ANÁLISIS HIDROLÓGICO

EN SAN JUAN IXTAYOPAN, DESDE EL VOLCÁN TEUHTLI HASTA CALLE LIRIOS, ALCALDÍA TLÁHUAC, CIUDAD DE MÉXICO

Fenómenos Naturales
y Antropogénicos
Julio, 2023

GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO
CAPITAL DE LA TRANSFORMACIÓN

SECRETARÍA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS Y PROTECCIÓN CIVIL

GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

CAPITAL DE LA TRANSFORMACIÓN

SGIRPC

SECRETARÍA DE GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS Y PROTECCIÓN CIVIL DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Arq. Myriam Urzúa Venegas
Secretaria de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil

Lic. Luz Elena Rivera Cano
Secretaria Particular de la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil

Mtro. Jorge Antonio Ortiz Torres
Asesor de la Secretaria

Lic. Iccen Leticia Salas Pichardo
Directora Ejecutiva de Asuntos Jurídicos

Mtra. Gloria Luz Ortiz Espejel
Directora General de Vinculación y Capacitación

Mtro. Norlang Marcel García Arróliga
Director General de Resiliencia

Lic. Rafael Humberto Marín Cambranis
Director General de Análisis de Riesgos

Mtro. Pedro Martínez Cornejo
Director General de Táctico Operativa

Mtra. Erika Alejandra Barba Luna
Directora Ejecutiva de Administración y Finanzas

Lic. Jonathan Pascual Capote Romero
Director de Difusión de Prevención de Riesgos

Diseño: **Justino Hernández Cortez**
Inscrito a la Dirección de Difusión de Prevención de Riesgos

ESTUDIO REALIZADO POR:

DIANA LAURA DIAZ CRUZ
ROMÁN VALVERDE DELGADO

FENÓMENOS NATURALES Y ANTROPOGÉNICOS
DIRECCIÓN GENERAL DE ANÁLISIS DE RIESGOS

AÑO 2023

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 6
2. ANTECEDENTES 8
3. OBJETIVO 9
4. ESTUDIO HIDROLÓGICO 10
    4.1 Gastos de Diseño 10
    4.2 Características Fisiográficas 11
    4.3 Determinación de las Características Fisiográficas en la Cuenca “A” 13
    4.4 Tiempo de Concentración en la Cuenca “A” 14
    4.5 Número de Escurrimiento en la Cuenca “A” 15
    4.6 Determinación de la Lluvia Media de Diseño en la Cuenca “A” 20
        4.6.1 Visualizador de Escenarios de Lluvia, VELL 21
        4.6.2 Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas, SIATL 23
        4.6.3 Análisis de funciones de probabilidad, Ax 25
            4.6.3.1 Precipitación media por el método de polígonos de Thiessen 28
            4.6.3.2 Precipitación media por el método de isoyetas 33
    4.7 Determinación de la Lluvia Efectiva en la Cuenca “A” 37
    4.8 Cálculo de los Gastos de Diseño en la Cuenca “A” 39
        4.8.1 Método de la Fórmula Racional 39
        4.8.2 Método de Hidrograma Unitario Triangular, HUT 39
        4.8.3 Método de Ven Te Chow 40
    4.9 Hidrograma Sintético con base al Hidrograma Adimensional propuesto por el SCS 43
5. ANÁLISIS EN SUBCUENCAS 2, 3 Y 4 46
    5.1 Determinación de la Lluvia Media de Diseño en Subcuencas 2, 3 y 4 46
    5.2 Cálculo de los Gastos de Diseño en Subcuencas 2, 3 y 4 47
    5.3 Hidrograma Sintético con base al Hidrograma Adimensional propuesto por el SCS para las Subcuencas 2, 3 y 4 48
6. CONCLUSIONES 51
7. BIBLIOGRAFÍA 53

1. INTRODUCCIÓN

San Juan Ixtayopan se localiza al sur de la alcaldía Tláhuac y colinda con los pueblos de Santiago Tulyehualco y San Antonio Tecomitl. En la actualidad está conformado por cinco barrios: San Agustín, La Concepción, La Soledad, La Asunción y La Lupita; a su vez, existen seis colonias: Jaime Torres Bodet, Francisco Villa, El Rosario, Tierra Blanca, Peña Alta y Jardines del Llano.

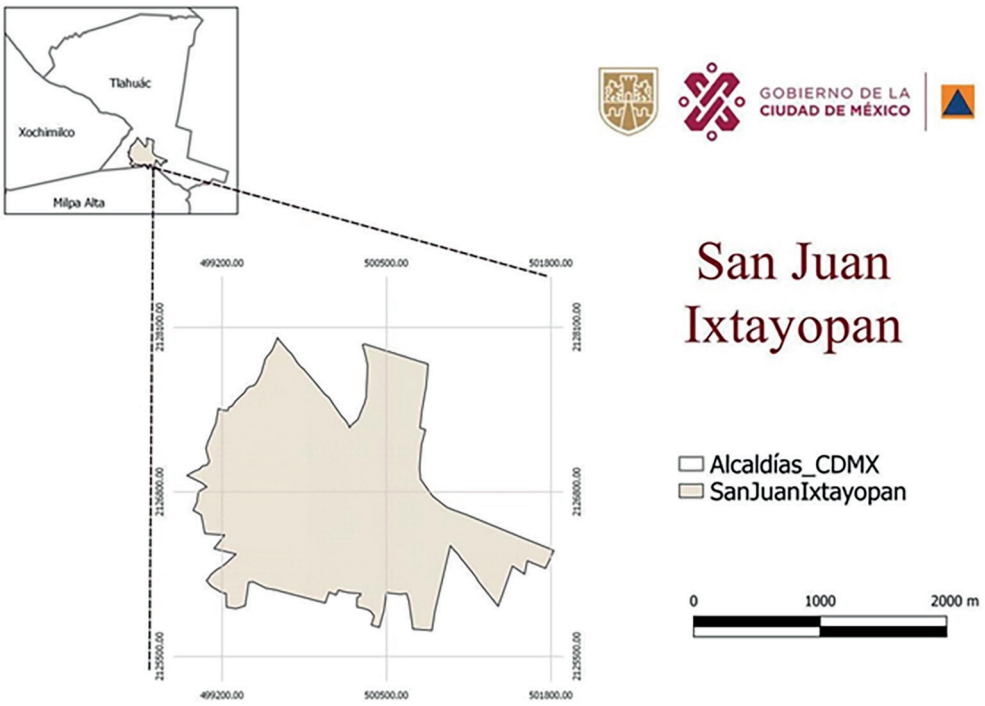
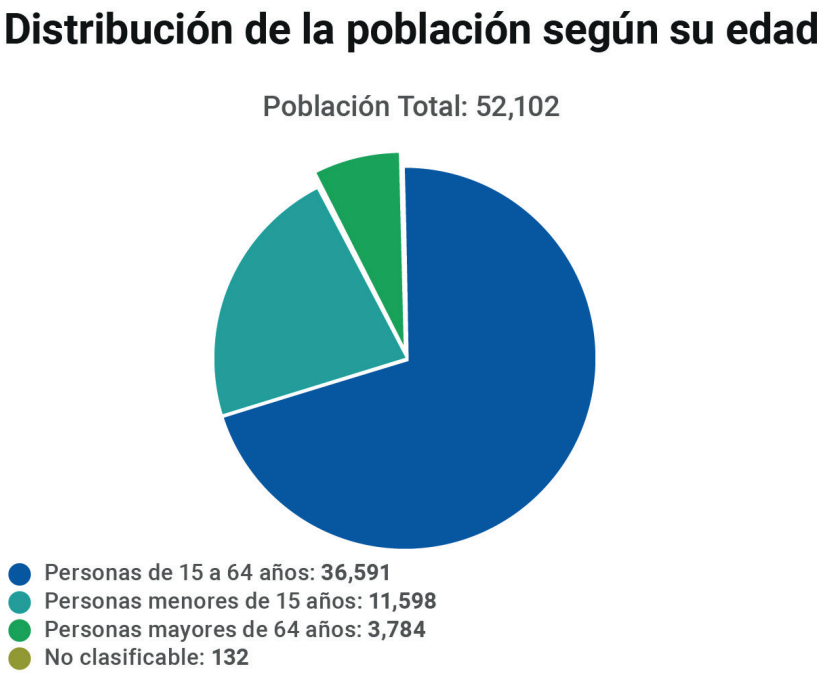


Figura 1.
San Juan Ixtayopan
Fuente: Elaboración propia

Este pueblo es famoso por sus tapetes de aserrín de colores que son colocados en las calles principales del pueblo durante los festejos de semana santa, también es famoso por la feria del elote que se lleva a cabo en el mes de agosto.

Este lugar registra una población total de 52,105 habitantes, según el SIATL. La cuantificación de la población, viviendas y servicios en las viviendas, se realiza intersecando el área de drenaje seleccionada con las capas de manzanas de localidades urbanas y los puntos de localidades rurales pertenecientes al Marco Geoestadístico del Censo de Población y Vivienda 2020, para luego sumar los valores de las variables del censo (SIATL, 2020).



En el lugar predomina un clima templado sub-húmedo, con una temperatura media anual de 15.46 °C, temperatura mínima promedio de 12.11 °C y la máxima de 17.87°C, mientras que su precipitación media anual es de 5.47 milímetros.

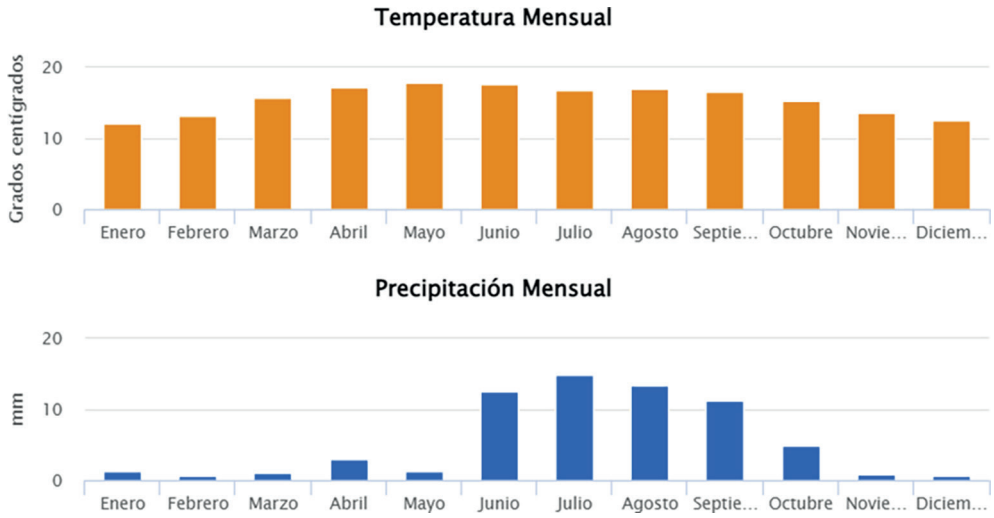


Figura 3.
Temperatura y precipitación media mensual
Fuente: SIATL de INEGI, 2020

2. ANTECEDENTES

De acuerdo al historial de inundaciones presentadas en la alcaldía Tláhuac es posible identificar que se tiene un amplio registro de inundaciones por intensas lluvias en San Juan Ixtayopan. A continuación se mencionan algunos de estos registros:

I. "El 20 de julio de 2020 varias familias resultaron afectadas tras las intensas lluvias que cayeron en San Juan Ixtayopan, por lo cual la Directora General de Administración, Silvia Ferrer González, señaló que tras las lluvias atípicas que provocaron la inundación de los inmuebles, se hizo válido el seguro por responsabilidad civil.

De esta manera, se llevó a cabo el levantamiento y dictaminación con la intervención de la Dirección de Gestión de Riesgos y Protección Civil de la Alcaldía y el Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

Los recursos recibidos por la aseguradora fueron distribuidos en 18 cheques, cuyo monto fue definido de acuerdo con el dictamen determinado por los ajustadores de la compañía, según la afectación de cada hogar.

Ernesto Romero Elizalde, Director General de Participación Ciudadana, recordó que, tras las intensas lluvias, varias Direcciones Generales trabajaron intensamente en diferentes colonias como El Rosario y Francisco Villa." (Flores, 2021)

II. "Las lluvias que se prolongaron todo el día dificultaron los trabajo de desazolve y limpieza en demarcaciones donde las inundaciones por las tormentas del 15 y 16 de septiembre fueron severas, como Tláhuac, Coyoacán, Iztapalapa y Benito Juárez.

El nivel del agua alcanzó alrededor de un metro de altura, y el agrupamiento especial auxilió a vecinos para poder mover algunas de las pertenencias.

En Tláhuac, en Segunda Cerrada de Camino Real, en San Juan Ixtayopan, al mediodía todo el tramo de calle seguía anegado. El agua se acumuló en patios y entradas de las viviendas.

Los vecinos temían una nueva inundación debido a la lluvia que se mantuvo durante todo el día y por la tarde se intensificó, sin embargo sólo provocó nuevos encharcamientos." (Quintero M. & Bravo, 18)

Estas lluvias afectaron aproximadamente 1500 viviendas, provocó caída de árboles y severos encharcamientos en calles y avenidas, debido a esto, autoridades activaron alerta purpura, roja, naranja y amarilla en las diferentes demarcaciones afectadas.

III. "El día 13 de abril de 2023 la lluvia provoca inundaciones en calles de Tláhuac.

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) informó sobre la atención que se otorgó en algunos de los encharcamientos en la alcaldía Tláhuac, ocasionados por la lluvia del jueves.

Los encharcamientos se suscitaron en diversas colonias de la alcaldía Tláhuac, e incluso varias partes de la demarcación continuaron inundadas." (Sosa, 2023)

Derivado de lo anterior, surge el interés por realizar un análisis hidrológico para la alcaldía Tláhuac, en parte del pueblo San Juan Ixtayopan.

3. OBJETIVO

Realizar el análisis hidrológico en San Juan Ixtayopan, en la subcuenca RH-26Dp, desde el volcán Teuhtli hasta calle Lirios, alcaldía Tláhuac, Ciudad de México.

4. ESTUDIO HIDROLÓGICO

Con la finalidad de caracterizar hidrológicamente la zona de estudio, se obtuvieron las cuencas asociadas a cada escurrimiento de interés, tal como se muestra a continuación:

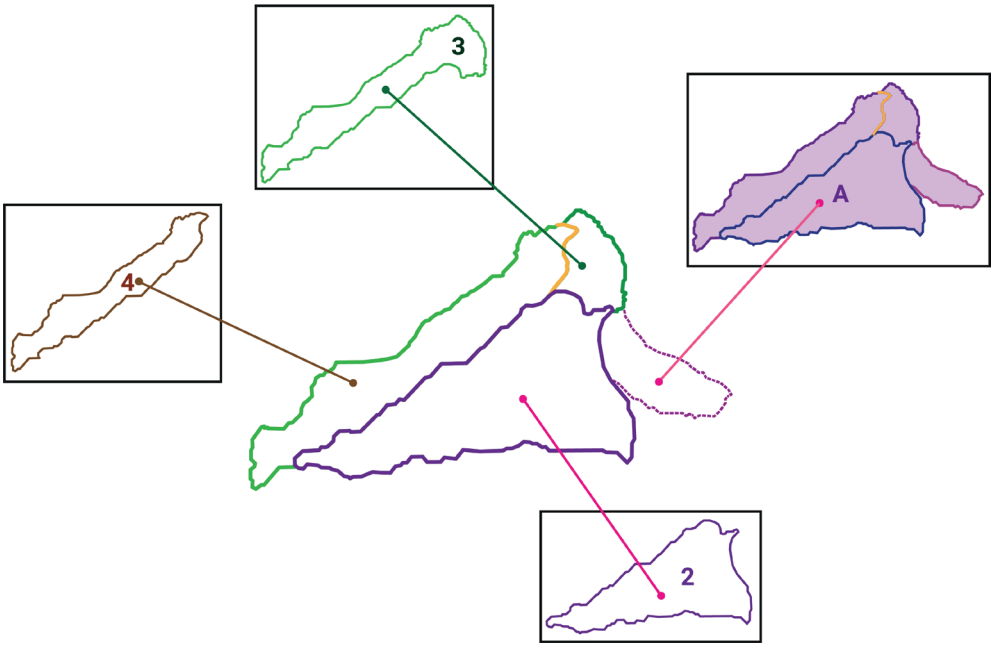


Figura 4.
Subcuencas asociadas a cada escurrimiento de interés
Fuente: Elaboración propia

4.1. Gastos de Diseño

Para este trabajo se emplearon los insumos siguientes:

- Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM), INEGI 2010;
- Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL), INEGI 2020;
- Estaciones Climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional-CONAGUA.

Así como el uso de los software siguientes:

- Visualizador de Escenarios de Lluvia (VELL), CENAPRED;
- QGIS, Sistema de Información Geográfica (SIG);
- Programa Ax, para análisis de funciones de probabilidad, CENAPRED;
- Google Earth.

4.2. Características Fisiográficas

Frecuentemente se presentan dificultades para disponer de información de la duración de la lluvia, debido a que no se cuenta con estaciones con pluviógrafo, ante esto, se debe aplicar un método indirecto que permita definir tanto la duración como la intensidad de las lluvias, para ello, es necesario conocer las características fisiográficas de la cuenca, tales como el área, longitud del cauce principal, pendiente media del cauce principal y los registros máximos de precipitación en 1 hora o 24 horas.

Este caso de estudio no cuenta con información de precipitaciones máximas anuales para diferentes intervalos de tiempo, esto impide establecer una ecuación de intensidad-duración-período de retorno, por lo que las intensidades de precipitación se determinarán con las ecuaciones de Kuichling.

Figura 5.
Parteaguas de la cuenca asociada a la zona de estudio
Fuente: Elaboración propia, con base en el MDE de INEGI, 2010

Para la ingeniería hidrológica, el escurrimiento superficial es bastante importante puesto que representa el agua que circula por la superficie terrestre y se concentra en los cauces.

La metodología curva número, elaborada por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos, es utilizada para determinar el escurrimiento superficial.

Las razones principales para el uso generalizado del método son:

- Aplicabilidad y eficacia aceptada.
- Requiere un reducido número de variables para su aplicación.
- Los resultados son similares con otros modelos de mayor complejidad.

El método curva número se emplea en todo tipo de cálculos hidrológicos.

Este método refleja la capacidad de la cuenca para producir escurrimiento durante una lluvia.

El valor del parámetro depende de los siguientes factores:

- Permeabilidad o grupo hidrológico de suelo;
- Uso de suelo o tipo de cubierta vegetal;
- Pendiente del terreno.

Para el caso de México, el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) es quien proporciona los Modelos Digitales del Terreno (MDT).

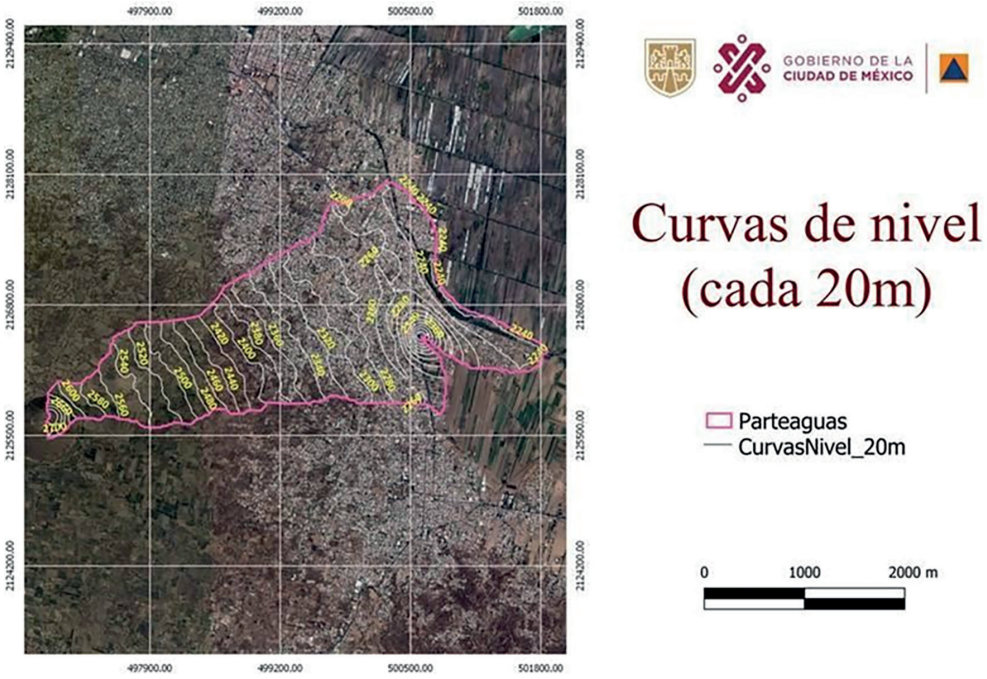


Figura 6.
Curvas de nivel a cada 20 metros
Fuente: Elaboración propia, con base en el MDE de INEGI, 2010

4.3. Determinación de las Características Fisiográficas en la Cuenca "A"

Con apoyo en las cartas topográficas del INEGI, se determinó el área de la cuenca (Ac), la longitud de la corriente principal (L), el desnivel topográfico (D), así como la pendiente media del cauce principal (S).

La pendiente media del cauce principal se calcula con la ecuación de Taylor Schwarz, tal como se describe a continuación:

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \cdots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 \qquad [1]$$

Donde:

l_i longitud del tramo i

S_i pendiente del tramo i

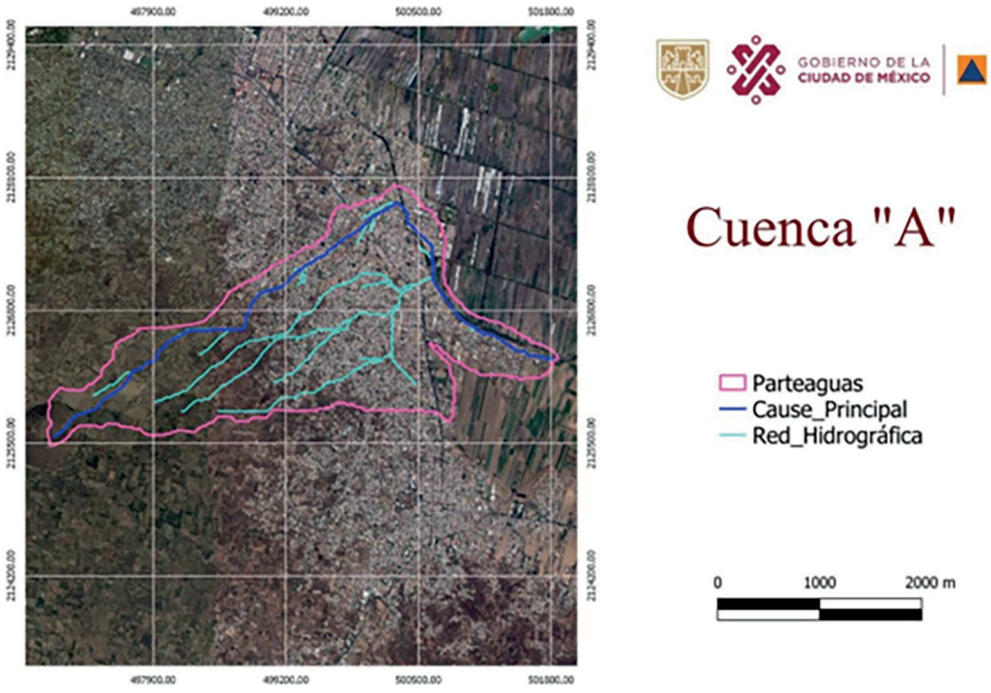


Figura 7.
Cuenca "A"
Fuente: Elaboración propia, con base en el MDE de INEGI, 2010

Los resultados se muestran a continuación:

Ac	5.7	Km^2
L =	7	Km
D =	462	m
S =	0.066	

Tabla 1.
Elementos en el parteaguas

4.4. Tiempo de Concentración en la Cuenca "A"

El tiempo de concentración es relevante en los modelos lluvia-escurrimiento, puesto que la duración de la lluvia se asume igual al tiempo de concentración de la cuenca, de modo que para esta duración la totalidad de la cuenca esté aportando al proceso de escurrimiento, por lo cual se espera que se presenten los caudales máximos.

A partir de diferentes ajustes empíricos de registros hidrológicos, fue que se generaron los métodos para determinar el tiempo de concentración de una cuenca, considerando de sus parámetros morfométricos, uno de estos métodos es el de Kirpich (Aparicio M, 2008) que depende de la longitud de la corriente principal (L), así como de la pendiente media del cauce principal (S), tal como se muestra a continuación:

$$t_c = 0.000325\left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}\right) \qquad [2]$$

Donde:

L longitud del cauce principal, (m)
S pendiente del cauce principal, (adimensional)
Otra forma para obtener el tiempo de concentración es con el método de Rowe (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2013):

$$t_c = \left(\frac{0.87\ L^3}{H}\right)^{0.385} \qquad [3]$$

Donde:

L longitud del cauce principal, (km)
H diferencia de elevación entre los extremos del cauce principal, (m)
Asimismo, el tiempo de concentración puede ser calculado con el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS).

$$t_c = \left(\frac{L^{1.15}}{3085\ D^{0.38}} \right)^{0.385} \quad [4]$$

Donde:

L longitud del cauce principal, (m)
D desnivel topográfico, (m)

Al consultar el portal del SIATL, que integra información hidrográfica de otras instituciones y tiene como objetivo proveer a los usuarios de herramientas de simulación de aforos o gastos de cuencas de forma sencilla; es posible identificar que el tiempo de concentración asociado a la cuenca es t_c = 0.87 horas.

La tabla siguiente muestra los valores de tiempo de concentración, obtenidos por los diferentes métodos y consultas.

Tabla 2.
Tiempos de concentración para las diferentes cuencas

Tiempo de concentración, hrs			
Kirpich	Rowe	SCS	SIATL
0.84	0.84	0.83	0.87

Para este análisis se empleará el valor de tiempo de concentración más pequeño, el cual corresponde al resultado del método SCS, siendo este el tiempo más desfavorable.

4.5. Número de Escurrimiento en la Cuenca "A"

Uno de los métodos para calcular el número de escurrimiento (N) fue desarrollado por los hidrólogos del U.S. Soil Conservation Service; para este método los valores de N pueden ser pesados o estimados por interpolación.

El número de escurrimiento depende del uso o cobertura, tratamiento o práctica, tipo y composición del suelo, pendiente y estado de humedad del terreno.

En la tabla 3 se muestran diferentes usos del terreno y se refiere a la cobertura de cualquier material (generalmente vegetal) que cubre el suelo y lo protege del impacto de la lluvia. La condición de la cobertura tiene que ver con las diversas prácticas agrícolas usadas (surco, nivel, terraza). Finalmente, los tipos de suelo a partir de los cuales se obtiene N, pueden ser 4 de acuerdo a la velocidad con que se infiltra el agua: A (alta), B (moderada), C (baja) y D (muy baja).

Uso de tierra	Condición de la cobertura vegetal de la superficie	Tipo de suelo			
		A	B	C	D
Bosques cultivados	Ralo, baja transpiración	45	66	77	83
	Normal, transpiración media	36	60	73	79
	Espeso, alta transpiración	25	55	70	77
Caminos	De tierra	72	82	87	89
	Superficie dura	74	84	90	92
Bosques naturales	Muy ralo, muy baja transpiración	56	75	86	91
	Ralo, baja transpiración	46	68	78	84
	Normal, transpiración media	36	60	70	76
	Espeso, alta traspiración	26	52	62	69
Descanso, sin cultivo	Muy espeso, muy alta transpiración	15	44	54	61
	Surcos rectos	77	86	91	94
Cultivos en surco	Surcos rectos	70	80	87	90
	Surco en curva de nivel	67	77	83	87
	Terrazas	64	73	79	82
Cereales	Surcos rectos	64	76	84	88
	Surco en curva de nivel	62	74	82	85
	Terrazas	60	71	79	82
Leguminosas sembradas con maquinaria o al voleo	Surcos rectos	62	75	83	87
	Surco en curva de nivel	60	72	81	84
	Terrazas	57	70	78	82
Pastizal	Pobre	68	79	86	89
	Normal	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
	Curva de nivel, pobre	47	67	81	88
	Curva de nivel, normal	25	59	75	83
	Curva de nivel, bueno	6	35	70	79
Potrero permanente	Normal	30	58	71	78
Superficie impermeable		100	100	100	100
Urbano			84	90	92
Agua			70	78	82

Tabla 3.
Tipo de suelos
Fuente: Aparicio M, 2008

Para diferentes tipos de superficie en la cuenca de estudio, el valor de N se determina a partir de la expresión siguiente:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^{n} N_i A_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \qquad [5]$$

Donde:

N número de escurrimiento
A área de la cuenca, (km^2)

Tipo Edafológico	Clasificación	Uso de Suelo y Vegetación	N	A (km^2)	N*A
ZU	D	ZONA URBANA	92	0.059	5.426
ZU	D	ZONA URBANA	92	0.329	30.249
ZU	D	ZONA URBANA	92	0.288	26.509
ZU	D	ZONA URBANA	92	0.043	3.946
ZU	D	ZONA URBANA	92	0.002	0.200
PI	B	PASTIZAL INDUCIDO	59	0.165	9.763
IAPF	D	AGRICOLA-PECUARIA-FORESTAL	83	0.000	0.025
IAPF	D	AGRICOLA-PECUARIA-FORESTAL	84	4.354	365.721
IAPF	D	AGRICOLA-PECUARIA-FORESTAL	84	0.484	40.651

Tabla 4.
Número de escurrimiento

btener el promedio pesado, el número de escurrimiento resulta ser igual a N = 84.3

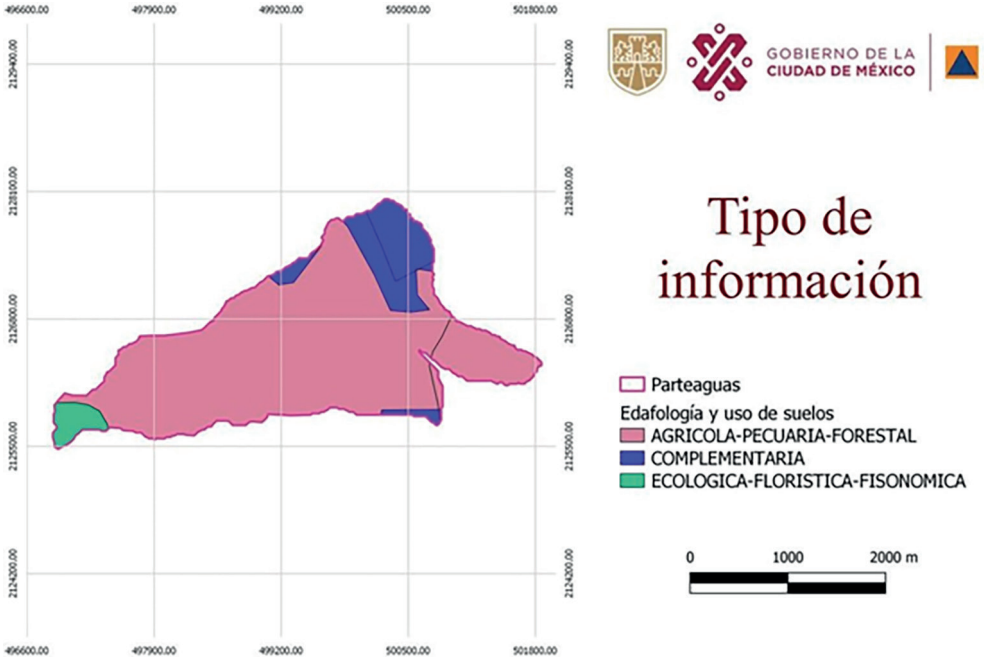


Figura 8.
Tipo de información
Fuente: Elaboración propia, con base a datos del INEGI, 2010

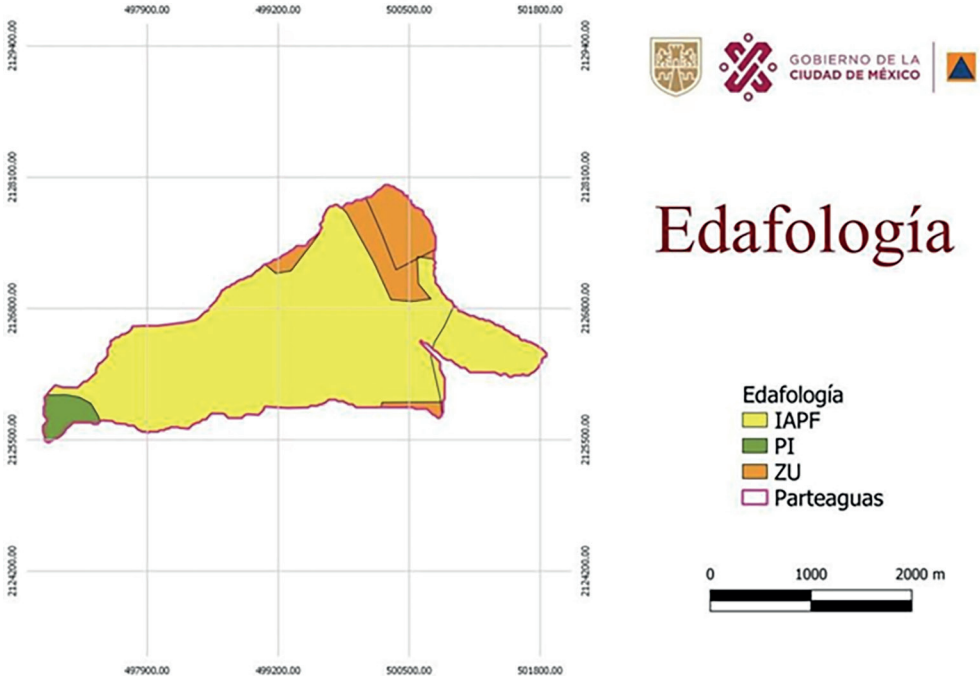


Figura 9.
Edafología
Fuente: Elaboración propia, con base a datos del INEGI, 2010

A través de la consulta al SIATL, el sitio web muestra que en la zona de estudio, el uso de suelo y vegetación se distribuye en urbano construido, agricultura de riego anual, agricultura de temporal anual y permanente, pastizal inducido y agricultura de temporal anual, tal como se muestra a continuación:

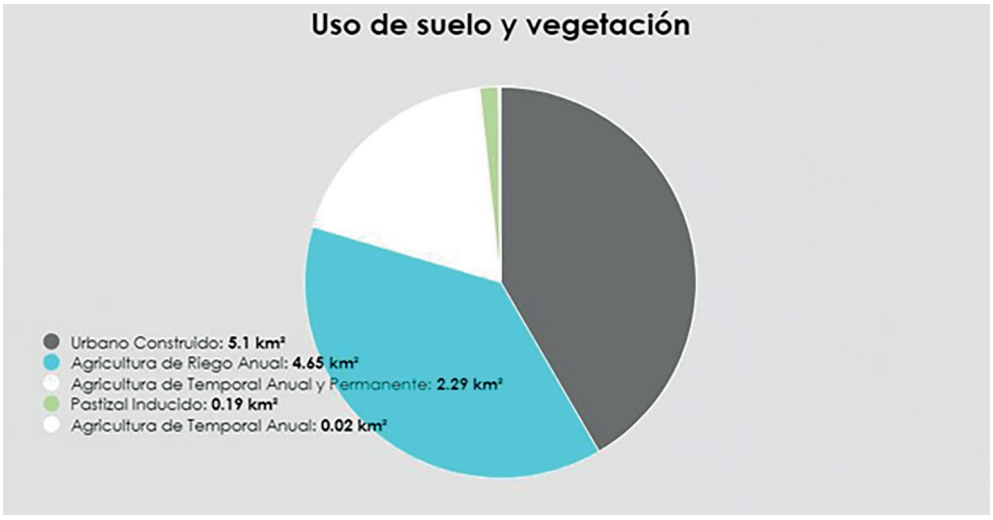


Figura 10.
Uso de suelo y vegetación
Fuente: SIATL de INEGI, 2020

INEGI realiza la cuantificación de la distribución de la vegetación y uso de suelo al hacer una intersección entre el área de drenaje seleccionada con la capa de Vegetación del Conjunto de Datos de Uso de Suelo y Vegetación serie VI, obteniendo un recorte de los polígonos de acuerdo a la forma del área de captación, para con esto recalcular las áreas y aplicar el conteo por su clasificación (SIATL, 2020).

La edafología identificada en este lugar está definida por phaeozem, gleysol, histosol y localidades.

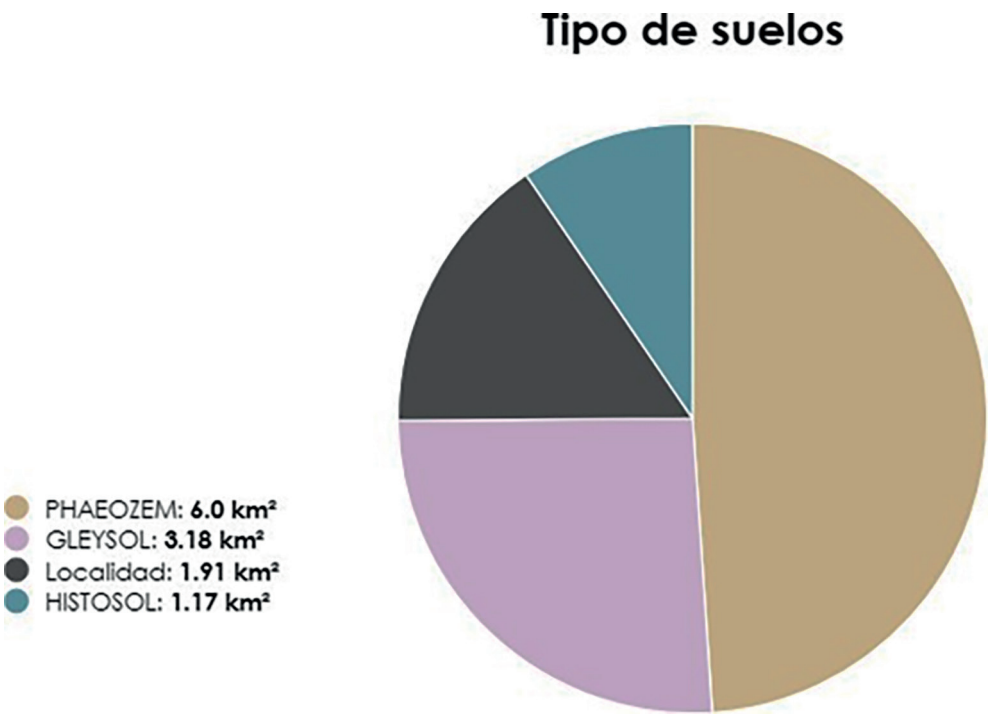


Figura 11.
Tipo de suelo Fuente: SIATL de INEGI, 2020

La cuantificación de la distribución de tipo de suelos, se realiza al hacer una intersección entre el área de drenaje seleccionada con la capa de Suelos del Conjunto de Datos de Edafología 1:250 000 serie I, obteniendo un recorte de los polígonos de acuerdo a la forma del área de captación, para con esto recalcular las áreas y aplicar el conteo por su clasificación (SIATL, 2020).

Aunado a ello, es posible observar que existe un porcentaje de 4.4% de humedales en la zona de interés.

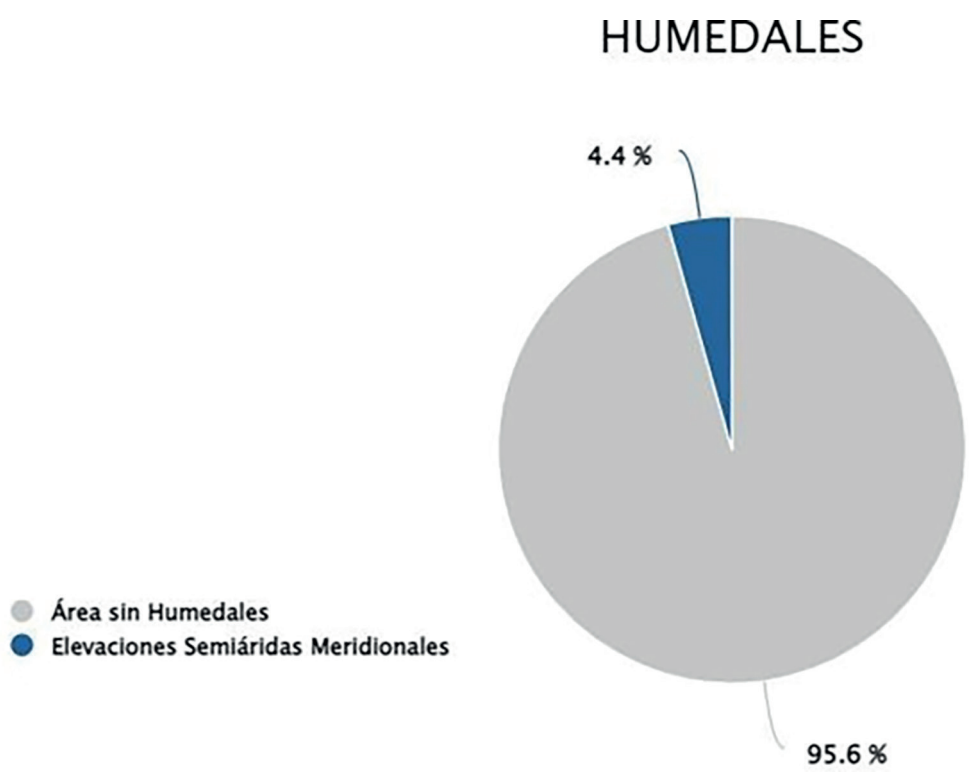


Figura 12.
Humedales Fuente: SIATL de INEGI, 2020

La cuantificación de la distribución de humedales, se realiza al hacer una intersección entre el área de drenaje seleccionada con la capa de Humedales Potenciales 1:250 000 serie I, obteniendo un recorte de los polígonos de acuerdo a la forma del área de captación, para con esto recalcular las áreas y aplicar el conteo por su clasificación (SIATL, 2020).

4.6. Determinación de la Lluvia Media de Diseño en la Cuenca "A"

Calcular la lluvia media de diseño tiene la finalidad de aportar parámetros cuantitativos a la planificación y al diseño hidrológico.

La lluvia media de diseño es un evento hipotético pluvial intenso, estadísticamente previsible para una duración dada y una recurrencia asignada.

Con la obtención de esta información es posible alimentar un modelo lluvia-escurrimiento, para posteriormente diseñar medidas estructurales para obras, así como para las no estructurales (planificación territorial).

Para este análisis y síntesis de lluvias máximas medidas en la zona de estudio se empleó el software VELL, SIATL y Ax.

4.6.1. Visualizador de Escenarios de Lluvia, VELL

El Visualizador de Escenarios de Lluvia (VELL), es un desarrollo informático que presenta los resultados de análisis de precipitaciones para diferentes duraciones y periodos de retorno, que funciona a través de la elección de la combinación entre los Organismos de Cuenca y las duraciones en un punto geográfico, para finalmente dar como resultado las precipitaciones para diferentes periodos de retorno.

La Coordinación Nacional de Protección Civil (CNPC), a través del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), interesada en la buena calidad de los estudios hidrológicos para elaborar mapas de peligro y riesgo por inundaciones, consideró pertinente elaborar mapas de isoyetas de altura de precipitación, con diferentes duraciones, asociados a distintos periodos de retorno, que proporcionan información importante para los Atlas de peligro o riesgo estatales y municipales, así como para el estudio de diferentes tipos de obras que caen en el ámbito de otras dependencias del gobierno federal, organismos descentralizados y privados.

La finalidad de este trabajo es:

- Complementar y validar la información pluviográfica disponible en el país, subsanando la carencia de la misma en algunas zonas y,
- Ofrecer información básica para la elaboración de mapas de peligro y riesgo por inundación, al asegurar el uso de criterios homogéneos durante la realización del análisis de frecuencias en cualquier cuenca del país.

VELL obtiene información climatológica de la base de datos del Climate Computing Project (CLICOM) y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) dependiente de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que cuenta con alrededor de 5,338 estaciones en todo el país, sin embargo, las estaciones empleadas en este software corresponden a 2,243 estaciones pluviométricas instaladas en diferentes puntos del país. El número de estaciones utilizadas fue definido posterior a la revisión de que el registro histórico de cada estación contara con al menos 20 años de información válida, hasta diciembre de 2010. Los periodos de retorno que se presentan son 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1000 y 2000 años y el valor de la altura de precipitación máxima asociada con cada isoyeta está expresado en milímetros.

El análisis estadístico y probabilístico de la información se genera a través de la distribución Normal, Exponencial, Lognormal de 2 y 3 parámetros, Gama de 2 y 3 parámetros, Gumbel y Doble Gumbel. En tanto que para determinar la

bondad de cada una de las distribuciones de probabilidad de la serie de datos históricos, se usa el mínimo error estándar y se extrapola la precipitación para distintos periodos de retorno.

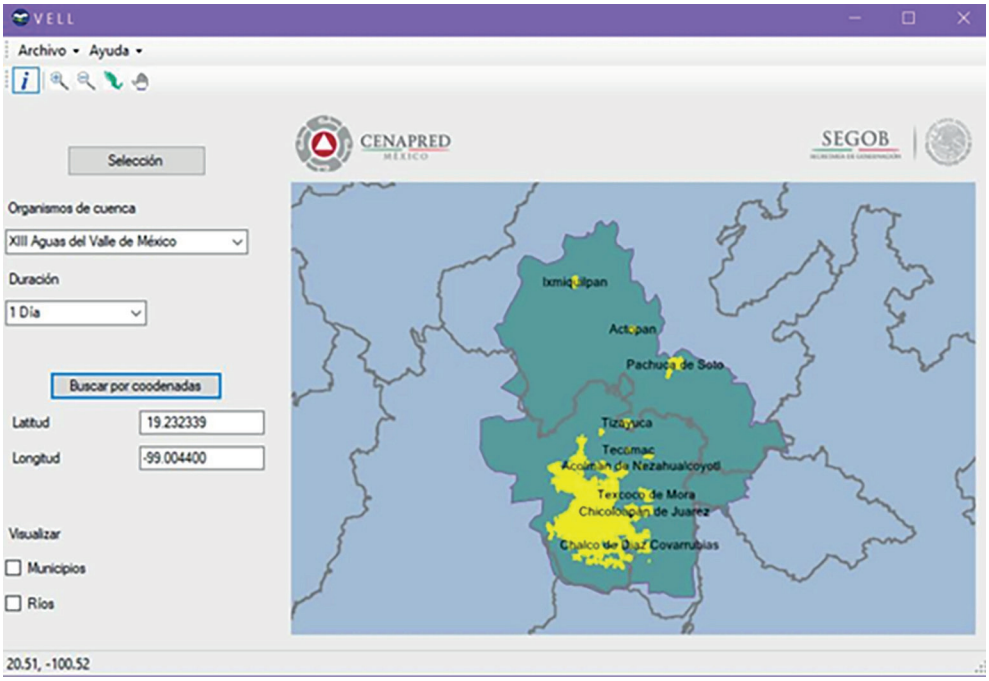


Figura 13.
Visualizador de escenarios de lluvia (VELL)

Los resultados de lluvias máximas, obtenidos del VELL, para la cuenca "A", hasta el periodo de retorno de 100 años, se muestran en la siguiente tabla:

Tr (años)	Hp (mm)
2	43.9
5	58.0
10	68.4
20	78.2
50	92.3
100	103.5

Tabla 5.
Lluvia de diseño, VELL

4.6.2. Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas, SIATL

Dada la necesidad de proveer información vectorial detallada del agua para el análisis de escasez, degradación y riesgo que representan las avenidas de ríos, deslaves e inundaciones ocasionadas por lluvias intensas, el INEGI generó la Red Hidrográfica a escala 1:50 000 la cual modela el drenaje superficial de una cuenca hidrográfica.

El SIATL es una herramienta gratuita con información hidrográfica superficial. La información contenida en este portal de internet tiene como objetivo que sus datos sirvan de sustento en la construcción de escenarios para diversos proyectos, tales como contingencias de eventos hidrometeorológicos, rutas de evacuación, construcción de infraestructura y ordenamiento, entre otros.

Este simulador tiene un funcionamiento interactivo, dado que además de ser un visualizador, la aplicación permite la búsqueda de localidades y rasgos hidrográficos, así como la simulación de flujos aguas arriba y aguas abajo.

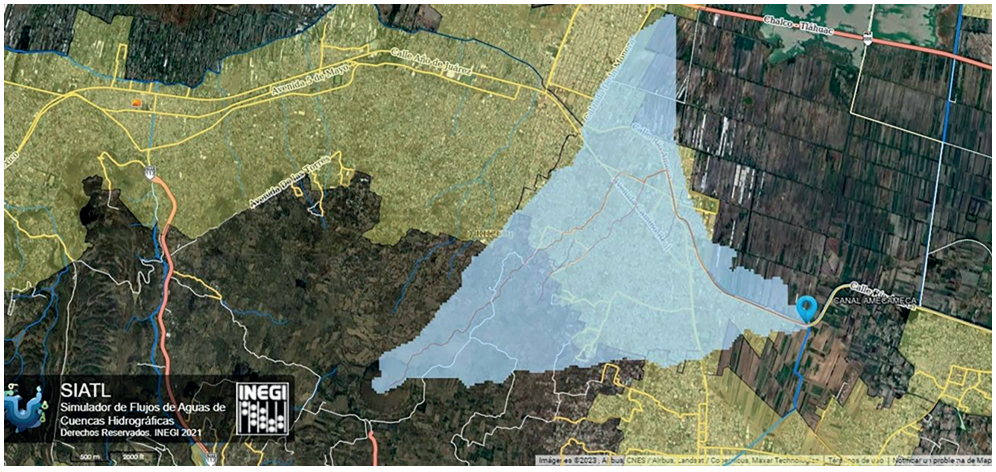


Figura 14.
Flujos de corriente arriba, San Juan Ixtayopan Fuente: SIATL de INEGI, 2021

Por otra parte, el SIATL proporciona el intervalo en el que se encuentra el coeficiente de escurrimiento.

La cuantificación de la distribución del coeficiente de escurrimiento, se realiza al hacer una intersección entre el área de drenaje seleccionada con la capa de Coeficiente de Escurrimiento del Conjunto de Datos de Aguas Superficiales 1:250 000 serie I, obteniendo un recorte de los polígonos de acuerdo a la forma del área de captación, para con esto recalcular las áreas y aplicar el conteo por su clasificación (SIATL, 2020).

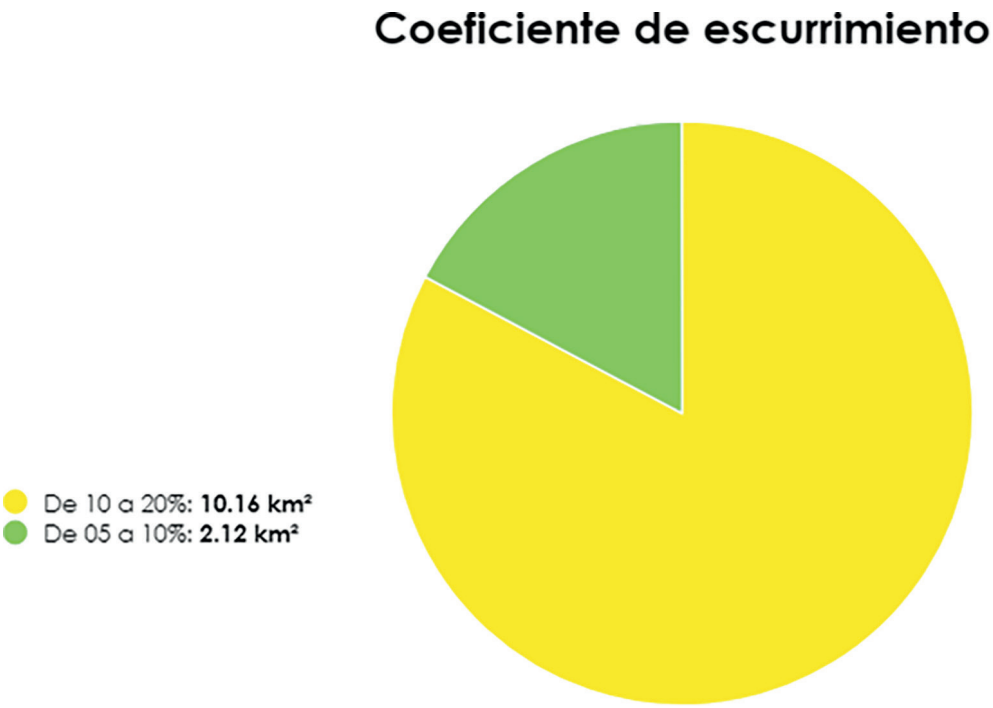


Figura 15.
Coeficiente de escurrimiento
Fuente: SIATL de INEGI, 2020

El valor del coeficiente de escurrimiento, se obtiene de acuerdo a los tipos de suelos, uso del suelo y pendiente, cuando el área de drenaje presenta diferencia entre estos, se genera un coeficiente para cada área parcial y posteriormente se calculará el promedio ponderado (SIATL, 2020).

De acuerdo a lo anterior, se aprecia que para un área igual a 2.12 km2 el coeficiente de escurrimiento se encuentra entre 5% y 10%, mientras que para un área igual a 10.16 km2 el coeficiente de escurrimiento se encuentra entre 10% y 20%.

A partir de la delimitación automática del parteaguas que realiza el SIATL (figura 14), el sitio web proporciona las siguientes características de la cuenca:

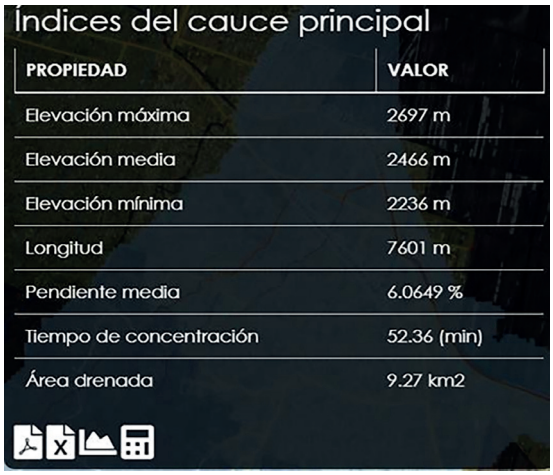


Figura 16.
Índices del cauce principal
Fuente: SIATL de INEGI, 2020

Una vez conocidos estos índices del cauce principal, es posible realizar el cálculo de la lluvia de diseño para cada periodo de retorno, a través de la calculadora que posee este sitio, tal como se muestra a continuación:

Figura 17.
Cálculo de la lluvia de diseño
Fuente: SIATL de INEGI, 2020

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tr (años)	Hp (mm)
2	35.53
5	45.94
10	53.08
20	59.91
50	59.43
100	65.16

Tabla 6.
Lluvia de diseño, SIATL

4.6.3. Análisis de funciones de probabilidad, Ax

AX.EXE Es un programa que ajusta distintas funciones de probabilidad a muestras de datos y calcula el error cuadrático de cada una de ellas respecto a la muestra.

Las funciones de probabilidad con las que trabaja el programa son Normal, Log-normal, Gumbel, Exponencial, Gamma y doble Gumbel. El cálculo de cada uno de los parámetros de las funciones de probabilidad es por momentos y por máxima verosimilitud. A continuación se describen las funciones de probabilidad típicas en hidrología.

- **Distribución Normal**

$$F(x) = \frac{1}{\beta\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\times} exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\alpha}{\beta}\right)^2\right] dx$$

El rango va de $-\infty \leq x \leq \infty$

α y β son los parámetros de esta distribución, los cuales corresponden a la media (μ) y a la desviación estándar (σ), respectivamente. Estos parámetros pueden sustituirse por los estadísticos muestrales correspondientes: $\mu = x$ y $\sigma = s$

Y los estimadores de los parámetros en términos de los momentos de la muestra son: $\alpha = \bar{x}$ y $\beta = sx$

- **Distribución Log-Normal**

$$F(x) = \frac{1}{\beta \times \sqrt{2\pi}} \int_{0}^{\times} exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Inx-\alpha}{\beta}\right)^2\right] dx$$

El rango va de $\times > 0$

α y β son los parámetros de esta distribución, los cuales corresponden a la media (μ) y a la desviación estándar (σ), respectivamente. Estos parámetros pueden sustituirse por los estadísticos muestrales correspondientes: $\mu = x$ y $\sigma = s$.

Y los estimadores de los parámetros en términos de los momentos de la muestra son: $\alpha = \bar{y}$ y $\beta = sy$, para $y = Inx$

- **Distribución Valores Extremo tipo I (Gumbel)**

Los valores extremos son valores máximos o mínimos seleccionados de conjuntos de datos.

$$F(x) = exp\left[-exp\left(-\frac{x-\alpha}{\beta}\right)\right]$$

Donde el rango va de $-\infty \leq x \leq \infty$

Y los estimadores de los parámetros en términos de los momentos de la muestra son: $\beta = \frac{\sqrt{6}}{\pi} s_x \quad y \quad \alpha = \bar{x} - 0.5772\beta$

α y β son los parámetros de esta distribución, α es un parámetro de ubicación, β es un parámetro de escala.

- **Distribución Exponencial**

$$F(x) = 1 - exp\left[-\frac{x-\alpha}{\beta}\right]$$

El rango va de $x \geq \alpha$

α y β son los parámetros de esta distribución, los cuales corresponden a la media (μ) y a la desviación estándar (σ), respectivamente. Estos parámetros pueden sustituirse por los estadísticos muestrales correspondientes: $\mu = x$ y $\sigma = s$.

Y $\frac{1}{\beta}$ es la tasa media de ocurrencia de los eventos.

Los estimadores de los parámetros en términos de los momentos de la muestra son: $\beta = sx \; y \; \alpha = \bar{x}$

- **Distribución Gamma**

Está descrito por la distribución Gamma, la cual es la distribución de una suma de β variables aleatorias independientes e idénticas, distribuidas exponencialmente.

$$F(x) = \frac{1}{\alpha r(\beta)} \int_0^x \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right) dx$$

El rango va de $x \geq 0$

Y los estimadores de los parámetros en términos de los momentos de la muestra son: $\alpha = \frac{s_x^2}{x} \quad y \quad \beta = \frac{\bar{x}}{s_x^2} = \frac{1}{(C_y)^2}$

- **Distribución bivariada Gumbel Doble (BiGumbel Doble)**

Sea la función de distribución de probabilidad conjunta entre las variables aleatorias x, y, dada por la extensión bivariada del modelo logístico de Gumbel siguiente:

$$F(x,y) = exp\left\{\left[(-\ln F(x))^m + (-\ln F(x))^m\right]^{1/m}\right\}$$

Donde m es un parámetro de asociación dado por $m = \sqrt{\frac{1}{1-p}}$, $p =$ coeficiente de correlación lineal.

4.6.3.1. Precipitación media por el método de polígonos de Thiessen

Para determinar la lluvia media de diseño en la cuenca "A" por medio del programa Ax, es necesario conocer la información de precipitación diaria, dichos datos son obtenidos de las diferentes estaciones climatológicas. Para este caso de estudio, la cuenca "A" se encuentra rodeada por algunas estaciones climatológicas de la Ciudad de México y otras del Estado de México, tal como se muestra a continuación:

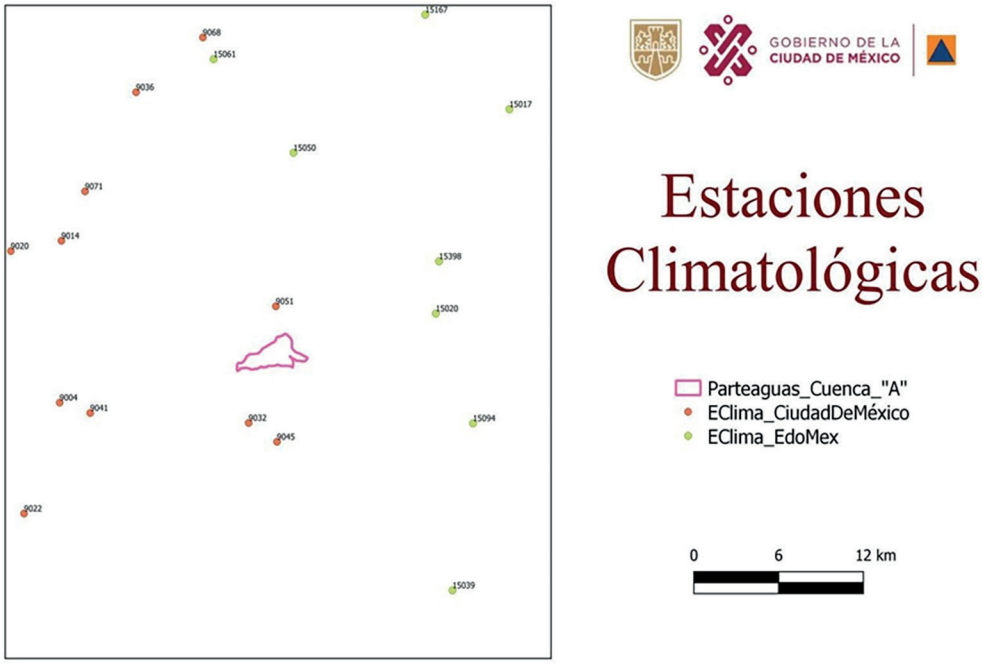


Figura 18.
Estaciones climatológicas cercanas a la cuenca "A"
Fuente: Elaboración propia

Como se puede visualizar en la figura 18, existen varias estaciones climatológicas, por lo que es necesario evaluar cuál es el valor de lluvia que se puede asociar al área en cuestión, para realizar este procedimiento existen muchos métodos, tal como el método de la media aritmética, el método de los polígonos de Thiessen, el método de isoyetas, el método del inverso de la distancia al cuadrado, entre otros.

Uno de los métodos más utilizados es el de los polígonos de Thiessen, el cual evalúa qué área de la cuenca le pertenece a cada estación climatológica, de esta manera se puede establecer una correspondencia de cada parte de la cuenca con una estación climatológica concreta.

A través de las herramientas de QGIS se generaron los polígonos. Para este análisis sólo se consideraron las estaciones en operación, ya que estas cuentan con un registro valido de información de más de 20 años.

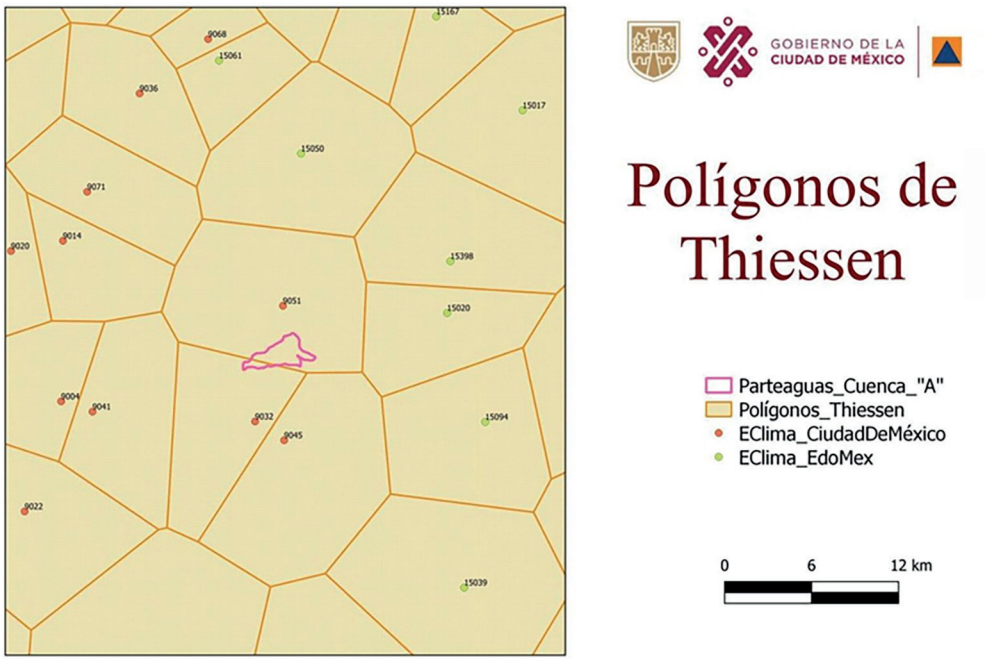


Figura 19.
Polígonos de Thiessen para estaciones climatológicas en operación Fuente: Elaboración propia

Con apoyo de la figura 19 se identifica que las estaciones que tienen influencia sobre la cuenca "A" son la estación Tláhuac (9051) y Milpa Alta (9032), ambas pertenecientes a la Ciudad de México.

La influencia de la estación 9051 es del 86% la cual abarca un área de 4.9 km^2, mientras que para la estación 9032 es del 14% con un área de 0.8 km^2.

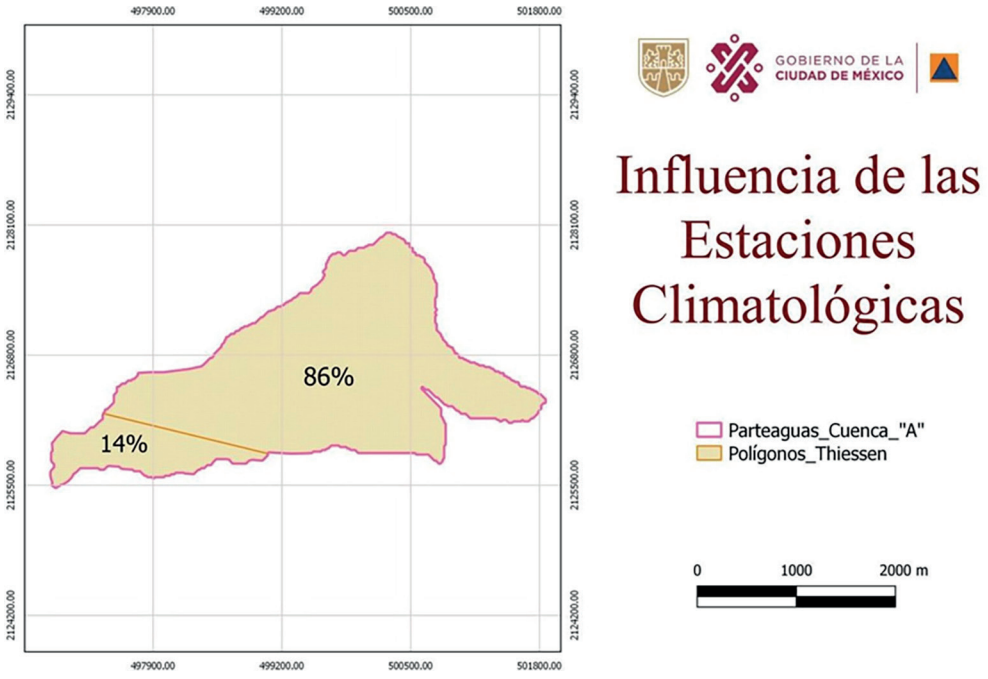


Figura 20.
Influencia de las estaciones climatológicas Fuente: Elaboración propia

Una vez que se conoce cuáles son las estaciones que tienen influencia sobre la cuenca de estudio, se realiza la búsqueda de los datos climatológicos diarios a través del Servicio Meteorológico Nacional-CONAGUA, y a partir de estos datos se determinan los máximos anuales de precipitación, los resultados se muestran a continuación:

Estación	9051	Situación	Operando
Nombre	Tláhuac	Latitud	019.263°
Estado	Distrito federal	Longitud	-099.004°
Municipio	Tláhuac	Altitud	2,240 msnm

Año	PRECIP (mm)	Año	PRECIP (mm)
1961	40.2	1990	0
1962	37	1991	0
1963	66	1992	0
1964	32	1993	0
1965	60	1994	0
1966	26	1995	0
1967	52	1996	16
1968	45	1997	38
1969	35	1998	30
1970	50	1999	30.5
1971	28	2000	36
1972	50	2001	36
1973	40	2002	26
1974	44	2003	39
1975	34	2004	0
1976	40	2005	25.5
1977	45	2006	43
1978	35	2007	29
1979	54	2008	22.5
1980	44	2009	0
1981	27	2010	20
1982	21	2011	55.6
1983	60	2012	36
1984	34	2013	37
1985	22	2014	35.5
1986	33	2015	27.5
1987	28	2016	43
1988	47	2017	32.2
1989	0		

Tabla 7.
Precipitación máxima anual para la estación 9051

Estación	9032	Situación	Operando
Nombre	Milpa alta	Latitud	019.191°
Estado	Distrito federal	Longitud	-099.022°
Municipio	Milpa alta	Altitud	2,420 msnm

Año	PRECIP (mm)	Año	PRECIP (mm)	Año	PRECIP (mm)
1929	10	1959	30	1989	93
1930	40	1960	43.5	1990	43.5
1931	40	1961	50	1991	0
1932	6	1962	34.5	1992	31.5
1933	0	1963	52.8	1993	21.5
1934	0	1964	85.5	1994	43.5
1935	0	1965	39	1995	47.4
1936	0	1966	38.2	1996	36.2
1937	0	1967	64	1997	43.1
1938	0	1968	35	1998	69.2
1939	0	1969	55.7	1999	0
1940	0	1970	61	2000	0
1941	37.1	1971	30.4	2001	0
1942	35	1972	40.8	2002	41.5
1943	40	1973	39	2003	68.5
1944	35	1974	29.5	2004	37.3
1945	35	1975	26.5	2005	47
1946	0	1976	51.5	2006	54
1947	0	1977	37	2007	52.4
1948	0	1978	33	2008	26
1949	0	1979	42	2009	0
1950	0	1980	40	2010	18.9
1951	0	1981	29.5	2011	65.5
1952	0	1982	27	2012	34
1953	0	1983	30	2013	39
1954	0	1984	49.9	2014	34
1955	60.5	1985	37.5	2015	20
1956	39.5	1986	32.8	2016	40
1957	35.5	1987	28.2	2017	32
1958	44.5	1988	40.5		

Tabla 8.
Precipitación máxima anual para la estación 9032

Una vez conocidos los valores máximos anuales de precipitación, estos se importan al programa Ax y se trabaja con los datos medidos puesto que para este análisis no se realizó algún procedimiento para obtener datos sintéticos.

Ax permite usar cada uno de los ajustes de funciones de probabilidad por separado, o bien, seleccionar la opción de cálculo global, donde calcula los errores cuadráticos de todas las funciones y los muestra en una tabla como la siguiente:

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	1.829	----------	1.829	----------
Lognormal	1.294	1.216	1.095	1.025
Gumbel	1.480	----------	1.136	----------
Exponencial	3.044	----------	22.588	----------
Gamma	1.167	1.200	1.162	1.159
Doble Gumbel	2.107			

Figura 21.
Resumen de errores estándar con base en la estación 9051
Fuente: Programa Ax

Dados los resultados de error cuadrático, se optó por elegir aquellos métodos que dieran el valor más pequeño para cada función, a fin de realizar el cálculo de los ajustes por separado, y extrapolar valores para diferentes períodos de retorno.

	Hp (mm)					
Tr (años)	***Normal***	***Lognormal***	***Gumbel***	***Exponencial***	***Gamma***	***Doble Gumbel***
2	37.2	35.6	35.2	33.8	36	34.2
5	46.7	46.2	46.1	44.1	46.1	49.1
10	51.6	52.8	53.2	51.9	52.2	54.8
20	55.7	59	60.1	59.7	57.6	58.8
50	60.3	66.8	69	70	64.2	63.6
100	63.4	72.6	75.7	77.8	68.8	67.1

Tabla 9.
Lluvia de diseño con base en la estación 9051

Se aplicó el procedimiento descrito anteriormente a la estación 9032, para obtener los errores cuadráticos de todas las funciones, los cuales se muestran a continuación:

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	4.483	----------	4.483	----------
Lognormal	3.245	3.304	3.571	4.495
Gumbel	3.144	----------	3.240	----------
Exponencial	4.101	----------	23.125	----------
Gamma	3.558	3.444	3.521	11111.000
Doble Gumbel	3.822			

Figura 22.
Resumen de errores estándar con base en la estación 9032
Fuente: Programa Ax

Se eligen nuevamente los métodos para los cuales el error cuadrático es más pequeño, se realiza el cálculo de los ajustes por separado, y se extrapolan los valores para diferentes períodos de retorno.

	Hp (mm)					
Tr (años)	*Normal*	*Lognormal*	*Gumbel*	*Exponencial*	*Gamma*	*Doble Gumbel*
2	40.8	38.3	38.3	36.2	38.4	36.4
5	53.4	51.7	51.6	49.9	52.2	52.7
10	60	60.4	60.4	60.3	60.9	63.1
20	65.4	68.8	68.8	70.7	68.9	71.4
50	71.6	79.5	79.7	84.4	78.8	81.1
100	75.7	87.6	87.8	94.8	85.9	88.2

Tabla 10.
Lluvia de diseño con base en la estación 9032

Para continuar con la aplicación del método de los polígonos de Thiessen, con la finalidad de conocer la precipitación media que cae en la cuenca, se debe calcular la relación entre área (Ai) y precipitación (Hpi):

$$Hp_{med} = \frac{1}{A_{total}} \sum_{i=1}^{n} (A_i)\,(Hp_i) \qquad [6]$$

De acuerdo con los valores que proporciona el programa Ax de error cuadrático, se identifica que para la estación 9051 el mejor ajuste es a través de la función Lognormal por máxima verosimilitud, mientras que para la estación 9032 el mejor ajuste es por la función Gumbel por momentos, por lo tanto, para realizar el cálculo de la precipitación media se toman los valores de precipitación correspondientes a los resultados de las funciones mencionadas:

Estación	**9051**			**9032**			
Área [km²]	**4.9**			**0.8**			
	Lognormal			**Gumbel**			**Hp**
Tr	**Hp**	**A*Hp**	**Hp med**	**Hp**	**A*Hp**	**Hp med**	**Thiessen**
años	**mm**	**km2*mm**	**mm**	**mm**	**km²*mm**	**mm**	**mm**
2	35.60	175.32	30.76	38.3	30.63	5.37	36.13
5	46.20	227.53	39.92	51.6	41.26	7.24	47.16
10	52.80	260.03	45.62	60.4	48.30	8.47	54.09
20	59.00	290.56	50.98	68.8	55.02	9.65	60.63
50	66.80	328.98	57.72	79.7	63.74	11.18	68.90
100	72.60	357.54	62.73	87.8	70.21	12.32	75.04

Tabla 11.
Precipitación media por el método de polígonos de Thiessen

4.6.3.2. Precipitación media por el método de isoyetas

Otro método que se emplea para el cálculo de la precipitación media es a través del uso de isoyetas.

El método de isoyetas se considera de los más precisos, puesto que toma en cuenta aspectos orográficos en el cálculo de la lluvia media sobre la cuenca de estudio. Este método consiste en realizar el trazado de curvas de igual precipitación (igual como se hace para estimar las curvas de nivel de un levantamiento topográfico).

Sobre la base de los valores puntuales de precipitación para cada periodo de retorno, en cada estación dentro de la cuenca, se construye una capa ráster como la que se muestra en la figura 23, y por interpolación se generan las líneas de igual precipitación.

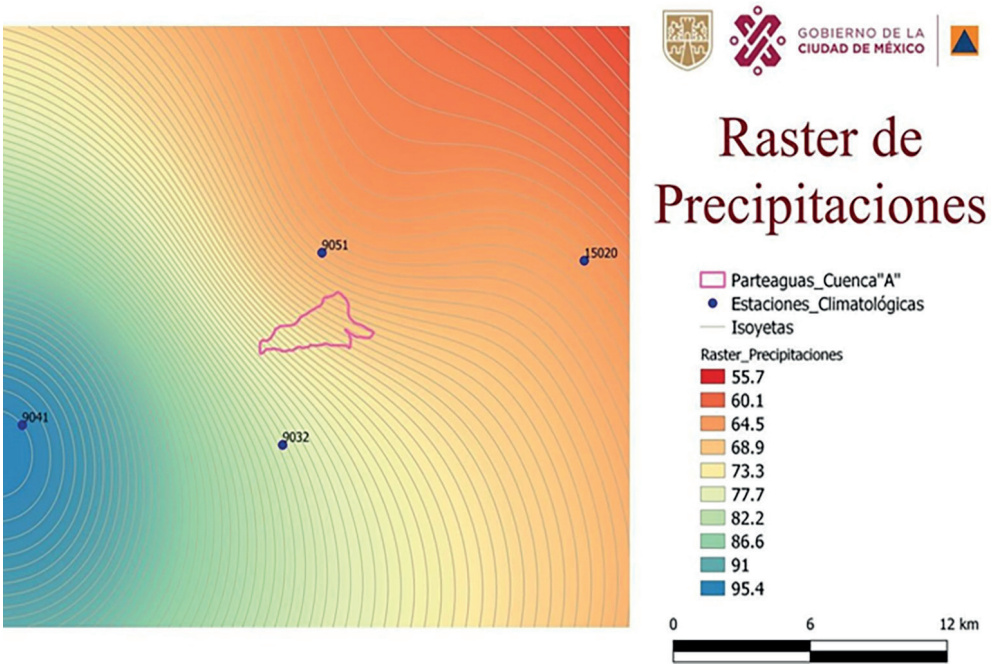
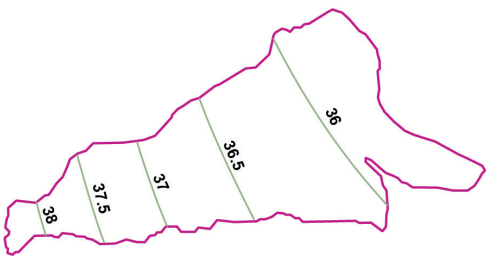
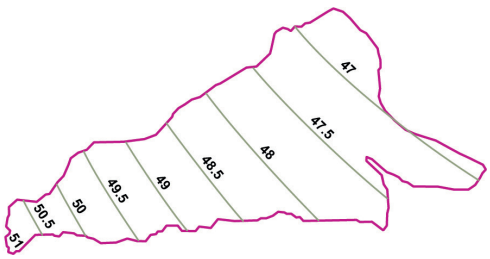


Figura 23.
Ráster de precipitaciones para el periodo de retorno de 50 años Fuente: Elaboración propia

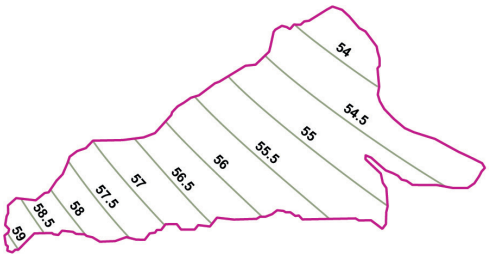
Un mapa de isoyetas en una cuenca, es un elemento básico dentro de cualquier estudio hidrológico, porque a través de este se puede realizar la cuantificación del valor medio de lluvia, además de presentar de manera gráfica la distribución de la precipitación sobre la zona, en el período considerado.



Isoyetas para el periodo de retorno de 2 años

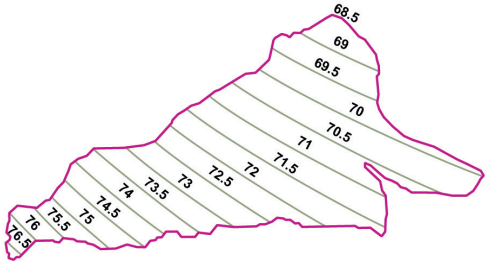


Isoyetas para el periodo de retorno de 5 años

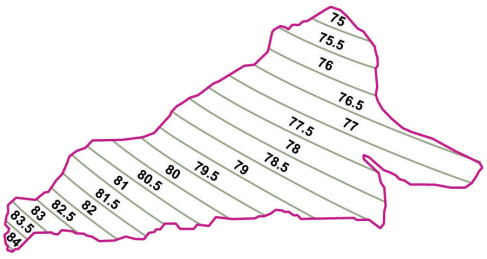


Isoyetas para el periodo de retorno de 10 años

Isoyetas para el periodo de retorno de 20 años



Isoyetas para el periodo de retorno de 50 años



Isoyetas para el periodo de retorno de 100 años

Figura 24.
Isoyetas de precipitación para los diferentes periodos de retorno
Fuente: Elaboración propia

Posterior a la construcción de las isoyetas, es necesario determinar el área entre ellas, para poder determinar la precipitación media con la expresión:

$$Hp_{med} = \frac{1}{A_{total}} \sum_{i=1}^{n} [(Hp_i + Hp_{i+1})/2]\,(A_i) \qquad [7]$$

Al aplicar la ecuación se requiere del valor medio de precipitación comprendido entre cada línea generada, así como el área entre estas mismas, a continuación se muestra un ejemplo:

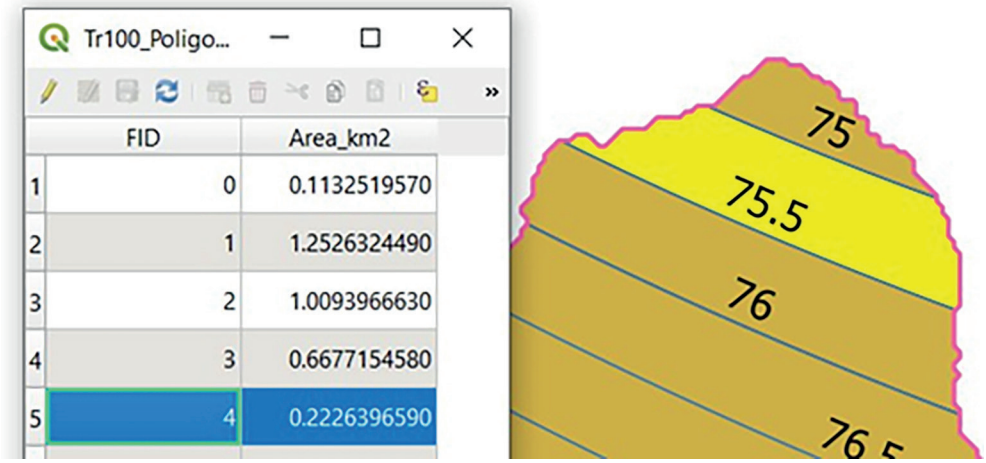


Figura 25.
Áreas comprendidas entre isoyetas, para el periodo de retorno de 100 años
Fuente: Elaboración propia

Para ejemplificar la obtención de la precipitación media, se tiene lo siguiente:

$$Hp_i = \frac{1}{5.7\ km^2}\left([(75\ mm + 75.5\ mm)/2](0.223\ km^2)\right) = 2.95\ mm$$

Este procedimiento se realiza hasta completar la sumatoria total de todas las áreas generadas a partir de las líneas de isoyetas, para cada periodo de retorno.

Los resultados de la lluvia media de diseño a través del empleo del método de isoyetas, se muestra a continuación:

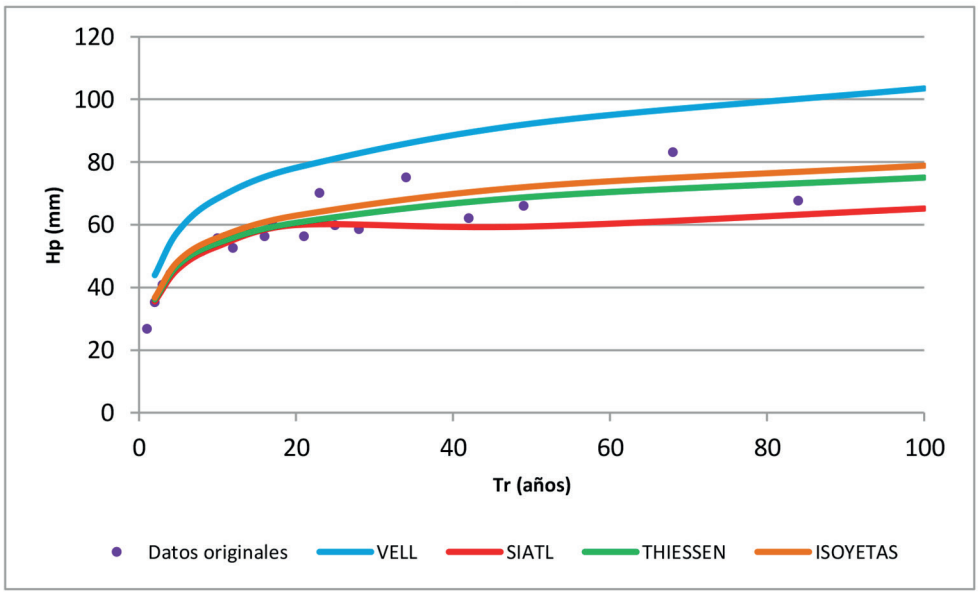
Tr	Hp
años	mm
2	36.66
5	48.41
10	55.84
20	62.93
50	72.20
100	78.85

Tabla 12.
Lluvia media por el método de isoyetas

En resumen, se muestran a continuación los resultados de lluvias de diseño para la cuenca "A", obtenidos a través del VELL, SIATL, polígonos de Thiessen e Isoyetas.

	Hp (mm)			
Tr (años)	VELL	SIATL	THIESSEN	ISOYETAS
2	43.9	35.53	36.13	36.66
5	58	45.94	47.16	48.41
10	68.4	53.08	54.09	55.84
20	78.2	59.91	60.63	62.93
50	92.3	59.43	68.9	72.20
100	103.5	65.16	75.04	78.85

Tabla 13.
Resumen de lluvia de diseño



Gráfica 1.
Lluvia de diseño por diferentes fuentes

De acuerdo a la Gráfica 1, los resultados de lluvia de diseño más altos son los obtenidos con el Software VELL, por lo que para el presente trabajo se tomó la decisión de realizar los análisis posteriores con estos resultados. Cabe mencionar que estos resultados son favorables para una simulación de escenarios de inundación.

4.7. Determinación de la Lluvia Efectiva en la Cuenca "A"

Con el objetivo de obtener la lluvia efectiva, se determina el valor del coeficiente de Kuichling (e), el cual depende del tiempo de concentración (tc), tal como se muestra a continuación:

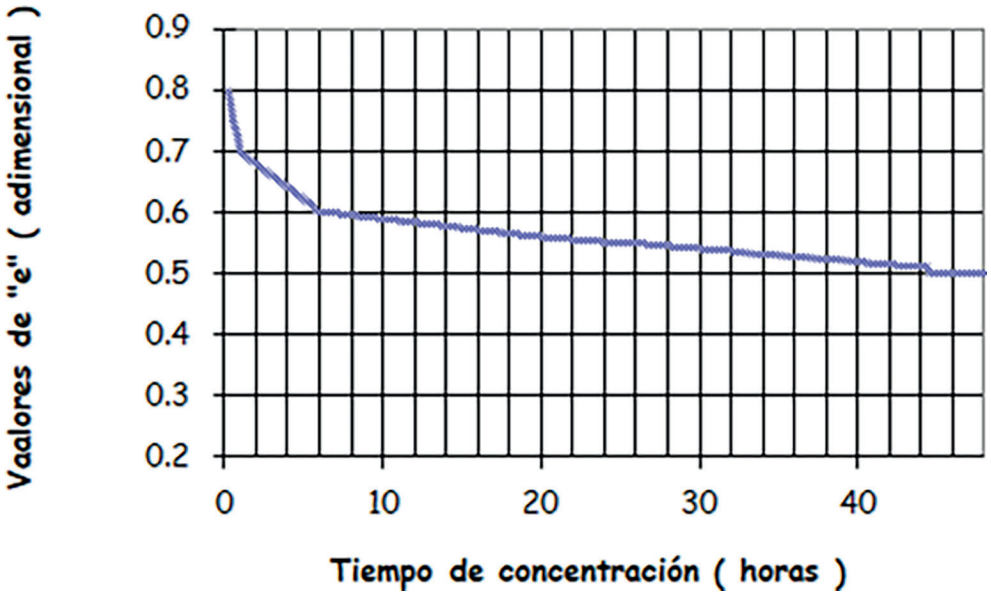


Figura 26.
Coeficiente de Kuichling (e)

Dado que el tiempo de concentración con el que se está trabajando es igual a $tc = 0.83$ horas, se realiza la proyección sobre el gráfico mostrado en la figura 26, de esta manera se determina que el valor del coeficiente de Kuichling corresponde a $e = 0.70$

Ahora, con apoyo de la siguiente expresión se calcula el término K:

$$K = \frac{\overline{hp}(1-e)}{24^{1-e}} \qquad [8]$$

Posteriormente, con apoyo de la ecuación [9] se calcula la lluvia efectiva de diseño.

$$Hp_d = \frac{KTc^{1-e}}{1-e} \qquad [9]$$

Tr (años)	K	Hpd media de diseño (mm)
2	5.05	17.19
5	6.67	22.71
10	7.86	26.78
20	8.99	30.62
50	10.61	36.14
100	11.89	40.53

Tabla 14.
Lluvia efectiva de diseño

Para obtener la lluvia en exceso, el coeficiente de escurrimiento e intensidad, se emplean las siguientes expresiones:

$$He = \frac{\left(Hp - \frac{508}{N} + 5.08\right)^2}{\left(Hp + \frac{2032}{N} - 20.32\right)} \qquad [10]$$

$$C = \frac{He}{Hp_d} \qquad [11]$$

$$I = \frac{K}{(1-e)t_c{}^e} \qquad [12]$$

Los resultados correspondientes se muestran en la tabla siguiente:

Tr (años)	He (mm)	C	I (mm/hrs)
2	1.08	0.06	20.78
5	2.89	0.13	27.46
10	4.63	0.17	32.38
20	6.53	0.21	37.02
50	9.61	0.27	43.70
100	12.30	0.30	49.00

Tabla 15.
Extrapolación de la lluvia en exceso, coeficiente de escurrimiento e intensidad

4.8. Cálculo de los Gastos de Diseño en la Cuenca “A”

Con los datos obtenidos anteriormente se procede a calcular los gastos de diseño a través de los métodos de la Fórmula Racional, del Hidrograma Unitario Triangular (HUT), método de Ven Te Chow y a través de la consulta al SIATL.

4.8.1. Método de la Fórmula Racional

$$Qd = 0.278\ C\ I\ A \qquad [13]$$

Donde:

Qd *gasto de diseño. (m^3/s)*

C *coeficiente de escurrimiento. Este valor representa la fracción de la lluvia que escurre en forma directa y varía entre 0 y 1*

I *intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, (mm/h)*

A *área de la cuenca, (km^2)*

4.8.2. Método de Hidrograma Unitario Triangular, HUT

$$Qd = \frac{0.556\ He\ A}{n\ t_p} \qquad [14]$$

Donde el tiempo pico (tp) se calcula con la ecuación [15].

$$t_p = 0.60\ t_c + \frac{\Delta t}{2} \qquad [15]$$

De esta manera, el tiempo pico es tp = 0.91 horas.

Considerando que el área es igual a 5.7 km^2, se determina que n es igual a 2.000, esto de acuerdo a la siguiente figura:

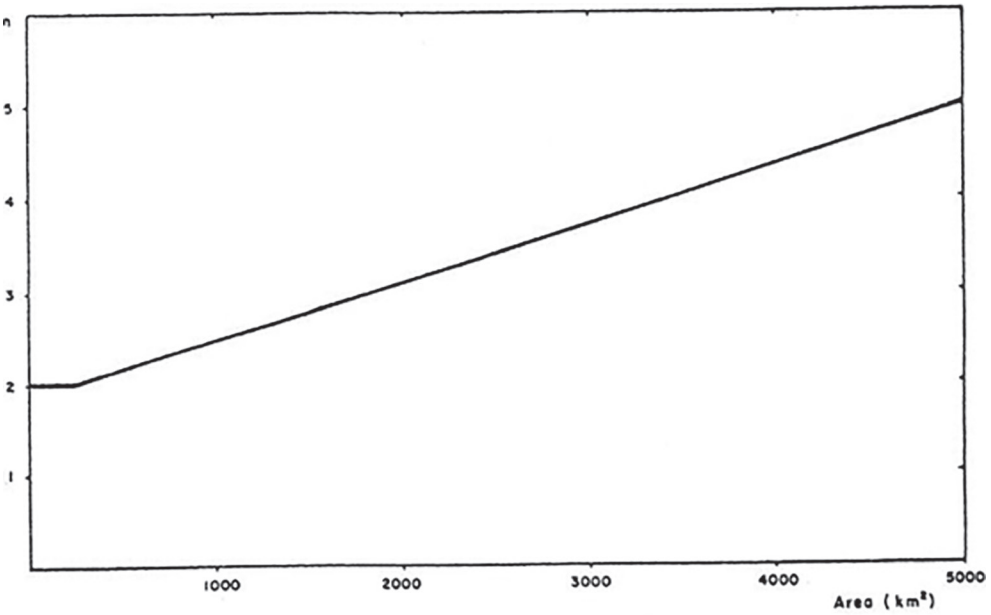


Figura 27.
Relación entre A y n

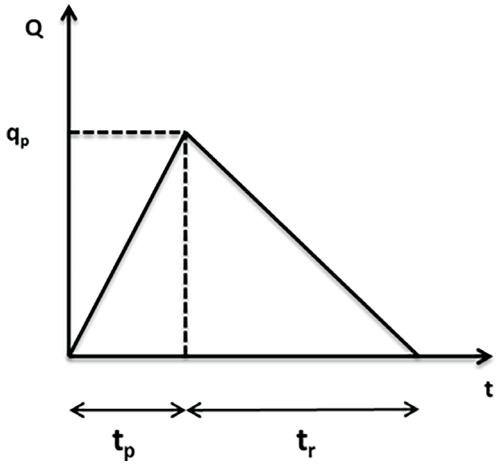


Figura 28.
Hidrograma Unitario Triangular (HUT)

4.8.3. Método de Ven Te Chow

$$Qd = AXYZ \qquad [16]$$

Donde:

- *X* *factor de escurrimiento*
- *Y* *factor climático*
- *Z* *factor de reducción*

Los términos X, Y, Z se calculan con las ecuaciones [17, 18 y 19] respectivamente.

$$X = \frac{He}{D} \qquad [17]$$

$$Y = 0.278 \qquad [18]$$

$$Z = \frac{Q_p}{Q_e} \qquad [19]$$

Y el tiempo de retraso se calcula como se muestra a continuación:

$$t_r = 0.00505\left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0.64} \qquad [20]$$

Donde:

tr *tiempo de retraso, (horas)*
L *longitud del cauce principal, (m)*
S *pendiente del cauce principal, (adimensional)*

Al aplicar la ecuación [20], el tiempo de retraso es igual a $tr = 0.79$ horas. La siguiente gráfica muestra la relación entre Z y tc/tr.

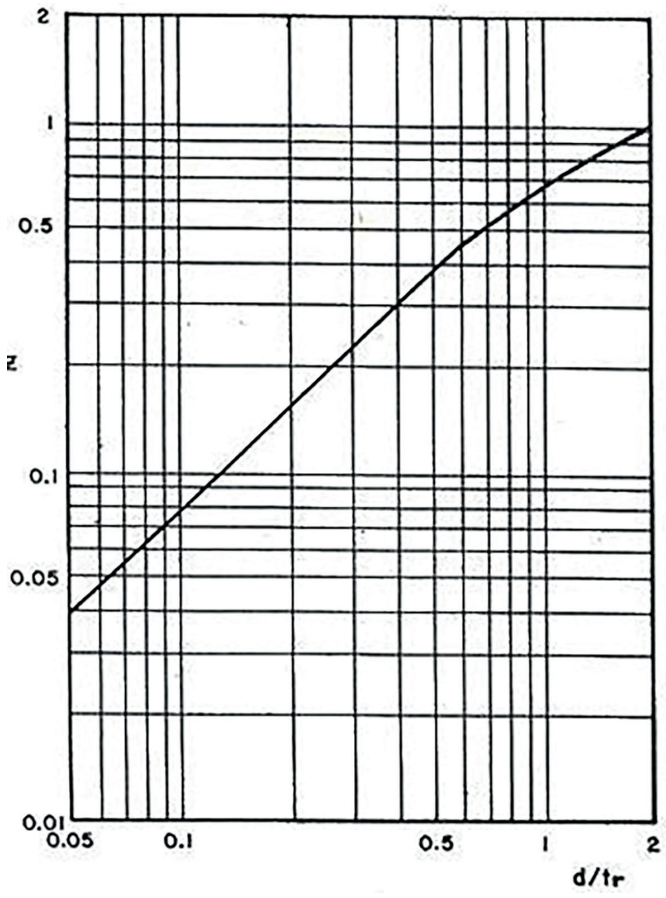


Figura 29.
Relación entre Z y Tc/Tr

Al consultar una vez más la calculadora del SIATL e ingresar los índices del cauce principal, es posible conocer los gastos de diseño para cada periodo de retorno, tal como se muestra a continuación:

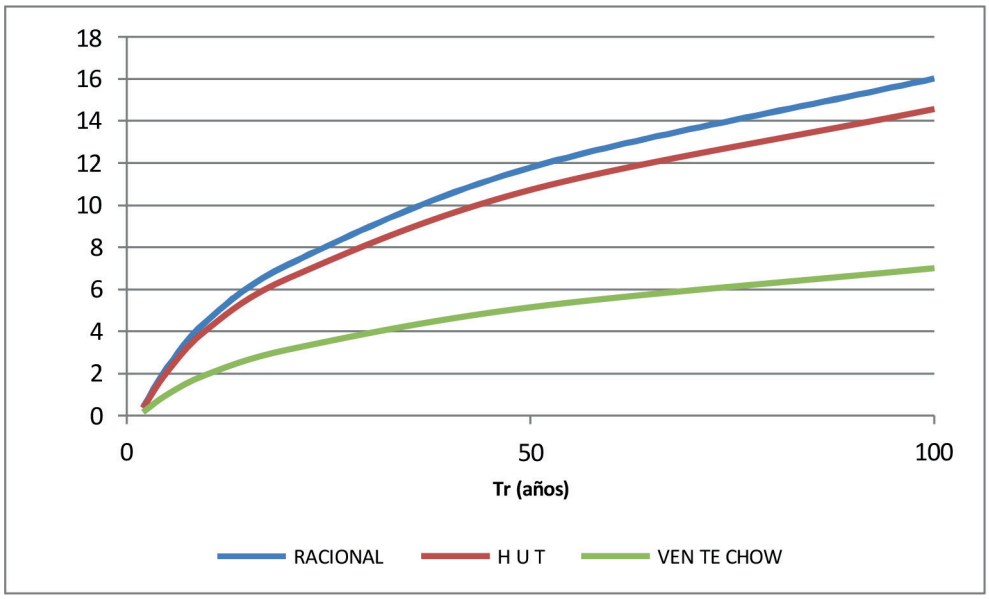
Figura 30.
Cálculo de gastos de diseño
Fuente: SIATL de INEGI, 2020

Los gastos de diseño inferidos para la cuenca "A", mediante la consulta al SIATL y por los modelos de lluvia-escurrimiento descritos anteriormente, para diferentes períodos de retorno, se muestran a continuación:

Tr (años)	GASTOS DE DISEÑO (m³/s)			
	RACIONAL	H U T	VEN TE CHOW	SIATL
2	2.081	1.892	1.440	9.30
5	5.565	5.059	3.852	12.02
10	8.917	8.106	6.171	13.89
20	12.562	11.420	8.695	15.67
50	18.487	16.807	12.796	15.55
100	23.665	21.514	16.380	17.05

Tabla 16.
Gastos de diseño para diferentes períodos de retorno

Los valores de gasto de diseño presentados por el SIATL son los valores más altos, sin embargo, esto es debido a los criterios considerados por esta aplicación, y por el área de cuenca, que es 62% más grande que el área considerada por el trazo manual del parteaguas, de forma que se descartaron los valores de este sitio web, y se toman en consideración los resultados obtenidos por el método racional, que ahora sería el que posee los valores más altos. Esta consideración se realiza ya que esto se traduce a que se toman los datos para la condición más desfavorable.



Gráfica 2.
Gastos de diseño

4.9. Hidrograma Sintético con base al Hidrograma Adimensional propuesto por el SCS

Los hidrogramas unitarios sintéticos han sido desarrollados con la finalidad de poder enfrentar problemas ante la falta de datos.

Estos modelos relacionan las características principales del hidrograma unitario sintético (caudal pico, tiempo pico, tiempo base) con características morfométricas de la cuenca (área, pendiente, longitud del cauce principal, etc.).

De acuerdo a las características morfométricas requeridas, es posible calcular el hidrograma unitario, el cual se convoluciona con la precipitación efectiva para producir el hidrograma de escurrimiento directo de la cuenca de estudio. Mientras que, si se requiere del caudal máximo asociado a un cierto periodo de retorno, la convolución se hace con la precipitación efectiva que tiene ese periodo de retorno y se asume que el pico del hidrograma de escurrimiento directo representa el caudal máximo de esa probabilidad de ocurrencia, para ello existen diferentes modelos que pueden ser usados, entre ellos se encuentran los siguientes:

- Hidrograma Unitario Adimensional
- Hidrograma Unitario Triangular
- Hidrograma Unitario Geomorfológico
- Método de Ven Te Chow

En este trabajo se empleará la metodología del Hidrograma Unitario Adimensional del SCS.

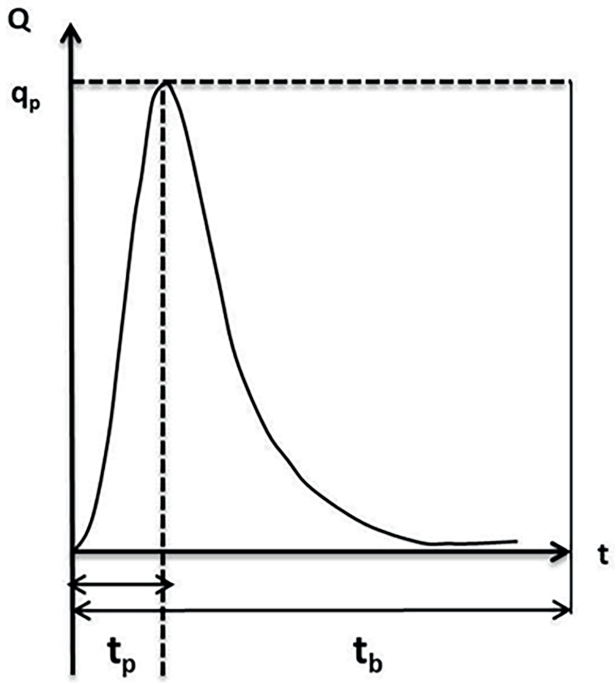


Figura 31.
Hidrograma Unitario Adimensional del SCS

T/Tp	Q/Qp
0.00	0.00
0.10	0.03
0.30	0.19
0.40	0.31
0.60	0.66
0.70	0.82
0.80	0.93
0.90	0.99
1.00	1.00
1.10	0.99
1.20	0.93
1.30	0.86
1.50	0.68
1.70	0.46
1.90	0.33
2.20	0.21
2.60	0.11
3.20	0.04
5.00	0.00

Tabla 17.
Coordenadas del HUA

Las características del HUA se obtienen a partir de las siguientes expresiones:

$$t_r = 0.6\, t_c \qquad [21]$$

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \qquad [22]$$

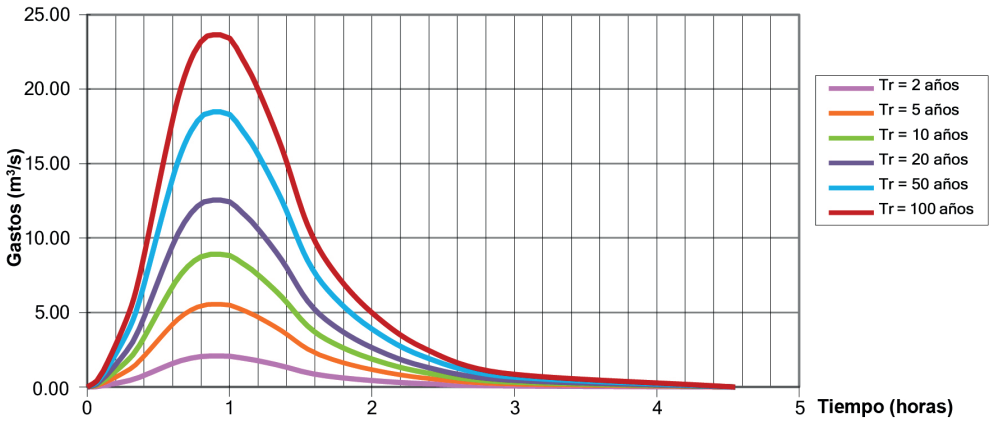
$$t_b = 2.67\, t_p \qquad [23]$$

$$q_p = \frac{0.208\ A}{t_p} \qquad [24]$$

Finalmente, se muestran los resultados de los hidrogramas obtenidos en relación a la cuenca "A".

Tiempo	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años	100 años
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.09	0.06	0.17	0.27	0.38	0.55	0.71
0.27	0.40	1.06	1.69	2.39	3.51	4.50
0.36	0.65	1.73	2.76	3.89	5.73	7.34
0.55	1.37	3.67	5.88	8.29	12.20	15.62
0.64	1.71	4.56	7.31	10.30	15.16	19.41
0.73	1.94	5.18	8.29	11.68	17.19	22.01
0.82	2.06	5.51	8.83	12.44	18.30	23.43
0.91	**2.08**	**5.57**	**8.92**	**12.56**	**18.49**	**23.67**
1.00	2.06	5.51	8.83	12.44	18.30	23.43
1.09	1.94	5.18	8.29	11.68	17.19	22.01
1.18	1.79	4.79	7.67	10.80	15.90	20.35
1.36	1.42	3.78	6.06	8.54	12.57	16.09
1.55	0.96	2.56	4.10	5.78	8.50	10.89
1.73	0.69	1.84	2.94	4.15	6.10	7.81
2.00	0.44	1.17	1.87	2.64	3.88	4.97
2.37	0.23	0.61	0.98	1.38	2.03	2.60
2.91	0.08	0.22	0.36	0.50	0.74	0.95
4.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gasto máximo	**2.08**	**5.57**	**8.92**	**12.56**	**18.49**	**23.67**

Tabla 18.
Hidrogramas de la cuenca "A"



Gráfica 3.
Hidrogramas Sintéticos con base al Hidrograma Adimensional propuesto por el SCS para la cuenca "A"

5. ANÁLISIS EN SUBCUENCAS 2, 3 Y 4

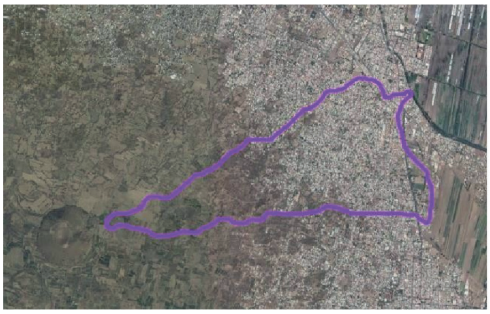
A continuación, se muestran los resultados de la caracterización hidrológica de las subcuencas asociadas a cada escurrimiento de interés.

5.1. Determinación de la Lluvia Media de Diseño en Subcuencas 2, 3 y 4

Al tomar en cuenta los criterios hechos para la cuenca "A", se hace uso del Visualizador de Escenarios de Lluvia (VELL), para conocer los valores de lluvia para las subcuencas 2, 3 y 4, dichos resultados se muestran a continuación:

	Subcuenca 2	Subcuenca 3	Subcuenca 4
Tr	$Hp_{max\ 24}$	$Hp_{max\ 24}$	$Hp_{max\ 24}$
años	*mm*	*mm*	*mm*
2	43.7	42.9	43.9
5	57.7	56.7	58
10	68	66.8	68.4
20	77.8	76.4	78.2
50	91.8	90.1	92.3
100	102.9	101	103.5

Tabla 19.
Lluvia de diseño para las subcuencas 2, 3 y 4



Subcuenca 2.

Subcuenca 3

Subcuenca 4

Figura 32.
Subcuencas de interés
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 20, se muestran las características fisiográficas de cada subcuenca.

	Subcuenca 2	Subcuenca 3	Subcuenca 4
Área, km^2	2.8	2.2	1.8
Longitud del cauce principal, km	3.5	5.4	4.4
Desnivel topográfico, m	292.0	463.0	462.0
Pendiente del cauce principal	0.085	0.087	0.104
Número de escurrimiento	83.2	82.4	80.5
Tiempo de concentración, hrs	0.44	0.61	0.49

Tabla 20.
Características fisiográficas de cada subcuenca

5.2. Cálculo de los Gastos de Diseño en Subcuencas 2, 3 y 4

Con la metodología del método racional, descrita previamente, se calculó el gasto de diseño para cada subcuenca y se obtuvo lo siguiente:

Tr (años)	GASTOS DE DISEÑO (m^3/s)			
	Cuenca "A"	Subcuenca 2	Subcuenca 3	Subcuenca 4
2	2.081	1.587	0.635	0.400
5	5.565	4.580	2.079	1.609
10	8.917	7.520	3.543	2.917
20	12.562	10.789	5.197	4.418
50	18.487	16.116	7.924	6.962
100	23.665	20.797	10.353	9.256

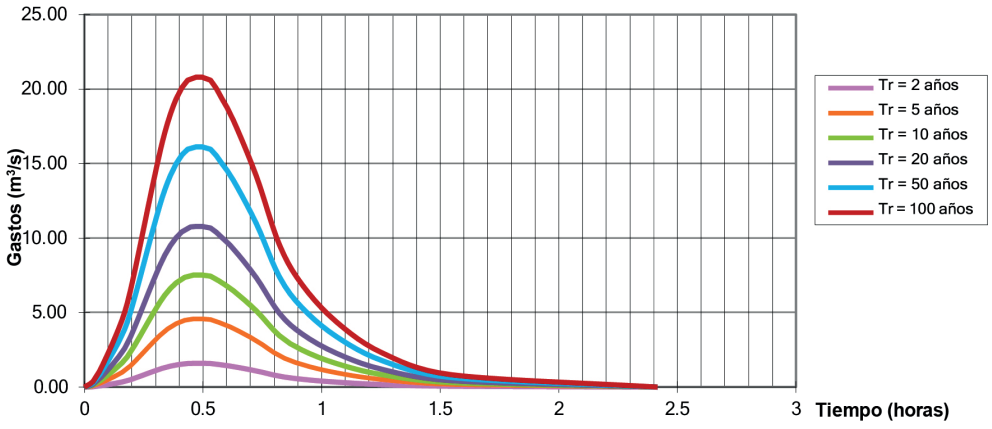
Tabla 21.
Gastos de diseño para diferentes períodos de retorno en las subcuencas, por el método racional

5.3. Hidrograma Sintético con base al Hidrograma Adimensional propuesto por el SCS para las Subcuencas 2, 3 y 4

A continuación, se muestran los resultados de los Hidrogramas Unitarios Adimensionales del SCS, en relación a la subcuenca 2.

Tiempo	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años	100 años
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.05	0.05	0.14	0.23	0.32	0.48	0.62
0.14	0.30	0.87	1.43	2.05	3.06	3.95
0.19	0.49	1.42	2.33	3.34	5.00	6.45
0.29	1.05	3.02	4.96	7.12	10.64	13.73
0.34	1.30	3.76	6.17	8.85	13.22	17.05
0.39	1.48	4.26	6.99	10.03	14.99	19.34
0.43	1.57	4.53	7.44	10.68	15.96	20.59
0.48	**1.59**	**4.58**	**7.52**	**10.79**	**16.12**	**20.80**
0.53	1.57	4.53	7.44	10.68	15.96	20.59
0.58	1.48	4.26	6.99	10.03	14.99	19.34
0.63	1.37	3.94	6.47	9.28	13.86	17.89
0.72	1.08	3.11	5.11	7.34	10.96	14.14
0.82	0.73	2.11	3.46	4.96	7.41	9.57
0.92	0.52	1.51	2.48	3.56	5.32	6.86
1.06	0.33	0.96	1.58	2.27	3.38	4.37
1.26	0.17	0.50	0.83	1.19	1.77	2.29
1.55	0.06	0.18	0.30	0.43	0.64	0.83
2.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gasto máximo	**1.59**	**4.58**	**7.52**	**10.79**	**16.12**	**20.80**

Tabla 22.
Hidrogramas de la subcuenca 2

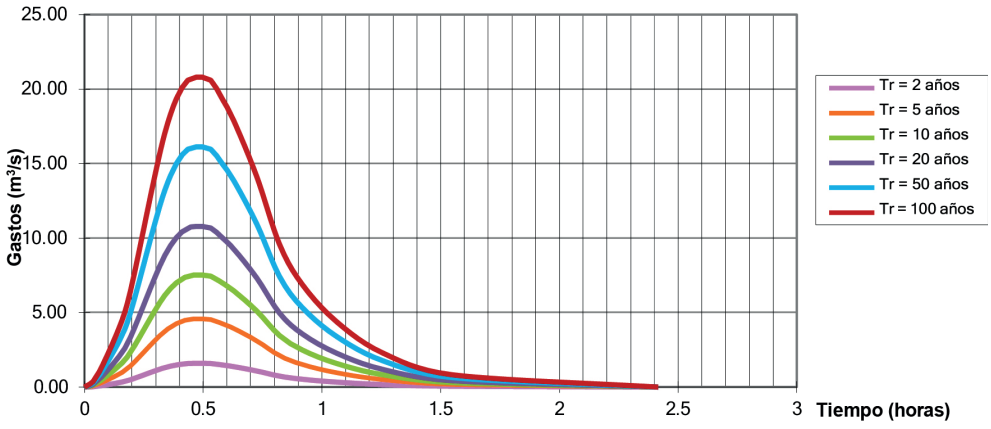


Gráfica 4.
Hidrogramas Sintéticos con base al Hidrograma Adimensional propuesto por el SCS para la subcuenca 2

A continuación, se muestran los resultados de los hidrogramas obtenidos, en relación a la subcuenca 3.

Tiempo	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años	100 años
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.07	0.02	0.06	0.11	0.16	0.24	0.31
0.20	0.12	0.40	0.67	0.99	1.51	1.97
0.27	0.20	0.64	1.10	1.61	2.46	3.21
0.40	0.42	1.37	2.34	3.43	5.23	6.83
0.47	0.52	1.70	2.91	4.26	6.50	8.49
0.54	0.59	1.93	3.30	4.83	7.37	9.63
0.60	0.63	2.06	3.51	5.14	7.84	10.25
0.67	**0.64**	**2.08**	**3.54**	**5.20**	**7.92**	**10.35**
0.74	0.63	2.06	3.51	5.14	7.84	10.25
0.81	0.59	1.93	3.30	4.83	7.37	9.63
0.87	0.55	1.79	3.05	4.47	6.81	8.90
1.01	0.43	1.41	2.41	3.53	5.39	7.04
1.14	0.29	0.96	1.63	2.39	3.65	4.76
1.28	0.21	0.69	1.17	1.71	2.61	3.42
1.48	0.13	0.44	0.74	1.09	1.66	2.17
1.75	0.07	0.23	0.39	0.57	0.87	1.14
2.15	0.03	0.08	0.14	0.21	0.32	0.41
3.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gasto máximo	**0.64**	**2.08**	**3.54**	**5.20**	**7.92**	**10.35**

Tabla 23.
Hidrogramas de la subcuenca 3

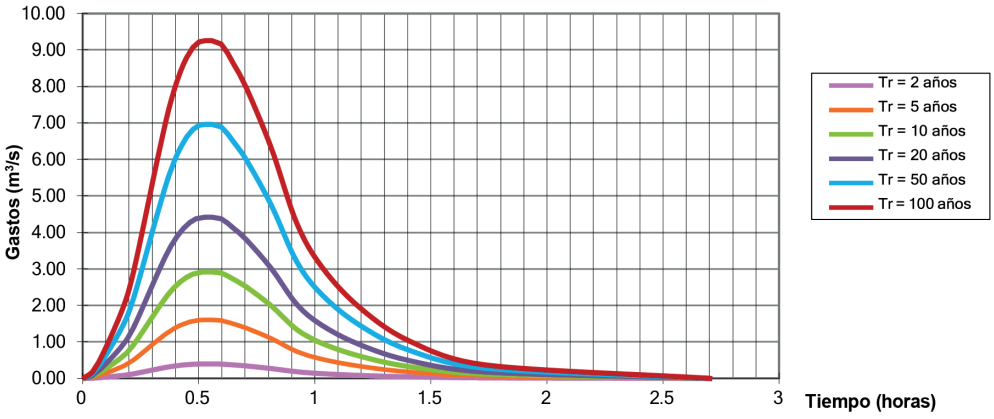


Gráfica 5.
Hidrogramas Sintéticos con base al Hidrograma Adimensional propuesto por el SCS para la subcuenca 3

A continuación, se muestran los resultados de los hidrogramas obtenidos, en relación a la subcuenca 4.

Tiempo	2 años	5 años	10 años	20 años	50 años	100 años
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.05	0.01	0.05	0.09	0.13	0.21	0.28
0.16	0.08	0.31	0.55	0.84	1.32	1.76
0.22	0.12	0.50	0.90	1.37	2.16	2.87
0.33	0.26	1.06	1.93	2.92	4.60	6.11
0.38	0.33	1.32	2.39	3.62	5.71	7.59
0.43	0.37	1.50	2.71	4.11	6.47	8.61
0.49	0.40	1.59	2.89	4.37	6.89	9.16
0.54	**0.40**	**1.61**	**2.92**	**4.42**	**6.96**	**9.26**
0.60	0.40	1.59	2.89	4.37	6.89	9.16
0.65	0.37	1.50	2.71	4.11	6.47	8.61
0.70	0.34	1.38	2.51	3.80	5.99	7.96
0.81	0.27	1.09	1.98	3.00	4.73	6.29
0.92	0.18	0.74	1.34	2.03	3.20	4.26
1.03	0.13	0.53	0.96	1.46	2.30	3.05
1.19	0.08	0.34	0.61	0.93	1.46	1.94
1.41	0.04	0.18	0.32	0.49	0.77	1.02
1.73	0.02	0.06	0.12	0.18	0.28	0.37
2.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gasto máximo	**0.40**	**1.61**	**2.92**	**4.42**	**6.96**	**9.26**

Tabla 24.
Hidrogramas
de la subcuenca 4



Gráfica 6.
Hidrogramas Sintéticos
con base al Hidrograma
Adimensional propuesto
por el SCS para la subcuenca 4

6. CONCLUSIONES

La información que proporciona el Modelo Digital de Terreno del INEGI utiliza cartas topográficas con una escala 1:50,000, cuya información es confiable sólo si el río es intermitente.

Un análisis más preciso supone la disposición de más y mejor calidad de información, como es el caso de un mayor detalle en el Modelo Digital de Terreno, o datos batimétricos del cauce, e inclusive la visita al sitio para recopilar información adicional sobre las condiciones del terreno.

En la actualidad existen varios modelos, algunos incluso más complejos que los mencionados en este trabajo. A través de estos se pueden observar los procesos hidrológicos e incorporar distintas variables meteorológicas y parámetros de una cuenca, lo que da como producto una serie de escurrimientos sintéticos y algunas veces de recarga de aguas subterráneas. Como se describió previamente, los datos de entrada básicos son una serie de cantidades de lluvia, sin embargo, también es posible incluir datos de nevadas, temperatura, radiación, evapotranspiración potencial, etc. Los modelos para cuencas urbanas pueden contener una descripción de su red de drenaje; los modelos para las zonas rurales pueden contener hidrogramas unitarios, curvas de distribución del área en el tiempo o subprogramas de circulación.

El SIATL es un SIG desarrollado como aplicación web geoespacial de acceso libre, en él se puede revisar el comportamiento de los recursos hídricos superficiales en las cuencas de México y generar un análisis hidrológico. Esta aplicación contiene diferentes capas las cuales se dividen en grupos como datos climáticos e hidrométricos, red hidrográfica, uso de suelo y vegetación, vías de transporte y datos topográficos a una escala 1:50000, datos geoestadísticos y sociales, división cartográfica, entre otras.

Debido a los criterios considerados por el SIATL, como se puede observar en el desarrollo de este trabajo, el área de la cuenca que toma en cuenta el SIATL es 62% más grande al área considerada por el trazo manual del parteaguas, es preciso tomar en cuenta que este último se construyó a partir de las curvas de nivel del terreno y de la demarcación de áreas de drenaje superficial. Dicho lo anterior, se puede concluir que aunque este programa es bastante útil y facilita el manejo de las funciones para el análisis hidrológico, es mejor hacer el uso de los datos de la delimitación de la cuenca obtenida por el modelador.

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, existen diferentes factores que hacen a un análisis hidrológico importante, sin embargo, la utilidad de este se vuelve clara cuando se usa como insumo para un análisis hidráulico, pues a través de este último se pueden conocer las zonas inundables.

Para realizar la modelización hidráulica de los cauces de estudio, se recurre a programas informáticos como HEC-RAS y a partir de los resultados dados por este, es posible elaborar planos del estudio (situación, cuenca, perfil longitudinal con lámina de agua, perfil transversal con márgenes inundados y planta de llanura de inundación).

Dicho lo anterior, es necesario continuar con un análisis hidráulico.

7. BIBLIOGRAFÍA

Aparicio M, F. J. (2008). *Fundamentos de Hidrología de Superficie.* México: Limusa.

Breña Puyol, A. F., & Jacobo Villa, M. A. (2013). *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial.* México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Flores, L. G. (15 de Marzo de 2021). *La Jornada.* Recuperado el 31 de Mayo de 2023, de https://www.jornada.com.mx/notas/2021/03/15/capital/entrega-tlahuac-225-mil-a-18-familias-afectads-por-lluvias-el-ano-pasado/

Quintero M. , J., & Bravo, E. (2020 de Septiembre de 18). *La Educación.* Recuperado el 31 de Mayo de 2023, de https://laeducacion.us/videos-tres-dias-de-historicas-lluvias-en-la-ciudad-de-mexico-en-algunas-zonas-el-agua-llevo-a-un-nivel-de-un-metro/

SIATL. (2020). Recuperado el 08 de 06 de 2023, de https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/

Sosa, S. (13 de Abril de 2023). *El Universal.* Recuperado el 31 de Mayo de 2023, de https://www.eluniversal.com.mx/metropoli/lluvia-provoca-inundaciones-en-calles-de-tlahuac/

Tláhuac Bienestar. (s.f.). Recuperado el 31 de Mayo de 2023, de http://www.tlahuac.cdmx.gob.mx/SAN-JUAN-IXTAYOPAN/

GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

CAPITAL DE LA TRANSFORMACIÓN

SGIRPC