	0.447

- 0.2 km² de captación

Los resultados de las simulaciones, se muestran en la figura 27, en donde se resalta con rojo el área de inundación sin implementar la captación de agua pluvial y el área azul corresponde a las áreas inundadas una vez implementada la captación de agua pluvial. La tabla 39 muestra las áreas inundadas.

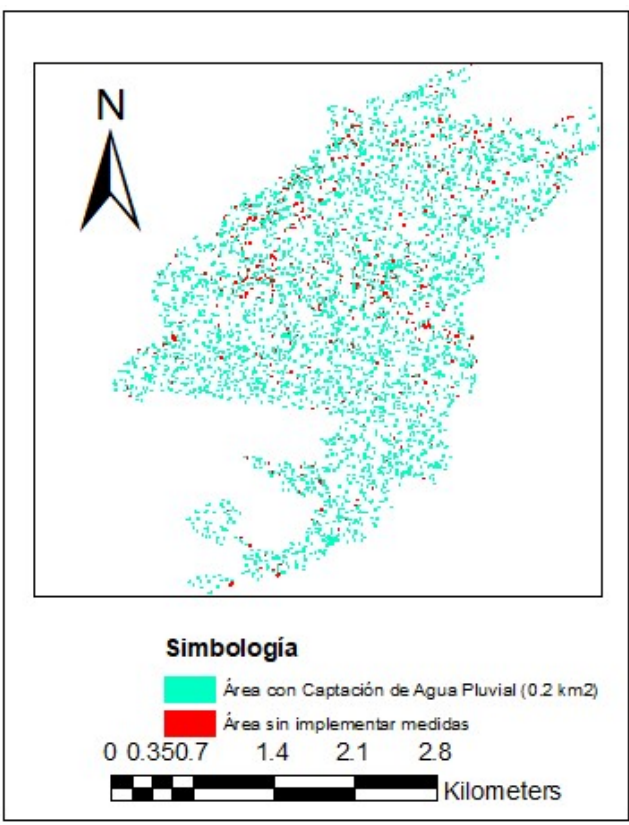


Figura 27 Áreas inundadas

Tabla 39 Áreas inundadas con captación de agua pluvial (0.2 km²)

Área inundada con 0.2 km ² de captación de agua pluvial	
Tr (años)	Área (km ²)
5	0.172
10	0.230
20	0.277
50	0.339
100	0.362
500	0.420
1000	0.439

7.4 Modelación con Azotea verde

El tipo de infraestructura denominada “captación de agua pluvial”, se modela con la misma condición de los demás tipos de infraestructura, con altura de captación efectiva de 10 centímetros.

- 0.1 km² de captación

Los resultados de las simulaciones, se muestran en la figura 28, en donde se resalta con rojo el área de inundación sin implementar la azotea verde y el área verde corresponde a las áreas inundadas una vez implementada la azotea verde. La tabla 40 muestra las áreas inundadas.

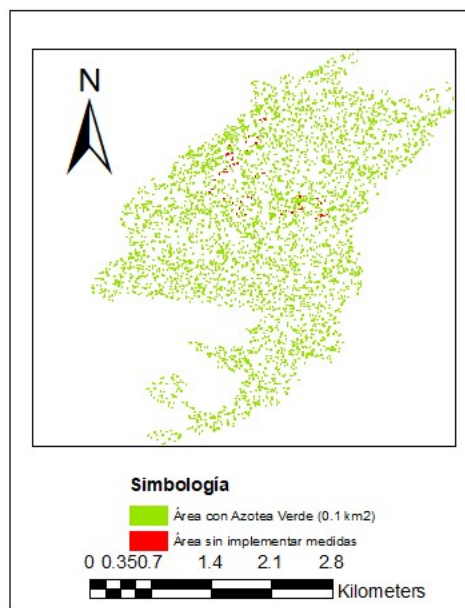


Figura 28 Áreas inundadas

Tabla 40 Áreas inundadas con azotea verde (0.1 km²)

Área inundada con 0.1 km ² de azotea verde	
Tr (años)	Área (km ²)
5	0.186
10	0.239
20	0.283
50	0.338
100	0.367
500	0.428
1000	0.447

- 0.2 km² de captación

Los resultados de las simulaciones, se muestran en la figura 28, en donde se resalta con rojo el área de inundación sin implementar la azotea verde y el área verde corresponde a las áreas inundadas una vez implementada la azotea verde. La tabla 40 muestra las áreas inundadas.

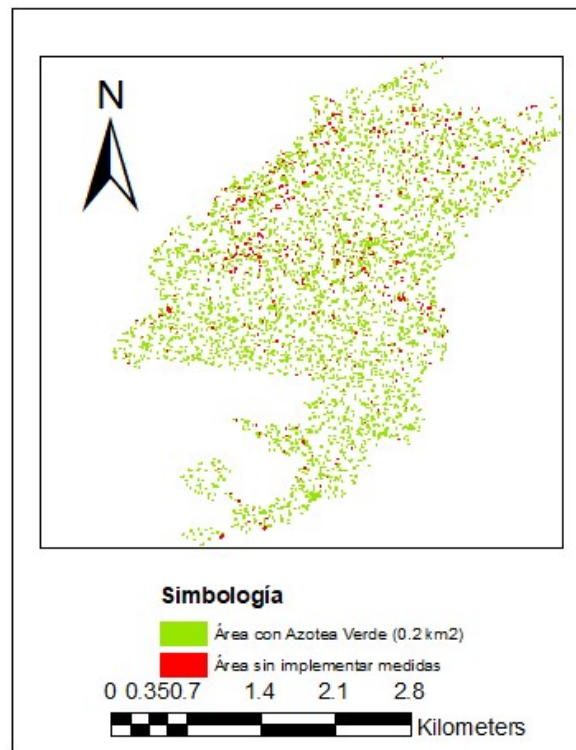


Figura 29 Áreas inundadas

Tabla 41 Áreas inundadas con azotea verde (0.2 km²)

Área inundada con 0.2 km ² de azotea verde	
Tr (años)	Área (km ²)
5	0.171
10	0.230
20	0.277
50	0.338
100	0.362
500	0.420
1000	0.439

7.5 Modelación con Parques inundables

El tipo de infraestructura denominada “parques inundables”, se modela con la misma condición de los demás tipos de infraestructura, con altura de captación efectiva de 10 centímetros (figura 29).

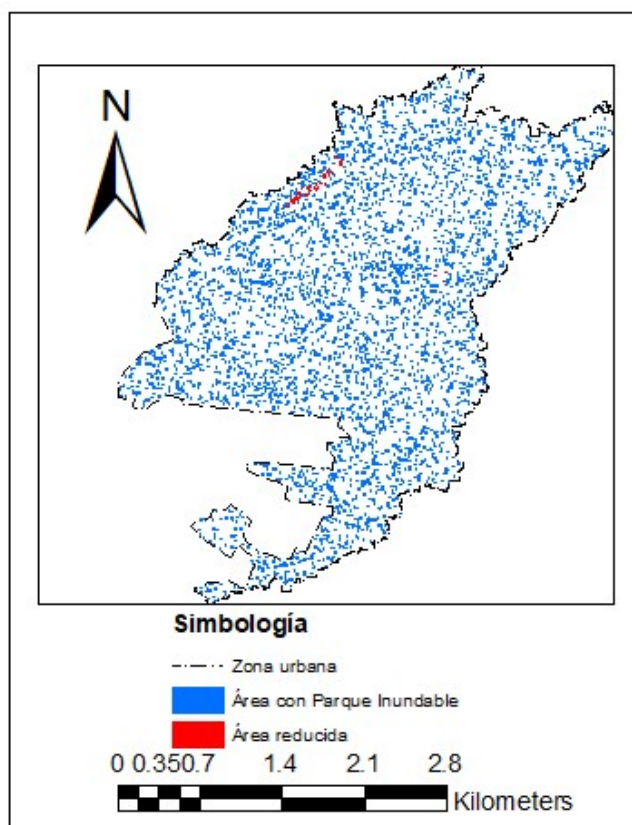


Figura 30 Áreas inundadas

- 0.1 km² de captación

Los resultados de las simulaciones, se muestran en la tabla 42, donde se muestran las áreas inundadas.

Tabla 42 Áreas inundadas con parques inundables (0.1 km²)

Área inundada con 0.1 km² de Parques inundables	
Tr (años)	Área (km²)
5	0.185
10	0.237
20	0.282
50	0.337
100	0.365
500	0.427
1000	0.447

- 0.2 km² de captación

Los resultados de las simulaciones, se muestran en la tabla 43, donde se muestran las áreas inundadas.

Tabla 43 Áreas inundadas con parques inundables (0.2 km²)

Área inundada con 0.2 km² de Parques inundables	
Tr (años)	Área (km²)
5	0.184
10	0.236
20	0.279
50	0.334
100	0.362
500	0.423
1000	0.443

7.6 Análisis de resultados

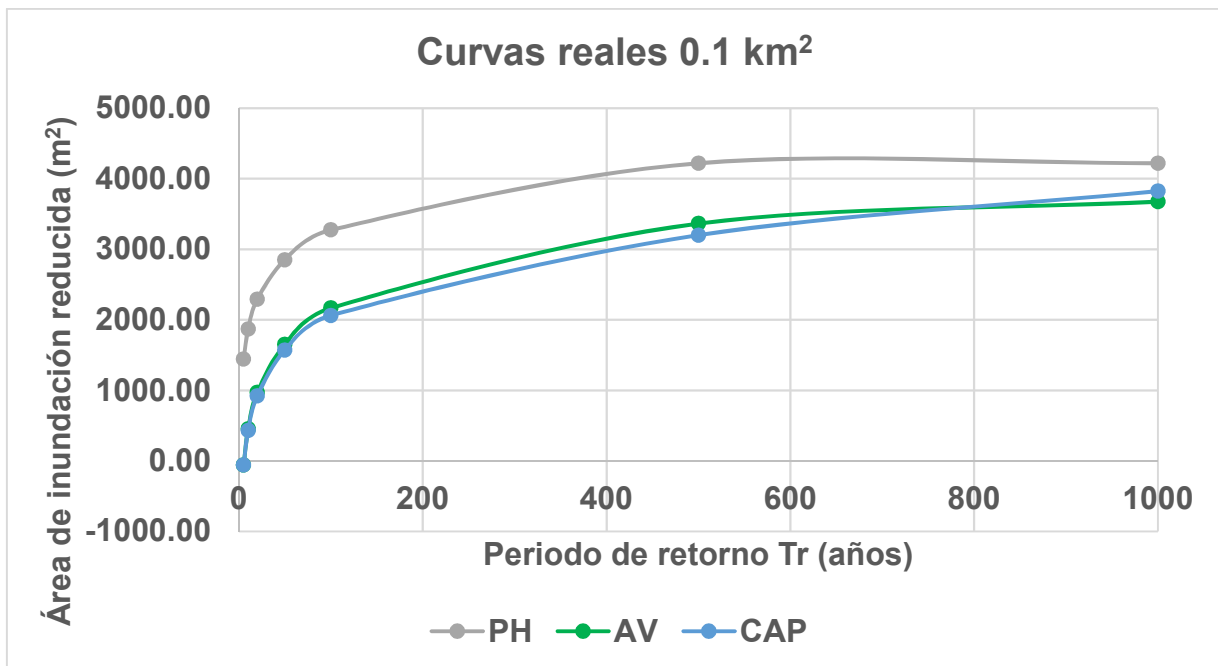
Después de definirse las áreas inundadas, se realiza la etapa de evaluación, que consiste en una comparativa de la reducción de áreas inundadas en condiciones

naturales, contra el área determinada una vez implementado cada uno de los tipos de infraestructura verde propuestos.

- El resultado del área de inundación reducida, considerando un área efectiva de captación de 0.1 km² y una profundidad de captación de 0.1 metros, se presenta en la tabla 44, gráfica 6.

Tabla 44 Áreas de reducción de inundación (0.1 km²)

Área de reducción de inundación m ²			
(Área con infraestructura: 0.1 km ²)			
Tr	PH	AV	CAP
5	1457.28	150.02	175.02
10	1660.86	300.04	75.01
20	2346.72	975.11	900.11
50	2957.48	1625.19	1425.17
100	3475.40	1975.23	1900.22
500	4086.15	3525.41	3400.40
1000	3950.49	3675.43	3825.45

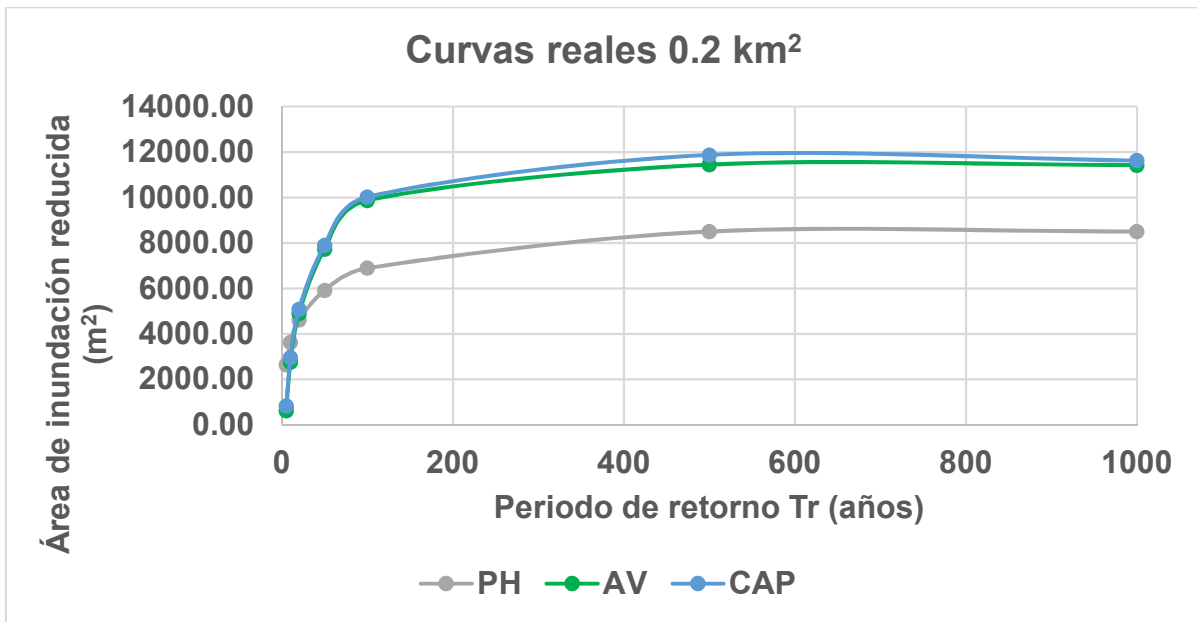


Gráfica 6 Curvas de mitigación de área de inundación

- El resultado del área de inundación reducida, considerando un área efectiva de captación de 0.2 km² y una profundidad de captación de 0.1 metros, se presenta en la tabla 45, gráfica 7.

Tabla 45 Áreas de reducción de inundación (0.2 km²)

Área de reducción de inundación m ²			
(Área con infraestructura: 0.2 km ²)			
Tr	PH	AV	CAP
5	2885.98	14976.76	15176.78
10	3303.86	9351.10	9401.10
20	4632.72	6450.76	6450.76
50	5886.38	1125.13	1450.17
100	6975.80	6775.79	7000.82
500	8229.45	11451.34	11876.39
1000	7950.99	11426.34	11626.36



Gráfica 7 Curvas de mitigación de área de inundación

Como se puede observar, el tipo de infraestructura que ofrece una mayor reducción del área de inundación presente en la cuenca, es el parque inundable para el caso en el que se tiene un área efectiva de captación de 0.1 km²; mientras que la mayor reducción para un área efectiva de captación de 0.2 km², se presenta con la captación de agua pluvial.

- **Análisis de costo-beneficio**

-Azotea verde

La instalación de azoteas verdes agrega la necesidad de mayor trabajo en las edificaciones, pues el peso adicional tiene que ser considerado durante la construcción haciéndola ligeramente más cara a la construcción tradicional.

En México, Reyes un experto de la UNAM propuso instalar jardines en las azoteas de los edificios de la capital, aunque recalca que esto no es tan sencillo pues se debe calcular el peso de soporte, impermeabilización y el uso de la tierra adecuada para las plantas (Gudiña, 2009).

La instalación y cuidado de los techos verdes directos en México son costosos, pues la inversión promedio depende de las plantas usadas (Cervantes, 2009). A pesar del costo, esta propuesta de techos verdes debería convertirse en parte de la cultura de vida en la CDMX, por lo que el gobierno debe emprender ciertas medidas como: la implementación de las azoteas verdes en los edificios públicos, como políticas públicas permanentes, modificar la legislación y modificar el código financiero para incentivar la instalación de este proyecto.

Considerando los elementos componentes de las azoteas verdes, se determinó el siguiente catálogo de conceptos (tabla 46) de acuerdo a los precios del tabulador de precios unitarios de la Ciudad de México.

Tabla 46. Catálogo de conceptos azotea verde

Clave	Elementos	Unidad	P.U.
GS12FU	Sistema de impermeabilización prefabricado a base de bitumen modificado para azoteas jardinadas Uniplas Jardín Plus SBS 4.0 PG, con membrana impermeabilizante anti-raíz, colocada con soplete, incluye preparación de a superficie aplicando una capa de Impercoa primario diuido 1:1 con agua en proporción de 0.1 l/m2, resane de fisuras con Impercoat cemento sellador plástico bituminoso wet, colocación de una geomalla filtrante uniplus drenaje sencillo 180, engrapando las juntas con alambre galvanizado y adherido con bandas auto adheribles Plasticker en los pretilas, impermequimia o similar, de acuerdo a la norma ambiental para el D.F. NADF-011-AMBT-2007.	m2	\$ 824.46

VD23BB	Calilstenum, altura de 80 a 100 cm follaje de 0 a 50 cm.	pza	\$ 153.88
VB13	Suministro y colocación de tierra vegetal y de abono orgánico, incluye: los materiales con las características solicitadas en e sitio de los trabajos, desperdicios; la mano de obra para el acarreo libre, preparación de la superficie, colocación, tendido, nivelado, limpieza, el equipo y la herramienta necesarios para la correcta ejecución de los trabajos. Tierra vegetal negra.	m3	\$ 944.27
VD12B	Suministro y colocación de pasto en rollo, incluye: los materiales con las características solicitadas, en el sitio de los trabajos, agua, reposición; la mano de obra para el acarreo libre, preparación de la superficie, trazo, plantación, nivelado, riego, poda, conservación y mantenimiento durante 45 días o lo que se establezca en el contrato a partir de la plantación, limpieza, el equipo y la herramienta necesarios para la correcta ejecución de los trabajos.	m2	\$ 52.44
		Subtotal	\$ 1975.05

Sin embargo, de acuerdo a los costos de inversión del programa de INFONAVIT, el costo de inversión por cada metro cuadrado, es de \$4,000.00, para una obra nueva.

Ya que la adecuación de una azotea, dependerá de factores que intervienen en la instalación, el propósito y tipo de azotea verde que se requiera. Sólo por mencionar algunas de estas variables que modifican el costo se encontró:

Domos, antenas, tinacos, tanques de gas, tuberías, cableado, bajadas de agua pluvial, pendientes, entre muchas otras (estos obstáculos se pueden resolver para la instalación, pero modifican el costo), además, debe de considerarse que la estructura original deberá de soportar una carga extra promedio de 110 kg/m².

-Captación de agua pluvial

De acuerdo a los costos obtenidos de un análisis de costeo básico para captación de agua pluvial, se identificaron los conceptos de los principales elementos componentes del sistema (tabla 47) y se valoró el costo de implementar la medida en una extensión de 1 m².

Tabla 47. Catálogo de conceptos

Clave	Elementos	Unidad	P.U.
-------	-----------	--------	------

FK17DD	Suministro y colocación de impermeabilante cementoso modificado Sellome gris o similar, a dos capas, para losas, terrazas y azoteas.	m ²	\$	100.03
GC28BB	Pretil a base de tabique rojo recocido de 11.5 cm de espesor y de 0.85 m de altura, incluye cadena de concreto armado, acabado aplanado serroteado ambas caras.	m	\$	709.48
	Coladera Piso Una Boca Rejilla Redonda 1BC 123 Urrea	pza	\$	582.15
IG12GL	4-Tubo de pvc tipo hidráulico enger, de 102 mm de diámetro, RD 26.	m	\$	605.00
IG1BL	2-Codo de pvc tipo hidráulico unión cementar, de 90° x 102 mm de diámetro	pza	\$	398.64
	Filtro Ecomesh BT-LXB-10 para sistemas de tinaco, ideal para filtrar sedimentos, óxidos, partículas.	pza	\$	750.00
	Tinaco tricapa 1500 L con accesorios	pza	\$	2,649.00
		Subtotal	\$	5,794.30

-Parque inundable

De acuerdo al costo del proyecto del Parque Hídrico La Quebradora, cuyo monto fue de 250 millones de pesos, cuya superficie es de 38470 m², con una capacidad de almacenamiento de 60,000 m³.

Por lo que la construcción por metro cuadrado, tiene un costo de \$6, 498.57 pesos M/N.

8. CONCLUSIONES

La evaluación de la mejor alternativa de implementación de infraestructura verde, respecto del análisis costo beneficio, implica factores como el costo económico y beneficio social, a través de indicadores, considerando los siguientes puntos:

1. Identificar el objetivo (satisfacer la necesidad de agua y usarla de la mejor manera, etc.),
- 2.- Identificar las alternativas (para disponer de agua en este caso),
3. Identificar los criterios que permitan comparar unas posibilidades con otras, decidir sus precios, calidad del bien, bienestar que de ello se obtiene, riesgos, etc.)
y
- 4.- Considerando lo anterior, tomar una decisión, ordenando de acuerdo con algún indicador de rentabilidad, para cada una de las opciones.

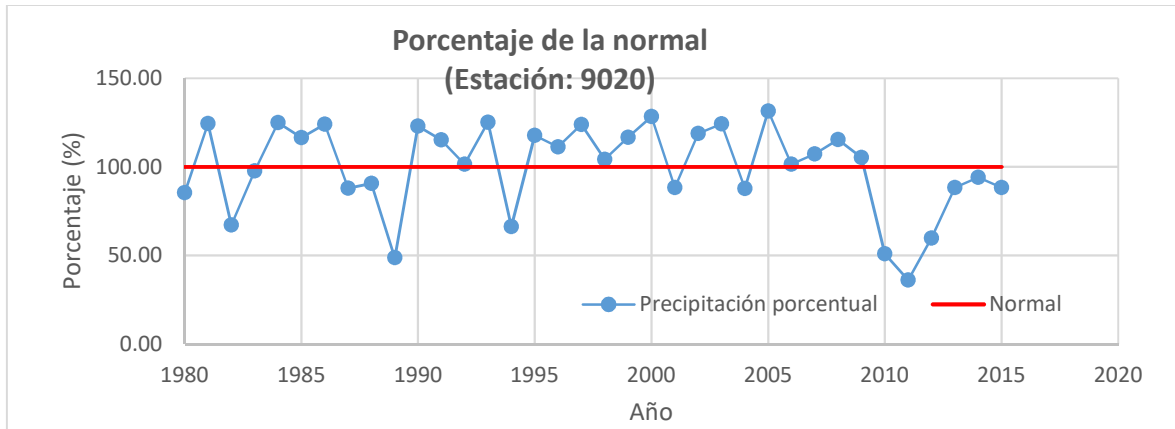
El criterio de sección está en función del beneficio social y la mitigación de las inundaciones, por lo que el análisis Costo-Beneficio, permite definir la factibilidad de las alternativas planteadas o del proyecto a ser desarrollado, cuyo objetivo es proporcionar una medida de los costos en que se incurren en la realización de un proyecto, y a su vez comparar dichos costos previstos con los beneficios esperados de la realización de dicho proyecto y la utilidad es valorar la necesidad y oportunidad de acometer la realización del proyecto; seleccionar la alternativa más beneficiosa para la realización del proyecto y, estimar adecuadamente los recursos económicos necesarios en el plazo de realización del proyecto. (Gittinger, Gittinger and Economic Development Institute (Washington, 2006)

Es importante señalar que las curvas de mitigación de inundación muestran un comportamiento creciente, hasta el punto en donde la curva se mantiene horizontal, lo que indica una pérdida de eficiencia de la infraestructura, como agente mitigador de inundaciones.

Las azoteas verdes constituyen una alternativa viable para la naturación de las áreas urbanas, a pesar que los costos rondan los \$4,000.00/m², siendo los más bajos con respecto a las otras opciones, a largo plazo representan un beneficio para la población y el medio ambiente, pues son muchos los beneficios que éstas áreas ofrecen mejorando la calidad de vida de las poblaciones urbanas.

La captación de agua pluvial, además de ser un medio de mitigación de inundaciones, ofrece alternativas de abastecimiento de agua para consumo, mismo que se vuelve viable ante los problemas de abastecimiento que se presentan en la actualidad, además de representar un ahorro en los costos de energía y traslado. El precio se encuentra en un nivel intermedio, con un valor aproximado de \$5,795.00 M/N por metro cuadrado, sin embargo, su comportamiento con respecto a la mitigación de áreas, indica que es una buena alternativa.

Por otro lado, evaluando la serie de datos de precipitación media anual, se obtiene el porcentaje de la normal, con el siguiente resultado (Gráfica 8):



Gráfica 8 Porcentaje de la normal

En donde se observa que, de acuerdo a la tendencia de la serie de tiempo de precipitación media diaria del periodo 1980-2015, se observa una tendencia negativa en los últimos 10 años, con respecto a la precipitación anual acumulada, por lo que, contar con una alternativa de abastecimiento, ayudará a mitigar la escasez hídrica debida a la variabilidad climática y sobrepoblación de la Ciudad de México.

Los parques inundables ofrecen una serie de servicios socio-ambientales, además se ser un elemento mitigador de inundaciones, aunque su costo es el mayor de los tres tipos de infraestructura analizados, tiene un comportamiento adecuado como agente mitigador de inundaciones.

Por lo que los tres tipos de infraestructura ofrecen una alternativa de costo y beneficios de acuerdo a los espacios, obstáculos físicos, paisajes, presupuesto y requerimientos.

REFERENCIAS

CONAGUA, C. N. del A. (2016) 'Lineamientos técnicos: Sistema de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda', *Programa nacional para captación de agua de lluvia y ecotecnias en zonas rurales (PROCAPTAR)*, p. 42. Available at: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/152776/LINEAMIENTOS_CAPTACI_N_PLUVIAL.pdf.

Del, H. and Entre, S. (2005) 'APLICACIÓN DEL MÉTODO DE INFILTRACIÓN DE GREEN-AMPT CON REDISTRIBUCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO ENTRE ENCHARCAMIENTOS R. Muñoz-Carpena y L. Gowdish Agric. and Bio. Engineering

Dept. Univ. of Florida. 101 Frazier Rogers Hall, PO Box 110570 Gainesville, FL 32611, *America*, 32611, pp. 205–213.

Escalante Sandoval, C. A. and Reyes Chávez, L. (2002) 'Técnicas Estadísticas en Hidrología', p. 298.

Gittinger, J. P., Gittinger, J. P. and Economic Development Institute (Washington, D. C. . (2006) 'Análisis económico de proyectos agrícolas', (2005), pp. 173–178.

Melrose, J., Perroy, R. and Careas, S. (2015) *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*. 1a edición, *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015*. 1a edición. México, D.F. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Mora, I. G. S. (2012) 'Ciudad universitaria, México, junio 2012', p. 105.

Ortiz Moreno, Jorge Adrián; Arroyo Zambrano, Tania; Fuentes Gutiérrez, A. (2015) 'Análisis De La Viabilidad De La Incorporación De Sistemas De Captación De Agua Pluvial En Los Desarrollos Inmobiliarios Bajo El Programa De Hipoteca Verde De Infonavit', *PhD Proposal*, 1. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Romero, M. (2017) 'La CDMX en el tiempo, inundaciones.pdf'.

SEMARNAT (2008) 'Nadf-013-Rnat-2007', *Quality*.

Álvarez S. 2009. Azoteas verdes, una opción rentable. Consulta electrónica. http://www.circuloverde.com.mx/artman2/publish/materiales/Azoteas_Verdes_una_opci_n_RENTABLE.shtml. (Consultado 3 de noviembre de 2009).

Cervantes R. 2009. Embellecer las azoteas. La Comunidad. Excelsiór. Consulta electrónica. 1pp

Gudiña V. 2009. Jardines en azoteas podrían ayudar a combatir la contaminación (Publicado en 2007). Consulta electrónica. <http://elblogverde.com/jardines-en-azoteas-podrian-ayudar-a-combatir-la-contaminacion/>. (Consultado el 6 de noviembre de 2009)

Short23. 2009. Techos Verdes y Agricultura Urbana. Consulta electrónica. <http://shot23.wordpress.com/2009/05/17/techos-verdes-agricultura-urbana/> (Consultado el 6 de noviembre de 2009).

Urbieta U. M. P. 2005. Plantas medicinales, manual para las azoteas verdes. Ririki Intervención Social S. C. Instituto de Desarrollo Social. 22 p.