



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de inundaciones:
Microcuenca Presa San
Francisco**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Jesús Reyes Castillo

DIRECTORA DE TESIS

Ing. Thalía Alfonsina Reyes Pimentel



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

*“Oh, alma mía,
no aspire a la vida inmortal,
pero agota el campo de lo posible”*

Albert Camus, 1942

Dedicado a...

A Margarita Castillo Gómez, mi mamá, quien a lo largo de toda mi vida me ha brindado su apoyo incondicional, me ha corregido y aconsejado, por todo su esfuerzo y cariño... Gracias mamá...

A mis hermanos Karen y Saúl, mis compañeros en tantas aventuras y travesuras, gracias por su compañía, por sus consejos y por siempre estar ahí para mí...

A Yolo, mi compañera, mi confidente y mi amiga, gracias por todo su cariño y comprensión, gracias por permitirme compartir tanto, por permitirme caminar a su lado...

A Liz, por todo su apoyo, por escucharme, por brindarme su amistad durante ya tantos años, por estar ahí en mis buenos y malos momentos, por ser mi mejor amiga...

A Bernabé, Edgar y Rolando, por su amistad a lo largo de toda esta etapa, por todos esos buenos momentos a lo largo de la carrera...

A todas las personas que he conocido y han formado parte de mi vida, que han impactado en mi forma de pensar, de sentir y percibir el mundo...

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería.

Al Lic. Aldo Fernando Trujillo Priego, por todas y cada una de sus clases, por sus lecturas y reflexiones, las cuales me impulsaron a conocerme y madurar como ser humano...

A la Lic. Tehny Carolina Ruiz Primo Martínez, porque sus clases cambiaron mi perspectiva de la sociedad en que vivimos, permitiéndome conocer nuevas perspectivas...

Al Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda, por su guía durante mi servicio social y por mostrarme que lo que he adquirido a lo largo de mi formación académica puede y debe tener un impacto positivo en la sociedad...

A la Dra. Clemencia Santos Cerquera, por todo lo que pude aprender de ella, por su orientación a lo largo de mi proceso de titulación, por sus consejos y sugerencias...

A los miembros de mi honorable jurado, la Dra. Nelly Lucero Ramírez Serrato, el M.C. David Escobedo Zenil, el M.C. Sergio Salinas Sánchez y el Ing. Alejandro García Serrano.

Al proyecto *Atlas de Riesgos* de la alcaldía Álvaro Obregón.

Contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Justificación	1
1.2 Hipótesis	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Zona de estudio.....	4
1.5 Inundaciones	6
1.6 Metodología	8
2. Hidrología	10
2.1 Cuenca y microcuenca	10
2.1.1 Número de curva	12
2.2 Cauce	14
2.2.1 Tiempo de concentración.....	15
2.3 Precipitación	19
2.3.1 <i>Outliers</i>	24
2.3.2 Distribuciones de probabilidad.....	25
2.4 Periodos de retorno	28
2.5 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.....	29
2.6 Ecuación general de la curva IDF.....	30
2.7 Hietograma de diseño.....	31
3. Modelación hidrológica.....	33
3.1 HEC-HMS.....	33
3.1.1 Caudal	33
3.2 HEC-RAS.....	36
4. Resultados	39
4.1 Profundidad de tirante.....	39
4.2 Velocidad de tirante	45
4.3 Discusión de resultados.....	51
5 Conclusiones	53

Índice de Figuras

Fig. 1. Eventos de desastre en la Alcaldía Álvaro Obregón.	2
Fig. 2. Distribución temporal de desastres hidrometeorológicos, alcaldía Álvaro Obregón.	2
Fig. 3. Ubicación y relieve de la microcuenca Presa San Francisco.	4
Fig. 4. Hidrograma (entrada y salida) para cuencas no urbanizadas (izquierda) y urbanizadas (derecha).	7
Fig. 5. Diagrama de flujo de la metodología.	9
Fig. 6 Precipitación y nivel del río. 9 de agosto del 2022.	16
Fig. 7 Precipitación y nivel del río. Primer evento del 9 de agosto del 2022.	17
Fig. 8. Ubicación de estaciones hidrometeorológicas.	20
Fig. 9 Precipitación histórica en la estación 9038.	21
Fig. 10 Precipitación histórica en las estaciones cercanas a la zona de estudio.	21
Fig. 11 Histograma de probabilidad de precipitación para las estaciones de interés.	22
Fig. 12 Registro completo (abajo) compuesto por la estación 9038 (arriba) y 9045 (centro).	23
Fig. 13 Máximos anuales del registro completo.	23
Fig. 14 Análisis de datos dudosos.	24
Fig. 15 Análisis de datos dudosos, con data corregida.	25
Fig. 16 Prueba de bondad de ajuste: método gráfico. Gráfico Q-Q (Superior) e Histograma (Inferior).	27
Fig. 17 Curva de Intensidad-Duración-Frecuencia para un periodo de retorno de 100 años.	30
Fig. 18 Hietograma de diseño para una precipitación de 3 horas y un TR de 100 años.	32
Fig. 19 Caudal de un río.	33
Fig. 20. Hietograma con infiltración y escurrimiento (Arriba) e Hidrograma (Abajo).	34
Fig. 21 Caudal modelado y nivel del río registrado con el sensor.	35
Fig. 22. Modelo Digital de Terreno, en rojo se observa la zona de conflicto. Interfaz de HEC-RAS.	36
Fig. 23. Visualización del canal creado. Interfaz de Hec-RAS.	37
Fig. 24. Corte transversal (arriba) y longitudinal (abajo) del canal.	37
Fig. 25. Diseño de la estructura tipo Culvert.	38
Fig. 26. Malla con celdas de 5x5m y 2x2m alrededor de la presa y puente respectivamente.	38
Fig. 27. Profundidad del tirante de agua, T5.	40
Fig. 28. Profundidad del tirante de agua, T10.	41
Fig. 29. Profundidad del tirante de agua, T25.	42
Fig. 30. Profundidad del tirante de agua, T100.	43
Fig. 31. Profundidad del tirante de agua, T500.	44
Fig. 32. Velocidad del tirante de agua, T5.	46
Fig. 33. Velocidad del tirante de agua, T10.	47
Fig. 34. Velocidad del tirante de agua, T25.	48
Fig. 35. Velocidad del tirante de agua, T100.	49
Fig. 36. Velocidad del tirante de agua, T500.	50

Índice de tablas

Tabla 1 Parámetros morfométricos de la cuenca	11
Tabla 2 Grupos hidrológicos del suelo (Soil Conservation Service, 1972)	13
Tabla 3 Número de Curva. (Natural Resources Conservation Service, 1986)	13
Tabla 4 Parámetros morfométricos del cauce	14
Tabla 5 Precipitación. 9 de agosto del 2022	18
Tabla 6 Nivel del río. 9 de agosto del 2022.	18
Tabla 7 Prueba de bondad de ajuste: Chi-Cuadrado.....	26
Tabla 8 Prueba de bondad de ajuste: Kolmogorov-Smirnov	26
Tabla 9 Precipitación máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno.	28
Tabla 10 Constantes de la ecuación general de la curva IDF	31
Tabla 11 Caudal para diferentes periodos de retorno	35
Tabla 12. Análisis temporal del desborde del río.....	39
Tabla 13. Velocidades máximas sobre Calz. Jalapa	45

1. Introducción

El Valle de México es una zona geográfica ubicada en el centro de México. Se trata de una cuenca endorreica donde, originalmente, se encontraban los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco. Estos cuerpos de agua y el acuífero eran alimentados por los escurrimientos y filtraciones provenientes de las sierras aledañas; sin embargo, el alto crecimiento demográfico y la urbanización han provocado cambios en el equilibrio hídrico de la cuenca, lo que, aunado a una mala gestión del agua, ocasiona eventos como inundaciones.

: Las inundaciones en la Ciudad de México son uno de los desastres naturales más investigados, esto debido a la frecuencia con la que ocurren, y los daños que ocasionan tanto a la población como a sus bienes materiales.

Un área de especial interés en el análisis de inundaciones en la Ciudad de México es la zona aledaña a la Presa San Francisco, en la delegación Álvaro Obregón, la cual funciona como vaso regulador del caudal del río San Francisco en temporada de lluvias. Debido a la creciente frecuencia de eventos de inundación y el peligro que esto supone para la población que habita alrededor de la presa, se considera necesario un estudio multifactorial que permita conocer las variables que aumentan la vulnerabilidad de la zona y ayude a identificar los sitios más expuestos a este tipo de peligro.

El presente trabajo se enfocará en delimitar las áreas más susceptibles a inundaciones dentro de la microcuenca en la que se encuentra la Presa San Francisco, y tratará de crear escenarios para diversos periodos de retorno que permitan definir las zonas más vulnerables a inundaciones.

1.1 Justificación

De acuerdo con la base de datos de DesInventar Sendai (UNDRR, s.f.), los desastres relacionados con inundaciones dentro de la alcaldía Álvaro Obregón representan el 18% del total de las afectaciones reportadas, mientras que los desastres relacionados con eventos de precipitación corresponden al 14%. (UNDRR, s.f.). En la figura 1 se observa la proporción entre eventos de desastres, donde el 32% está directamente relacionado con eventos de origen hidrometeorológico.



Fig. 1. Eventos de desastre en la Alcaldía Álvaro Obregón. Elaboración propia a partir de datos de DesInventar (UNDRR, s.f.)

Lo anterior denota la alta vulnerabilidad de la alcaldía ante eventos hidrometeorológicos. En la figura 2, se muestra un análisis temporal de los desastres relacionados únicamente con este tipo de eventos, es posible observar una tendencia al alza, especialmente después del 2005.

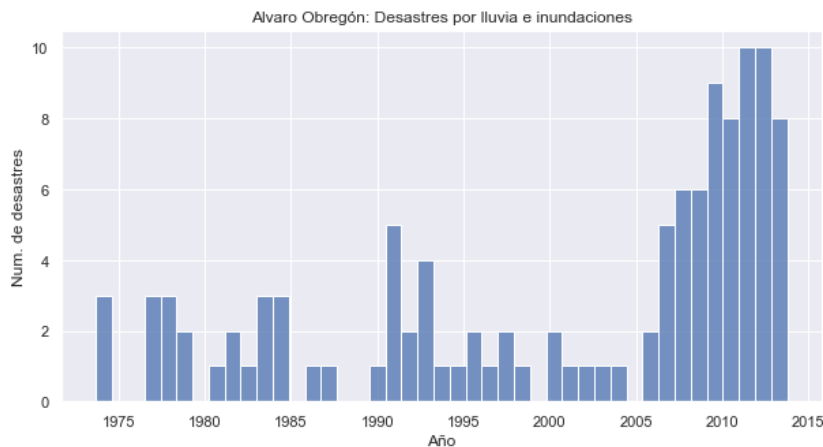


Fig. 2. Distribución temporal de desastres hidrometeorológicos, alcaldía Álvaro Obregón. Elaboración propia a partir de datos de DesInventar. (UNDRR, s.f.)

1.2 Hipótesis

Se plantea que el aumento en la intensidad de las precipitaciones dentro de la zona de estudio es la causa principal del aumento en los eventos de inundación en las inmediaciones de la Presa San Francisco.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Delimitar las zonas de inundación, profundidad del tirante de agua y velocidad del caudal para periodos de retorno de 5, 10, 25, 100 y 500 años dentro de la microcuenca Presa San Francisco.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar el análisis estadístico de los eventos de precipitación en la zona de estudio.
- Definir las características morfológicas de la microcuenca Presa San Francisco.
- Obtener los caudales de desfogue para la microcuenca para periodos de retorno de 5, 10, 25, 100 y 500 años.
- Caracterizar la profundidad y velocidad de los tirantes de agua en caso de inundación, por medio de los softwares HEC-HMS y HEC-RAS.

1.4 Zona de estudio

Álvaro Obregón es una de las 16 alcaldías que componen a la Ciudad de México, se encuentra al suroeste, y limita al poniente con el Estado de México. Cuenta con una superficie total de 96 km² y una altura media de 2373 msnm (INEGI, 2020).

El relieve de la alcaldía Álvaro Obregón es complejo, puede clasificarse en tres tipos principales, laderas montañosas, pie de monte y planicie lacustre, esta última con una altura de 2240 msnm, mientras que la parte alta de la Sierra de Las Cruces tiene una altura máxima de 3800 msnm. Esta diferencia de alturas propicia una notable diferencia en los climas, con temperaturas medias que oscilan entre los 15° y 10°C y precipitaciones medias anuales de 736 y 1300 mm (Lugo-Hubp, 1995).

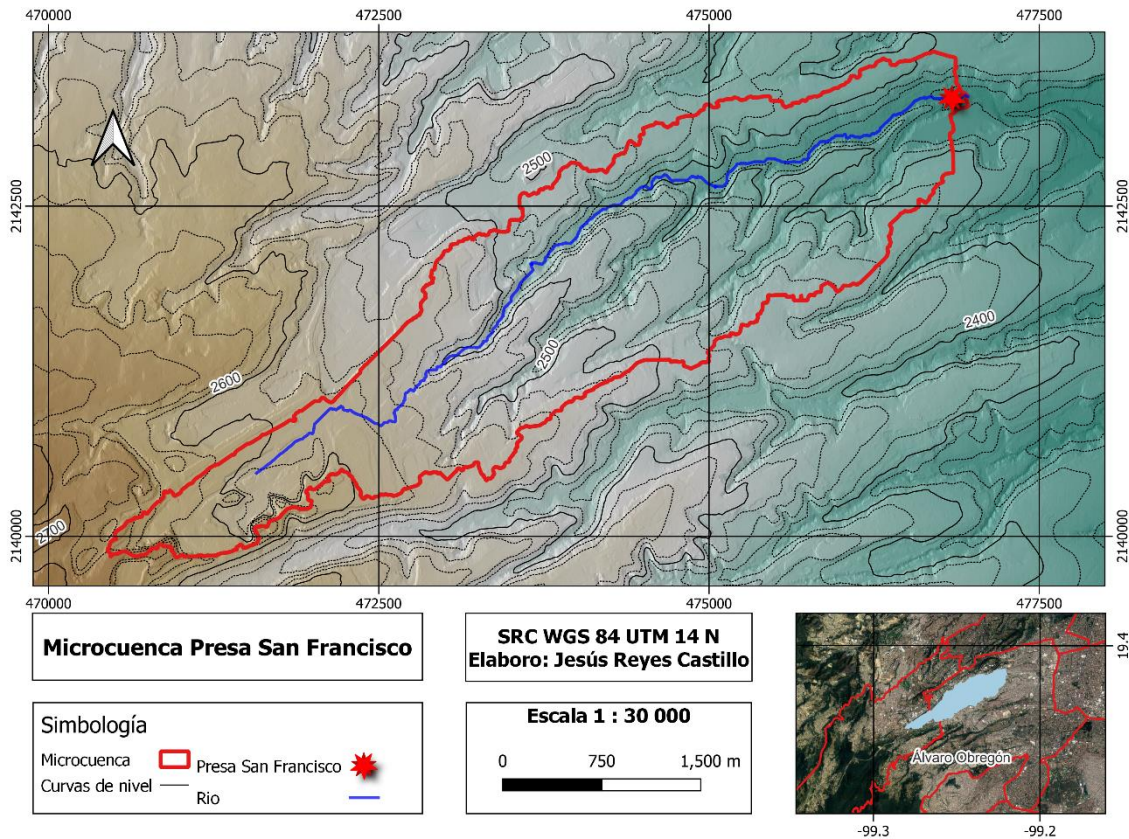


Fig. 3. Ubicación y relieve de la microcuenca Presa San Francisco. Elaboración propia a partir de datos de INEGI. (INEGI, 2020)

El relieve montañoso y la presencia de barrancas favorece la escorrentía concentrada, las cuales en algunas zonas son permanentes. Sin embargo, hay que destacar que el comportamiento hidrológico de la zona ha sido fuertemente modificado, debido a la presencia de obras civiles como presas, entubamientos, etc.

De acuerdo con el estudio de Lugo-Hubp (1995), de las 44 barrancas identificadas en la Ciudad de México, 14 se ubican dentro de la Álvaro Obregón, lo cual representa un 32% del total. Por norma general, las barrancas de esta alcaldía tienen sus cabeceras a una altitud menor a los 2700 msnm. Estas barrancas son producto de un proceso de erosión remontante.

Estos barrancos se clasifican en dos tipos, las mayores y las secundarias. Las primeras llegan a tener una erosión vertical de hasta 40 m, cuentan con corrientes permanentes, son de formación antigua y se encuentran controlados por fallas (Lugo-Hubp, 1995). Por otro lado, los barrancos secundarios son generalmente de poca profundidad (2-40 m), con corrientes de temporada y continúan en un proceso erosivo intenso, debido principalmente a la deforestación. (Lugo-Hubp, 1995).

1.5 Inundaciones

De acuerdo con CENAPRED (2004), las inundaciones se definen como aquellos eventos en los que existe un incremento en el nivel del agua en ríos o mares, lo que ocasiona una invasión de agua en sitios donde generalmente no cubre, lo que genera daños a la población y sus bienes materiales. Este aumento repentino del nivel del agua puede deberse a diferentes causas como precipitación, marea de tormentas o incluso fallas en estructuras hidráulicas.

Estos eventos suelen presentar avenidas, las cuales son un caudal extremo respecto al histórico de caudales para un determinado periodo de retorno, es importante mencionar que, si bien existen avenidas “ordinarias”, estas se refieren a los caudales máximos esperados para ciertos periodos de retorno (Gonzalez del Tanago, 2008). Suelen ser predecibles tanto en magnitud como en probabilidad, pues se encuentran dentro de lo previsto de acuerdo con modelos hidrológicos y registros históricos, a diferencia de las avenidas “extraordinarias”, las cuales exceden estos cálculos. (Gonzalez del Tanago, 2008)

Si bien es innegable la relación entre precipitación, avenidas e inundaciones, González del Tanago (2008) menciona que la interacción entre estos factores es más complicada, ya que en ella intervienen otros factores como el estado del drenaje, donde inundaciones graves pueden ser producto de avenidas de bajo periodo de retorno si las condiciones que permiten un adecuado drenaje del cauce no son las óptimas. Caso contrario, si el drenaje de la cuenca se encuentra en buen estado una precipitación de un alto periodo de retorno no provocará inundaciones.

Según estudios de CENAPRED (2004), otro factor que incrementa el riesgo a inundaciones es la modificación del uso de suelo de las cuencas, donde zonas que anteriormente eran parte del cauce o de la llanura de inundación, han sido ocupadas paulatinamente por asentamientos humanos.

Tal como se observa en la figura 8, el cambio de uso de suelo también modifica la infiltración y escurrimientos en la cuenca, lo que ocasiona que un mismo evento de precipitación tenga efectos diferentes en cuencas no urbanas y urbanas. En las primeras, ya que la infiltración es mayor, el caudal de salida es mucho menor al caudal de entrada y el tiempo de concentración es mayor. En el caso de las cuencas urbanizadas, ya que se favorece el escurrimiento sobre la infiltración, el gasto de salida es muy similar al de entrada y el tiempo de concentración es menor, disminuyendo el tiempo que tienen las autoridades para actuar ante este tipo de fenómenos. (CENAPRED, 2004)

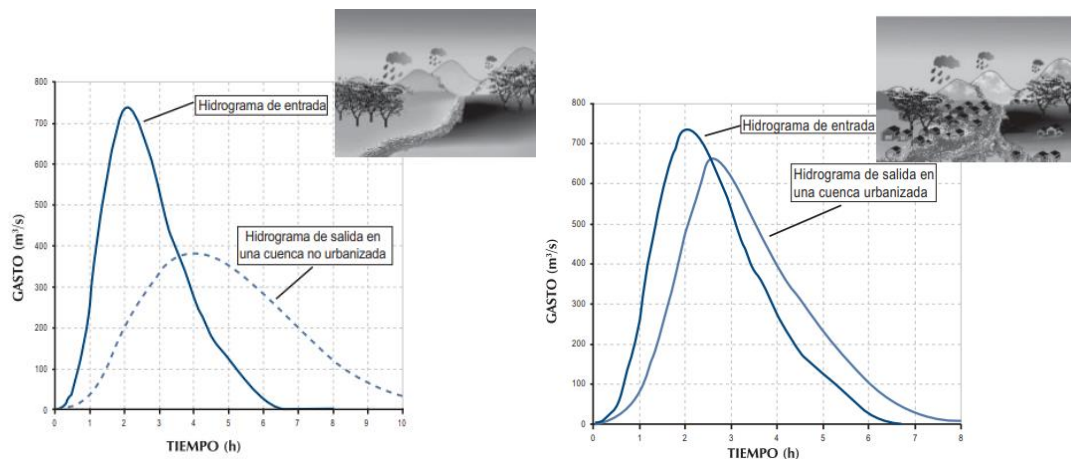


Fig. 4. Hidrograma (entrada y salida) para cuencas no urbanizadas (izquierda) y urbanizadas (derecha).
Imagen obtenida de CENAPRED (2004)

Las inundaciones son eventos multifactoriales, dependen de variables de origen natural, como la morfología de la cuenca, forma del cauce, intensidad de la precipitación, pero también se ven influenciadas por variables de origen antropogénico, como el uso de suelo, la existencia de drenaje y la cantidad de desechos que pudieran estar presentes en el cauce principal de la cuenca. Todo esto hace que la clasificación de inundaciones sea complicada CENAPRED (2004) clasifica las inundaciones de acuerdo con su origen o el tiempo de respuesta de la cuenca.

I. De acuerdo con su origen

- a. Inundaciones Pluviales:** Son ocasionadas únicamente por la precipitación que cae sobre la zona afectada, la cual satura el suelo de la cuenca y provoca la acumulación de agua.
- b. Inundaciones Fluviales:** Son generadas debido al desbordamiento de los ríos presentes en el área, por lo que el excedente de agua proviene no solo de la zona afectada, sino de cualquier parte de la cuenca tributaria.
- c. Inundaciones Costeras:** Son consecuencia del aumento del nivel medio del mar, ocasionando que este penetre tierra adentro. El ascenso de marea es ocasionado generalmente por tormentas y ciclones tropicales.
- d. Inundaciones por falla de infraestructura:** Ocurren cuando la capacidad de las obras hidráulicas destinadas a la contención de cuerpos de agua es rebasada, o bien, estas presentan fallas, ocasionando que el agua acumulada se desborde súbitamente.

II. Clasificación de las inundaciones por el tiempo de respuesta de la cuenca

- a. Inundaciones Lentas:** Se producen generalmente en cuencas con una pendiente de cauce pequeña, lo cual provoca que el cauce de salida sea insuficiente para drenar los escurrimientos de la cuenca, lo que ocasiona el desborde de los márgenes del caudal.
- b. Inundaciones Súbitas:** Son causadas por precipitaciones repentinas y de gran intensidad. Ocurren generalmente en cuencas con poca capacidad de infiltración como áreas urbanas y zonas deforestadas, lo que provoca que la mayor parte de la precipitación se convierta en escurrimientos.

1.6 Metodología

La delimitación de las zonas en peligro de inundación requiere el análisis de múltiples variables físicas y meteorológicas para posteriormente realizar las modelaciones hidráulicas pertinentes.

En primera instancia, es necesario caracterizar la morfología de la cuenca y el cauce, para ello se utilizó una serie de modelos digitales de terreno de alta resolución (LiDAR) obtenidos del INEGI, los cuales se procesaron en un Sistema de Información Geográfica.

A la par se realizó el análisis estadístico de la precipitación. Los datos de la lluvia se obtuvieron de 2 fuentes. El primer conjunto de datos se obtuvo de una serie de estaciones sinópticas meteorológicas automáticas (CONAGUA, s.f.), las cuales pertenecen a CONAGUA y poseen una resolución temporal de horas. El segundo conjunto de mediciones de precipitación se obtuvo del Observatorio hidrológico en tiempo real del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Instituto de Ingeniería UNAM, s.f.), el cual proporciona una resolución temporal de 1 min.

A manera de incrementar la certeza en el cálculo del tiempo de concentración de la microcuenca, se utilizaron datos del nivel del río con una resolución temporal de 15 minutos, los cuales fueron proporcionados por el proyecto Atlas de Riesgos de la Alcaldía Álvaro Obregón. Los datos de precipitación y nivel de río se procesaron utilizando *Python*, mientras que para el ajuste de probabilidad y periodos de retorno se usó el software *Hydrognomon*.

Una vez finalizado el análisis hidrológico se procedió a realizar la modelación hidrológica, la primera parte de esta consistió en el cálculo de los caudales de salida para la microcuenca, los cuales se obtuvieron utilizando el software HEC-HMS y los hietogramas de diseño elaborados en la primera etapa (Fig. 9).

Finalmente, la simulación de los tirantes de agua ante eventos de precipitación se procesa usando el software HEC-RAS, para lo cual se usaron los caudales de salida calculados anteriormente y un conjunto de archivos vectoriales con la geometría del caudal, los cuales se procesaron anteriormente en el SIG ArcMap de ESRI.

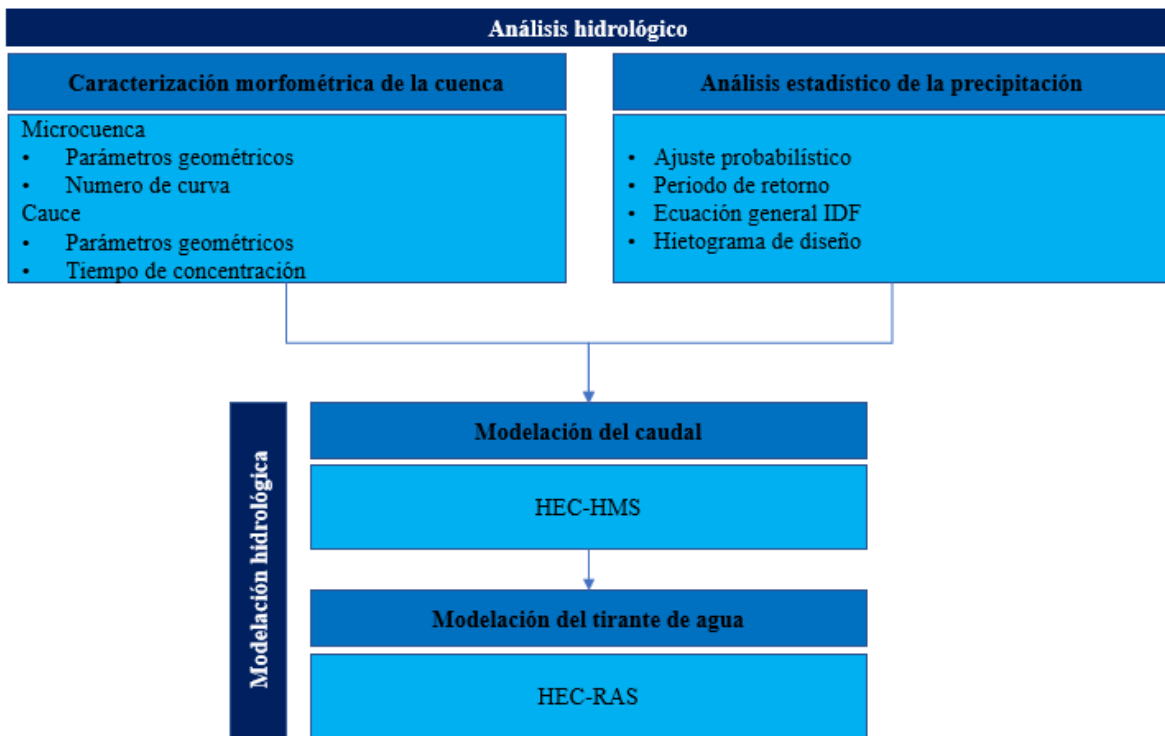


Fig. 5. Diagrama de flujo de la metodología. Elaboración propia.

2. Hidrología

2.1 Cuenca y microcuenca

Una cuenca es un área de la superficie terrestre en la cual el agua fluye hacia un mismo punto en el cual se concentran los escurrimientos, siendo un río, lago o incluso el mar (García-Ruiz, 1987). Es importante entender a la cuenca como un sistema abierto en los cuales existe un intercambio de energía y materia con el medio que le rodea.

De acuerdo con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2019), las cuencas pueden subdividirse en subcuencas o microcuenca de acuerdo con su área. Una cuenca debe tener un territorio mayor a 50 000 hectáreas, una subcuenca debe rondar entre los 5 000 y 50 000 ha, mientras que una microcuenca debe tener un área menor a 5 000 ha.

El análisis morfométrico de una cuenca comprende el estudio de la geometría de una superficie de suelo dentro de un sistema de erosión fluvial (Albarracín Franco, 2020). Esto con el fin de interpretar dichas características para evaluar el comportamiento hidrológico de la cuenca y plantear estrategias dirigidas al desarrollo sostenible y un correcto aprovechamiento del recurso hídrico.

A continuación, se enuncian algunos parámetros morfométricos y de relieve importantes para el análisis de inundaciones propuestos por Albarracín Franco (2020):

Parámetros morfométricos

- *Superficie de la cuenca*: Área de la cuenca delimitada por la línea divisoria de aguas
- *Perímetro*: Longitud de la divisoria de aguas
- *Factor de forma de Horton*: Valor adimensional que representa la concentración de los escurrimientos.

$$k_f = \frac{A}{L^2}$$

A: Área de la cuenca

L: Longitud del cauce principal

Este parámetro representa la tendencia de la cuenca a grandes crecidas, un factor de forma bajo es representativo de cuencas alargadas, asociadas a crecientes de baja magnitud. Por otro lado, un factor de forma mayor a 1 representa tendencia a concentrar escurrimientos, lo que desencadena grandes crecidas.

- *Coficiente de compacidad de Gravelius*: Expresa la relación entre perímetro y superficie.

$$k_c = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

A: Área de la cuenca

P: Perímetro de la cuenca

El K_c se relaciona con la tendencia de la cuenca a una forma circular. Mientras más cercano sea este valor a 1, mayor será la semejanza con una circunferencia.

Parámetros de relieve

- Cota máxima: Altura máxima a la cual se encuentra la divisoria de la cuenca
- Cota mínima: Altura donde se encuentra el punto de desfogue de la cuenca
- Pendiente promedio: Valor medio de la pendiente de la superficie que ocupa la cuenca.

Utilizando imágenes LiDAR obtenidas de INEGI (2020) se calcularon los parámetros morfométricos y de relieve, para lo cual se usó el software QGIS y las ecuaciones presentadas. En la tabla 1, se muestran los parámetros de la cuenca, para lo cual se tomó como punto de desfogue a la presa San Francisco.

Tabla 1 Parámetros morfométricos de la cuenca

Cuenca	
Área [m ²]	8107950
Perímetro [m]	20721
Factor de forma	0.13
Coficiente de compacidad	2.05
Cota máxima [m]	2693
Cota mínima [m]	2318
Pendiente promedio [%]	26.6

2.1.1 Número de curva

El número de curva es un método desarrollado en los años 50's por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, el cual permite caracterizar la escorrentía de una cuenca hidrográfica a partir de sus características físicas, tales como el tipo, densidad, tratamiento de las coberturas del suelo, así como del grupo hidrológico del mismo. (Diaz Carvajal, 2017)

La ecuación que desarrolló el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos se define de la siguiente manera:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

Q: Escorrentía

P: Lámina de lluvia

S: Potencial máximo de retención

Como se puede observar la escorrentía varía en función de la precipitación y el potencial de retención. Este último valor puede variar entre 0 e infinito, por lo que es necesario introducir un parámetro con un menor rango de variación, este parámetro fue denominado Número de Curva (NC) y únicamente varía entre 0 y 100 (Diaz Carvajal, 2017).

La relación entre el NC y el potencial de precipitación se obtiene mediante la ecuación:

$$NC = \frac{25.400}{S + 254}$$

El Número de Curva se elige mediante la combinación entre una variedad de coberturas y grupos hidrológicos de suelo, las cuales se pueden consultar en diversas bibliografías (Soil Conservation Service, 1972; Natural Resources Conservation Service, 1986).

Para la elección del número de curva se utilizó el contexto físico geográfico de la cuenca. Para la elección del grupo hidrogeológico se utilizó la geología de la zona, compuesta principalmente por rocas ígneas extrusivas volcanoclásticas, lo cual de acuerdo con la tabla 2 corresponde a un tipo de suelo D, caracterizado principalmente por su baja permeabilidad.

Análisis de inundaciones: Microcuenca Presa San Francisco

Tabla 2 Grupos hidrológicos del suelo (Soil Conservation Service, 1972)

Descripción	Grupo
Aluviones y coluviones actuales	A
Areniscas y margas	B
Areniscas rojas, filitas, cuarcitas y pizarras	C
Basaltos	D
Calizas recristalizadas	B
Calizas tableadas azules	A
Coluvial	A
Conos de deyección	B
Cuarcitas micáceas	D
Diabasas	D
Dolomías negras y calizas	B
Filitas, cuarcitas y calcoesquistos	C
Limos negros, rojos y cantos encostrados	C
Indiferenciado	C
Limos y arcillas rojas	C
Margas arenosas y margas	C
Margas blancas	D
Margas grises	D
Margas y areniscas	B
Mármoles calizos y dolomíticos	C
Mármoles fajeados y mármoles blancos	C
Micacitas con granates	C
Micaesquistos y cuarcitas	D
Pizarras micáceas y micacitas	B
Terrazas	C
Yesos	C

Posteriormente con la información del uso de suelo obtenida de la CONABIO (CONABIO, 2023), se determinó que la cuenca está principalmente compuesta por suelo de uso residencial. De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta que un Acre es igual a 4046.86 m², se decidió utilizar el número de curva correspondiente a ¼ de acre (1011.714 m²) propuesto por el Natural Resources Conservation Service (1986) (Tabla 3).

Tabla 3 Número de Curva. (Natural Resources Conservation Service, 1986)

Uso de suelo	Grupo hidrológico de suelo			
	A	B	C	D
Uso comercial y unidades habitacionales	80	85	90	95
Cultivos, método convencional	72	81	88	91
Cultivos, método de conservación	62	71	78	81
Césped, mala condición	58	74	82	86
Césped, buena condición	39	61	74	80
Pastura o pradera, mala condición	68	79	86	89
Pastura o pradera, buena condición	39	61	74	80
Pavimento	100	100	100	100
Bosques, cobertura pobre	45	66	77	83
Bosques, buena cobertura	25	55	70	77
Residencial, mala condición (1/4 de acre por lote)	73	83	88	91
Residencial, buena condición (1/4 de acre por lote)	61	75	83	87
Residencial, mala condición (1/2 de acre por lote)	67	80	86	89
Residencial, buena condición (1/2 de acre por lote)	53	70	80	85
Residencial, mala condición (2 acre por lote)	63	77	84	87
Residencial, buena condición (2 acre por lote)	47	66	77	81
Carreteras	74	84	90	92

2.2 Cauce

El cauce se define como la porción de terreno por donde fluyen los ríos, arroyos o torrentes, se trata de estructuras lineales producto de la erosión, por lo que suelen corresponderse con los puntos más bajos de la cuenca (Albarracín Franco, 2020).

A continuación, se enuncian algunos parámetros morfométricos relevantes en el ámbito de inundaciones, los cuales fueron propuestos por Senciales González (1998):

- *Longitud del cauce*: La longitud del cauce principal es un parámetro con un efecto relevante en el comportamiento hidrológico de la cuenca, ya que en un río de poca longitud los efectos de la lluvia se manifiestan con mayor rapidez.
- *Cota máxima*: Altura máxima del cauce
- *Cota mínima*: Altura donde se encuentra el punto de desfogue de la cuenca
- *Pendiente media*: La pendiente media en conjunto con la sinuosidad permite conocer el estado de las fuerzas erosivas del cauce. En ríos con poca pendiente la erosión suele ser baja, mientras que en cauces con altos valores de pendiente la erosión suele ser importante.

La tabla 4 muestra los parámetros del cauce, los cuales se obtuvieron mediante el procesamiento de imágenes LiDAR obtenidas de INEGI (2020), para lo cual se usó el software QGIS y las ecuaciones anteriormente presentadas.

Tabla 4 Parámetros morfométricos del cauce

Cauce	
Longitud [m]	7814
Cota máxima [m]	2606
Cota mínima [m]	2298
Pendiente [%]	22

2.2.1 Tiempo de concentración

Vélez Upegui (2011) define el tiempo de concentración como aquel lapso en el que, como consecuencia de una precipitación uniforme se alcanza el estado estacionario, es decir que toda la cuenca contribuye eficazmente al caudal de salida en el punto de desfogue.

La importancia del tiempo de concentración radica el supuesto de que la duración de la precipitación de mayor intensidad para un cierto periodo de retorno es igual al tiempo de concentración de la cuenca, esto debido a que el tiempo de concentración es la fase de la precipitación que determina el caudal máximo (Vélez Upegui, 2011). Sin embargo, hay que destacar que esta suposición puede o no ser cierta, ya que lluvia asociada a caudales máximos se refiere al intervalo de mayor intensidad y no a la duración total de la precipitación, además que dentro del sistema también influyen las características del suelo como la saturación. (Vélez Upegui, 2011)

Para el cálculo del tiempo de concentración se utilizó la metodología propuesta por Témez, que se utiliza la longitud del cauce expresada en kilómetros y la pendiente del cauce en porcentaje. De esta manera se obtuvo un tiempo de concentración de 44 minutos (Témez, 1991).

$$T_c = 0.3 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.75}$$

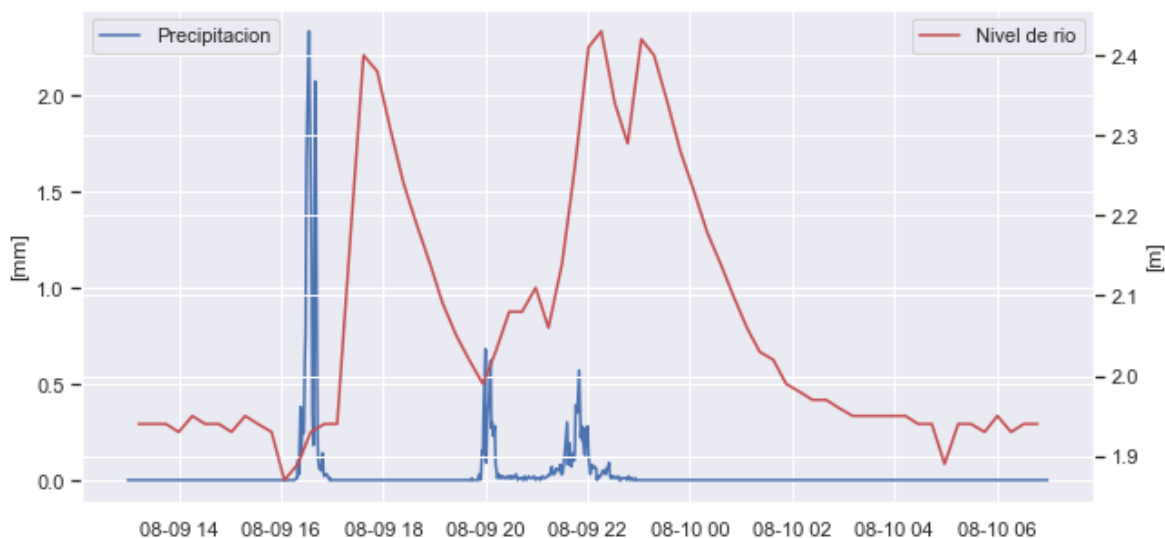
L: Longitud del cauce [Km]

S: Pendiente del cauce [%]

Para corroborar estos datos se utilizaron datos recopilados por el observatorio hidrológico en tiempo real (Instituto de Ingeniería UNAM, s.f.), correspondientes al evento de precipitación ocurrido el 9 de agosto del 2022, el cual inició las 16:18 y finalizó a las 16:58 del mismo día, con una precipitación acumulada de 16.5 mm durante dicho periodo de tiempo.

Para estimar de manera empírica el tiempo de concentración, se utilizó información obtenida del sensor de nivel de río, la cual fue proporcionada por el proyecto Atlas de Riesgos.

En la figura 10 se observa como la precipitación tiene un impacto directo en el comportamiento del caudal del río. El primer evento de precipitación ocurrió a las 16:00 horas ocasionó un aumento de 46 cm en el nivel del río, posteriormente al finalizar la lluvia el caudal presenta una tendencia a la baja.

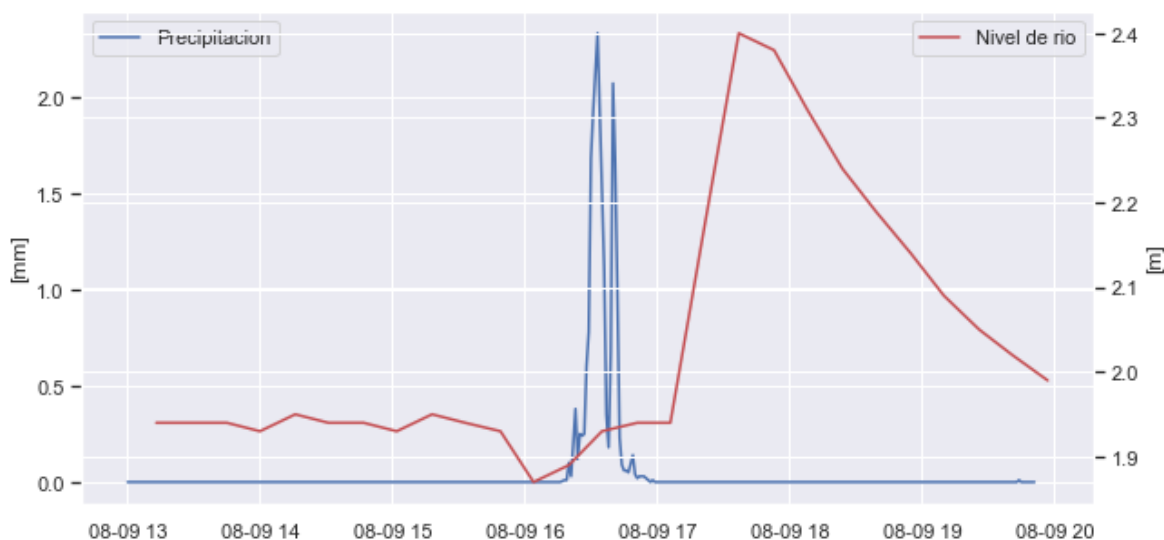


*Fig. 6 Precipitación y nivel del río. 9 de agosto del 2022.
Elaboración propia a partir de datos proporcionados por el proyecto Atlas de Riesgos A.O*

Sin embargo, a las 20:00 ocurre un nuevo evento de precipitación ocasionando una nueva subida en el nivel del río. Es de destacar que la intensidad de esta nueva precipitación es mucho menor que la anterior, sin embargo, el cauce alcanza una altura incluso superior a la del primer evento. Este comportamiento se observa de nuevo minutos después cuando el caudal aumenta nuevamente más de 50 cm a pesar de la baja intensidad de la lluvia.

De este comportamiento se infiere que el lapso entre las tres precipitaciones es muy corto, ocasionando que el suelo continúe saturado luego de la primera precipitación, favoreciendo así que un gran porcentaje de las precipitaciones subsecuentes se manifieste directamente en forma de escurrimientos, contribuyendo en mayor medida al aumento del caudal.

Para un análisis más preciso del comportamiento hidrológico de la cuenca, se acotó el lapso de tiempo para incluir únicamente la primera precipitación. Como se observa en la figura 11, durante el evento de precipitación ocurrido a las 16 horas el nivel del caudal se mantuvo estable hasta pasados 64 minutos del inicio de la lluvia y 47 minutos después del punto de mayor intensidad.



*Fig. 7 Precipitación y nivel del río. Primer evento del 9 de agosto del 2022.
Elaboración propia a partir de datos proporcionados por el proyecto Atlas de Riesgos A.O*

Así mismo se alcanzó un máximo en el nivel del río a las 17:37 horas, teniendo un aumento de 46 cm respecto al nivel anterior a la precipitación. Este aumento máximo se presentó después de 79 minutos iniciada la lluvia y 62 minutos después del instante de mayor intensidad.

De lo anterior es posible estimar en 63 minutos el tiempo de concentración para la microcuenca de interés, pues es pasado este lapso que en el caudal se comienzan a observar los efectos de los escurrimientos de la parte alta. Este valor obtenido de manera empírica es similar al obtenido mediante el método Témez (1991), por una diferencia de solo 19 minutos, la cual puede apreciarse de manera más detallada en las tablas 5 y 6, esta diferencia se atribuye a características físicas de la cuenca que no toma en cuenta la ecuación, tales como uso de suelo, geología, entre otros.

Tabla 5 Precipitación. 9 de agosto del 2022
 . (Instituto de Ingeniería UNAM, s.f.)

Hora	Precipitación [mm]
09/08/2022 16:18	0.01
09/08/2022 16:19	0.01
09/08/2022 16:20	0.1
09/08/2022 16:21	0.03
09/08/2022 16:23	0.38
09/08/2022 16:24	0.12
09/08/2022 16:25	0.25
09/08/2022 16:26	0.24
09/08/2022 16:27	0.25
09/08/2022 16:28	0.6
09/08/2022 16:29	0.78
09/08/2022 16:30	1.68
09/08/2022 16:31	1.92
09/08/2022 16:33	2.33
09/08/2022 16:36	1.11
09/08/2022 16:37	0.35
09/08/2022 16:38	0.18
09/08/2022 16:39	0.68
09/08/2022 16:40	2.07
09/08/2022 16:41	1.66
09/08/2022 16:42	0.98
09/08/2022 16:43	0.23
09/08/2022 16:44	0.09
09/08/2022 16:45	0.06
09/08/2022 16:46	0.06
09/08/2022 16:47	0.05
09/08/2022 16:49	0.14
09/08/2022 16:50	0.04
09/08/2022 16:51	0.02
09/08/2022 16:52	0.03
09/08/2022 16:54	0.03
09/08/2022 16:55	0.02
09/08/2022 16:56	0.01
09/08/2022 16:57	0
09/08/2022 16:58	0.01

Tabla 6 Nivel del río. 9 de agosto del 2022.
 Datos proporcionados por el proyecto Atlas de Riesgos AO.

Hora	Nivel [m]
09/08/2022 16:04	1.87
09/08/2022 16:20	1.89
09/08/2022 16:35	1.93
09/08/2022 16:51	1.94
09/08/2022 17:06	1.94
09/08/2022 17:22	2.18
09/08/2022 17:37	2.4
09/08/2022 17:53	2.38
09/08/2022 18:08	2.31
09/08/2022 18:24	2.24
09/08/2022 18:39	2.19
09/08/2022 18:55	2.14
09/08/2022 19:10	2.09
09/08/2022 19:26	2.05
09/08/2022 19:41	2.02
09/08/2022 19:57	1.99

2.3 Precipitación

La precipitación, es agua meteórica que cae sobre la superficie terrestre, es importante resaltar que al tratarse de precipitación, si bien se suele hablar únicamente de lluvia, esta incluye también a la nieve, granizo y el rocío (Sánchez, 2022).

De acuerdo con Ordoñez (2011), para la formación de la precipitación es necesaria la condensación del vapor atmosférico, la cual es favorecida por diversos procesos termodinámicos que son influenciados a su vez por factores como la orografía, corrientes de aire etc. Teniendo en cuenta lo anterior, las precipitaciones suelen clasificarse de la siguiente forma (Ordoñez, 2011):

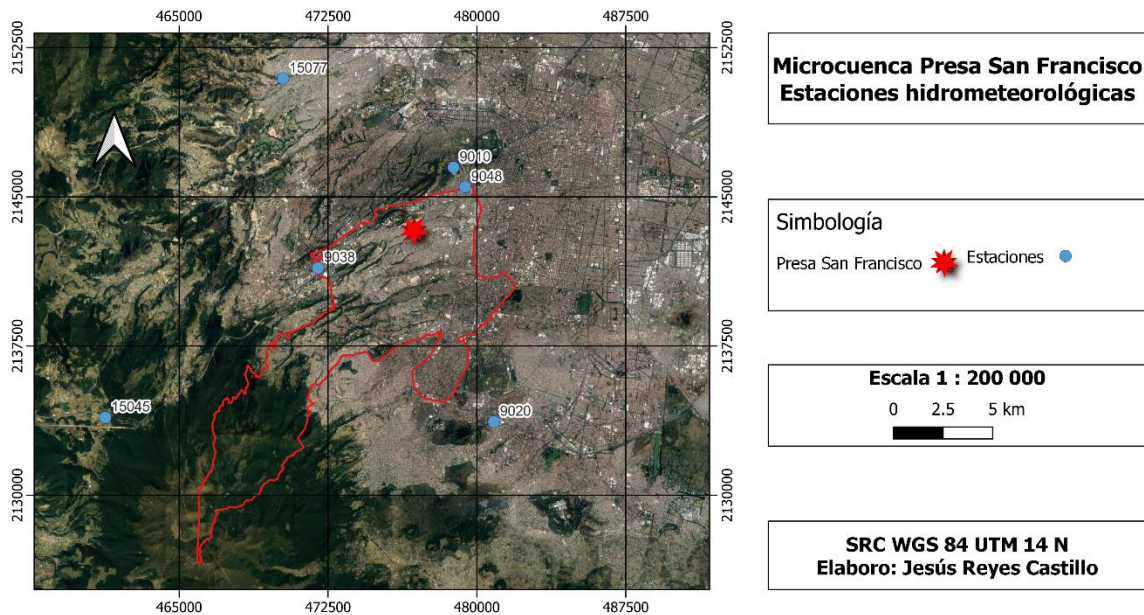
- *Precipitación convectiva*: Son el resultado de un rápido ascenso de masas de aire a la atmósfera, lo que trae como resultado precipitaciones de gran intensidad y poca duración. Se suelen asociar a la aparición de nubes tipo cúmulus y cumulonimbos.
- *Precipitación orográfica*: Se asocian a las variaciones topográficas, específicamente por la presencia de barreras orográficas. Si bien las características de la precipitación dependen de la altitud, pendiente y orientación de la barrera topográfica y la masa de aire caliente con la que interactúa, presentan una intensidad y frecuencia regular.
- *Precipitación frontal*: Son consecuencia del contacto entre masas de aire con diferente temperatura. Los frentes fríos ocasionan precipitaciones cortas e intensas, mientras que los frentes calientes producen precipitaciones de larga duración, pero poca intensidad.

La caracterización de la precipitación es de vital importancia para la comprensión del ciclo hidrológico y en este caso en particular permite establecer una relación entre precipitación, escurrimientos y caudal. La precipitación se cuantifica en mm, donde un milímetro es el equivalente a la altura de una lámina de agua luego de verter 1lt de agua en un recipiente de 1 m².

Existen diversos instrumentos para cuantificar la precipitación, siendo los más importantes el pluviómetro y el pluviógrafo (Sánchez, 2022):

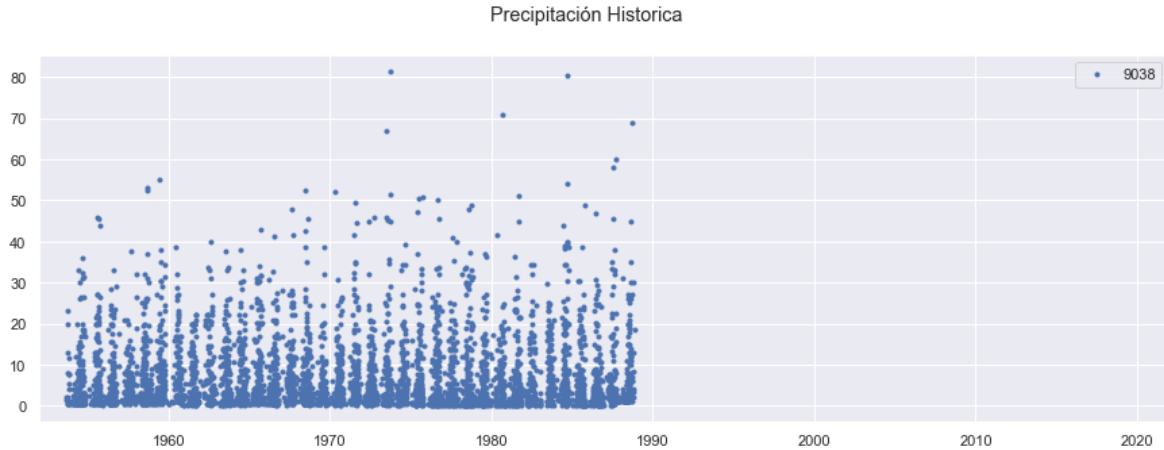
- *Pluviómetro*: Es un recipiente graduado con paredes verticales que recoge la precipitación en punto específico, las mediciones se toman una vez al día, posterior a lo cual se vacía el pluviómetro. El pluviómetro estandarizado por el National Weather Service de los Estados Unidos de América consta de un recipiente de 8 pulgadas de diámetro, el cual se debe ubicar a 1.5 metros de altura.
- *Pluviógrafo*: Es un instrumento que registra la precipitación en función del tiempo, ya sea de forma mecánica o digital. Esto permite tener información continua del fenómeno hidrometeorológico, permite observar las variaciones de la precipitación a lo largo del tiempo. El gráfico que se obtiene de un pluviógrafo se denomina pluviógrama y representa la precipitación acumulada.

Para el análisis hidrológico de la microcuenca se utilizó la Estación Sinóptica Meteorológica Automática (ESMA) #9038, debido a que su ubicación aguas arriba aunque en la parte media de la cuenca, permitiría un análisis más preciso del comportamiento de los escurrimientos.



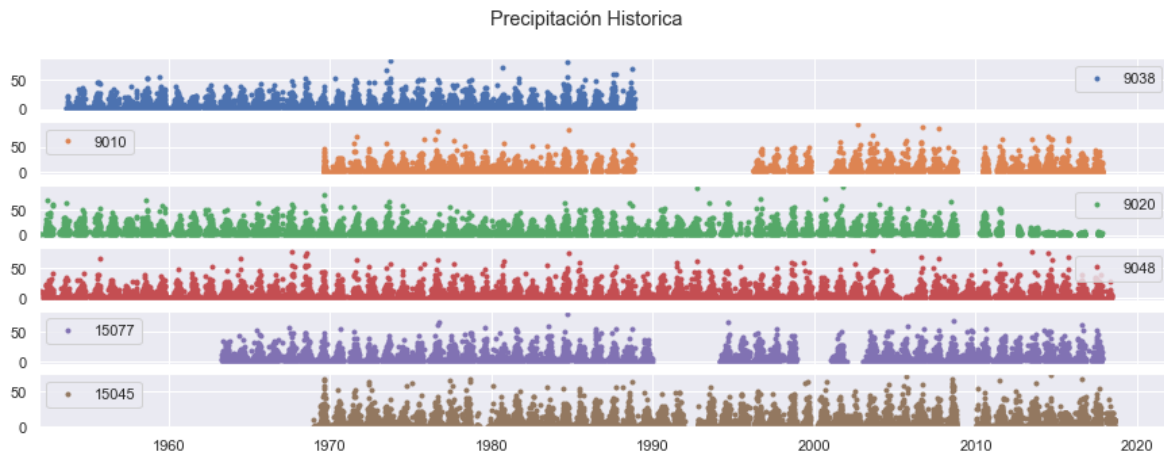
*Fig. 8. Ubicación de estaciones hidrometeorológicas.
Elaboración propia a partir de información de INEGI y CONAGUA.*

Sin embargo, como se puede observar en la figura 13, la estación #9038 tiene registros únicamente hasta 1988, lo que hace necesario completar el registro con alguna estación hidrometeorológica cercana.



*Fig. 9 Precipitación histórica en la estación 9038.
Elaboración propia a partir de datos de CONAGUA*

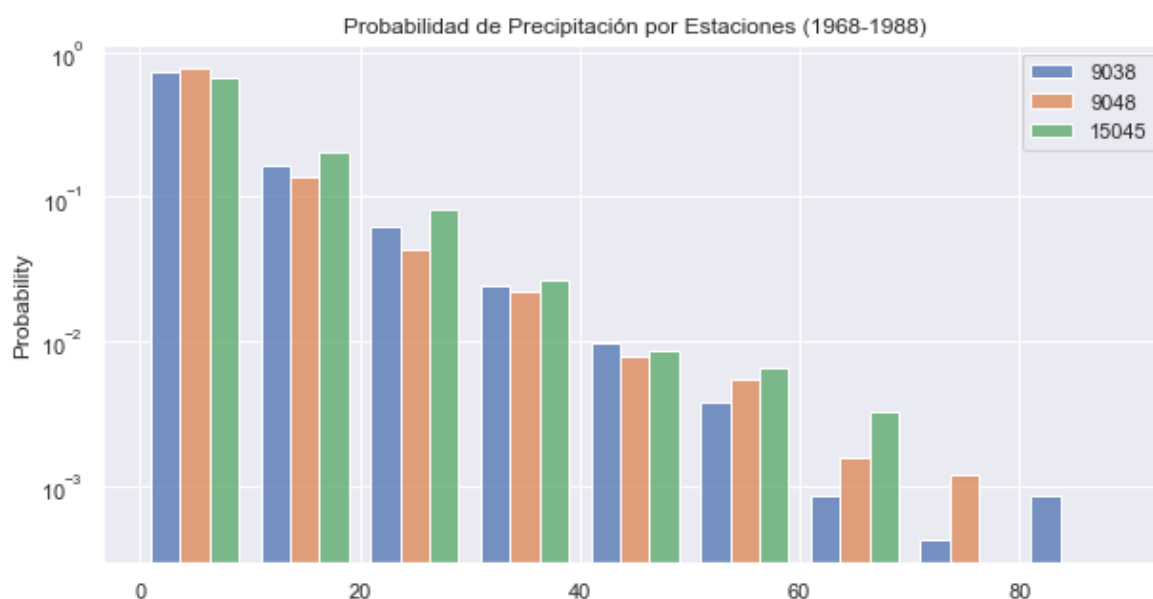
Para completar la data se analizaron las estaciones 9010, 9020, 9048, 15077 15045, todas ellas a una distancia máxima de 10 km. En primera instancia se descartaron las estaciones 9010 y 15077 por tener periodos de tiempo importantes en los que no se registraron datos; la estación 9020 también fue descartada por su falta de confiabilidad en los datos posteriores al 2010



*Fig. 10 Precipitación histórica en las estaciones cercanas a la zona de estudio.
Elaboración propia a partir de datos de CONAGUA.*

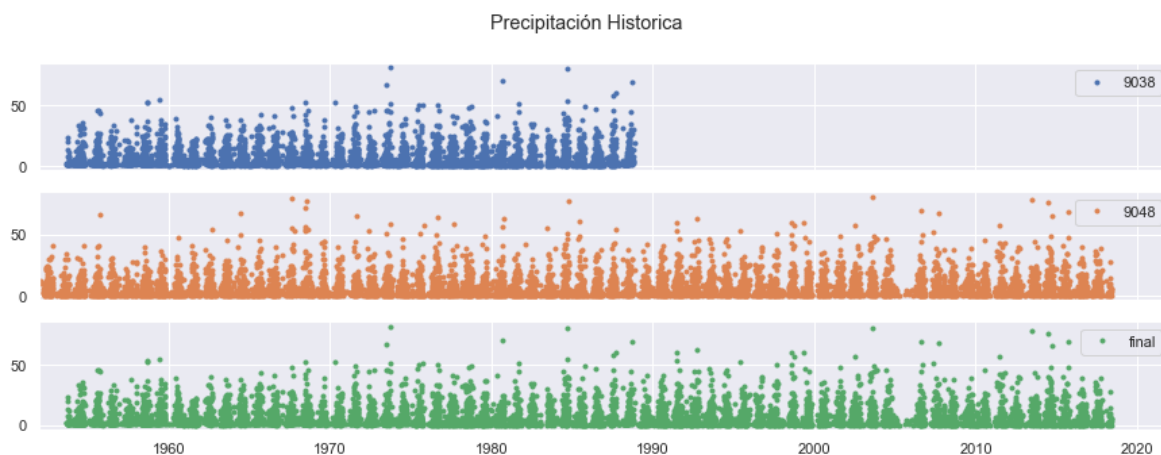
Por estas razones, se realizó un análisis de las estaciones 9048 y 15045 para elegir aquella con un comportamiento similar al de la estación 9038. Para ello se limitó el análisis al periodo comprendido entre 1969 y 1988, donde las 3 estaciones recopilaron datos de precipitación.

La figura 15 muestra el histograma de precipitación para el periodo de interés, mientras que en la parte inferior se observan las probabilidades para cada rango de precipitación. Del análisis de ambos gráficos se concluyó que la estación 9048 tiene un comportamiento más similar a la estación de interés.



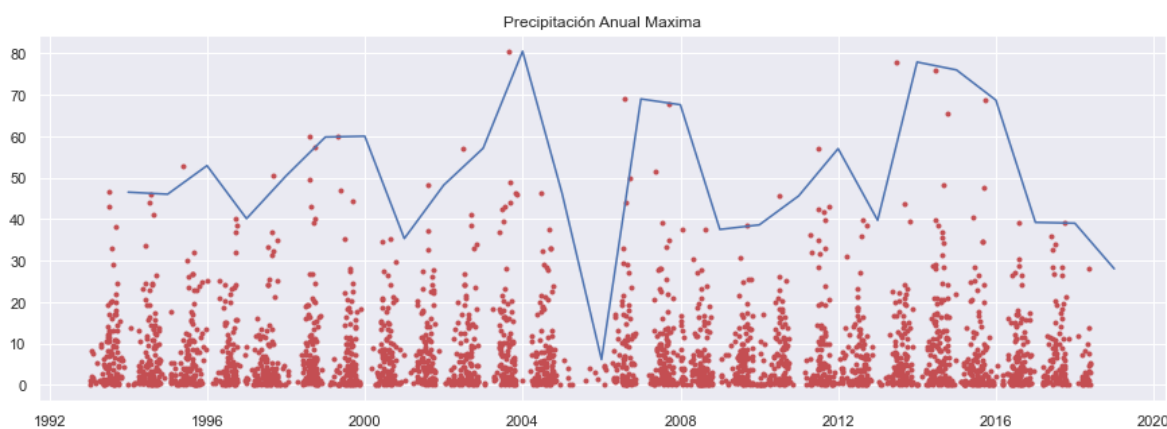
*Fig. 11 Histograma de probabilidad de precipitación para las estaciones de interés.
Elaboración propia a partir de datos de CONAGUA.*

Finalmente, para obtener el registro completo se utilizó la información de la estación 9038 para el periodo comprendido entre 1953 y 1988, mientras que, para el restante, 1989-2018 se utilizó la información de la estación 9048. A continuación, se muestra la precipitación en ambas estaciones y la data final.



*Fig. 12 Registro completo (abajo) compuesto por la estación 9038 (arriba) y 9045 (centro).
Elaboración propia a partir de datos de CONAGUA.*

Para realizar el ajuste a una distribución de probabilidad se trabajó con precipitaciones máximas anuales, ya que la precipitación no se considera un proceso estacionario, se restringió el análisis a los últimos 25 años de la data, esto con el fin de tener un análisis más fiable. En la figura 17 se muestran dichos valores.



*Fig. 13 Máximos anuales del registro completo.
Elaboración propia a partir de datos de CONAGUA.*

2.3.1 Outliers

De acuerdo con el boletín 17b del *Hydrology Subcommittee* (1986), al tratar con eventos extremos se debe tener cuidado, ya que un valor extremadamente grande o bajo puede crear problemas en el análisis y modelación, alterando la media y la desviación estándar de la muestra.

El *Interagency Advisory Committee on Water Data* de EE. UU., utilizó una prueba para detectar valores atípicos con un 10% de nivel de significancia, para este análisis se utilizó la siguiente ecuación de frecuencias. (Water Resources Council, 1975)

$$x_H = \bar{x} \pm k_N * S$$

x_H : Umbral atípico en unidades de registro

\bar{x} : Promedio de los logaritmos de precipitación anual máxima

S : Desviación estándar de los logaritmos de precipitación anual máxima

k_N : Valor k dependiente del tamaño de la muestra

Una vez realizados los cálculos para la obtención del umbral máximo y mínimo, se obtuvieron 135 y 15 [mm] respectivamente (fig. 18), por lo que se decidió eliminar un valor atípico que se encontraba por debajo del umbral mínimo.

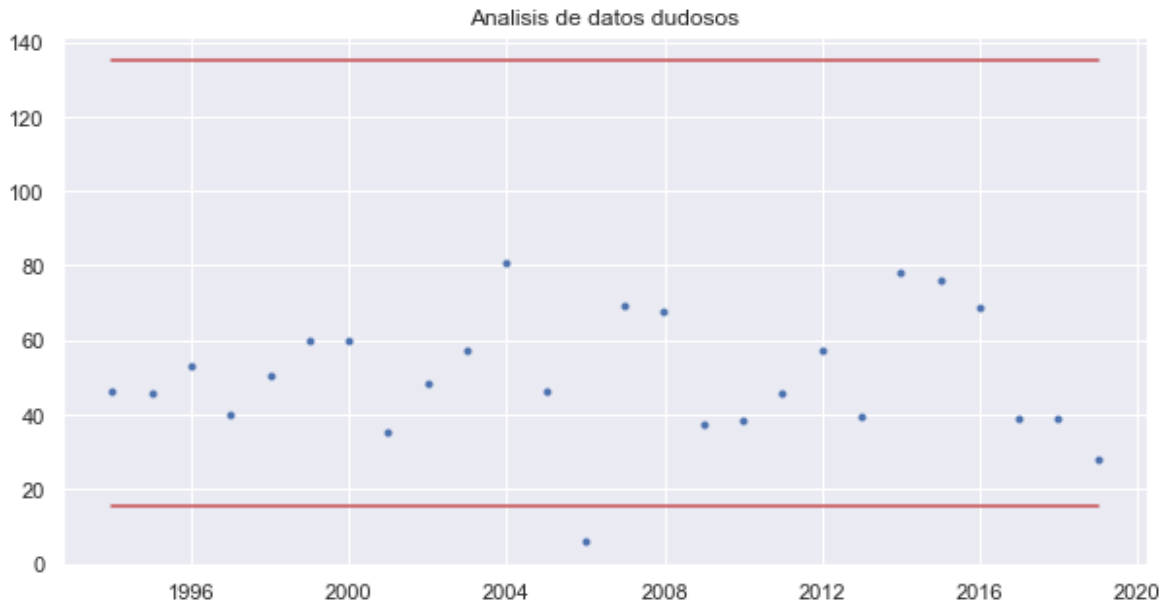
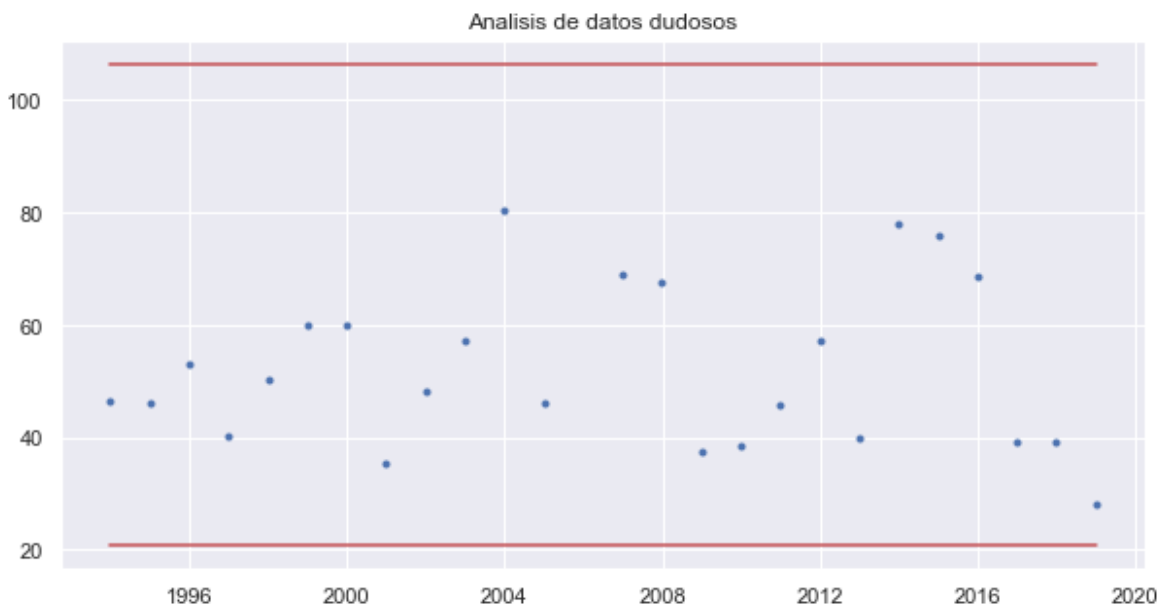


Fig. 14 Análisis de datos dudosos.
Elaboración propia a partir de datos de CONAGUA.

Después de eliminar el valor atípico se repitió el procedimiento para la nueva data, obteniendo un umbral máximo y mínimo de 106 y 20 [mm] respectivamente (fig. 19), con lo cual ya no se obtuvieron valores considerados atípicos mediante el método propuesto.



*Fig. 15 Análisis de datos dudosos, con data corregida.
Elaboración propia a partir de datos de CONAGUA.*

2.3.2 Distribuciones de probabilidad

El análisis de precipitación, de acuerdo con la propuesta de Flowers-Cano (2017), requiere conocer la frecuencia con la que se presentan eventos de precipitación máxima. Esto hace necesario el evaluar estadísticamente la precipitación como un conjunto de datos empíricos que permitan proponer hipótesis probabilísticas acerca de la ocurrencia de estos eventos. Sin embargo, es importante resaltar que, si bien existen muchas distribuciones de probabilidad, actualmente no existe una que sea universalmente aceptada para el análisis hidrológico.

Para el presente trabajo se consideraron las distribuciones de probabilidad teóricas Normal, Log Normal, Pearson, Log Pearson, Exponencial, Gumbel. Para obtener la distribución de probabilidad que mejor se adapte a la serie de datos de precipitación se utilizan diversas pruebas de bondad de ajuste, las cuales representan la concordancia entre la distribución empírica y la distribución teórica. (Flowers-Cano, 2017)

En las tablas 7 y 8 se muestran los resultados de las pruebas de bondad de ajuste Chi-Cuadrado y la prueba de verificación de Kolmogorov-Smirnov, las cuales se realizaron con ayuda del software Hydrognomon. En los resultados se aprecia que la distribución de probabilidad con menor grado de ajuste es la exponencial, por lo que se descarta.

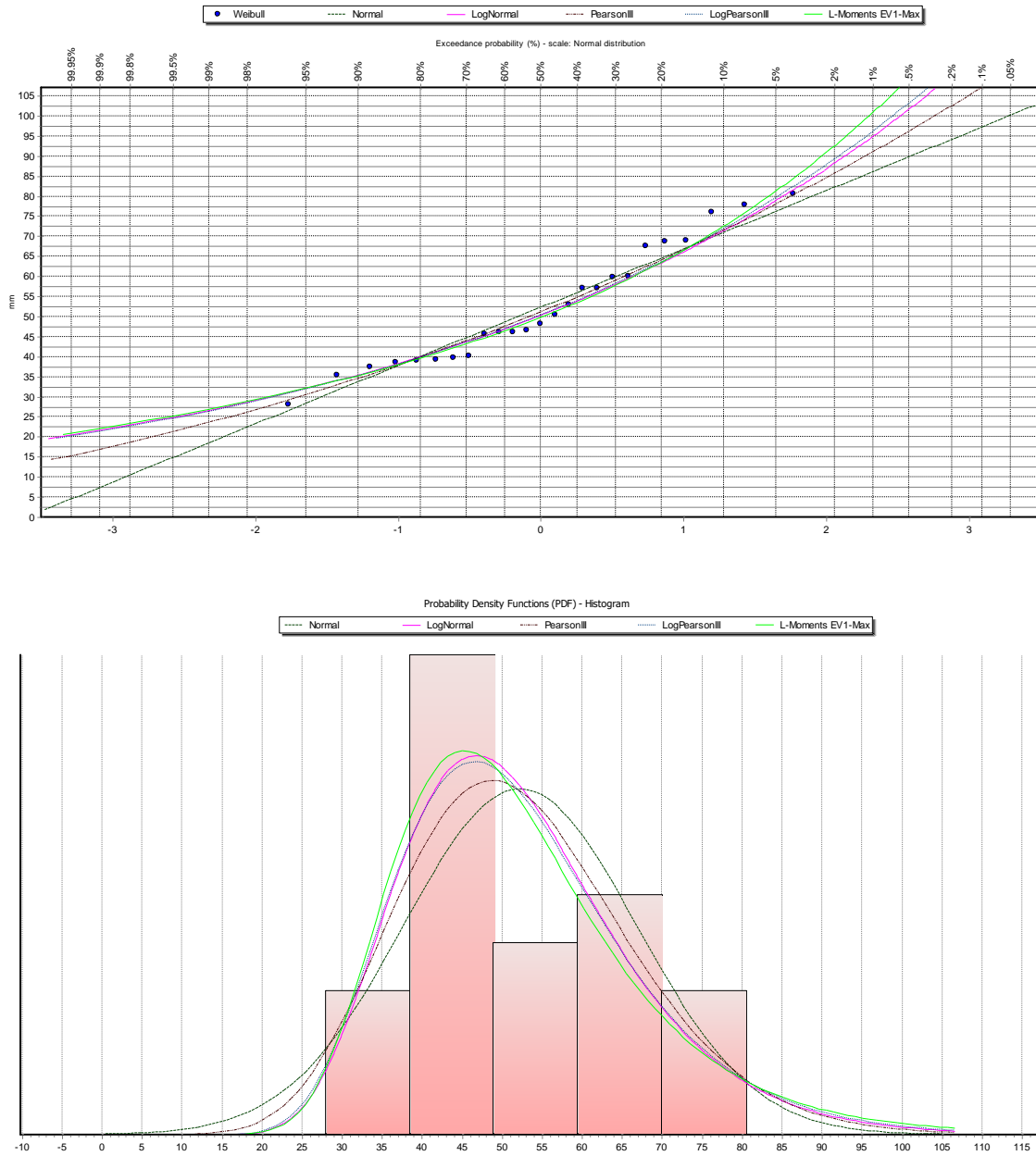
Tabla 7 Prueba de bondad de ajuste: Chi-Cuadrado

X-Cuadrada	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$	$\alpha=10\%$	Grado de ajuste
LogNormal	Aceptada	Aceptada	Aceptada	36.79%
Normal	Aceptada	Aceptada	Aceptada	20.19%
EV1-Max (Gumbel)	Aceptada	Aceptada	Aceptada	20.19%
Pearson III	Aceptada	Aceptada	Aceptada	15.73%
Log Pearson III	Aceptada	Aceptada	Aceptada	15.73%
Exponential	Aceptada	Rechazada	Rechazada	2.73%

Tabla 8 Prueba de bondad de ajuste: Kolmogorov-Smirnov

Kolmogorov-Smirnov	$\alpha=1\%$	$\alpha=5\%$	$\alpha=10\%$	Grado de ajuste
Pearson III	Aceptada	Aceptada	Aceptada	91.54%
Log Pearson III	Aceptada	Aceptada	Aceptada	91.34%
LogNormal	Aceptada	Aceptada	Aceptada	89.13%
EV1-Max (Gumbel)	Aceptada	Aceptada	Aceptada	83.56%
Normal	Aceptada	Aceptada	Aceptada	82.33%
Exponential	Aceptada	Aceptada	Aceptada	48.50%

Para realizar la elección entre el resto de las distribuciones se recurrió al método gráfico, donde se compararon los valores esperados con los obtenidos. En la parte superior de la figura 20 se observa la comparativa en un gráfico Q-Q, mientras que en la parte inferior se comparan las distribuciones de probabilidad con el histograma de los datos. Al realizar el análisis visual, se optó por la distribución de Gumbel debido a su mayor grado de ajuste.



*Fig. 16 Prueba de bondad de ajuste: método gráfico. Gráfico Q-Q (Superior) e Histograma (Inferior).
Elaboración propia.*

2.4 Periodos de retorno

En hidrología, Gutiérrez Lozano (2011), define el periodo de retorno como la frecuencia con la que se presenta un evento extremo como la precipitación, es decir, el lapso en el que un evento será igualado o excedido. La magnitud de estos fenómenos es inversa a la probabilidad de ocurrencia, por lo que una precipitación de gran magnitud se presentará con poca frecuencia.

$$P(X) = \frac{1}{T}$$

P(X): Probabilidad de excedencia

T: Periodo de retorno

Una vez obtenida la distribución teórica de probabilidad, se procedió al cálculo de las precipitaciones máximas diarias para diferentes periodos de retorno. En la tabla 9 se muestran los resultados.

*Tabla 9 Precipitación máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno.
Elaboración propia.*

T (años)	Precipitación [mm]
5	62.7365
10	71.2468
25	81.9997
50	89.9768
100	97.895
200	105.784
500	116.193

2.5 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia

Las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) representan la intensidad media de una precipitación para diferentes intervalos de tiempo, todos ellos asociados a un mismo periodo de retorno. (Pizarro, 2003)

Chow (1994) menciona que el cálculo de una curva IDF conlleva dentro de sí la necesidad de definir y proponer parámetros como son la intensidad, periodos de retorno etc. En el caso de la intensidad se define como la variación de la precipitación a lo largo del tiempo, para su cálculo se utilizó la siguiente ecuación (Chow, 1994):

$$I = \frac{P_D}{D}$$

I: Intensidad

P_D: Precipitación máxima de duración D

D: Duración de la precipitación

La ecuación anterior requiere definir una precipitación máxima y proponer una duración para la precipitación, esto teniendo en cuenta que la precipitación estará asociada a un periodo de retorno en particular. Para ello se utilizó el criterio Dick y Peschke (Chow, 1994).

$$P_D = P_{24H} \left(\frac{D}{1440} \right)^{0.25}$$

P_D: Precipitación máxima de duración D

P_{24H}: Precipitación máxima de 24 horas

D: Duración de la precipitación

Una vez propuestos los valores de duración y periodo de retorno fue posible calcular la curva IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) para cada uno de los periodos de retorno, en la figura 21 se muestra una curva IDF para un periodo de retorno de 100 años y una duración de 24 horas.

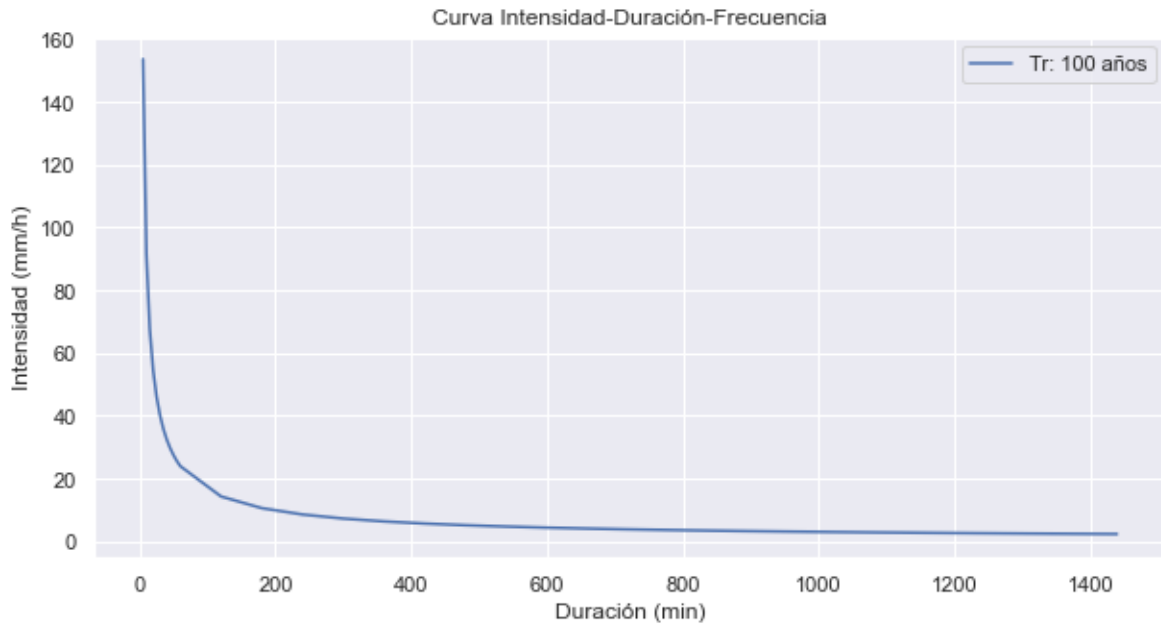


Fig. 17 Curva de Intensidad-Duración-Frecuencia para un periodo de retorno de 100 años.
Elaboración propia.

2.6 Ecuación general de la curva IDF

La ecuación general de la curva IDF fue propuesta por Aparicio (1997), a diferencia de las ecuaciones anteriores, esta permite modelar la intensidad máxima de una precipitación para diferentes lapsos de tiempo.

$$I_{max} = \frac{K * T^m}{D^n}$$

I_{max} : Intensidad Máxima

T : Periodo de retorno

D : Duración

k, m, n : Constantes

Esta ecuación cuenta con 3 constantes que es necesario calcular. Ya que se trata de una ecuación logarítmica hay que llevar la expresión a una forma lineal, tal y como se muestra en el siguiente desarrollo:

$$I_{max} = \frac{K * T^m}{D^n}$$
$$\text{Log}(I_{max}) = \frac{\text{Log}(K) * \text{Log}(T^m)}{\text{Log}(D^n)}$$
$$\text{Log}(I_{max}) = \text{Log}(K) * m \text{Log}(T) * -n \text{Log}(D)$$
$$y = x_1 + m x_2 - n x_3$$

Una vez obtenida la ecuación lineal se realizó una regresión lineal múltiple de todas las curvas IDF anteriormente calculadas. Los resultados de la regresión se pueden apreciar en la tabla 10.

Tabla 10 Constantes de la ecuación general de la curva IDF

Constante	Valor
K	509.59
m	0.132
n	0.75

2.7 Hietograma de diseño

El hietograma se define como un gráfico en el cual se representan las intensidades de lluvia respecto al tiempo, el cual se mide en intervalos definidos, por lo cual el hietograma suele tener forma escalonada. Ya que el hietograma representa la intensidad de la precipitación suele tener unidades de mm/h, aunque en el caso de eventos de menor duración también suele representarse en mm/min. (Chereque Morán, 1989)

Una vez obtenida la relación IDF (Intensidad, duración, frecuencia) el paso siguiente consistió en discretizar la precipitación en intervalos de tiempo. Para ello se utilizó el método de bloques alterno propuesto por Chow (1994), el cual consiste en utilizar la ecuación general IDF y calcular la precipitación para diferentes duraciones, posteriormente se realiza un reacomodo donde la intensidad máxima quedará a la mitad del hietograma de diseño, mientras que las consecuentes se colocarán alternadamente alrededor de la intensidad máxima.

Para el presente caso de estudio se modelaron precipitaciones con una duración de 3 horas para periodos de retorno de 5, 10, 25, 100 y 500 años. En la figura 22 se observa un hietograma de diseño con una duración de 3 horas y un periodo de retorno de 100 años.



*Fig. 18 Hietograma de diseño para una precipitación de 3 horas y un TR de 100 años.
Elaboración propia.*

3. Modelación hidrológica

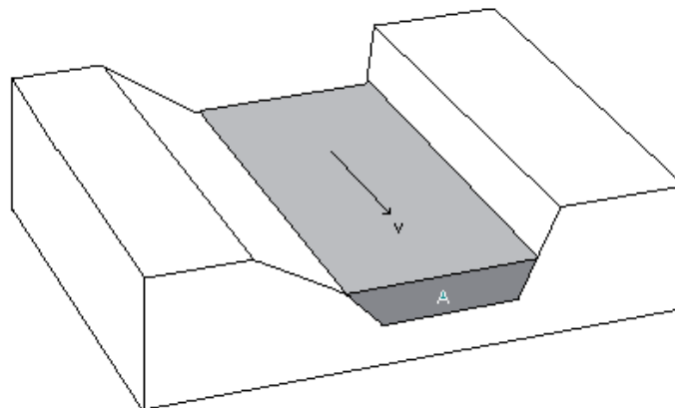
3.1 HEC-HMS

HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*) es un software elaborado por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos de América, el cual permite modelar los hidrogramas de esorrentía de un determinado punto de aforo de la cuenca, ello como consecuencia de un evento específico de precipitación (Lopez, 2012).

La capacidad del software de modelar los hidrogramas en cualquier parte de la cuenca toma como base la red de drenaje de la cuenca, parte de la idea de que la cuenca es un conjunto de sistemas hidrológicos-hidráulicos (subcuencas) conectados mediante sistemas hidráulicos (cauces). El modelado se basa de las relaciones matemáticas existentes entre los diversos fenómenos físicos que se llevan a cabo durante los eventos de precipitación, tales como las pérdidas por evapotranspiración, transformación del exceso de lluvia en caudal, adición del flujo base etc. (Lopez, 2012).

3.1.1 Caudal

El caudal de un río, de acuerdo con Santiago (2008), se define como la cantidad de agua que pasa por una sección transversal del mismo en un determinado tiempo, suele expresarse en m^3/s . El caudal es una función del área de la sección del río por la velocidad del agua que la cruza.



*Fig. 19 Caudal de un río.
Imagen tomada de Santiago (2008)*

La forma más exacta de obtener el caudal de un río es realizar mediciones de campo, esto mediante diferentes metodologías como el molinete, el cual es un aparato compuesto por una hélice, la cual al ser introducido al curso de agua gira y a partir de las revoluciones de la hélice es capaz de medir la velocidad del cauce. Otro método utilizado consiste en estimar la velocidad del río mediante el tiempo de tránsito, lo cual se consigue midiendo el tiempo que le toma a unos flotadores recorrer una porción del río. (Santiago, 2008)

Sin embargo, en múltiples ocasiones no es posible realizar mediciones en campo, lo que hace necesario el uso de metodologías que permitan estimar numéricamente el caudal mediante otros parámetros conocidos como la precipitación y la escorrentía, para el presente caso de estudio se utilizó HEC-HMS.

En primera instancia se modeló el caudal asociado al evento de precipitación registrado el día 9 de agosto del 2022. En la figura 24 se observa el hietograma en la parte superior, en rojo se tiene la precipitación perdida por infiltración, mientras que en azul la precipitación convertida en escorrentía. En la parte inferior de la figura se observa el caudal de salida proveniente de la precipitación convertida en escorrentía.

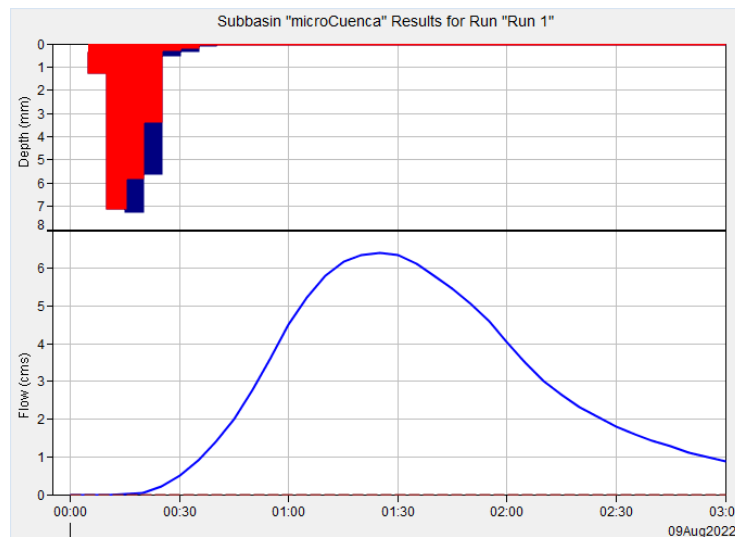
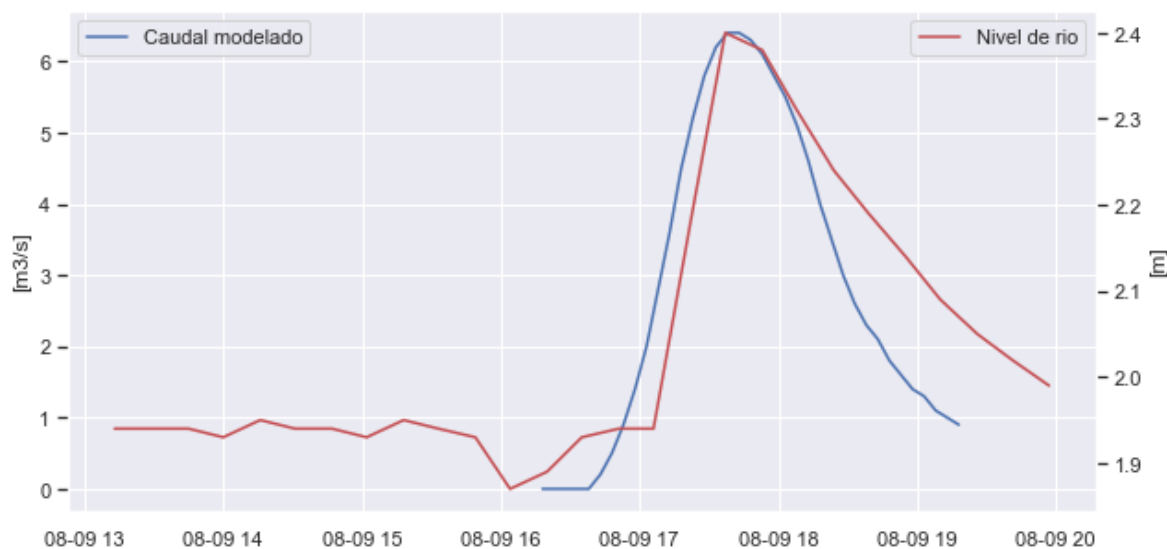


Fig. 20. Hietograma con infiltración y escurrimiento (Arriba) e Hidrograma (Abajo).
Elaboración propia

Los resultados del modelo se compararon con los valores registrados por el sensor de río proporcionado por el proyecto Atlas de Riesgos AO. En la figura 25 se observa en azul el hidrograma simulado, el cual muestra un comportamiento similar a los valores de altura del río registrados por el sensor, coincidiendo la hora a la que ambos registros presentan su máximo valor. Sin embargo, es de destacar que, en el hidrograma la disminución del caudal es de manera más abrupta respecto a lo registrado en el sensor.



*Fig. 21 Caudal modelado y nivel del río registrado con el sensor.
Elaboración propia*

Una vez corroborada la precisión del modelo, se procedió a obtener los caudales asociados a distintos periodos de retorno para precipitaciones máximas con una duración de 3 horas, los cuales se pueden observar en la tabla 11.

Tabla 11 Caudal para diferentes periodos de retorno

T (años)	Precipitación máxima (mm)	Caudal (m³/s)
5	66.65	288
25	87.52	408
50	96.16	471
100	104.74	542
500	124.56	740

3.2 HEC-RAS

HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*) es un software desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (*U.S. Army Corps of Engineers*), el cual permite modelar la hidráulica de flujo en ríos, esto basado en la hipótesis del flujo unidimensional. (Bustos Montes, 2011)

HEC-RAS es un software altamente utilizado en la industria, en su estudio del 2011, Bustos Montes destaca la gran versatilidad de la herramientas y opciones para modelar sistemas hidráulicos con las que cuenta el software, ya que permite modelar ríos en flujo permanente y no permanente, en flujo subcrítico y supercrítico, además de poder incluir en el modelado estructuras como puentes, alcantarillas, sistemas de bombeo etc.

Para poder realizar la simulación de datos en HEC-RAS es necesario proporcionar datos generales sobre las características del flujo y las geometrías del área de interés. Para lo cual se utilizó un modelo digital de terreno construido mediante imágenes LIDAR obtenidas de INEGI, con una resolución horizontal de 1.5 m.

Al definir la geometría de la cuenca se tomó como punto de desfogue a la presa San Francisco, por lo que el modelado se enfocó únicamente al área aledaña a dicha presa. Sin embargo, como se observa en la figura 26, dadas las características del MDT, el puente que sirve de conexión entre el río y la presa se observa como una zona elevada.

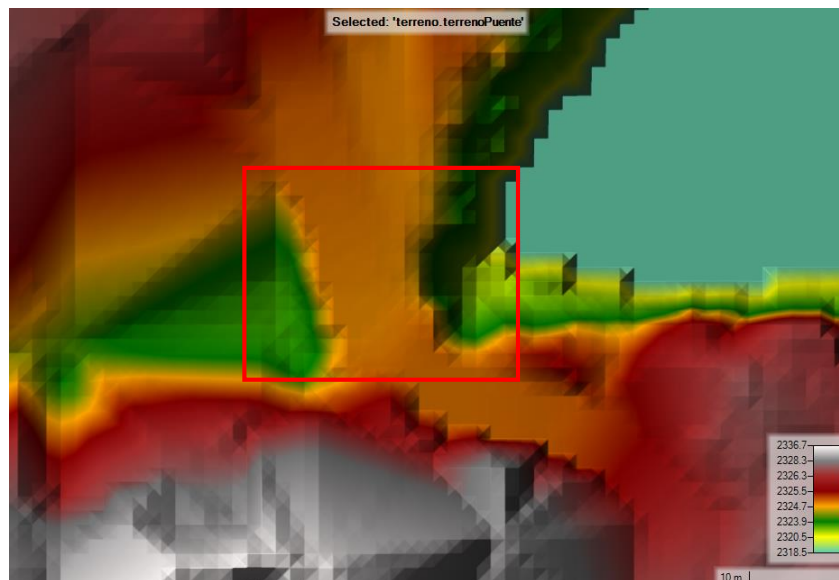


Fig. 22. Modelo Digital de Terreno, en rojo se observa la zona de conflicto. Interfaz de HEC-RAS. Elaboración propia

Ya que esta elevación impide el flujo de agua del río hacia la presa se procedió a modificar el MDT para poder incluir el puente y obtener una simulación más realista del caudal. En la figura 27 se observa el canal creado para unir hidráulicamente la parte final del río con la entrada de la presa. Usando la herramienta RAS Mapper de HEC-RAS, se asignaron también los valores de la geometría del canal, una pendiente en los taludes de 0.25 y un ancho de 7 metros (fig. 28).

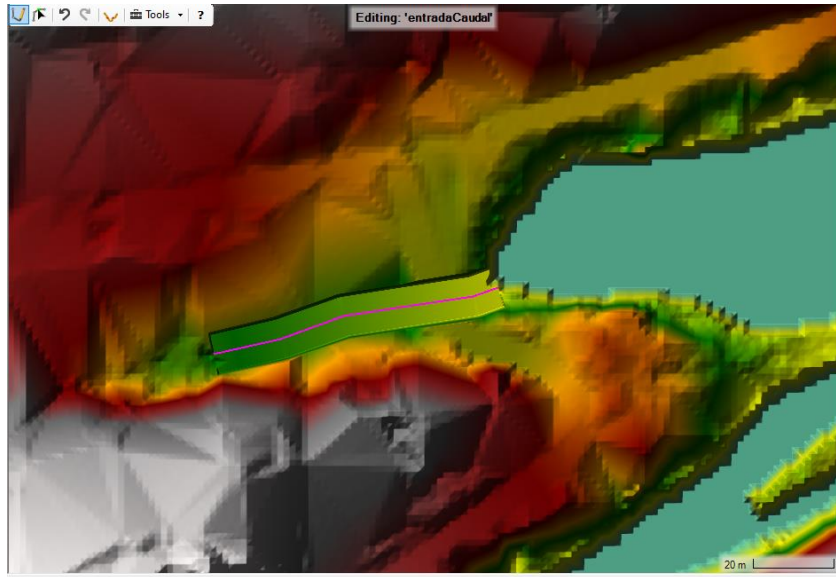


Fig. 23. Visualización del canal creado. Interfaz de Hec-RAS.
Elaboración propia

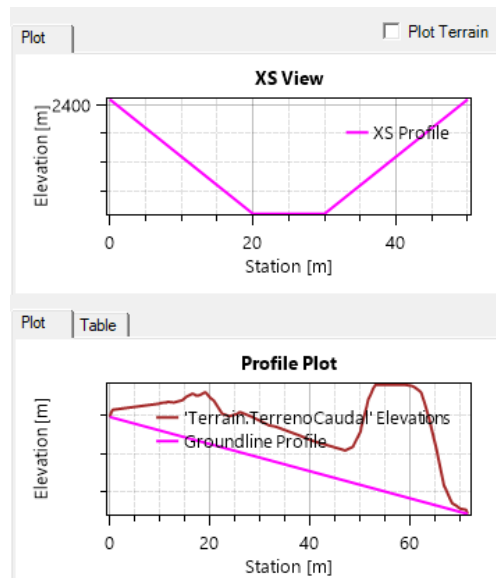
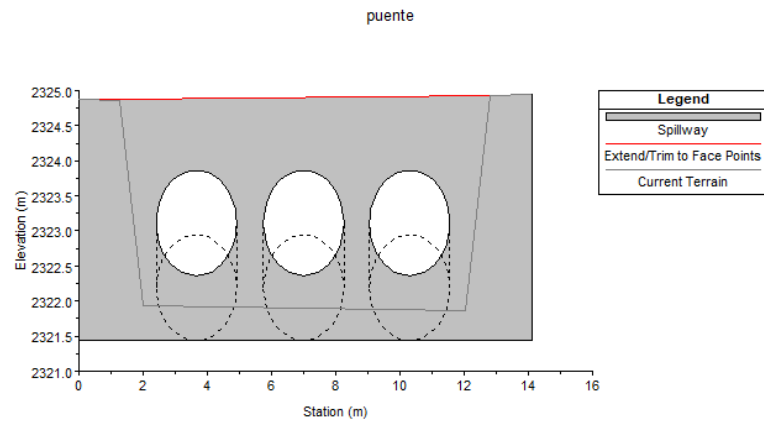


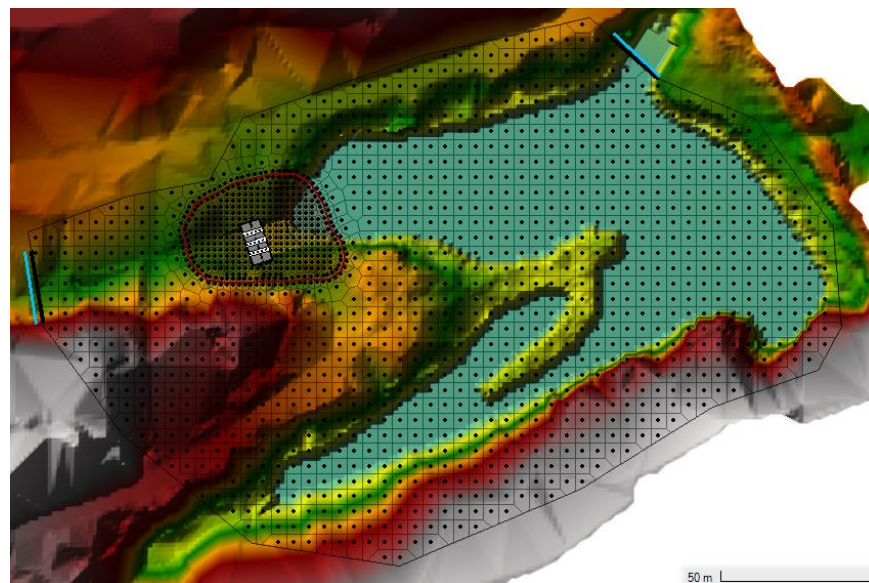
Fig. 24. Corte transversal (arriba) y longitudinal (abajo) del canal.
Elaboración propia

Una vez creado el canal por donde fluirá el caudal se procedió a diseñar el puente que se encuentra a la entrada de la presa. Para ello se modeló una estructura tipo Culvert con un ancho de 7 metros desde la entrada a la salida del caudal, un ancho de 11.5 m en la parte superior y 10 m en la parte inferior. Dentro del box Culvert se modelaron 3 túneles de forma circular con un diámetro de 1.5 m.



*Fig. 25. Diseño de la estructura tipo Culvert.
Elaboración propia*

Con el objetivo de optimizar la simulación se estableció una malla regular con celdas de 5x5 metros alrededor de la presa, mientras que alrededor del puente se estableció un área de mayor resolución (celdas de 2x2 m), ya que el área de mayor interés para el análisis de riesgo se encuentra alrededor del puente debido al tránsito de personas y transporte.



*Fig. 26. Malla con celdas de 5x5m y 2x2m alrededor de la presa y puente respectivamente.
Elaboración propia a partir de datos de INEGI*

4. Resultados

4.1 Profundidad de tirante

Las simulaciones mostraron que para un periodo de retorno de 5 y 10 años no existe desbordamiento del río (fig. 31 y 32). Sin embargo, para periodos de retorno de 25 años en adelante el río se desborda (fig. 33-35).

Es de destacar que si bien, para todos los periodos de retorno se observan alturas en el tirante de agua de hasta 2 metros, estos valores máximos se ubican dentro de los márgenes del río y presa, donde no suponen un factor de riesgo para la población.

En el caso de las áreas con presencia de agua que se ubican sobre la Calzada Jalapa el análisis de peligro es distinto, ya que al ser una vía de paso para peatones y vehículos el peligro se incrementa.

En el modelado para un caudal de 25 años, el río se desborda y alcanza una altura máxima de 7.5 cm sobre la Calzada Jalapa. Para el caso del caudal con periodo de retorno de 100 años las afectaciones son mayores, ya que el área inundada incrementa de manera notable, alcanza una altura de hasta 30 cm sobre la vialidad. Por otro lado, para un periodo de retorno de 500 años el área afectada no se incrementó de forma notable; sin embargo, la altura máxima del tirante de agua alcanzó los 48 cm, lo que aumenta de forma importante el peligro alrededor del puente.

Para realizar el análisis temporal del comportamiento de la inundación se tomó las 00:00 como hora del inicio de la precipitación. Dadas las características de los hietogramas, todos ellos con una duración de 3 horas, la mayor intensidad de precipitación se tiene a la 1:30, mientras que los hietogramas alcanzan el valor máximo de caudal a las 2:45.

Al tener en cuenta lo anterior en la tabla 12 se muestra la hora a la que inició el desborde del río, la hora en que el cauce retrocedió a los márgenes del río y el tiempo total de la inundación. Es importante resaltar que en todos los casos el punto de mayor altura en el caudal se alcanza a las 2:45, por lo que el tiempo entre el inicio del desborde y el máximo de la inundación suele ser menor y más abrupto respecto al tiempo que le toma al río regresar a su cauce.

Tabla 12. Análisis temporal del desborde del río

Periodo de Retorno	Hora inicio	Hora Fin	Tiempo total
25 años	2:30	3:00	30 min
100 años	2:15	3:30	75 min
500 años	2:10	3:55	105 min

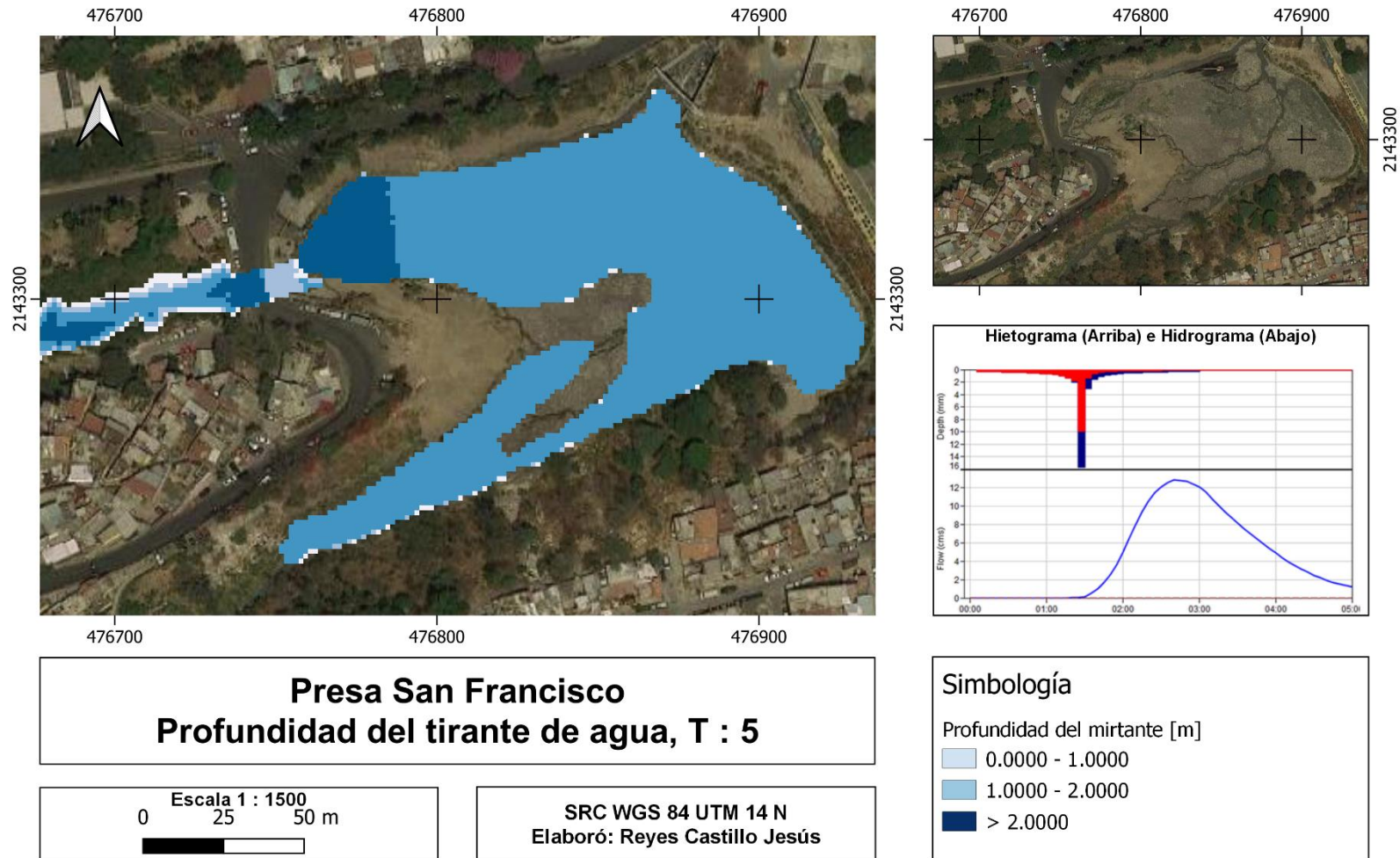


Fig. 27. Profundidad del tirante de agua, T5.
Elaboración propia

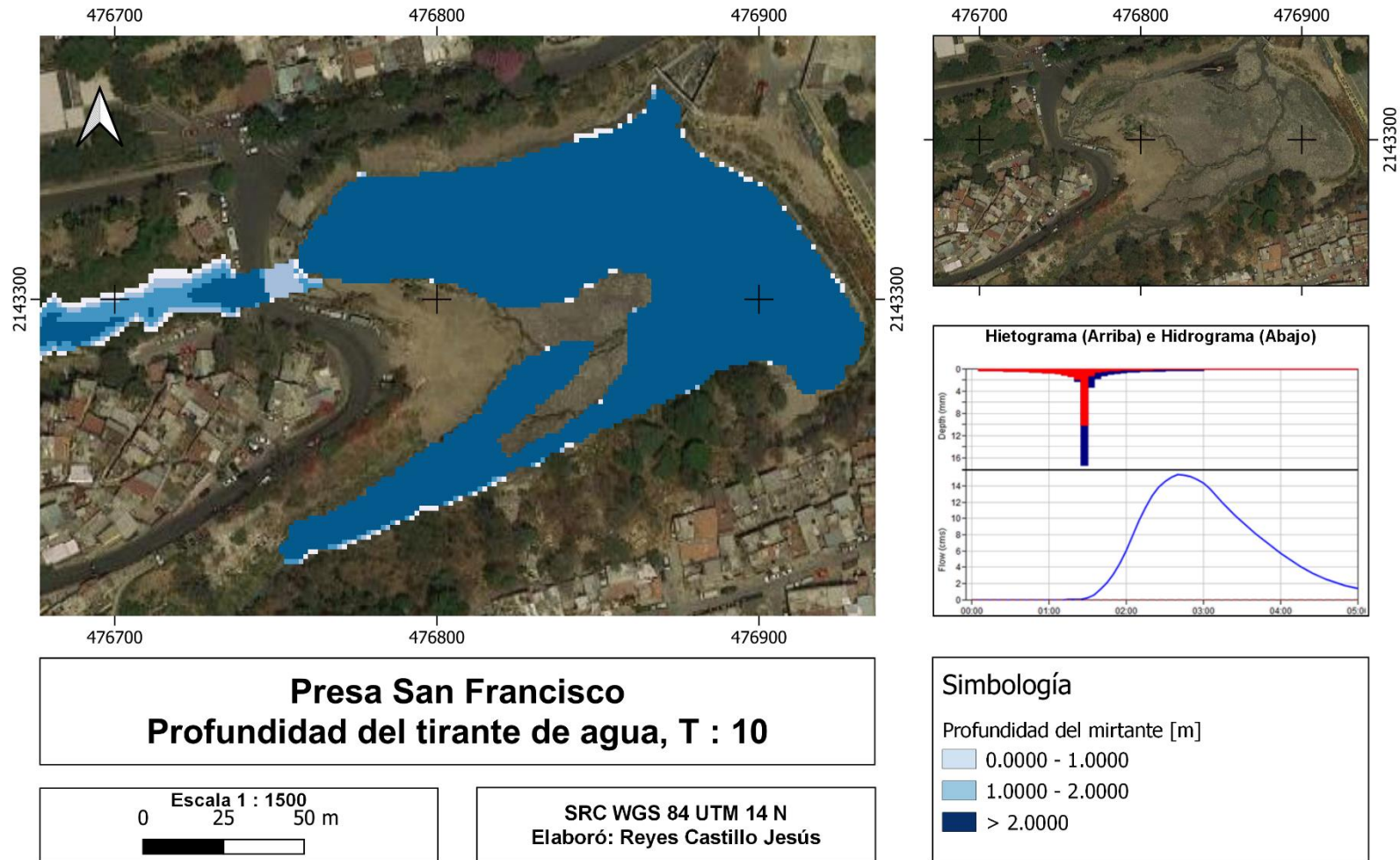


Fig. 28. Profundidad del tirante de agua, T10.
 Elaboración propia

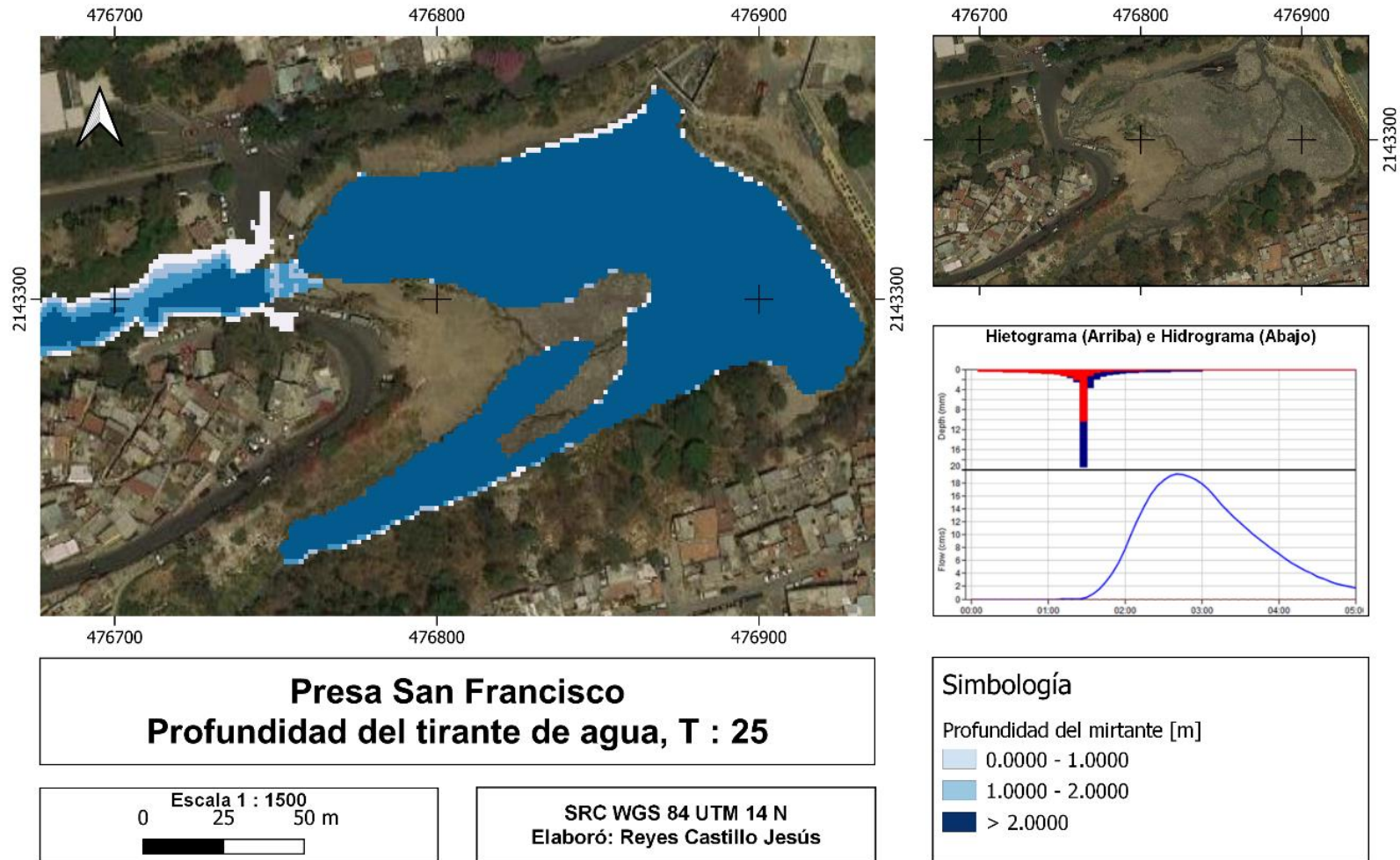


Fig. 29. Profundidad del tirante de agua, T25.
 Elaboración propia

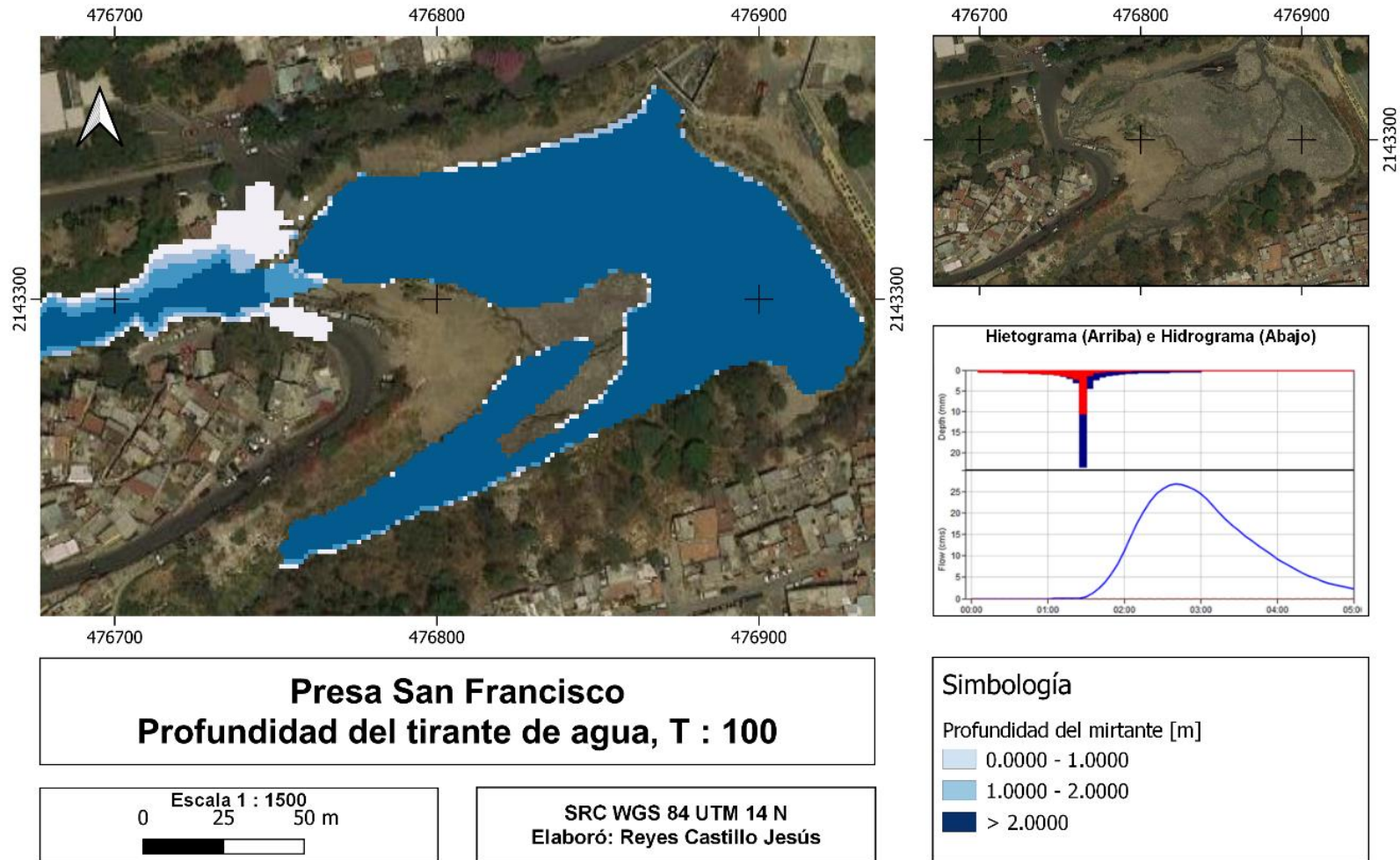


Fig. 30. Profundidad del tirante de agua, T100.
Elaboración propia

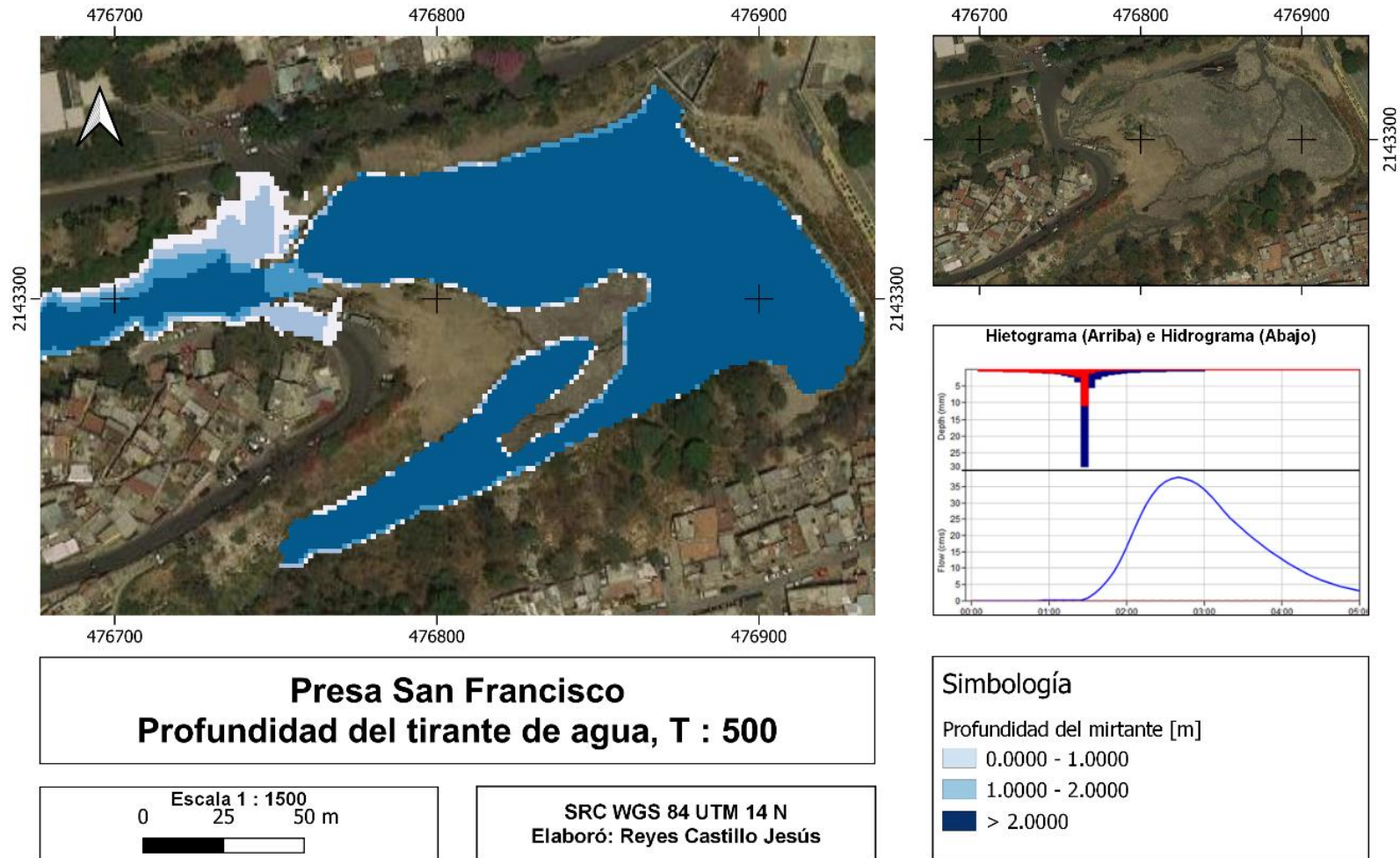


Fig. 31. Profundidad del tirante de agua, T500.
 Elaboración propia

4.2 Velocidad de tirante

Al realizar el análisis de la velocidad de caudal, se observa un comportamiento similar al mostrado en el tirante de agua, esto en lo que respecta a las áreas de inundación. Los valores más altos de velocidad se concentran principalmente en 2 puntos, el primero de ellos debajo del puente y el segundo a aproximadamente 40 metros aguas arriba del mismo.

En el caso de los valores altos que se encuentran sobre el lecho del río, se intuye que es debido a las variaciones en la geometría del cauce, mientras que las velocidades altas que se observan en el puente se deben a la disminución del área transversal del cauce.

Al realizar el análisis de peligro, las zonas con mayor importancia son las vialidades que presentan encharcamiento y flujo de agua, es ahí donde el análisis de velocidad de caudal es de vital importancia, ya que valores altos en la velocidad pueden ocasionar el arrastre de personas o vehículos.

Tabla 13. Velocidades máximas sobre Calz. Jalapa

Periodo de retorno [años]	Velocidad máxima [m/s]
25	0.3
100	1.8
500	2.6

El modelado hidráulico arrojó velocidades máximas de 0.3, 1.8, y 2.6 m/s sobre la calzada Jalapa, esto para periodos de retorno de 25, 100 y 500 años respectivamente. Con lo cual se observa que el peligro por inundación para un periodo de retorno de 25 años es relativamente bajo, mientras que para 100 y 500 años el riesgo aumenta de forma sustancial, ya que la velocidad del cauce sobre la calzada Jalapa puede ocasionar el arrastre de personas o incluso el volcamiento de vehículos.

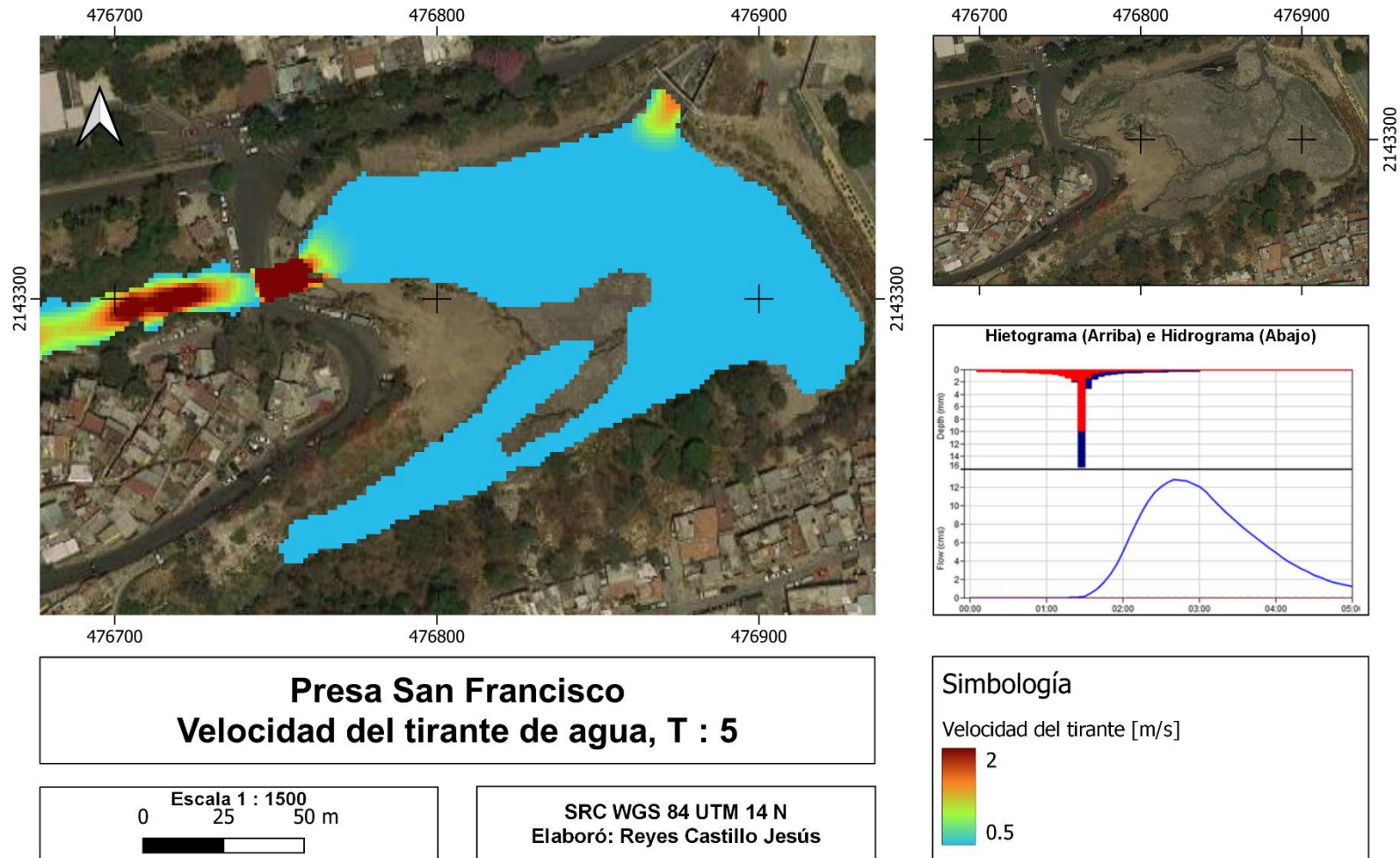


Fig. 32. Velocidad del tirante de agua, T5.
Elaboración propia

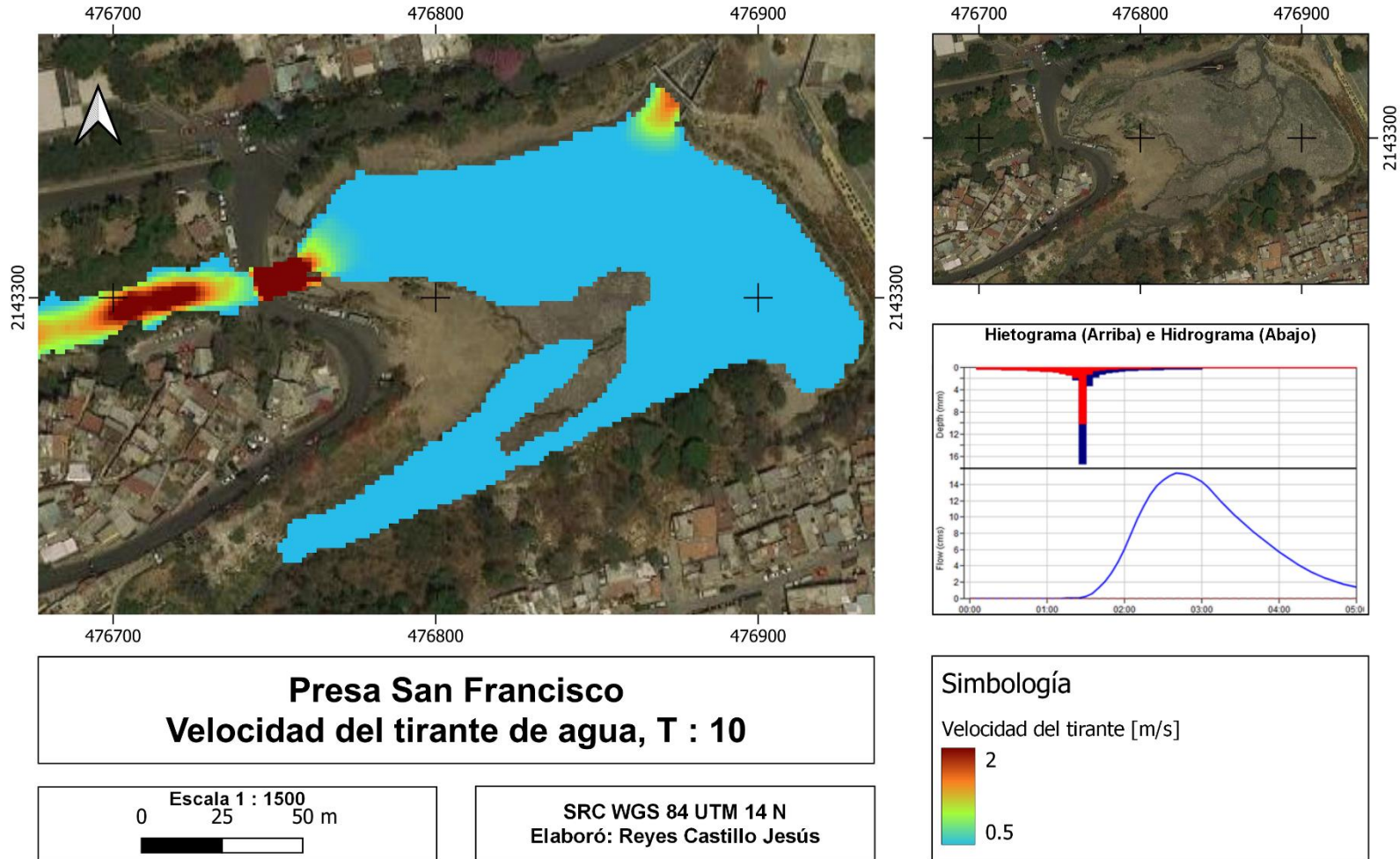


Fig. 33. Velocidad del tirante de agua, T10.
 Elaboración propia

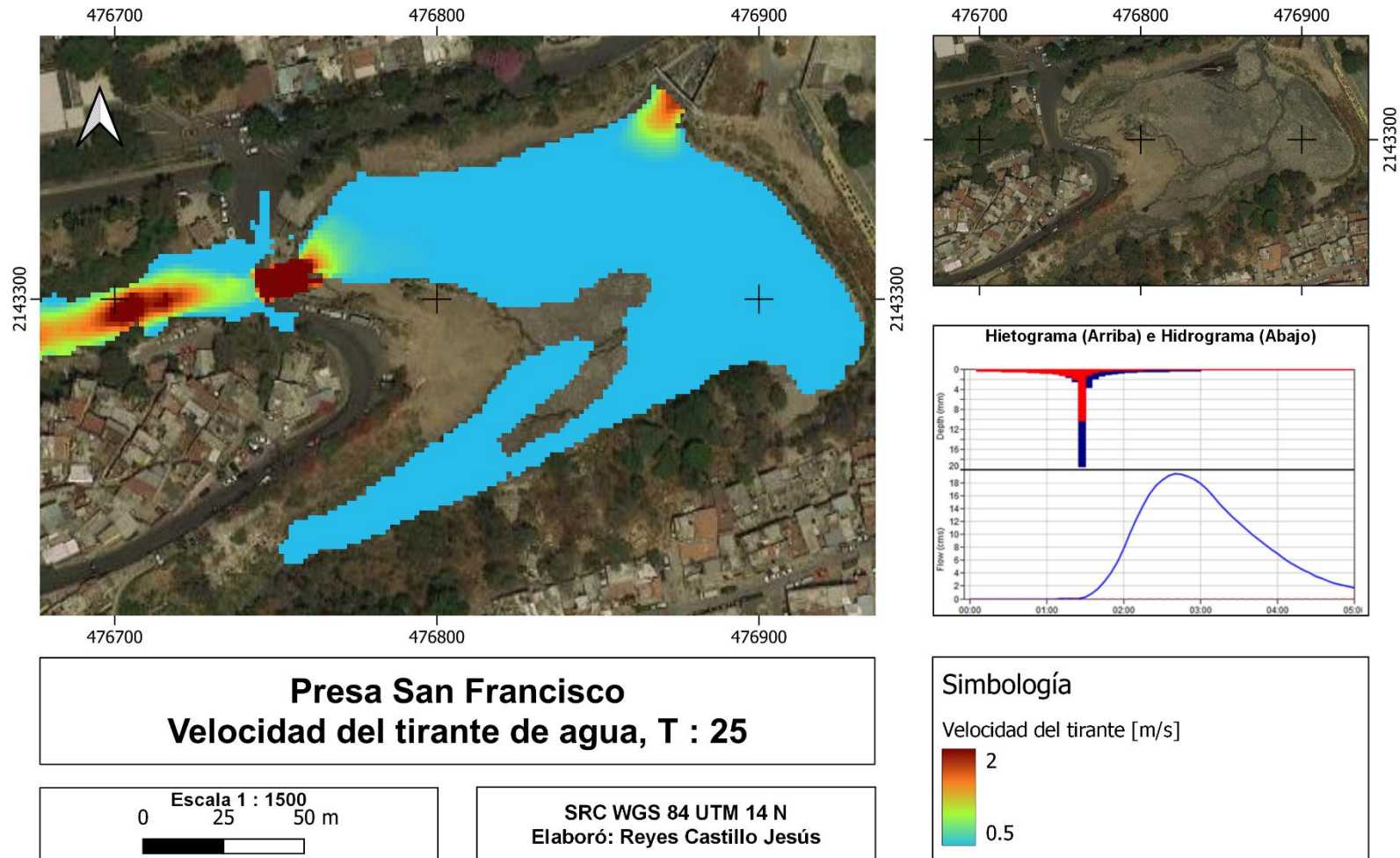


Fig. 34. Velocidad del tirante de agua, T25.
 Elaboración propia

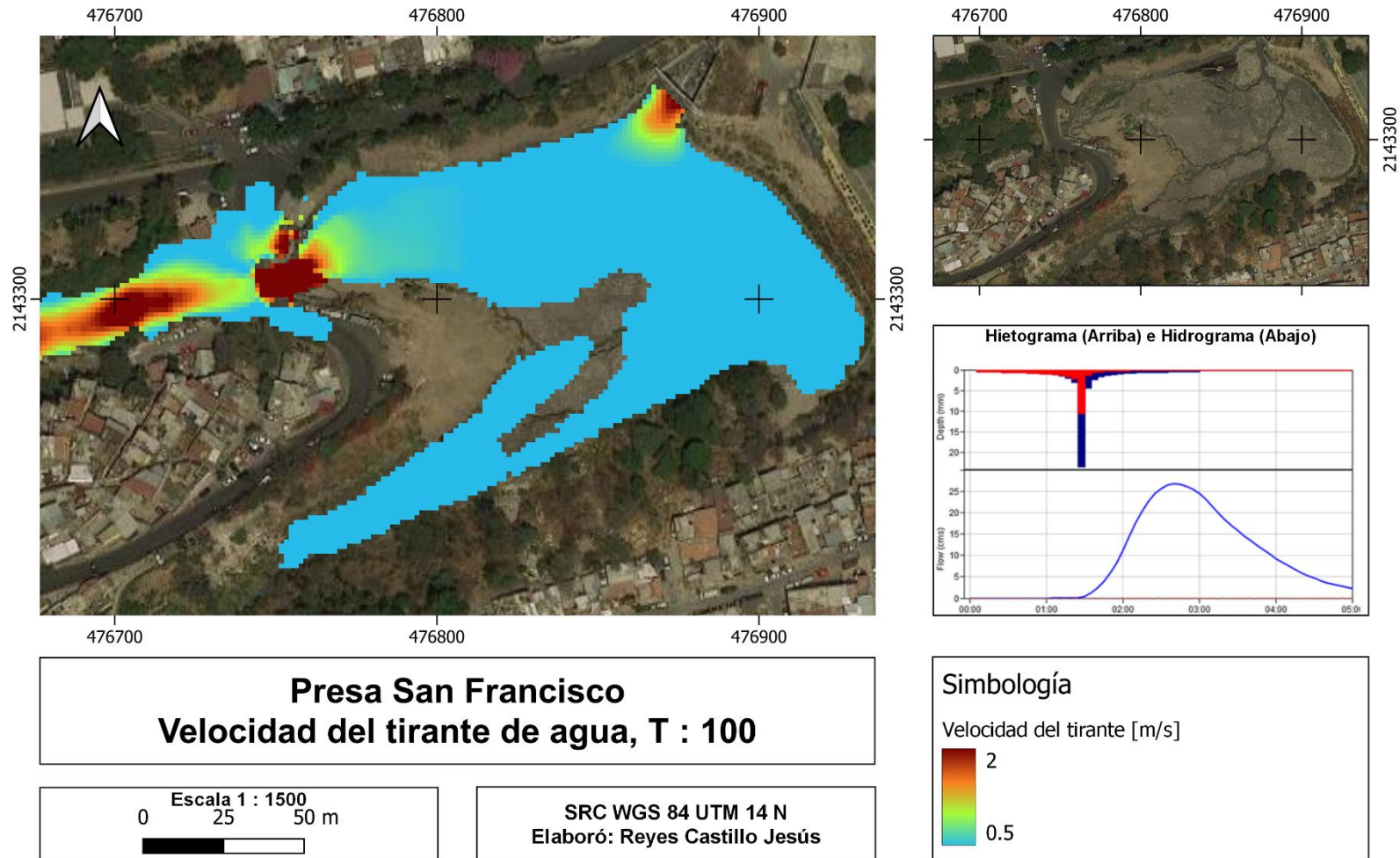


Fig. 35. Velocidad del tirante de agua, T100.
 Elaboración propia

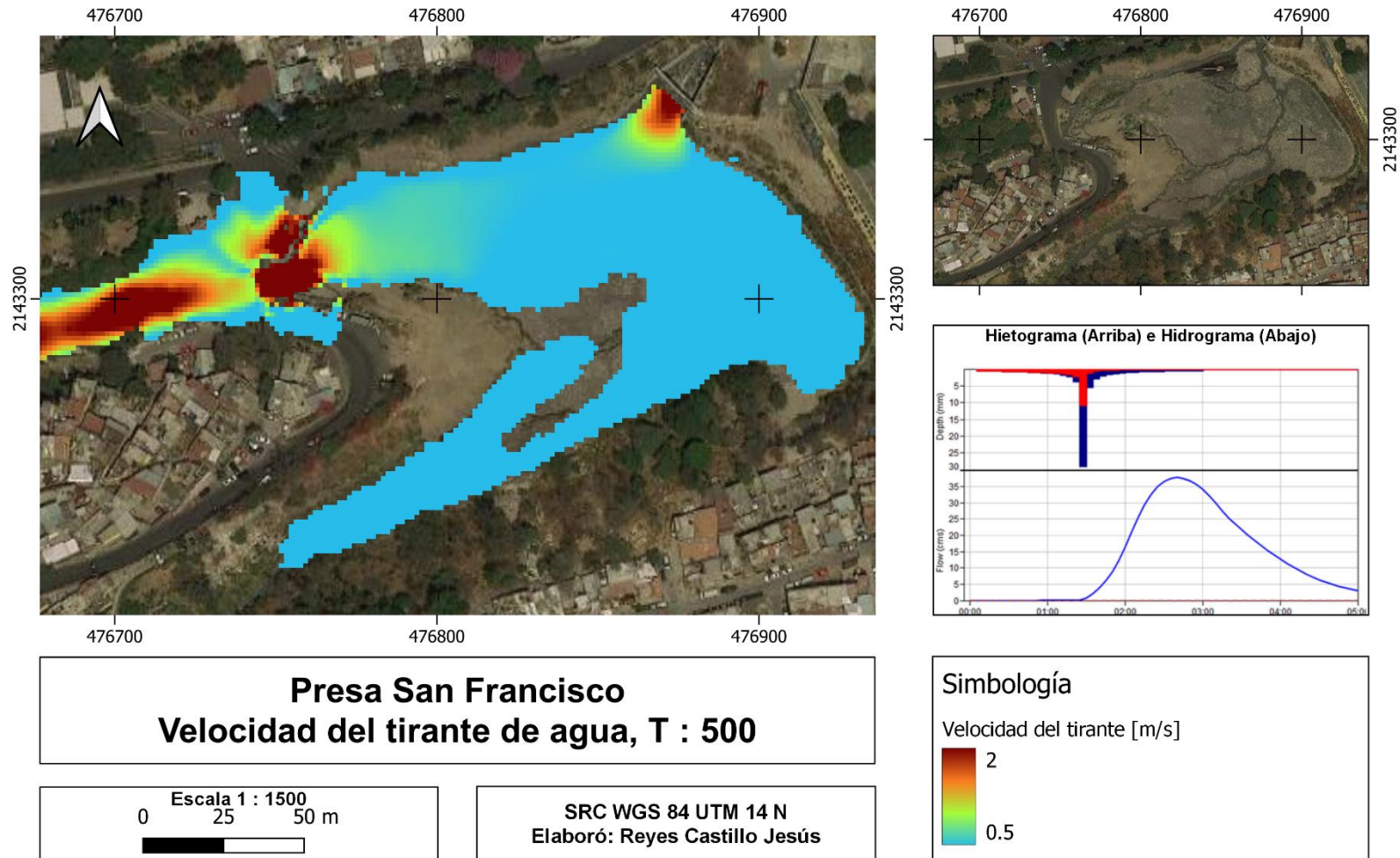


Fig. 36. Velocidad del tirante de agua, T500.
Elaboración propia

4.3 Discusión de resultados

Las simulaciones mostraron que para precipitaciones asociadas a periodos de retorno de 5 y 10 años el río permanece en su cauce sin causar afectaciones a las zonas aledañas. Sin embargo, para periodos de retorno de 25 años o más se observó que el río sale de su caudal, inundando la calzada Jalapa e impidiendo el paso a vehículos y peatones, obstruyendo así una importante vía de comunicación en la zona.

En el caso de un cauce con periodo de retorno de 25 años se considera que el peligro es bajo, esto debido a la baja altura del tirante agua y la baja velocidad del cauce. Por otro lado, para periodos de retorno de 100 y 500 años el aumento de riesgo es sustancial, ya que no solo el área inundada aumenta de forma importante, sino que la altura del tirante llega a alcanzar 30 y 48 cm respectivamente, lo cual aunado a la alta velocidad del cauce (1.8 y 2.6 m/s) puede llegar a ocasionar el arrastre de personas y vehículos.

El modelado de los escurrimientos mediante el método del número de curva arrojó resultados muy fiables en cuanto al tiempo que le toma al caudal alcanzar su máxima altura. Con este método se calculó una capacidad de absorción de la cuenca de 295×10^3 [m³] de agua, con lo cual cualquier volumen de precipitación extra se convierte en escurrimiento.

El tiempo de concentración calculado para la microcuenca fue de 44 minutos, mientras que el tiempo de concentración obtenido de manera experimental mediante el uso del sensor de nivel de caudal fue de 63 minutos. Es decir que se cuenta con aproximadamente una hora a partir del inicio de la precipitación para comenzar a observar un aumento en el nivel del río.

Este comportamiento en la cuenca, si bien se determina en parte por el tipo de litología en la zona, se ven influenciado por el uso de suelo en la cuenca, compuesto principalmente por áreas de uso residencial, las cuales favorecen el escurrimiento y dificultan la infiltración, trayendo como consecuencia un tiempo de concentración menor, disminuyendo así el margen de tiempo que se tiene para la respuesta ante inundaciones.

En los últimos años la presencia de asentamientos irregulares en la parte alta de la Alcaldía ha ido en aumento, ocasionando cambios en los usos de suelo que terminan por deteriorar los servicios ecológicos de la zona. El crecimiento de la mancha urbana y la disminución de vegetación dificultan la infiltración de lluvia y favorecen los escurrimientos.

El análisis de una problemática tan compleja como lo son las inundaciones requirió el uso de diferentes fuentes de información, las cuales según su resolución temporal y espacial ayudaron a disminuir o aumentar la incertidumbre en el cálculo del peligro, por lo que es importante reconocer las limitaciones de los insumos usados en el presente trabajo.

La ecuación general de la curva IDF (Intensidad Duración y Frecuencia) en conjunto con el método de bloques alternos, permitió modelar una serie de tormentas con una duración de 3 horas y distintos periodos de retorno, esto con el fin de analizar el comportamiento de la cuenca ante estos eventos. Sin embargo, es de destacar que la duración fue propuesta de forma arbitraria tomando como base el tiempo de concentración, por lo que los análisis realizados pueden extrapolarse a precipitaciones de diferente duración.

La información utilizada para el análisis de la precipitación se obtuvo de 2 fuentes diferentes, CONAGUA y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, esto buscando cubrir las carencias que tiene cada una de forma individual. En el caso de las estaciones hidrometeorológicas de CONAGUA si bien cuentan con un amplio histórico de registros, no hay información posterior al 2018 en ninguna de las estaciones. Además, al ser registros con una resolución de 24 horas, no es posible realizar análisis de eventos de precipitación a mayor detalle.

A diferencia de lo anterior, los registros del Observatorio hidrológico del Instituto de Ingeniería de la UNAM tienen una resolución temporal de 1 minuto, con lo cual es posible conocer la duración e intensidad de eventos de precipitación, y cómo estas características influyen en la respuesta hidrológica de la microcuenca. Sin embargo, al ser registros relativamente nuevos, no cuentan con un acervo que permita realizar análisis históricos confiables.

Finalmente, la información topográfica obtenida de INEGI, tiene algunas limitaciones a considerar. El nivel de resolución espacial, si bien es útil para realizar análisis generales a nivel cuenca, en estudios donde la zona de estudio es pequeña, se requiere mayor resolución, pues las simulaciones sobre la circulación del flujo de agua dependen directamente de los modelos de terreno. Por otro lado, la resolución temporal es quizá la mayor desventaja de estos datos, ya que, debido a la rapidez en las dinámicas de crecimiento urbano, los usos de suelo y por ende el comportamiento hidrológico del área, se ve modificado de forma importante en cortos periodos de tiempo, dejando en algunos casos, la información obsoleta.

5 Conclusiones

A partir del 2005 se ha observado una clara tendencia al alza los eventos de inundación dentro de la delegación Álvaro Obregón, los cuales representan el 32% del total de desastres que ocurren dentro de la alcaldía, siendo el 18% directamente inundaciones.

Estos datos reflejan el alto nivel de riesgo al que se encuentran sometidos los vecinos de la zona, ya que estas precipitaciones y caudales se asocian a una probabilidad de excedencia del 4%, un índice bastante alto teniendo en cuenta el comportamiento de las precipitaciones en esta parte de la cuenca.

Inicialmente, se planteó que la ocurrencia de inundaciones era producto del aumento en la intensidad de las precipitaciones, las simulaciones mostraron que el tiempo del desborde del río y el tiempo que le toma regresar a su cauce están relacionados a la intensidad de la precipitación.

Sin embargo, la probabilidad de excedencia calculada no se corresponde con la alta frecuencia con que se presentan desbordes en la presa; de esto se infiere que si bien pudo ser influenciado por las características de los insumos utilizados, también es debido a que dentro de los parámetros que se tuvieron en cuenta al realizar los modelos, no se tomaron en cuenta factores sociales como la presencia de basura a lo largo del cauce del río y en la presa, la cual modifica el comportamiento hidráulico del río e impide el correcto desfogue de la presa, causando que precipitaciones de menor intensidad puedan desembocar en eventos de inundación.

Esto hace que la búsqueda de soluciones a las inundaciones en la presa San Francisco sea una problemática que debe atacarse no solo desde el punto de vista técnico, sino del social, fomentando la reflexión y participación de la comunidad que ahí radica.

6 Bibliografía

- Albarracin Franco, S. A. (2020). Aspectos morfológicos de la cuenca del arroyo Nagel (Misiones, Argentina). *+Ingenio*.
- Aparicio, F. (1997). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa México.
- Bustos Montes, J. C. (2011). *Cálculo de flujo gradualmente variado con HEC-RAS*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- CENAPRED. (2004). *Inundaciones*. Ciudad de México: Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana.
- Chereque Morán, W. (1989). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. Lima.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*.
- CONABIO. (2023). *PORTAL DE GEOINFORMACIÓN 2023*. Obtenido de SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN SOBRE BIODIVERSIDAD (SNIB): <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAGUA. (s.f.). *Estaciones Meteorológicas Automáticas*. Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>
- Díaz Carvajal, Á. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. *Ingeniería y Desarrollo*, 19.
- Escalona, H. (22 de 08 de 2023). Acumulación de basura provocó el desbordamiento de la presa San Francisco, en la Álvaro Obregón. *La Prensa*.
- Flowers-Cano. (2017). COMPARACIÓN DE CUATRO TÉCNICAS PARA SELECCIONAR LA DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE MEJOR AJUSTE PARA EL ANÁLISIS DE DATOS DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL EN MÉXICO. *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability*.
- García-Ruiz, J. M.-V.-I. (1987). *Aspectos dinámicos de un cauce fluvial en el contexto de su cuenca: el ejemplo del río Oja (Vol. 3)*. Zaragoza: CSIC-CSIC Press.
- González del Tanago, M. (2008). *Inundaciones y Cambio climático*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Gutiérrez Lozano, J. (2011). Periodos de retorno de lluvias torrenciales para el estado de Tamaulipas, México. *Investigaciones geográficas*.
- Hydrology Subcommittee. (1986). Flood, Flow, Frequency. Bulletin 17B. *Interagency Advisory Committee on Water Data. Office of Water Data Coordination, US Geologic Survey, Reston, VA*.

- INEGI. (2020). *Modelo digital de elevación de tipo superficie con resolución de 1.5 metros generado a partir de datos de altimetría del relieve*.
- Instituto de Ingeniería UNAM. (s.f.). *Observatorio hidrológico en tiempo real*. Obtenido de <https://www.oh-iiunam.mx/>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (1 de Agosto de 2019). *¿Qué es una cuenca?* Obtenido de <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369#:~:text=Se%20considera%20que%20una%20cuenca,menos%20de%205%20000%20hect%C3%A1reas>.
- Lopez, J. J. (2012). Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas. *Obras y proyectos*, 16.
- Lugo-Hubp, J. (1995). *Relieve, litología y riesgos en la zona urbana de la delegación Álvaro Obregón, D.F.* Ciudad de México: Instituto de Geología, UNAM.
- Natural Resources Conservation Service. (1986). *Urban Hydrology for small watersheds*.
- Ordoñez, J. J. (2011). *Ciclo Hidrológico*. Lima.
- Pizarro, R. (2003). *Módulo 2 Curvas Intensidad Duración Frecuencia*. Sociedad Estándares de Ingeniería Para Aguas Y Suelos LTDA.
- Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F. (2010). *Ocupación irregular y riesgo socio-ambiental en las barrancas de la delegación Álvaro Obregón, Distrito Federal*. México.
- Sánchez, F. J. (2022). *Hidrología Superficial y Subterránea*. 2ª ed. Kindle Direct Publishing.
- Santiago, B. (2008). *Introducción a la Hidrología*. Santa Rosa, Argentina: EdUNLPam.
- Senciales González, J. M. (1998). El análisis morfológico de las cuencas fluviales aplicado al estudio hidrográfico. *Norba. Revista de geografía.*, 29.
- Soil Conservation Service. (1972). *Hydrologic Soil Cover Complexes*.
- Témez, J. R. (1991). Extended and improved rational method. Version of the highways administration of Spain. *Proc. XXIV Congress*.
- UNDRR. (s.f.). *DesInventar Sendai*. Obtenido de <https://www.desinventar.net/whatisdesinventar.html>
- Vélez Upegui, J. J. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *Dyna*.
- Water Resources Council, H. C. (1975). Guidelines for determining flood flow frequency (No. 17). *Water Resources Council, Hydrology Committee*.