



Universidad Autónoma de Querétaro
 Facultad de Ingeniería
 Maestría en Ciencias en Hidrología Ambiental

DETERMINACIÓN DE ZONAS DE RIESGO POR INUNDACIÓN PARA
 DISTINTOS ESCENARIOS DE URBANIZACIÓN.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
 Maestría en Ciencias en Hidrología Ambiental

Presenta:

Ing. Luis Ángel Miranda Sánchez

Dirigido por:

M. en C. José Antonio Quevedo Tizado

M. en C. José Antonio Quevedo Tizado
 Presidente

Antonio Quevedo

Firma

Dr. Eduardo Álvarez Mendiola
 Secretario

[Signature]

Firma

Dr. Carlos Alberto Chávez García
 Vocal

[Signature]

Firma

Dr. Nabil Mobayed Khodr
 Suplente

[Signature]

Firma

M. en I. Pablo Talamantes Contreras
 Suplente

[Signature]

Firma

[Signature]

Dr. Aurelio Domínguez González
 Director de la Facultad

Goana

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
 Director de Investigación y Posgrado

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación refiere a la problemática que se tiene con las inundaciones y las afectaciones que tienen sobre los aspectos económicos, materiales y sociales.

La infraestructura hidráulica se ve rebasada debido a que no se contempla los escurrimientos que se generaran a futuro por el cambio de uso de suelo, además se generan zonas de riesgo por inundaciones.

Actualmente se tiene un crecimiento acelerado en la urbanización, asociado al crecimiento poblacional con un incremento de hasta el 2.6 por ciento (INEGI, 2015). Lo cual genera un cambio de uso de suelo y por lo tanto un incremento en los escurrimientos superficiales favoreciendo las inundaciones. En general se realizan evaluaciones del riesgo considerando sólo las condiciones actuales de urbanización sin considerar el crecimiento de la mancha urbana y zonas de riesgo en condiciones futuras.

El problema en la ciudad de Querétaro, en especial en la zona de estudio, la subcuenca El Nabo, radica en que el aumento de la mancha urbana genera un cambio en el uso de suelo por lo tanto mayor escurrimiento superficial y debido a que las obras de conducción y regulación existentes han sido rebasadas en su diseño por lo cual ocurren siniestros donde estas obras son insuficientes.

Por lo tanto se requiere contemplar las zonas de riesgo por inundación que contemplando escenario de urbanización futura se determine las áreas actuales y futuras con riesgo por inundación realizando una simulación de las zonas de inundación respecto a los escurrimientos futuros y mediante ésta simulación determinar y plasmar en mapas las zonas probables futuras de inundación que permitan definir áreas que sean contempladas para una mejor planeación de la urbanización y construcción de infraestructura.

(Palabras clave: Inundaciones, riesgo, infraestructura, urbanización, planeación)

SUMMARY

In this research concerns the problem that have with the floods and the effects they have on the economic, physical and social aspects.

The hydraulic infrastructure is exceeded because the runoff will be generated in the future by changing land use is not contemplated, besides risk areas are generated by floods.

Actually, the zone has a rapid growth in urbanization, population growth associated with an increase of up to 2.6 percent (INEGI, 2015). Which leads to a change in land use and therefore an increase in surface runoff favoring floods. Overall risk assessments considering only the present conditions of urbanization without considering the growth of the urban area and areas at risk in future conditions are made.

The problem in the city of Queretaro, especially in the study area, the sub Turnip, is that increasing urban sprawl generates a change in land use therefore greater surface runoff and because the works existing management and regulation have been exceeded in design so claims where these works are insufficient occur.

Therefore, required contemplate risk areas for flooding contemplating scenario future development of current and future risk areas determined by flooding performing a simulation of flood zones regarding future runoff and through this simulation to determine and shape in maps probable future flood areas for defining areas that are covered for better planning urbanization and infrastructure construction.

(Key words: Floods, risk, infrastructure, urbanization, planning)

A MI FAMILIA.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de ingeniería y la Universidad Autónoma de Querétaro:

A mis sinodales, jurado, coordinador de la carrera y profesores por formarme y darme las herramientas y conocimientos para ser un buen profesionista, así como el compartir algunas de sus buenas y malas experiencias laborales, de las cuales aprendí desde antes de entrar al ambiente laboral.

A la Facultad de Ingeniería y la Universidad Autónoma de Querétaro, por darme la oportunidad de ser alumno de esta institución, llevando siempre la educación impartida en esta mí facultad.

Al CONACYT por el apoyo económico que me brindo para poder realizar un buen trabajo de investigación y aportar algo a la sociedad.

A mi asesor de tesis Antonio Quevedo Tiznado por el apoyo, ayudarme y otorgarme las herramientas para poder concluir este trabajo de tesis, gracias por su paciencia y la confianza que me brindo para obtener un buen trabajo de tesis.

Gracias a Dios por permitirme llegar a este momento tan importante, gracias por mi familia y las personas que me puso en mi camino para que me acompañaran, apoyaran y ayudaran a lo largo de mi vida.

A mis padres:

Como una muestra de mi agradecimiento por su apoyo, confianza, sacrificios, esfuerzo, comprensión y consejo en esta etapa de mi vida en la que gracias a Dios y a ustedes he culminado una de mis más grandes metas, porque mis triunfos son simplemente una muestra del trabajo en familia y me enorgullece compartirlos con ustedes. Mama que siempre estuviste ahí para educarme y darme el apoyo para levantarme cada que tropezaba y guiarme por el camino que me trajo a este punto donde me siento tan orgulloso de ser su hijo. Papa que siempre me apoyaste sin importar que se tuviera que trabajar más allá de lo necesario, con la ilusión de sacar adelante a nuestra familia.

Gracias a mis padres estoy aquí y con los sacrificios que pasamos, hoy estoy orgulloso de que me enseñaron a valorar, luchar y nunca rendirme para conseguir lo que me propongo, gracias por sus enseñanzas y consejos que me alentaron a ser una mejor persona.

A mis hermanos:

Gracias por el apoyo que recibí y las lecciones que aprendimos juntos, en donde valoramos el esfuerzo que contribuimos todos como familia para poder concluir esta meta, en la que recuerdo todo los sacrificios y las cosas que no pudimos tener para poder lograr acabar mis estudios. Gracias por su compañía, alegría y cosas que me enseñaron en hasta el día de hoy, que me hace cada vez ser una mejor persona.

A mi esposa:

Gracias por aguantarme tanto tiempo, por todo el apoyo, la paciencia y los ánimos que me dabas para perseguir mis sueños y seguir adelante, gracias por el tiempo y el cariño que hicieron no desesperarme y continuar hasta lograr hoy esta gran meta.

A mis amigos:

Gracias por ser parte de esta etapa de mi vida y por apoyarme en los problemas que en algunas ocasiones no eran de la escuela, pero siempre estuvieron ahí, en los momentos difíciles y también en las fiestas, gracias por contagiarme de esa alegría, esos momentos que recordare para toda la vida como parte de mi juventud.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 ANTECEDENTES	12
1.2 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	17
1.2.1 <i>Hipótesis:</i>	17
1.2.2 <i>Objetivo general:</i>	17
1.2.3 <i>Objetivos particulares:</i>	18
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 USO DE SUELO Y VEGETACIÓN.	19
2.2 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN.	19
2.3 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.	20
2.4 HIDROGRAMA.....	20
2.5 MÉTODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR (HUT)	22
2.6 SOFTWARE UTILIZADO	24
2.6.1 <i>Ax</i>	24
2.6.2 <i>Google earth</i>	24
2.6.3 <i>Arcgis</i>	24
2.6.4 <i>Iber</i>	25
3. METODOLOGÍA	28
3.1 INFORMACIÓN REQUERIDA	28
3.1.1 <i>Topografía</i>	28
3.1.2 <i>Estación meteorológica de influencia</i>	28
3.1.3 <i>Uso de suelo y edafología</i>	29
3.2 DELIMITACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.	30
3.2.1 <i>Delimitación de la cuenca</i>	31
3.2.2 <i>Características fisiográficas de la cuenca</i>	33
3.2.3 <i>Características de uso de suelo y vegetación actuales</i>	35
3.2.4 <i>Visita de campo</i>	38
3.3 DETERMINACIÓN DE LOS DISTINTOS ESCENARIOS DE URBANIZACIÓN	41
3.4 ESTUDIOS HIDROLÓGICOS PARA LOS DISTINTOS ESCENARIOS DE URBANIZACIÓN.	41

3.4.1	<i>Análisis de lluvias de diseño.</i>	41
3.4.2	<i>Parámetros fisiográficos de la cuenca.</i>	48
3.4.3	<i>Coefficientes de escurrimiento asociados al uso de suelo y vegetación para los distintos escenarios de urbanización.</i>	48
3.4.4	<i>Tiempo de concentración para los distintos escenarios de urbanización.</i>	49
3.4.5	<i>Calculo de los gastos por el método HUT (Hidrograma Unitario Triangular).</i>	49
3.5	CRITERIOS Y CONSIDERACIONES DEL CASO PARTICULAR DE ESTUDIO.	50
3.6	SIMULACIÓN HIDRÁULICA Y TRÁNSITO DE AVENIDAS.	51
3.7	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA.	52
3.8	ELABORACIÓN DE MAPAS DE ZONAS DE INUNDACIÓN PARA LOS DISTINTOS ESCENARIOS FUTUROS DE URBANIZACIÓN.	52
3.9	ESTIMACIÓN DE COSTOS PROBABLES POR DAÑOS DEBIDO LA URBANIZACIÓN EN LAS ZONAS DE INUNDACIÓN.	52
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	53
4.1	ESCENARIOS DE URBANIZACIÓN.	53
4.2	HIDROGRAMAS Y GASTOS MÁXIMOS PARA LOS DISTINTOS ESCENARIOS DE URBANIZACIÓN.	53
4.3	SIMULACIÓN HIDRÁULICA Y TRÁNSITO DE AVENIDAS.	57
4.4	ÁREAS DE INUNDACIÓN Y TIRANTE MÁXIMO PARA LOS DISTINTOS ESCENARIOS DE URBANIZACIÓN.	64
4.5	MAPAS DE ZONAS DE INUNDACIÓN PARA LOS DISTINTOS ESCENARIOS FUTUROS DE URBANIZACIÓN.	66
4.6	ESTIMACIÓN DE COSTOS PROBABLES POR DAÑOS EN LA URBANIZACIÓN FUTURA.	70
5.	CONCLUSIONES	71
6.	REFERENCIAS	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ecuaciones utilizadas en las condiciones internas.	26
Tabla 2. Datos de precipitación de la Estación Juriquilla, Querétaro, Qro	29
Tabla 3 Parámetros fisiográficos de la cuenca.	33
Tabla 4. Escenarios de Urbanización y porcentaje de urbanización.	41
Tabla 5. Error estándar obtenido a partir del programa AX.	45
Tabla 6. Error estándar obtenido a partir del ajuste con la función Doble Gumbel Optimizada para la estación.	45
Tabla 7. Ajuste de los datos a partir de la función de distribución Doble Gumbel Optimizada para la estación.	47
Tabla 8. Precipitación para diferentes periodos de retorno para la estación Juriquilla.	47
Tabla 9 Parámetros fisiográficos de la cuenca.	48
Tabla 10. Escenarios de Urbanización.	53
Tabla 11. Coeficientes CN, Tiempo de concentración y gastos máximos para los distintos escenarios de urbanización con un $Tr= 25$ años.	54
Tabla 12. Coeficientes CN, Tiempo de concentración y gastos máximos para los distintos escenarios de urbanización con un $Tr= 50$ años.	54
Tabla 13. Áreas de inundación y tirante máximo para los distintos escenarios de urbanización con un $Tr= 25$ años.	64
Tabla 14. Áreas de inundación y tirante máximo para los distintos escenarios de urbanización con un $Tr= 50$ años.	64
Tabla 15. Costos probables para los distintos escenarios de urbanización con un $Tr= 25$ años.	70
Tabla 16. Costos probables para los distintos escenarios de urbanización con un $Tr= 50$ años.	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Herramientas Iber y un ejemplo de edición de nodos de una malla.	27
Figura 2. Ubicación de la cuenca de estudio.....	30
Figura 3. Cuenca de influencia en el sitio de estudio.	31
Figura 4. Curvas de nivel a cada 50m.	32
Figura 5. Sistema de arroyos que pasan cerca de la zona de estudio.	34
Figura 6. Se muestra el cauce teórico principal la cuenca de estudio.....	34
Figura 13. Se muestra la principal cobertura de suelo dentro de la cuenca que son parcelas agrícolas y matorrales.	35
Figura 14.-Mapa de Edafología dentro de la cuenca de estudio (CONABIO, 2015). Donde se muestra que se tiene una cobertura de Vertisol Pelico en la mayoría de la cuenca de estudio, con lo cual se define el tipo de suelo.	36
Figura 9. Cobertura de suelo en condiciones Actuales.	37
Figura 4. Se muestra la pendiente en la cuenca, donde se observa una pendiente plana en la parte baja de la cuenca, donde se generan las zonas de inundación.	38
Figura 5. Se muestra la vegetación preeminente de la cuenca de estudio.	39
Figura 6. Se muestran varias fotografías de la zona de estudio, representando la vegetación que en su mayoría cubre la zona, así como la pendiente que conforma la zona.	39
Figura 7. Estratos de suelo en la zona de estudio.....	40
Figura 14. Estaciones climatológicas aledañas al sitio de estudio.	42
Figura 16. Influencia de las Estaciones Climatológicas cercanas; sobre el Sitio de Estudio.....	43

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Hidrogramas de crecientes con distintos escenarios de Urbanización para un $Tr=25$ años.	55
Gráfica 2. Hidrogramas de crecientes con distintos escenarios de Urbanización para un $Tr=50$ años.	56

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Actualmente en la ciudad de Querétaro se tiene un crecimiento acelerado en la urbanización, asociado al crecimiento poblacional con un incremento anual de hasta el 2.6 por ciento (INEGI, 2016). Tal situación ha generado un cambio de uso de suelo y por lo tanto un incremento en los escurrimientos superficiales favoreciendo las inundaciones. En general, los estudios de evaluación del riesgo o posibilidad de ocurrencia de inundaciones consideran sólo las condiciones actuales de urbanización a la vez que desprecian el crecimiento de la mancha urbana, y con ello el aumento de las zonas de riesgo, en condiciones futuras.

Las inundaciones son un fenómeno natural, por el cual el agua cubre los terrenos, llegando en ciertas ocasiones a una altura que puede dejar sumergidas viviendas, calles, destruir cosechas, con peligro incluso vital para toda la población que habiten el lugar, y enormes pérdidas económicas (Gómez *et al.*, 2009). Cada año eventos extremos de este tipo causan daños en propiedades y cobran vidas en muchas partes del mundo, además de generar costos económicos muy altos. Durante las últimas décadas las ciudades en riesgo se han incrementado considerablemente, en especial sobre países en desarrollo, estimulado por el crecimiento demográfico y la constante reconfiguración urbana (Hernández y Vieyra, 2010). Éstos efectos cada vez son más frecuentes, situación que muestra el impacto destructivo que podría tenerse en el futuro próximo (Mobayed *et al.*, 2001).

El régimen de lluvias característico de cada zona puede presentar valores extremos los cuales producen fenómenos naturales de crecidas, que a la vez dan origen a situaciones de inundaciones (Esparza, 2005). Es por esto, que surge el interés en comprender y describir la naturaleza aleatoria de los fenómenos hidrológicos.

El riesgo es la combinación de la probabilidad y la consecuencia de no controlar el peligro, el cual refiriere como una condición o característica intrínseca que puede causar un daño, éste concepto, aplicado al tema de las inundaciones, el cual es un tema regional que no ha podido ser solucionado sólo con obras estructurales. Por lo tanto acciones de tipo no estructurales son necesarias como el control de uso y ocupación del suelo en zonas con riesgo de inundación, a través de la elaboración de mapas de riesgo de inundación por medio de la modelación matemática hidrodinámica (Riccardi, 1997).

El medio más obvio para reducir los daños causados por las inundaciones es la alerta en un tiempo específico. La alerta de inundaciones permite a las personas evacuar un área en peligro. Si el tiempo es suficiente, las posesiones vulnerables pueden ser movidas de la zona peligrosa y ser protegidas, ya sea con sacos de arena u otras medidas que minimicen los daños en las propiedades (Kite, 1988). Un segundo medio para reducir daños, es la planificación avanzada a partir de la probabilidad de eventos. Por ejemplo, la zonificación pluvial basada en la probabilidad de que el río o lago lleguen a tener ciertos niveles asegurando que desarrollos habitacionales e industriales no estén localizados en áreas de alto riesgo.

En resumen, si no se tiene una adecuada planeación, prevención de las zonas de probable inundación y riesgo hidráulico basadas en una correcta modelación hidráulica que considere escenarios futuros de urbanización, la infraestructura hidráulica resultará rebasada y en consecuencia con problemas de inundación.

En la actualidad se realizan simulaciones basadas en modelos hidrológicos; entendidos como una aproximación al funcionamiento real del ciclo del agua en una cuenca vertiente, se pueden clasificar en físicos y abstractos (Triviño y Ortiz,

2015). Estos modelos permiten aproximar el funcionamiento hidráulico y simular el comportamiento de las inundaciones.

Algunos modelos tratan de aplicar algoritmos basados en la hidrodinámica del flujo, pero mediante esquemas simplificados para efectuar el tránsito de avenidas. Algunos, por ejemplo, utilizan el conocido método de Muskingum o de la onda cinemática - como se hace en la serie de programas HEC (SCS, 1993); y otros, mejor aún, emplean formas simplificadas de las ecuaciones de Saint-Venant. Este último tipo de modelos ha sido elegido para simular el esquema de simulación de la escorrentía pluvial en cuencas urbanas porque, además de representar mejor el fenómeno del flujo 1D y 2D a superficie libre, efectúa evaluaciones mucho más rápidas que los modelos basados en las ecuaciones completas.

En casos particulares, la escorrentía urbana presenta claramente un comportamiento hidráulico bidimensional (plazas, calles, curvas con pendientes transversales altas, etc.). En estos casos, la simulación de la escorrentía deberá efectuarse utilizando métodos 2D. Este enfoque se basa en las ecuaciones de aguas someras bidimensionales completas. Varias simulaciones de inundaciones en áreas urbanas con sistemas de drenaje diferente superficiales se llevan a cabo a través de un método de volumen finito que se habían desarrollado en el Laboratorio de Lampit (*Laboratorio di Modellistica numeric per la protezione idraulica del Territorio*) de la Universidad de Calabria, Italia, y el resultados se compararon con los obtenidos por el modelo HEC-HMS (Gómez *et al.*, 2009).

AQUA II desarrollado para escurrimientos en llanuras. Veneré (2016) aplicó el simulador a la cuenca del arroyo Santa Catalina, afluente del arroyo Azul en la provincia de Buenos Aires. Se construyó un modelo de elevación de la zona utilizando interferometría radar con un tamaño de celda de 80 metros, resultando en una discretización de 70,000 celdas. El modelo fue calibrado sobre tres eventos

reales de ondas de precipitaciones seguidas de escurrimientos desde las zonas serranas hasta las llanuras adyacentes. El ajuste pudo realizarse asignando un valor uniforme y constante tanto para el coeficiente de infiltración como para el de escurrimiento del terreno y una variación cúbica con la altura de agua para el caso de las celdas del arroyo. El modelo así obtenido, reproduce con buena precisión el comportamiento de la cuenca ante eventos de diferentes intensidades resultados son muy similares a los observados con base en imágenes satelitales.

Por su parte Pereles *et al.* (2014) y Balde *et al.* (2008) analizaron el ajuste de distintas estrategias metodológicas para la evaluación del área inundable. Para ello se comparan la extensión de la lámina de inundación en un evento real concreto, con la predicción de la misma obtenida a partir de dos modelos de simulación de la inundación. En un caso, la predicción se realiza mediante el programa HEC-RAS; y en el segundo caso, este modelo se ve modificado a través de la evaluación integrada de la inundación y otros peligros que inciden directamente en la expansión de la lámina de agua (erosión hídrica y movimientos gravitacionales). Se utilizó como caso de análisis la inundación producida en las cuencas de los arroyos Gallegos y Las Piletas en costa oriental de la provincia de Málaga en los días 27 y 28 de marzo de 2004, a partir de un evento pluviométrico de 229 mm en 24 h. Los resultados muestran un desfase considerable entre la realidad y las predicciones según ambos modelos, aunque se observa que la evaluación integrada de peligros asociados proporciona un mejor ajuste del área inundable.

Una tendencia actual es la metodología de volúmenes finitos, aprovechando los importantes desarrollos habidos en las últimas décadas con este tipo de esquemas para las ecuaciones de las aguas someras (Vázquez-Cendón, 1999; Toro, 2009). Algunas de las herramientas disponibles y que utilizan volúmenes finitos son: Infoworks, Quad2D, las últimas versiones de Mike e Iber.

Iber es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en ríos y estuarios desarrollado a partir de la colaboración del Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA en la Universidad de Coruña, del Grupo de Ingeniería Matemática de la Universidad de Santiago de Compostela. Iber se desarrolló a partir de 2 herramientas de modelización numérica bidimensional ya existentes, Turbillón y CARPA, ambas con el método de volúmenes finitos, que fueron integradas en un único código ampliado con nuevas capacidades (Cea *et al.*, 2007; Bladé *et al.*, 2008).

Por otro lado, como complemento a la modelación hidráulica se han desarrollado metodologías que incluyen más parámetros dentro de la modelación de inundaciones. Por ejemplo, Hernández y Vieyra (2010) realizaron una correlación de variables físicas y sociales, así como del uso de diversos métodos y herramientas para obtener los parámetros necesarios en el reconocimiento de áreas de riesgo de desastre por inundaciones y caracterizar la incidencia de inundaciones a través de rangos (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto).

Se han realizado trabajos de identificación de riesgo por inundaciones en zonas urbanas en Sudamérica, generando aportaciones de análisis de escurrimientos considerados en zonas urbanas (Bertoni y Maza, 2004).

Tomando en cuenta algunos trabajos como el realizado en Argentina en la Ciudad de Buenos Aires, donde se analizó la problemática de las inundaciones en áreas urbanas como proceso de ocupación, un enfoque espacio-temporal tomando en cuenta el incremento de las áreas urbanas (Lindón, 1989).

En este trabajo de investigación se resalta que mediante un modelo matemático u ajuste estadístico se describa el crecimiento de la zona a urbana en los últimos años dentro de la cuenca y se pueda pronosticar, escenarios de urbanización para distintos periodos de retorno y mancha urbanizada; esto con el

objetivo de definir los gastos a considerar en la simulación. Por lo tanto, se hace necesario, también, obtener las áreas de afectación y de peligrosidad por inundación para distintos escenarios de urbanización futuros y generar los mapas de riesgo hidráulico dentro de la cuenca, con el fin de recomendar medidas u obras que permitan reducir los daños por inundaciones. En el caso en particular se realizó el análisis en una cuenca considerando que la distribución de las zonas que se están construyendo en las periferias aguas arriba del valle de la ciudad de Querétaro en particular la cuenca La Lagartija, la cual es una zona potencialmente desarrollable según el plan de desarrollo urbano (INEGI 2016), donde indica que el crecimiento dentro de la cuenca ha sido considerable por estar en contacto con la mancha urbana creciente de la ciudad de Querétaro.

1.2 Hipótesis y Objetivos

1.2.1 Hipótesis:

La modelación hidráulica bidimensional de los escurrimientos pluviales considerando distintos escenarios de urbanización futura referentes al cambio de uso de suelo, identifica las áreas futuras de inundación y comportamiento del incremento de estos escurrimientos en la zona urbana.

1.2.2 Objetivo general:

Determinar las zonas de inundación para distintos escenarios de urbanización del caso de estudio, cuenca La Lagartija, mediante la modelación hidráulica bidimensional en el software Iber, para definir y determinar el incremento de las zonas de inundación para los distintos escenarios de urbanización futura.

1.2.3 Objetivos particulares:

- Caracterizar la zona de estudio en las condiciones actuales, mediante visitas de campo para identificar las características fisiográficas y propiedades particulares de la zona.
- Determinar los escenarios de urbanización a futuro de la cuenca de estudio, proponiendo el análisis de las condiciones, naturales, actuales y con un 25%, 50%, 100% de urbanización futura, contemplando y el plan de urbanismo de la ciudad de Querétaro.
- Realizar la simulación hidráulica y tránsito de avenidas de las zonas de probable inundación, considerando las condiciones actuales y los distintos escenarios de urbanización futuros, mediante el software Iber de simulación de inundaciones en 2D, para obtener y definir las áreas de inundación para los distintos escenarios de urbanización.
- Obtener las áreas de inundación y realizar el análisis respecto a los asentamientos urbanos actuales y con los distintos escenarios de urbanización, para definir las zonas de probable afección y estimar costos que se pudiesen generar debido a la urbanización en las zonas de inundación de cada escenario propuesto.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Uso de suelo y vegetación.

El uso del suelo es el uso que los seres humanos hacen de la superficie terrestre. El uso del suelo abarca la gestión y modificación del medio ambiente natural para convertirlo en un ambiente construido tal como campos de sembradío, pasturas y asentamientos humanos. También ha sido definido como "las acciones, actividades e intervenciones que las personas realizan sobre un determinado tipo de superficie para producir, modificarla o mantenerla" (FAO, 1997a; FAO/UNEP, 1999)

De acuerdo con información de la CONABIO el sitio de estudio cuenta con características de Vegetación y Tipo de Suelo particulares de la región, y de las cuales se desprende un suelo Tipo C (arenas finas, limos y bastante arcilla) de acuerdo a las tablas para usos de suelo. (CONABIO, 2012).

2.2 Modelo Digital de elevación.

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados. En los modelos digitales de elevación existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital, las cuales varían dependiendo del método que se emplea para generarlos y para el caso de los que son generados con tecnología LIDAR se obtienen modelos de alta resolución y gran exactitud (valores submétricos).

2.3 Tiempo de concentración.

El tiempo de concentración (T_c) se asume como el lapso que tarda en llegar una gota de agua desde la parte más alta de la cuenca hasta su punto de salida.

Por su parte, el tiempo de concentración T_c , se define como el lapso que tarda el escurrimiento de una tormenta en viajar desde el punto más distante hasta la salida de la cuenca o sitio de proyecto, o bien el lapso transcurrido desde el final de la tormenta hasta el término del hidrograma superficial. En cambio, el tiempo de retraso, LT , es el tiempo medido entre el llamado centro de masa de la precipitación efectiva y el pico del hidrograma de escurrimiento. El Servicio de Conservación de Recursos Naturales de los Estados Unidos (NRCS, 2010). Siguiendo la fórmula para el cálculo del tiempo de concentración:

$$T_c = \frac{0.00227l^{0.8} \left(\frac{100}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{Y^{0.5}} \quad (1)$$

donde l es la distancia desde el punto más alejado hasta la salida de la cuenca, en m; CN es el número de curva de escurrimiento, función del tipo y cobertura del suelo, según la metodología propuesta por el Soil Conservation Service (SCS, 1993); Y es la pendiente promedio de la cuenca, expresada en forma de porcentaje.

2.4 Hidrograma

El hidrograma es una representación gráfica o tabular de la variación en el Tiempo de los gastos que escurren por un cauce. El gasto (Q) se define como el volumen de escurrimiento por unidad de tiempo (m^3/s) que escurre por un cauce.

El hidrograma se define para una sección transversal de un río y si los valores obtenidos se grafican contra el tiempo se obtendrá una representación gráfica como el siguiente ejemplo:

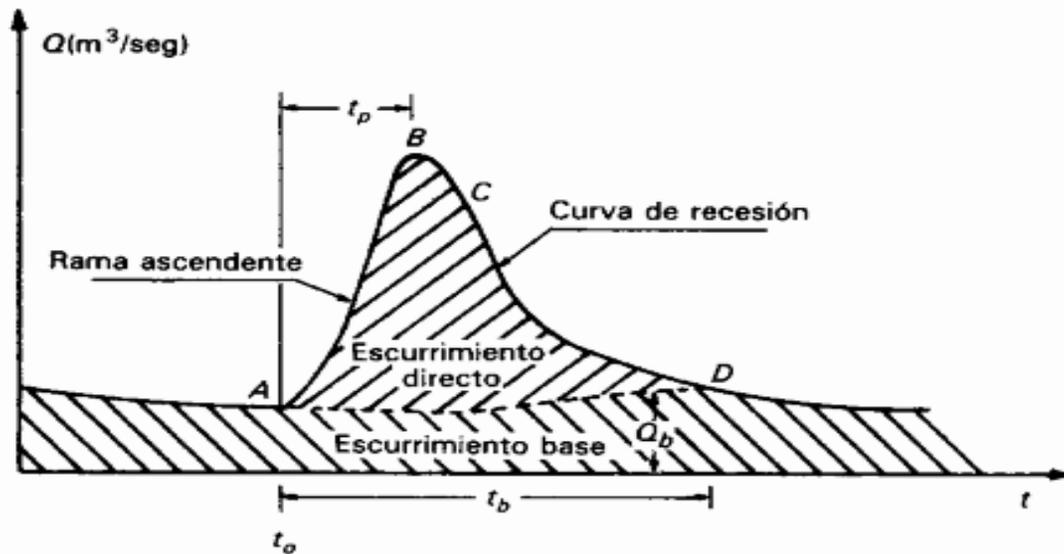


Figura 1. Elementos del hidrograma.

Los elementos fundamentales del hidrograma son: el gasto antecedente; la rama ascendente; la cresta o pico; la rama descendente; la curva de recesión; y el gasto base.

La forma del hidrograma estará fuertemente influenciada por las características fisiográficas de la cuenca hidrológica, así como por las condiciones particulares del cauce (cambios en la sección, condiciones de las riberas, etc.)(Breña Puyol *et al.* 2006).

2.5 Método del hidrograma unitario triangular (HUT)

Este método, desarrollado por el SCS, consta de dos partes. En una de ellas se hace una estimación del volumen de escorrentía resultante de una precipitación - escurrimiento directo, y en la otra se determina el tiempo de distribución del escurrimiento, incluyendo el caudal de punta.

Para la distribución en el tiempo de la escorrentía, se procede así: se hace uso del hidrograma unitario adimensional desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos cuya forma está predeterminada.

La escala de tiempo del hidrograma se expresa en unidades del período de ascenso (T_p) del mismo y los caudales de escurrimiento se expresan en unidades del caudal de escurrimiento de punta (q_p).

Para convertir las ordenadas adimensionales del hidrograma en valores reales, debe conocerse el período de elevación (T_p) y el caudal pico o de punta (q_p). Este último se obtiene utilizando la relación obtenida del hidrograma triangular sintético, como se muestra en el paso siguiente:

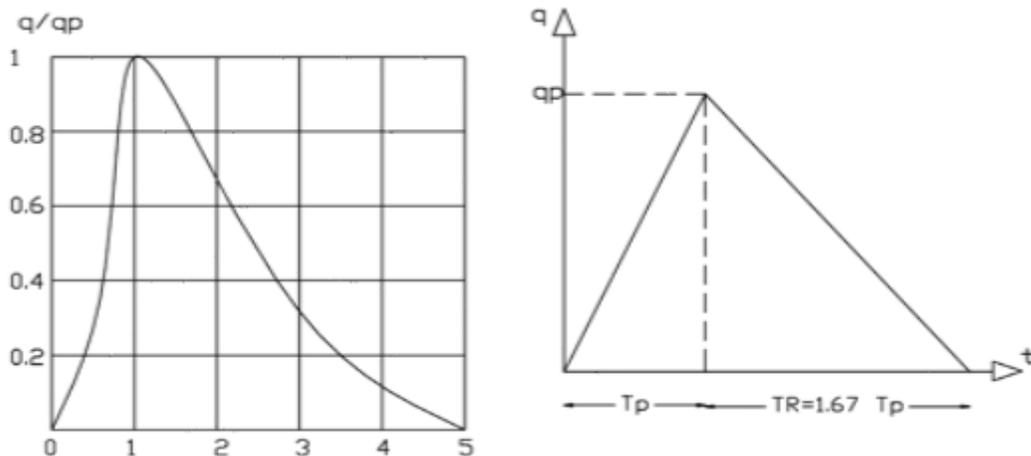


Figura 2. Hidrogramas unitarios sintéticos del Servicio de Conservación de Suelos. (Izquierda) Hidrograma adimensional y (Derecha) Hidrograma unitario triangular. (SCS, 1973).

Para aplicar este método se requieren como datos de entrada el área de la cuenca en kilómetros cuadrados, el tiempo de concentración de la cuenca en horas, el número de curva de la cuenca y estimar la precipitación en exceso (He).

El tiempo pico como una de las características del hidrograma unitario triangular se determinó mediante la fórmula siguiente:

$$Tp = 0.60Tc + \frac{D}{2} \quad (2)$$

donde Tc es el tiempo de concentración en horas y D es la duración de la tormenta en horas.

Para obtener el gasto, considerando los anteriores parámetros se utiliza la formula siguiente:

$$Qd = \frac{0.556HeA}{2Tp} \quad (3)$$

donde He es precipitación en exceso en mm, A es el área de la cuenca en kilómetros cuadrados y Tp es el tiempo pico en horas.

Para obtener el hidrograma de escurrimiento se multiplican las ordenadas del hidrograma adimensional por el valor de gasto pico y las abscisas por el tiempo pico para cada periodo de retorno en ambas actuales y condiciones futuras.

2.6 Software utilizado

2.6.1 Ax.

El programa AX, desarrollado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres, el cual ajusta las funciones de probabilidad mencionadas a muestras de datos históricos, e incluye variantes de aproximación por momentos y máxima verisimilitud por cada método de ajuste o función de probabilidad analizada, determinando el error estándar (diferencia cuadrática entre el valor observado y el calculado por la función) de cada una de ellas respecto a la muestra.

2.6.2 Google earth.

Un Sistema de Información Geográfica (también conocido con los acrónimos SIG en español o GIS en inglés) es un conjunto de herramientas que integra y relaciona diversos componentes (usuarios, hardware, software, procesos) que permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos procedentes del mundo real que están vinculados a una referencia espacial, facilitando la incorporación de aspectos sociales-culturales, económicos y ambientales que conducen a la toma de decisiones de una manera más eficaz.

Un SIG (Sistema de Información Geográfica) nos permiten hacer un análisis exhaustivo del territorio en los ámbitos más diversos. Son herramientas versátiles, con un amplio campo de aplicación en cualquier actividad que conlleve un componente espacial.

2.6.3 Arcgis

ArcGIS es una completa plataforma de información que permite crear, analizar, almacenar y difundir datos, modelos, mapas y globos en 3D, poniéndolos a disposición de todos los usuarios según las necesidades de la organización.

Como sistema de información, ArcGIS es accesible desde clientes desktop, navegadores web, y terminales móviles que se conectan a servidores de departamento, corporativos o con arquitecturas de computación en la nube (Cloud Computing).

Para los desarrolladores, ArcGIS proporciona herramientas que les permitirán crear sus propias aplicaciones.

ArcGIS es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica o SIG. Producido y comercializado por ESRI, bajo el nombre genérico ArcGIS, en él se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica con herramientas tales como ArcReader, ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox.

2.6.4 Iber

El modelo Iber se desarrolló a partir de 2 herramientas de modelización numérica bidimensional. El modelo Iber consta de diferentes módulos de cálculo acoplados entre sí. En su primera versión se incluye un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos, de granulometría uniforme, por carga de fondo y por carga en suspensión. El módulo hidrodinámico de Iber resuelve las ecuaciones de St. Venant bidimensionales, incorporando los efectos de la turbulencia rozamiento superficial por viento. Además, la fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning.

La fuerza de rozamiento realizada por el viento sobre la superficie libre se calcula a partir de la velocidad del viento a 10 m de altura, utilizando para ello la ecuación de Van Dorn (Van Dorn, 1953).

La viscosidad turbulenta se calcula mediante modelos de turbulencia específicos para las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad. Iber incluye 3 modelos de turbulencia promediados en profundidad: el modelo parabólico, un modelo de longitud de mezcla y el modelo k- ϵ de Rastogi y Rodi (Rastogi y Rodi, 1978).

Iber distingue entre contornos cerrados (tipo pared) y contornos abiertos por los cuales entra y sale el agua del dominio de cálculo. Las condiciones internas se utilizan para modelar estructuras hidráulicas tipo compuertas, vertederos o puentes que entran en carga.

Las ecuaciones de aguas someras y las del modelo se resuelven mediante el método de volúmenes finitos para mallas bidimensionales no estructuradas. Los esquemas numéricos utilizados en Iber son especialmente apropiados para la modelización de cambios de régimen y de frentes seco-mojado o inundación (Bermúdez *et al.*, 1998). A continuación, en la tabla 2 se muestran las ecuaciones utilizadas dependiendo de las condiciones internas del modelo y sus variantes respecto a la geometría y la infraestructura analizada.

Tabla 1. Ecuaciones utilizadas en las condiciones internas.

Compuerta libre	$Q = C_{dg} B h \sqrt{2g(Z_u - Z_B)}$
Compuerta transición	$Q = C_{dg} B h \sqrt{6g(Z_u - Z_D)}$
Vertedero libre	$Q = C_{dg} B (Z_u - Z_w)^{1.5}$

La discretización del dominio espacial como se muestra en la figura 1, se realiza con volúmenes finitos en mallas no estructuradas, admitiéndose mallas mixtas formadas por elementos triangulares y cuadrangulares (LeVeque, 2002).

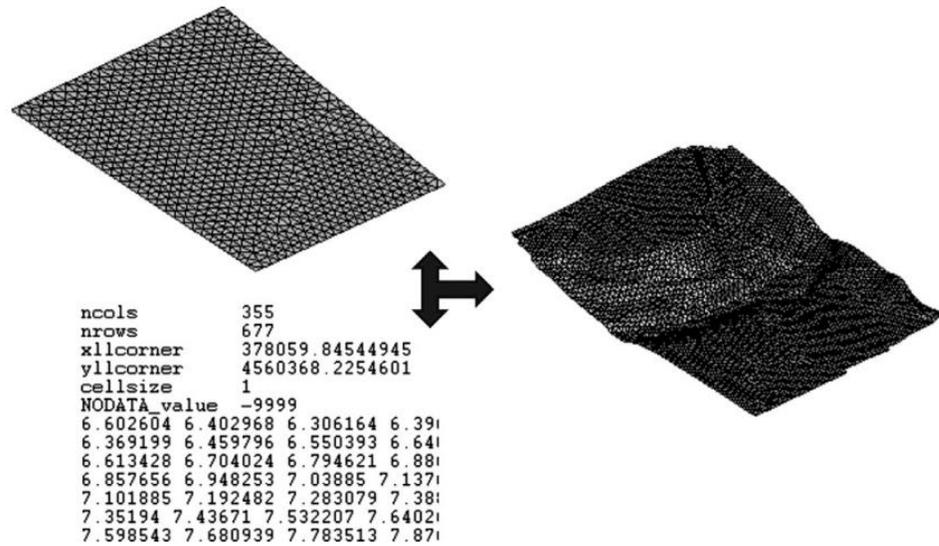


Figura 3. Herramientas Iber y un ejemplo de edición de nodos de una malla.

Para topografías que presentan irregularidades o complejidades se implementa la metodología de creación de geometrías en formato RTIN (Regular Triangular Irregular Network) adaptando la propuesta (Evans *et al.*, 2014).

El flujo convectivo se discretiza mediante esquemas descentrados de tipo Godunov, concretamente el esquema descentrado de Roe (Roe, 1986). La interfaz de usuario de un programa de simulación numérica es de gran importancia, y en el caso particular de modelar bidimensional puede resultar clave dada la cantidad y la variedad de datos de entrada que se requieren. La interfaz de Iber está realizada en base al programa GiD, desarrollado por el Centro Internacional de Métodos Numéricos. GiD es un programa de pre proceso y post proceso para simulaciones numéricas que está diseñado para ser adaptado y personalizado según los requisitos del modelo numérico (Ribo *et al.*, 2007).

El resultado es una herramienta flexible y amigable con el usuario. Muchas de las capacidades disponibles en la interfaz de Iber son intrínsecas de GiD, pero muchas otras han sido desarrolladas para dotar al modelo de las herramientas específicas que se necesitan para simulación numérica de flujos a lámina libre en aguas poco profundas (Corestein *et al.*, 2010).

3. METODOLOGÍA

3.1 Información requerida

3.1.1 Topografía.

Se requiere información topográfica para delimitar la zona de estudio. El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) proporciona una configuración del terreno en tres dimensiones mediante los llamados modelos digitales de elevación (MDE).

Para este trabajo se obtuvo de la base de datos del INEGI el modelo digital de elevaciones en escala 1:50 000 con resolución de 30 m en el mallado reticular. Este modelo fue usado para la delimitación de la cuenca de estudio, determinar pendientes de terreno e hidrografía de la zona de estudio.

3.1.2 Estación meteorológica de influencia.

De acuerdo a los estudios hidrológicos realizado para la zona de estudio se tiene que la estación de influencia sobre la zona de estudio es la estación Juriquilla perteneciente a la CONAGUA, de la cual se proporcionó dicha información de precipitaciones máximas en 24 horas para el análisis probabilístico y determinar las distintas lluvias de diseño asociadas a los diferentes periodos de retorno. A continuación, se muestra los registros de la estación Juriquilla.

Tabla 2. Datos de precipitación de la Estación Juriquilla, Querétaro, Qro

Año	Precipitación	Año	Precipitación	Año	Precipitación
1979	S/R	1992	42.0	2005	34.6
1980	51.5	1993	43.5	2006	48.0
1981	34.2	1994	41.0	2007	112.5
1982	35.0	1995	54.5	2008	74.7
1983	95.2	1996	66.5	2009	44.3
1984	44.2	1997	50.5	2010	118.0
1985	62.8	1998	47.5	2011	52.0
1986	42.0	1999	72.0	2012	90.0
1987	60.0	2000	46.0	2013	50.0
1988	49.1	2001	48.0	2014	56.0
1989	51.5	2002	40.4	2015	50.0
1990	36.0	2003	71.0		
1991	53.0	2004	63.0		
Precipitación máxima en 24 horas (mm)					
SR Sin Registro					

3.1.3 Uso de suelo y edafología

La caracterización del tipo de suelo y vegetación existente en la zona es una parte fundamental para poder cuantificar los escurrimientos.

La información de edafología se obtiene de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), donde el sitio de estudio cuenta con características de vegetación y tipo de suelo particulares de la región, de las cuales se determina el tipo de suelo y se corrobora en visitas de campo

Mediante la información de imágenes satelitales y sistemas de información geográfica, se realiza el tratamiento y análisis de la información para extraer las áreas urbanas y diferentes tipos de uso de suelo, con lo que se puede determinar un ponderado de los coeficientes de escurrimiento para el análisis de los modelos lluvia escurrimiento.

3.2 Delimitación y descripción de la zona de estudio.

Generalmente, en un trabajo hidrológico se requiere la delimitación de la cuenca de influencia hasta el punto de control o de interés del análisis hidrológico, además de la parametrización de las características fisiográficas de la misma para determinar los escurrimientos pluviales en la zona.

La zona de estudio se determinó por ser una zona potencialmente urbanizable, y donde se puede tener problemas de inundación en la parte baja de la cuenca, la cuenca de estudio se le conoce como cuenca La Lagartija, debido a que pasa por un ordo con el mismo nombre. Esta cuenca descarga se encuentra al noroeste de la ciudad de Querétaro cerca de la zona residencial Juriquilla, municipio de Querétaro, Qro. A continuación, se muestra la ubicación de la cuenca de estudio.

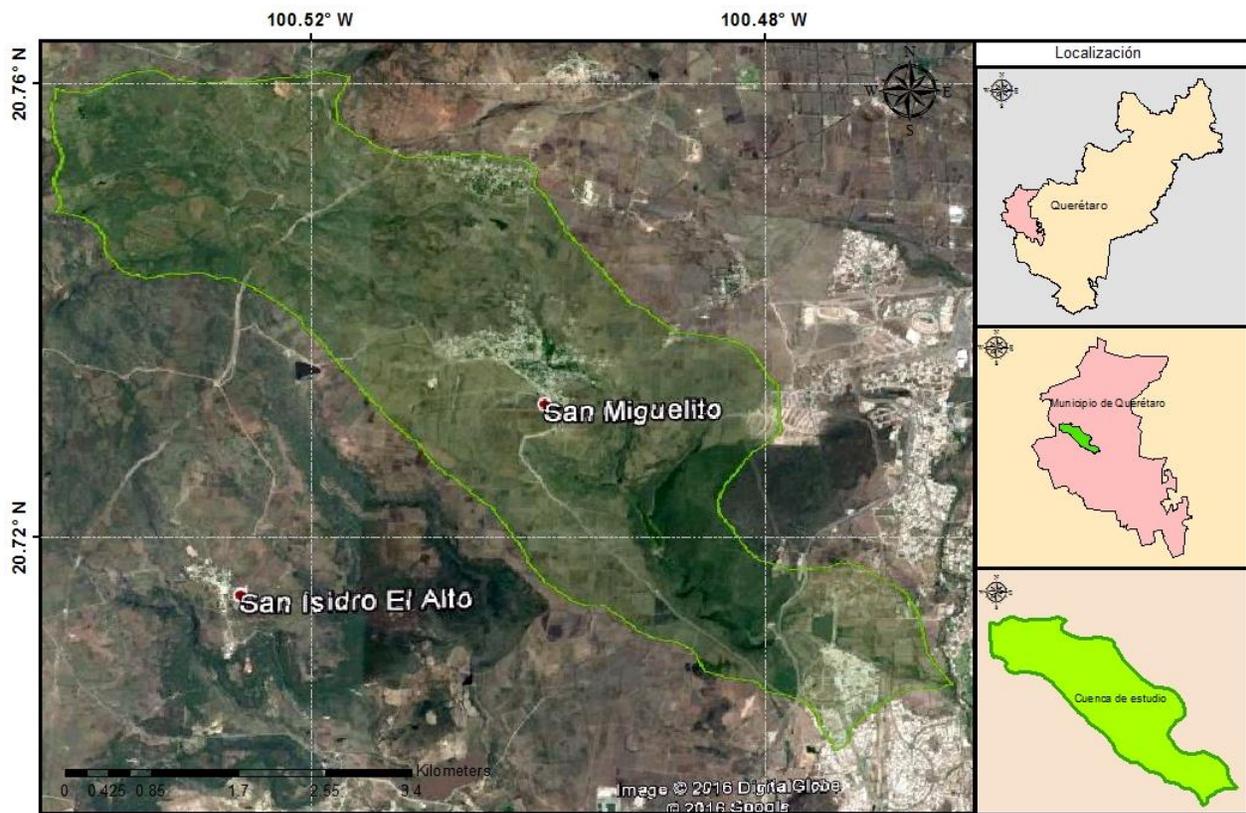


Figura 4. Ubicación de la cuenca de estudio.

3.2.1 Delimitación de la cuenca

Para delimitar el área de aportación de la cuenca se utilizó el modelo digital de INEGI en escala 1:50,000 y con resolución de 30m. Posteriormente, se insertó una imagen de satélite corregida y referenciada al sistema UTM al Sistema de Información Geográfica. Adicionalmente, se contó con la topografía (curvas de nivel) de las condiciones actuales de la zona de estudio, por último, a partir de la ubicación del punto de interés, se trazó la cuenca de influencia en el programa ARC GIS 10.1 versión estudiante y fue corregida por lo observado en campo como parteaguas artificiales de la zona urbana (calles o muros), la cual se puede observar en las figuras siguientes.

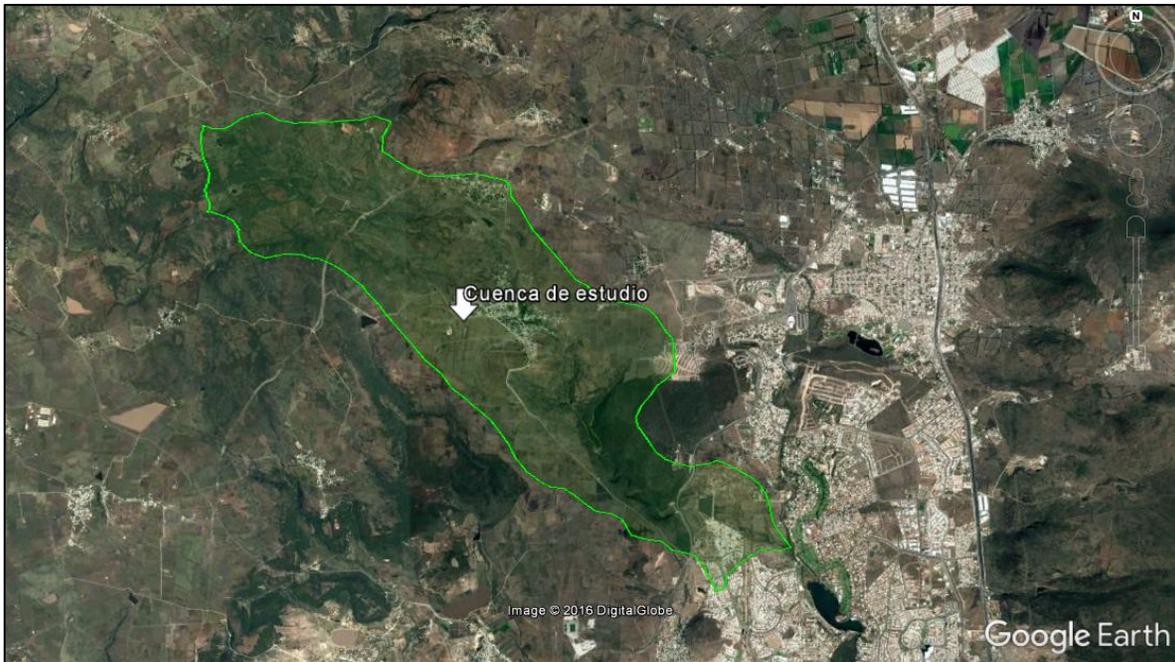


Figura 5. Cuenca de influencia en el sitio de estudio.

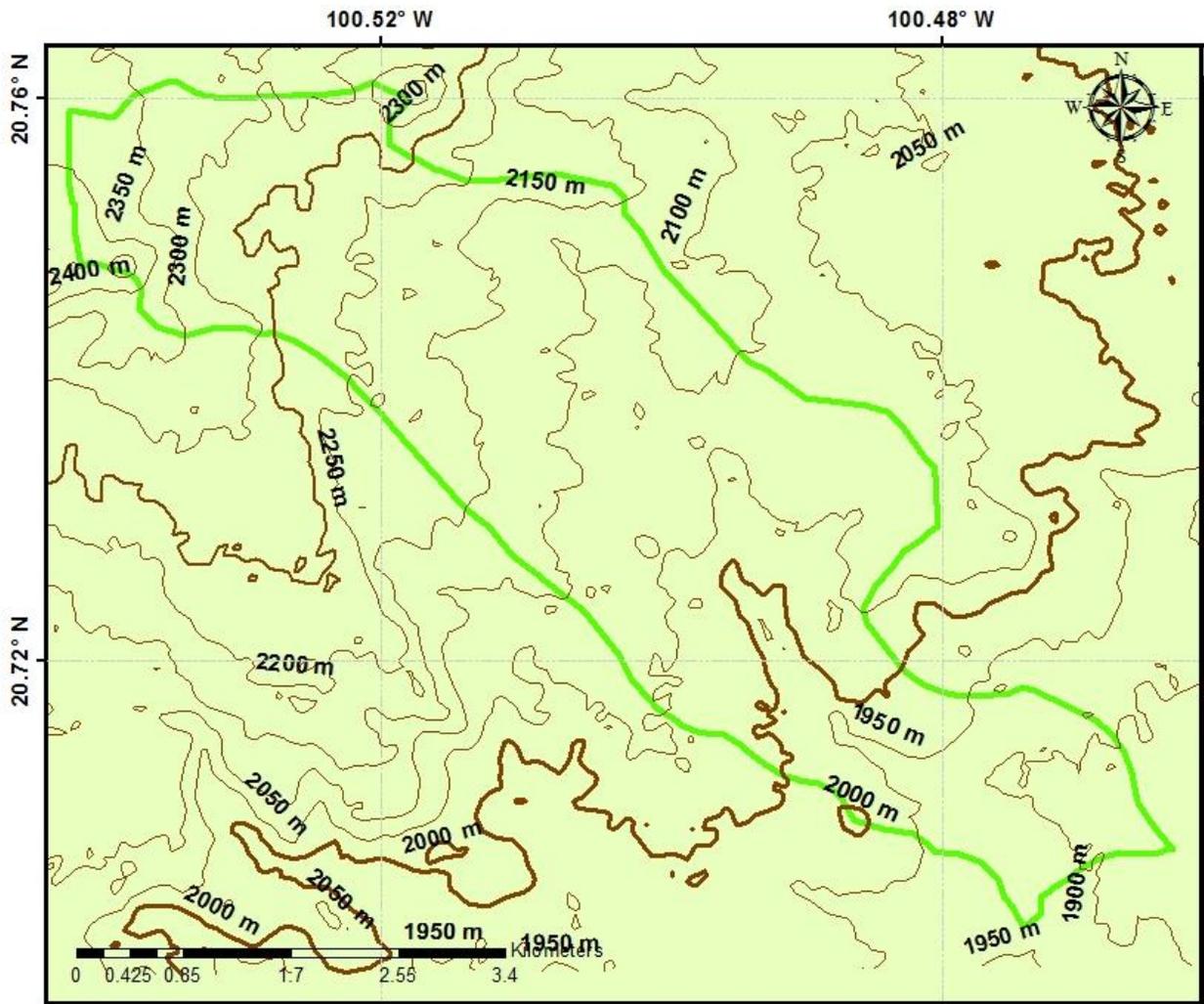


Figura 6. Curvas de nivel a cada 50m.

3.2.2 Características fisiográficas de la cuenca.

Para el caso de este estudio se presentan las siguientes condiciones de la cuenca analizada y se justifica la delimitación de la misma.

De acuerdo al análisis de la cuenca de estudio y de la visita de campo, se encontraron los siguientes parámetros de la cuenca de influencia para el área de estudio, los escurrimientos debido a la pendiente de la cuenca forman la cárcava del cauce en la parte alta, sin embargo, en la parte baja de la cuenca no se tienen un cauce definido debido a la baja pendiente de la zona. Para análisis del método del HUT se considera un cauce principal para la evaluación de la hidrología de la cuenca.

A continuación, se muestran los parámetros fisiográficos de la cuenca de estudio.

Tabla 3 Parámetros fisiográficos de la cuenca.

Parámetro fisiográfico	Valor
Longitud del cauce principal (L) =	11,486 m
Desnivel del cauce principal (H) =	509 m
Pendiente del cauce principal (S) =	0.04431 m/m
Área de la Cuenca =	18.54 Km ²

En la Figura 7 se muestra la hidrografía e l zona de estudio, la cual indica que la cuenca es afluente al arroyo El Arenal en la parte Noreste de la ciudad de Querétaro, por otra parte, también se puede observar en la Figura 8 el cauce principal de la cuenca de estudio, considerando el cauce con mayor longitud para llegar al final de la cuenca, se establece el cauce principal, como una característica fisiográfica de la cuenca, considerando donde se empiezan a generar los escurrimientos, la pendiente y elevación de este cauce para los análisis posteriores.

En las figuras siguientes se muestra que dentro de la cuenca los escurrimientos van con dirección de Oeste-Este y de Norte-Sur.

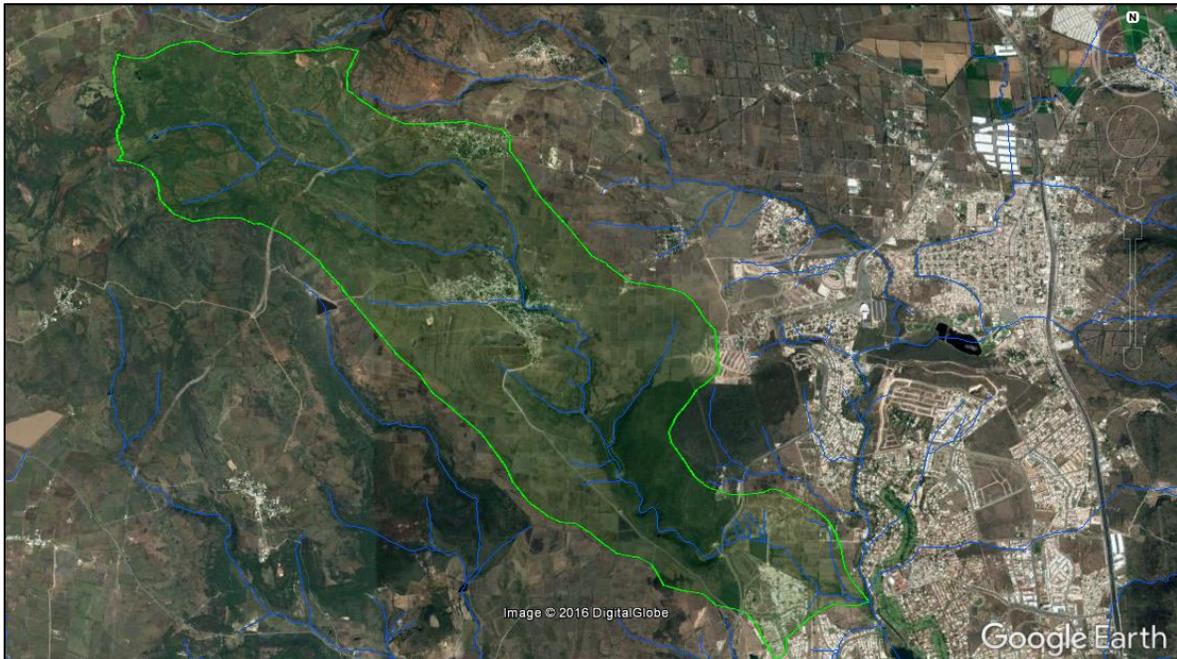


Figura 7. Sistema de arroyos que pasan cerca de la zona de estudio.

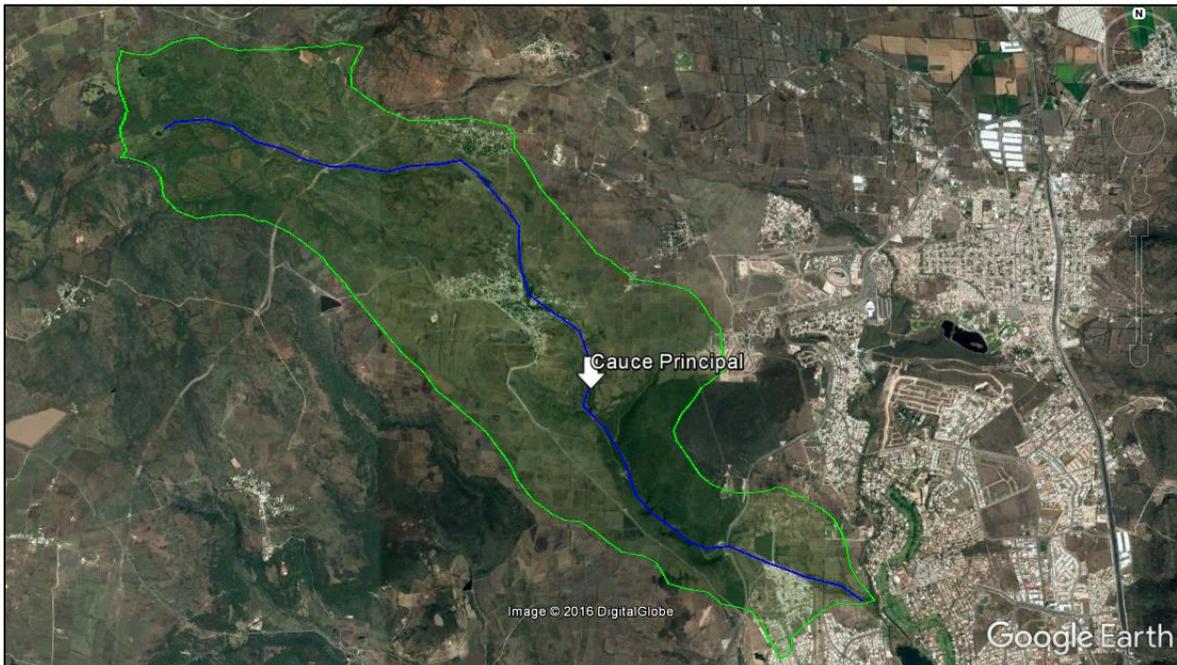


Figura 8. Se muestra el cauce teórico principal la cuenca de estudio.

3.2.3 Características de uso de suelo y vegetación actuales.

De acuerdo con información de la CONABIO el sitio de estudio cuenta con características de Vegetación y Tipo de Suelo particulares de la región, las cuales se muestran en las siguientes figuras y de las cuales se desprende un suelo Tipo C (arenas, limos y arcilla).

De visita de campo, se observa la existencia de parcelas agrícolas como principal tipo de vegetación dentro de la delimitación de la cuenca, y algunas zonas urbanizadas dentro de la cuenca, en la siguiente fotografía se ilustra la panorámica general de vegetación existente en el sitio de estudio.



Figura 9. Se muestra la principal cobertura de suelo dentro de la cuenca que son parcelas agrícolas y matorrales.

En esta parte se utilizó programas como el Arcgis, Google Earth, etc. Los cuales ayudaron para ubicar geográficamente la zona de estudio y poder obtener las características para realizar el estudio hidrológico y hacer notar gráficamente la ubicación de la zona de estudio.

De acuerdo a la Edafología de la CONABIO, se presenta en la siguiente figura representando la edafología de influencia en la zona de estudio.

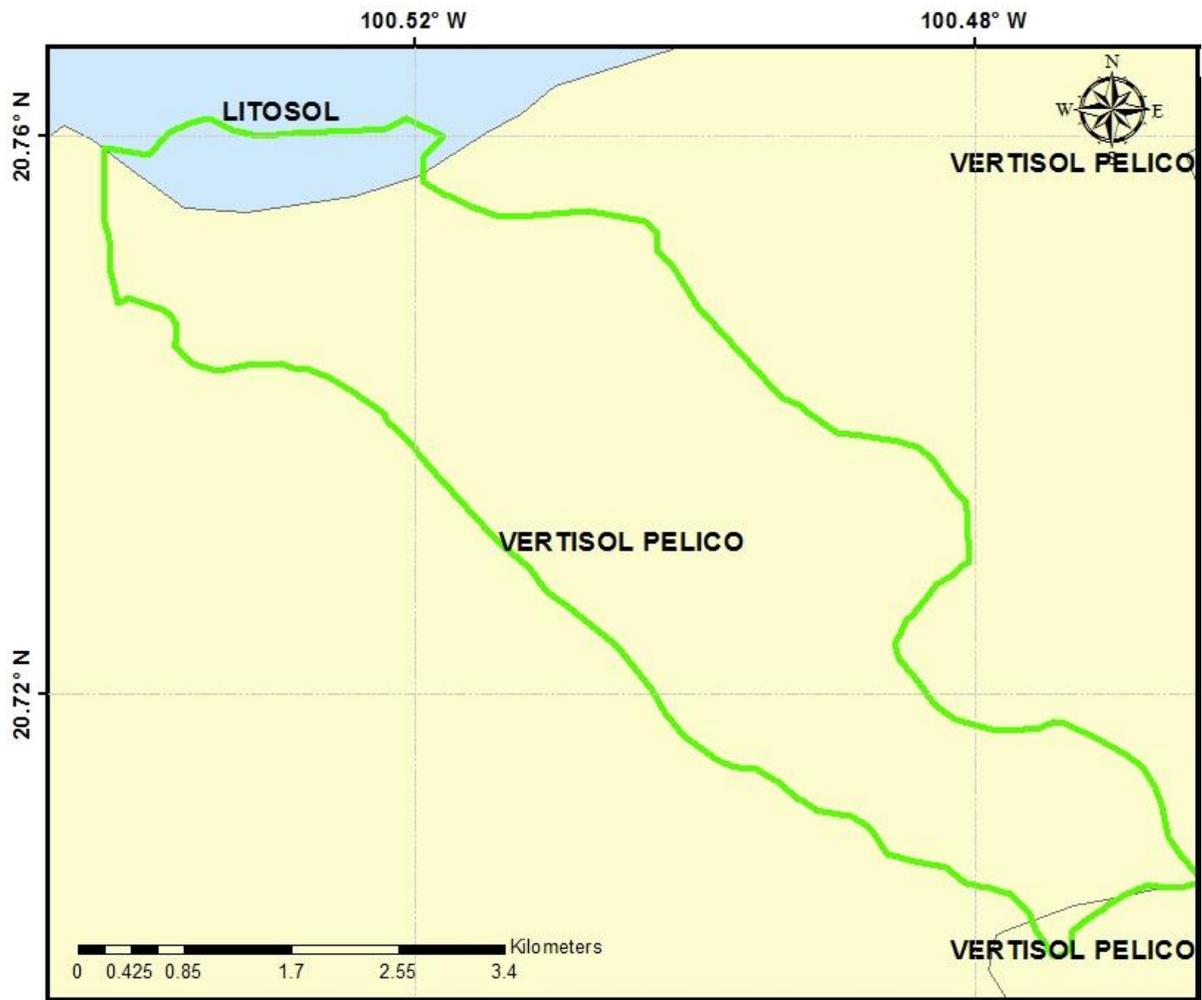


Figura 10.-Mapa de Edafología dentro de la cuenca de estudio (CONABIO, 2015). Donde se muestra que se tiene una cobertura de Vertisol Pelico en la mayoría de la cuenca de estudio, con lo cual se define el tipo de suelo.

Considerando la información anterior y el recorrido se observa que se tiene una cobertura de Vertisol Pelico (Tipo de Suelo C) en la cuenca de estudio, con lo cual se define el tipo de suelo que es un tipo C en su mayoría corroborando en campo y que se trata de limos y arcilla con un poco de arenas finas y afloramiento de rocas en las partes altas de la cuenca.

A continuación, se muestra la cobertura del suelo en condiciones actuales.

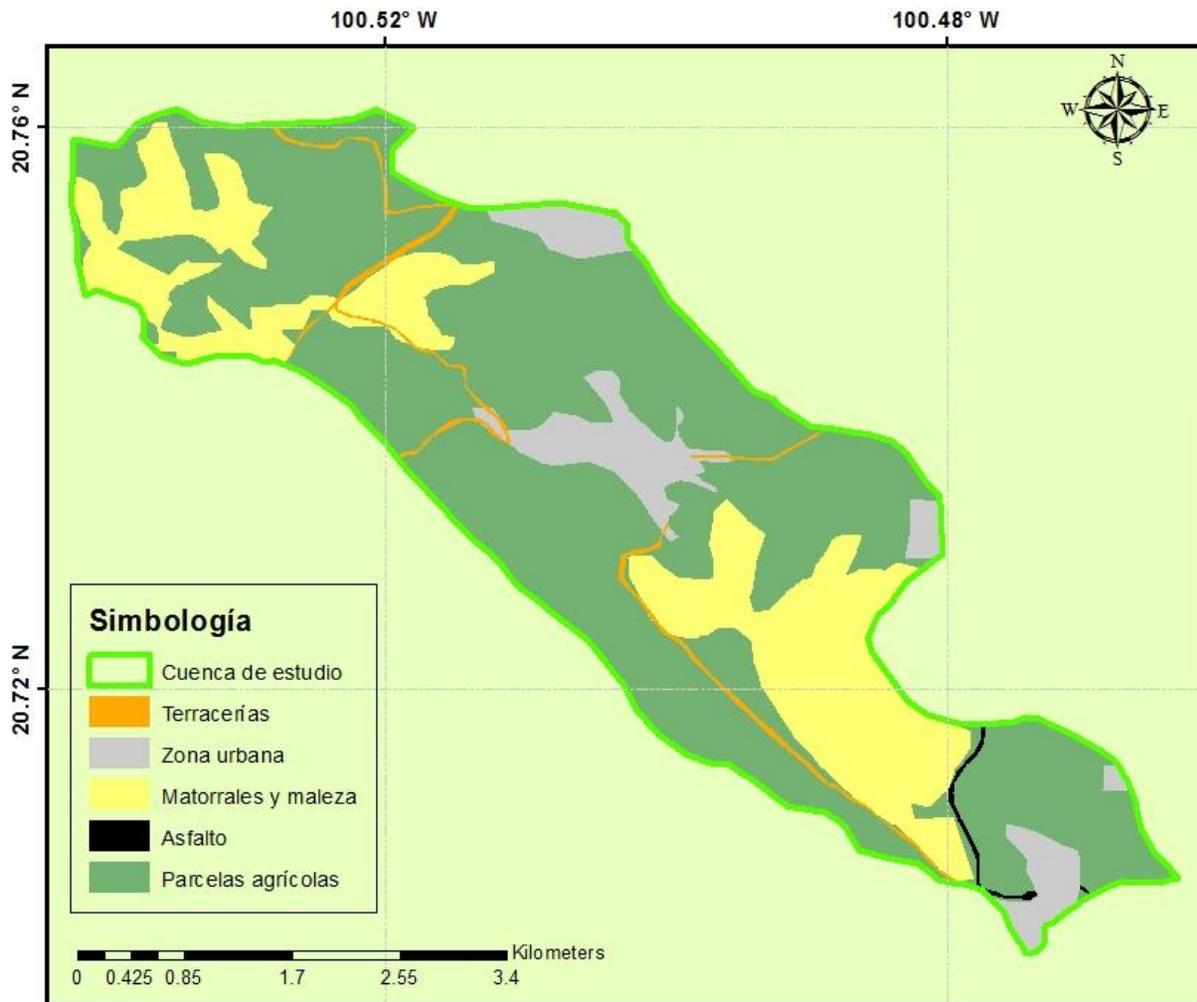


Figura 11. Cobertura de suelo en condiciones Actuales.

3.2.4 Visita de campo.

Se realizó el recorrido de campo en donde se muestra la vegetación existente y condiciones fisiográficas para definir los números de escurrimiento y observar cómo se comportan los escurrimientos en la zona de estudio.

En las siguientes imágenes se observa la vegetación de sitio de estudio, así como la pendiente del terreno y tipo de suelo en general.

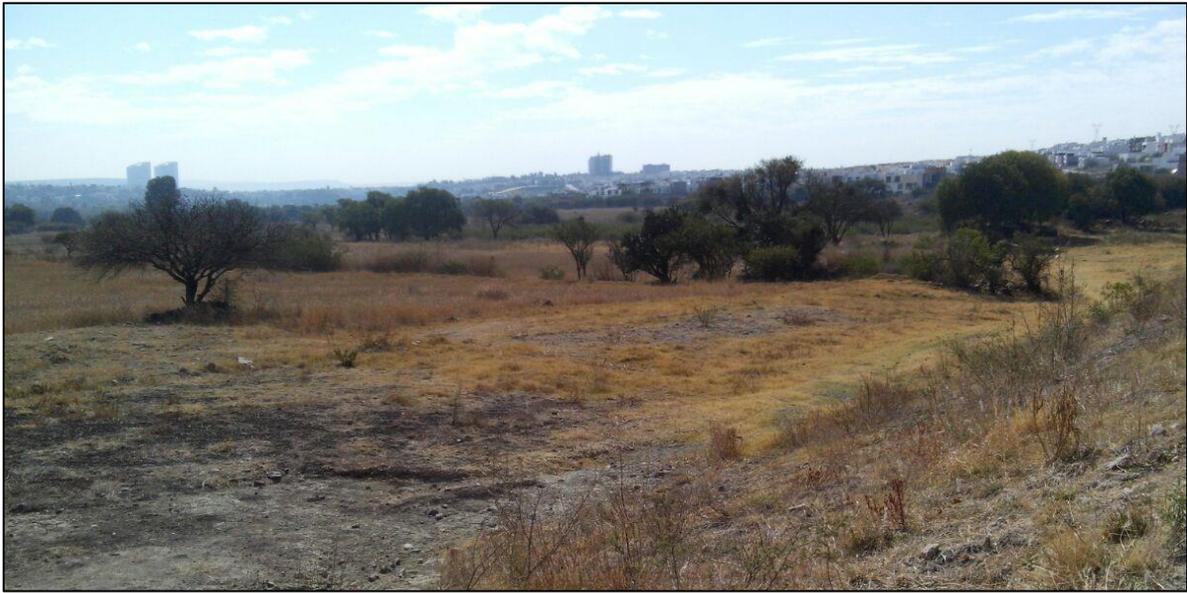


Figura 12. Se muestra la pendiente en la cuenca, donde se observa una pendiente plana en la parte baja de la cuenca, donde se generan las zonas de inundación.

En el recorrido de campo se visitaron los arroyos y la zona en general, principalmente para obtener las características que intervienen en el estudio hidrológico, también se recorrió el arroyo principal y se observó los tipos de suelos y vegetación existentes en la zona, debido a que esa información es básica para la realización del estudio.



Figura 13. Se muestra la vegetación preeminente de la cuenca de estudio.

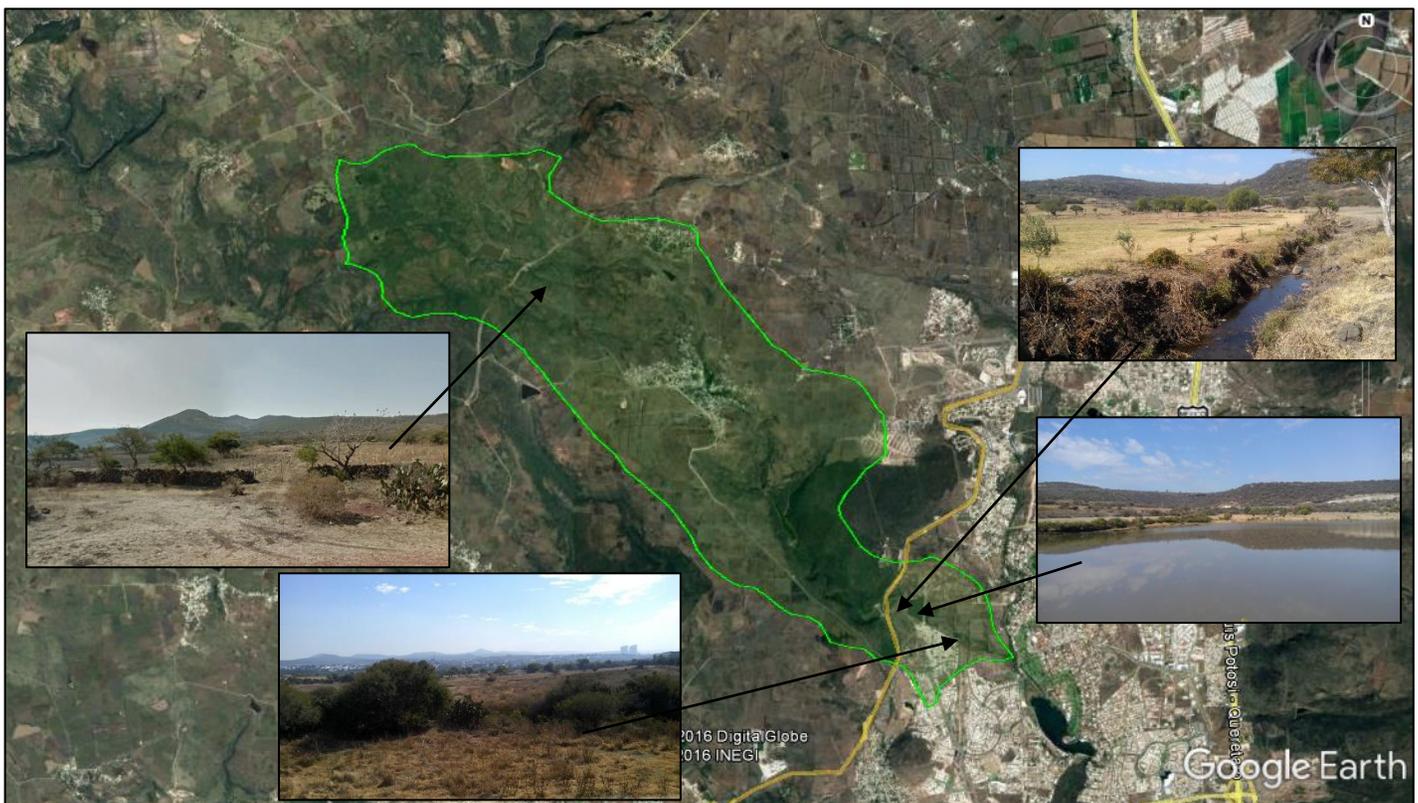


Figura 14. Se muestran varias fotografías de la zona de estudio, representando la vegetación que en su mayoría cubre la zona, así como la pendiente que conforma la zona.

De la Figura anterior, se resalta la vegetación existente en la zona de estudio que refiere a parcelas como principal uso de suelo y vegetación, en condiciones actuales.



Figura 15. Estratos de suelo en la zona de estudio.

Con la evidencia presentada se obtuvieron las características fisiográficas para el estudio del sitio, características que nos definen los parteaguas o condiciones particulares, así como lo primordial que es observar y caracterizar el tipo de suelo en cada zona y definir las áreas para la ponderación de los mismos.

3.3 Determinación de los distintos escenarios de urbanización

Tomando en cuenta el plan de urbanismo de Querétaro y las imágenes de satélite que nos indican la urbanización actual de la zona de estudio, la cuenca se encuentra en una zona altamente urbanizable, debido al crecimiento de la población y al desarrollo habitacional de la zona en particular. Considerando como principal variable el cambio de uso de suelo por la urbanización se plantea el análisis de las zonas de inundación para los escenarios de urbanización futura, contemplando el análisis de cómo se comportaban los escurrimientos en las condiciones naturales, con las condiciones actuales y para un desarrollo de la zona urbana dentro de la cuenca del 25%, 50% y 100%. En la Tabla 4 se muestran los distintos escenarios de urbanización de acuerdo al porcentaje de urbanización propuesto dentro de la cuenca de estudio

Tabla 4. Escenarios de Urbanización y porcentaje de urbanización.

Escenario	Área urbanizada (Km2)	Porcentaje de urbanización (%)
Natural	0.00	0.00
Actual	1.46	7.87
I	4.63	25.00
II	9.27	50.00
III	13.90	75.00
IV	18.54	100.00

3.4 Estudios hidrológicos para los distintos escenarios de urbanización.

3.4.1 Análisis de lluvias de diseño.

La información de lluvia, como parte medular de este estudio, proviene de los datos pluviométricos existentes en la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en su Dirección Local Querétaro Qro., consistente en lluvias máximas en 24 horas para cada registro anual, con la cual se procede a realizar el análisis de la información y determinar las lluvias de diseño asociadas a los diferentes periodos de retorno.

3.4.1.1 Polígonos de Thiessen.

La información de lluvia, como parte medular de este estudio, proviene de los datos pluviométricos existentes en la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en su Dirección Local Querétaro Qro., consistente en lluvias máximas en 24 horas para cada registro anual.

Las estaciones meteorológicas cercanas al sitio de estudio se muestran en la siguiente figura, contemplando únicamente las estaciones a cargo de la CONAGUA.

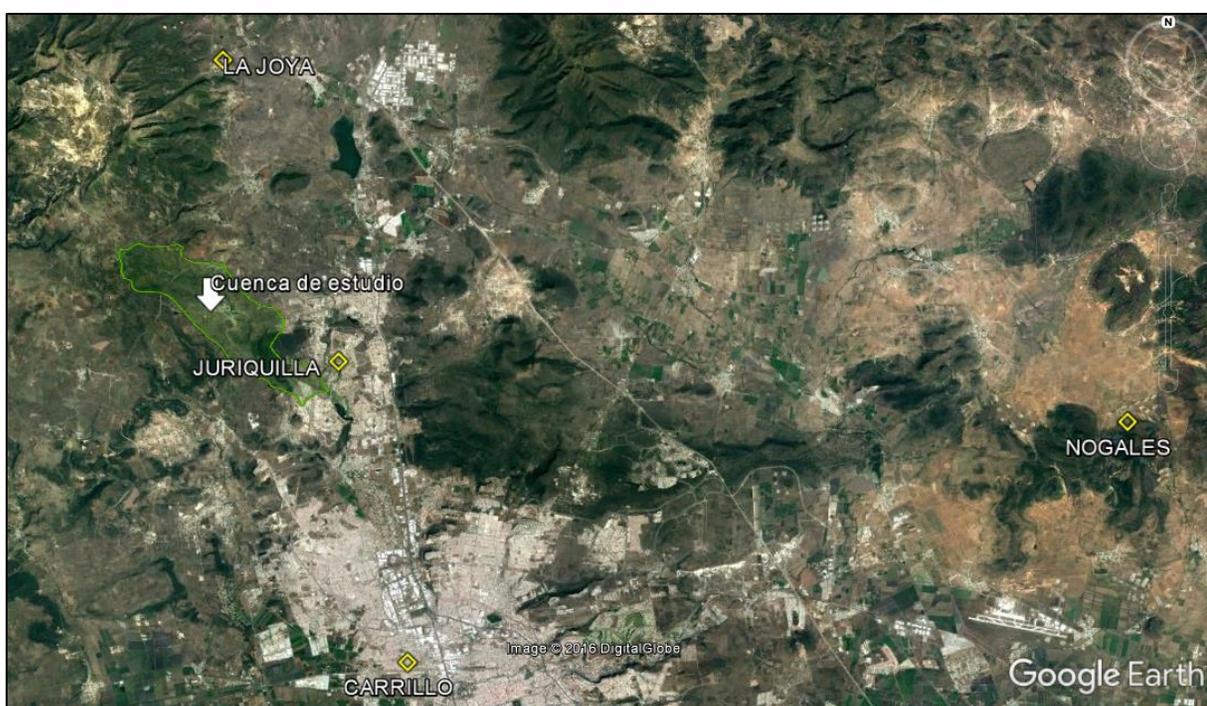


Figura 16. Estaciones climatológicas aledañas al sitio de estudio.

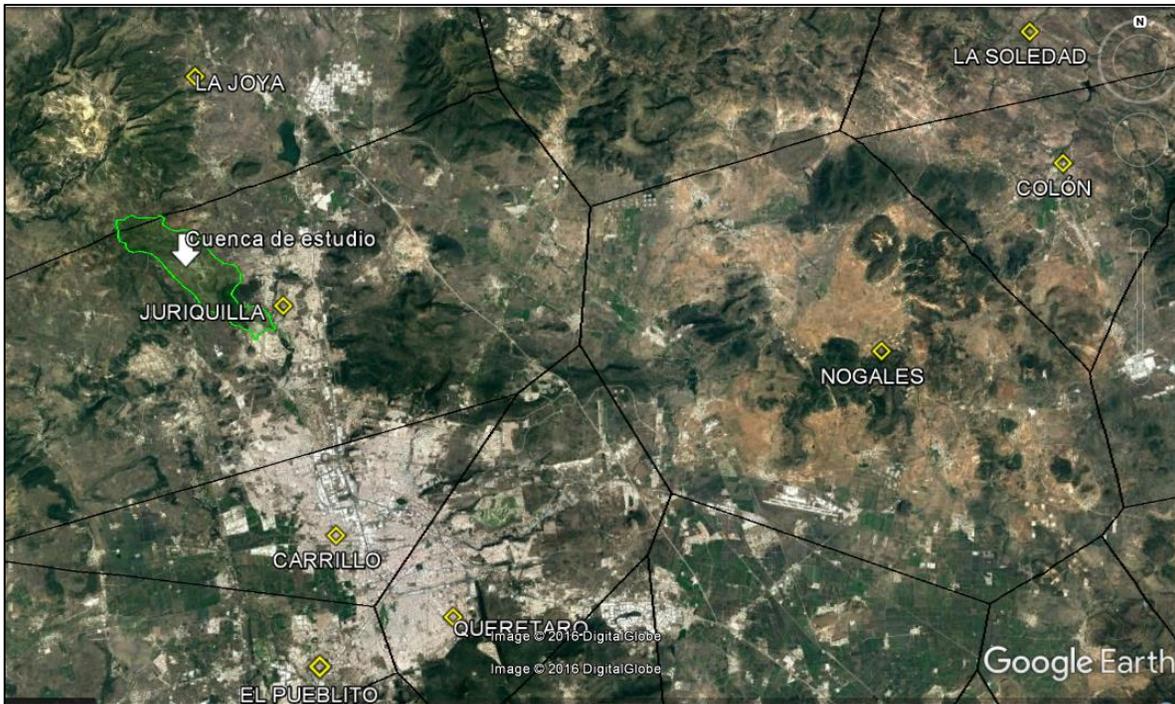


Figura 17. Influencia de las Estaciones Climatológicas cercanas; sobre el Sitio de Estudio.

Partiendo de la metodología del trazo de los polígonos de Thiessen se obtuvo la figura anterior, donde se puede observar que la estación de influencia al sitio de estudio es la estación Juriquilla, para la cual se realizó el análisis probabilístico de la información de lluvias máximas en 24 horas, contemplando los registros anuales.

3.4.1.2 Análisis de frecuencias.

El proceso estadístico tiene como finalidad calcular las lluvias máximas probables con una duración de 24 horas para los periodos de retorno adoptados para posteriormente hacer el proceso de simulación lluvia-escorrentamiento.

Los periodos de retorno seleccionados para la determinación de los gastos máximos generados en este estudio, fueron de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 Y 1000 años, de acuerdo con las recomendaciones de la Comisión Nacional del Agua.

Las funciones de probabilidad comúnmente utilizadas por su facilidad y de acuerdo al tipo de información climatológica disponible son las siguientes funciones: Normal, Log-Normal, Gumbel y DobleGumbel.

Para efectuar el ajuste de las funciones conocidas a la distribución de los datos observados, se utilizó el programa AX, desarrollado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres, el cual ajusta las funciones de probabilidad mencionadas a muestras de datos históricos, e incluye variantes de aproximación por momentos y máxima verisimilitud por cada método de ajuste o función de probabilidad analizada, determinando el error estándar (diferencia cuadrática entre el valor observado y el calculado por la función) de cada una de ellas respecto a la muestra.

Además, para determinar un ajuste más adecuado de la función Doble Gumbel, se realiza la optimización del parámetro p , en esta opción se encuentra el menor error estándar de ajuste a partir del método de Rosenbrock, que es un procedimiento de búsqueda directa que encuentra el mínimo de una función no lineal de múltiples variables no restringidas o acotadas.

Con el objeto de determinar a qué función de probabilidad se ajusta mejor la muestra de registros de precipitación máxima en 24 h, se llevó a cabo como una primera aproximación, un ajuste global de los registros de precipitación máxima, procedimiento que está contenido en el mismo programa de computo AX. Los resultados de salida del programa se indican en la tabla de abajo y se muestran los errores cuadráticos de cada función aplicada.

Con base en los resultados obtenidos, se extrapolaron los datos deseados en el programa AX para cada periodo de retorno de lluvias máximas en 24 horas a partir de la distribución Doble Gumbel optimizada para la estación.

Con el objeto de determinar a qué función de probabilidad se ajusta mejor la muestra de registros de precipitación máxima en 24 h, se llevó a cabo como una primera aproximación, un ajuste global de los registros de precipitación máxima

para la estación de análisis, procedimiento que está contenido en el mismo programa de cómputo AX. Los resultados de salida del programa se indican en las siguientes tablas para la estación analizada, y se muestran los errores cuadráticos de cada función aplicada.

Estación Juriquilla

Tabla 5. Error estándar obtenido a partir del programa AX.

Resumen de errores estándar Archivo analizado: JURISQU~1.TXT				
Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	8.780	-----	8.780	-----
Lognormal	5.858	5.108	7.069	23.252
Gumbel	5.710	-----	7.584	-----
Exponencial	4.283	-----	29.566	-----
Gamma	6.732	4.751	7.549	11111.000
Doble Gumbel	3.495			
Mínimo error estándar: 3.495 Calculado por la función: Doble Gumbel				
<input type="button" value="Aceptar"/> <input type="button" value="Imprimir"/> <input type="button" value="Ayuda"/>				

Como se observa al comparar los resultados de las tablas anteriores, el menor error estándar de ajuste se obtiene a partir de la distribución Doble Gumbel. Sin embargo, se realizó el ajuste con la función Doble Gumbel Optimizada que al realizar la partición optima de la función doble Gumbel se disminuyó el error como se muestra en las siguientes figuras

Tabla 6. Error estándar obtenido a partir del ajuste con la función Doble Gumbel Optimizada para la estación.

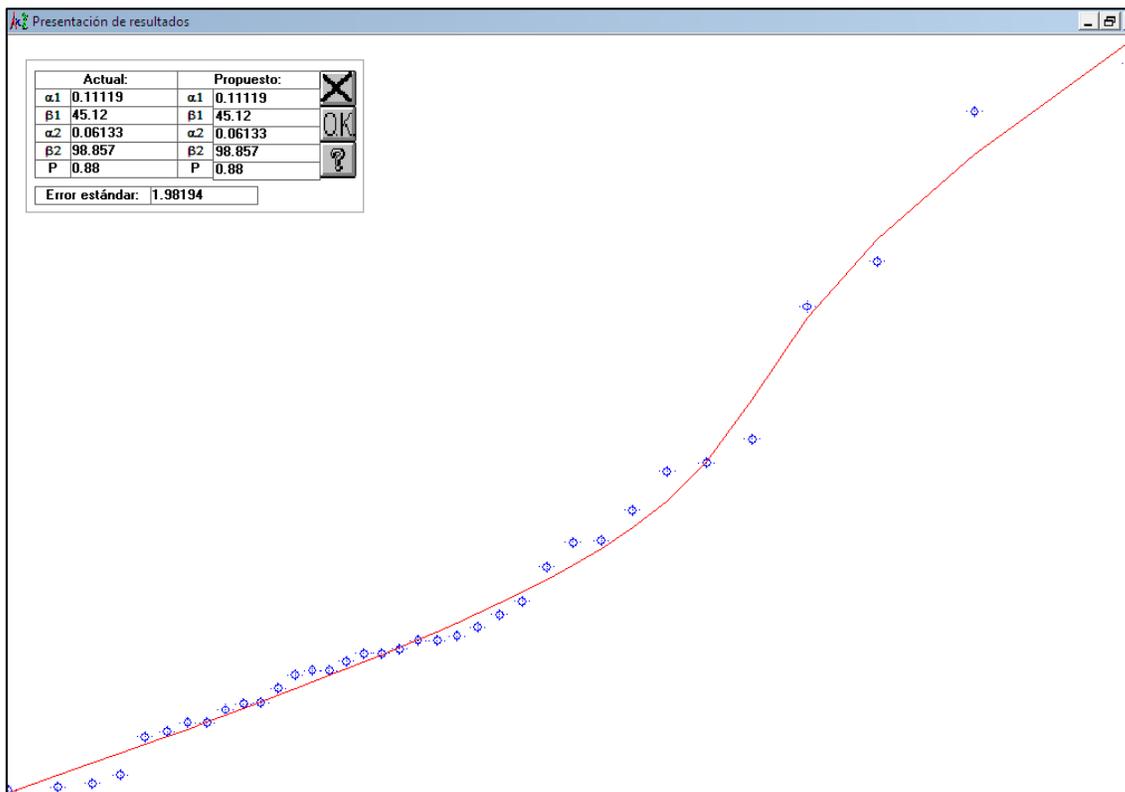
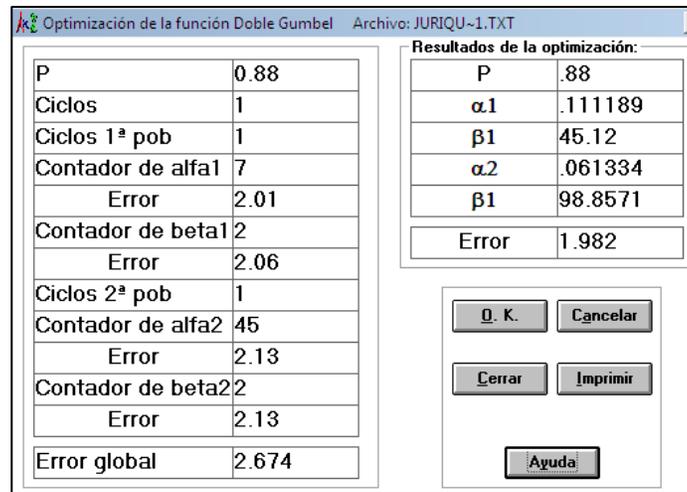


Figura 18. Se muestra el ajuste con la función Doble Gumbel Optimizada para la estación

Por tal motivo, se realiza el ajuste y extrapolación de los datos a partir de estas distribuciones Doble Gumbel Optimizada como se muestra a continuación.

Tabla 7. Ajuste de los datos a partir de la función de distribución Doble Gumbel Optimizada para la estación.

i	Tr	Dato	Calculado	Error^2
1	37.	118.	121.25	10.59
2	18.5	112.5	107.57	24.27
3	12.33	95.2	97.85	7.02
4	9.25	90.	88.76	1.53
5	7.4	74.7	79.29	21.1
6	6.17	72.	72.08	.01
7	5.29	71.	67.61	11.51
8	4.63	66.5	64.51	3.97
9	4.11	63.	62.13	.76
10	3.7	62.8	60.19	6.83
11	3.36	60.	58.54	2.14
12	3.08	56.	57.09	1.19
13	2.85	54.5	55.8	1.69
14	2.64	53.	54.62	2.64
15	2.47	52.	53.54	2.38
16	2.31	51.5	52.53	1.07
17	2.18	51.5	51.58	.01
18	2.06	50.5	50.68	.03
19	1.95	50.	49.82	.03
20	1.85	50.	49.	1.01
21	1.76	49.1	48.19	.82
22	1.68	48.	47.41	.35
23	1.61	48.	46.65	1.84
24	1.54	47.5	45.89	2.6
25	1.48	46.	45.14	.75
26	1.42	44.3	44.38	.01
27	1.37	44.2	43.63	.33
28	1.32	43.5	42.86	.41

Parámetros estadísticos de la muestra:							
μ	= 56.403	σ	= 20.256	γ	= 1.666	κ	= 5.732
Parámetros de la función: Doble Gumbel							
Parámetro	Alfa1	Beta1	Alfa2	Beta2	P		
Valor	.111189	45.12	.061334	98.8571	.88		
Error estándar = 1.982							
Cerrar	Extrapolar	Graficar	Imprimir	Ayuda			

Tabla 8. Precipitación para diferentes periodos de retorno para la estación Juriquilla.

Tr	Dato cal
2.	50.25
5.	66.25
10.	91.53
25.	113.79
50.	126.7
100.	138.71
200.	150.35
500.	165.46
1000.	176.86

3.4.2 Parámetros fisiográficos de la cuenca.

De acuerdo al análisis de la cuenca de estudio y de la visita de campo, se encontraron los siguientes parámetros de la cuenca de influencia para el área de estudio.

Tabla 9 Parámetros fisiográficos de la cuenca.

Parámetro fisiográfico	Valor
Longitud del cauce principal (L) =	11,486 m
Desnivel del cauce principal (H) =	509 m
Pendiente del cauce principal (S) =	0.04431 m/m
Área de la Cuenca =	18.54 Km ²

3.4.3 Coeficientes de escurrimiento asociados al uso de suelo y vegetación para los distintos escenarios de urbanización.

Mediante las tablas de la CONABIO y la visita de campo y las áreas de diferentes tipos de uso de suelo y vegetación se determinó los coeficientes N de escurrimiento que le corresponde a cada tipo de suelo, de acuerdo a esta clasificación se dividió la zona y se realizó un mapa de la situación actual y para cada escenario, respecto a esta división se calculó las áreas y porcentajes de estas para el análisis y con respecto a lo anterior se realizó el cálculo del factor CN para cada propuesta de los diferentes escenarios de urbanización.

3.4.4 Tiempo de concentración para los distintos escenarios de urbanización.

El tiempo de concentración (T_c) se asume como el lapso que tarda en llegar una gota de agua desde la parte más alta de la cuenca hasta su punto de salida. Para el cálculo de este parámetro se utilizó la ecuación referente a l tiempo de concentración del servicio de conservación de suelos, pero con la fórmula que involucra no solo las características de pendiente y longitud, sino que también involucra el uso de suelo para lo cual resulta la aplicación en este trabajo, debido a que el estimar una urbanización futura genera una impermeabilidad en la zona de estudio y por lo tanto una respuesta de la cuenca as rápida, haciendo que el tiempo de concentración se vea reducido y por lo tanto se contempla como una variable que depende de los escenarios de urbanización propuestos.

3.4.5 Calculo de los gastos por el método HUT (Hidrograma Unitario Triangular).

Este método, desarrollado por el SCS, también llamado del “número de curva” consta de dos partes. En una de ellas se hace una estimación del volumen de escorrentía resultante de una precipitación - escurrimiento directo, y en la otra se determina el tiempo de distribución del escurrimiento, incluyendo el caudal punta.

Se utilizó este método debido a que es el más adecuado a las características fisiográficas de la cuenca y para las condiciones particulares de la zona de estudio, así como los parámetros que ayudan a poder estimar los escurrimientos de acurdo a la variable principal propuesta como el cambio de uso de suelo debido a la urbanización.

El cálculo de los gastos de diseño se realizó para los diferentes periodos de retorno, en este caso en articular analizando el caso de un $TR=25$ años y un $Tr=50$ años, donde se pudieron observar los hidrogramas para cada periodo de retorno y para cada condición de escenarios propuestos.

Al realizar el análisis y cálculo de los gastos por el método del hidrograma unitario triangular se calculó el CN ponderado de acuerdo a cada tipo de suelo y en cada escenario a partir de las condiciones actuales y para cada periodo de retorno, calculando la precipitación en exceso y se calculó el tiempo pico que es el factor que nos indica el gasto pico en el hidrograma.

3.5 Criterios y consideraciones del caso particular de estudio.

- Se contempla las lluvias máximas en 24 horas y por medio de la hidrología clásica, considerando el método del hidrograma unitario triangular, calcular los gastos máximos.
- Se consideró el modelo HUT por ser el más adecuado a las características fisiográficas de la cuenca, calculando los gastos sin considerar los bordos aguas arriba, estableciendo el caso crítico de que se encuentre en su capacidad a NAMO y viertan en el momento que se produzca los escurrimientos.
- Analizar los gastos máximos para los periodos de retorno de 25 y 50 años, debido a que en la estación de influencia se han tienen el registro más alto para una lluvia asociada a un $Tr=25$ años, sin embargo, también se considera evaluar por seguridad el $Tr=50$ años.
- La delimitación de la cuenca se realizó con un modelo digital de elevaciones debido a que la zona permanece en su mayoría sin urbanizarse y se siguen respetando los parteaguas naturales referentes a las curvas de nivel.
- Se considera el tiempo de concentración una variable de acuerdo a la urbanización futura, debido a que entre más impermeable es la zona el tiempo de respuesta de la cuenca es variable, acortando el tiempo de concentración por una respuesta más rápida en la cuenca de estudio.

- En el modelo hidráulico se realizó el análisis para la zona baja de la cuenca donde se generan las áreas de inundación, ya que en la parte alta no se generan áreas de inundación debido a las pendientes pronunciadas de la misma.
- Los escenarios se plantean de acuerdo al porcentaje de urbanización de la cuenca y se realiza un ponderado del CN para cada escenario de urbanización.
- La urbanización se considera de aguas abajo hacia aguas arriba de acuerdo con la proyección de la urbanización del plan de desarrollo urbano de la ciudad de Querétaro.
- Se establece que la urbanización de la zona es una zona con un nivel de marginación bajo y con propiedades de dos plantas, para el análisis de costos debido a daños por inundación.

3.6 Simulación hidráulica y tránsito de avenidas.

La simulación hidráulica y tránsito de avenidas de la cuenca, así como de los arroyos, se realizó considerando los distintos escenarios de urbanización, mediante el software Iber de simulación de inundaciones en 2D. Para ello se recaudó la información de la topografía, así como la información característica de la cuenca como tipo de vegetación uso de suelo entre otros, asignando los gastos de estudios los estudios hidrológicos y calculando para cada escenario de urbanización las áreas de inundación generadas para cada escenario propuesto. Se introdujo la topografía en formato de un modelo digital de elevaciones, al cual se le anexa la información de uso de suelo y respecto a la rugosidad se contempla el número de Manning representativo para cada área con distinto valor de uso de suelo, por ultimo para cada escenario se introduce las condiciones particulares de los gastos asociados a las tormenta o periodos de diseño y se extrajo la información de las zonas de inundación generadas.

3.7 Análisis de resultados de la simulación hidráulica

Derivado de la simulación hidráulica se obtuvieron las áreas de inundación que arroja el software Iber y se realizó el análisis respecto a los asentamientos urbanos actuales y con los distintos escenarios de urbanización. Mediante el cálculo de las áreas de inundación con sistemas de información geográfica se pudo delimitar las zonas de probable afectación de acuerdo a los escenarios analizados y con las distintas lluvias de diseño. Además, se obtuvieron los tirantes máximos generados para cada condición y las doce simulaciones respecto a cada escenario de urbanización.

3.8 Elaboración de mapas de zonas de inundación para los distintos escenarios futuros de urbanización

Referente a las áreas de inundación se extrajeron las áreas en formato shape y mediante sistemas de información geográfica fue posible referenciar la información y realizar los mapas de zonas de probable inundación analizando la información en condiciones actuales y los escenarios futuros de urbanización, además de poder comparar mediante el traslape de las zonas urbanas actuales y las áreas simuladas como zonas de inundación, se identificaron y se representaron en mapas para tener una fácil comprensión visual del fenómeno de las inundaciones considerando la urbanización futura.

3.9 Estimación de costos probables por daños debido la urbanización en las zonas de inundación.

Teniendo como datos los tirantes máximos y las zonas de inundación, se calculó mediante la metodología del CENAPRED los costos probables por daños debido a las zonas de inundación que generaría cada escenario de urbanización, contemplando los criterios particulares de la zona de estudio, con lo cual se pudo realizar un estimado del incremento que se tiene también en costos debido a los daños provocados en caso de urbanización de las zonas referentes a cada escenario propuesto.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Escenarios de urbanización.

En la Tabla 10 se muestran los distintos escenarios de urbanización de acuerdo al porcentaje de urbanización propuesto dentro de la cuenca de estudio, se muestra también el área que representa de urbanización, donde se resalta que se tiene actual mente un 7.87 por ciento de urbanización de la cuenca de estudio, y por lo que se planteó los diferentes escenarios a futuro para observar el comportamiento de los escurrimientos hasta llegar a una condición de urbanización total de la cuenca.

Tabla 10. Escenarios de Urbanización.

Escenario	Área urbanizada (Km2)	Porcentaje de urbanización (%)
Natural	0.00	0.00
Actual	1.46	7.87
I	4.63	25.00
II	9.27	50.00
III	13.90	75.00
IV	18.54	100.00

4.2 Hidrogramas y gastos máximos para los distintos escenarios de urbanización.

Partiendo de las variables principales donde influyen el cambio de uso de suelo representado en el coeficiente CN, tiempo de concentración y las características fisiográficas particulares de la cuenca de estudio. Se obtuvieron los siguientes gastos para las distintas condiciones de urbanización, contemplando dos simulaciones de tormentas asociadas a un periodo de retorno de 25 años y 50 años.

Tabla 11. Coeficientes CN, Tiempo de concentración y gastos máximos para los distintos escenarios de urbanización con un Tr= 25 años.

Escenario	CN	Tc (horas)	Gasto (m3/s)
Natural	65.00	4.44	6.98
Actual	75.41	3.35	18.82
I	77.64	3.13	22.78
II	82.50	2.69	34.31
III	85.75	2.41	45.11
IV	90.00	2.00	65.22

Tabla 12. Coeficientes CN, Tiempo de concentración y gastos máximos para los distintos escenarios de urbanización con un Tr= 50 años.

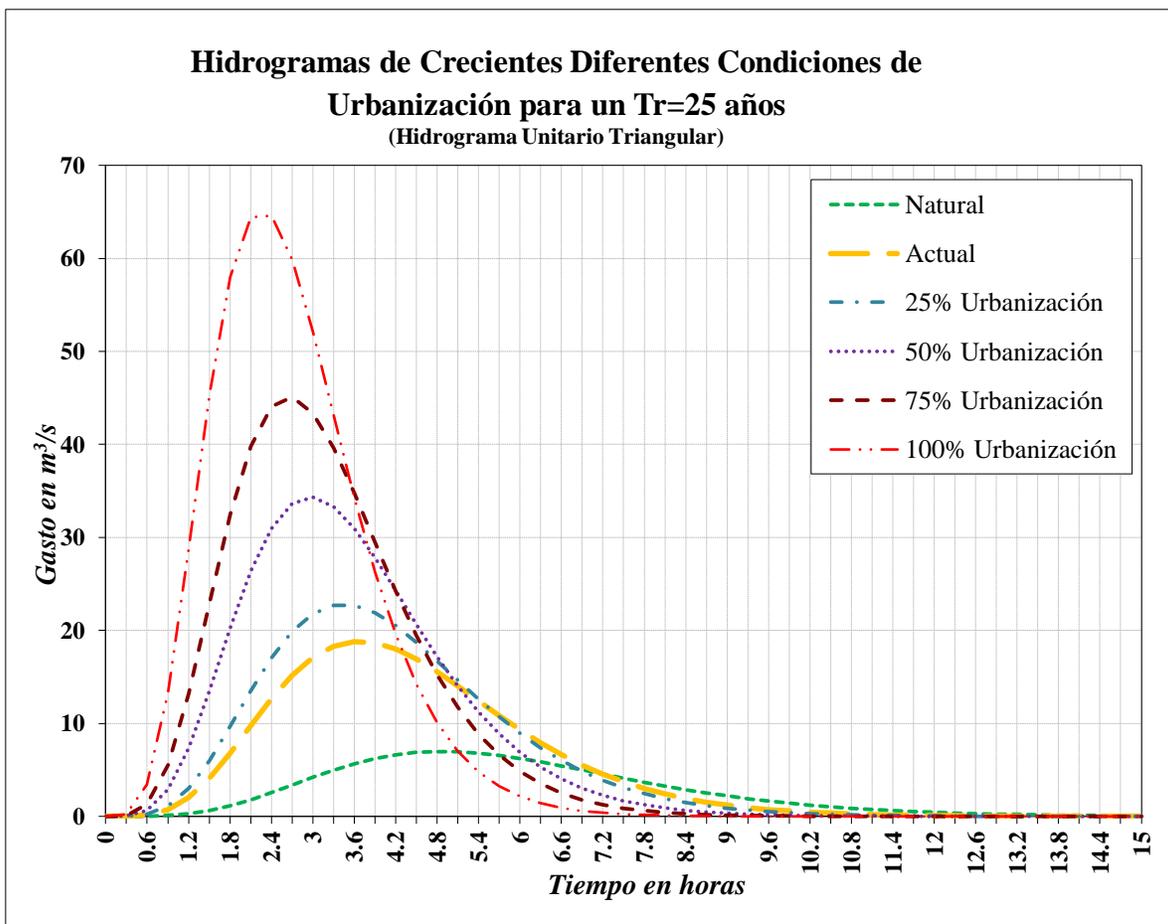
Escenario	CN	Tc (horas)	Gasto (m3/s)
Natural	65.00	4.44	9.75
Actual	75.41	3.35	24.02
I	77.64	3.13	28.68
II	82.50	2.69	42.01
III	85.75	2.41	54.29
IV	90.00	2.00	76.80

En la Tabla 11 y Tabla 12, se encontró la variabilidad de los gastos que no solo son mayores debido a simular con una tormenta mayor, en este caso se comparan las tormentas de 25 y 50 años de periodo de retorno, sino también que el ponderado de los coeficientes referentes al uso de suelo y la permeabilidad que representan generan un cambio al urbanizar la cuenca en cada escenario, por lo que esto implica que los gastos sean mayores.

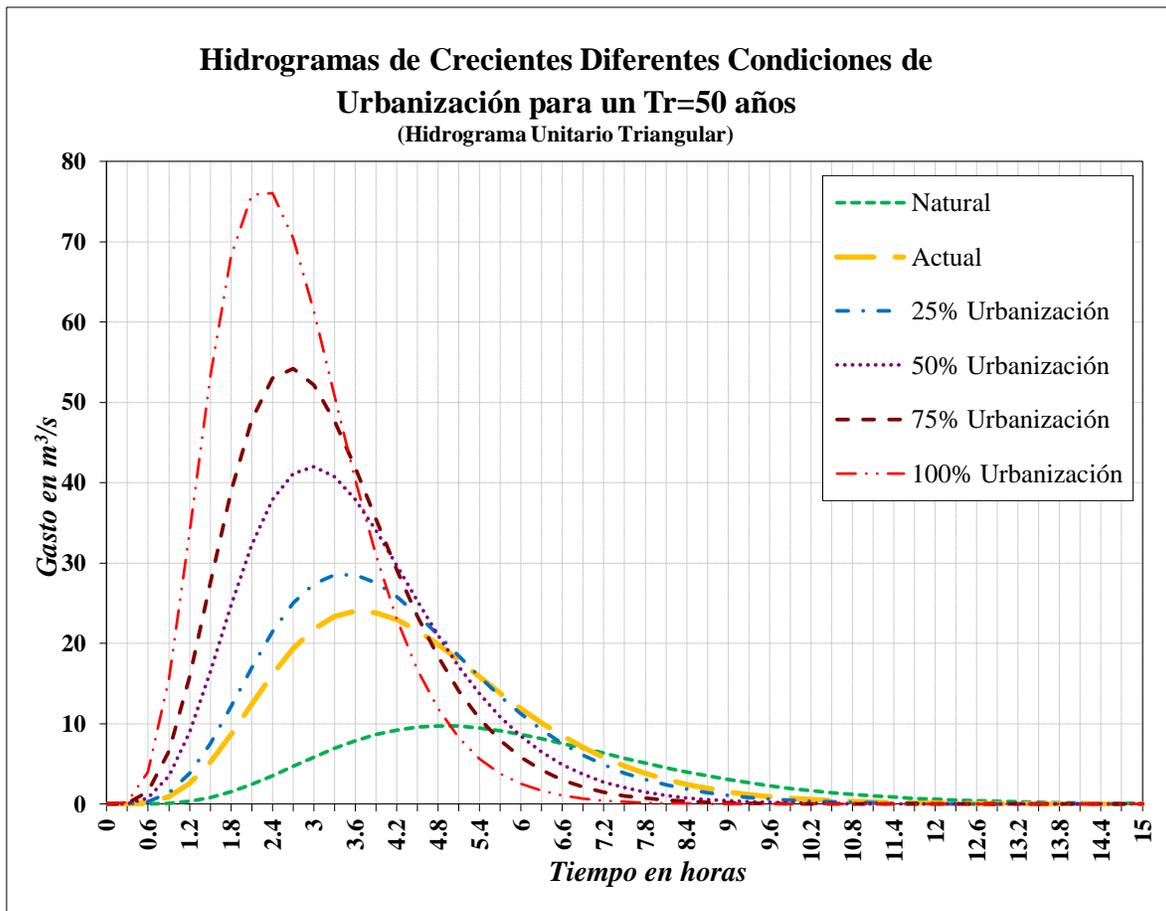
Podemos entender que un gasto asociado a una condición de urbanización del 50% y con un Tr=25 años sea mayor que el gasto asociado a un Tr=50años para la condición actual, por lo que se refiere a que una tormenta de menor magnitud pero en una condición de urbanización mayor puede generar un gasto mayor y en consecuencia, una obra hidráulica que solo está diseñada para un periodo de

retorno mayor, pero que no contempla una urbanización futura o incremento en los escurrimientos, puede resultar rebasada.

Por otra parte, no solo el coeficiente de uso de suelo afecta los gastos directamente sino también afecta la repuesta de la cuenca, debido a una impermeabilización mayor tiende a que la respuesta de la cuenca sea más rápida y esto genera un incremento en los gastos, incrementando rápidamente el tirante sobre un cauce.



Gráfica 1. Hidrogramas de crecientes con distintos escenarios de Urbanización para un $T_r=25$ años.



Gráfica 2. Hidrogramas de crecientes con distintos escenarios de Urbanización para un Tr=50 años.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se puede observar el fenómeno del incremento de la impermeabilidad en una cuenca, donde al comparar los hidrogramas de un periodo de retorno de 25 y 50 años, se identifica que a una tormenta de mayor magnitud tendrá una respuesta en los gastos de mayor magnitud, sin embargo, también se observa que para las distintas condiciones de urbanización el tiempo de respuesta de la cuenca asociado a la impermeabilidad de los escenarios analizados, tiende a hacer a los hidrogramas más cortos en duración, pero a su vez con un volumen mayor. Comparando el hidrograma

generado en condiciones naturales con la condición de urbanización total, podemos ver el tiempo total del hidrograma se reduce a prácticamente la mitad con un gasto mucho mayor en las condiciones con el 100% de urbanización.

4.3 Simulación hidráulica y tránsito de avenidas.

Los resultados de la simulación hidráulica se expresan en la magnitud de la mancha de inundación considerando el instante donde se tiene el máximo en el área de inundación, así mismo se pueden observar en las siguientes imágenes la escala de calado o tirante máximo y la ubicación respecto a la zona de inundación actual y las condiciones de urbanización actual. A continuación, se presentan los resultados de la simulación de inundaciones para los distintos escenarios de urbanización considerando una tormenta de diseño de un $Tr=25$ años.



Figura 19. Simulación de áreas de inundación, escenario natural, $Tr=25$ años.

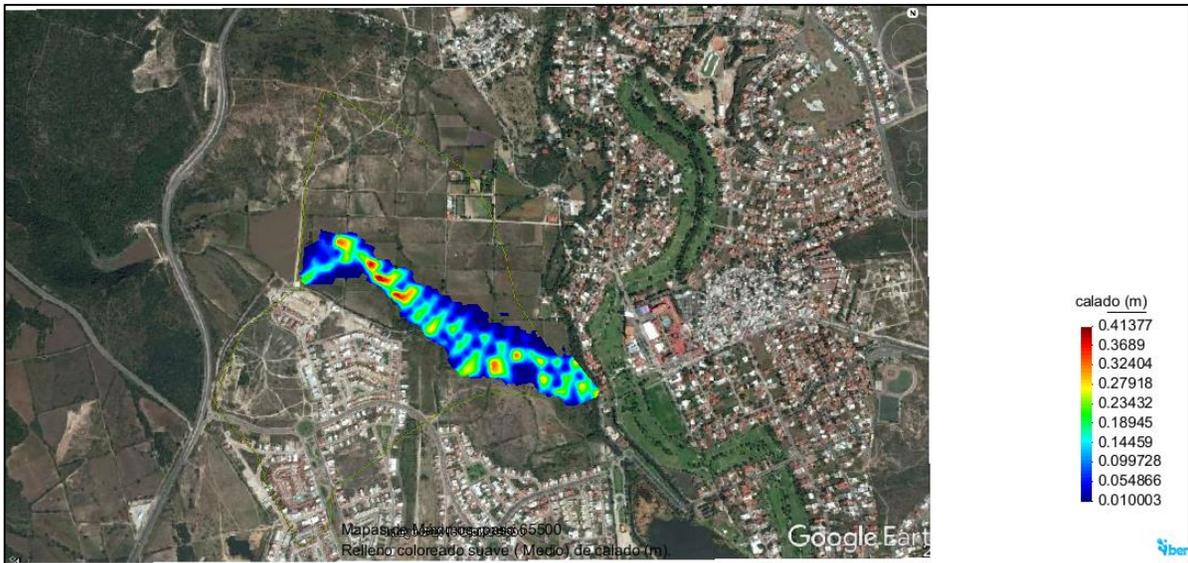


Figura 20. Simulación de áreas de inundación, escenario actual, $T_r=25$ años.

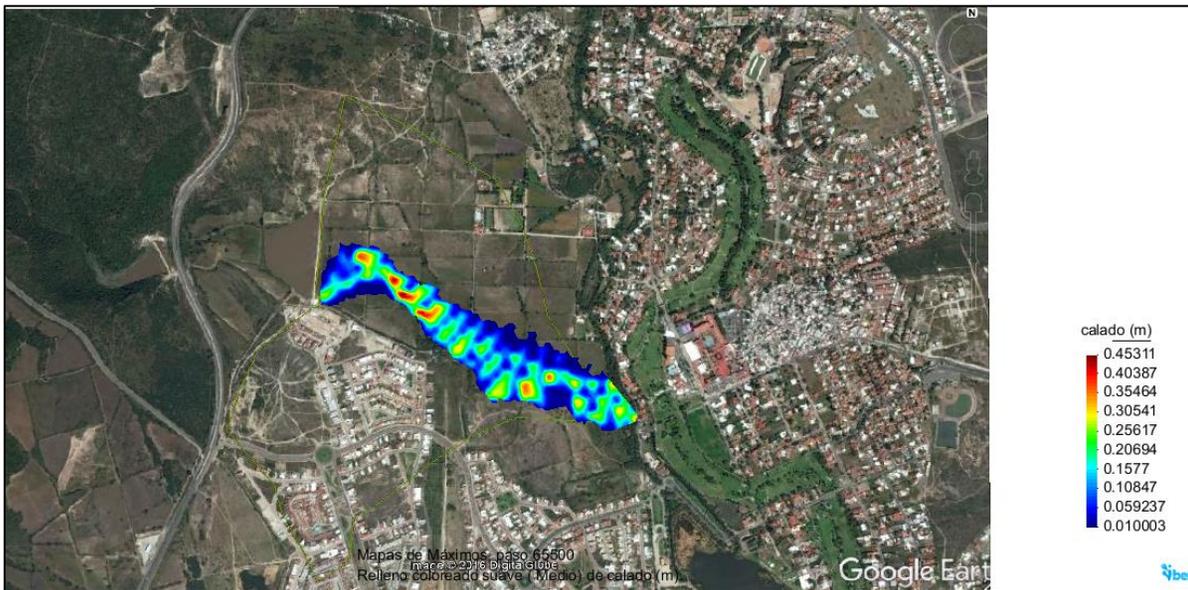


Figura 21. Simulación de áreas de inundación, escenario I, $T_r=25$ años.

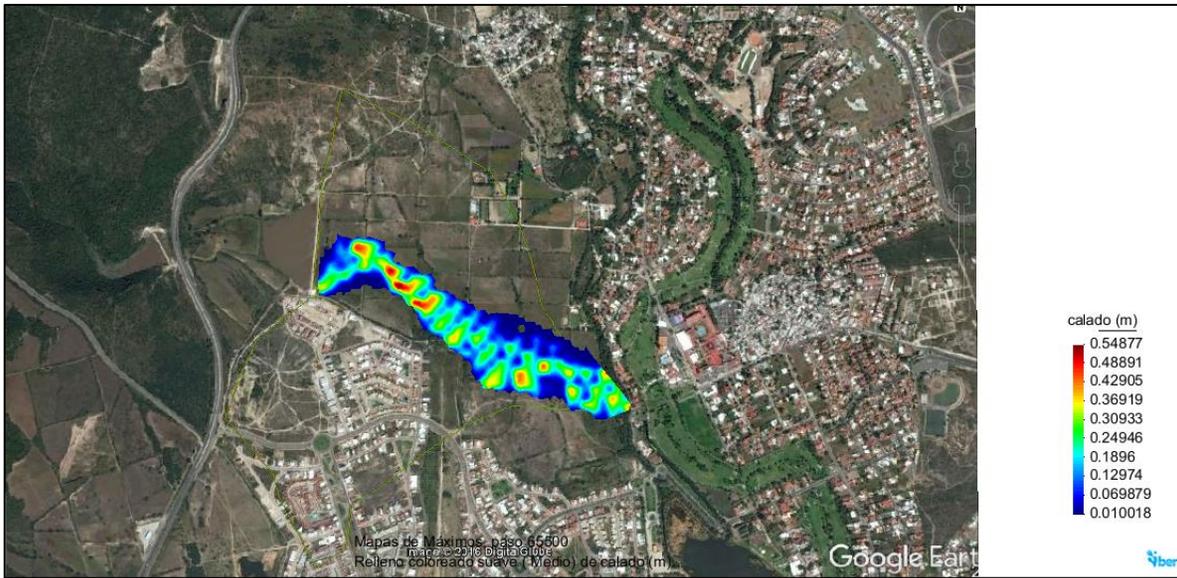


Figura 22. Simulación de áreas de inundación, escenario II, $Tr=25$ años.

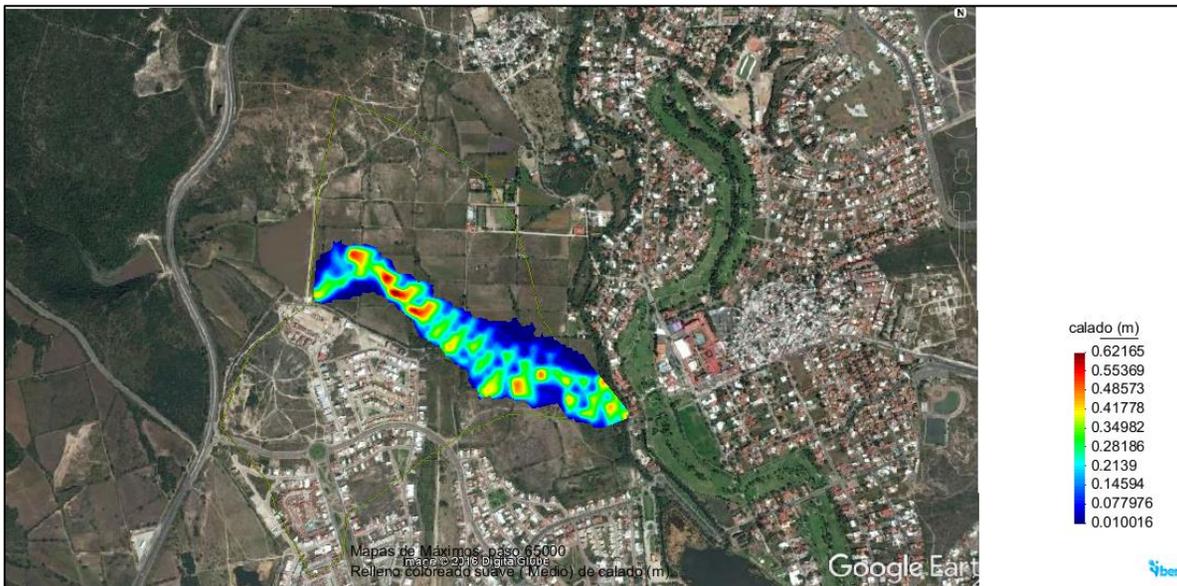


Figura 23. Simulación de áreas de inundación, escenario III, $Tr=25$ años.

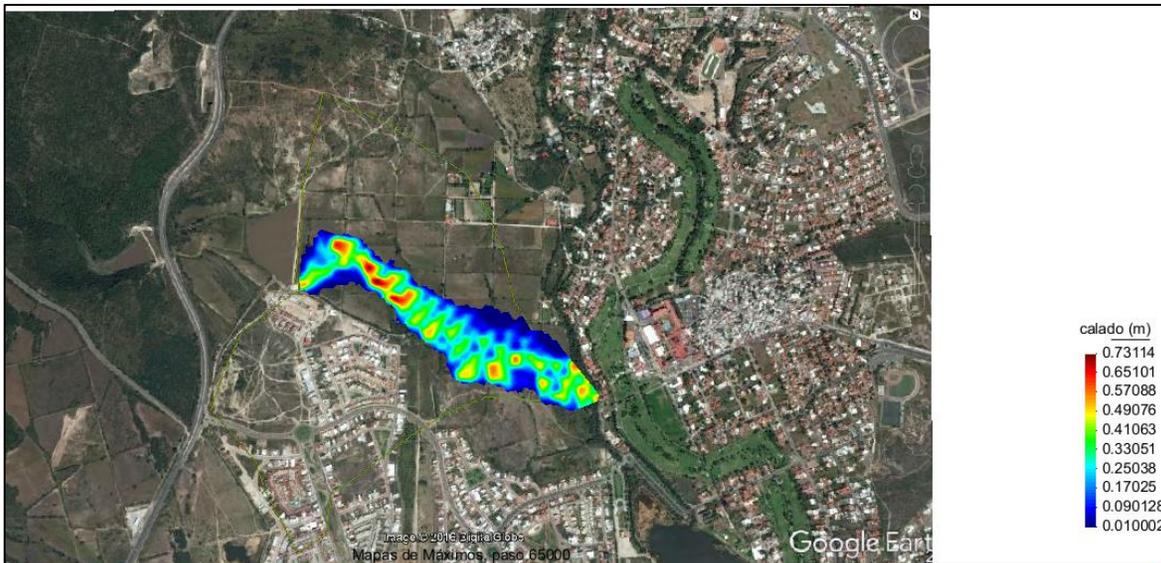


Figura 24. Simulación de áreas de inundación, escenario IV, $T_r=25$ años.

Determinando las áreas de inundación para los distintos escenarios de urbanización se puede resaltar que respecto a la zona urbana actual no se tiene conflicto, debido que las zonas de inundación de mantienen en los que actualmente son parcelas agrícolas, donde revisando en campo, el cauce se dispersa entre las parcelas y se genera la zona de inundación actual con un flujo laminar. Sin embargo considerando que cada escenario de urbanización futura aumenta los gastos y por consecuencia éste efecto de cambio de uso de suelo aumentan las áreas de inundación (corroborado con la simulación hidráulica), se debe prever para una mejor planeación de la urbanización de la zona de estudio que el área de inundación actual no siempre será de la misma magnitud y por tanto, se debe contemplar el área de inundación generada para un periodo de retorno mayor, así como también, considerar las condiciones de urbanización futura, las cuales incrementan estas áreas de inundación y los tirantes de agua que se producen. A continuación, se presentan los resultados de la simulación hidráulica para los distintos escenarios de urbanización contemplando una lluvia de diseño de un $T_r=50$ años.

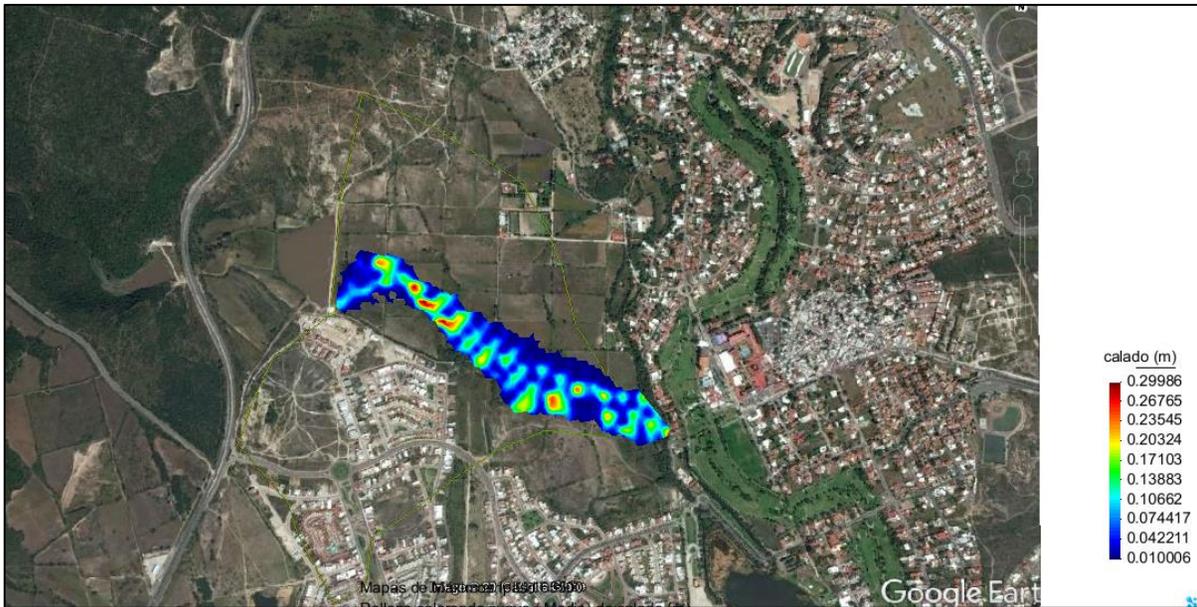


Figura 25.Simulación de áreas de inundación, escenario natural, Tr=50 años.

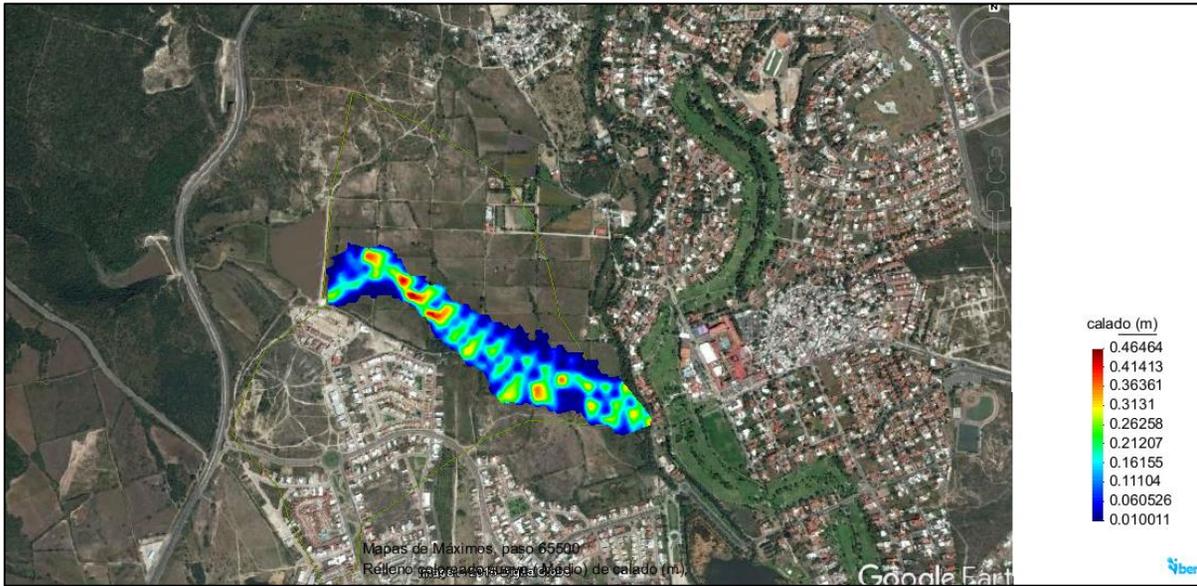


Figura 26.Simulación de áreas de inundación, escenario actual, Tr=50 años.

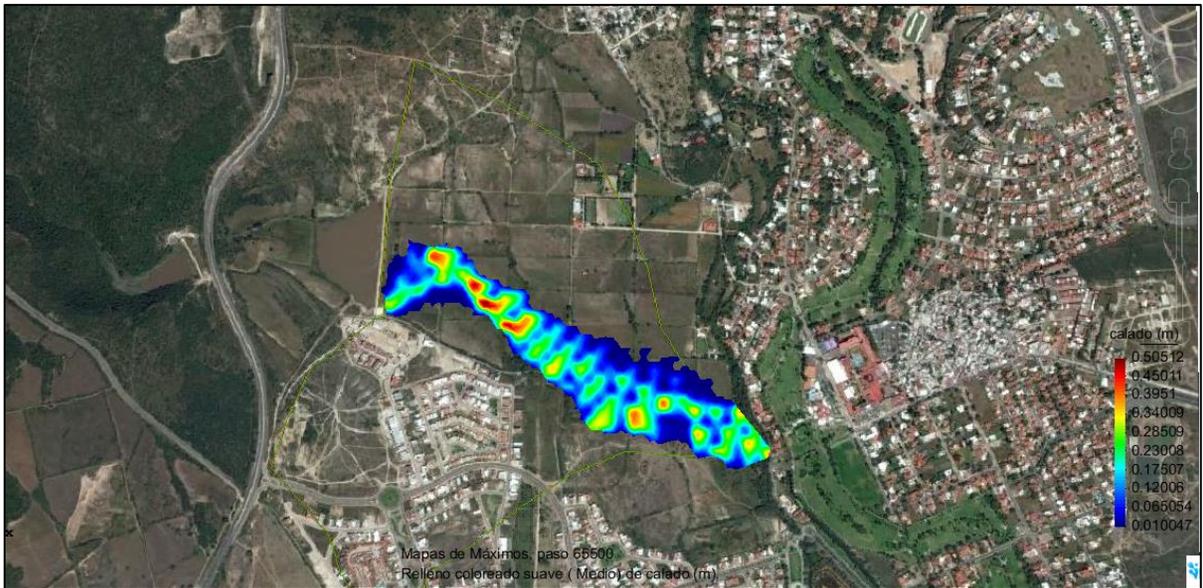


Figura 27.Simulación de áreas de inundación, escenario I, Tr=50 años.

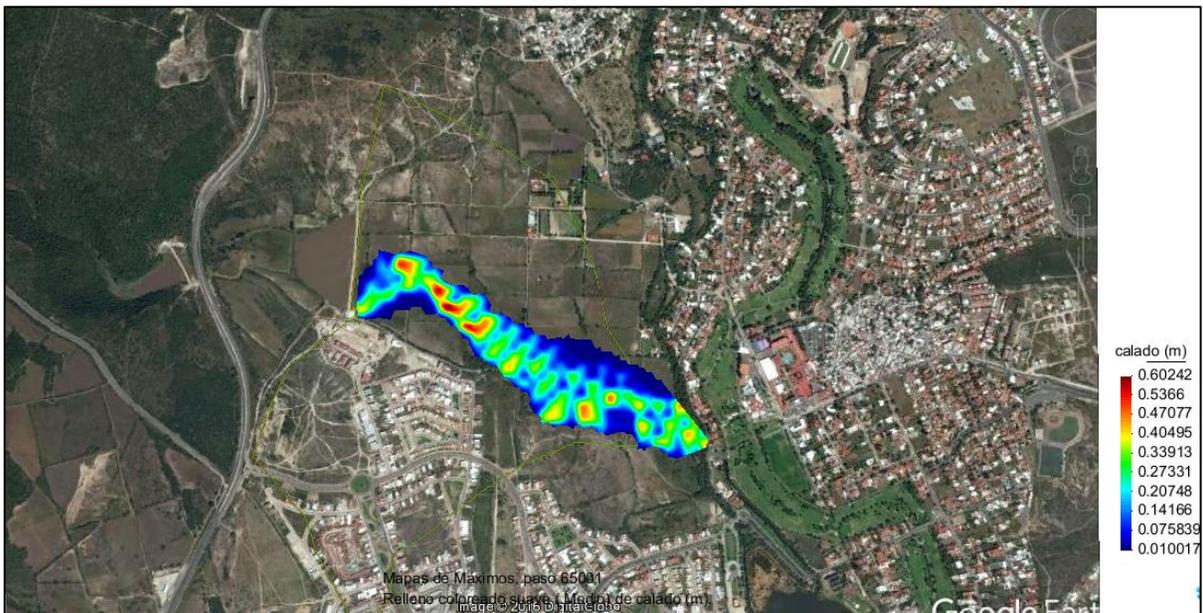


Figura 28.Simulación de áreas de inundación, escenario II, Tr=50 años.

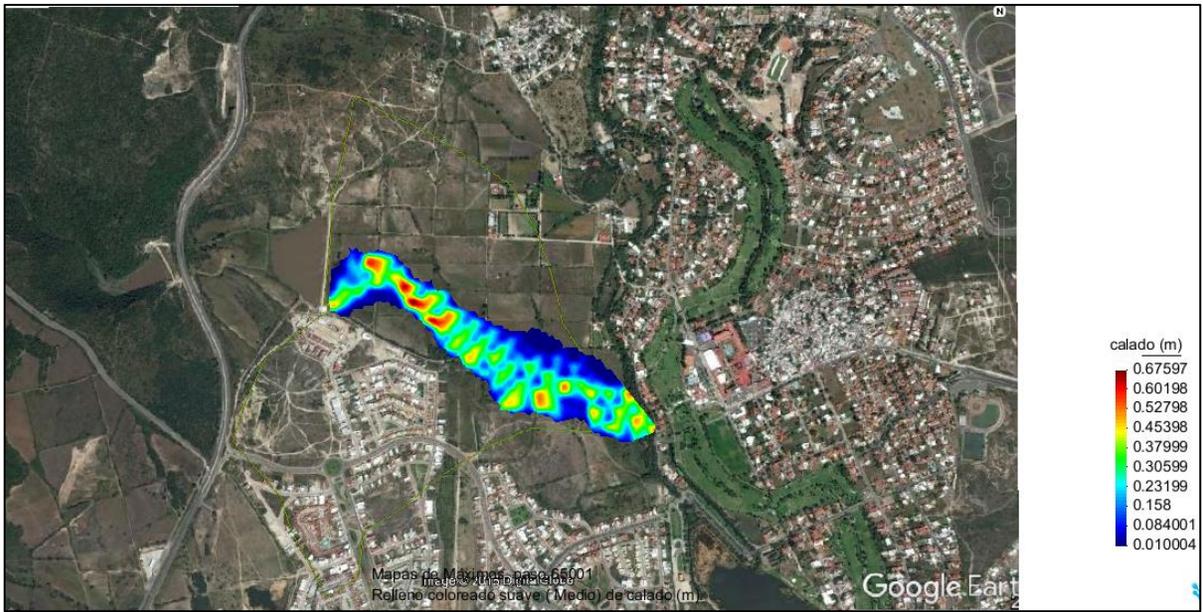


Figura 29. Simulación de áreas de inundación, escenario III, $Tr=50$ años.

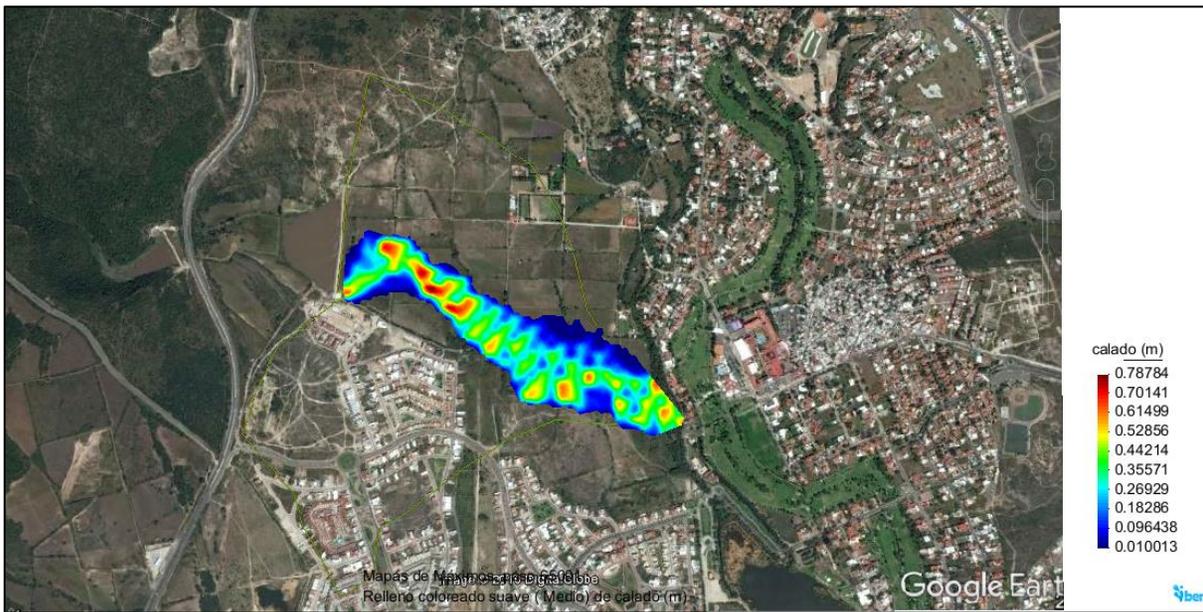


Figura 30. Simulación de áreas de inundación, escenario IV, $Tr=50$ años.

4.4 Áreas de inundación y tirante máximo para los distintos escenarios de urbanización.

A continuación, se presentan los resultados de la simulación de inundaciones, cuantificando las áreas de inundación máximas para los distintos escenarios, además de los tirantes máximos que se generaron en el tránsito de las avenidas de diseño de 25 y 50 años para las distintas condiciones de urbanización.

Tabla 13. Áreas de inundación y tirante máximo para los distintos escenarios de urbanización con un $T_r= 25$ años.

Escenario	Área de inundación (Ha)	Tirante máximo (m)
Natural	18.129	0.25
Actual	19.926	0.41
I	20.623	0.45
II	22.358	0.54
III	22.640	0.62
IV	24.053	0.73

Tabla 14. Áreas de inundación y tirante máximo para los distintos escenarios de urbanización con un $T_r= 50$ años.

Escenario	Área de inundación (Ha)	Tirante máximo (m)
Natural	19.509	0.29
Actual	21.358	0.46
I	21.629	0.50
II	23.064	0.60
III	23.473	0.67
IV	24.160	0.78

Comparando los resultados se observa que las áreas de inundación varían respecto al escenario de urbanización corroborando la hipótesis de este trabajo, sin embargo, el cambio no es tan representativo como se esperaba debido a que varían en un máximo de 20%, comparando como se generaba el área de

inundación en condiciones naturales respecto a las condiciones totalmente urbanizadas. Esto debido a la topografía del sitio particular de estudio, puesto que en condiciones actuales ya se tiene que es una zona de inundación, al realizar la simulación de los demás escenarios el área si se ve incrementada pero el incremento es relativamente menor al que se esperaba comparándolo con un cauce que se estuviese bien definido, donde éste desbordaría causando un gran incremento en la mancha de inundación.

Por otra parte, la topografía de la zona delimita los extremos la zona de inundación y genera el remanso que propicia el área de inundación y los tirantes máximos de las zonas, los cuales se ven incrementados hasta casi tres veces su valor como se muestra en la Tabla 13 y Tabla 14 comparando las condiciones como se comportaban los escurrimientos en condiciones naturales y como se comportarán con condiciones totalmente urbanizadas. Esto indica que para este caso en particular de estudio las áreas de inundación pueden ser afectadas con tirantes de hasta tres veces mayor con la urbanización futura respecto al que se tiene considerado actualmente, por lo tanto, se debe contemplar dichas condiciones para la planeación de la urbanización de la zona, donde puede causar daños futuros a las estructuras que no se prevén actualmente.

4.5 Mapas de zonas de inundación para los distintos escenarios futuros de urbanización.

Derivado de los resultados de la modelación hidráulica, se presentan los mapas de las zonas de inundación para cada escenario de urbanización.

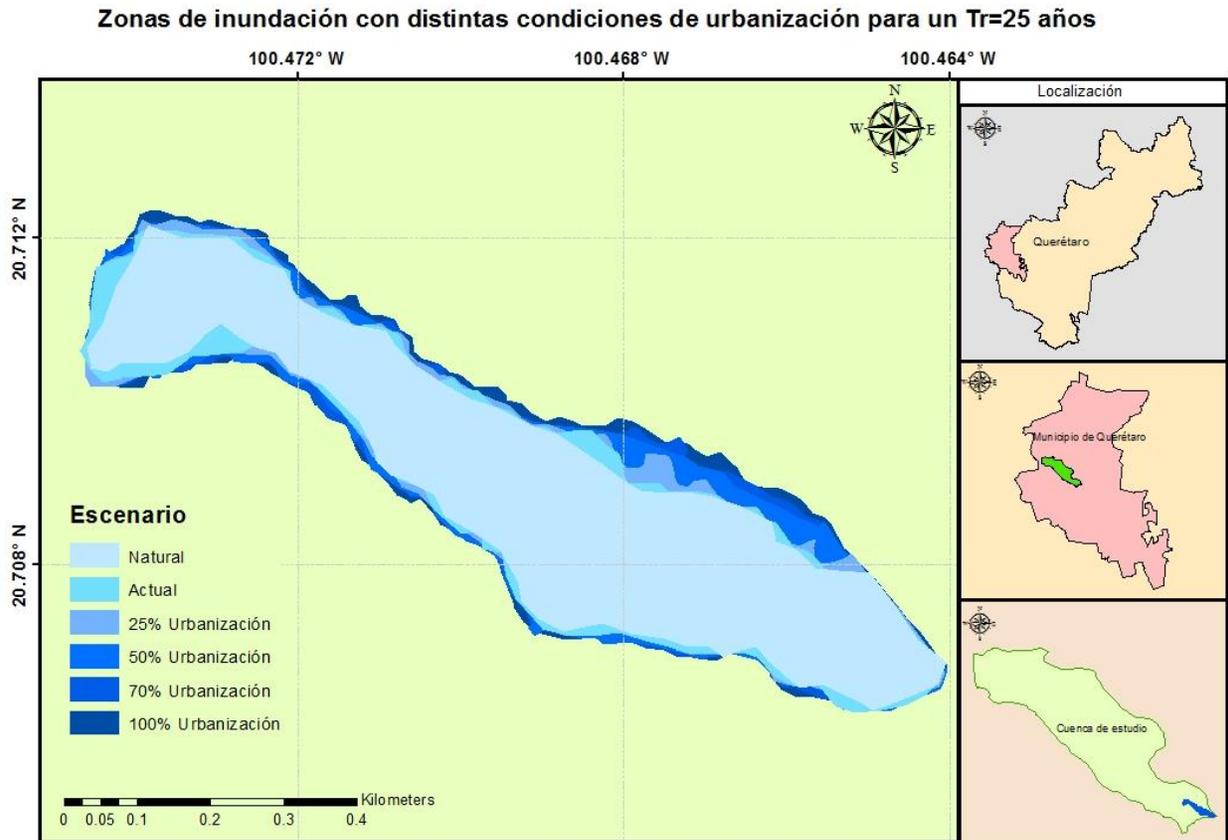


Figura 31. Zonas de inundación por distintos escenarios de urbanización, Tr=25 años.

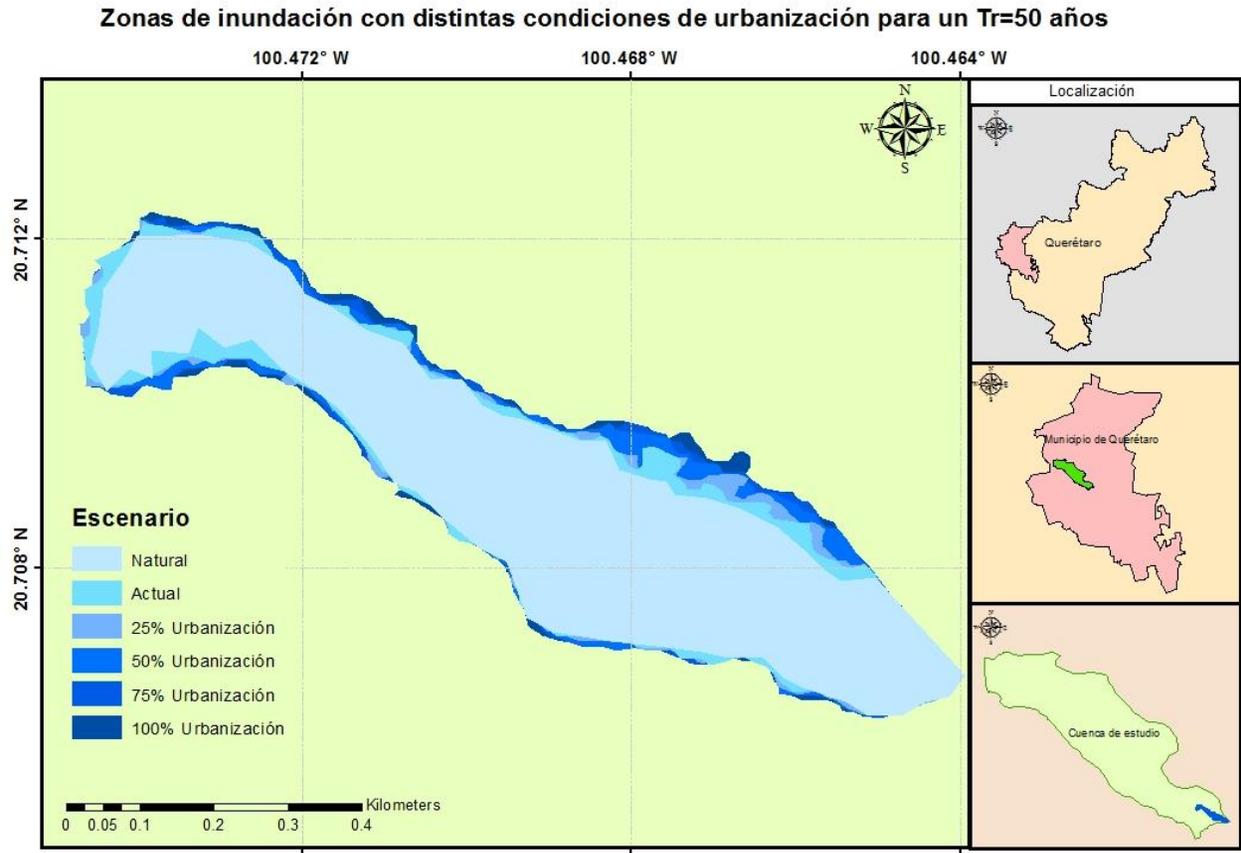


Figura 32. Zonas de inundación par distintos escenarios de urbanización, $T_r=50$ años.

En la Figura 31 y Figura 32, se puede mostrar el incremento de las áreas de inundación para los distintos escenarios de urbanización, donde se observa que aunque no se tiene una gran variabilidad entre las áreas, debido a la topografía del caso de estudio, se puede observar el aumento de la zona de inundación conforme al incremento en los gastos derivado de la urbanización establecida en los escenarios propuestos.



Figura 33. Zonas de inundación respecto a la urbanización actual, $T_r=25$ años.



Figura 34. Zonas de inundación respecto a la urbanización actual, $T_r=25$ años.

Se presentan los mapas de las zonas de probable inundación en la Figura 33 y Figura 34, donde se puede observar las áreas de probable afectación respecto a la urbanización actual. Las áreas no causan daños considerables actualmente, debido a que el área de inundación se refiere a parcelas agrícolas, sin embargo, se recomienda tomar estas consideraciones de las áreas futuras de inundación, para prever daños a la infraestructura urbana por el desarrollo en estas zonas, para la planeación de la zona urbana dentro de la cuenca y prevenir inundaciones en áreas urbanas o problemática pluviales.

4.6 Estimación de costos probables por daños en la urbanización futura.

Como información adicional se muestran a continuación los gastos probables que se generarían por la urbanización de las zonas e inundación, contemplando las condiciones de cada escenario de urbanización.

Tabla 15. Costos probables para los distintos escenarios de urbanización con un Tr= 25 años.

Escenario	Costo máximo (MILLONES M.N.)	Costo mínimo (MILLONES M.N.)	Medio (MILLONES M.N.)
Natural	0.00	0.00	0.00
Actual	0.00	0.00	0.00
I	63.61	53.94	55.36
II	76.57	65.28	66.93
III	83.37	71.32	73.08
IV	95.90	82.32	84.31

Tabla 16. Costos probables para los distintos escenarios de urbanización con un Tr= 50 años.

Escenario	Costo máximo (M.N.)	Costo mínimo (M.N.)	Medio (M.N.)
Natural	0.00	0.00	0.00
Actual	0.00	0.00	0.00
I	70.96	60.37	61.92
II	83.52	71.39	73.17
III	89.84	76.98	78.86
IV	99.32	85.35	87.40

En la Tabla 15 y 16 se muestran los costos estimados de acuerdo al tirante máximo y áreas de inundación para cada escenario de urbanización, se observa el incremento de los costos por el incremento de las áreas de inundación. También se muestra que para las condiciones naturales y actuales no se tiene urbanización en la zona inundable lo cual no genera un costo por daños, para los demás casos se recomienda evaluar el costo beneficio en caso de ser necesario el urbanizar en la zona de probable inundación.

5. CONCLUSIONES

Al plantear los distintos escenarios urbanización se modificó el uso de suelo para cada escenario lo cual incremento los coeficientes referentes a la permeabilidad de la cuenca y por tanto se observó un incremento en los escurrimientos debido a que en cada escenario entre más incrementa la mancha urbana mayor es el área impermeable y genera mayores gastos.

Por otra parte, se analizó en este caso el escenario de la cuenca con condiciones naturales (sin urbanización) donde se determinó sus gastos y el área de inundación dentro de la cuenca que se generaba antes de la urbanización, así mismo, se realizó el cálculo para las condiciones actuales, donde se observa que debido al cambio de uso de suelo de matorrales a parcelas y zona urbana se tiene un incremento en los escurrimientos.

Se determinó el incremento de los gastos que no solo son mayores debido a simular con una tormenta mayor, en este caso se comparan las tormentas de 25 y 50 años de periodo de retorno, sino también, que el ponderado de los coeficientes referentes al uso de suelo y la permeabilidad que representan tienen un cambio al ser más urbanizada la cuenca en cada escenario, por lo que esto implica que los gastos sean mayores. Se demostró que un gasto asociado a una tormenta de menor magnitud en condición de urbanización futura puede incluso ser mayor a un gasto asociado a un periodo de retorno mayor considerando únicamente las condiciones de urbanización actuales y en consecuencia una obra hidráulica que solo está diseñada para un periodo de retorno mayor pero no contempla una urbanización futura o incremento en los escurrimientos puede resultar rebasada al generarse este uso cambio en el uso de suelo.

Se identificó que no solo el coeficiente de uso de suelo afecta los gastos directamente sino también afecta la repuesta de la cuenca, debido a una impermeabilización mayor tiende a que la respuesta de la cuenca será más rápida y esto genera un incremento en los gastos y se refleja en la magnitud de los

tirantes de agua y su zona de inundación. El tiempo de respuesta de la cuenca asociado a la impermeabilidad de los escenarios analizados tiende a hacer a los hidrogramas más cortos en duración, pero a su vez con un volumen mayor. Comparando el hidrograma generado en condiciones naturales con la condición de urbanización total, podemos ver el tiempo total del hidrograma se reduce a prácticamente la mitad con un gasto mucho mayor en las condiciones con el 100% de urbanización.

Las áreas de inundación varían respecto al escenario de urbanización corroborando la hipótesis de este trabajo, sin embargo, el cambio no es tan representativo como se esperaba debido a que varían en un máximo de 20% comparando como se generaba el área de inundación en condiciones naturales, respecto a las condiciones totalmente urbanizadas. Esto debido a la topografía del sitio particular de estudio, puesto que en condiciones actuales se tiene que es una zona de inundación, al realizar la simulación de los demás escenarios el área se ve incrementada pero el incremento es relativamente menor al que se esperaba comparándolo con un cauce que se estuviese bien definido, donde este desbordaría causando un gran incremento en la mancha de inundación.

Sin embargo, los calados o tirantes máximos de las zonas, los cuales cabe resaltar si se ven incrementados hasta casi tres veces su valor comparando las condiciones naturales y como se comportarán con condiciones totalmente urbanizadas. Esto indica que para este caso en particular de estudio las áreas de inundación pueden ser afectadas con tirantes de hasta tres veces mayor al que se tiene considerado actualmente, teniendo la urbanización futura, por lo tanto, se resaltan las consideraciones que se debe tener para la planeación de la urbanización de la zona, donde puede causar daños futuros a las estructuras que no se prevén actualmente.

Los mapas muestran las áreas de probable afectación respecto a la urbanización actual, donde , las áreas no causan daños considerables actualmente, debido a que el área de inundación se refiere parcelas agrícolas, sin

embargo se recomienda tomar estas consideraciones de las áreas futuras e inundación, para prever daños a la infraestructura urbana por el desarrollo en estas zonas, para una mejor planeación de la zona urbana dentro de la cuenca y prevenir inundaciones en áreas urbanas o problemática pluviales.

Respecto a los costos calculados se tiene el incremento de los costos por el incremento de las áreas de inundación y los tirantes que se generan, resaltando que actualmente no se tiene urbanización en la zona inundable y esto no genera un costo por daños, para los demás casos se recomienda evaluar el costo beneficio en caso de ser necesario el urbanizar en la zona de probable inundación.

Por último, siguiendo este criterio de considerar los escurrimientos con una cuenca urbanizada a futuro permitirá determinar la magnitud de gastos y zonas inundables, así como estimar los probables daños al urbanizar una zona de inundación futura. Esto referirá a una herramienta, normativa o criterio, que ayude a planificar obras hidráulicas pluviales que consideren estas condiciones futuras para que no se vean rebasadas en próximos años, además de poder delimitar estas zonas probables de inundación, considerándolas para una mejor ubicación y planeación de los nuevos desarrollos habitacionales y poder prevenir desastres futuros de inundaciones debido a estas causas. Además, se puede generar una normativa de planeación en estas áreas y/o que unidades de protección civil puedan alertar y saber los lugares más probables de inundación actuales y con urbanización futuras, para tener más atención a las zonas en caso de una contingencia.

6. REFERENCIAS

Bermúdez A., Dervieux A., Desideri J.-A., Vázquez M.E., 1998, Upwind schemes for the two-dimensional shallow water equations with variable depth using unstructured meshes, *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*

Bertoni, J. C., y Maza, J. A. 2004, Aspectos asociados a las inundaciones urbanas en Argentina, *Inundaciones Urbanas en Argentina.*

Bladé E., Gómez M., Sánchez-Juny M., J. Dolz, 2008, Preserving steady-state in one dimensional finite-volume computations of river flow, *J. Hydraul. Eng.* 134 pp. 1343–1347.

Breil, P., Radojevic, B. D., y Chocat, B. 2010, Assessing impact of global change on flood regimes. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 167-179.

Cea L., Puertas J., Vázquez-Cendón M.-E., 2015, Depthaveragedmodelling ofturbulent shallow water flow with wet-dry fronts, *Arch. Comput. Methods Eng.*

Chow V. T., 1959, *Hidráulica de canales abiertos*, Ed. McGraw-Hill.

Diskin M. y Ding Y. 1994, Channel routing independent of length subdivision, *Water Resources Research.*

Corestein G., Bladé E., Cea L., Lara A., Escolano E., Coll A., Iber, a river dynamics simulation tool, en: M. Pasenau, E. Escolano, J. Suit, A. Coll, A. Melendo, A. Monros, et al., 2010, 5th Conference on Advances and Applications of GID. Monografía CIMNE M118, International Center for Numerical Methods and Engineering, Barcelona, p. 87.

Esparza Orta, J. L. (2005). *La influencia de la longitud del registro en la estimación de gastos de diseño en México* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. División de Estudios de Posgrado. Campus Morelos.).

Evans W., Kirkpatrick D., Townsend G., 2014, Right-triangulated irregular networks, *Algorithmica*, pp.264–286.

Fernández Martín, E., 2012. ¿Cómo mejorar la imagen pública de los sondeos electorales?: causas y posibles soluciones a una percepción social negativa de los sondeos electorales. Universidad Complutense de Madrid.

Gómez Valentín, Manuel; Macchione, Francesco; Russo, Beniamino, 2009, *Ingeniería Hidráulica en México* . Vol. 24 Issue 3, p51-62.

Hernández y Vieyra, 2010, Riesgo por inundaciones en asentamientos precarios del periurbano, Morelia, una ciudad media mexicana: ¿El desastre nace o se hace?. *Rev. geogr. Norte Gd.*, n.47, pp. 45-62. ISSN 0718-3402.

INEGI (Instituto nacional de estadística y geografía), 2016, *Información geográfica y demográfica de México*. Disponible en: www.inegi.gob.mx.

Kite G.W. 1988, *Frequency and Risk Analysis in Hydrology*, Water Resources Publications, Colo St. Univ Fort Collins.

LeVeque R.J., *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*, Cambridge University Press, Cambridge, 2002.

Lindón, A., 1989. La problemática de las inundaciones en áreas urbanas como proceso de ocupación, un enfoque espacio-temporal. El caso de la ciudad de Buenos Aires. *Encuentro Geógrafos América Lat.* 2, 33–43.

Mobayed K. N., 2001, *Modelo distribuido de lluvia-escorrentía basado en el manejo de variables geo-referenciadas y el escalamiento fisiográfico de cuencas*, tesis doctoral, UNAM, México.

Mobayed, K., N.; Fuentes M., G. E. y Méndez A., B., 2002, *Aplicación del modelo hidrológico distribuido HIDRAS a una cuenca con respuesta súbita*.

Pereles Roselló, M. J.; Gallegos Reina, A.; Catarero Prados, F., 2014, Análisis de ajuste del área inundable obtenida mediante una evaluación integrada de la peligrosidad de inundación y peligros asociados, Baetica, 527-545.

Rastogi A.K., Rodi W., 1978, Predictions of heat and mass transfer in open channels, J. Hydraul. Div. - ASCE 104 , 397–420.

Ribó R., Pasenau M., Escolano E., Pérez J., Coll A., Melendo A., et al., 2007, GiD Reference Manual, CIMNE, Barcelona.

Riccardi, G.A., 1997. Elaboración de mapas de riesgo de inundación por medio de la modelación matemática hidrodinámica. Ing. Agua 4.

SCS (Soil Conservation Service), 1993, National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. USDA, Washington. pp: 4.1 - 4.20.

Toro E.F., 2009, Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics, A Practical Introduction, Springer Verlag, Berlin.

Triviño P.A. y Ortiz R.S., 2015, Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en Ramblas y Ríos-Rambra Mediterráneos, Investigaciones Geográficas #35, Universidad de Alicante, España.

Van Dorn W.C., 1953 ,Wind stress on an artificial pond, J. Mar. Res. 12 , pp. 249–276.

Vázquez-Cendón M.E., 1999, Improved treatment of source terms in upwind schemes for the shallow water equations in channels with irregular geometry, J. Comput. Phys. 148, pp. 497–526.

Vénere M, Clausse A., 2016, A computational environment for water flow along floodplains, International Journal on Computational Fluid Dynamics, Vol. 16, pp. 327-330.