
CUANTIFICACIÓN DE DAÑOS POR INUNDACIÓN
DEBIDO AL DESBORDAMIENTO DEL DREN
ARROYO DE TIERRAS CON EL USO DEL
SOFTWARE FLOODRISK PLUGIN

Tesis para obtener el título de
Ingeniero Civil

Presenta:

Chrystopher Daly Franco Navarro

Asesores:

Dr. Constantino Domínguez Sánchez

Mtro. Israel Alejandro García Ledesma



Morelia, Michoacán febrero 2022

Resumen

El presente trabajo se realizó con propósito de aportar instrumentos que sean de ayuda en el ámbito de la protección civil para lo cual se presenta una metodología práctica y útil para la estimación de riesgos por fenómenos de inundación, todo esto mediante el uso de softwares que están al alcance de las autoridades encargadas de salvaguardar la vida de la población de la ciudad de Morelia y el estado como lo son: Qgis, HEC-RAS, ArcGIS, Floodrisk Plugin, entre algunos otros que ayudan a hacer más eficientes los tiempos de ejecución de este tipo proyectos ayudando a ganar tiempo para prevenir desastres provocados por los fenómenos de inundación. En la realización de este trabajo se lograron puntos importantes cómo: caracterizar la zona de estudio con las zonas más vulnerables ante un fenómeno de inundación, estimar los potenciales riesgos económicos y de pérdidas humanas ante un fenómeno de inundación además de encontrar evidencias de la importancia que tienen las medidas no estructurales para reducir los potenciales riesgos derivados de un fenómeno de inundación.

Abstract

The purpose of this investigation is to provide tools in order to help the protection of people, is the reason why a handy and useful methodology for risk assessment caused by flooding events is provide by this document. This methodology is given by some reachable software for the authorities who are the responsible to save people's life in Morelia city and all county, some of these softwares are: Qgis, HEC-RAS, ArcGIS and FloodRisk Plugin. It's important to say that these softwares help to do this kind of project something efficient in time in order to prevent disasters due to flooding events. Making this investigation we achieved many important points such as: to define flooding events vulnerable areas, to make an analysis of risk assessment and find out several evidence about the importance of use non-structural actions in order to reduce potential risk caused by flooding events.

Palabras clave

Riesgos, Vulnerabilidad, Pérdidas, Amenaza, FloodRisk

Agradecimientos

Hasta la más difícil travesía será más fácil si te haces acompañar de las personas indicadas, es por ello que agradezco a quienes me brindaron su apoyo, amistad, comprensión y afecto durante estos 5 años de formación universitaria que dieron entre todos sus frutos este trabajo. Y desde luego a quienes estuvieron presentes durante la realización de esta tesis, gracias a aquellos que decidieron compartir parte de su valioso conocimiento y tiempo para realizar aportes a esta.

Agradezco a mis padres **Leticia Navarro y Richard Torres** por darme el gran regalo que es la educación y a pesar de que las cosas a veces no fueran bien, no dudaron un segundo en darme una formación universitaria y desde niño inculcar en mí la idea de ser un profesional, no hay regalo más valioso. Gracias por ser mi apoyo incondicional, por su tolerancia, por los sacrificios que han hecho para que yo lograra esto, por soportar noches en las que quizás no durmieron a causa de mis desvelos de trabajo y desde luego por su amor incondicional. Sin ustedes no hubiera logrado lo que soy ahora, y es por ello que estoy infinitamente agradecido, ¡Gracias Mamá! ¡Gracias Papá!

De igual manera agradezco a mi hermano **Mateo Torres** por sacarme siempre una sonrisa en mis momentos de estrés, por ser tolerante conmigo, por tu valioso apoyo y sobre todo recordarme que no hay problema que no tenga solución. Gracias Mateo por no dejar morir mi niño interior.

Gracias a mis asesores, **Dr. Constantino Domínguez Sánchez y Mtro. Israel Alejandro García Ledesma** por el valioso conocimiento que han aportado a esta tesis, por ser mis guías, por el valioso tiempo que me han brindado y ser pacientes conmigo. ¡Gracias!

A mis amigos y compañeros técnicos académicos, **Liz García, Arturo Albarrán y David Navarro** les agradezco por su gran apoyo incondicional, por brindarme su valiosa amistad y mostrarme que las cosas siempre son mejor cuando se está acompañado. Les agradezco todo lo que he aprendido de ustedes desde como trabajar en equipo hasta abrirme a conocer nuevas personas.

Agradezco a la **Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe** por invitarme a formar parte del Departamento de Hidráulica, por sus atinados consejos y su apoyo para mi desarrollo profesional. Sin usted esta tesis no existiría

Gracias a mis amigos de preparatoria, **Gabriela, Fernanda, Alan, Brayan, Carlos, Eduardo, Naomi, Denise, Rodrigo, Omar, Benito, Ruth, Karla, Carlos Macías**, por estar siempre, creer en mí y mostrarme que la verdadera amistad no conoce tiempo ni espacio. ¡Aprecio bastante su amistad!

Contenido

1.	Introducción	11
1.1.	Planteamiento del problema	12
1.2.	Zona de estudio.....	14
1.3.	Objetivos	16
2.	Marco de referencia.....	17
2.1.	Vulnerabilidad	17
2.2.	Amenaza.....	18
2.3.	Riesgo	20
2.4.	Medidas para reducir los riesgos por inundación	21
2.4.1.	Medidas estructurales.....	22
2.4.2.	Medidas no estructurales.....	24
3.	Metodología	29
3.1.	Estudio Hidrológico	29
3.2.	Modelo de inundación	45
3.2.1.	Comparación de modelos unidireccionales y bidireccionales	45
3.2.2.	Datos de ingreso.....	51
3.2.3.	Modelación.....	54
3.3.	Estimación de riesgos.....	58
3.3.1.	Estimación de pérdidas económicas	58
3.3.2.	Estimación de pérdidas humanas	64
3.3.3.	Modelación en FloodRisk Plugin	68
4.	Resultados	74
5.	Conclusiones.....	81
6.	Anexos	84
6.1.	Anexo 1.....	85
6.2.	Anexo 2.....	94
6.3.	Anexo 3.....	106
6.3.1.	Tr 2 años	107
6.3.2.	Tr 5 años	115
6.3.3.	Tr 10 años	123
6.3.4.	Tr 25 años	131

6.3.5.	Tr 50 años	139
6.3.6.	Tr 200 años	147
6.3.7.	Tr 500 años	155
6.3.8.	Tr 1000 años	163
6.3.9.	Tr 5000 años	171
6.3.10.	Tr 10000 años	179
7.	Bibliografía	187

Índice de figuras

Figura 1 Vehículos arrastrados por la corriente provocada por el fenómeno de 10/07/18	12
Figura 2 Población siendo resguardada debido al fenómeno de inundación presentado el 9/07/20	13
Figura 3 Localización del estado de Michoacán de Ocampo en la República Mexicana	14
Figura 4 Localización del municipio de Morelia en el estado de Michoacán de Ocampo.....	14
Figura 5 Ubicación de la zona de estudio (resaltada en verde olivo) al sur oeste de la ciudad de Morelia.....	15
Figura 6 Zona de estudio indicando las zonas habitadas alrededor del cauce del dren Arroyo de Tierras	16
Figura 7 Diagrama que muestra los principales componentes de un desastre natural.....	21
Figura 8 Componentes del riesgo según Escuder Bueno donde el riesgo, así como se represente en términos de “amenaza y vulnerabilidad”, se puede presentar en términos de “probabilidad y consecuencias”	21
Figura 9 Las presas son estructuras de retención de alta funcionabilidad a la hora de evitar fenómenos de inundación pues ayudan a controlar los caudales excedentes	23
Figura 10 Ejemplos de diques y muros de contención para proteger zonas aledañas a cauces de un fenómeno excedente.....	23
Figura 11 Túnel Emisor Oriente es un ejemplo de un sistema de drenaje para evitar inundaciones in situ.....	23
Figura 12 Distintas medidas estructurales para la mitigación de riesgos por inundación, tabla extraída de la edición 49 de los Cuadernos de investigación publicados por el CENAPRED	24
Figura 13 Una predicción temprana de una inundación es pieza clave para evitar pérdidas humanas.....	26
Figura 14 En el sitio web del H. Cuerpo de bomberos de la CDMX se puede apreciar la campaña de prevención contra inundaciones.....	26
Figura 15 La red de alertas sísmicas de la CDMX son importantes para resguardar a la población cuando se ha producido un sismo minutos antes de que lleguen las ondas a la ciudad.....	27
Figura 16 El Ejército Mexicano aplicando medidas de evacuación para salvaguardar a la población afectada por un fenómeno de inundación.	27
Figura 17 Cuenca del dren Arroyo de Tierras y su cauce principal el cual corresponde al mismo Arroyo.	30
Figura 18 Perfil longitudinal del dren Arroyo de Tierras extraído del MDE a través de software de Sistemas de Información Geográfica	31
Figura 19 Estaciones climatológicas elegidas para la realización del estudio Hidrológico	33
Figura 20 Distribución de las precipitaciones entre estaciones para realizar el llenado de datos faltantes	36
Figura 21 Análisis estadístico de Funciones de Probabilidad para una distribución normal realizado en HidroEsta © para el cálculo de gastos	37
Figura 22 Mapa de escurrimiento correspondiente al parámetro N.....	38
Figura 23 Mapa de escurrimiento correspondiente al parámetro K	39
Figura 24 Hietograma de precipitaciones para un Tr 10 años	43
Figura 25 Resumen de resultados arrojado por el software HEC HMS © para un Tr 10 años.....	43

Figura 26 Hidrograma de salida graficado por HEC-HMS © para un Tr de 10 años	43
Figura 27 Sección transversal tipo para análisis unidireccionales en HEC-RAS ©.....	46
Figura 28 Trazo de secciones transversales para análisis unidireccionales en el software HEC-RAS	46
Figura 29 Relieve correspondiente a la zona de estudio ingresado al software HEC-RAS, cotas en msnm	51
Figura 30 Coeficientes de rugosidad propuestos en la zona de estudio para la simulación de la inundación.	52
Figura 31 Hidrograma para un Tr de 100 años	53
Figura 32 Ingreso del relieve topográfico de la zona mediante el uso de un archivo en formato RASTER al HEC-RAS ©.....	54
Figura 33 Ingreso de los coeficientes de rugosidad de la zona de estudio al software HEC-RAS © mediante el uso de un archivo tipo SHAPE.....	55
Figura 34 Malla creada en el software HEC-RAS © con una definición de 7x7 metros	55
Figura 35 Ingreso de los hidrogramas al HEC-RAS © mediante el menú para flujo no permanente	56
Figura 36 Pantalla de progreso del modelado en HEC-RAS ©mostrando que la simulación fue exitosa.....	56
Figura 37 Mapa de profundidad de la inundación y mapa de las velocidades alcanzadas por esta para un Tr 100 años	57
Figura 38 Clasificación del uso de suelo propuesta según la metodología propuesta por Albano R.	59
Figura 39 Clasificación del tipo de infraestructura vial de la zona según la metodología propuesta por Albano R.	60
Figura 40 Curva tirante-daño para clasificación “Industrial” coincidiendo la curva para el contenido y la estructura	61
Figura 41 Curva tirante-daño para la clasificación “Tejido Urbano Continuo” coincidiendo la curva para el contenido y la estructura.	61
Figura 42 Curva tirante-daño para la clasificación “Agrícola-Seminatural” coincidiendo nuevamente las dos curvas	62
Figura 43 Curva tirante-daño para la clasificación “Caminos de alta velocidad y terrenos aledaños” coincidiendo nuevamente las dos curvas	62
Figura 44 Curva tirante-daño para la clasificación “Otros caminos y terrenos aledaños” coincidiendo nuevamente las dos curvas	63
Figura 45 Mapa que representa la densidad poblacional de la zona donde un punto equivale a 30 habitantes	64
Figura 46 Tiempo de aviso o alerta para la zona de estudio en formato SHAPE.....	69
Figura 47 Mapa que establece las pérdidas económicas para el contenido de la zona Tr 100 años	75
Figura 48 Mapa que establece las pérdidas económicas para las estructuras de la zona Tr 100 años	75
Figura 49 Mapa que contiene el porcentaje de daños en los contenidos de la zona Tr 100 años	76
Figura 50 Mapa que contiene el porcentaje de daños en las estructuras de la zona Tr 100 años	76
Figura 51 Densidad de pérdidas humanas en la zona de estudio Tr 100 años.....	77

Figura 52 Densidad de población en riesgo en la zona de estudio Tr 100 años	77
Figura 53 Histograma de pérdidas económicas por uso de suelo en la zona de estudio para un Tr 100 años	78
Figura 54 Histograma de consecuencias para la población para la categoría C3 y un Tr 100 años	79
Figura 55 Histograma de consecuencias para la población para la categoría C7 y un Tr 100 años	80
Figura 56 Histograma de consecuencias para la población para la categoría C5 y un Tr 100 años	80
Figura 57 Comparación entre las pérdidas de vida para cada gasto asociado a un periodo de retorno y la diferencia existente entre cada tasa de mortalidad.	81
Figura 58 Comparativa entre pérdidas económicas asociadas a las estructuras y al contenido...	82
Figura 59 Pérdidas económicas asociadas a cada gasto correspondiente a un periodo de retorno	82
Figura 60 Histograma de pérdidas económicas en estructuras y su contenido de acuerdo al uso de suelo	83

Índice de tablas

Tabla 1 Algunas características geomorfológicas de la cuenca perteneciente al dren Arroyo de Tierras	29
Tabla 2 Velocidades promedio en función de la pendiente principal del cauce según Aparicio	31
Tabla 3 Rango de número de secuencias para registro homogéneo según Campos Aranda en su libro “Procesos del ciclo hidrológico”	34
Tabla 4 Resumen del análisis estadístico de FDP donde se puede observar que el mejor ajuste lo tuvo la función Log Gumbel	37
Tabla 5 Expresiones propuestas por la NOM-011-CONAGUA-2015 para el cálculo del coeficiente de escurrimiento.....	40
Tabla 6 Resumen de gastos picos asociados a diversos periodos de retorno calculados mediante el método racional.....	41
Tabla 7 Calculo del hietograma de precipitaciones para un Tr 10 años	42
Tabla 8 Datos tabulares del hidrograma para un Tr 10años	44
Tabla 9 Comparación de gastos pico calculados con el método racional y el software HEC-HMS ©	44
Tabla 10 Datos del Hidrograma asociado a un Tr de 100 años	53
Tabla 11 Coste de referencia de acuerdo al tipo de suelo basado en datos catastrales del Gobierno de Michoacán	60
Tabla 12 Descripción de las categorías propuestas por el método SUFRI para la caracterización de l a tasa de mortalidad propia de la zona de estudio	66
Tabla 13 Valores de tiempo de aviso y severidad para cada una de las categorías mencionadas anteriormente	67
Tabla 14 Pérdidas económicas por uso de suelo en la zona de estudio para un Tr 100 años	78
Tabla 15 Datos correspondientes a la población en riesgo y pérdida de vidas considerando residentes temporales y residentes además para las categorías C3, C5, C7.	79

1. Introducción

Para que un desastre natural se produzca, siempre estarán presentes tres constantes: **Vulnerabilidad, riesgo y amenaza**, siempre que estas se combinen se producirá el desastre. Cuando existe la posibilidad de que un suceso exceda un nivel de ocurrencia con una cierta intensidad y durante un tiempo de exposición se dice que existe una **amenaza**, en otras palabras, es el peligro latente al cual un sistema se encuentra expuesto. Por otro lado, la **vulnerabilidad** será la factibilidad de que un sujeto o sistema expuesto sea afectado por un fenómeno que caracteriza la amenaza, al decir que un sistema sea expuesto hace alusión a la susceptibilidad física, económica, política o social de un sistema de sufrir daños. Finalmente, el **riesgo** será el potencial de pérdidas que puede ocurrirle al sistema expuesto resultado de la combinación de los otros dos factores. (Cardona 2001)

Todo esto se abordará en los distintos capítulos que conforman esta tesis, en el **marco de referencia** se abordará toda la teoría que respalda a esta tesis, explicando los conceptos de **vulnerabilidad, amenaza, riesgo** pasando por las medidas que pueden ayudar a mitigar los riesgos por inundación como **medidas estructurales y no estructurales**. En el capítulo referente a la **metodología** corresponderá a todos aquellos procesos que se llevaron a cabo para la realización de esta tesis como lo fueron el **estudio hidrológico**, los **modelos de inundación**, así como la **estimación de riesgos**. En el capítulo de **resultados** se mostrarán los mapas correspondientes a los riesgos potenciales, así como los números que hablan de estos y finalmente en capítulo que aborda las **conclusiones** se realizará un análisis de los resultados realizando comparativas que ayuden a entender de manera clara la importancia de realizar un estudio de este tipo.

1.1. Planteamiento del problema

La determinación del riesgo por inundación se ha convertido en una práctica cada vez más recurrente, ya que debido a factores políticos, socioeconómicos y poblacionales es cada vez más frecuente el establecimiento irregular de población en predios que no cumplen con fines de urbanización

En la ciudad de Morelia año con año se presentan fenómenos naturales que exceden la capacidad del sistema de drenes pluviales con los que cuenta la zona metropolitana provocando que decenas de colonias se encuentren bajo **amenaza** cada vez que se presentan este tipo de fenómenos. Un ejemplo de ello la tromba que dio a lugar la madrugada del 10 de Julio de 2018 en la que afectó a una decena de colonias ubicadas al noroeste de la ciudad a faldas del Quinceo, provocando el arrastre de material pétreo, lodo, vehículos incluso maquinaria pesada, provocando así la declaratoria de estado de emergencia por parte de las autoridades.



Figura 1 Vehículos arrastrados por la corriente provocada por el fenómeno de 10/07/18

Otro fenómeno de este tipo suscito el 9 de Julio de 2020 dónde una intensa tormenta que azotó la capital del estado provocó el desbordamiento del dren Arroyo de Tierras afectando al menos 4 colonias y provocando gran cantidad de pérdidas económicas según el diario **“La Voz de Michoacán”**. La problemática generada por este dren será objeto de estudio para el trabajo a continuación presentado pues al atravesar gran parte de la ciudad presenta una amenaza importante para una decena de asentamientos que se encuentran al margen de este dren. Además de presentar un importante potencial de pérdidas económicas pues amenaza a una importante zona comercial de la ciudad y sin olvidar el gran número de habitantes que de igual manera se encuentra bajo amenaza de un fenómeno que exceda la capacidad de este dren.



Figura 2 Población siendo resguardada debido al fenómeno de inundación presentado el 9/07/20

Como se mencionó anteriormente debido al importante potencial de pérdidas humanas, así como de pérdidas económica de las colonias aledañas al Dren Arroyo de Tierras es necesario hacer una estimación cuantitativa de lo que pueden representar estos potenciales pues esto será de gran ayuda al momento de idealizar planes y estrategias lo suficientemente eficientes para reducir la posibilidad o bien el número de pérdidas después de un fenómeno de inundación. Además de que los planes cumplan una buena relación costo-beneficio.

Hacer que la cuantificación de riesgos potenciales inundación y la caracterización de zonas vulnerables sea una práctica común en la disciplina de la protección civil debe ser una prioridad, pues se debe dar certidumbre a la población cuando esta se encuentre vulnerable ante un fenómeno de este tipo pues no podemos estar dejando la vida de los habitantes a la suerte, esperando que no se presenten pérdidas potencial cuando se puede actuar y evitar que sucedan en gran parte pérdidas tanto de vidas como pérdidas del patrimonio de los habitantes es por ello que el esperar no sirve en lo absoluto cuando se trata de un desastre natural.

Por ello esta investigación pretende abrir el panorama en los encargados de la toma de decisiones para que así sean conscientes de que buena parte de las consecuencias que deja un fenómeno de inundación se pueden evitar y no sólo dándole peso a la elaboración de obras de mitigación, sino que la formación a la población, los planes y estrategias ante contingencias y además la coordinación entre autoridades son de suma importancia para disminuir riesgos por inundación. Al final de cuentas una obra de mitigación estructural siempre requerirá medidas no estructurales.

Por otro lado, este tipo de análisis son de suma ayuda a la hora de realizar estudios costo-beneficio cuando se trata de medidas estructurales y no estructurales pues ayudan a dar una mayor certidumbre y sobre todo justificar la realización de manera presupuestal la realización de estas. Y se puede mencionar aún más ventajas de este tipo de estudios, sin embargo, estas son las más importantes.

Crear certidumbre es la base de todo este tipo de investigaciones.

1.2. Zona de estudio

Macro localización

El municipio de Morelia, se encuentra en el estado de Michoacán de Ocampo en la región centro-oeste de la República Mexicana. A su vez se encuentra en la región centro norte del estado colindando con los municipios de: **Quiroga, Tarímbaro, Charo, Tarímbaro, Acuitzio** entre otros.



Figura 3 Localización del estado de Michoacán de Ocampo en la República Mexicana



Figura 4 Localización del municipio de Morelia en el estado de Michoacán de Ocampo

Micro localización

La zona de estudio se encuentra en la zona sur de la ciudad de Morelia, que corresponde a las zonas aledañas al cauce del dren Arroyo de tierras, que corresponden a las colonias:

- Balcones de Morelia
- Los Fresnos
- Rincón Quieto
- Fracc. Real Universidad
- Carlos María Bustamante
- Pinar del Río
- Jardines de Torremolinos
- Hermenegildo Galeana
- Rector Hidalgo
- Agustín Arriaga Rivera

El dren arroyo de tierras nace al sur de la ciudad en la “Loma del venado” teniendo un recorrido de sur a noroeste uniéndose al Río Grande como destino final.

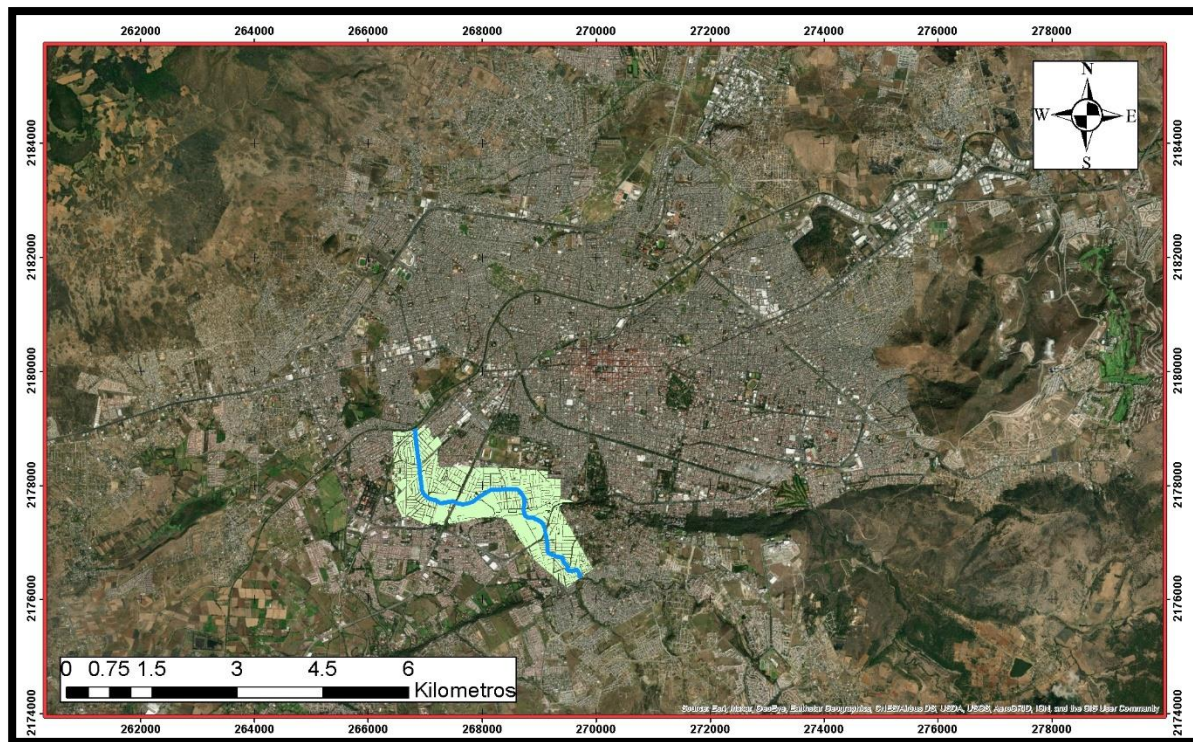


Figura 5 Ubicación de la zona de estudio (resaltada en verde olivo) al sur oeste de la ciudad de Morelia



Figura 6 Zona de estudio indicando las zonas habitadas alrededor del cauce del dren Arroyo de Tierras

1.3. Objetivos

1. Cuantificar las pérdidas potenciales; económicas y humanas de la zona buscando la mayor optimización en los procesos para lograr procedimiento sencillo y con tiempos de cálculo cortos haciendo uso del software Floodrisk Plugin para Qgis.
2. Caracterizar las zonas más vulnerables al riesgo por inundación mediante el uso del software Floodrisk Plugin para Qgis.
3. Analizar el alcance de medidas no estructurales a la hora de reducir el riesgo en la zona de estudio además de analizar qué tipo de acciones componen estas este tipo de medidas.
4. Caracterizar las zonas en las que se concentren las consecuencias del fenómeno de inundación.
5. Sentar las bases para que este tipo de estudios se realicen de manera más frecuente dado la importancia a la hora de proponer planes y estrategias para hacer frente a este tipo de fenómenos.

2. Marco de referencia

Dado que la naturaleza de esta investigación es la cuantificación de pérdidas económicas, así como como humanas, abundaremos más en dos conceptos que están intrínsecamente relacionados con esto, con fin de comprender los principales factores que originan este tipo de pérdidas.

A partir de ahora los conceptos de: **Amenaza, vulnerabilidad y riesgo**, tendrán un mayor significado en esta investigación por lo que serán explicados a continuación haciendo referencia a trabajos de distintos autores.

2.1. Vulnerabilidad

Primeramente, tendremos que entender que para que se genere un desastre natural será necesaria la intervención de los tres elementos mencionados anteriormente: **Amenaza, vulnerabilidad y riesgo**. Los términos de amenaza y vulnerabilidad siempre irán de la mano pues de uno depende la existencia de otro, para entender esta correlación les daremos un significado.

En infinitas ocasiones hemos escuchado hablar del término **“Vulnerabilidad”** ya sea en un contexto social, de salud pública etc. Es un término, muy popular en nuestro lenguaje cotidiano, sin embargo, este no es entendido del todo o bien existen mal interpretaciones de este. Pues bien, para evitar este tipo de problemas apelaremos a distintas interpretaciones enunciadas en seguida.

Vulnerabilidad según el Centro Nacional de Prevención de Desastres:

*“Factor de riesgo interno de un elemento o grupo de elementos expuestos a una amenaza. Corresponde a la predisposición o susceptibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que se manifieste un **fenómeno peligroso de origen natural, socio natural o antropogénico**. Representa también las condiciones que imposibilitan o dificultan la recuperación autónoma posterior. Las diferencias de vulnerabilidad del contexto social y material expuesto ante un fenómeno peligroso determinan el carácter selectivo de la severidad de sus efectos. Sistema de condiciones y procesos resultantes de factores físicos, sociales, económicos y medioambientales que aumentan la susceptibilidad de una comunidad al impacto de los peligros.”*

Vulnerabilidad según (Escuder Bueno, 2013):

*“...la vulnerabilidad puede definirse como las condiciones, determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y medioambientales, que caracterizan la susceptibilidad de una comunidad al **impacto de una amenaza**.”*

Vulnerabilidad según (Cardona, 2001):

*“La vulnerabilidad en otras palabras, es la predisposición o susceptibilidad física, económica, política o social que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir daños en caso de un **fenómeno desestabilizador** de origen natural o antrópico se manifieste.”*

Y por último para la UNDRO la vulnerabilidad está definida de la siguiente manera:

*“Es el grado de pérdida de un elemento o grupo s de elementos bajo riesgo resultado de la probable **ocurrencia de un suceso desastroso**, expresada en una escala desde 0 o sin daño a 1 o pérdida total.”*

Si se presta atención es posible encontrar un común denominador en cada una de estas definiciones, un punto en común en la visión de cada autor, este punto en común corresponde a la amenaza. Pues en cada uno de ellos coincide en que un elemento o sistema será vulnerable en cierto grado siempre que se presente un evento o mejor dicho la probabilidad de que un evento exceda un nivel de excedencia convirtiéndose en una amenaza.

También se puede deducir que la vulnerabilidad tiene un carácter socioeconómico y esto se puede comprobar en el día a día de nuestra sociedad pues en las zonas urbanas cada vez son más comunes los asentamientos humanos en zonas no aptas para urbanización, estas acciones son impulsadas por la decadencia económica, mala planeación en el crecimiento de las grandes urbes, sobrepoblación entre otras, lamentablemente dado que la población que asienta en estos sitios son incapaces de estabilizarse ante la amenaza de un suceso que presente un nivel de excedencia, los convierte en sujetos realmente vulnerables. Según el Programa Municipal de Desarrollo Urbano de la ciudad de Morelia, se han establecido cerca de 200 asentamientos urbanos irregulares que corresponden a cerca de 2,617.37 hectáreas de los cuales 3 se encuentran en zonas de riesgo, sin desechar la probabilidad de que existan más asentamientos ubicados en zonas de riesgo.

Ya que sabemos a qué nos referimos con el término vulnerabilidad será necesario plantearnos la siguiente pregunta: **¿Por qué estudiar la vulnerabilidad?** Esto se puede responder de una sencilla manera, dado que los fenómenos naturales son hechos inevitables no existe método para reducir pérdidas más que ayudando a una población a reducir que tan vulnerables son, pues los hará capaces de recuperarse con más facilidad de un evento excedente, por esta sencilla razón es de suma importancia mejorar las condiciones socioeconómicas de la población y desde luego reforzar la cultura de la prevención.

2.2. Amenaza

En la sección anterior logramos vislumbrar un poco acerca de lo que es o significa una **amenaza** el objetivo de este subtítulo será definir de una manera más precisa este elemento componente de un desastre natural. Al igual como se hizo con la definición de vulnerabilidad apelaremos a varias definiciones de distintos autores esto con objeto de dar ser más entendible al público que lea este trabajo.

Según el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) el término amenaza se define cómo:

*“Peligro latente que representa la probable **manifestación de un fenómeno físico** de origen natural, socio-natural o antropogénico, que se anticipa puede producir efectos adversos en las personas, la producción, la infraestructura y los bienes y servicios. Es un factor de riesgo físico externo a un elemento o grupo de elementos sociales expuestos, que se expresa como la probabilidad de que un fenómeno se presente con una cierta **intensidad**, en un **sitio específico** y dentro de un periodo de **tiempo** definido.”*

Para (Escuder Bueno, 2013) la amenaza es:

*“... la amenaza representa un **evento físico, fenómeno o actividad humana** potencialmente dañina ya que puede causar pérdida de vidas, heridos, daños a la propiedad, trastornos sociales y económicos, o degradación medioambiental. La amenaza se asocia generalmente al riesgo individual, que puede entenderse como la probabilidad de que la persona más expuesta fallezca por causa de dicha amenaza.”*

Amenaza según (Cardona, 2001):

*“En general, hoy se acepta que el concepto de amenaza se refiere a un **peligro latente o factor de riesgo externo** de un sistema o de un sujeto expuesto, que se puede expresar en forma matemática como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un suceso con una cierta intensidad en un sitio específico y durante un tiempo de exposición determinado.”*

La UNDRO definió el término amenaza cómo:

*“Es la probabilidad de ocurrencia de un **suceso potencialmente desastrosos** durante cierto periodo de tiempo en un sitio dado.”*

Como se puede observar el término amenaza está relacionado con el **fenómeno físico** o un **evento** que es común se presente sin embargo este excede o sobrepasa una cierta normalidad con la que se presenta usualmente o sea excede un nivel de ocurrencia ya que se presentan condiciones extremas para las cuales que no está preparada la infraestructura de un sitio. Un factor de gran influencia en el momento de presentarse una amenaza será el tiempo ya que de él dependerá la cantidad de pérdidas que pueda tener un sistema ya que del tiempo dependerá la eficacia de los planes de respuesta ante contingencias o fenómenos naturales

Como se mencionó anteriormente los conceptos de vulnerabilidad y amenaza van de la mano ya que al hablar de un sistema vulnerable no podríamos darle esa etiqueta si no existiera una amenaza, una amenaza por la cual ese sistema es vulnerable. De igual manera cuando hablamos de una posible amenaza, no podría considerarse amenaza si no existiera un sistema al que se dirija tal evento y por tanto no habría objeto que sea vulnerable a tal amenaza. Es por ello que, aunque pensemos que se definen por separado realmente en su esencia, en lo que las define se encuentra implícita una y otra.

2.3.Riesgo

Ya se han definido dos de las tres componentes que forman un desastre natural, ahora le daremos forma a este término tan sonado cada vez que se genera un desastre natural: **el riesgo**.

Para el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) el riesgo es:

“La probabilidad de que, durante un periodo específico de tiempo, se produzcan alteraciones graves del funcionamiento normal de una comunidad o una sociedad debido a los fenómenos físicos peligrosos que interactúan con condiciones sociales vulnerables, dando lugar a efectos humanos, materiales y económicos o ambientales adversos generalizados que requieren de una respuesta inmediata a la emergencia para satisfacer las necesidades humanas esenciales, y que pueden requerir apoyo externo para la recuperación.”

Para (Escuder Bueno, 2013) el riesgo es:

*“... se define riesgo como la combinación de una probabilidad de presentación de un determinado evento (también denominado **amenaza**), y las **potenciales consecuencias** adversas que tendría este evento para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural o las actividades económicas (estas consecuencias también suelen denominarse **vulnerabilidad**).”*

Según (Cardona, 2001):

*“De esta manera, el riesgo corresponde al **potencial de pérdidas** que pueden ocurrirle al sujeto o sistema expuesto, resultado de la **convolución de la amenaza y la vulnerabilidad**. Así, el riesgo puede expresarse en forma matemática como la probabilidad de exceder un nivel de consecuencias económicas, sociales o ambientales en un cierto sitio y durante un cierto periodo de tiempo.”*

Riesgo (o bien *Riesgo total*) para la UNDRO:

*“Se define como el **número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica** debido a la ocurrencia de un desastre...”*

Básicamente podemos decir que cuando hablamos de riesgo, nos referimos al producto de la actuación combinada de la amenaza y la vulnerabilidad, en este caso es producto será el número de pérdidas tanto humanas, económicas y ambientales. Y como se mencionó anteriormente para reducir el riesgo la única manera será reduciendo la vulnerabilidad de un sistema.



Figura 7 Diagrama que muestra los principales componentes de un desastre natural

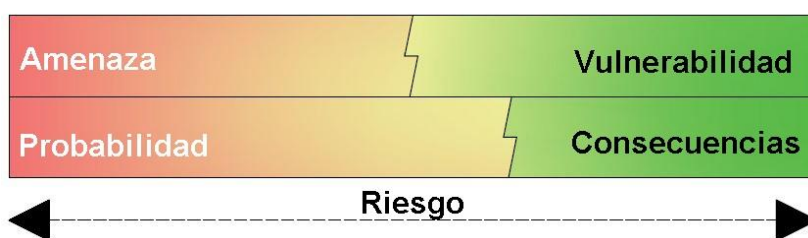


Figura 8 Componentes del riesgo según Escuder Bueno donde el riesgo, así como se represente en términos de “amenaza y vulnerabilidad”, se puede presentar en términos de “probabilidad y consecuencias”

¿Hacia a dónde vamos?

Bien el objeto de este trabajo será la estimación de **riesgo por inundación**, por lo que se obtendrá las pérdidas potenciales económicas y humanas debido al desbordamiento del dren Arroyo de tierras. En nuestro caso particular el desbordamiento de este dren corresponde a la **amenaza** y la población que vive alrededor de su cauce corresponde a nuestro sistema **vulnerable**. Pero más allá de la estimación del riesgo, ensayaremos cómo es que las medidas de reducción del riesgo pueden ayudar a disminuir la vulnerabilidad del sistema. Para ello detallaremos un poco acerca de las medidas de reducción.

2.4. Medidas para reducir los riesgos por inundación

Tendremos que entender primeramente que para reducir los riesgos por inundación se podrán aplicar dos tipos de medidas que se agrupan en **medidas estructurales** y **medidas no estructurales**, las cuales definiremos en los siguientes párrafos.

Según el Boletín Oficial del Estado del gobierno español en su Real Decreto 903/2010 define **medida estructural** como:

“Toda medida consistente en la realización de obras de infraestructura que actúan sobre los mecanismos de generación, acción y propagación de las avenidas alterando sus características hidrológicas o hidráulicas, así como el oleaje, de las mareas o de la erosión en las zonas costeras.”

Mientras que el CENAPRED define a las medidas estructurales como:

“están constituidas por cualquier obra de infraestructura hidráulica que ayude a controlar inundaciones. Este objetivo se puede lograr de dos maneras: mantener el agua dentro del cauce del río, o bien, evitar que el agua que ha salido de los cauces alcance poblaciones o zonas de gran interés.”

Podemos apreciar que cuando hablamos de medidas estructurales, nos referimos a mecanismo físicos que sirven de barrera para evitar el impacto que pueda tener un evento de excedencia. Por otro lado, el Real Decreto 903/2010 también explica lo que es una medida no estructural y explica:

“aquella que, sin actuar sobre la avenida en sí, o sobre la acción del mar, modifica la susceptibilidad de la zona inundable frente a los daños inundación.”

De igual manera el CENAPRED aporta a definir las medidas no estructurales de la siguiente manera:

“Este tipo de medidas no se basa en la construcción de estructuras físicas sino en la planeación, organización, coordinación y ejecución de una serie de ejercicios de Protección Civil que busca evitar o disminuir los daños causados por las inundaciones...”

Por tanto, estaremos hablando de medidas que no implican barreras o mecanismos físicos sobre una avenida y estas dependerán del factor humano, pues la colaboración de la población, así como el actuar de las autoridades ayudará a disminuir la vulnerabilidad del sistema. A pesar de esto tanto medidas estructurales y no estructurales no eliminarán por completo el riesgo ya que, en el caso de las medidas estructurales, su utilidad dependerá de un *evento de diseño* del cual siempre habrá probabilidad de presentarse eventos de mayor magnitud que dejarán un *riesgo residual* el cual podrá ser eliminado mediante la aplicación de medidas no estructurales, sin embargo, no siempre serán capaces de hacerlo.

2.4.1. Medidas estructurales

Uno de los objetivos de este trabajo será demostrar la eficacia de las medidas no estructurales por lo que analizaremos de manera breve este tipo de medidas. Este tipo de medidas, según (Escuder Bueno, 2013) Este tipo de medidas pueden clasificarse en cuatro grandes grupos, estos grupos son los siguientes:

- **Estructuras de retención:** Este tipo de estructuras serán las que son capaces de retener el agua para evitar inundaciones asociadas a avenidas mediante la *laminación* de avenidas lo cual significa “romper el pico” de una avenida reduciendo el caudal de descarga y aumentando el tiempo. Un ejemplo de este tipo de obras son las presas “rompe picos”.



Figura 9 Las presas son estructuras de retención de alta funcionalidad a la hora de evitar fenómenos de inundación pues ayudan a controlar los caudales excedentes

- **Estructuras de protección:** Este tipo de estructuras protegerán de manera directa evitando el ingreso del agua a una localidad o población y están comprendidas por **muros** y **diques**.



Figura 10 Ejemplos de diques y muros de contención para proteger zonas aledañas a cauces de un fenómeno excedente

- **Sistemas de drenaje:** Estas medidas serán utilizadas para la gestión de escorrentía o sea que drenarán el agua que se pueda almacenar en calles y avenidas a causa de la precipitación (inundación in situ).

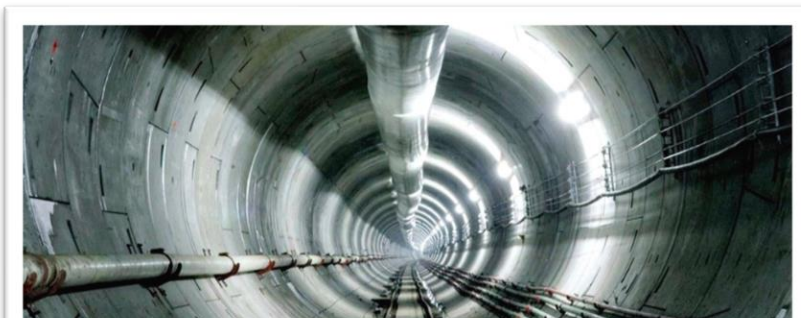


Figura 11 Túnel Emisor Oriente es un ejemplo de un sistema de drenaje para evitar inundaciones in situ.

- **Modificación de las características de cauces fluviales:** Estos tipos de medidas comprenderán la modificación de características importantes de un cauce que aumenten la capacidad de drenar el volumen de descarga de una avenida y comprenden obras como:
 - **Modificación de las características de la cuenca**
 - **Desvíos y nuevos cauces**
 - **Encauzamientos**
 - **Cambios de rugosidad**
 - **Ensanchamiento de la sección**

Dado que existe la probabilidad de que se presenten eventos mayores a los de diseño de este tipo de medidas se genera un **riesgo incremental** que está asociado a la falla de la estructura creando la probabilidad de que se produzcan consecuencias incluso mayores a las asociadas al fallo de la estructura.

Ahora bien, para el Centro Nacional de Prevención de Desastres Naturales existen 3 clasificaciones de este tipo de medidas: *Obras de regulación*, *Obras de rectificación* y *Obras de protección*.

- **Obras de regulación:** Qué se refiere a obras que interceptan directamente el agua de lluvia o que escurre por los cauces para almacenarla en un área seleccionada.
- **Obras de rectificación:** Facilitan la conducción rápida del agua por su cauce, principalmente dragando los ríos para conservar o aumentar su capacidad.⁸
- **Obras de protección:** Son aquellas que confinan el agua dentro del cauce del río para evitar que la inundación alcance poblaciones o zonas de importancia.

En resumen, los obras que constituyen cada una de las categorías son las siguientes:

Figura 12 Distintas medidas estructurales para la mitigación de riesgos por inundación, tabla extraída de la edición 49 de los Cuadernos de investigación publicados por el CENAPRED

Obras de regulación	Obras de rectificación	Obras de protección
- Presas de almacenamiento	- Canalización del cauce	- Bordos longitudinales
- Presas rompe-picos	- Entubamiento del cauce	- Bordos perimetrales
- Presas para retener azolves	- Corte de meandros	- Muros de encauzamiento
- Desvío permanente	- Rectificación de la corriente	
- Desvío temporal		

2.4.2. Medidas no estructurales

Siguiendo la misma clasificación propuesta por (Escuder Bueno, 2013) existen 6 distintos tipos de medidas estructurales, las cuales abordaremos desde el punto de visto del autor.

- **Políticas y planeamiento urbano:** Debido a la frecuencia cada vez mayor de fenómenos climatológicos excedentes en zonas urbanas se han implementado medidas estructurales que han propiciado al origen de zonas potencialmente inundables sin embargo por motivos socioeconómicos así como una mala planeación urbana han provocado el establecimiento de comunidades en estas zonas lo que da origen a un sistema vulnerable, amenazado por un evento de inundación que crea riesgos potenciales lo que se traduce en pérdidas tanto económicas como humanas.

Por esto es necesario que las autoridades establezcan un planeamiento urbano adecuado y eficiente que evite los asentamientos en zonas no aptas para urbanización. Siendo necesaria una normativa que regule usos de suelo y tipos de edificaciones, esto a fin de caracterizar y ubicar con facilidad zonas que sean aptas para establecer asentamientos. Otro punto importante será que las autoridades competentes establezcan periodos de retorno para el diseño de medidas estructurales, así como la redirección de flujos a zonas que no afecten a la población.

Y por último el establecer políticas de prevención y formación a la población en materia de riesgos de inundación será de gran apoyo para reducir los riesgos ya que, en caso de presentarse un fenómeno de este tipo, el saber actuar de la población hará gran diferencia en la reducción de riesgos.

- **Predicción de inundaciones:** Otro elemento que forma parte de este tipo de medidas será la predicción de avenidas, pues indicará a la población vulnerable el tiempo y duración del caudal máximo que se desarrolle en la zona amenazada, para ello jugará el **tiempo de predicción** que es el tiempo desde que se prevé el fenómeno, hasta que este sucede y mientras mayor sea este habrá mayor efectividad en las medidas. Además de ayudar a acciones como la evacuación y reubicación de una población, ayudará al establecimiento de medidas estructurales temporales como presas rompepicos o bien barreras provisionales esto con fin de reducir los efectos aguas abajo.

Un ejemplo de esto suscitó el 21 de septiembre de 2021 en que, de acuerdo a información de Excelsior, varios estados como Querétaro, Hidalgo, San Luis Potosí, Estado de México así como Veracruz fueron alertados ante posibles inundaciones a raíz del desfogue de la presa Zimapán, los cuales fueron programados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) debido a las intensas lluvias que azotaron el centro del país por lo que se implementó la evacuación de las zonas ribereñas así como la colocación de diques por parte de las fuerzas armadas. Siendo posible la disminución del potencial de riesgo, ya que en este caso el tiempo de predicción fue el necesario para establecer medidas que ayudaran a la disminución del riesgo.



Figura 13 Una predicción temprana de una inundación es pieza clave para evitar pérdidas humanas

- Comunicación:** La comunicación entre autoridades y población según (Escuder Bueno, 2013) Se clasificará en dos tiempos o bien fases, estas son: **Comunicación general** y **Comunicación durante el evento de inundación**. Cuando hablamos de comunicación general estaremos refiriéndonos a la que se lleva cabo antes de que un fenómeno de este tipo suceda y que cuando suceda la población sepa cómo debe actuar. Ejemplo de esto puede ser la “*Campaña de prevención en temporada de lluvias*” de H. Cuerpo de Bomberos de la CDMX, en la que haciendo uso de medios digitales se indica a la población la manera de actuar ante una inundación, dicha campaña se realiza año con año al inicio de la temporada de lluvias.



Figura 14 En el sitio web del H. Cuerpo de bomberos de la CDMX se puede apreciar la campaña de prevención contra inundaciones

La comunicación durante el evento de inundación consistirá en los sistemas de alarma que alertarán a la población ante un inminente evento de inundación y deben emitirse desde que predice un evento de inundación o bien cuando se presente un fallo estructural de cualquier medida estructural. Estos sistemas de alerta podrán hacer uso de medios de comunicación tales como: radio, televisión, internet, llamadas telefónicas, mensajes de texto, así como el uso de redes sociales, podrá hacer uso de alarmas como altavoces, sirenas etc. Así como difusión persona a persona mediante el personal de protección civil, seguridad pública, cuerpos de emergencias entre otros. Un ejemplo de esto es la alerta sísmica de la CDMX, este tipo de comunicación hace uno de una alarma comprendida por una red de

altavoces que alertan cuando un evento sísmico sucedió y la posible afectación a la ciudad, propiciando la evacuación voluntaria de la población para reducir el potencial de riesgo que puede producir la amenaza en este caso un sismo.



Figura 15 La red de alertas sísmicas de la CDMX son importantes para resguardar a la población cuando se ha producido un sismo minutos antes de que lleguen las ondas a la ciudad

- **Movilización:** Cuando hablamos de movilización nos referiremos a la **evacuación** de la población y se clasificará según (Escuder Bueno, 2013) en tres distintos tipos: *Evacuación preventiva*, la cual se llevará a cabo antes del evento de inundación. La *Evacuación forzosa* que será durante el fenómeno de inundación y por último la *Huida* que se refiere al desplazamiento de la población afectada por los efectos de un evento inminente.



Figura 16 El Ejército Mexicano aplicando medidas de evacuación para salvaguardar a la población afectada por un fenómeno de inundación.

- **Coordinación y procedimiento de operación:** Este tipo de medida definirá los procedimientos a seguir durante la inundación, así como el papel de los sistemas de protección civil, seguridad pública y gobierno, con el fin de ayudar a que exista coordinación entre las distintas dependencias para tomar decisiones efectivas que ayuden a reducir los potenciales de riesgo generados por un fenómeno de inundación, evitando así la desorganización y las medidas contradictorias de distintos organismos.

Cabe mencionar que la correcta y efectiva coordinación entre autoridades ayudará a incrementar el tiempo de aviso para lograr así la movilización de la población y reducir el riesgo.

- **Seguros e indemnizaciones:** Cómo se mencionó anteriormente, una de las maneras en las que se puede definir a un sistema vulnerable será en base a la posibilidad de recuperarse con facilidad tras el paso de un fenómeno excedente, pues bien, los sistemas de seguros serán de gran importancia pues ayudarán a reducir las consecuencias directas e indirectas de manera notable cubriendo las pérdidas económicas. Por otro lado, las indemnizaciones cubrirán las pérdidas que no contemplen las aseguradoras y vendrán por parte de instancias gubernamentales o internacionales.

Para el CENAPRED este tipo de medidas están comprendidas en dos grandes grupos **medidas permanentes y medidas aplicables durante la contingencia** las cuales serán analizadas de manera breve en los siguientes párrafos:

- **Medidas permanentes:** El propósito de este tipo de medidas será que bienes con un elevado valor económico y social se ubiquen dentro de zonas sujetas a riesgo por inundación. Para este tipo de medidas será necesaria la delimitación de las zonas inundables para estimar los daños esperados en cada zona y además establecer una normativa para el uso de suelo que ayude a evitar asentamientos de alto riesgo de ser inundadas. El principal objetivo del uso de este tipo de medidas, será para prevenir a la población y a los organismos responsables de la ejecución de estas medidas para la prevención de desastres. Dado el bajo costo de este tipo de medidas estarán más al alcance de los países en desarrollo y su aplicación requerirán de una excelente coordinación entre población y organismos y entre los mismos organismos.
- **Medidas de operación:** Son aquellas que se aplican durante el transcurso de una contingencia y se apoyarán en modelos de pronósticos de avenidas que ayudarán a conocer la evolución de un fenómeno durante sus distintas fases de desarrollo.

Algunas de las acciones que comprenden este tipo de medidas son:

- Establecimiento y elaboración de programas, procedimientos y normas a seguir desde la detección de un fenómeno que pueda producir un desastre.
- Organización de acciones, personas y dependencias gubernamentales y privadas.
- Capacitación de la población que se encuentra amenazada para que sepan el actuar ante una situación de emergencia.
- Entrenamiento del personal encargado de las acciones durante la contingencia
- Correcta operación y conservación de la infraestructura.
- Evacuación de manera segura a la población vulnerable.
- Construcción, selección y operación de albergues y centros de primeros auxilios.
- Restauración en el menor tiempo posible de todos los servicios afectados por el fenómeno como: agua potable, drenaje y energía eléctrica.
- Evaluación de las medidas optadas para su retroalimentación.

3. Metodología

Para la estimación del potencial de riesgo asociado a las inundaciones provocadas por el desbordamiento del dren Arroyo de Tierras, se hizo uso del software Qgis que se utilizó para usar el plug de código libre denominado: *FloodRisk*, versión 1.0, la cual fue desarrollada por Raffaele Albano et al. Para el correcto funcionamiento de dicho software será necesario tener las características de la inundación como lo son: Extensión, distribución e intensidad de esta, esta información será superpuesta en la zona donde se ubica la población que se encuentra expuesta, así como sus propiedades esto con fin de calcular el potencial de riesgo generado por el evento de inundación.

Para la estimación del potencial de riesgo, hará uso de curvas tirante-daño las cuales describen la relación existente entre las pérdidas económicas, el tipo y uso de las diversas construcciones, así como las profundidades que presenta el evento. Para la estimación del potencial de pérdidas humanas Floodrisk utiliza varios factores denominados ***tasa de mortalidad***, de forma particular hace uso de factores como: la profundidad y velocidad del agua, el grado de preparación de la población ante un fenómeno de inundación; que considera la educación pública sobre el riesgo de inundación, existencia de sistemas de alerta, comunicación y coordinación entre las autoridades, la hora en que se presenta el fenómeno, así como tiempo de advertencia.

3.1. Estudio Hidrológico

Características geomorfológicas de la cuenca

El primer paso para la estimación de riesgos fue la simulación del modelo de inundación, para el cual se realizó el estudio hidrológico de la cuenca que da origen a este cauce. Las características geomorfológicas de la cuenca se presentan a continuación:

Tabla 1 Algunas características geomorfológicas de la cuenca perteneciente al dren Arroyo de Tierras

Características Geomorfológicas	
Área (km ²)	18.08
Desnivel (m)	278
Longitud (km)	10.53
Pendiente (m/m)	0.0153
Pendiente (%)	1.54

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 = 0.01537 \text{ m/m} \approx 1.537\%$$

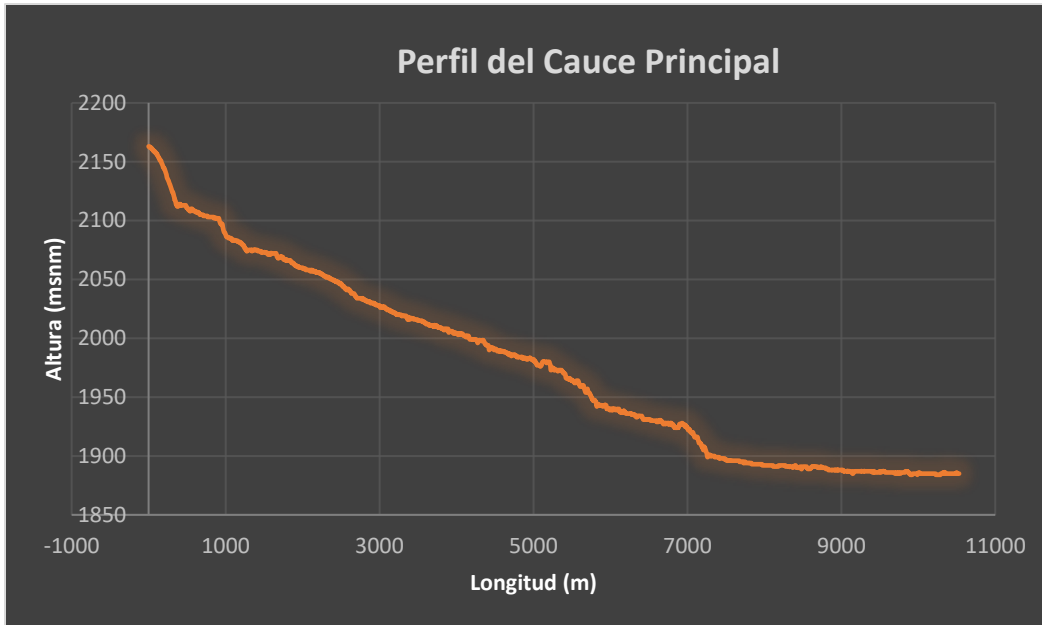


Figura 18 Perfil longitudinal del dren Arroyo de Tierras extraído del MDE a través de software de Sistemas de Información Geográfica

Una vez obtenida la pendiente del cauce principal se procedió al cálculo del tiempo de concentración de la cuenca haciendo uso de distintas metodologías que se presentarán a continuación:

Según Aparicio, usando la siguiente expresión:

$$t_c = \frac{L}{3600 v}$$

Dónde:

L = Longitud total de la corriente principal en metros

v = Velocidad media del agua en el cauce principal en m/s obtenida en base la siguiente tabla:

Tabla 2 Velocidades promedio en función de la pendiente principal del cauce según Aparicio

Pendiente del cauce principal (%)	Velocidad media (m/s)
1 - 2	0.6
2 - 4	0.9
4 - 6	1.2
6 - 8	1.5

Dado que la pendiente de nuestro cauce es del 1.54% la velocidad media que le corresponde será de 0.6 m/s por tanto el tiempo de concentración será:

$$t_c = \frac{10530.218}{3600 (0.6)} = \mathbf{4.88 \text{ horas}}$$

Mediante las ecuaciones de Kirpich que se expresan de la siguiente manera:

$$t_c = 0.000325 \left[\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right] \quad (1)$$

$$t_c = 0.066 \left[\frac{L}{\left(\frac{H}{L} \right)^{0.5}} \right]^{0.77} \quad (2)$$

Dónde:

S = La pendiente del cauce m/m

H = Desnivel del cauce

Los resultados fueron los siguientes:

$$t_c = 0.000325 \left[\frac{10530.218^{0.77}}{0.01538^{0.385}} \right] = \mathbf{2.03 \text{ horas}}$$

$$t_c = 0.066 \left[\frac{10.53}{\left(\frac{278}{10530.218} \right)^{0.5}} \right]^{0.77} = \mathbf{1.634 \text{ horas}}$$

Mediante la ecuación de Giandotti dada por:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$$

Dónde:

A = Superficie de la cuenca en km^2

Se obtuvo lo siguiente:

$$t_c = \frac{4\sqrt{137.811} + 1.5(10.53)}{0.8\sqrt{278}} = \mathbf{4.70 \text{ horas}}$$

Sin embargo, dado que no se cumple la siguiente expresión se descarta este método.

$$\frac{L}{3600} \geq t_c \geq \frac{L}{3600 + 1.5}$$

Por último, se aplicó el método del Servicio de Carreteras de California que está dado por la siguiente expresión:

$$t_c = \left(\frac{0.8708L^3}{H} \right)^{0.385}$$

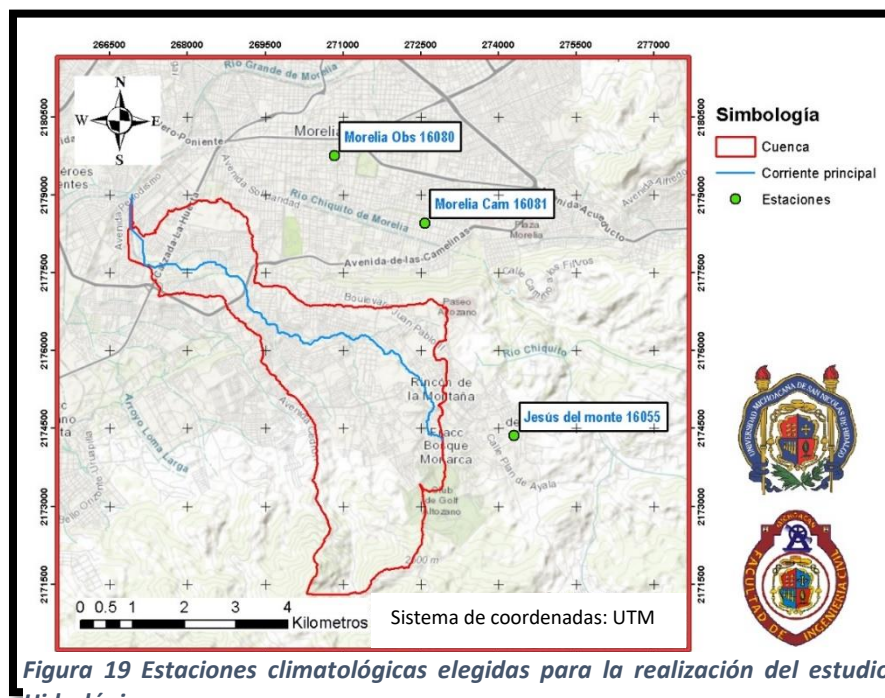
Con el que se obtuvo el siguiente valor:

$$t_c = \left(\frac{0.8708(10.53^3)}{278} \right)^{0.385} = \mathbf{1.648 \text{ horas}}$$

Por tanto, regirá la ecuación (2) de Kirpich.

Análisis de precipitaciones

Una vez obtenidas las características geomorfológicas de la cuenca se procedió al análisis de las estaciones climatológicas que se utilizaron con fin de obtener los gastos máximos de diseño. Las estaciones utilizadas fueron: **Estación Morelia Observatorio 16080**, **Estación Morelia 16081** y **Estación Jesús del Monte 16055**, mediante la descarga de datos de precipitación anual de la plataforma CLICOM se aplicaron pruebas de homogeneidad (Helmert, Secuencias y T Student) e independencia (Límites de Anderson), a continuación, se presenta el resumen de las pruebas:



Helmert y Secuencias:

Mediante la diferencia entre las precipitaciones anuales y la media de todas ellas y los cambios de valores de positivos a negativos o viceversa se obtiene la prueba de Helmert contando los cambios de signos que se puedan presentar y con el uso de la expresión:

$$S - C = 0 \pm \sqrt{n - 1}$$

Por lo que las diferencia entre cambios de signo y no cambios tendrán que ser igual a cero o bien estar dentro de la tolerancia que estará en base al número de elementos de la serie, o sea:

$$S - C = \pm \sqrt{n - 1}$$

Para prueba de secuencias se utilizará la mediana de los datos con fin de comparar y marcas cada uno de ellos, si el valor es mayor a esta se marcará con la letra "A" y es menor con la letra "B". Se contarán las rachas en las que se repiten cada una de estas letras y se compararán los valores con la siguiente tabla para saber si la serie es o no homogénea.

T Student:

Después de las pruebas preliminares se procedió a aplicar la prueba **t Student** la cual es considerada como una prueba poderosa, ya que sirve para detectar inconsistencias en la media por lo que se obtendrán resultados más precisos. Para esta prueba se requiere de la mediana, la media, así como la tabla de distribución de **t Student**, así como la siguiente expresión:

Tabla 3 Rango de número de secuencias para registro homogéneo según Campos Aranda en su libro "Procesos del ciclo hidrológico"

Rango del número de secuencias (u) para un registro homogéneo			
Número de datos (n)	Rango (u)	Número de datos (n)	Rango (u)
12	5 - 8	32	13 - 20
14	5 - 10	34	14 - 21
16	6 - 11	36	15 - 22
18	7 - 12	38	16 - 23
20	8 - 13	40	16 - 25
22	9 - 14	50	22 - 30
24	9 - 16	60	26 - 36
26	10 - 17	70	31 - 41
28	11 - 18	80	35 - 47
30	12 - 19	100	45 - 57

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

Límites de Anderson

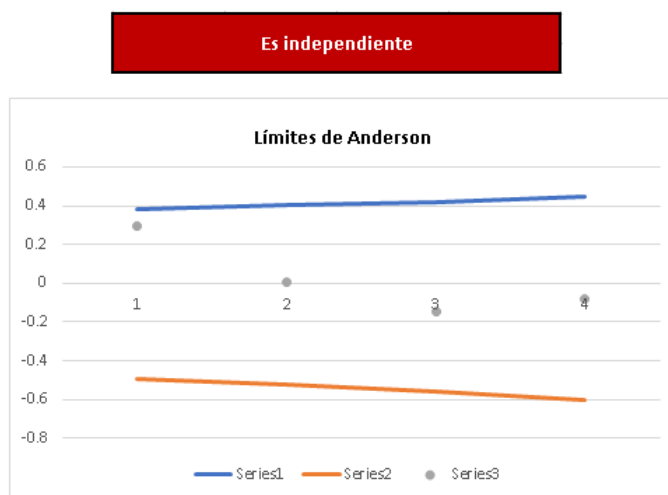
Una vez aplicadas las pruebas de homogeneidad se eligió la estación principal la cual fue la estación Morelia Observatorio 16080 para posteriormente utilizar los datos de esta en el cálculo de gastos máximos. Dicha prueba fue realizada con éxito pues se obtuvo que los datos de esta son independientes.

A continuación, se presenta un resumen de las pruebas realizadas a cada estación:

Mor. Obs. 16080			
	Mediana	848	
	Media	795.307619	
	C	9	
	S	11	
	n	21	
H e l i m	$(n - 1)^{(1/2)}$	4.47213595	
	S - C	2	Homogenea
S e c	Rango	8 - 13	
	u	10	Homogenea

Mor. Obs. 16081			
	Mediana	756.8	
	Media	773.378696	
	C	30	
	S	38	
	n	69	
H e l i m	$(n - 1)^{(1/2)}$	8.24621125	
	S - C	8	Homogenea
S e c	Rango	30 -- 40	
	u	29	No Homogenea

Mor. Obs. 16055			
	Mediana	868.7	
	Media	871.549605	
	C	24	
	S	51	
	n	76	
H e l i m	$(n - 1)^{(1/2)}$	8.66025404	
	S - C	27	No Homogenea
S e c	Rango	33 -- 45	
	u	27	No Homogenea



Llenado de estaciones

Una vez analizados los datos de precipitaciones, se procedió a hacer el llenado de las **precipitaciones máximas** de cada mes de la estación principal usando una estación secundaria (Morelia 16081) cómo apoyo y así poder aplicar el método de regresión lineal simple, en el cual se obtiene una ecuación de primer grado que trata de describir en la medida de lo posible el comportamiento de las precipitaciones de las dos estaciones en el tiempo como se muestra en la figura y así poder hacer una estimación de las precipitaciones faltantes.

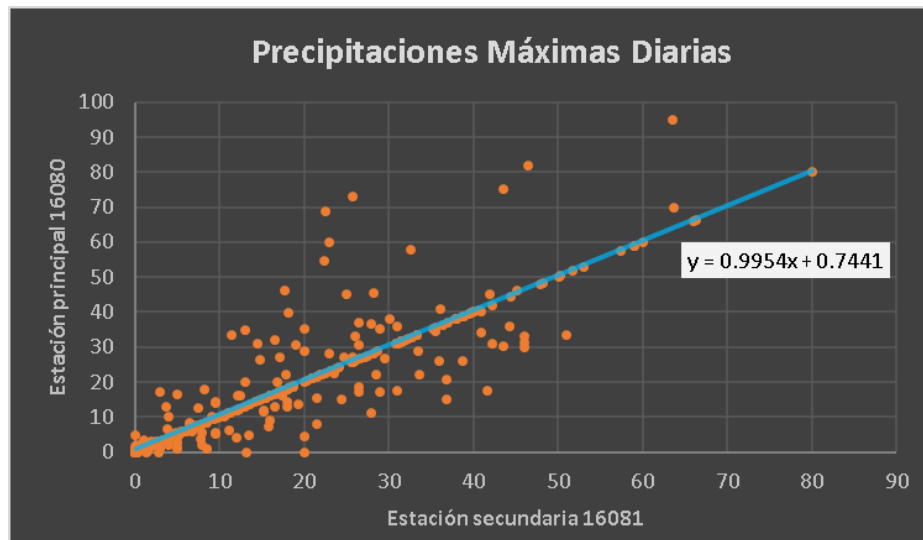


Figura 20 Distribución de las precipitaciones entre estaciones para realizar el llenado de datos faltantes

En el gráfico podemos observar que los datos se agrupan alrededor de la línea recta, la cual es una aproximación del comportamiento de los datos, la ecuación mostrada es la ecuación de dicha línea que se utilizará para la estimación de los datos faltantes, cabe mencionar que la estación secundaria si deberá contar con los meses que faltan en la estación principal para así hacer el correcto llenado de datos. Los meses que se llenaron fueron: **octubre de 1997, mayo de 2008 y junio de 2008.**

Funciones de probabilidad de distribución

Para la obtención de los gastos máximos será necesario del cálculo de la ecuación IDT (Intensidad Duración y Periodo de Retorno) para lo cual será necesario la probable precipitación máxima para 24hrs en un periodo de retorno de 10 años en base a la serie de datos de precipitaciones máximas anuales. Para esto se hará uso de las funciones de probabilidad de distribución con ayuda del software Hidroesta 2 ©, las FDP utilizadas fueron: **Normal, Log Normal, Gamma, Gumbel y Log Gumbel.** A continuación, se muestra el entorno de trabajo del software Hidroesta ©:

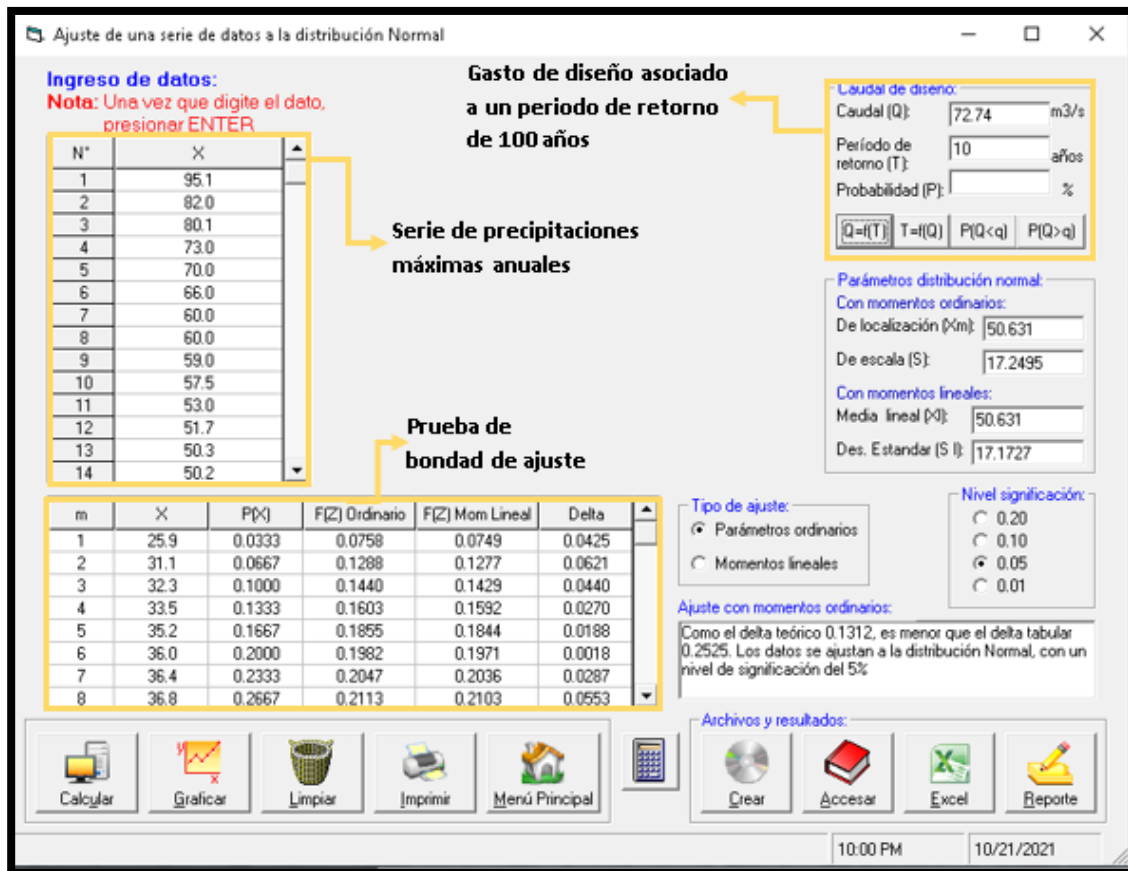


Figura 21 Análisis estadístico de Funciones de Probabilidad para una distribución normal realizado en HidroEsta © para el cálculo de gastos

Una vez realizadas todas las pruebas, se procedió a elegir el mejor ajuste, que será la distribución que mejor se ajusta a la información muestral, en este caso la serie de precipitaciones. A continuación, se hará un resumen de los resultados de cada una de las distribuciones donde el valor **Delta** indicará cuál de estas es la que mejor ajusta que será el de menor valor numérico:

Tabla 4 Resumen del análisis estadístico de FDP donde se puede observar que el mejor ajuste lo tuvo la función Log Gumbel

Smirnov Kolmogorov					
Delta	Normal	Log Normal	Gamma	Gumbel	Log Gumbel
	0.1312	0.112	0.1241	0.1099	0.0911

Cómo se puede apreciar la función que mejor ajusta es la función **Log Gumbel**, pues es la que presenta el menor valor Delta, por lo que esta será utilizada para el cálculo de la ecuación IDT.

Parámetros N y K

Una vez que se obtuvieron y se analizaron los datos de precipitación se calcularon los valores **N** y **K**, para el cálculo del valor N se utilizó la metodología propuesta por (Aparicio Mijares, 2010) obteniendo el siguiente mapa:

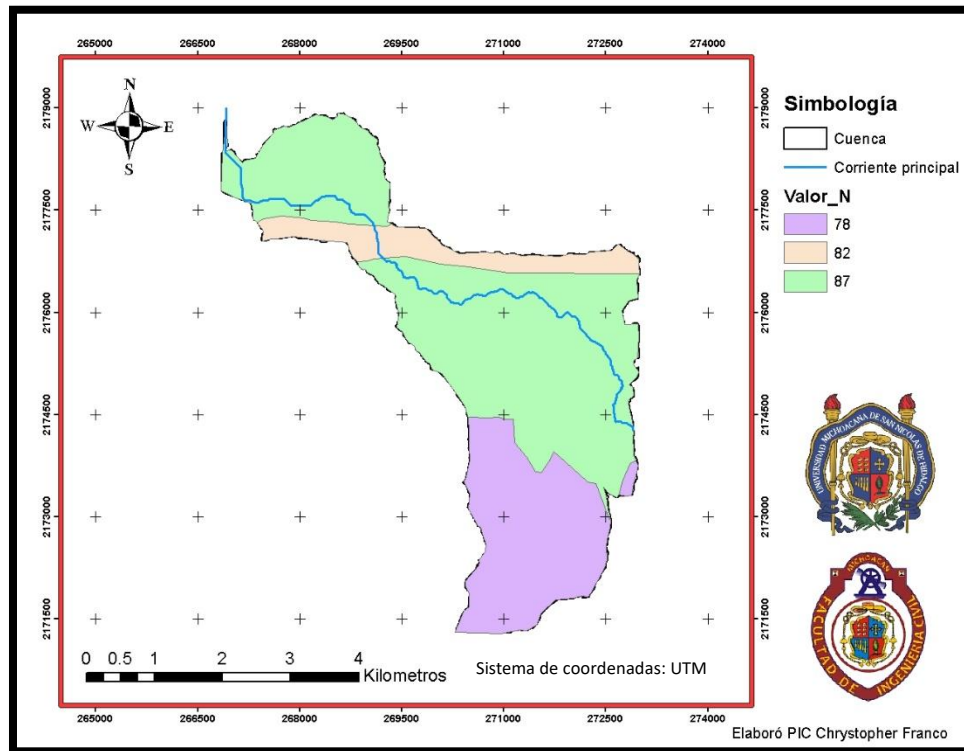


Figura 22 Mapa de escurrimiento correspondiente al parámetro N

Dónde:

- el valor de N igual a 78 corresponde a **bosques ralos** con un suelo de **tipo C** o sea un suelo fino.
- El valor N correspondiente al valor numérico 87 corresponde a **caminos** o bien **zonas urbanas** con un **tipo de suelo C** o fino.
- Y el valor de N igual a 82 corresponde de igual manera a **caminos** o **zonas urbanas** con **tipo de suelo B** o bien un suelo medio.

Para la clasificación del uso y tipo de suelo se utilizaron datos de INEGI como los archivos en formato SHAPE de uso y tipo de suelo, los cuales fueron reclasificados en la clasificación propuesta por Aparicio.

Mediante el uso de un promedio ponderado que involucra las áreas y el número de escurrimiento se obtuvo que el parámetro N de la cuenca es de: **84.09**.

De forma similar se obtuvo el **parámetro K** pero ahora con la metodología propuesta por la NOM-011-CONAGUA-2015 realizando de igual manera una reclasificación de los valores dados por INEGI a los de expresados en la normativa obteniendo el siguiente mapa:

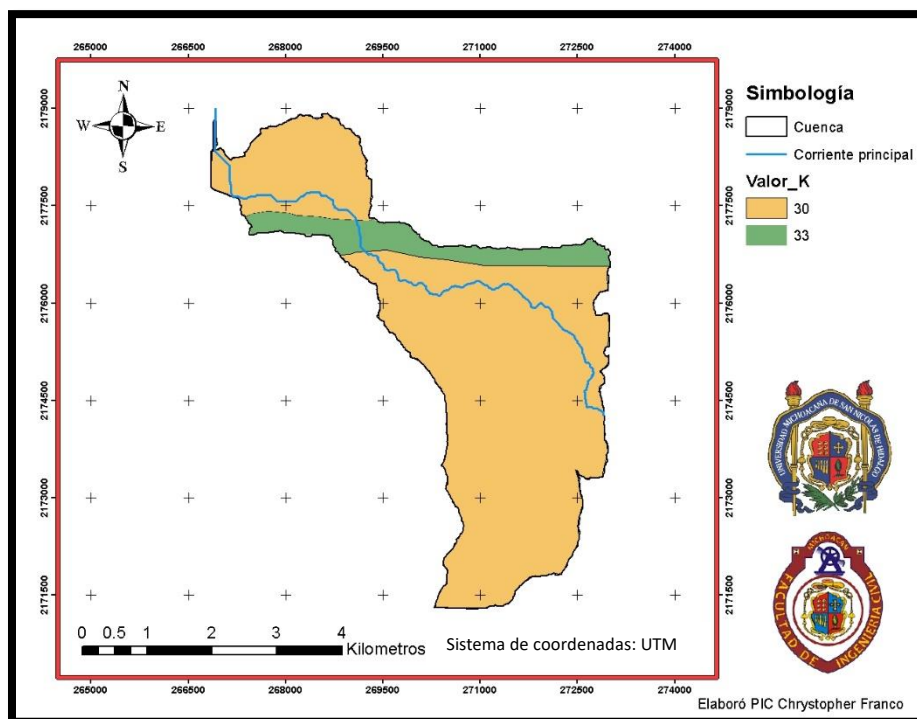


Figura 23 Mapa de escurrimiento correspondiente al parámetro K

A diferencia del mapa N, aquí solamente se obtuvieron dos distintas clasificaciones debido a la distinta clasificación de la normativa donde el tipo de suelo se basa en la permeabilidad.

Donde:

- El valor de 30 corresponde a **zonas urbanas** con un tipo de **suelo medio**.
- El valor K correspondiente a 33 corresponde a **zonas urbanas** con un **suelo fino**.

Utilizando el mismo método para obtener el parámetro N se obtuvo el parámetro K el cual fue de: **0.303**.

Cálculo de gastos máximos (método racional)

Una vez obtenida la ecuación IDT se realizó el cálculo de gastos mediante el método racional para el cual se hizo uso de un **coeficiente de escurrimiento (C_e)**, que fue calculado según la NOM-011-CONAGUA-2015 el cual involucra la serie de precipitaciones anuales, así como el parámetro K previamente calculado. Este coeficiente está dado por las siguientes expresiones:

Tabla 5 Expresiones propuestas por la NOM-011-CONAGUA-2015 para el cálculo del coeficiente de escurrimiento

K: Parámetro que depende del tipo y uso de suelo	Coeficiente de escurrimiento anual
Si K es ≤ 0.15	$C_e = K (P - 250)/2000$ (1)
Si K es ≥ 0.15	$C_e = K (P - 250)/2000 + (K - 0.15)/1.5$ (2)

Dado que en este caso el parámetro K es mayor a 0.15, se utilizará la expresión (2) para su cálculo y una vez calculado el Ce para cada año se procedió a promediarlo para así poder aplicarlo al método racional, el cual fue igual a:

$$C_e = 0.182$$

Para el cálculo de gastos picos de trabajarán los periodos de retorno correspondientes a **2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, 1000, 5000 y 10000** años e intervendrán variables como lo son: Área de la cuenca, tiempo de concentración, coeficiente de escurrimiento y el parámetro K como se ve en la expresión del método racional.

$$Q_p = C_e i A$$

Dónde:

Q_p = Gasto pico asociado a un periodo de retorno

C_e = Coeficiente de escurrimiento anual promediado de cada año

A = Área de la cuenca

La ecuación IDT utilizada para cada periodo de retorno fue la siguiente:

$$I_{max} = 193.2192T^{0.2040} * D^{-0.5535}$$

Como ejemplo ilustrativo calcularemos el gasto pico asociado a un periodo de retorno asociado a 10 años.

- Primeramente, se calculará la intensidad de precipitación asociada a este periodo de retorno considerando una duración de 98.32 min que es nuestro Tc:

$$I_{max} = 193.2192(10)^{0.2040} * (98.32)^{-0.5535}$$

$$I_{max} = 28.38mm$$

- Una vez calculada la intensidad sustituiremos en la expresión que describe el método racional para obtener el gasto máximo o pico:

$$Q_p = (0.182)(28.38)(18.10)$$

$$Q_p = 22.37 \text{ m}^3/\text{s}$$

A continuación, se muestra el resumen de gastos e intensidades calculadas:

Tabla 6 Resumen de gastos picos asociados a diversos periodos de retorno calculados mediante el método racional

Cálculo de gastos pico (método racional)	
Area de la cuenca (km ²)	18.104009
Tc (mins)	98.32254093
K	0.303
Ce prom	0.182
i2	17.56
i5	21.17
i10	24.38
i25	29.40
i50	33.86
i100	39.00
i200	44.93
i500	54.16
i1000	62.39
i5000	86.64
i10000	99.80
Qp2 (m ³ /s)	16.11
Qp5 (m ³ /s)	19.42
Qp10 (m ³ /s)	22.37
Qp25 (m ³ /s)	26.97
Qp50 (m ³ /s)	31.06
Qp100 (m ³ /s)	35.78
Qp200 (m ³ /s)	41.22
Qp500 (m ³ /s)	49.69
Qp1000 (m ³ /s)	57.23
Qp5000 (m ³ /s)	79.48
Qp10000 (m ³ /s)	91.55

Cálculo de gastos máximos (HEC-HMS)

Una vez obtenidos los gastos mediante el método racional, se realizó El cálculo de los hidrogramas a utilizar para la modelación de los modelos de inundación, esto mediante el software HEC-HMS ©, el cual utiliza el método del Hidrograma Unitario del Servicio de Conservación de Suelos (SCS por sus siglas en inglés) del gobierno de Estados Unidos. Para el cuál se requirieron los siguientes datos de ingreso:

- **La cuenca y la corriente principal en formato SHP**
- **Parámetro N**
- **Tiempo de retardo:** el tiempo de retardo será igual a:

$$Lag\ Time = 0.6T_c$$

$$Lag\ Time = 0.6(98.32min) = 58.99min$$

Cabe mencionar que este caso se utilizará el tiempo de concentración de la cuenca en minutos.

- **Hietograma de precipitación:** Mediante la transformación de la ecuación IDT a PDT (Precipitación Duración y Periodo de retorno), sustituyendo en la ecuación el periodo de retorno y transformando los exponentes negativos a positivos obteniendo la ecuación PDT de cada periodo de retorno.

$$I_{max} = 193.2192T^{0.2040} * D^{-0.5535}$$

Sustituyendo para un T = 10 años se tiene una ecuación PDT:

$$P = 3.7094D^{0.4465}$$

A partir de esta expresión se obtuvo el hietograma de precipitaciones calculando la precipitación para intervalos de tiempo de 0.25 hora hasta llegar al tiempo correspondiente al Tc, posteriormente se calculó el incremento de lluvia entre cada intervalo para después ordenarlo y obtener el hietograma de cada periodo de retorno.

Tabla 7 Calculo del hietograma de precipitaciones para un Tr 10 años

T = 10				
Tiempo (hrs)	D (min)	Lluvia total (mm)	Incremento de lluvia (mm)	Incremento ordenado (mm)
0 - 0.25	15	17.259	17.259	3.864
0.25 - 0.5	30	23.520	6.260	4.668
0.5 - 0.75	45	28.188	4.668	6.260
0.75 - 1	60	32.051	3.864	17.259
1 - 1.25	75	35.409	3.358	3.358
1.25 - 1.5	90	38.412	3.003	3.003
1.5 - 1.63	98	39.901	1.489	1.489

Una vez obtenidos los datos de ingreso se procedió a poner en marcha el software HEC-HMS para el cálculo de los hidrogramas de diseño.

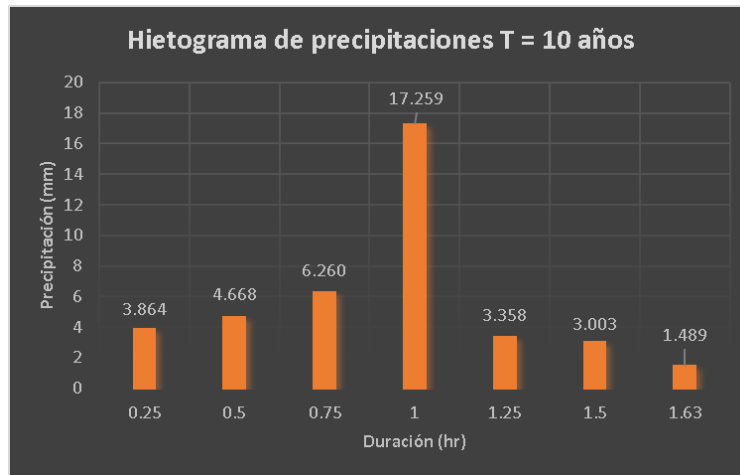


Figura 24 Hietograma de precipitaciones para un Tr 10 años

Los resultados arrojados por el software para el periodo de retorno de ejemplo fueron los siguientes:

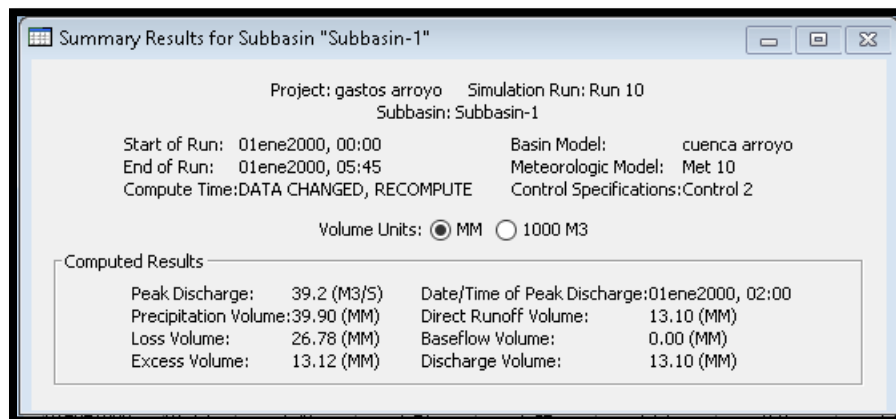


Figura 25 Resumen de resultados arrojado por el software HEC HMS © para un Tr 10 años

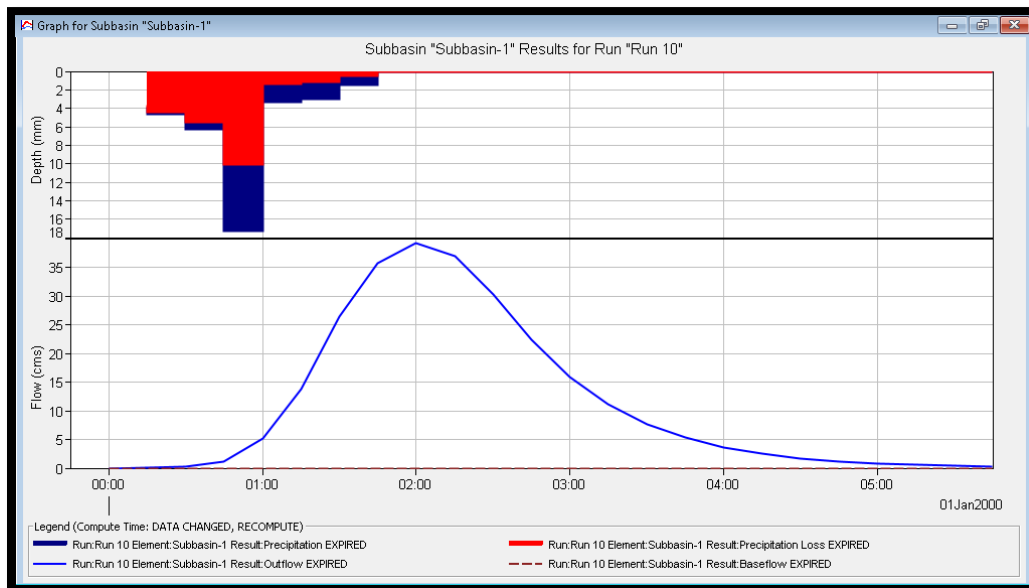


Figura 26 Hidrograma de salida graficado por HEC-HMS © para un Tr de 10 años

Tabla 8 Datos tabulares del hidrograma para un Tr 10años

Date	Time	Precip (MM)	Loss (MM)	Excess (MM)	Direct Flow (M3/5)	Baseflow (M3/5)	Total Flow (M3/5)
01ene2000	00:00				0.0	0.0	0.0
01ene2000	00:15	3.86	3.67	0.19	0.1	0.0	0.1
01ene2000	00:30	4.67	4.43	0.23	0.3	0.0	0.3
01ene2000	00:45	6.26	5.47	0.79	1.1	0.0	1.1
01ene2000	01:00	17.26	10.09	7.17	5.2	0.0	5.2
01ene2000	01:15	3.36	1.42	1.94	13.7	0.0	13.7
01ene2000	01:30	3.00	1.16	1.84	26.3	0.0	26.3
01ene2000	01:45	1.49	0.54	0.95	35.6	0.0	35.6
01ene2000	02:00	0.00	0.00	0.00	39.2	0.0	39.2
01ene2000	02:15	0.00	0.00	0.00	37.0	0.0	37.0
01ene2000	02:30	0.00	0.00	0.00	30.2	0.0	30.2
01ene2000	02:45	0.00	0.00	0.00	22.4	0.0	22.4
01ene2000	03:00	0.00	0.00	0.00	15.9	0.0	15.9
01ene2000	03:15	0.00	0.00	0.00	11.1	0.0	11.1
01ene2000	03:30	0.00	0.00	0.00	7.6	0.0	7.6
01ene2000	03:45	0.00	0.00	0.00	5.3	0.0	5.3
01ene2000	04:00	0.00	0.00	0.00	3.6	0.0	3.6
01ene2000	04:15	0.00	0.00	0.00	2.5	0.0	2.5
01ene2000	04:30	0.00	0.00	0.00	1.7	0.0	1.7
01ene2000	04:45	0.00	0.00	0.00	1.2	0.0	1.2
01ene2000	05:00	0.00	0.00	0.00	0.8	0.0	0.8
01ene2000	05:15	0.00	0.00	0.00	0.6	0.0	0.6
01ene2000	05:30	0.00	0.00	0.00	0.4	0.0	0.4
01ene2000	05:45	0.00	0.00	0.00	0.3	0.0	0.3

→ Gasto Pico

A continuación, se presentan los gastos pico obtenidos por cada uno de los métodos utilizados:

Tabla 9 Comparación de gastos pico calculados con el método racional y el software HEC-HMS ©

Resumen de gastos		
Gasto asociado a periodo de retorno	Método racional	HEC HMS (SCS)
Qp2 (m3/s)	16.11	19.5
Qp5 (m3/s)	19.42	29.4
Qp10 (m3/s)	22.37	39.2
Qp25 (m3/s)	26.97	56
Qp50 (m3/s)	31.06	72.1
Qp100 (m3/s)	35.78	91.6
Qp200 (m3/s)	41.22	115
Qp500 (m3/s)	49.69	152.9
Qp1000 (m3/s)	57.23	187.8
Qp5000 (m3/s)	79.48	293.7
Qp10000 (m3/s)	91.55	352.3

3.2. Modelo de inundación

Para desarrollar los modelos de inundación una vez obtenidos los hidrogramas de diseño, se procederá a utilizar el software HEC-RAS © para el desarrollo de un modelo de inundación en dos direcciones (2D Flood Modelling), pero antes de entrar en materia se dará una breve explicación de los principios que utiliza HEC-RAS © para la obtención de los modelos de inundación.

3.2.1. Comparación de modelos unidireccionales y bidireccionales

Para desarrollar un modelo de inundación el software HEC-RAS se tendrán dos opciones; la de un modelo en 1 dirección y un modelo en 2 direcciones, para saber cuál de ellas será útil a la hora de presentar un proyecto será necesario explicar el funcionamiento de cada una de ellas para así también establecer las diferencias entre uno y otro tipo de análisis.

Para establecer este tipo de metodologías se harán las siguientes suposiciones planteadas por (Betsholtz 2017) En su tesis de maestría, las cuales se enuncian a continuación:

- ***El fluido es incomprensible:*** Dado que la densidad se considera constante, el volumen será proporcional a la masa.
- ***La distribución de presiones es hidrostática:*** En este caso se desprecian las aceleraciones verticales.
- ***El flujo será estrictamente o de una sola dimensión o bien de dos dimensiones:*** despreciando variaciones verticales en el flujo y velocidad.
- ***La pendiente media del fondo del río será pequeña.***
- ***La fricción del lecho se podrá calcular con la ecuación de Manning.***
- ***El flujo se podrá describir en base funciones continuas de velocidad y elevación de la superficie del agua.***

- **Análisis Unidireccionales (1D)**

El desarrollo de un modelo unidireccional implicará un proceso más sencillo desde la recolección de datos de entrada hasta la ejecución del modelo, pues este método se basa principalmente en el uso de **sección transversales** que describen la topografía del río lo que le permite a este modelo ser de gran ventaja cuando el acceso a una topografía más definida del río es limitada. Dado a que su funcionamiento está restringido al flujo que se presenta entre los bordes del río, cuando se traten de usar en el modelado de zonas con topografía compleja estos tipos de modelos, será difícil considerar parámetros como: pérdidas por fricción y extensión de la inundación por lo que se pierde la fidelidad del modelo. El modelo en una dirección resolverá las ecuaciones gobernantes en cada una de las secciones porque al tener secciones en intervalos de longitud más pequeños o sea

teniendo más secciones, se logrará una definición más precisa del comportamiento del agua al circular a través del cauce del río. Las ecuaciones que definirán los modelos unidireccionales estarán basadas en las ecuaciones de Saint Venant.

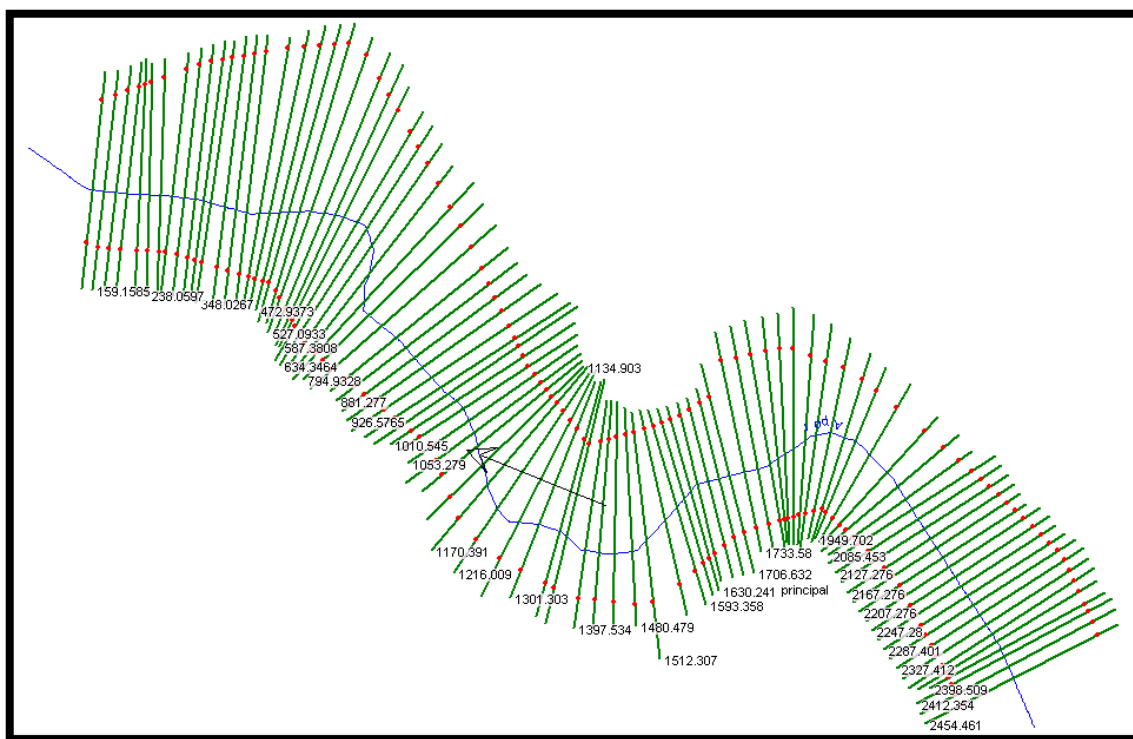


Figura 28 Trazo de secciones transversales para análisis unidireccionales en el software HEC-RAS

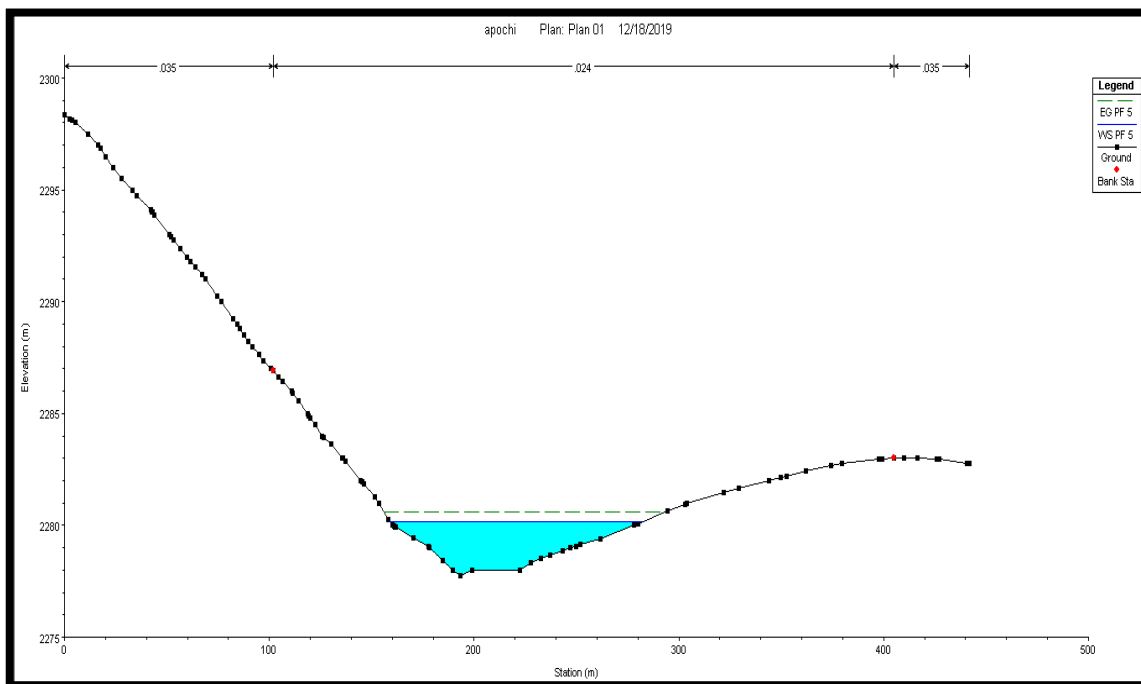


Figura 27 Sección transversal tipo para análisis unidireccionales en HEC-RAS ©

Básicamente se utilizarán dos ecuaciones; **La ecuación de la continuidad** y **La Ecuación de momentum** o de cantidad de movimiento.

La ecuación de la continuidad describirá la conservación de la materia en un volumen dado y que el flujo de esta será igual al cambio en el almacenamiento. Esta ecuación según Saint Venant puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\frac{\partial(Q)}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + q = 0$$

Dónde:

Q = Al gasto del cauce

A = Área de la sección transversal

q = Flujo de entrada lateral

La ecuación de momentum, está basada en la segunda ley de Newton la cual afirma:

“El cambio de movimiento es directamente proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime.”

Y en este caso aplicará que las fuerzas actuantes sobre un elemento significarán el cambio en la cantidad de movimiento o momentum y esta expresión se formulará dependiendo en las fuerzas que serán consideradas.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V^2}{2g} + h \right) = g(S_0 - S_f)$$

Dónde:

V = Es la velocidad del flujo

g = Corresponde a la aceleración gravitacional

h = Profundidad del agua

S_0 = Pendiente del lecho del cauce

S_f = Coeficiente de fricción (Manning)

Por lo que se ve en la ecuación de momentum el termino correspondiente a la carga de velocidad considera esta en una sola dirección “x” por lo que con eso se puede deducir que esta expresión se aplica únicamente en casos en los que el flujo circula en una sola dirección cómo lo son cauces, canales etc. Por lo que al momento de que se presente un desbordamiento y se requiera saber el

comportamiento del agua cuando se exceda la capacidad del cauce, esta ecuación dejara de ser lo suficientemente efectiva para analizar el fenómeno.

- **Análisis Bidireccionales:**

Al momento de querer analizar un fenómeno de inundación en una zona inundable no se puede asumir que el flujo será en una sola dirección pues cuando este tipo de fenómenos se presentan se puede decir que existe un cierto “desorden” en la manera en la que el agua fluye pues no sigue una sola dirección por lo que podemos hablar de que este tipo de eventos se desarrollan en un sistema bidireccional por ello las ecuaciones de flujo en una sola dirección no serán aplicables. Sin embargo, dichas ecuaciones se pueden adaptar a este tipo de fenómenos por lo que también tendremos una ecuación de continuidad, así como una ecuación de momentum, claro aplicables a flujos en ambas direcciones. Las cuales estarán representadas de la siguiente manera:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0$$

Dónde:

H = Es la elevación de la superficie del agua.

h = Es la profundidad o tirante del agua.

u = Es la velocidad promedio en dirección “x”.

v = Es la velocidad promedio en dirección “y”.

q = Representa el flujo de fuentes externas como las precipitaciones.

Al igual que en el análisis unidireccional la ecuación de momentum esta estará basada en la segunda ley de Newton, sin embargo, esta considerará fuerzas como la gravedad, viscosidad, fricción, así como el efecto Coriolis. Así que las ecuaciones se expresarán de la siguiente manera:

Ecuación para la dirección “x”

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v$$

Ecuación para la dirección “y”

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u$$

Dónde:

H = Es la elevación de la superficie del agua.

V_t = Coeficiente de viscosidad.

C_f = Coeficiente de fricción

f = Coeficiente de Coriolis

u = velocidad promedio en dirección "x"

v = velocidad promedio en dirección "y"

En la ecuación los términos a la izquierda de la igualdad corresponden a la aceleración local, así como la aceleración convectiva que explica cómo es que el efecto que sufre una partícula al desplazarse a una nueva ubicación en el flujo donde la velocidad es distinta. Los términos a la derecha de la igualdad representan las distintas fuerzas que actúan como la viscosidad, gravedad, fricción del lecho, así como la fuerza Coriolis. El coeficiente de fricción C_f se obtiene con la ecuación propuesta por Manning expresada como:

$$C_f = \frac{n^2 g |u|}{R^{4/3}}$$

Dónde:

n = Coeficiente de Manning.

g = Constante gravitacional.

u = Velocidad en dirección "x" (siendo v cuando se busque en dirección "y").

R = Radio hidráulico.

Sin embargo, para lograr la disminución de tiempos así como la inestabilidad numérica, el software simplifica las ecuaciones de momentum a ecuaciones que los desarrolladores han llamado "*Aproximación de onda difusiva*" (Diffusive wave approximation) en la cual supone que las fuerzas dominantes serán las fuerzas de gravedad así como la fricción por lo que variables correspondientes a los términos de aceleración, viscosidad y coeficiente de Coriolis serán despreciados por lo que la ecuación simplificada de momentum se expresa de la siguiente forma:

$$g \nabla H = -C_f V$$

Dónde:

V = Corresponde al vector de velocidad

Sustituyendo la expresión que define el coeficiente de fricción:

$$V = \frac{-(R(H))^{2/3}}{n} \frac{\nabla H}{|\nabla H|^{1/2}}$$

Dónde:

$R(H)$ = Es el radio hidráulico en función de la elevación de la superficie del agua.

∇ = Es el operador diferencial.

n = Es el coeficiente de Manning.

Sustituyendo en la ecuación de continuidad para flujo en dos direcciones se tiene:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot \beta \nabla H + q = 0$$

Dónde:

$$\beta = \frac{-(R(H))^{2/3}}{n}$$

3.2.2. Datos de ingreso

Para el desarrollo de nuestros modelos de inundación, fue necesaria la recolección de distintos datos de ingreso para poder echar a andar el software HEC-RAS © los cuales mostraremos a continuación:

Topografía de la zona de inundación

Para la obtención de la topografía del terreno, se recurrió a la base de datos de INEGI, mediante la cual se obtuvieron los modelos digitales de elevación de la zona (DEM) a una escala 1:10,000 y con una definición de 5m, dichos modelos corresponden a las cartas topográficas E14A23A2, E14A23A4, E14A23B1, E14A23B3 y son de tipo superficie con fin de obtener mayor definición de la traza urbana de la zona estudio, considerando vías de tránsito, edificios así como estructuras. Para el procesamiento de estos modelos se utilizó el software ArcGIS © con fin de unirlos en un solo DEM, una vez que se ha obtenido un solo modelo se procedió a ingresarlo al software HEC-RAS ©, al complemento RAS Mapper.

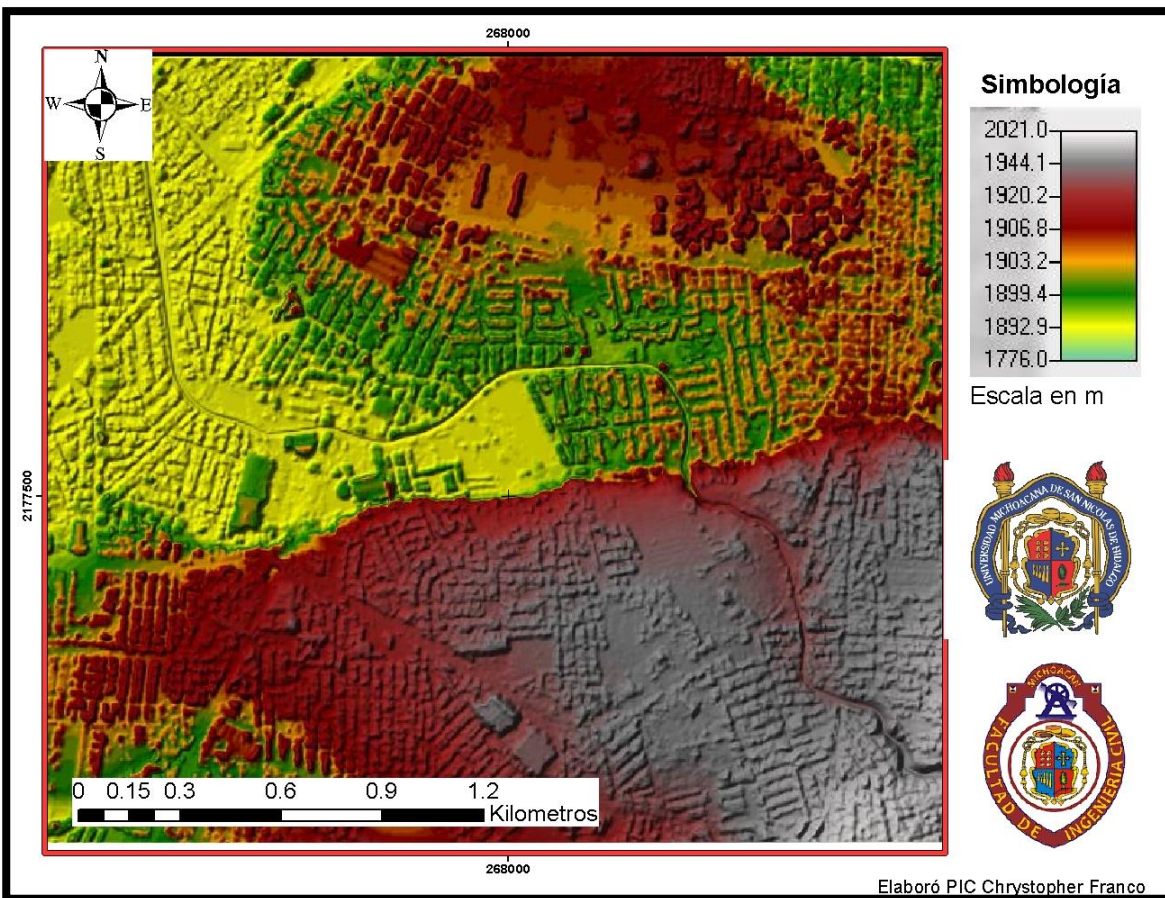


Figura 29 Relieve correspondiente a la zona de estudio ingresado al software HEC-RAS, cotas en msnm

Coeficientes de rugosidad

Cómo se apreció anteriormente en las ecuaciones de Aproximación *de onda difusiva* se encuentra presente el coeficiente de rugosidad de Manning, el cual varía de acuerdo al tipo de superficie por el que circule el flujo, ya que pueden presentar desde superficies de suelo desnudo, superficies con materia vegetal hasta superficies recubiertas con pavimentos.

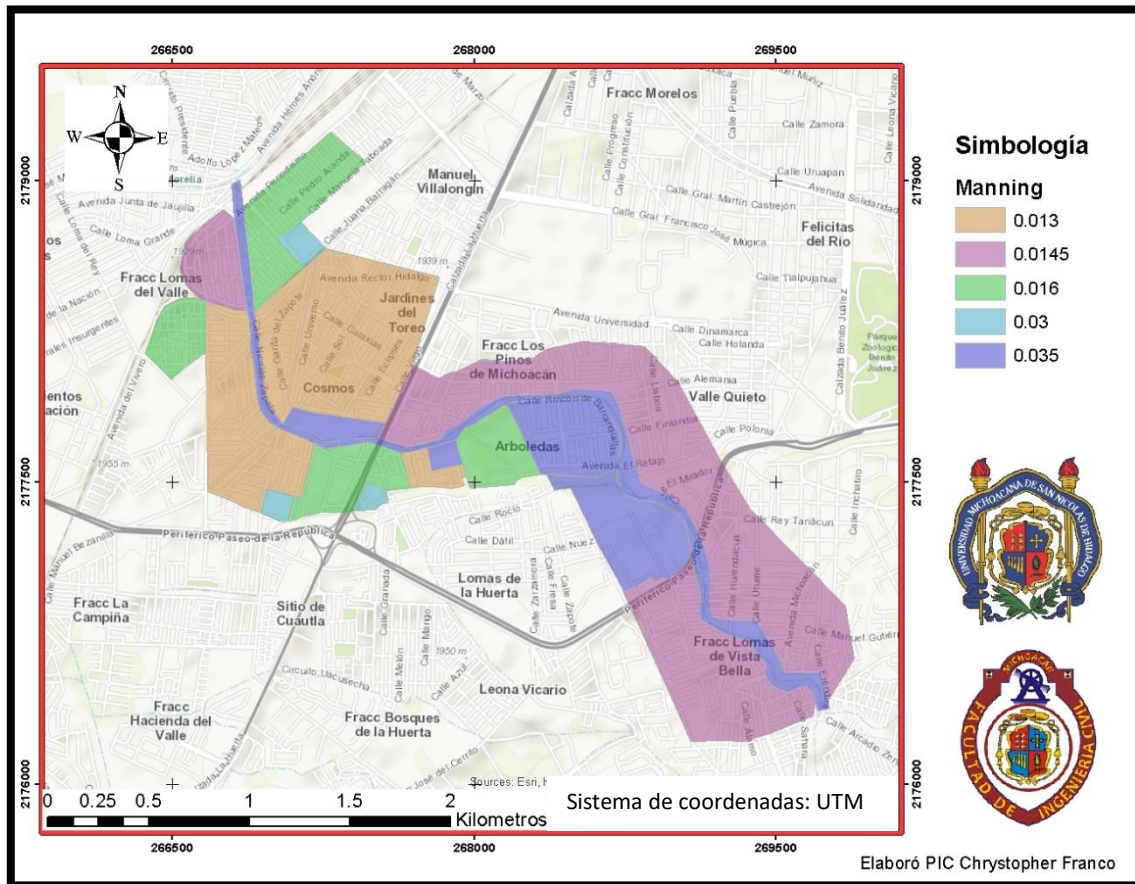


Figura 30 Coeficientes de rugosidad propuestos en la zona de estudio para la simulación de la inundación.

Para el caso de estudio se determinaron los siguientes coeficientes de Manning en base a los valores propuestos por (Te Chow, 2005)

- **Zonas con calles de Concreto:** Dado que no todas las calles tienen un acabado en común de concreto, dado que algunas son más antiguas que otras se consideró un valor medio entre: Concreto terminado ($n = 0.012$) y concreto sin terminar ($n = 0.014$) por lo que este valor será de **0.013**, indicado en color naranja en el mapa.
- **Zonas con calles de concreto y asfalto:** Con fin de reducir los tiempos de delimitación de zonas con cada uno de estos materiales, se tomó un valor promedio que se encuentra entre el valor tomado para el concreto en nuestro caso ($n = 0.013$) y el asfalto rugoso ($n = 0.016$) el cual fue igual a **0.0145**, indicado en color rosa en el mapa.

- **Zonas con calles totalmente pavimentadas con asfalto:** Para estas zonas se estableció un coeficiente de Manning igual a **0.016**, indicado en el mapa con color verde.
- **Zonas de parques o jardines:** Para estas zonas corresponde un coeficiente de **0.03**, color azul en mapa.
- **Coeficiente promedio del arroyo y zonas de cultivo:** Para el arroyo se consideró un coeficiente de Manning de **0.035** correspondientes a cauces serpenteantes con pastos y malezas, dicho valor coincide con cultivos en línea. Indicado en color morado en el mapa.

Cabe destacar que dichos valores son aproximados debido a la escala que se está trabajando, sin embargo, si se desea mayor precisión en la modelación se podrá hacer más divisiones en orden de tener más categorías y por tanto un modelo más fiel a la realidad. Estos datos fueron trabajados con ayuda del software de Sistemas de Información Geográfica, así como con la ayuda de imágenes satelitales y se ingresaron en el software HEC-RAS © en formato Shape file, creando un empalme entre este y el modelo de elevaciones asignando así un coeficiente a cada zona.

Hidrogramas

Para la modelación se usará un modelo de flujo no permanente, lo cual quiere decir que el gasto transitará por el cauce varía respecto al tiempo. Estos hidrogramas fueron calculados en el estudio hidrológico desarrollado anteriormente, para la consulta del interesado cada uno de estos (asociados a un periodo de retorno) se encuentran en el *Anexo 1 de este trabajo*.

Tabla 10 Datos del Hidrograma asociado a un Tr de 100 años

Tr 100	
Tiempo	Gasto (m ³ /s)
0:00	0
0:15	0.1
0:30	0.7
0:45	3
1:00	13.9
1:15	35.3
1:30	65.1
1:45	85.4
2:00	91.6
2:15	84.4
2:30	67.6
2:45	49.7
3:00	35.3
3:15	24.5
3:30	16.8
3:45	11.7
4:00	8
4:15	5.6
4:30	3.9
4:45	2.7
5:00	1.9
5:15	1.3
5:30	0.9
5:45	0.6
Gasto pico	91.6

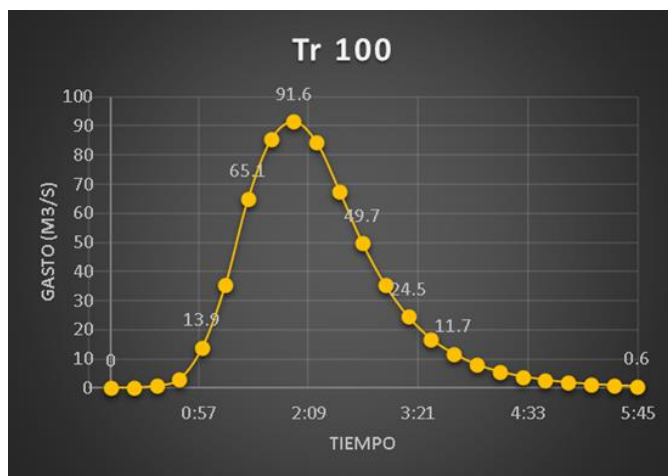


Figura 31 Hidrograma para un Tr de 100 años

3.2.3. Modelación

Para la modelación en dos dimensiones el software utiliza un sistema de elementos finitos mediante el cual se define un área de estudio que será dividida en un determinado número de **celdas** las cuales formarán lo que es conocido como **mall**, en cada celda de dicha malla se le dará solución a cada una de las ecuaciones que comprenden el método que utiliza el software para realizar la simulación. A continuación, se presentan los pasos seguidos para la realización de los modelos de inundación:

1. Mediante el complemento RAS Mapper se ingresó al software HEC-RAS © el modelo digital de elevaciones que dará las características geométricas de la zona las cuales son meramente las características topográficas de estas.

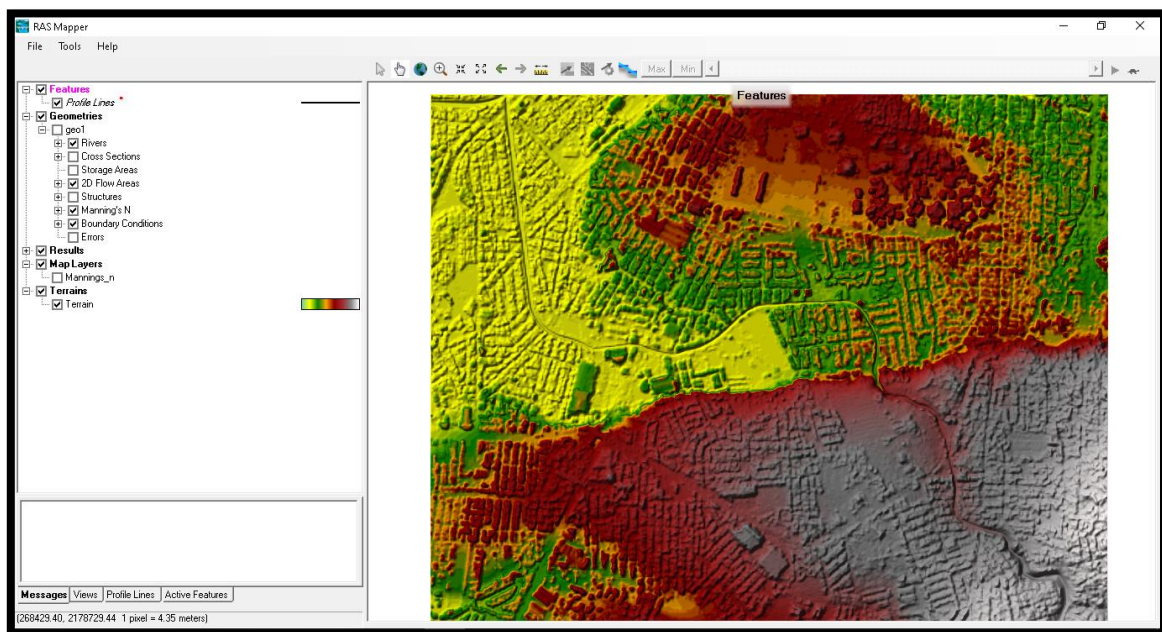


Figura 32 Ingreso del relieve topográfico de la zona mediante el uso de un archivo en formato RASTER al HEC-RAS ©

- Una vez ingresado esto se procedió a definir los coeficientes de rugosidad de la zona de estudio mediante el ingreso de un archivo en formato Shape File el cual fue definido anteriormente:

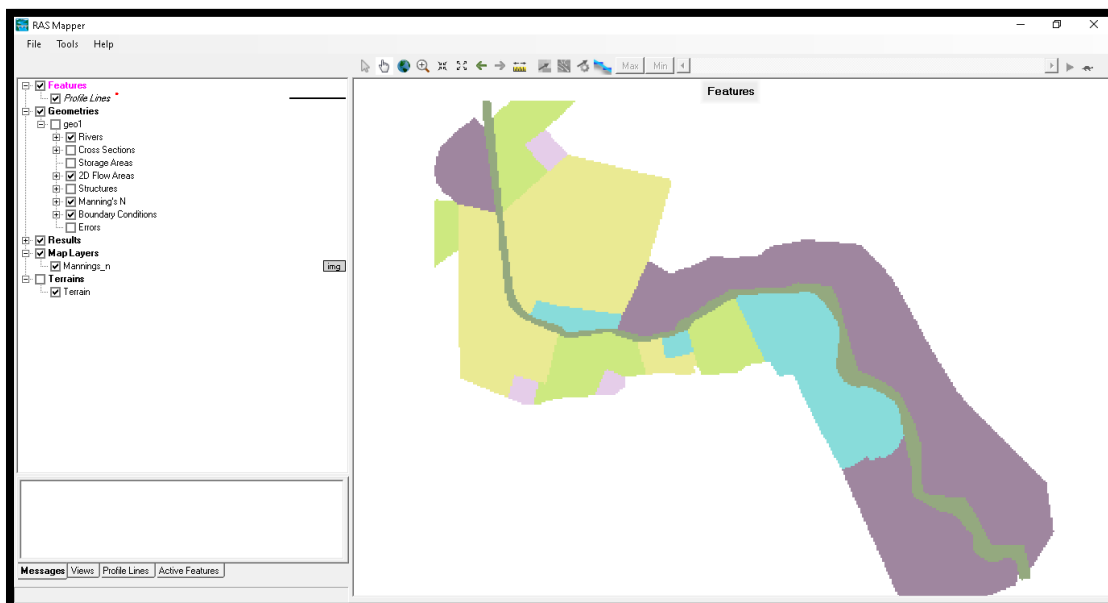


Figura 33 Ingreso de los coeficientes de rugosidad de la zona de estudio al software HEC-RAS © mediante el uso de un archivo tipo SHAPE

- Una vez ingresados los datos geométricos se procedió a la construcción de la malla mediante la que se realizarán los cálculos hidráulicos, definiendo la zona de estudio, así como las condiciones de borde (Aguas arriba y aguas abajo), la definición más apropiada para el caso, fue una malla que consta de celdas con un tamaño de 7 x 7 metros:

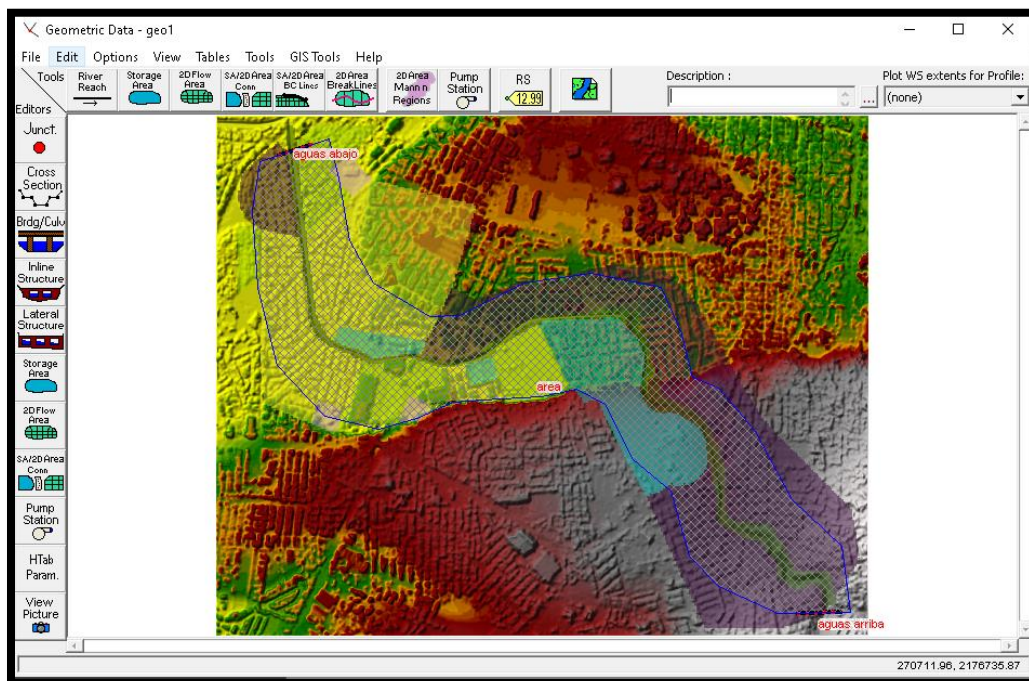


Figura 34 Malla creada en el software HEC-RAS © con una definición de 7x7 metros

- Ya que se definió la geometría, así como la malla para el computo se ingresaron los hidrogramas definidos para cada periodo de retorno:

Flow Hydrograph

SA: area BCLine: aguas arriba

☐ Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:
 Path:

☒ Enter Table Data time interval: 15 Minute

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

☒ Use Simulation Time: Date: 01SEP2008 Time: 00:00

☐ Fixed Start Time: Date: 01SEP2008 Time: 00:00

No. Ordinates Interpolate Missing Values Del Row Ins Row

	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m3/s)
1	31Aug2008 2400	00:00	0
2	01Sep2008 0015	00:15	0.6
3	01Sep2008 0030	00:30	5.4
4	01Sep2008 0045	00:45	22.4
5	01Sep2008 0100	01:00	76.3
6	01Sep2008 0115	01:15	166.6
7	01Sep2008 0130	01:30	277.1
8	01Sep2008 0145	01:45	342.8
9	01Sep2008 0200	02:00	352.3
10	01Sep2008 0215	02:15	314.1
11	01Sep2008 0230	02:30	246.2
12	01Sep2008 0245	02:45	178.8
13	01Sep2008 0300	03:00	126.5
14	01Sep2008 0315	03:15	87.9
15	01Sep2008 0330	03:30	60.2

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

☐ Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow: Multiplier: EG Slope for distributing flow along BC Line: 0.0153 TW Check

Plot Data OK Cancel

Figura 35 Ingreso de los hidrogramas al HEC-RAS @ mediante el menú para flujo no permanente

- Finalmente se llevó a cabo el cómputo de cada simulación correspondiente a cada periodo de retorno para obtener así los modelos de inundación en formato Raster:

HEC-RAS Finished Computations

Write Geometry Information
Layer: COMPLETE

Geometry Processor
River: RS:
Reach: Node Type: Storage Area
IB Curve:

Unsteady Flow Simulation
Simulation:
Time: 5.7500 01SEP2008 05:45:00 Iteration (1D): Iteration (2D): 3

Unsteady Flow Computations

Stored Map Generation
Map: Velocity

Computation Messages

Writing Results to DSS

Finished Unsteady Flow Simulation

1D Post Process Skipped (simulation is all 2D)

Computing Stored Results Maps

Generating stored map: 'Depth (Max)'
Processing Terrain File 1 of 1
0...10...20...30...40...50...60...70...80...90...100 - done.
Stored map 'Depth (Max)' created.

Generating stored map: 'Velocity (Max)'
Processing Terrain File 1 of 1
0...10...20...30...40...50...60...70...80...90...100 - done.
Stored map 'Velocity (Max)' created.
Completed storing 2 results map layers

Computations Summary

Computation Task	Time(hh:mm:ss)
Completing Geometry(64)	43
Preprocessing Geometry(64)	10

Pause Take Snapshot of Results Close

Figura 36 Pantalla de progreso del modelado en HEC-RAS @mostrando que la simulación fue exitosa

A continuación, se presentan los resultados de la modelación para un Tr correspondiente a 100 años, y la modelación para cada periodo de retorno se encuentra en el *Anexo 2* de este trabajo para el interesado.

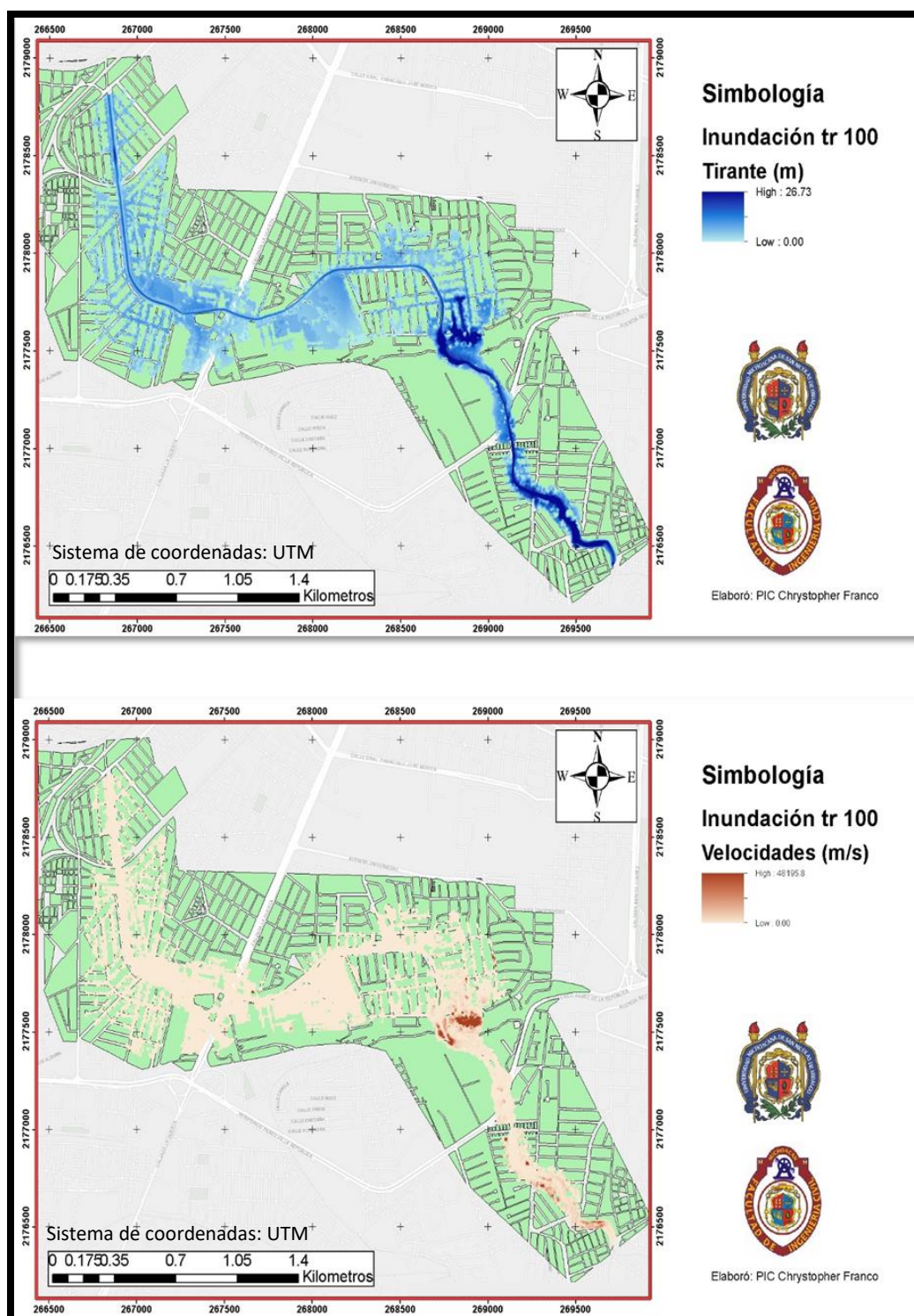


Figura 37 Mapa de profundidad de la inundación y mapa de las velocidades alcanzadas por esta para un Tr 100 años

3.3. Estimación de riesgos

Para la estimación del potencial de riesgo se utilizó el software de uso libre FloodRisk Plugin a través del software Qgis como procesador de Sistemas de Información Geográfica. Dicho software es capaz de estimar los daños directos que se presentan cuando ocurre un fenómeno de inundación, estos a su vez se pueden dividir en dos categorías:

- **Daños tangibles:** Este tipo de daños corresponden a aquellos que involucran a estructuras y todo aquello que se encuentra dentro de ellas, además de incluir el daño o destrucción de infraestructura como caminos y vías férreas.
- **Daños intangibles:** Los daños intangibles corresponden a aquellos que no se les puede asignar un valor comercial o bien aquello con lo que no se puede comerciar, en este caso será el potencial de pérdidas de vidas.

A continuación, se presentará la metodología utilizada por el software para la estimación de daños directos:

3.3.1. Estimación de pérdidas económicas

Para la estimación de daños físicos directos el software hace uso de curvas “*tirante-daño*” las cuales establecen una relación entre los tirantes que presenta la inundación y los posibles daños que estos pueden ocasionar en las estructuras y su contenido. La aplicación de estas curvas dependerá del uso de suelo que se dé en la zona de inundación. Dicha clasificación viene establecida en el software mediante una descripción y un código, por lo que nuestra zona de estudio se tiene que ajustar a dichos parámetros para el correcto funcionamiento del modelo. Las clasificaciones propuestas por el software son:

- **11100 tejido urbano continuo (densidad > 80%)**
- **11210 tejido urbano discontinuo denso (densidad 50% - 80%)**
- **11220 tejido urbano discontinuo de densidad media (densidad 30%-50%)**
- **11230 tejido urbano discontinuo de densidad baja (densidad 10%-30%)**
- **11240 tejido urbano discontinuo de densidad muy baja (densidad < 10%)**
- **11300 estructuras aisladas**
- **12100 industrial, comercial, sitios públicos, unidades privadas y militares**
- **12210 caminos de alta velocidad y terrenos aledaños**
- **12220 otros caminos y terrenos aledaños**
- **12230 vías férreas y terrenos aledaños**
- **12300 áreas portuarias**
- **12400 aeropuertos**
- **13100 Minas y vertederos**
- **13300 sitios de construcción**

- 13400 terrenos sin uso
- 14100 áreas urbanas verdes
- 14200 instalaciones deportivas y de ocio
- 20000 zonas agrícolas, áreas seminaturales y humedales
- 30000 bosques
- 40000 humedales
- 50000 cuerpos de agua

Para el caso de estudio se propuso la siguiente consideración para la clasificación del uso de suelo:

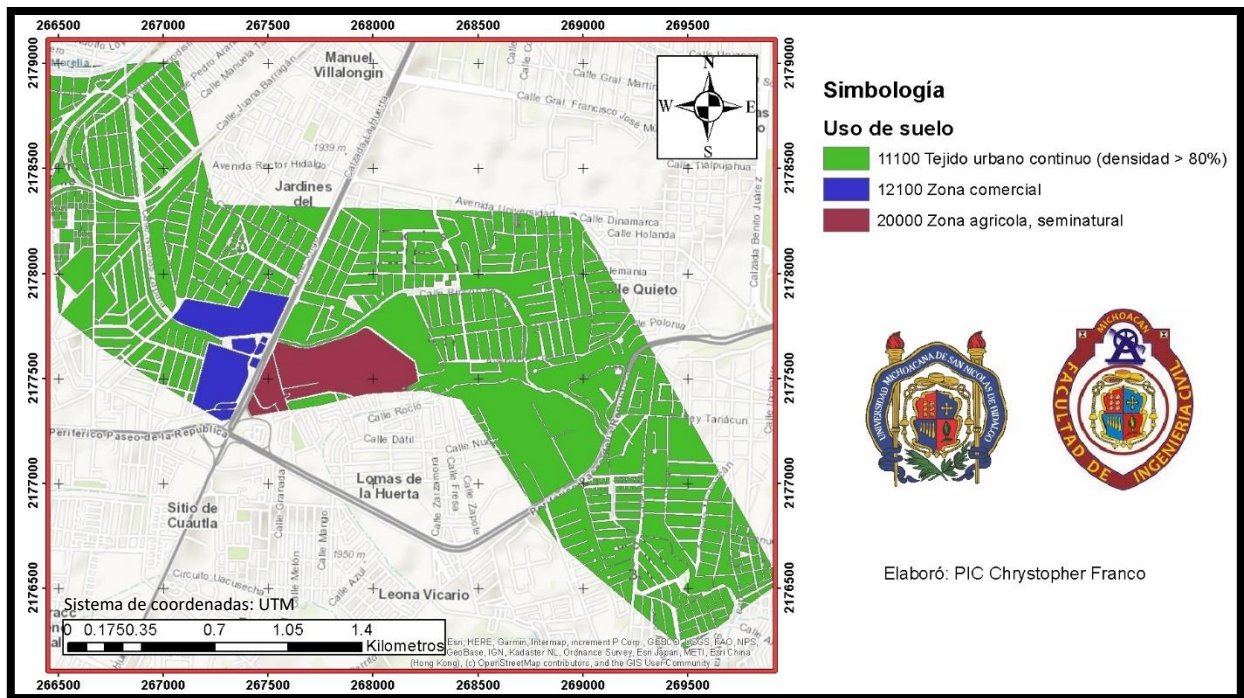


Figura 38 Clasificación del uso de suelo propuesta según la metodología propuesta por Albano R.

De igual manera se propuso la siguiente clasificación de la infraestructura vial de la zona quedando de la siguiente manera:

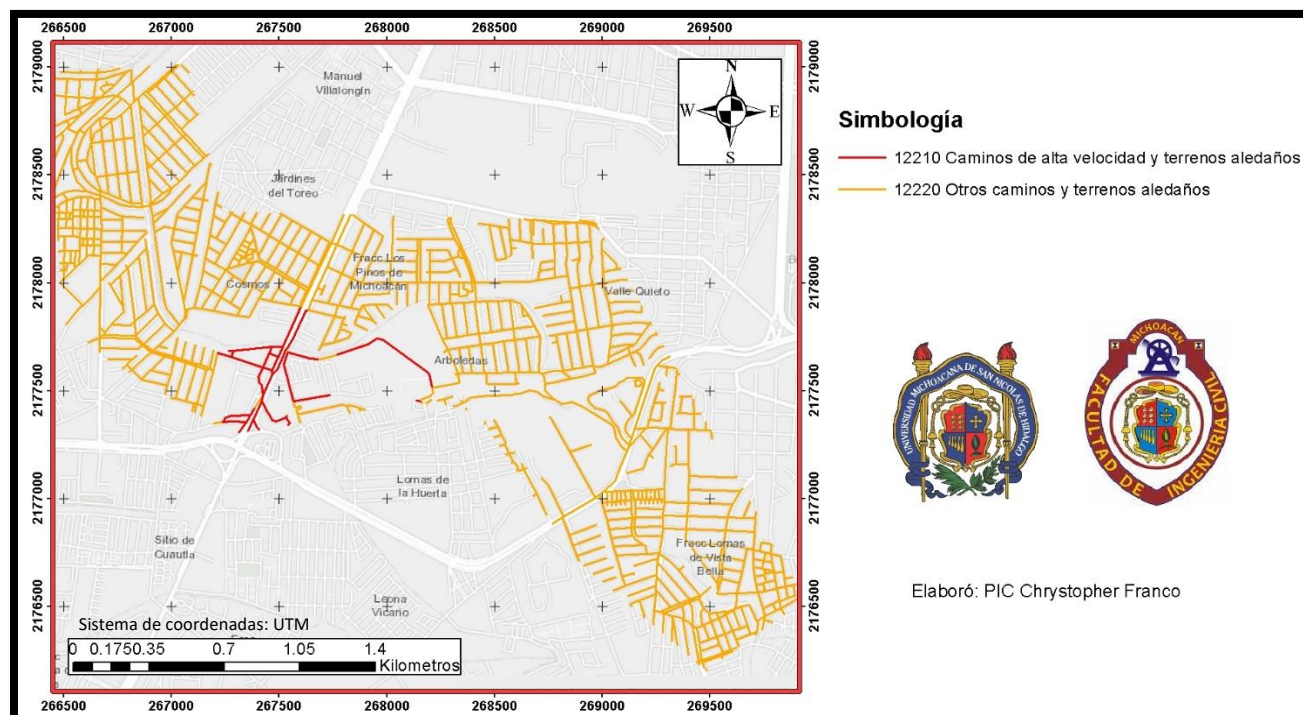


Figura 39 Clasificación del tipo de infraestructura vial de la zona según la metodología propuesta por Albano R.

Aunado a esto se estableció en base a datos catastrales un costo de referencia para cada una de las categorías, esto con fin de estimar pérdidas económicas en base al tipo de suelo y poder relacionarse con el porcentaje de daño correspondiente en las curvas tirante-daño. Estos costos fueron los siguientes:

Tabla 11 Coste de referencia de acuerdo al tipo de suelo basado en datos catastrales del Gobierno de Michoacán

Uso de suelo	Valor del contenido (pesos por m ²)	Valor estructural (pesos por m ²)
11100 tejido urbano continuo (densidad > 80%)	\$ 367	\$ 2,447
12100 zona comercial	\$ 608	\$4,052
20000 zona agrícola, seminatural	\$ 303	\$ 2,023
12210 caminos de alta velocidad y terrenos aledaños	\$ 4,020	\$ 26,800
12220 otros caminos y terrenos aledaños	\$3,000	\$ 20,000

Para la elección de la curva tirante-daño el software ofrece una amplia gama de opciones con fin de elegir la opción que más se adapte a nuestras necesidades, dichas funciones se basan en distintas metodologías, estas son:

- Modelo de Hazus
- Método estándar
- Modelo del atlas de Rhine

- Modelo Flemish
- Modelo de escaneo de daños
- Modelo JRC
- FLEMO

En este caso se utilizó las curvas establecidas en el método estándar, estas curvas corresponden a cada uno de los diferentes usos de suelo que se presentan en la zona de estudio:

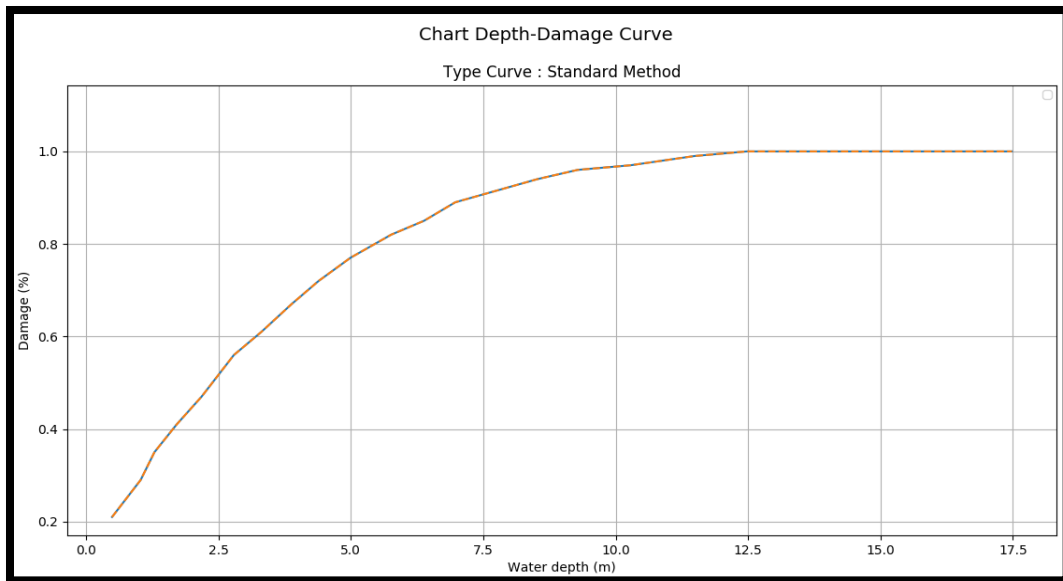


Figura 41 Curva tirante-daño para la clasificación “Tejido Urbano Continuo” coincidiendo la curva para el contenido y la estructura.

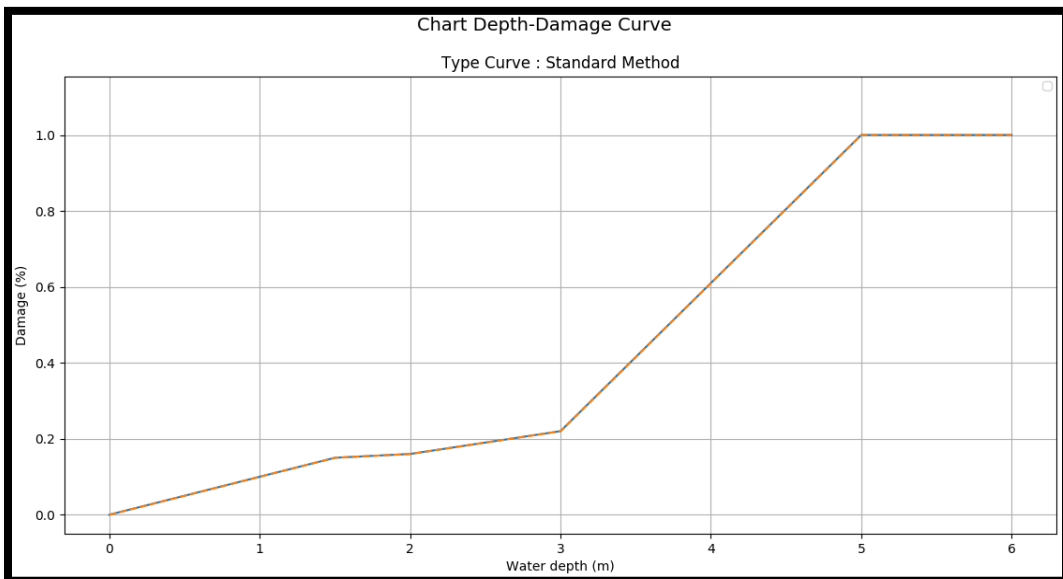


Figura 40 Curva tirante-daño para clasificación “Industrial” coincidiendo la curva para el contenido y la estructura

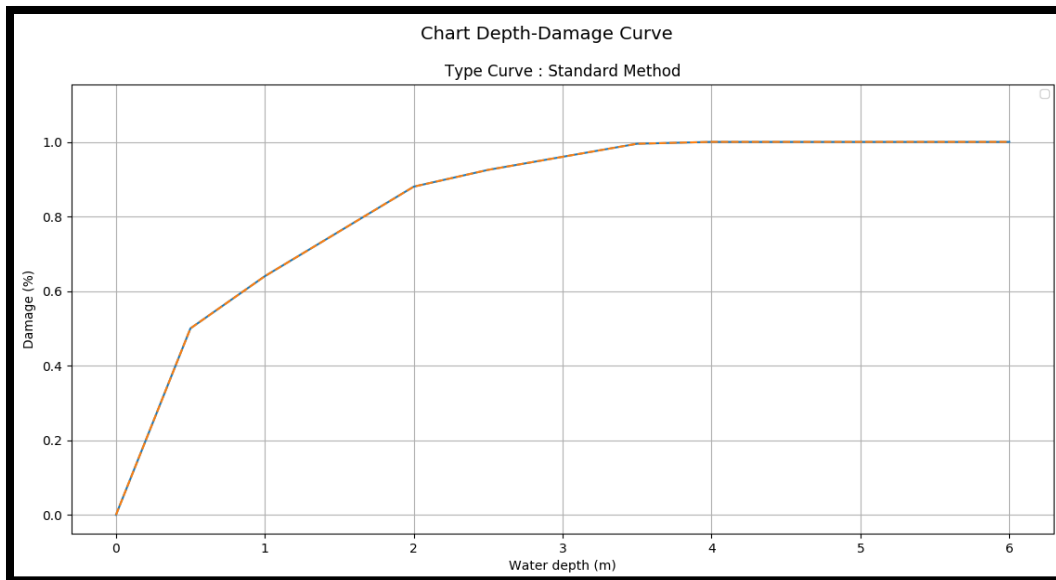


Figura 42 Curva tirante-daño para la clasificación “Agrícola-Seminatural” coincidiendo nuevamente las dos curvas

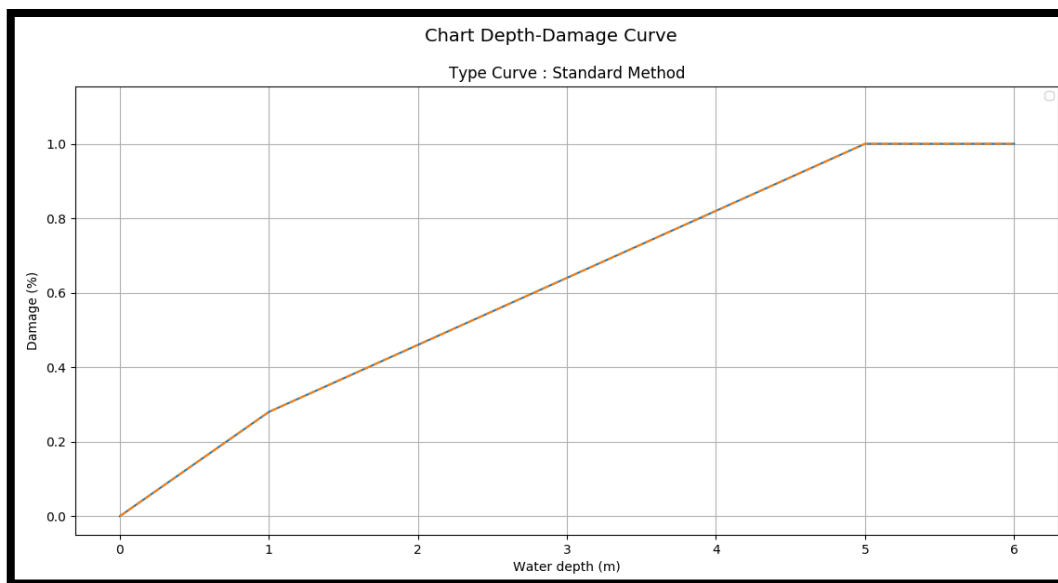


Figura 43 Curva tirante-daño para la clasificación “Camino de alta velocidad y terrenos alledaños” coincidiendo nuevamente las dos curvas

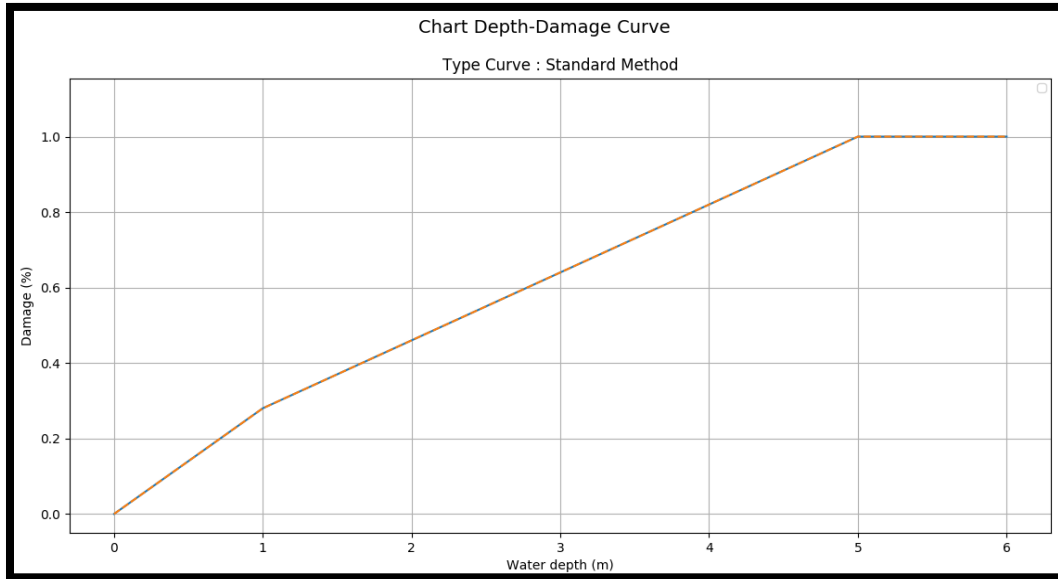


Figura 44 Curva tirante-daño para la clasificación “Otros caminos y terrenos aledaños” coincidiendo nuevamente las dos curvas

Ahora bien, una vez definidos estos parámetros y con los modelos de inundación asociados a un periodo de retorno (modelos de profundidad de inundación) obtenidos anteriormente el software obtendrá los costos directos siendo estos el producto del porcentaje de daño correspondiente a cada tirante y el costo de referencia donde se presenta la inundación. Esto se define en la siguiente expresión según (Escuder Bueno, 2013):

$$CD = \sum_{i=1}^m CD_i = A_{f,i} \cdot PD_i \cdot CR_i$$

Dónde:

CD = Costos directos

A_f = Área afectada

PD = Porcentaje de daños estimado mediante las curvas tirante-daño

CR = Coste de referencia según el uso de suelo

Por lo que el costo directo será la suma de los productos que cada área afectada por el fenómeno de inundación.

3.3.2. Estimación de pérdidas humanas

El potencial de pérdidas humanas que pueden ocurrir durante un fenómeno de inundación depende de diversos factores que según (Escuder Bueno, 2013) son condiciones que pueden afectar a la estabilidad que tiene el peatón como estabilidad al vuelco, deslizamiento o arrastre, así como la posibilidad de quedar atrapado en el interior de vehículos. El software se basa en esta metodología por lo que a continuación se presentarán los factores que definen a esta.

Población en riesgo

Para obtener el potencial de pérdidas será necesario obtener la población que se encuentra en riesgo, lo cual depende de factores como lo son, la densidad de población de la zona y así como los tirantes que se presentan en la zona de inundación. Para esto el software superpone los modelos de inundación, así como la densidad poblacional (considerando la población que habita la zona de manera temporal) proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) e ingresada en un formato tipo SHAPE de modo que es posible conocer las áreas expuestas y posteriormente obtener la población en riesgo mediante el producto de estos dos factores.

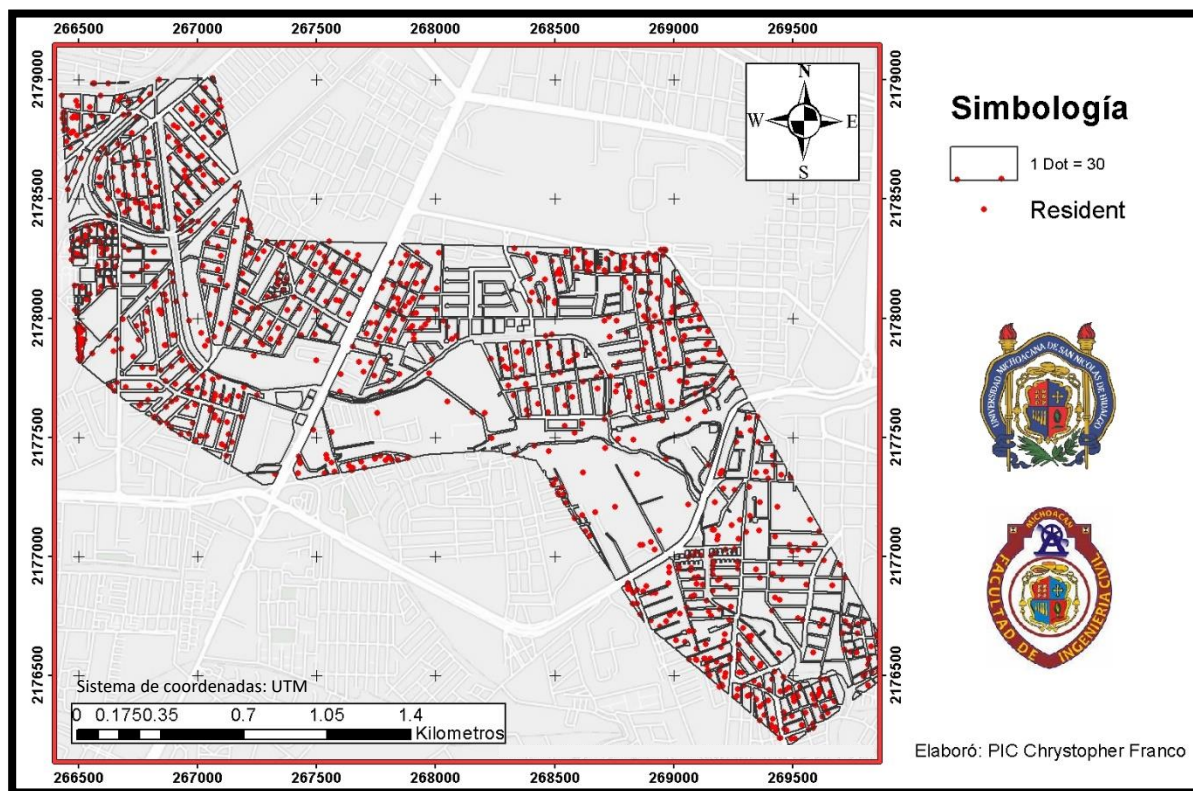


Figura 45 Mapa que representa la densidad poblacional de la zona donde un punto equivale a 30 habitantes

Fatalidades o tasas de mortalidad

Una vez definida la población en riesgo se requiere establecer una tasa de mortalidad característica de la zona, la cuales dependen del tiempo de advertencia (en este caso el tiempo de concentración), la severidad de la inundación, preparación de la población de la zona de riesgo ante un fenómeno de este tipo, así como la preparación y coordinación que exista entre las autoridades.

La severidad de la inundación estará clasificada según (Escuder Bueno, 2013) en tres distintos niveles los cuales son:

- **Severidad baja:** Casos donde no se presentan daños estructurales en edificios ni cimentaciones.
- **Severidad media:** Pueden presentarse daños estructurales, sin embargo, no se espera la destrucción total de la zona.
- **Severidad alta:** Zonas totalmente destruidas por un fenómeno de inundación (zonas que generalmente son destruidas por el fallo de alguna estructura de contención).

Para poder establecer el grado de severidad, se tendrá que definir el parámetro DV que nos ayuda a clasificar con precisión la severidad correspondiente dicho parámetro está dado por la siguiente expresión:

$$DV = \frac{Q_f - Q_{2.33}}{W_{df}}$$

Donde:

Q_f = Es el caudal máximo alcanzado por la avenida.

$Q_{2.33}$ = Es el caudal medio anual en el río.

W_{df} = Ancho alcanzado por la inundación.

Una vez definida la severidad, se procede a establecer una tasa de mortalidad propia de la zona de estudio, para la cual se tendrá que asignar una de las 10 clasificaciones propuestas por el proyecto SUFRI que se basan en factores como la preparación que tiene la población para actuar ante un fenómeno de inundación, la existencia de un Plan de Emergencia de Presa (PEP), o bien un plan de contingencia ante inundaciones, la coordinación entre autoridades y medios de comunicación que alerten a la población en riesgo. A continuación, se presentarán cada una de las categorías que propone el Proyecto SUFRI:

Tabla 12 Descripción de las categorías propuestas por el método SUFRI para la caracterización de la tasa de mortalidad propia de la zona de estudio

Categoría	Descripción
C1	No existe formación a la población
	No se dispone de sistema de aviso ni PEP
	No hay coordinación entre servicios de emergencia y autoridades
	No existen medios de comunicación a la población
C2	No existe formación a la población
	No se dispone de PEP, aunque existen otros sistemas de aviso
	No hay coordinación entre servicios de emergencia y autoridades
	No existen medios de comunicación a la población
C3	No existe formación a la población
	Existe PEP, pero no se ha implantado
	Existe coordinación entre servicios de emergencia y autoridades (no existen protocolos)
	No existen medios de comunicación a la población
C4	No existe formación a la población
	PEP implantado con sistemas de aviso correspondientes
	Existe coordinación entre servicios de emergencia y autoridades, protocolos de comunicación
	No existen medios de comunicación a la población
C5	No existe formación a la población
	PEP implantado con sistemas de aviso correspondientes
	Coordinación entre servicios de emergencias y autoridades
	Medios de comunicación a la población (sin comprobar)
C6	No existe formación a la población
	PEP implantado con sistemas de aviso correspondientes
	Coordinación entre servicios de emergencias y autoridades
	Medios de comunicación a la población implantados
C7	Formación a la población
	PEP implantado con sistemas de aviso
	Coordinación entre servicios de emergencias y autoridades
	Medios de comunicación a la población implantados
	***Si se produce rotura instantánea en 'C8', 'C9' y 'C10'
C8	Formación a la población
	PEP implantado con sistemas de aviso
	Coordinación entre servicios de emergencias y autoridades
	Medios de comunicación a la población implantados
C9	Formación a la población
	PEP implantado. Simulacros o PEP empleado prev.
	Alta coordinación entre servicios de emergencias y autoridades
	Medios de comunicación a la población implantados
C10	Planes de formación continua a la población
	PEP implantado. Simulacros o PEP empleado prev.
	Alta coordinación entre servicios de emergencias y autoridades
	Medios de comunicación a la población implantados

Tabla 13 Valores de tiempo de aviso y severidad para cada una de las categorías mencionadas anteriormente

Categoría	Tiempo de aviso (horas)	Severidad Alta (3)	Severidad Media (2)	Severidad Baja (1)
C1	0	0.9	0.3	0.02
	0.25	0.9	0.3	0.02
	0.625	0.7	0.08	0.015
	1	-	0.06	0.0006
	1.5	-	0.0002	0.0002
	24	-	0.0002	0.0001
C2	0	0.9	0.3	0.02
	0.25	0.9	0.3	0.02
	0.625	0.675	0.075	0.014
	1	-	0.055	0.00055
	1.5	-	0.0002	0.0002
	24	-	0.0002	0.0001
C3	0	0.9	0.3	0.02
	0.25	0.85	0.2	0.015
	0.625	0.6	0.07	0.012
	1	-	0.05	0.0005
	1.5	-	0.0002	0.0002
	24	-	0.0002	0.0001
C4	0	0.9	0.3	0.02
	0.25	0.75	0.15	0.01
	0.625	0.5	0.04	0.007
	1	-	0.03	0.0003
	1.5	-	0.0002	0.0002
	24	-	0.0002	0.0001
C5	0	0.9	0.3	0.02
	0.25	0.75	0.15	0.01
	0.625	0.5	0.0375	0.0065
	1	-	0.0275	0.000275
	1.5	-	0.0002	0.0002
	24	-	0.0002	0.0001
C6	0	0.9	0.3	0.02
	0.25	0.75	0.15	0.01
	0.625	0.475	0.035	0.006
	1	-	0.025	0.00025
	1.5	-	0.0002	0.0002
	24	-	0.0002	0.0001
C7	0	0.9	0.3	0.02
	0.25	0.65	0.1	0.0075
	0.625	0.4	0.02	0.002
	1	-	0.01	0.0002
	1.5	-	0.0002	0.0002
	24	-	0.0002	0.0001
C8	0	0.9	0.3	0.02
	0.25	0.55	0.06	0.006
	0.625	0.35	0.01	0.0015
	1	-	0.005	0.00015
	1.5	-	0.0002	0.00015
	24	-	0.0002	0.0001
C9	0	0.9	0.3	0.02
	0.25	0.55	0.06	0.006
	0.625	0.35	0.008	0.0015
	1	-	0.004	0.000125
	1.5	-	0.0002	0.0001
	24	-	0.0002	0.0001
C10	0	0.9	0.3	0.02
	0.25	0.5	0.03	0.005
	0.625	0.3	0.005	0.001
	1	-	0.002	0.0001
	1.5	-	0.0002	0.0001
	24	-	0.0002	0.0001

Para nuestro caso de estudio se realizaron las simulaciones correspondientes a las categorías C2, C3, C4, y C5. Una vez definido esto se procede a determinar las fatalidades o tasas de mortalidad mediante el uso de los valores presentados anteriormente.

Ya que se conoce la cantidad de población expuesta, así como la tasa de mortalidad característica de esta, es momento de estimar el potencial de pérdidas humanas, dada por la siguiente expresión:

$$N = \sum_{i=1}^m PR \cdot FR$$

Dónde:

N = Potencial de pérdidas humanas.

PR = Población expuesta.

FR = Fatalidades o tasa de mortalidad.

m = Categorías de uso de suelo establecidas.

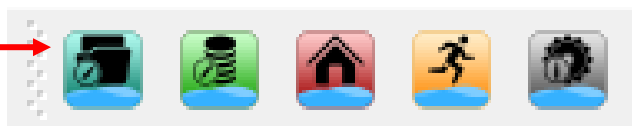
3.3.3. Modelación en FloodRisk Plugin

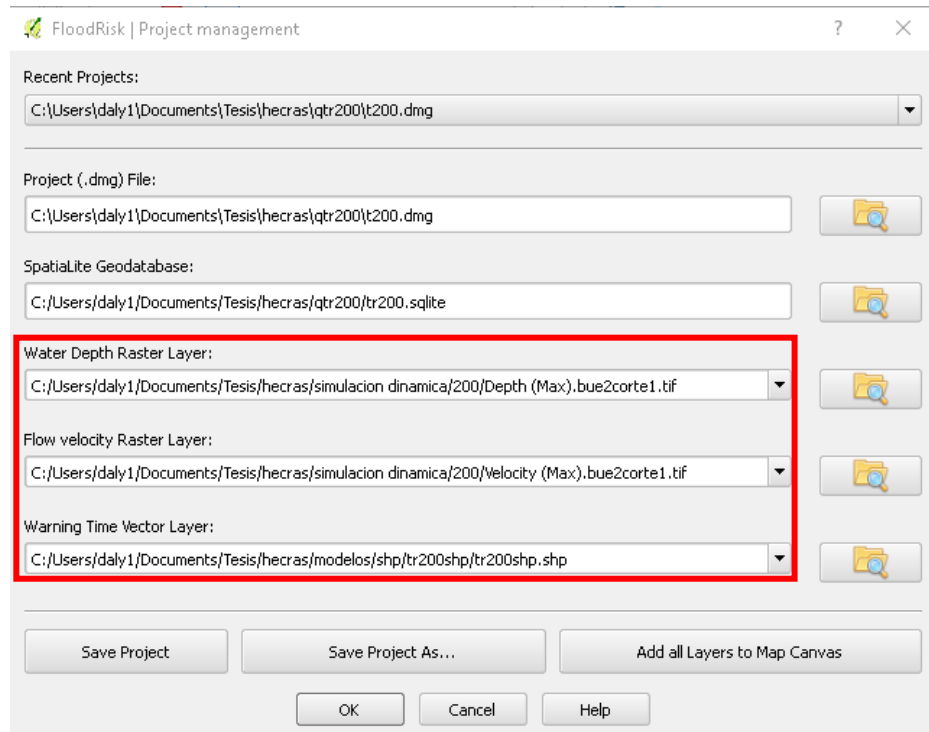
Ya que se conoce el funcionamiento del software, se explicará de manera breve los pasos a seguir para realizar estimación de riesgo de manera automatizada, para lograr así cálculos más precisos, sencillos y un tiempo de cálculo menor.

Ingreso de datos correspondientes a la amenaza

Como primer paso se ingresarán los modelos de inundación asociados a un periodo de retorno, previamente realizados en el software HEC-RAS ©, con modelos nos tanto al archivo raster que describe los tirantes que alcanza la inundación, así como el archivo que describe las velocidades alcanzadas en cada zona.

En la pantalla principal se elige la opción "Project" para ingresar los modelos de inundación





Una vez cargados los modelos, así como como el archivo en formato SHAPE que indica el tiempo de aviso (en este caso al no contar con este, se utilizó el tiempo de concentración calculado en el estudio Hidrológico) se procederá a ingresar los datos de vulnerabilidad y exposición.

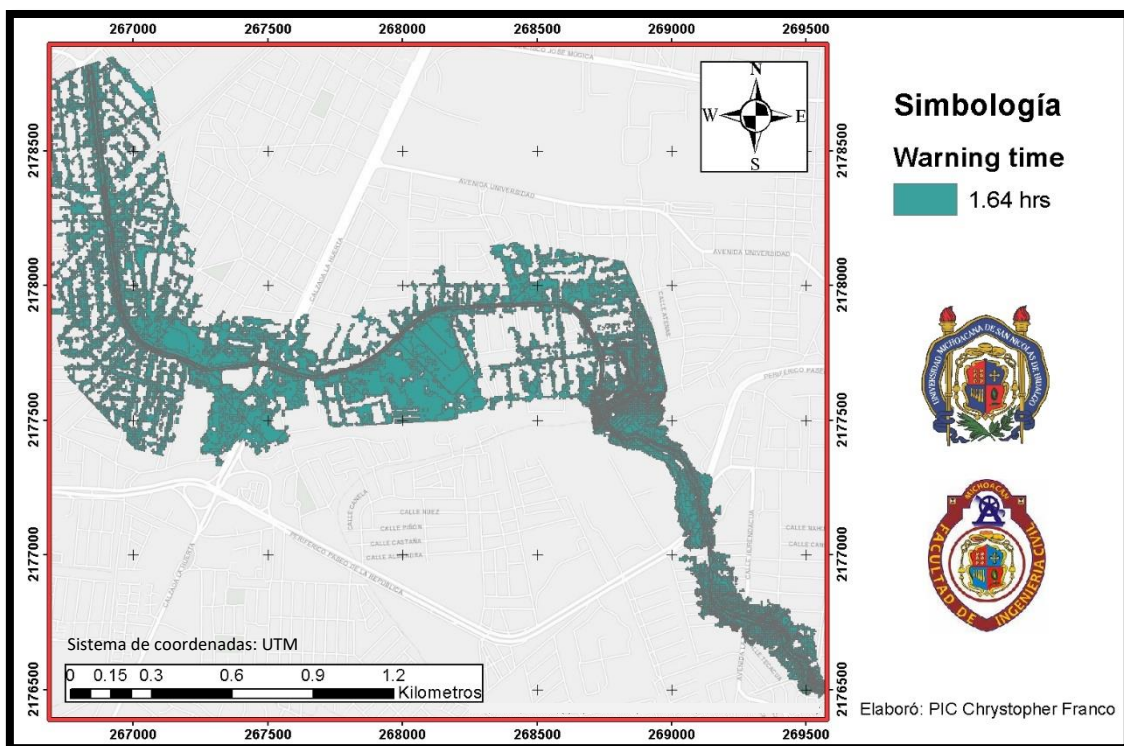
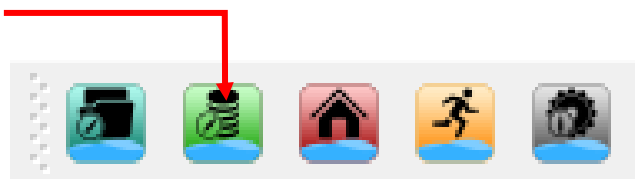


Figura 46 Tiempo de aviso o alerta para la zona de estudio en formato SHAPE

Ingresos de datos de vulnerabilidad

En este paso se ingresarán los datos que ayudarán a la caracterización de la vulnerabilidad del sistema, estos se ingresarán en archivos tipo CSV (Valores Separados por Comas), los cuales son los parámetros que el software deberá seguir para dar características a la zona de estudio, es decir la base teórica para que el software trabaje de manera adecuada.

Para el ingreso de estos datos se seleccionará el ícono que se indica



En la ventana que se despliega se procede a cargar dentro de la base de datos creada anteriormente los datos de vulnerabilidad en formato CSV.

Import alphanumeric input data

☐ Select all data

Occupancy Type:
☐

List of Depth-Damage Curves:
☐

Depth-Damage Curves:
☐

Fatality Rate:
☐

Flood Severity:
☐

Ingreso de datos de exposición

Una vez ingresada la base teórica del software, se procede a subir los datos de exposición, es decir los datos característicos de la zona que está bajo riesgo para que así se puedan realizar las estimaciones del potencial del riesgo. Estos datos serán:

- El archivo en formato SHAPE que indica la cantidad de población que habita en la zona, así como un archivo en formato CSV que indica el número de población que habita cada manzana que conforma al archivo SHAPE.
- El archivo en formato SHAPE que indica los costes de referencia de los edificios de la zona de estudio.
- El archivo en formato SHAPE que indica los costes de referencia de la infraestructura de la zona.

Estos datos se ingresarán de manera simular que los datos de vulnerabilidad sólo que en distinto apartado.

Import input layers

Analysis Area: ☐

☐ Select all data

Census Data Layer: ☐

Census Data Table:

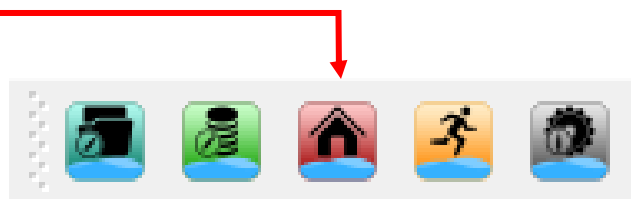
Property Polygon Vector Layer: ☐

Infrastructures Line Vector Layer: ☐

Una vez cargados esta información en la base de datos del software se procedió a realizar la estimación del riesgo, comenzando por la estimación de pérdidas económicas y posterior a esto la estimación de pérdidas humanas.

Estimación de pérdidas económicas

Para comenzar con este proceso se seleccionará el menú “Damage Assessment”



FloodRisk | Direct Economic Damages

Set Input Data

Project (.dmg) File:
C:\Users\daly1\Documents\Tesis\hecras\qtr200\t200.dmg

Spatialite Geodatabase:
C:/Users/daly1/Documents/Tesis/hecras/qtr200/tr200.sqlite

Water Depth Raster Layer:
C:/Users/daly1/Documents/Tesis/hecras/simulacion dinamica/200/Depth (Max).bue2corte1.tif

Charts

Set Depth-Damage Curves Type: Standard Method

Output Data

Economic Damage Layer:
C:/Users/daly1/Documents/Tesis/hecras/simulacion dinamica/200/Depth (Max)_dmg.tif

Vulnerability Layer:
C:/Users/daly1/Documents/Tesis/hecras/simulacion dinamica/200/Depth (Max)_vuln.tif

Global Summary Table:
C:/Users/daly1/Documents/Tesis/hecras/simulacion dinamica/200/Depth (Max)_dmg.csv

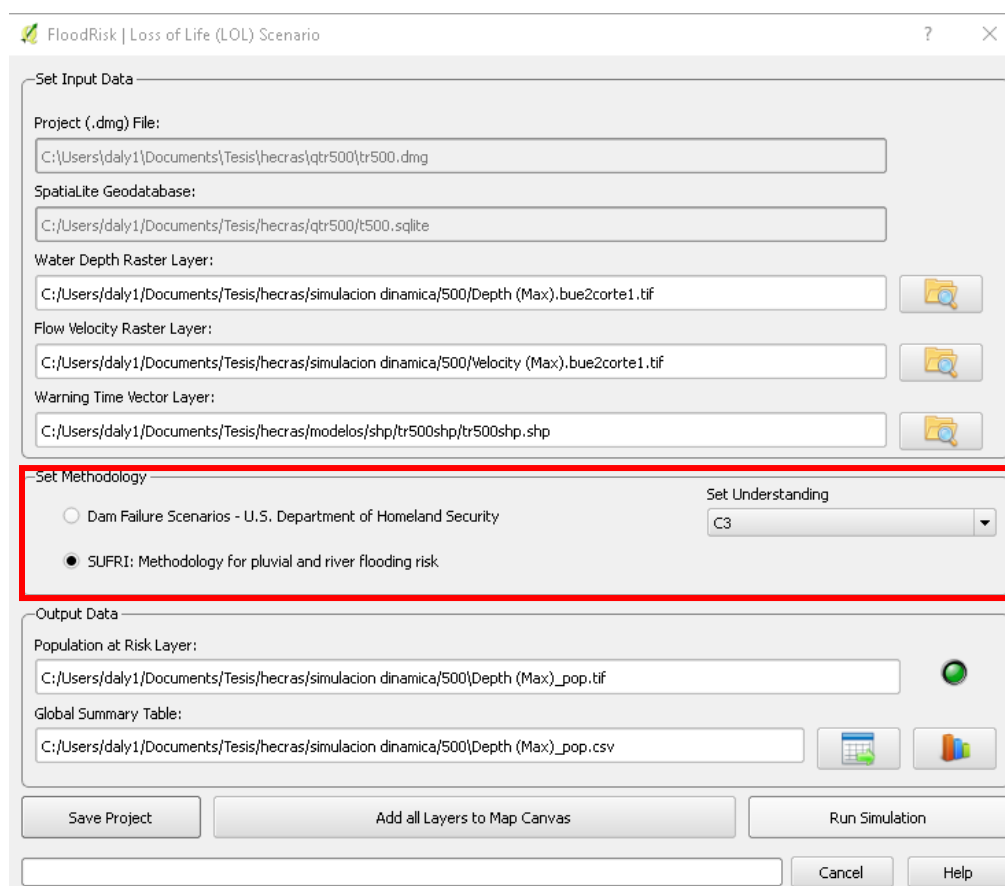
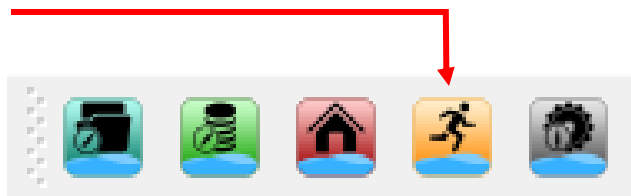
Save Project Add all Layers to Map Canvas Run Simulation

Cancel Help

Una vez en el menú se elegirán las curvas tirante daño con las que trabajará el software y se correrá la simulación, una vez realizado el proceso, el software arrojará tres archivos, que indicarán datos cómo: Porcentaje de daño en cada zona y pérdidas económicas de cada área.

Estimación de pérdidas humanas

Para comenzar con este proceso se seleccionará el menú “Population Consequences Assessment”



Una vez dentro del menú se seleccionará la categoría correspondiente para definir la tasa de mortalidad propuesto por el método SUFRI ya que nuestro caso de estudio no corresponde a la falla de una estructura hidráulica como lo es una presa, una vez hecho la selección adecuada se procede a correr la simulación. Una vez finalizada la simulación el software arrojará dos archivos que describirán la cantidad de población en riesgo, así como el potencial de pérdidas humanas.

4. Resultados

Los resultados obtenidos para cada periodo de retorno fueron un conjunto de **5 archivos**, de los cuales 3 son archivos en formato TIF y dos de ellos en formato CSV para su lectura en QGIS y Excel respectivamente. Dichos archivos almacenan la siguiente información:

- **Pérdidas económicas:** Las pérdidas económicas debidas al fenómeno de inundación estarán dadas por dos archivos de salida, el primero es un archivo en formato TIF de dos bandas que contiene las pérdidas económicas por metro cuadrado (pesos/m²), de las estructuras de la zona y del contenido en estas en función del **uso de suelo**. El segundo será una tabla en formato CSV que almacena las pérdidas económicas totales de la zona, el valor económico de las estructuras de la zona y sus contenidos, así como el área afectada por el fenómeno. Además, se obtuvieron histogramas que describen el daño en la zona asociados a cada periodo de retorno.
- **Porcentaje de daño:** El daño provocado tanto a estructuras como su contenido de la zona afectada por la inundación es representada por un archivo en formato TIF de dos bandas representando el porcentaje de daño estructural y de contenidos respectivamente.
- **Pérdidas humanas:** Como resultado se tendrá como en los casos anteriores un archivo en formato TIF de dos bandas donde la primera banda representará la población en riesgo en unidades de densidad (hab/km²) y la segunda banda mostrará las pérdidas de vida potenciales, de igual manera estará dada en unidades de densidad (hab/km²) además de la obtención de un archivo en formato CSV que indica las pérdidas de vida en función de los tirantes alcanzados por la inundación en cada zona afectada. De manera similar como se obtuvo en las pérdidas económicas se obtuvo un histograma que explica de manera grafica la relación existente entre los tirantes que presenta la inundación, la población en riesgo y la pérdida de vidas.

Además de esto, se obtuvieron histogramas de gran practicidad para el análisis de la inundación, ya que ayudan a identificar de mane gráfica cuáles son las zonas más golpeadas por el fenómeno de inundación, estos histogramas los genera el software de manera automática. A continuación, se mostrará lo dicho en este capítulo para los periodos de retorno de **50 y 100 años** para las categorías **C3, C5 y C7**, cabe señalar que tanto pérdidas económicas cómo porcentajes de daños y población en riesgo no varían para cada categoría ya que estas dependen de variables relacionadas con las características hidráulicas de la inundación como son tirante y velocidad de esta por lo que sólo cambiarán los potenciales de pérdida de vidas.

Se le recuerda al lector que todos los mapas y tablas obtenidas para cada periodo de retorno se encuentran en el anexo de este trabajo para consulta del interesado.

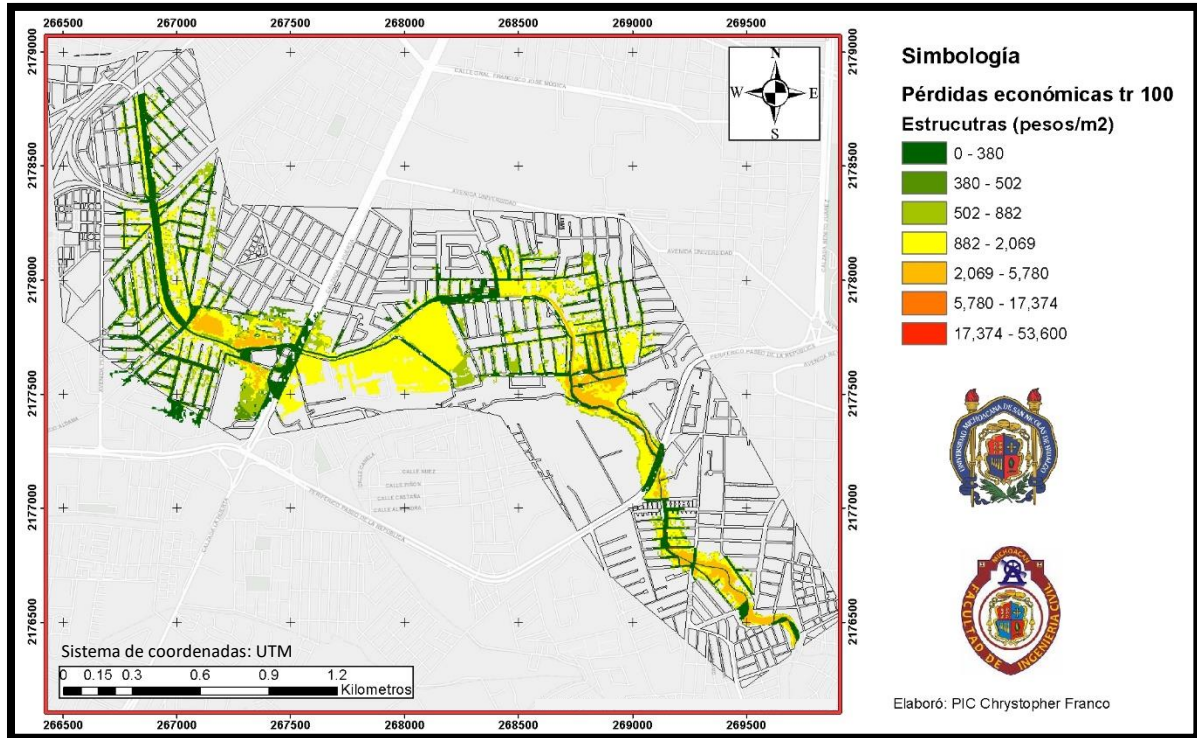


Figura 48 Mapa que establece las pérdidas económicas para las estructuras de la zona Tr 100 años

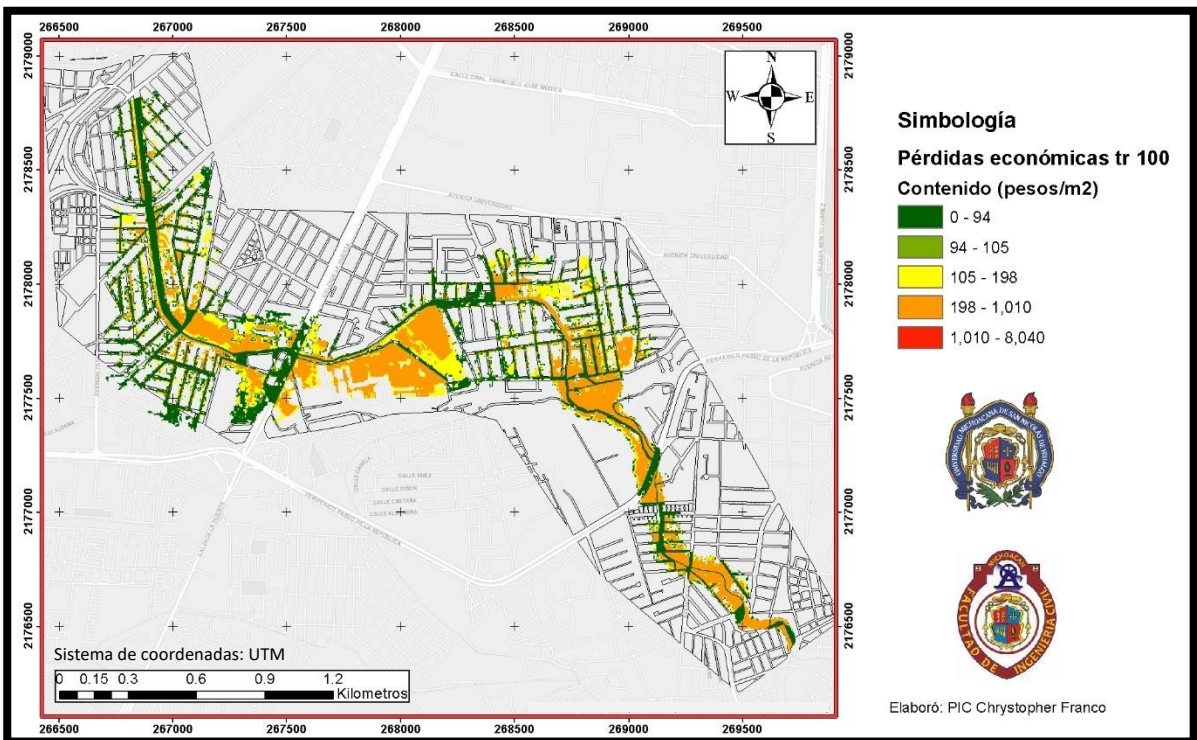


Figura 47 Mapa que establece las pérdidas económicas para el contenido de la zona Tr 100 años

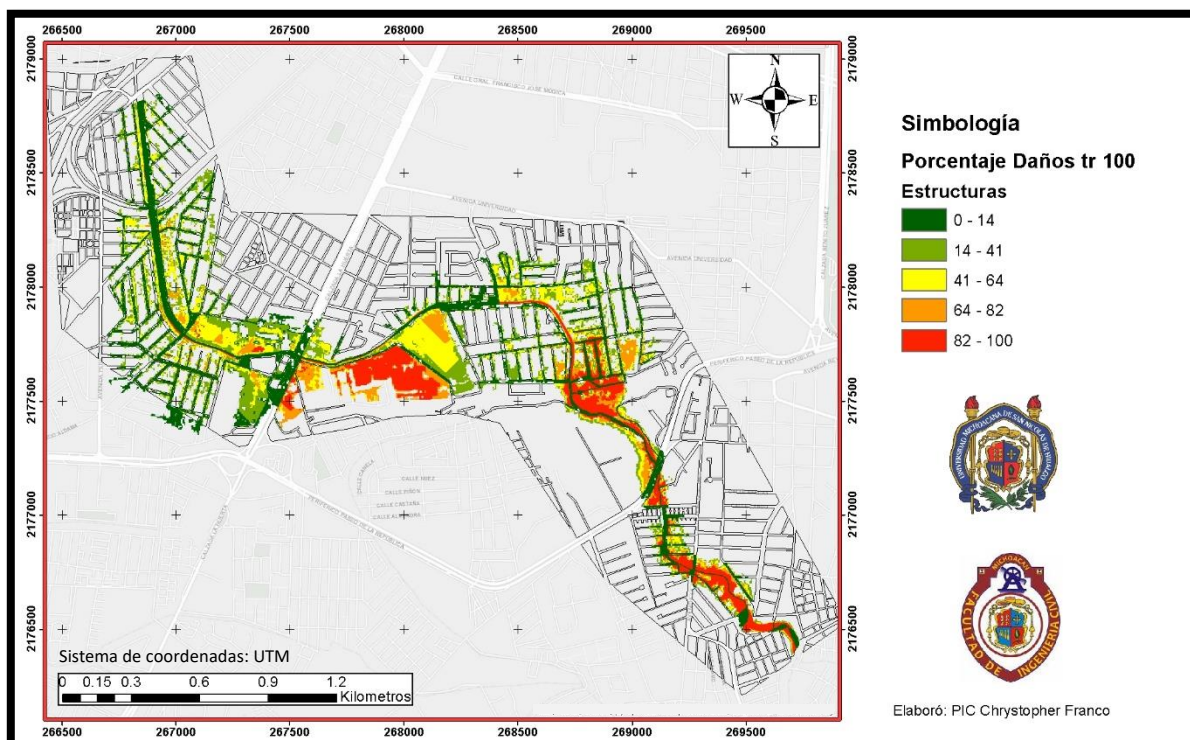


Figura 50 Mapa que contiene el porcentaje de daños en las estructuras de la zona Tr 100 años

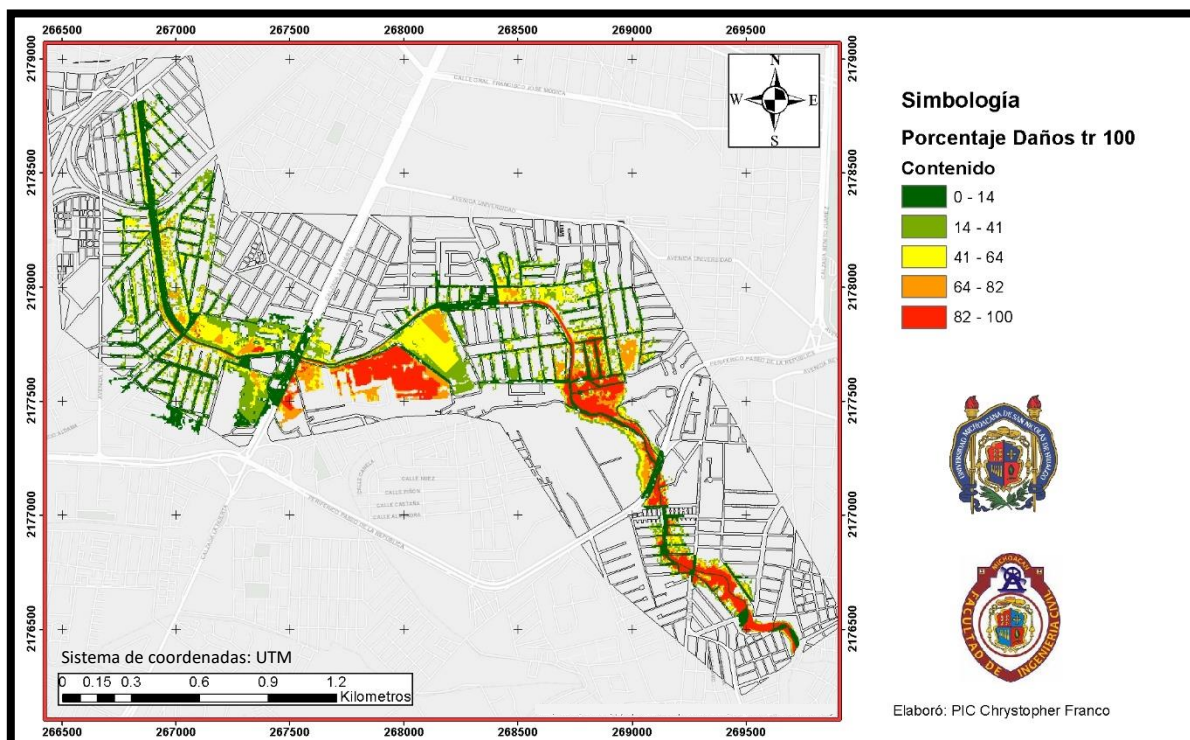


Figura 49 Mapa que contiene el porcentaje de daños en los contenidos de la zona Tr 100 años

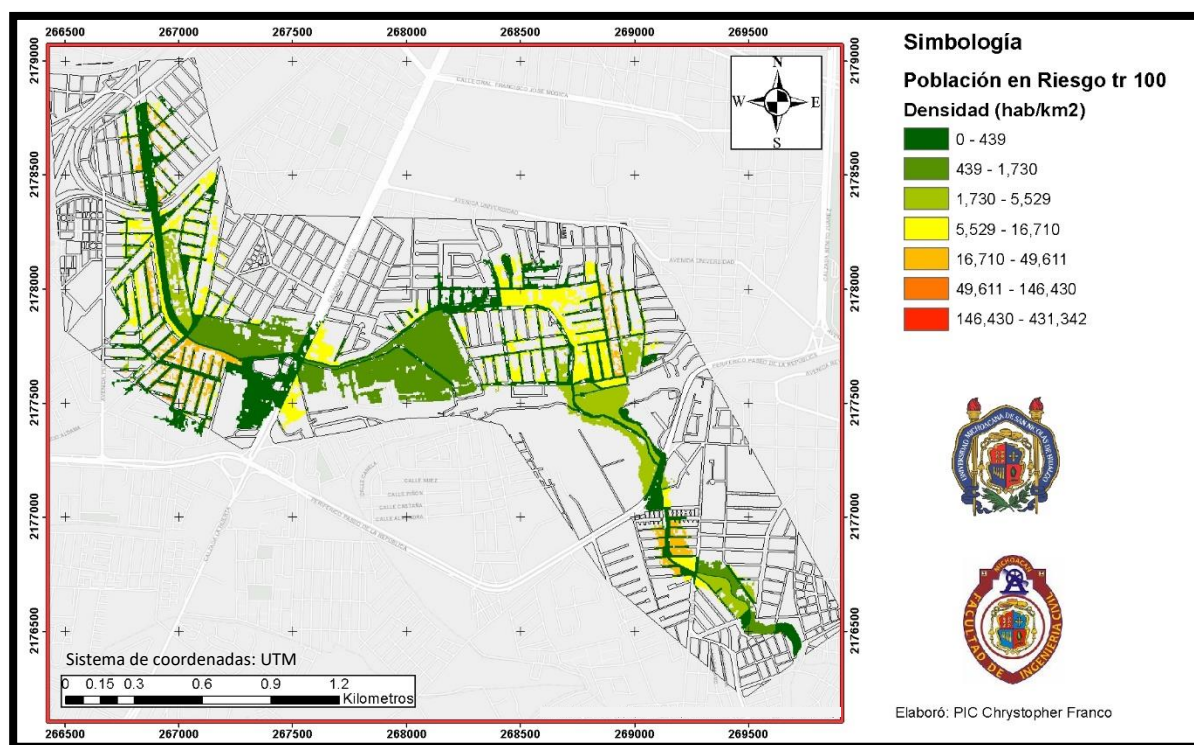


Figura 52 Densidad de población en riesgo en la zona de estudio Tr 100 años

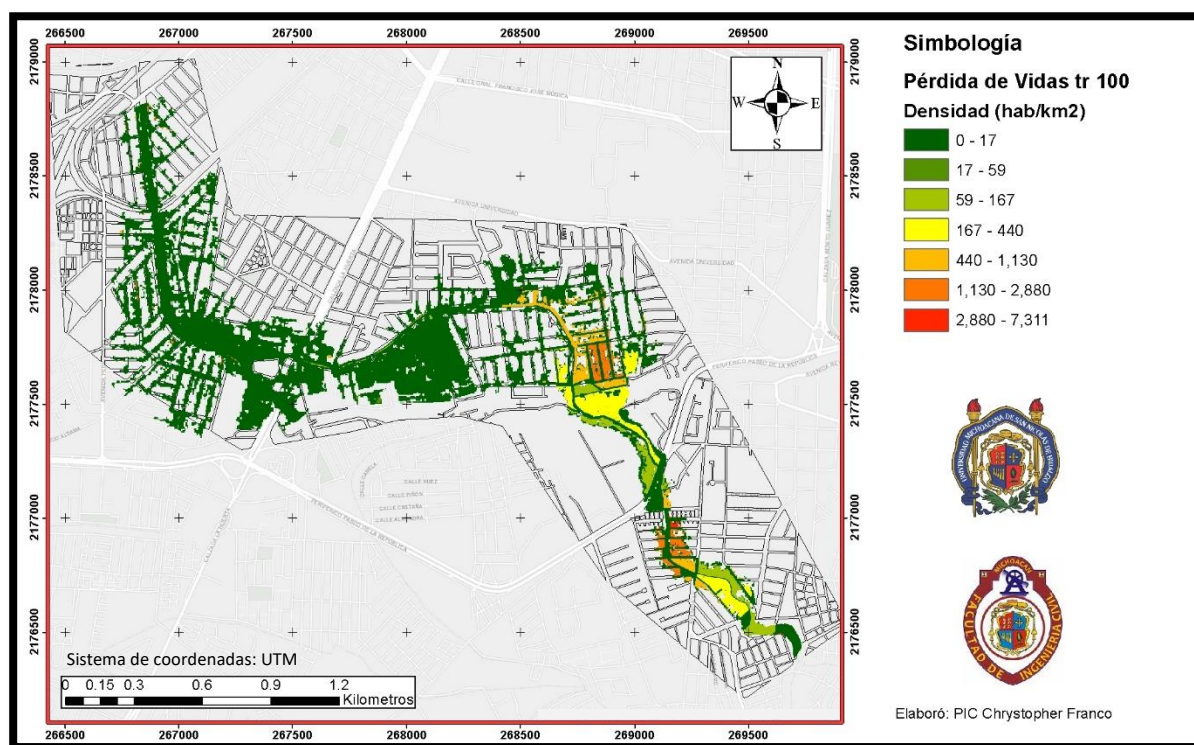


Figura 51 Densidad de pérdidas humanas en la zona de estudio Tr 100 años

Tabla 14 Pérdidas económicas por uso de suelo en la zona de estudio para un Tr 100 años

Tr 100						
Code	Uso de suelo	Área (m ²)	Valor estructural (pesos)	Valor del contenido (pesos)	Daños estructurales (pesos)	Daños del contenido (pesos)
11100	Tejido urbano continuo (densidad > 80%)	448100	\$ 1,096,516,000.00	\$164,454,700.00	\$591,336,900.00	\$ 88,688,400.00
12100	Industrial	84500	\$ 342,582,000.00	\$ 51,404,300.00	\$116,603,200.00	\$ 17,496,300.00
12210	Caminos de alta velocidad y terrenos aledaños	900	\$ 50,303,600.00	\$ 7,545,500.00	\$ 25,032,700.00	\$ 3,754,900.00
12220	Otros caminos y terrenos aledaños	11000	\$ 440,227,300.00	\$ 66,034,500.00	\$252,569,500.00	\$ 37,885,400.00
20000	Zonas agrícolas, áreas seminaturales y humedales	85600	\$ 173,208,400.00	\$ 25,942,700.00	\$142,009,600.00	\$ 21,269,800.00

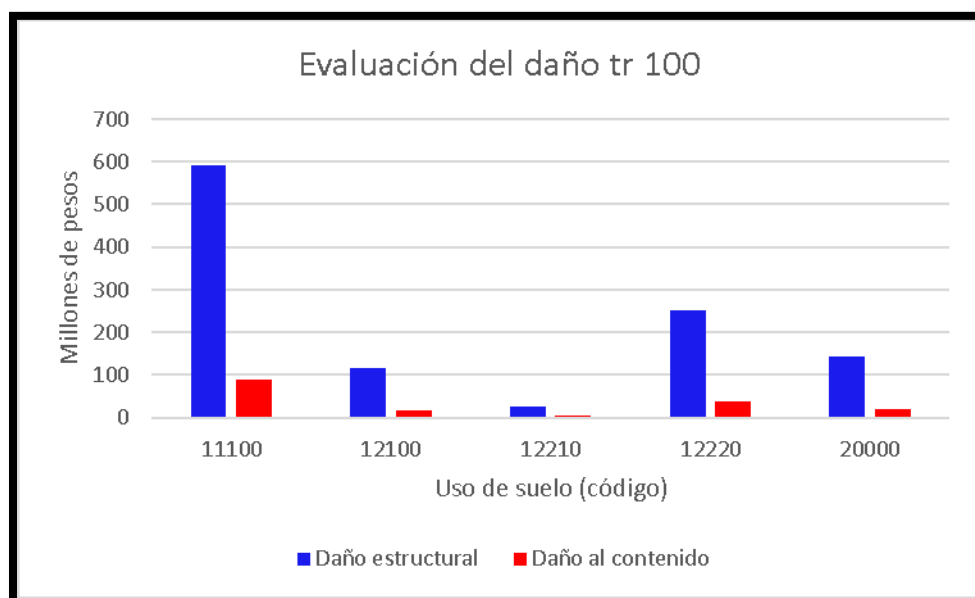


Figura 53 Histograma de pérdidas económicas por uso de suelo en la zona de estudio para un Tr 100 años

Tabla 15 Datos correspondientes a la población en riesgo y pérdida de vidas considerando residentes temporales y residentes además para las categorías C3, C5, C7.

Tr 100 años C3					
Tirante (m)	Área inundada (m2)	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	179686	922	55	977	5
1.0-2.0	231798	846	55	901	11
2.0-3.0	212869	653	43	696	11
3.0-4.0	127512	376	28	404	13
>4	179619	490	36	526	34
Total	931484	3287	217	3504	74

Tr 100 años C5					
Tirante (m)	Área inundada (m2)	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	179686	922	55	977	3
1.0-2.0	231798	846	55	901	6
2.0-3.0	212869	653	43	696	6
3.0-4.0	127512	376	28	404	6
>4	179619	490	36	526	17
Total	931484	3287	217	3504	37

Tr 100 años C7					
Tirante (m)	Área inundada (m2)	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	179686	922	55	977	1
1.0-2.0	231798	846	55	901	3
2.0-3.0	212869	653	43	696	3
3.0-4.0	127512	376	28	404	3
>4	179619	490	36	526	10
Total	931484	3287	217	3504	20

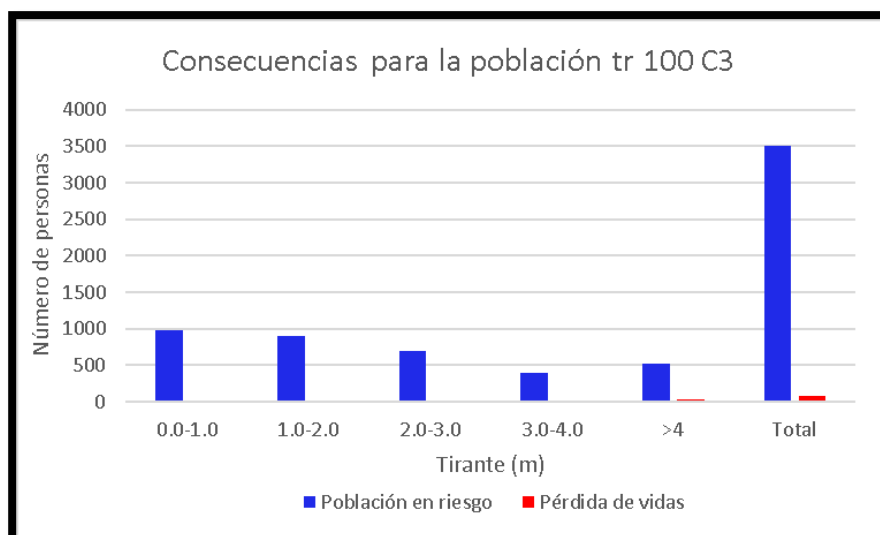


Figura 54 Histograma de consecuencias para la población para la categoría C3 y un Tr 100 años

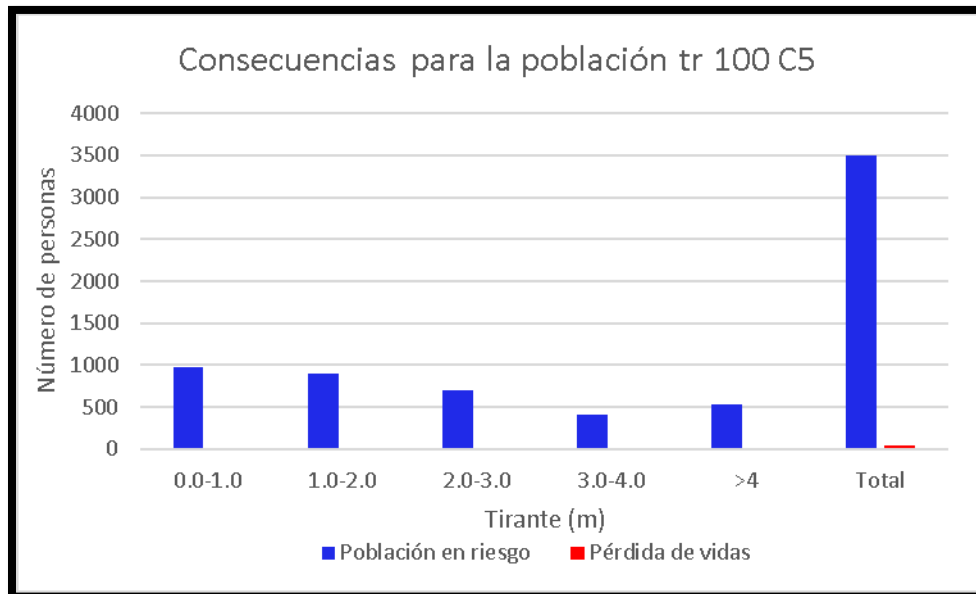


Figura 56 Histograma de consecuencias para la población para la categoría C5 y un Tr 100 años

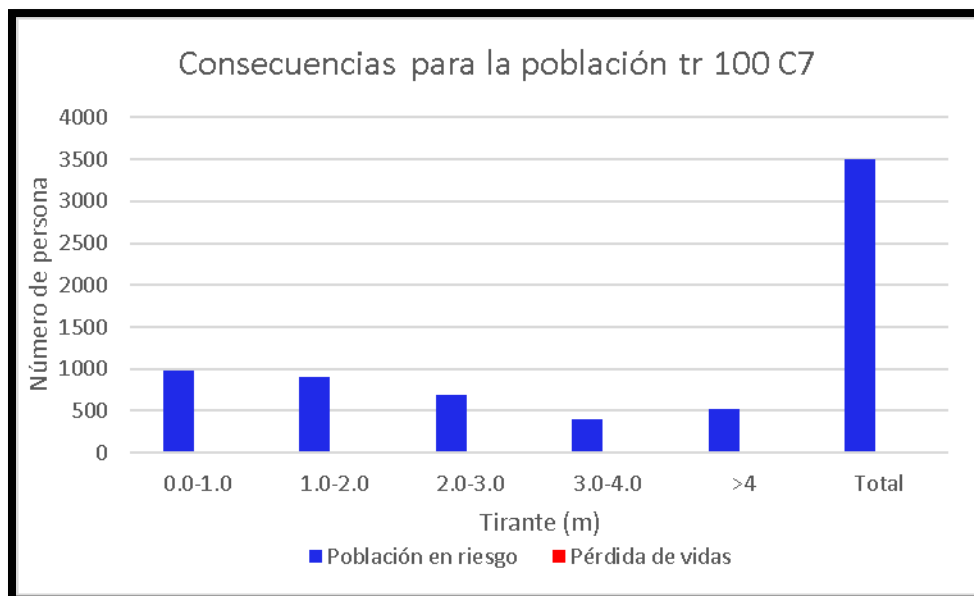


Figura 55 Histograma de consecuencias para la población para la categoría C7 y un Tr 100 años

5. Conclusiones

Mediante el análisis de los resultados obtenidos haciendo uso del software FloodRisk Plugin. Este trabajo de investigación ha logrado cuantificar de manera exitosa los riesgos potenciales durante un evento de inundación del dren Arroyo de Tierras, además de esto fue posible realizar la caracterización de la zona con fin de reconocer las zonas más vulnerables ante este tipo de fenómenos naturales, todo esto de una manera simplificada que ayuda a reducir los tiempos en que este tipo de proyectos son desarrollados. Se puede resumir en tres puntos las conclusiones a las que se llegaron con este trabajo, las cuales presentaremos en los siguientes párrafos:

1. Se logró comprobar la eficacia que tienen las medidas no estructurales en orden de eliminar o reducir los riesgos que se puedan presentar sobre la población a raíz de un fenómeno de inundación cómo el que se presentó en este caso. Para entender esto de una manera más simple se presenta la siguiente gráfica:

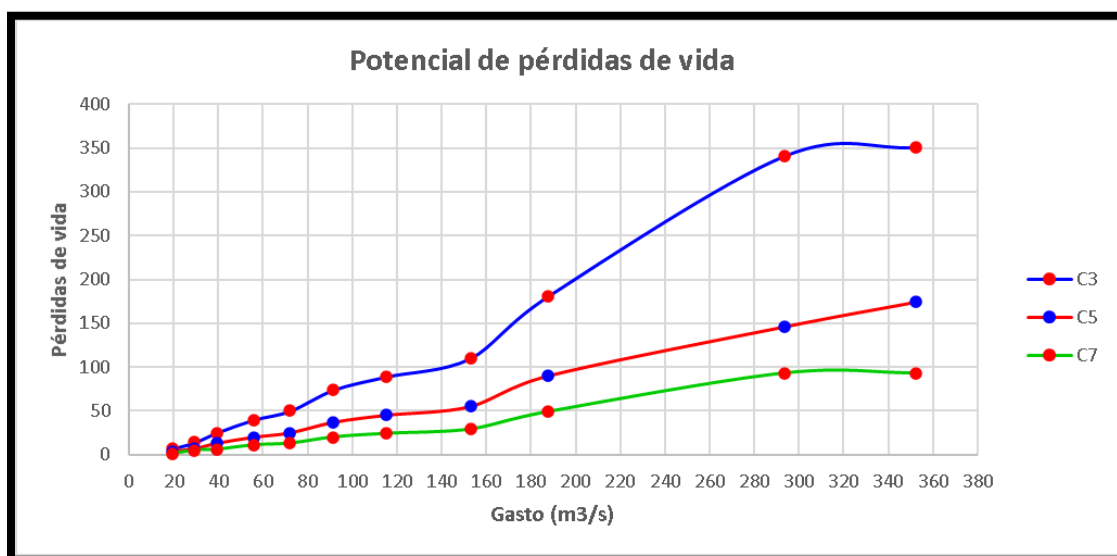


Figura 57 Comparación entre las pérdidas de vida para cada gasto asociado a un periodo de retorno y la diferencia existente entre cada tasa de mortalidad.

De entrada, es notable que, aunque no exista formación a la población en cuanto al procedimiento que se debe tomar en caso de un fenómeno de inundación pero existe un **plan de emergencia** que habilite sistemas de aviso temprano y aunado a esto exista **coordinación** entre las autoridades y los servicios de emergencias como lo es la categoría C5, hablaremos de una diferencia muy cercana al 50% de pérdidas humanas pues el poder tomar una decisión temprana podrá poner a salvo a la población de la zona. Ahora si se considera dar **formación** a la población vulnerable y que se encuentre bajo una constante amenaza como lo indica la categoría la categoría C7, se puede lograr una reducción promedio a la categoría C5 aproximada al 50%. Por tanto, se puede afirmar que las **medidas no estructurales** tendrán un gran peso en

la reducción de riesgos por inundación siendo una opción viable para zonas en las que hay pocos recursos para invertir en medidas estructurales de alto costo.

2. Mientras no **existan medidas estructurales** que ayuden a controlar un fenómeno de demasías las pérdidas económicas serán sumas de gran valor y estarán en función de los edificios que se encuentren en la zona o sea en otras palabras de los distintos usos de suelo además mientras más grande sea el área afectada por la inundación hablaremos de pérdidas económicas mayores (así como pérdidas humanas). Conocer cómo será afectada una zona en cuanto pérdidas económicas pueden ser de gran utilidad para las autoridades para determinar los tipos de obras que se pueden implementar ya que ayudarán a realizar un análisis **costo-beneficio** y así sea más fácil justificar el uso de medidas estructurales para la mitigación de inundaciones. Así mismo se observó que las pérdidas económicas como se esperaba, siempre serán mayores en cuanto a valores estructurales que los valores del contenido de estas y se observa además que conforme aumenta el gasto estas pérdidas relacionadas al contenido de las estructuras, tenderá a ser una línea recta por lo ya no existirán aumentos importantes. A continuación, se presentará de manera gráfica el resumen de pérdidas económicas correspondientes a los gastos asociados a cada periodo de retorno que se presentan en la zona:

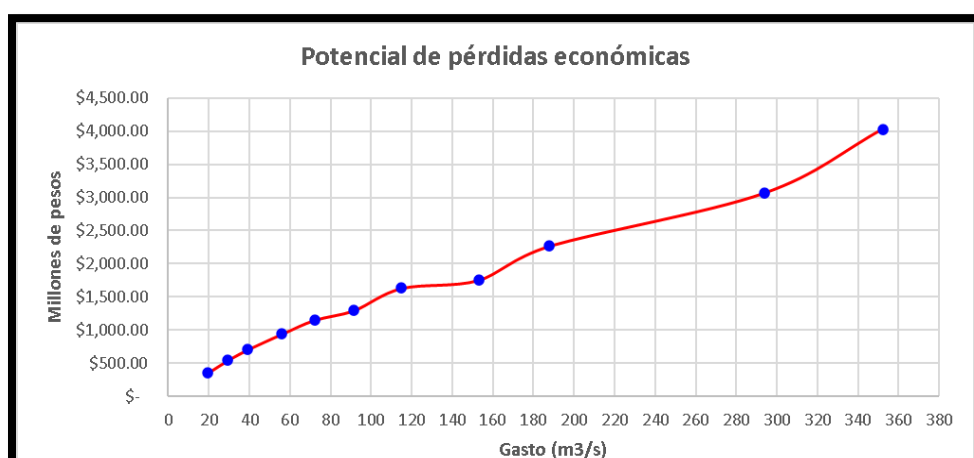


Figura 59 Pérdidas económicas asociadas a cada gasto correspondiente a un periodo de retorno

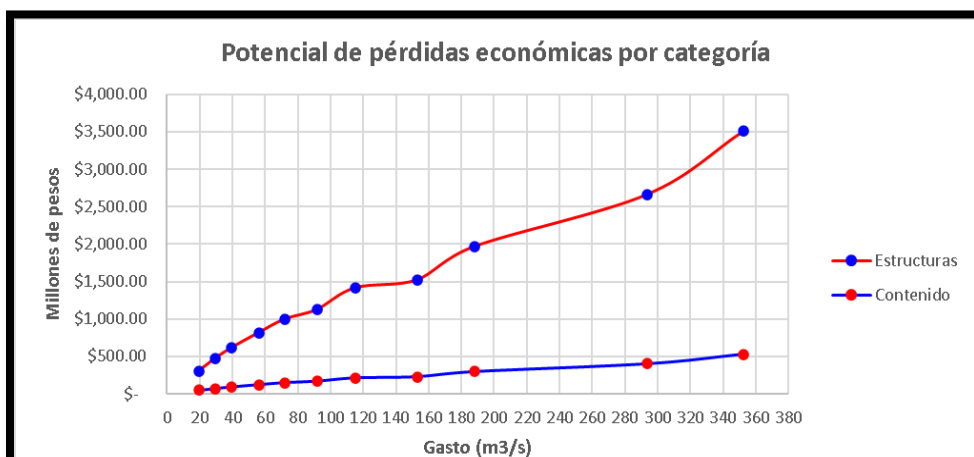


Figura 58 Comparativa entre pérdidas económicas asociadas a las estructuras y al contenido

3. Como se mencionó se logró con éxito la caracterización de las zonas más vulnerables dentro del área de estudio y éstas fueron las correspondientes a la categoría de **“Tejido urbano continuo (densidad >80%)”** con el código correspondiente **11100** ya que se pudo observar que la mayoría de los daños o pérdidas económicas se concentraron dentro de esa que es la que predomina en la zona de estudio. Se obtuvo de igual manera que las vías de comunicación tendrán un daño menor, por lo que se ayudarán a la recuperación pronto de la zona ya que permitirá el acceso tanto de los cuerpos de rescate y protección civil como equipos de maquinaria que ayuden a la rehabilitación de las zonas afectadas.

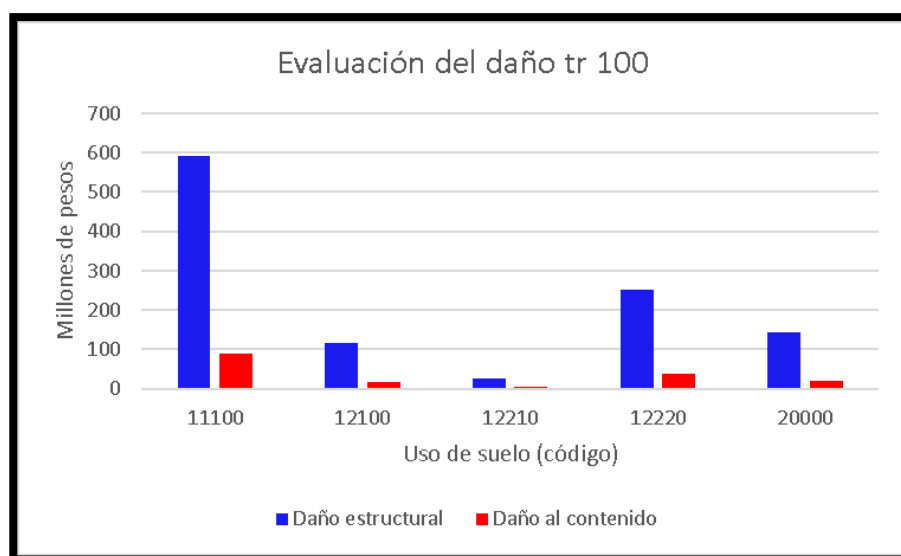


Figura 60 Histograma de pérdidas económicas en estructuras y su contenido de acuerdo al uso de suelo

Por último, es de gran importancia la implementación de este software en el análisis de riesgos por inundación ya que simplifica en gran medida las estimaciones que se tendrían que realizar manualmente, abriendo de igual forma la posibilidad de simular distintos escenarios para ayudar a la toma de decisión de quienes sean responsables. Cabe mencionar que siempre se tendrán que complementar medidas estructurales como no estructurales, ya que la combinación de estos dos tipos de medidas ayudarán a reducir de una manera óptima los riesgos provocados por un fenómeno de inundación, además que considerar un solo tipo de medida sería escatimar el valor tanto de la vida de la población como el de su patrimonio, por lo que para la zona de estudio se sugiere la implementación de los dos tipos de medidas o bien **cuando al menos** implementar medidas no estructurales creando al menos un escenario como el planteado en la categoría C5, con fin de salvaguardar lo más importante que es la vida y el bienestar de los ciudadanos.

Por lo tanto, se puede afirmar que se ha cumplido con los objetivos de esta tesis.

6. Anexos

6.1. Anexo 1

Hidrogramas obtenidos del estudio hidrológico

Tr 2	
Tiempo	Gasto (m3/s)
0:00	0
0:15	0.1
0:30	0.3
0:45	0.7
1:00	2.6
1:15	6.6
1:30	12.6
1:45	17.4
2:00	19.5
2:15	18.7
2:30	15.5
2:45	11.6
3:00	8.3
3:15	5.8
3:30	3.9
3:45	2.7
4:00	1.9
4:15	1.3
4:30	0.9
4:45	0.6
5:00	0.4
5:15	0.3
5:30	0.2
5:45	0.1
Gasto pico	19.5

Tr 5	
Tiempo	Gasto (m3/s)
0:00	0
0:15	0.1
0:30	0.3
0:45	0.9
1:00	3.9
1:15	10
1:30	19.4
1:45	26.5
2:00	29.4
2:15	27.9
2:30	22.9
2:45	17.1
3:00	12.2
3:15	8.5
3:30	5.8
3:45	4
4:00	2.8
4:15	1.9
4:30	1.3
4:45	0.9
5:00	0.6
5:15	0.4
5:30	0.3
5:45	0.2
Gasto pico	29.4

Tr 10	
Tiempo	Gasto (m3/s)
0:00	0
0:15	0.1
0:30	0.3
0:45	1.1
1:00	5.2
1:15	13.7
1:30	26.3
1:45	35.6
2:00	39.2
2:15	37
2:30	30.2
2:45	22.4
3:00	15.9
3:15	11.1
3:30	7.6
3:45	5.3
4:00	3.6
4:15	2.5
4:30	1.7
4:45	1.2
5:00	0.8
5:15	0.6
5:30	0.4
5:45	0.3
Gasto pico	39.2

Tr 25	
Tiempo	Gasto (m3/s)
0:00	0
0:15	0.1
0:30	0.4
0:45	1.6
1:00	7.7
1:15	20.3
1:30	38.5
1:45	51.4
2:00	56
2:15	52.3
2:30	42.3
2:45	31.3
3:00	22.2
3:15	15.4
3:30	10.6
3:45	7.4
4:00	5.1
4:15	3.5
4:30	2.4
4:45	1.7
5:00	1.2
5:15	0.8
5:30	0.6
5:45	0.4
Gasto pico	56

Tr 50	
Tiempo	Gasto (m3/s)
0:00	0
0:15	0.1
0:30	0.5
0:45	2.2
1:00	10.4
1:15	26.9
1:30	50.4
1:45	66.7
2:00	72.1
2:15	66.9
2:30	53.8
2:45	39.6
3:00	28.2
3:15	19.6
3:30	13.4
3:45	9.3
4:00	6.4
4:15	4.4
4:30	3.1
4:45	2.1
5:00	1.5
5:15	1
5:30	0.7
5:45	0.5
Gasto pico	72.1

Tr 100	
Tiempo	Gasto (m3/s)
0:00	0
0:15	0.1
0:30	0.7
0:45	3
1:00	13.9
1:15	35.3
1:30	65.1
1:45	85.4
2:00	91.6
2:15	84.4
2:30	67.6
2:45	49.7
3:00	35.3
3:15	24.5
3:30	16.8
3:45	11.7
4:00	8
4:15	5.6
4:30	3.9
4:45	2.7
5:00	1.9
5:15	1.3
5:30	0.9
5:45	0.6
Gasto pico	91.6

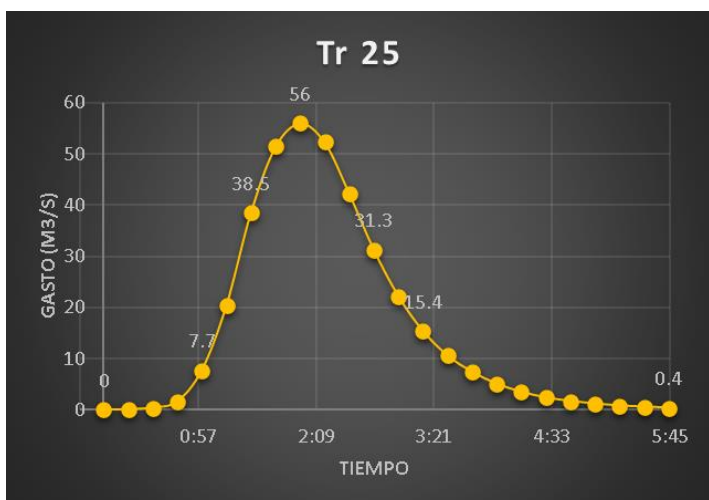
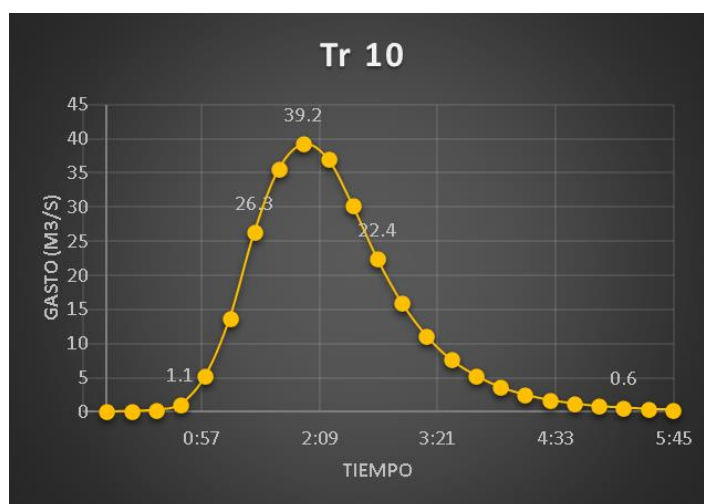
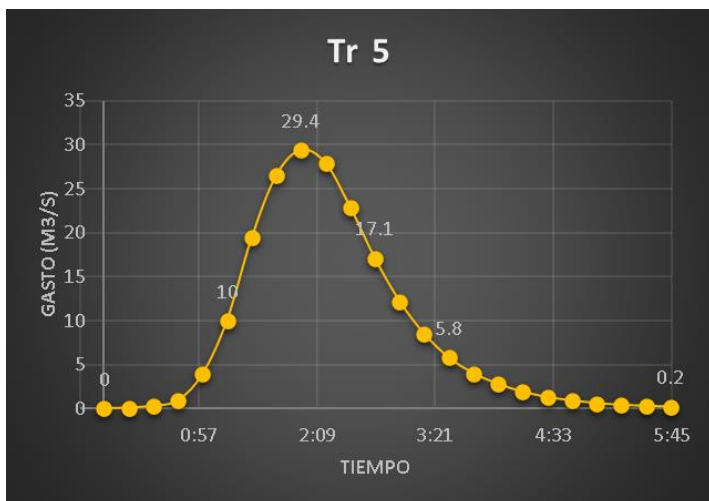
Tr 200	
Tiempo	Gasto (m3/s)
0:00	0
0:15	0.1
0:30	0.9
0:45	4.2
1:00	18.4
1:15	45.9
1:30	83.2
1:45	108
2:00	115
2:15	105.3
2:30	84
2:45	61.6
3:00	43.7
3:15	30.3
3:30	20.8
3:45	14.5
4:00	10
4:15	6.9
4:30	4.8
4:45	3.3
5:00	2.3
5:15	1.6
5:30	1.1
5:45	0.8
Gasto pico	115

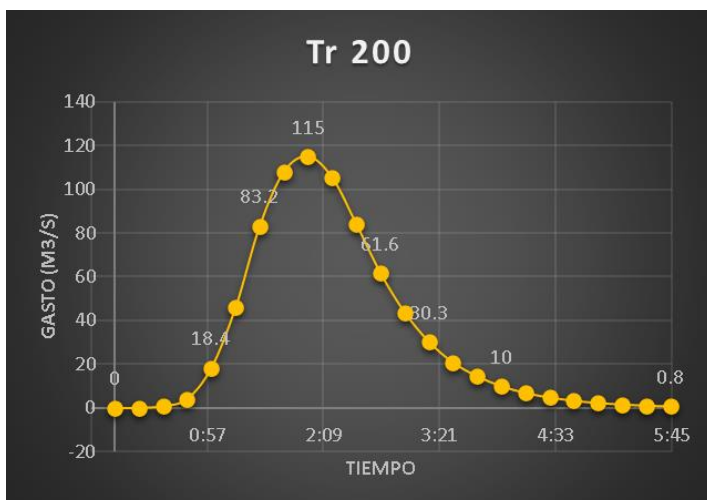
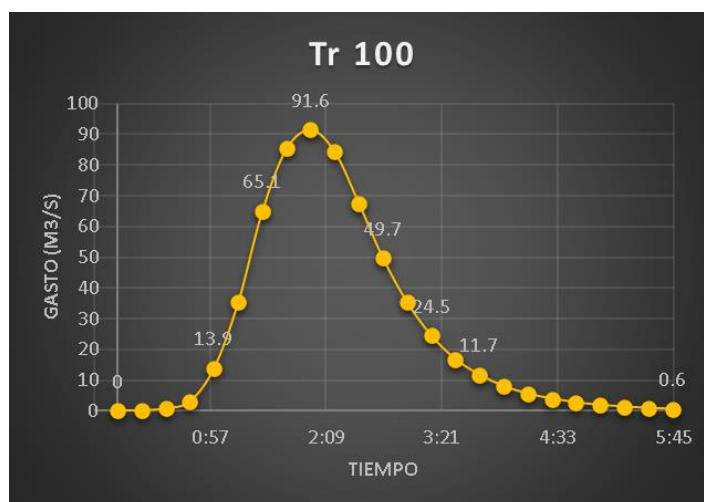
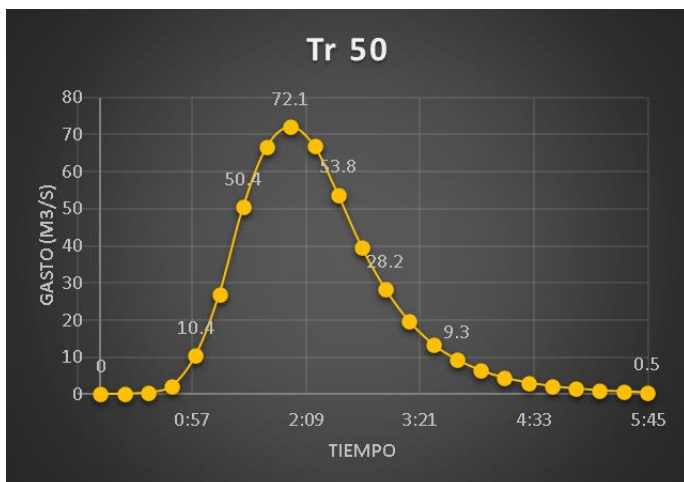
Tr 1000	
Tiempo	Gasto (m3/s)
0:00	0
0:15	0.2
0:30	1.9
0:45	8.6
1:00	34.2
1:15	80.8
1:30	141
1:45	179.2
2:00	187.8
2:15	169.8
2:30	134.3
2:45	98
3:00	69.4
3:15	48.2
3:30	33
3:45	23
4:00	15.9
4:15	11
4:30	7.6
4:45	5.3
5:00	3.7
5:15	2.6
5:30	1.8
5:45	1.2
Gasto pico	187.8

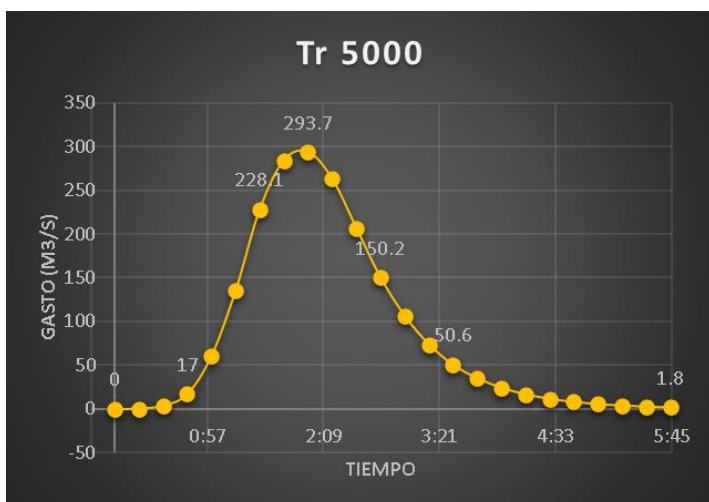
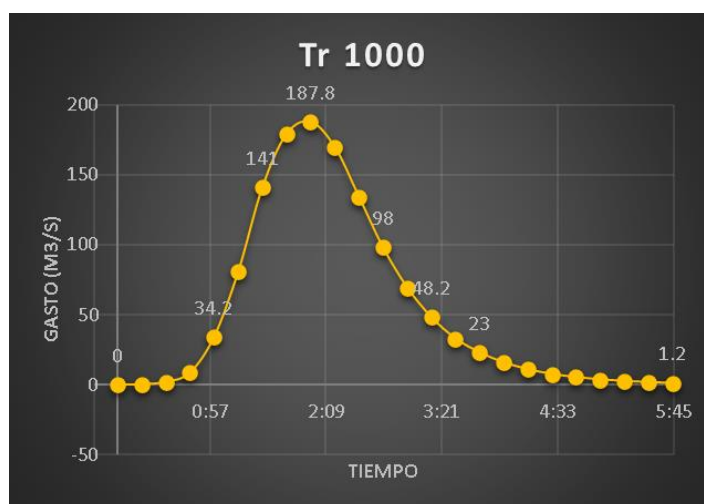
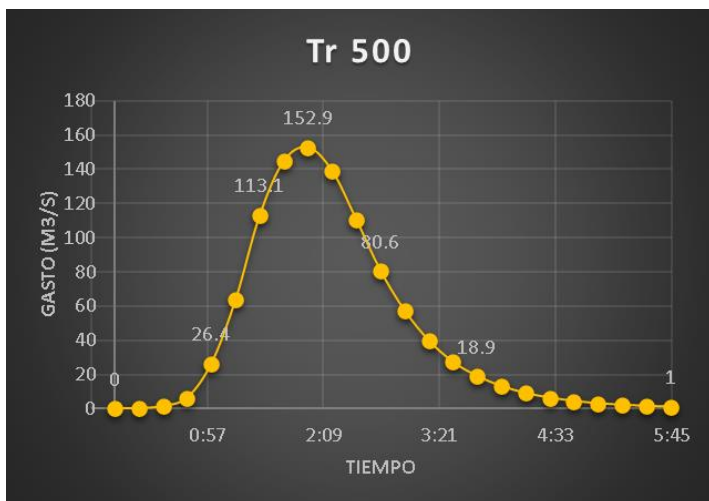
Tr 500	
Tiempo	Gasto (m3/s)
0:00	0
0:15	0.2
0:30	1.4
0:45	6.4
1:00	26.4
1:15	63.7
1:30	113.1
1:45	145
2:00	152.9
2:15	139
2:30	110.4
2:45	80.6
3:00	57.2
3:15	39.7
3:30	27.2
3:45	18.9
4:00	13.1
4:15	9
4:30	6.3
4:45	4.3
5:00	3
5:15	2.1
5:30	1.5
5:45	1
Gasto pico	152.9

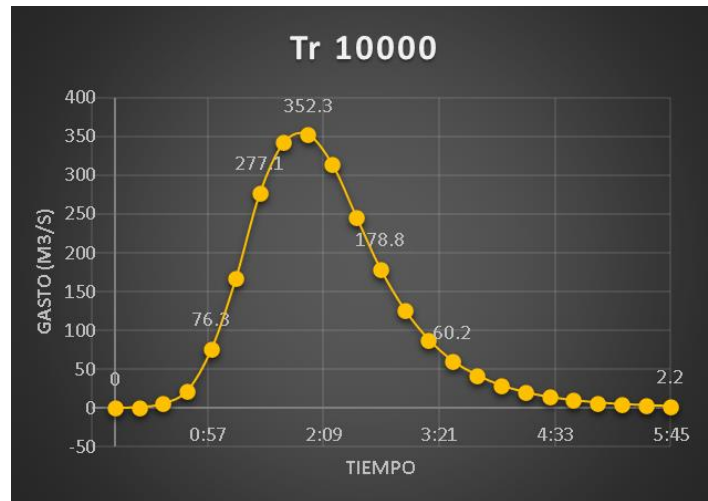
Tr 5000	
Tiempo	Gasto (m3/s)
0:00	0
0:15	0.4
0:30	3.9
0:45	17
1:00	60.5
1:15	135.2
1:30	228.1
1:45	284.3
2:00	293.7
2:15	262.9
2:30	206.6
2:45	150.2
3:00	106.3
3:15	73.9
3:30	50.6
3:45	35.2
4:00	24.3
4:15	16.8
4:30	11.7
4:45	8.1
5:00	5.6
5:15	3.9
5:30	2.7
5:45	1.8
Gasto pico	293.7

Tr 10000	
Tiempo	Gasto (m3/s)
0:00	0
0:15	0.6
0:30	5.4
0:45	22.4
1:00	76.3
1:15	166.6
1:30	277.1
1:45	342.8
2:00	352.3
2:15	314.1
2:30	246.2
2:45	178.8
3:00	126.5
3:15	87.9
3:30	60.2
3:45	41.9
4:00	28.9
4:15	20
4:30	13.9
4:45	9.6
5:00	6.7
5:15	4.7
5:30	3.3
5:45	2.2
Gasto pico	352.3



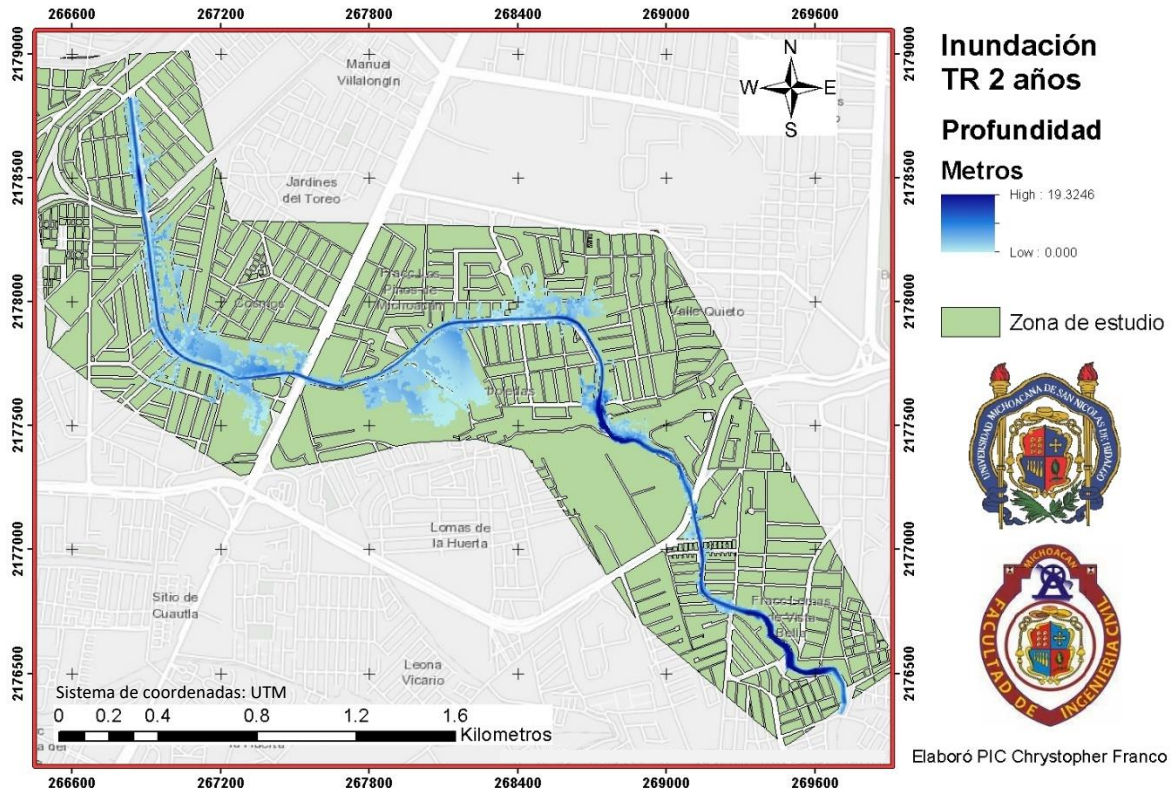


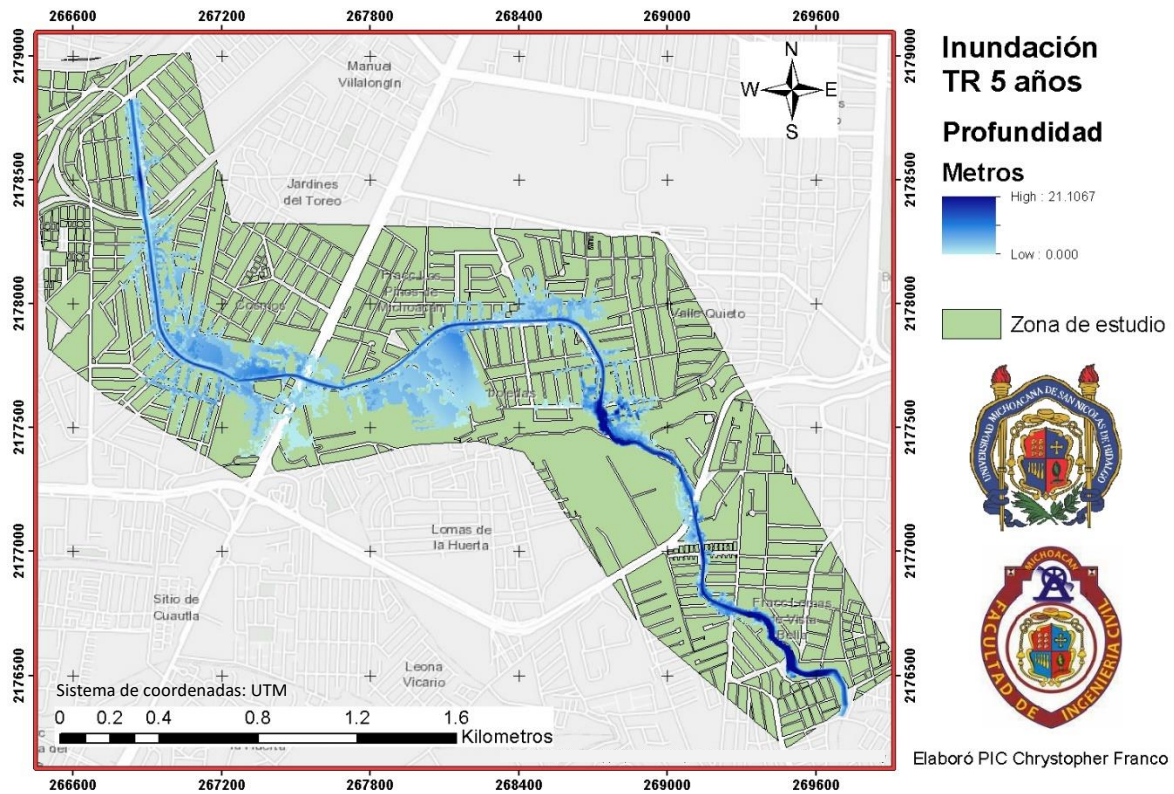


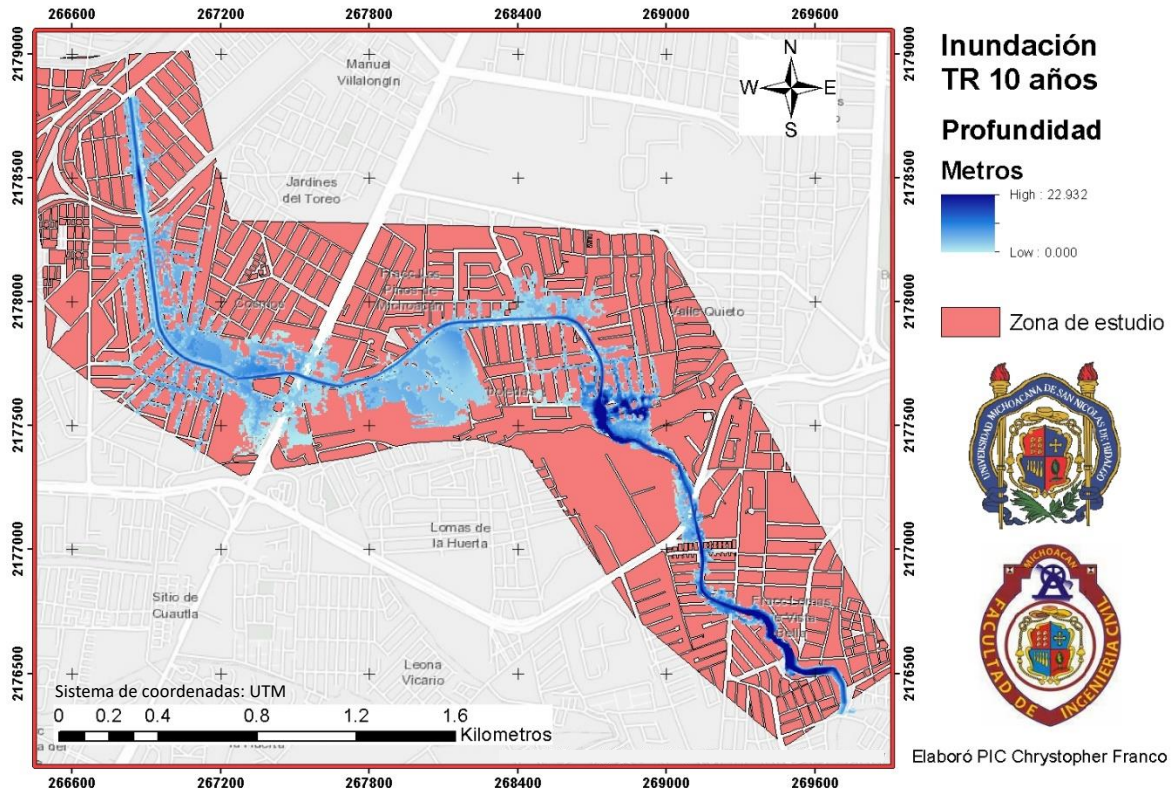


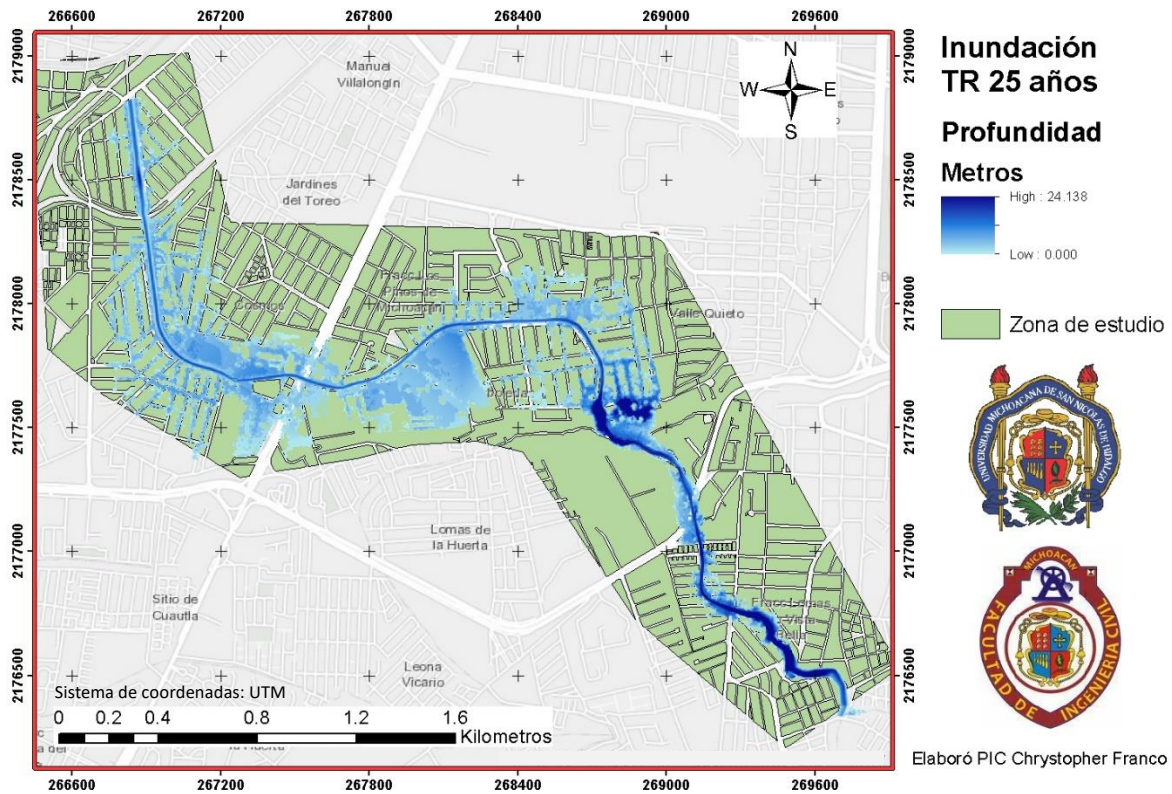
6.2. Anexo 2

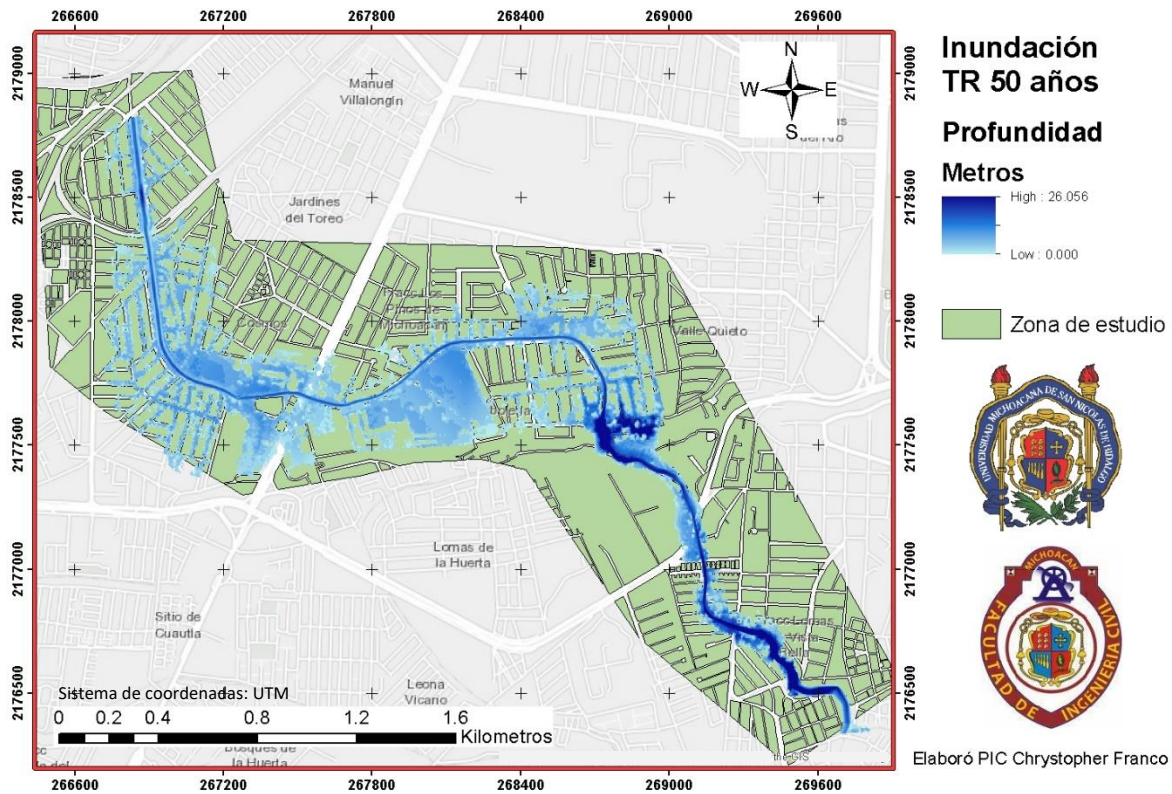
Resultados de la modelación en HEC-RAS

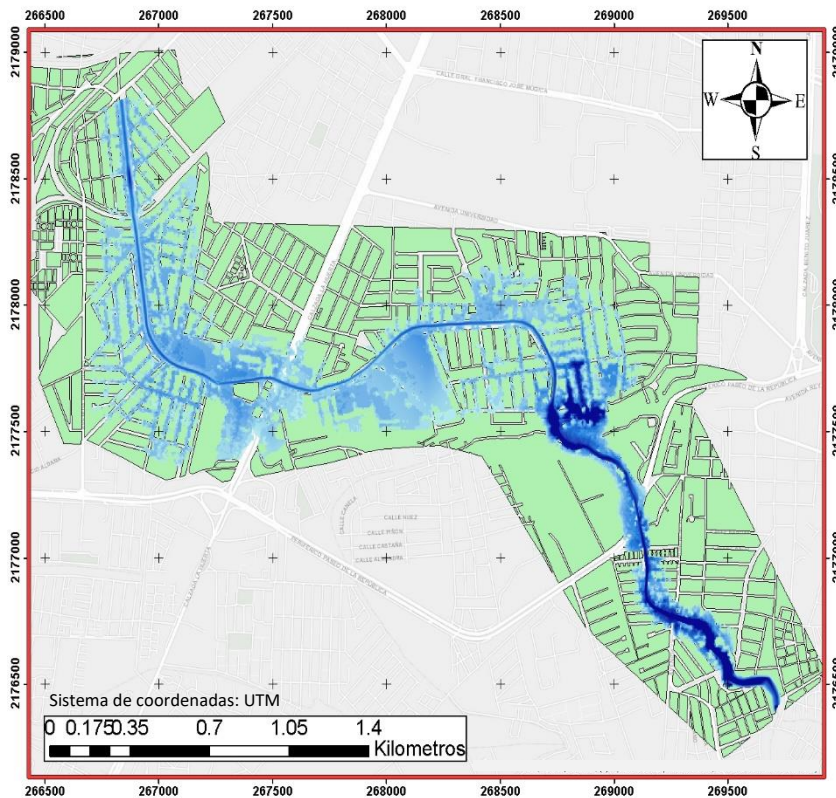








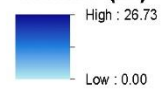




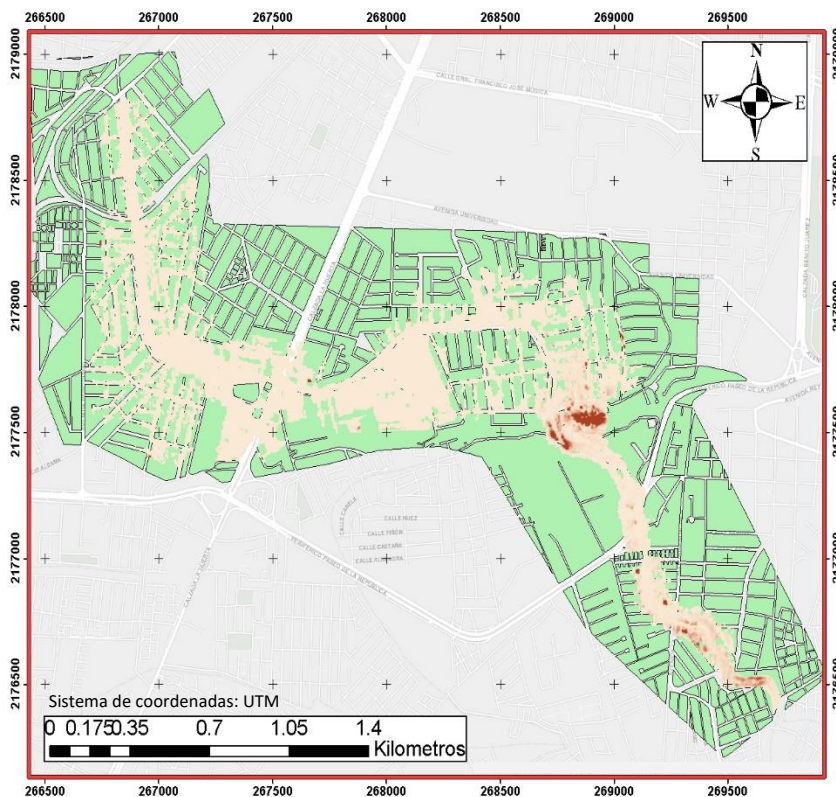
Simbología

Inundación tr 100

Tirante (m)



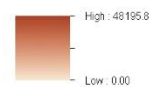
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



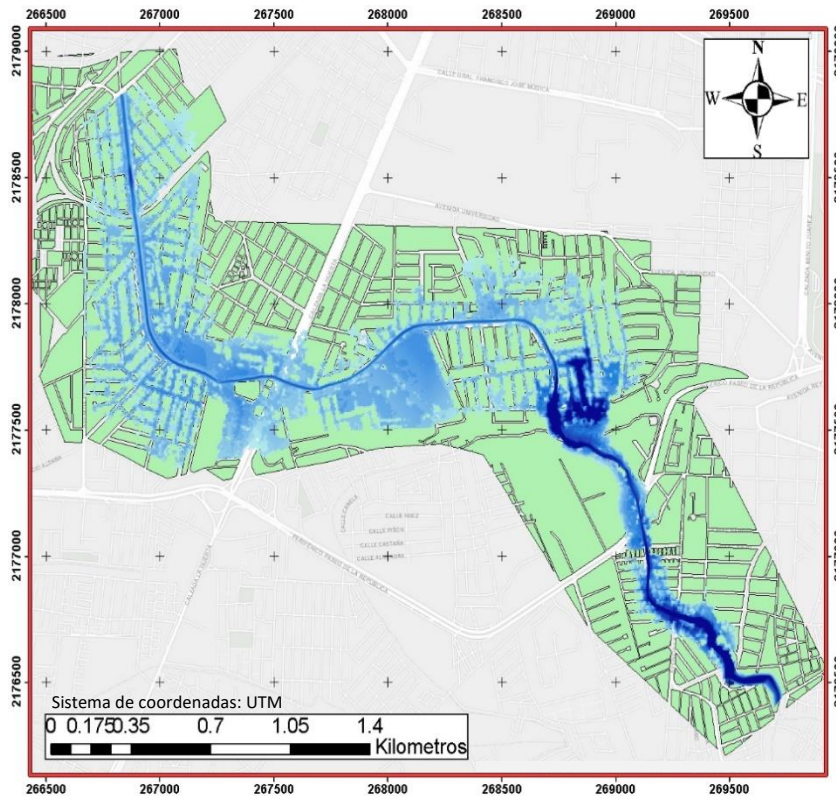
Simbología

Inundación tr 100

Velocidades (m/s)



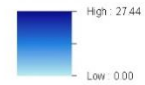
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



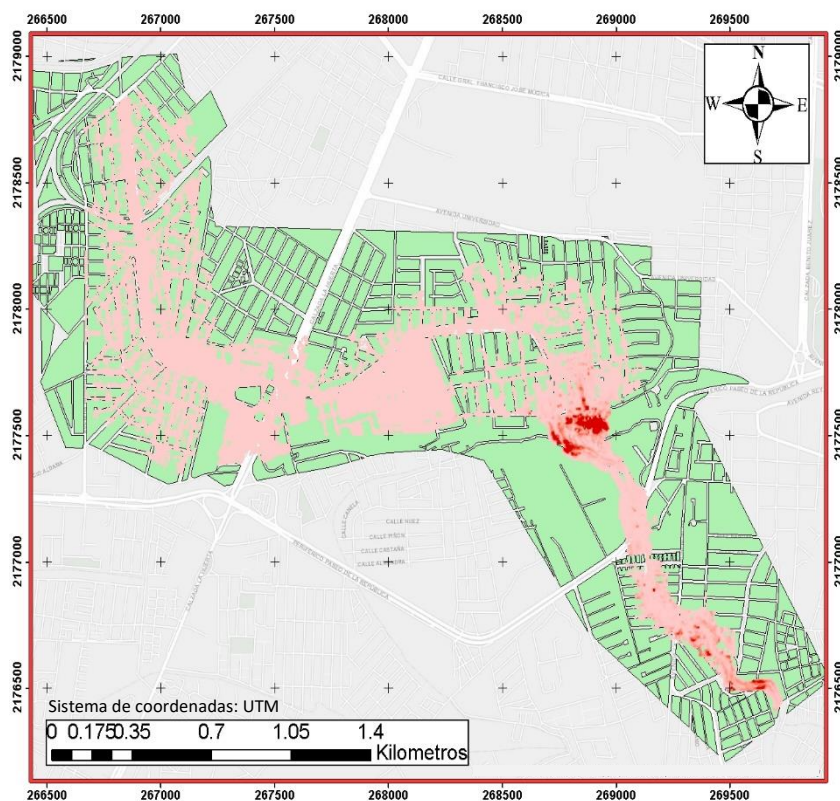
Simbología

Inundación tr 200

Profundidad (m)



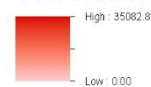
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



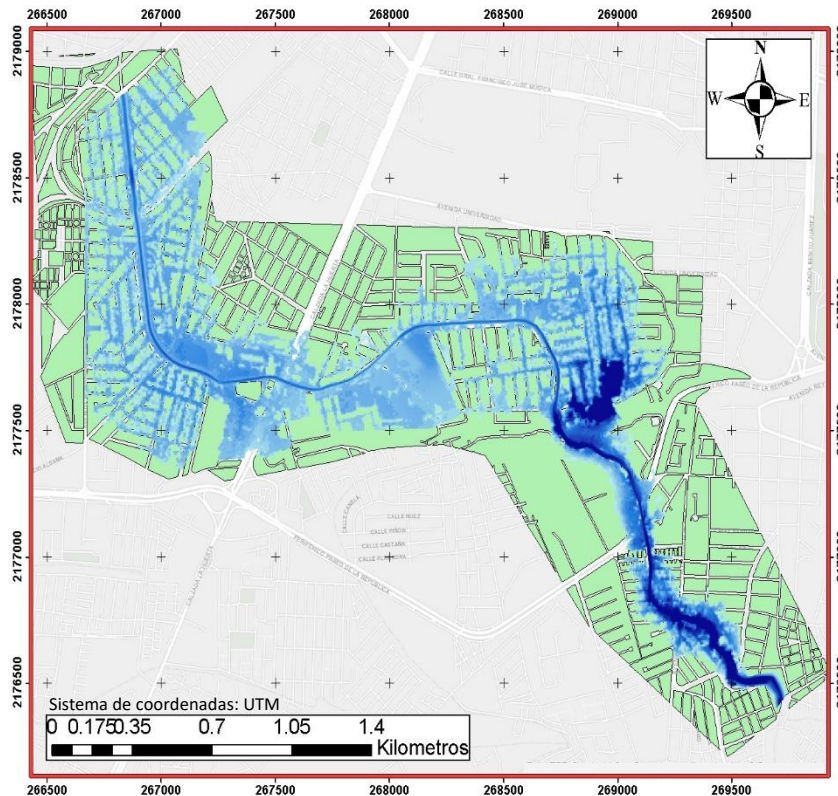
Simbología

Inundación tr 200

Velocidades (m/s)



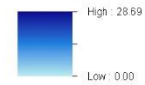
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



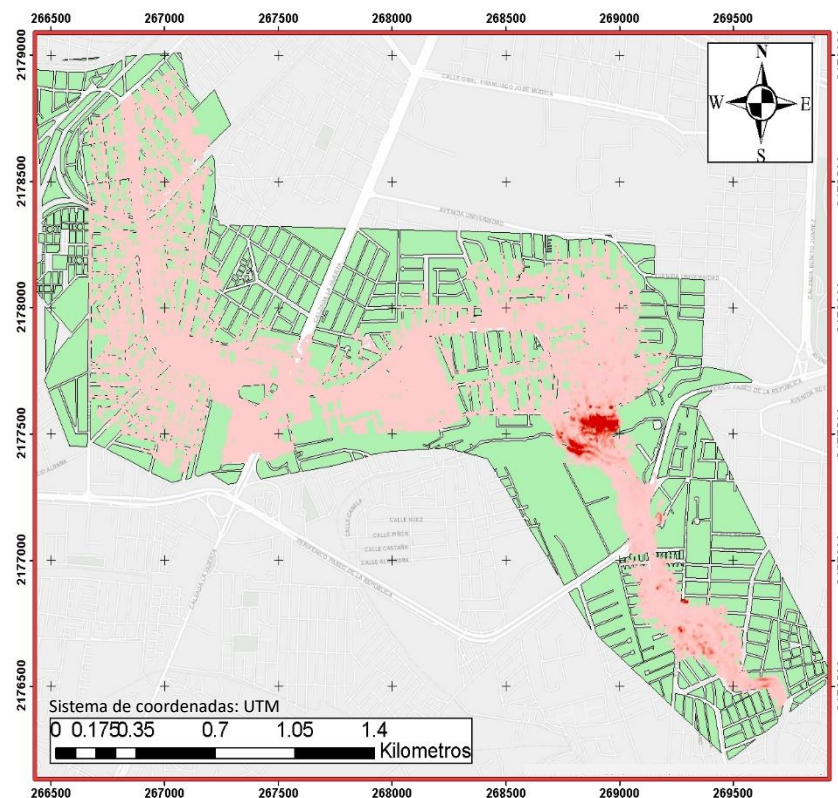
Simbología

Inundación tr 1000

Profundidad (m)



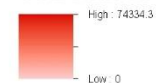
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



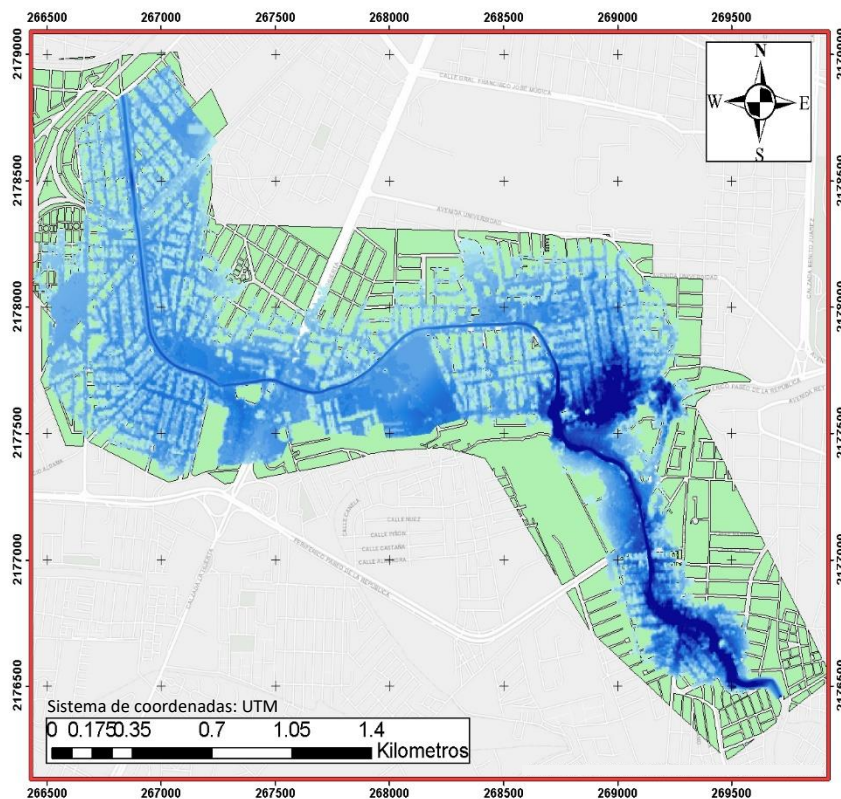
Simbología

Inundación tr 1000

Velocidades (m/s)

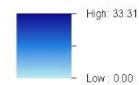


Elaboró: PIC Chrystopher Franco

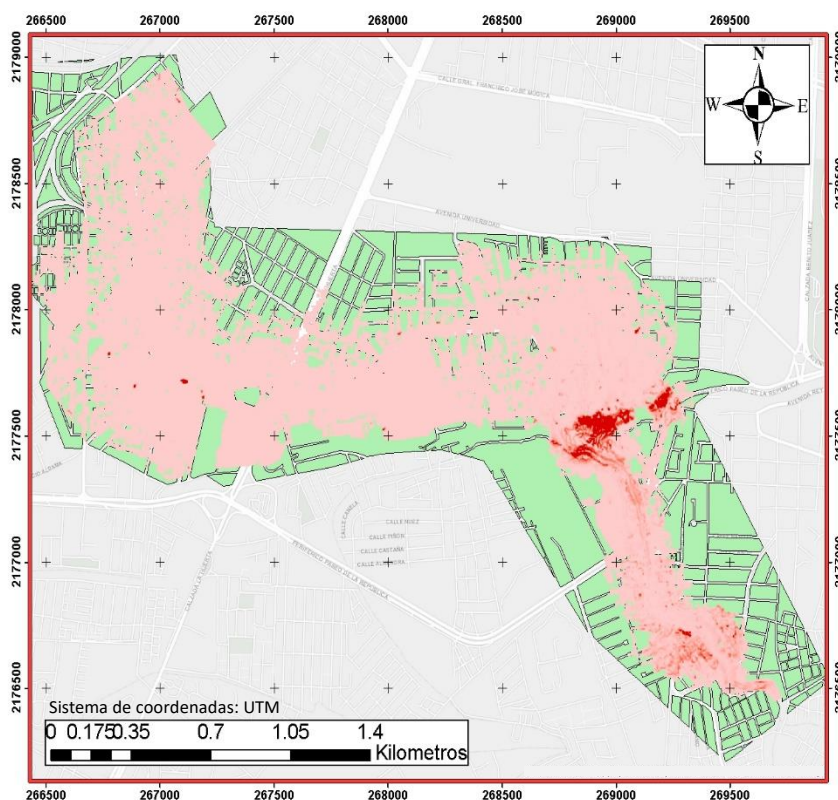


Simbología

Inundación tr 5000
Profundidad (m)

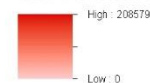


Elaboró: PIC Chrystopher Franco

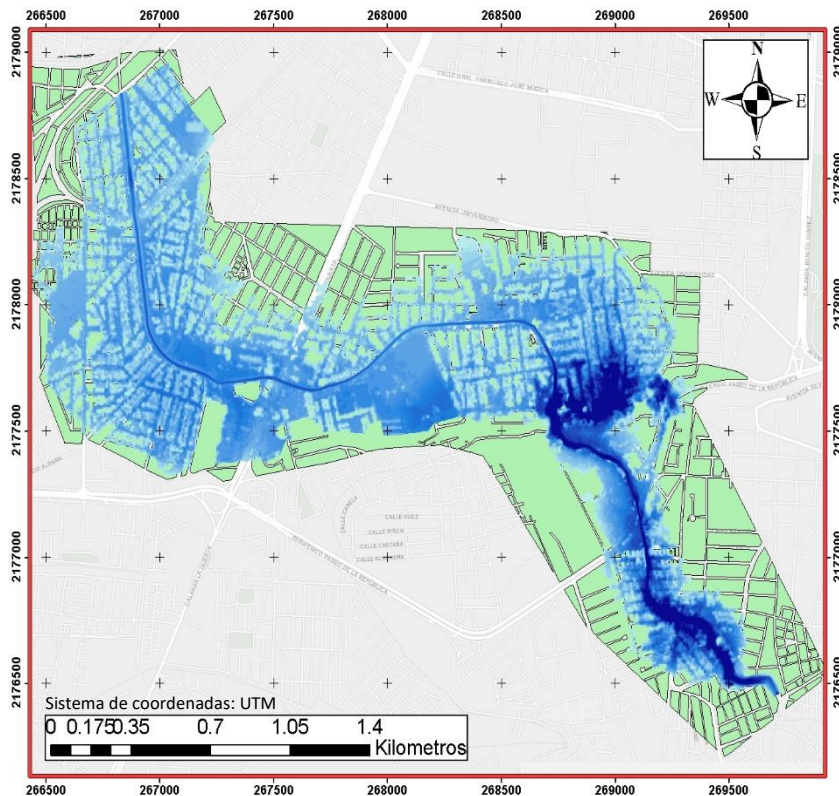


Simbología

Inundación tr 5000
Velocidades (m/s)



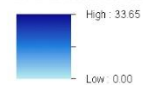
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



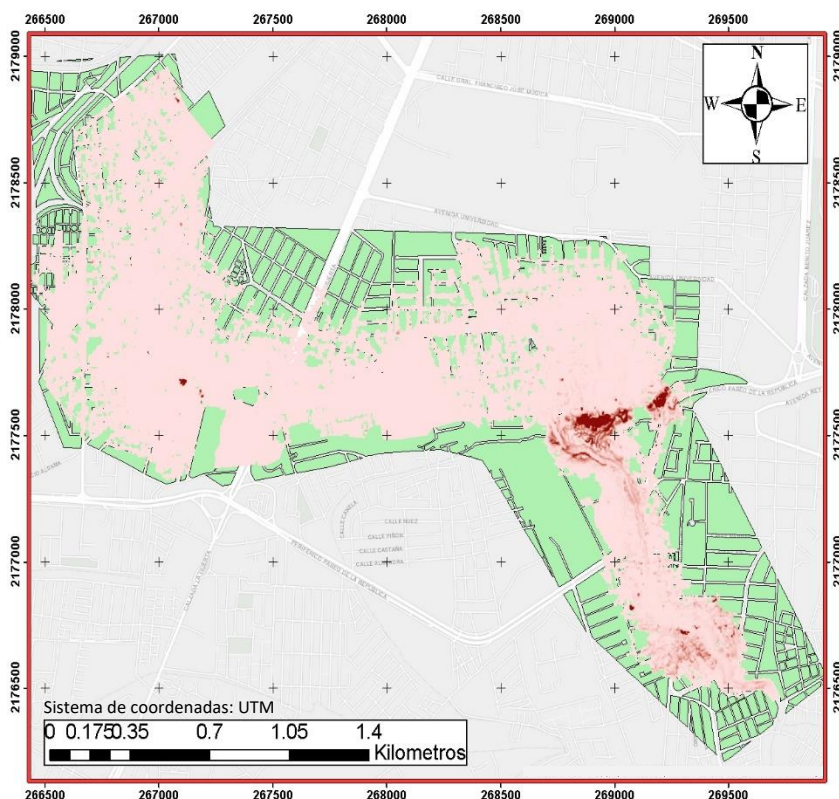
Simbología

Inundación tr 10000

Profundidad



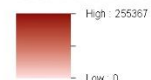
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Inundación tr 10000

Velocidades (m/s)

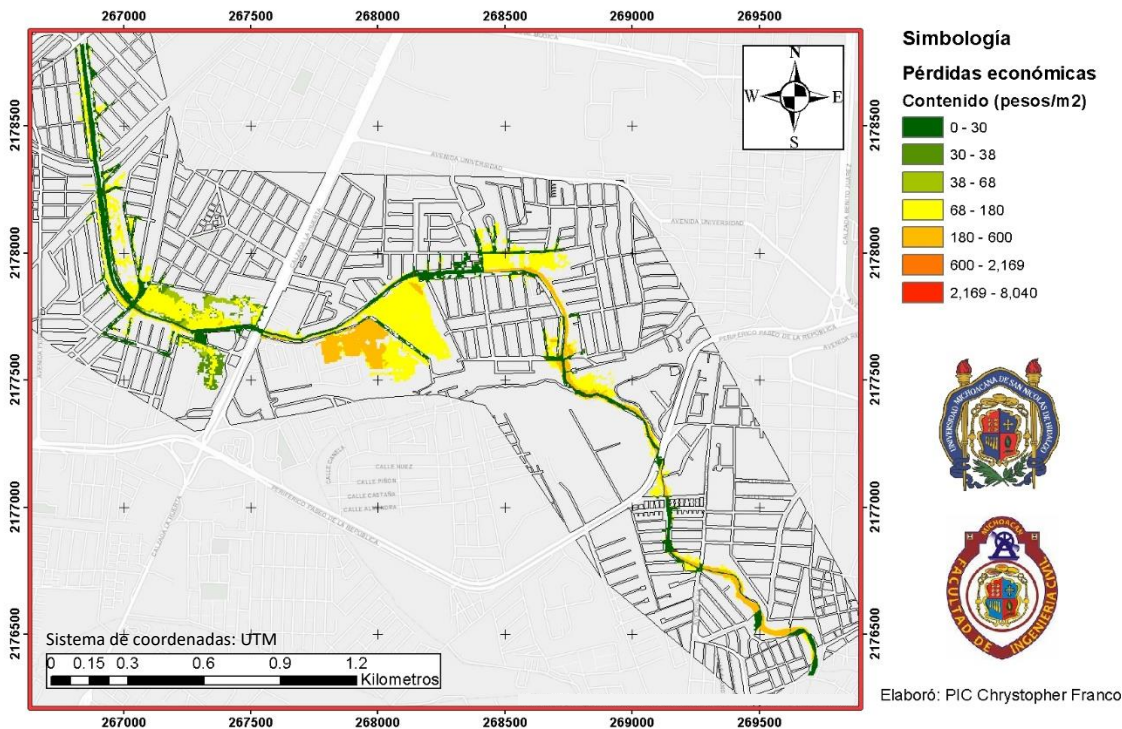
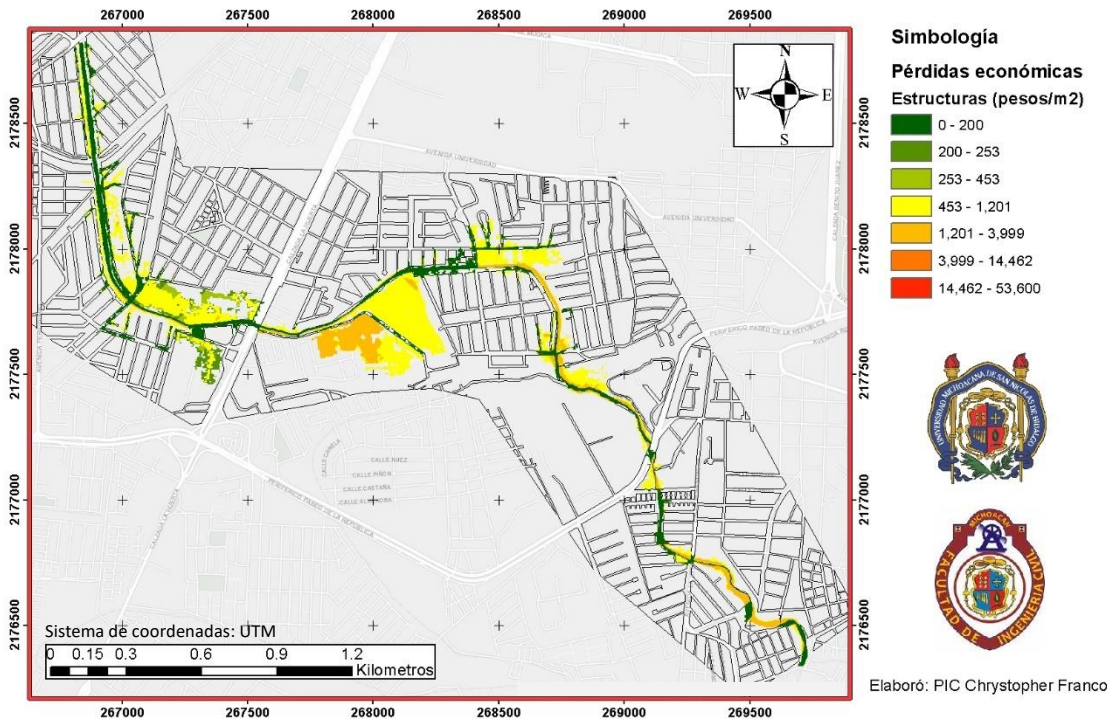


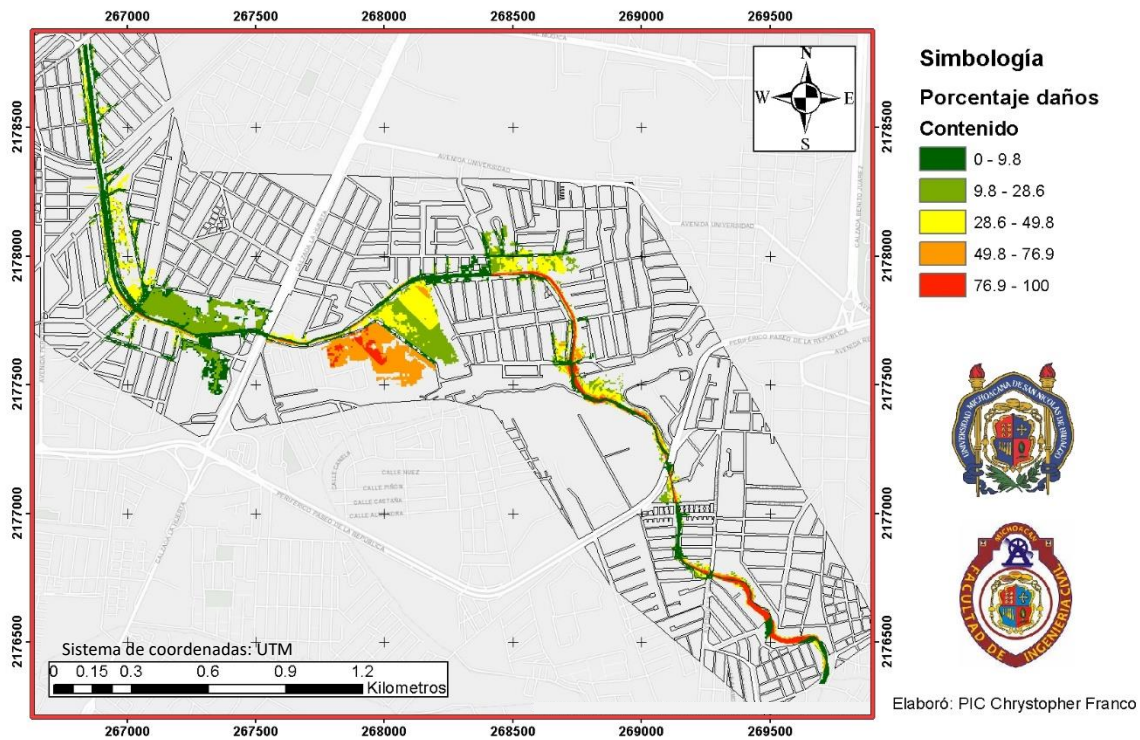
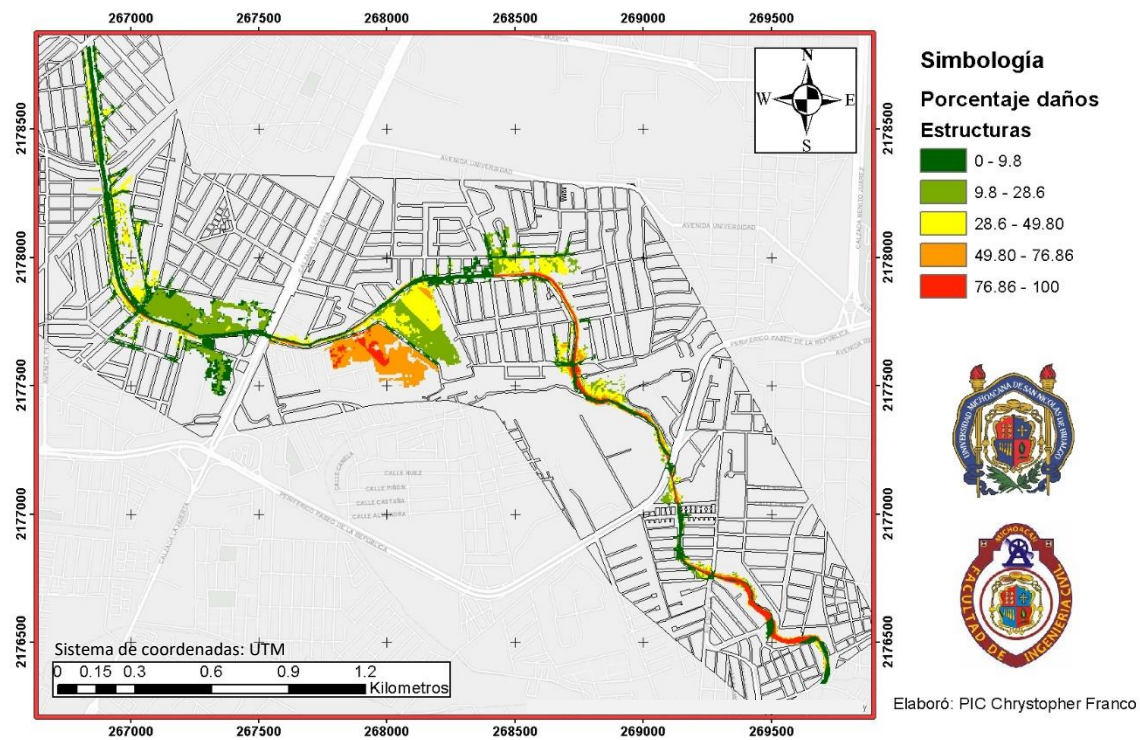
Elaboró: PIC Chrystopher Franco

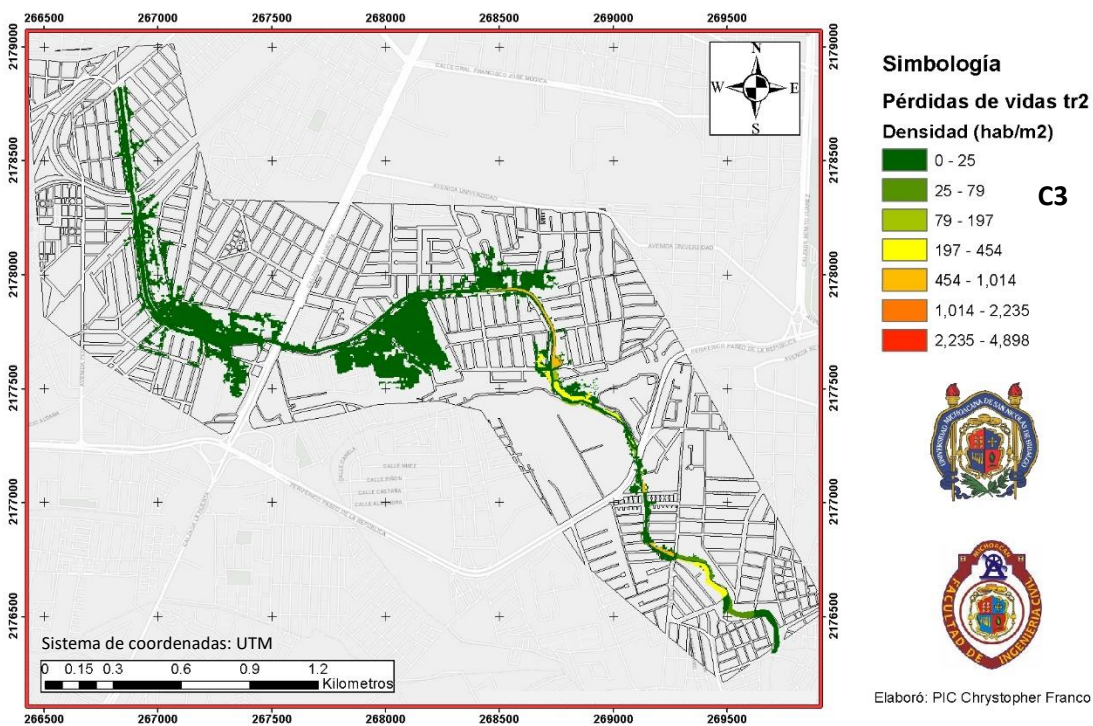
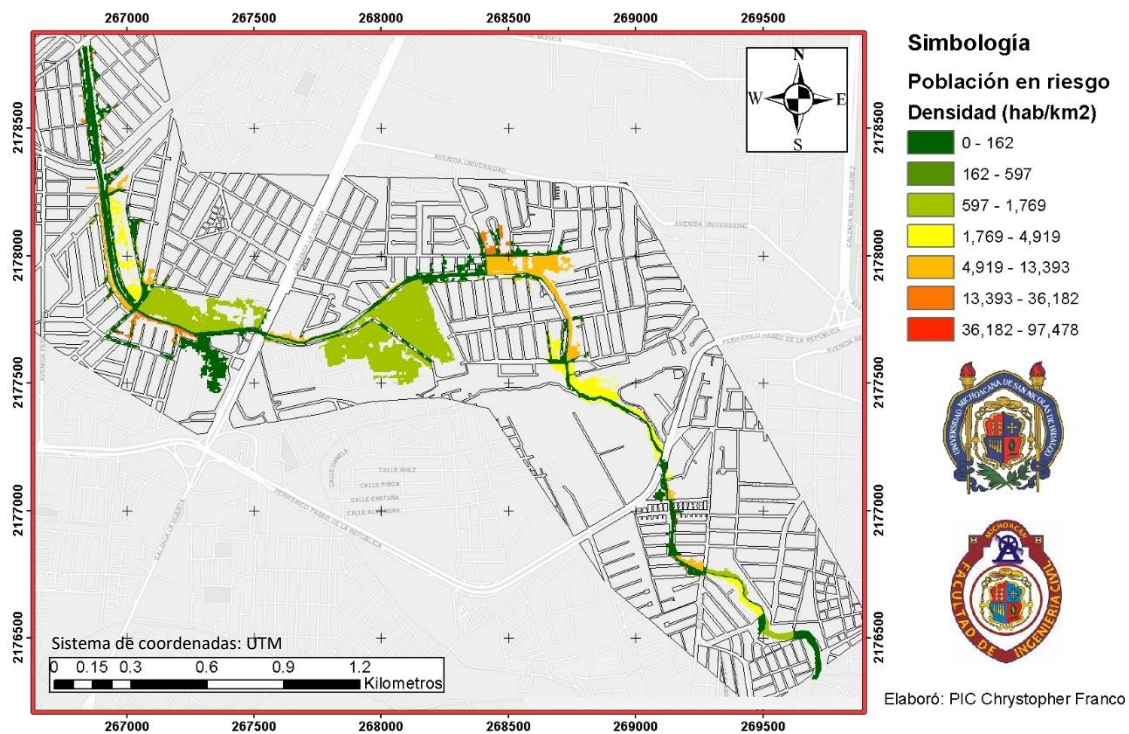
6.3. Anexo 3

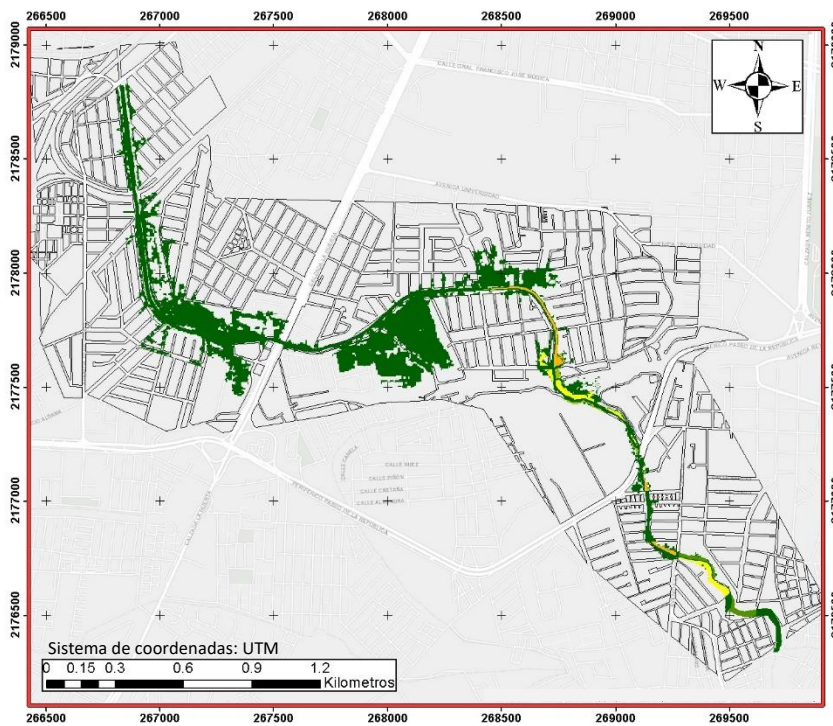
Resultados de la estimación de riesgos potenciales

6.3.1. Tr 2 años



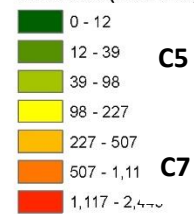




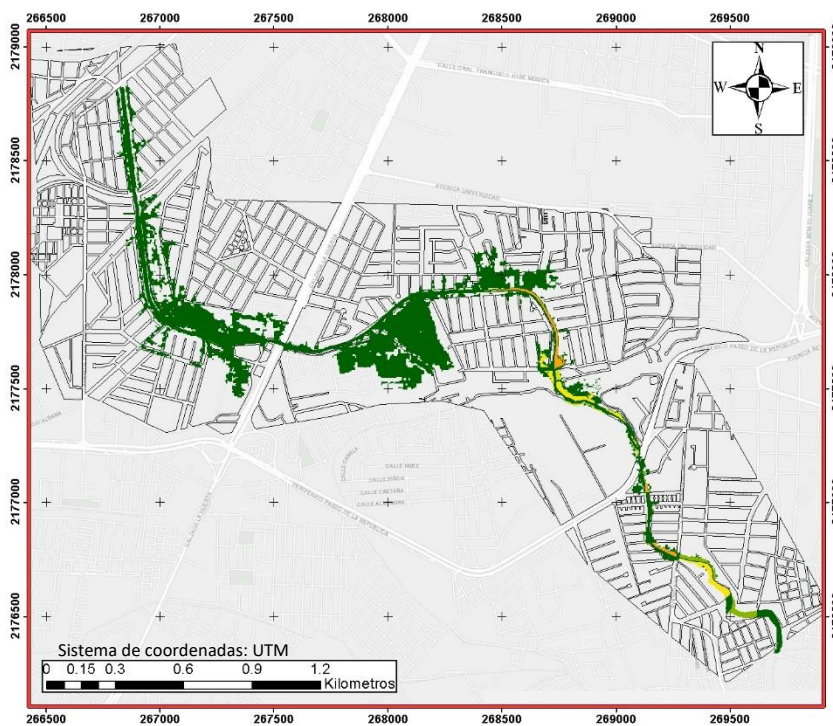


Simbología

Pérdidas de Vida tr 2
Densidad (hab/km2)

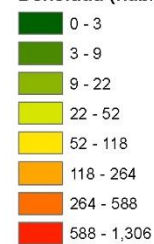


Elaboró: PIC Chrystopher Franco



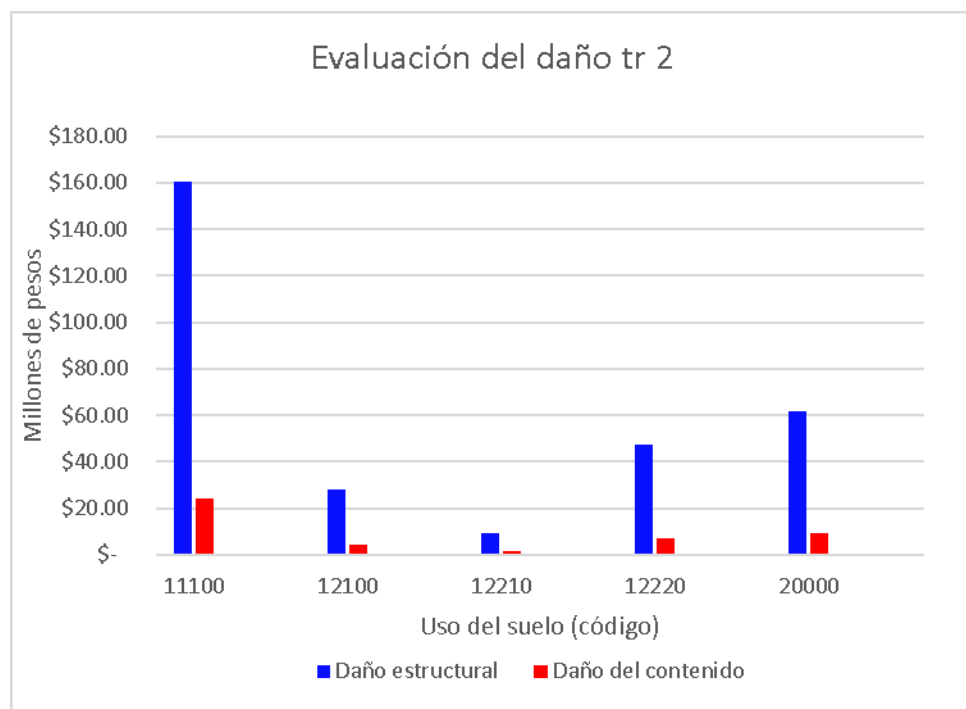
Simbología

Pérdida de vidas tr 2
Densidad (hab/km2)

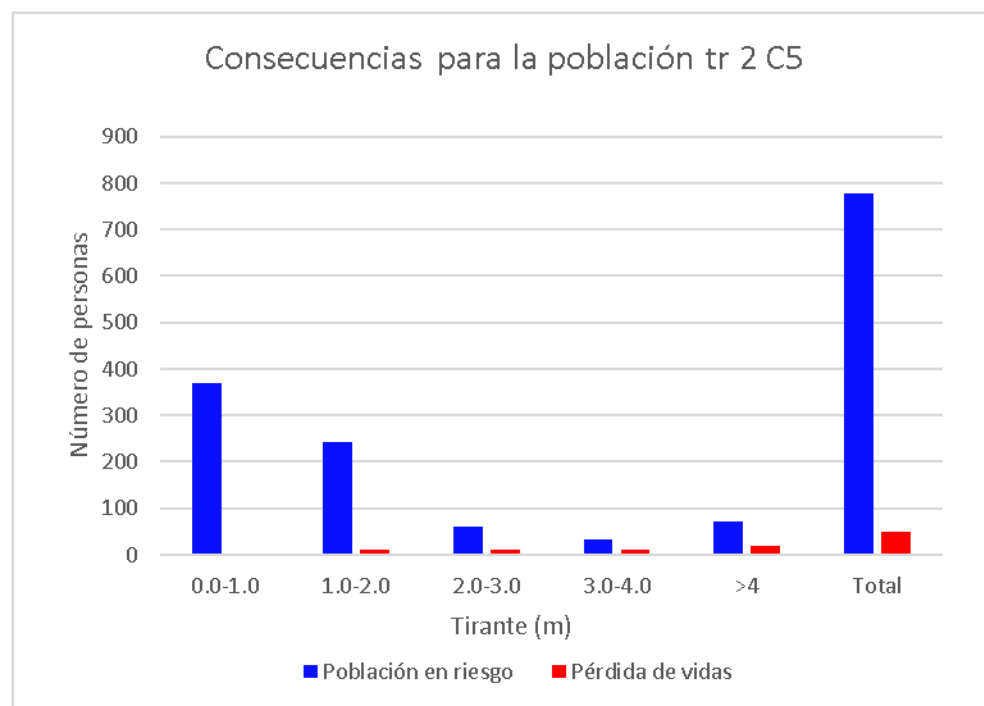
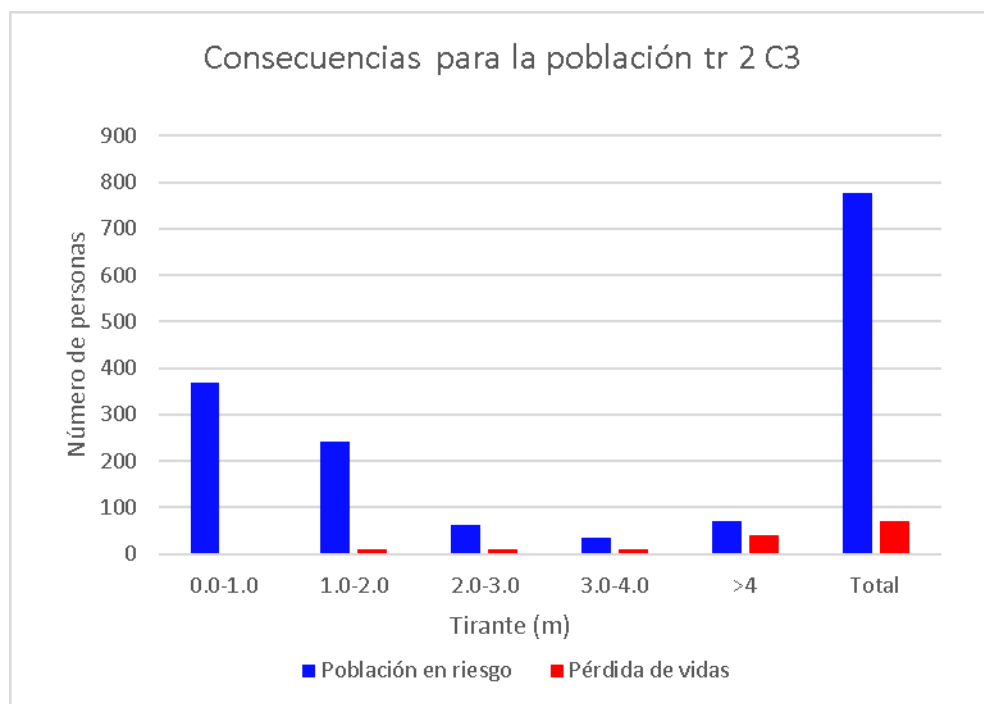


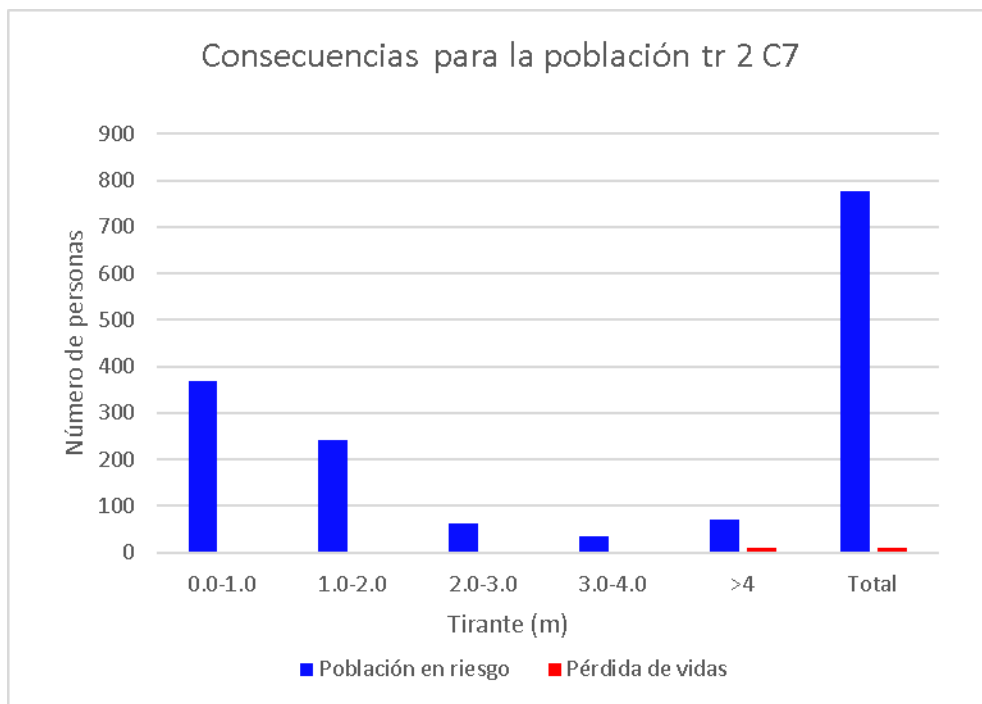
Elaboró: PIC Chrystopher Franco

Tr 2						
Code	Uso de suelo	Área (m ²)	Valor estructural (pesos)	Valor del contenido (pesos)	Daños estructurales (pesos)	Daños del contenido (pesos)
11100	Tejido urbano continuo (densidad >80%)	166600	\$ 407,687,000.00	\$ 61,144,900.00	\$ 160,279,300.00	\$ 24,038,700.00
12100	Industrial	55100	\$ 223,419,900.00	\$ 33,524,100.00	\$ 28,290,200.00	\$ 4,244,900.00
12210	Caminos de alta velocidad y terrenos aledaños	400	\$ 22,713,000.00	\$ 3,407,000.00	\$ 9,173,400.00	\$ 1,376,000.00
12220	Otros caminos y terrenos aledaños	2900	\$ 116,500,000.00	\$ 17,475,000.00	\$ 47,248,200.00	\$ 7,087,200.00
20000	Zonas agrícolas, áreas seminaturales y humedales	47300	\$ 95,711,200.00	\$ 14,335,400.00	\$ 61,911,500.00	\$ 9,272,900.00



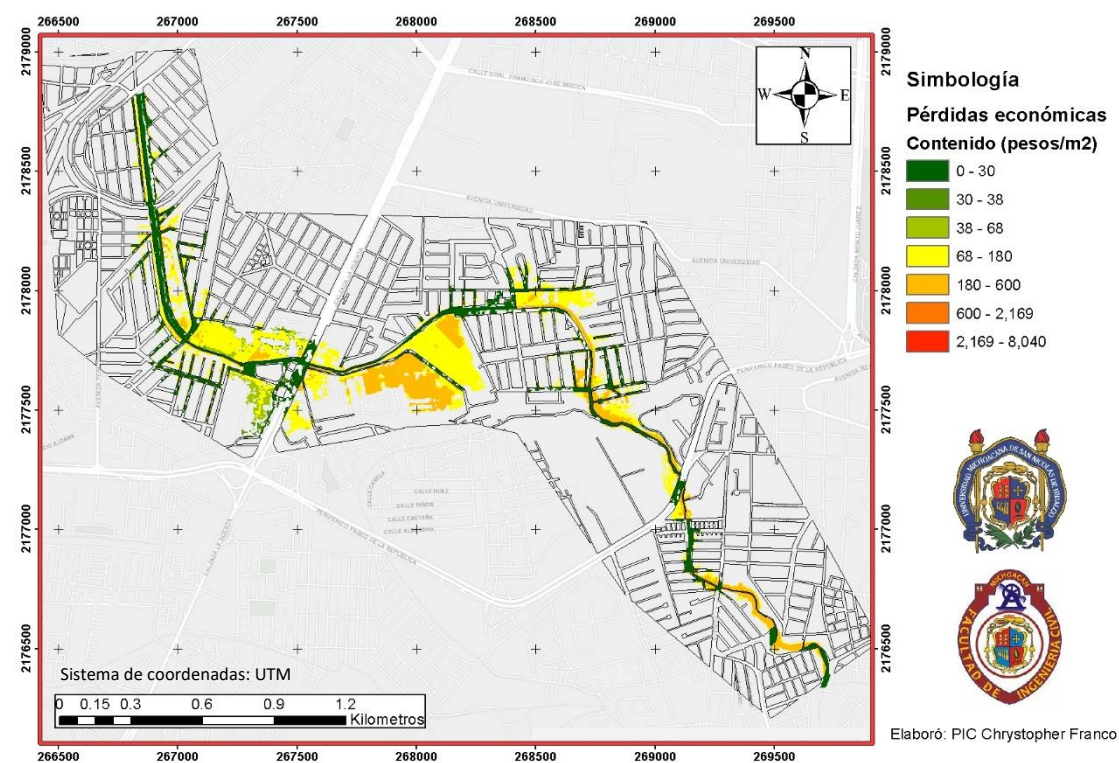
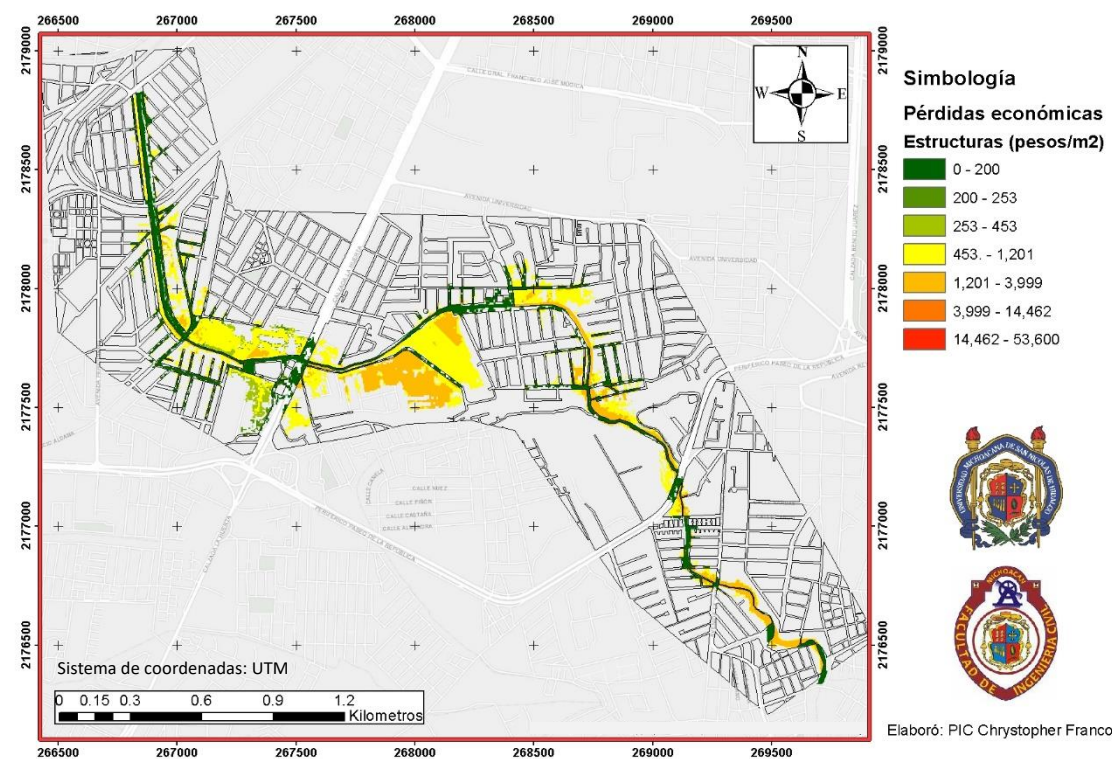
tr 2 años C3					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	170676	343	26	369	0
1.0-2.0	118600	229	13	242	1
2.0-3.0	32087	58	3	61	1
3.0-4.0	17950	31	3	34	1
>4	44266	66	5	71	4
Total	383579	727	50	777	7
tr 2 años C5					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	170676	343	26	369	0
1.0-2.0	118600	229	13	242	1
2.0-3.0	32087	58	3	61	1
3.0-4.0	17950	31	3	34	1
>4	44266	66	5	71	2
Total	383579	727	50	777	5
tr 2 años C7					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	170676	343	26	369	0
1.0-2.0	118600	229	13	242	0
2.0-3.0	32087	58	3	61	0
3.0-4.0	17950	31	3	34	0
>4	44266	66	5	71	1
Total	383579	727	50	777	1

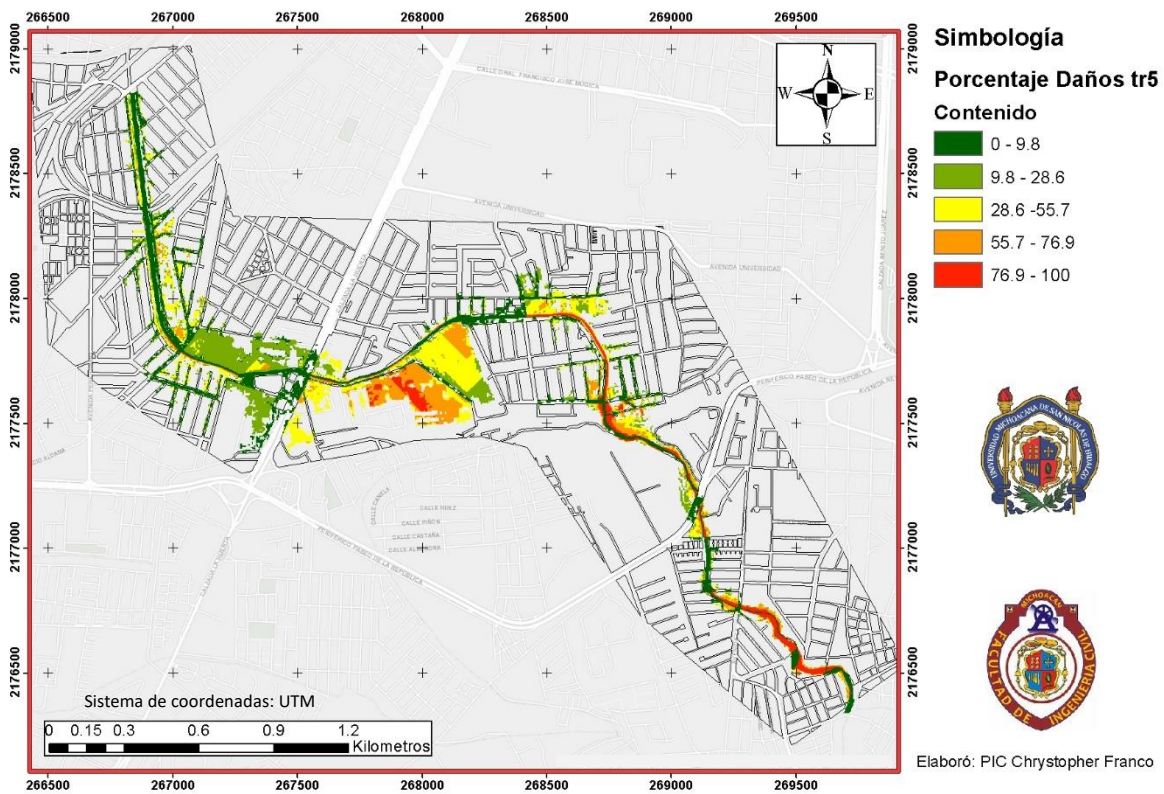
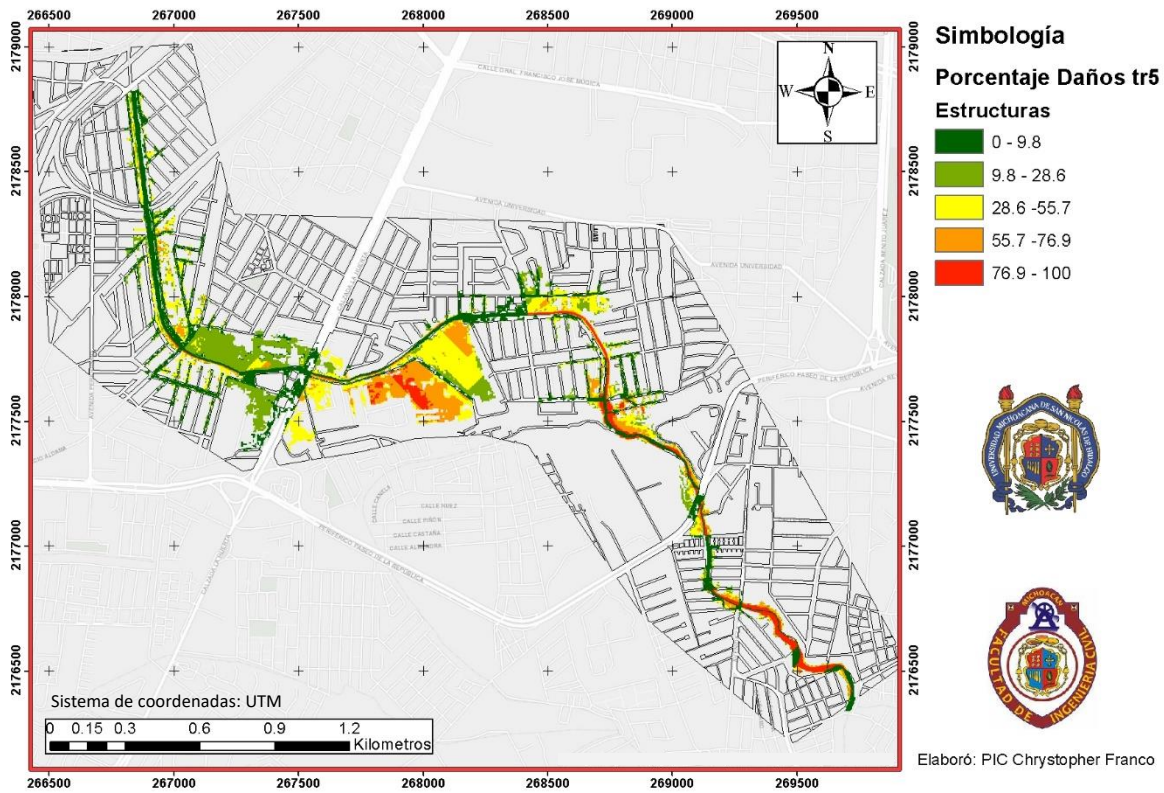


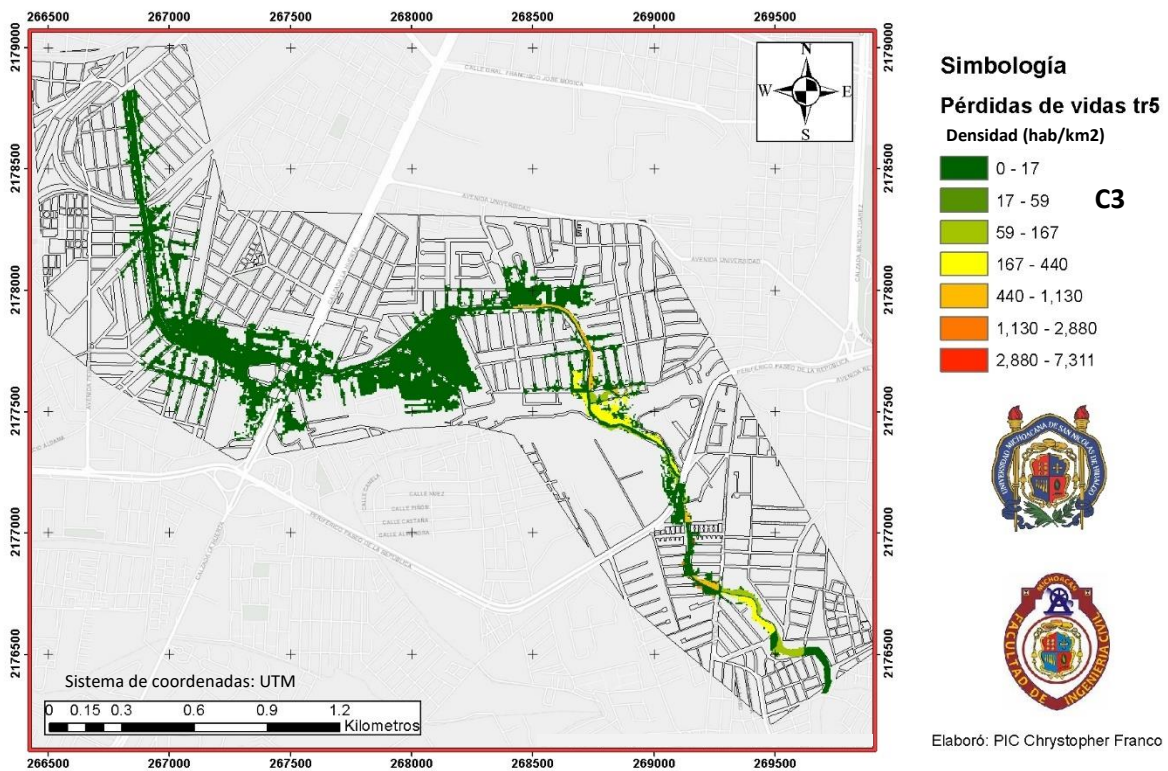
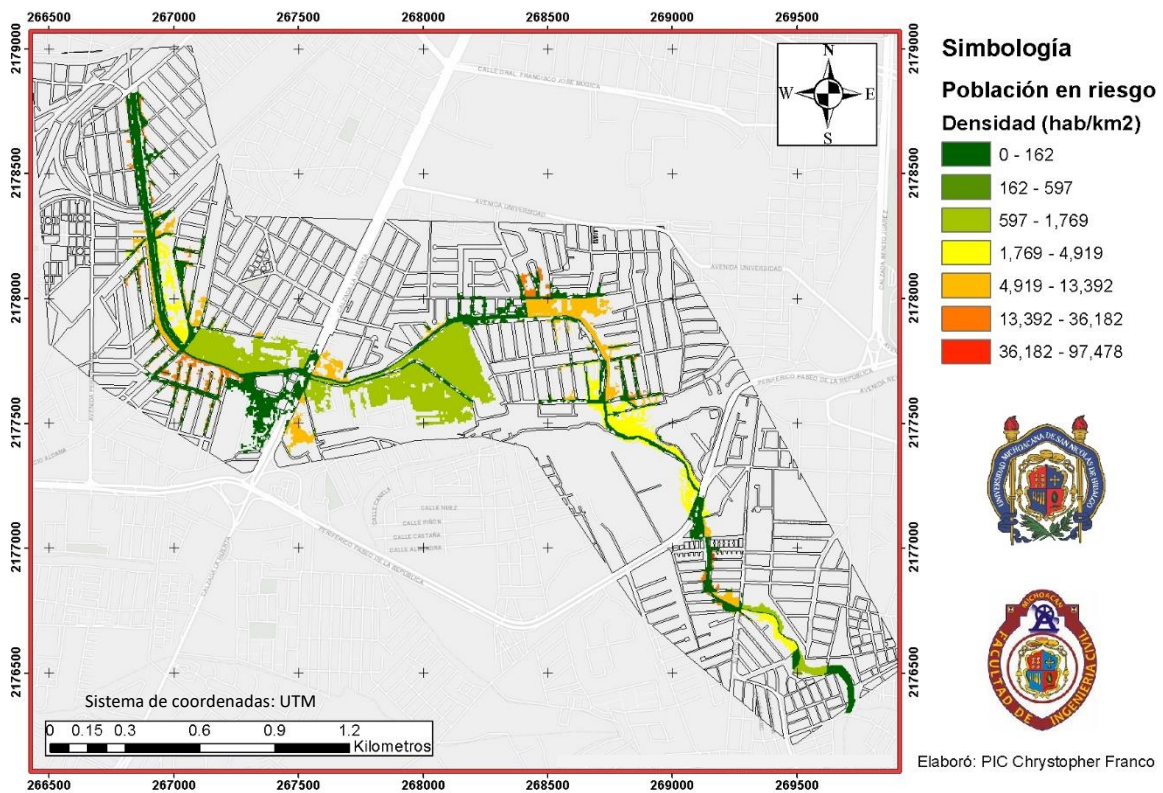


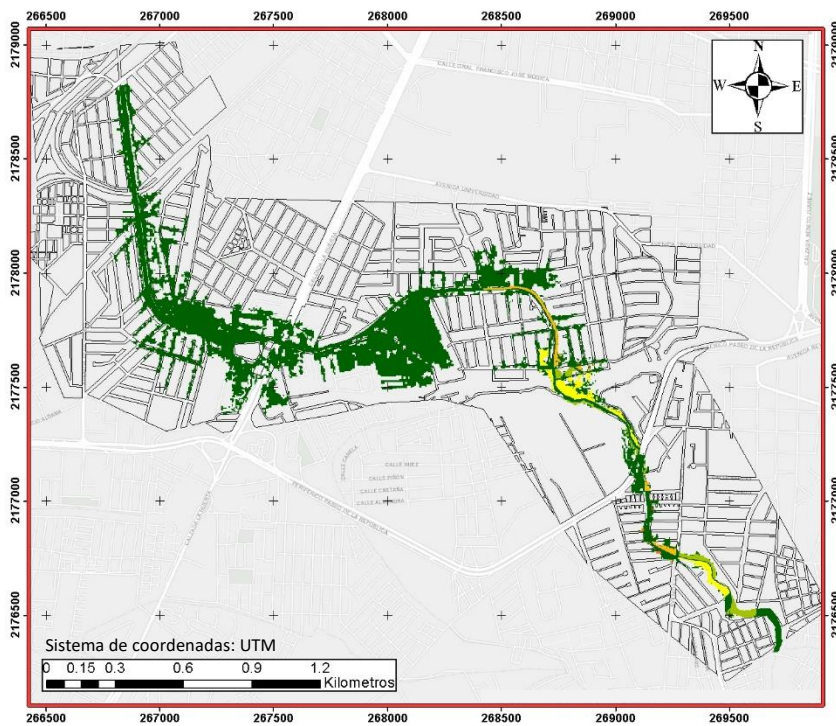
*****Nota: Los valores correspondientes a las pérdidas de vidas fueron multiplicados por 10 para lograr una mejor visualización en el histograma***

6.3.2. Tr 5 años



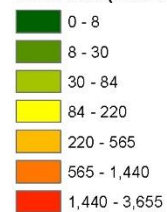






Simbología

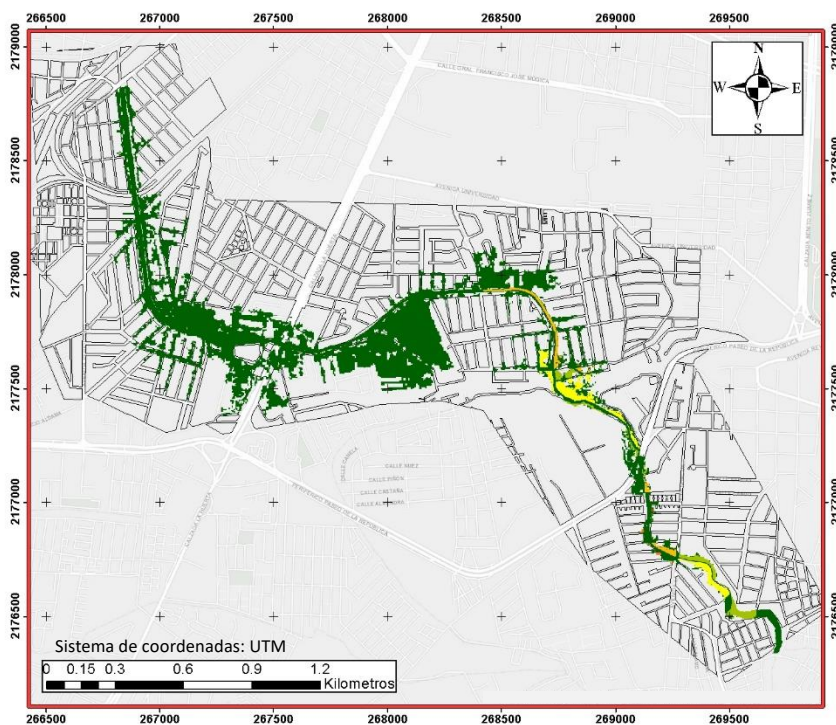
Pérdidas de vida tr 5
Densidad (hab/km2)



C5

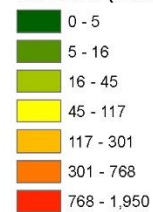


Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Pérdida de vidas tr 5
Densidad (hab/km2)

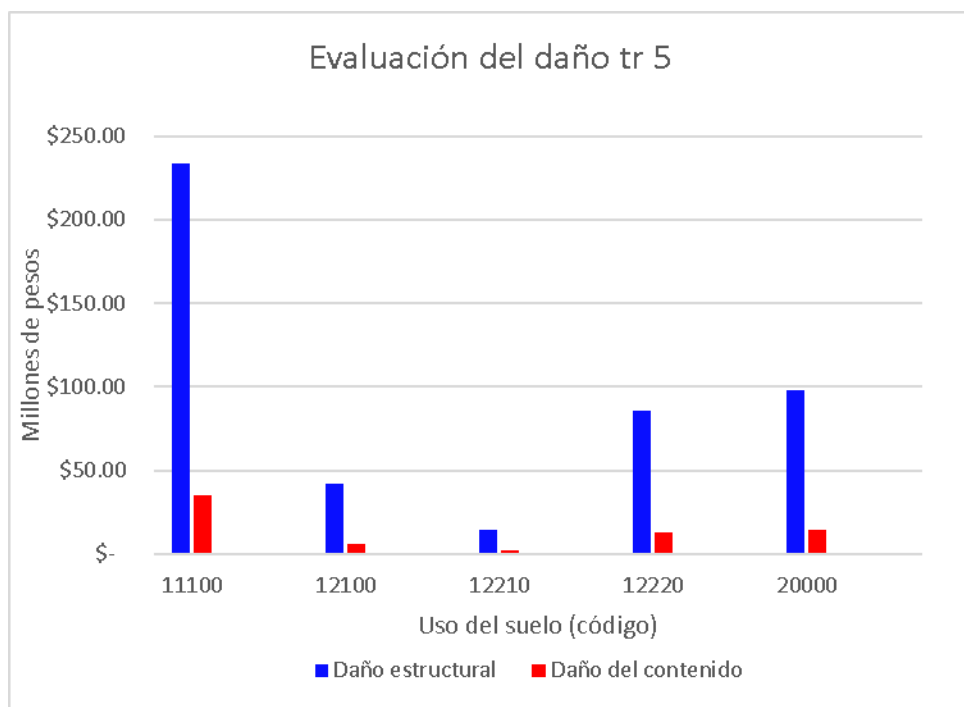


C7

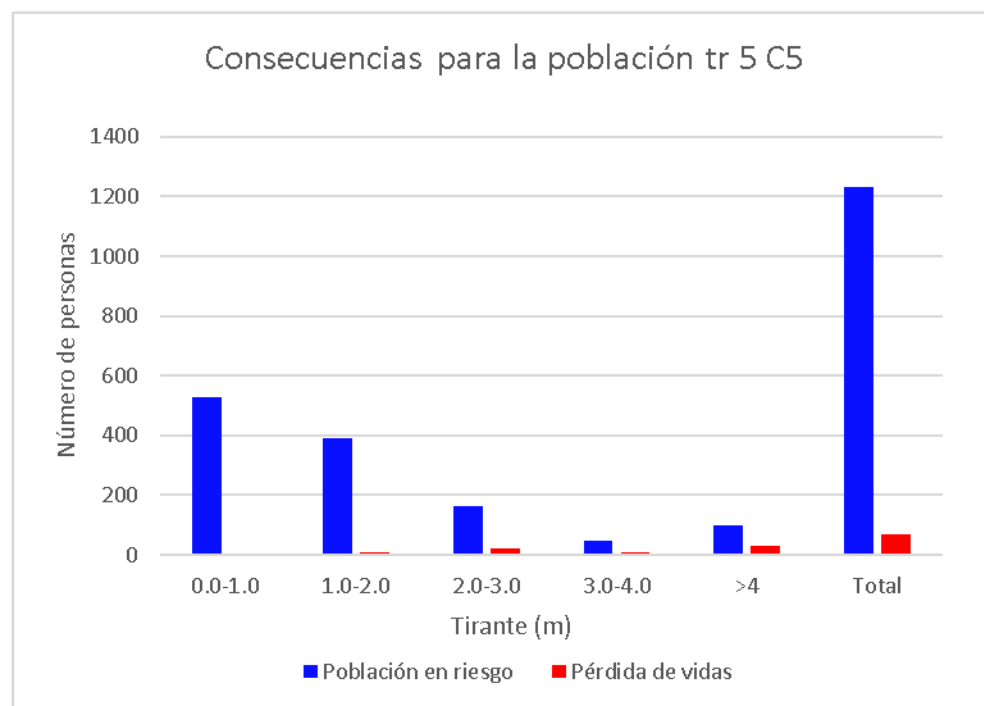
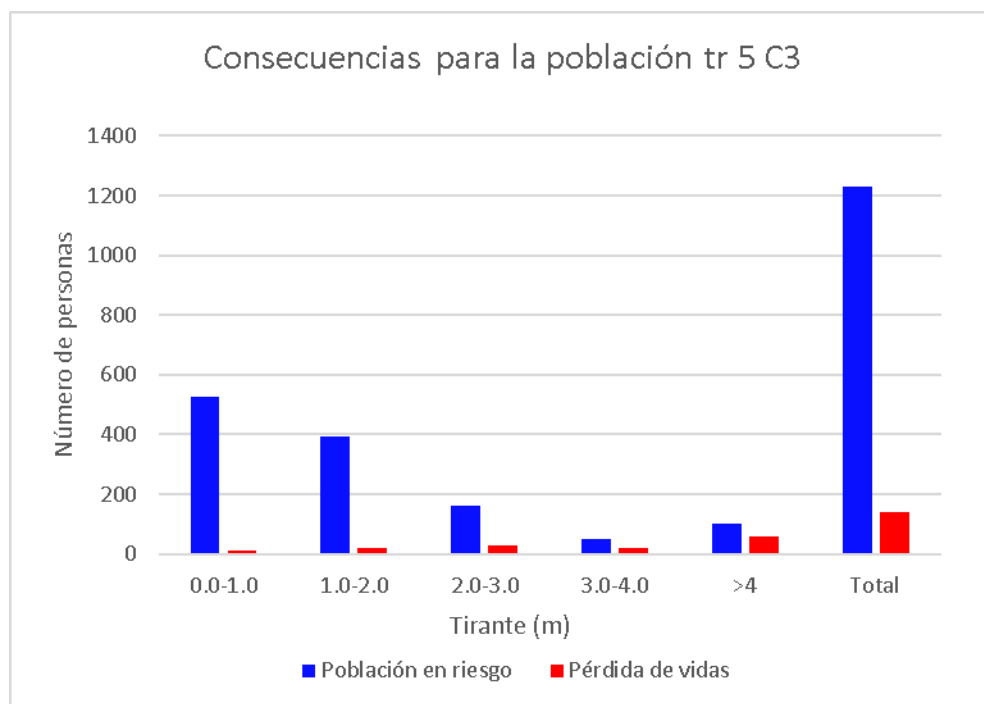


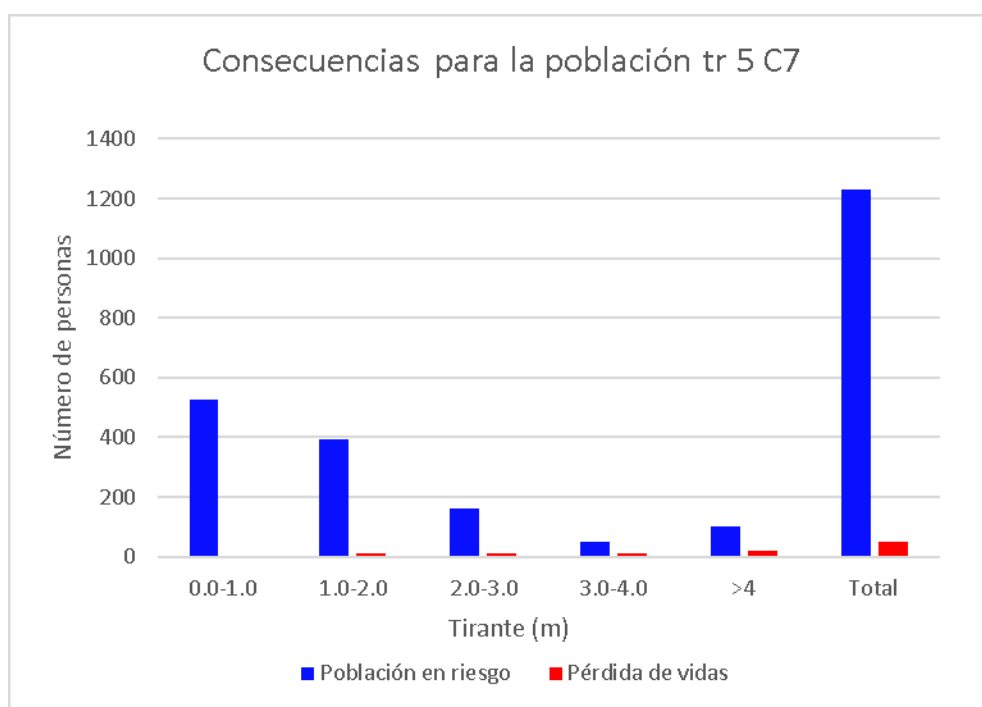
Elaboró: PIC Chrystopher Franco

Tr 5						
Code	Uso de suelo	Área (m ²)	Valor estructural (pesos)	Valor del contenido (pesos)	Daños estructurales (pesos)	Daños del contenido (pesos)
11100	Tejido urbano continuo (densidad >80%)	215300	\$ 526,910,300.00	\$ 79,025,800.00	\$ 233,712,400.00	\$ 35,052,100.00
12100	Industrial	64200	\$ 259,960,000.00	\$ 39,006,800.00	\$ 42,159,200.00	\$ 6,326,000.00
12210	Caminos de alta velocidad y terrenos aladaños	700	\$ 38,672,400.00	\$ 5,800,900.00	\$ 14,758,100.00	\$ 2,213,700.00
12220	Otros caminos y terrenos aladaños	4800	\$ 193,380,000.00	\$ 29,007,000.00	\$ 85,355,800.00	\$ 12,803,400.00
20000	Zonas agrícolas, áreas seminaturales y humedales	72300	\$ 146,276,000.00	\$ 21,908,900.00	\$ 97,716,300.00	\$ 14,635,700.00



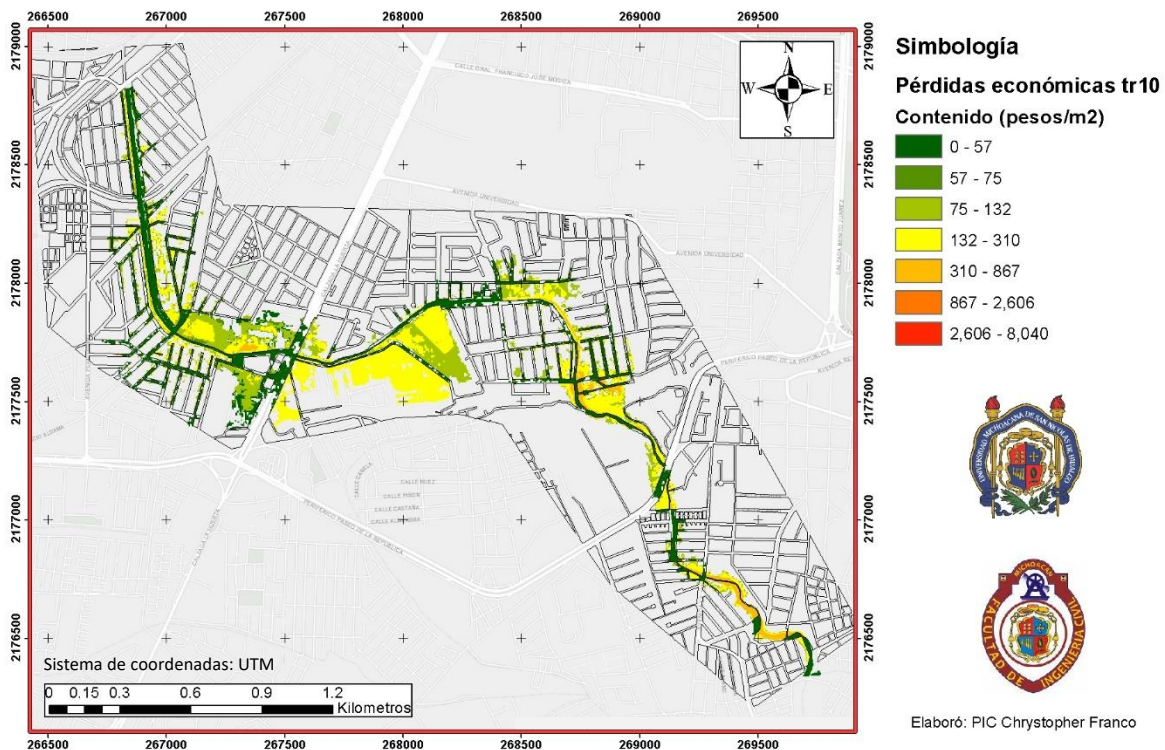
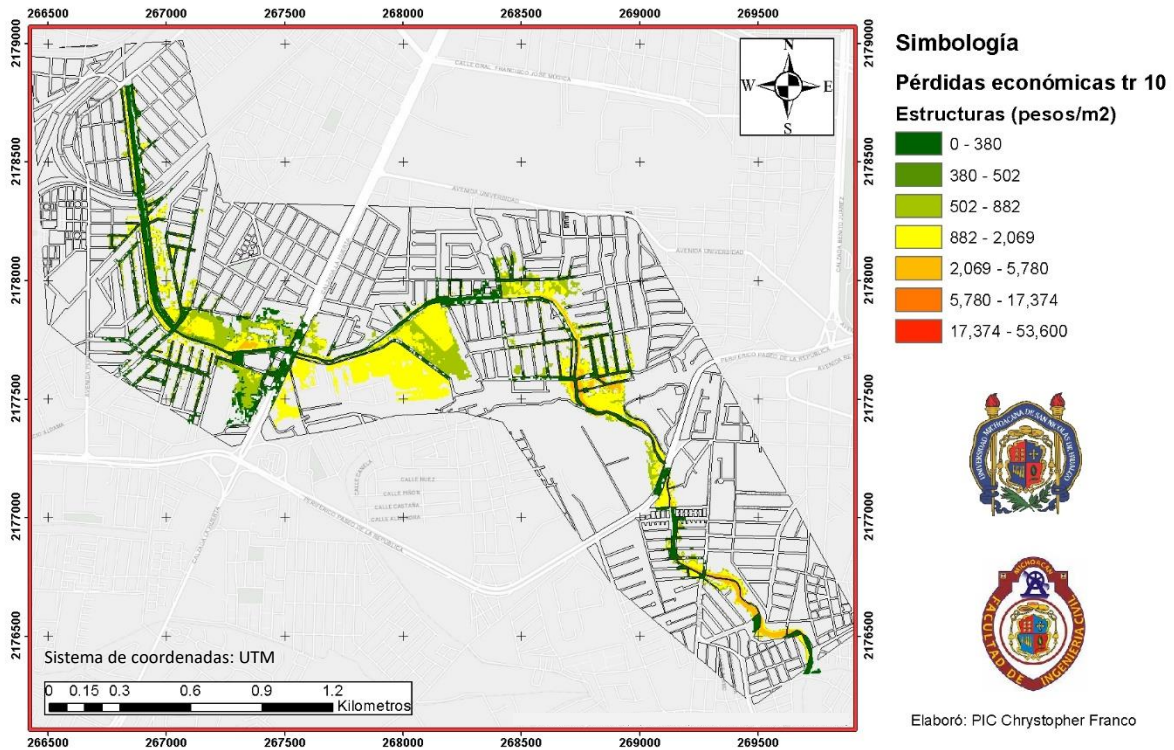
tr 5 años C3					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	180456	494	33	527	1
1.0-2.0	173809	368	23	391	2
2.0-3.0	73600	154	9	163	3
3.0-4.0	24969	45	4	49	2
>4	62134	94	6	100	6
Total	514968	1155	75	1230	14
tr 5 años C5					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	180456	494	33	527	0
1.0-2.0	173809	368	23	391	1
2.0-3.0	73600	154	9	163	2
3.0-4.0	24969	45	4	49	1
>4	62134	94	6	100	3
Total	514968	1155	75	1230	7
tr 5 años C7					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	180456	494	33	527	0
1.0-2.0	173809	368	23	391	1
2.0-3.0	73600	154	9	163	1
3.0-4.0	24969	45	4	49	1
>4	62134	94	6	100	2
Total	514968	1155	75	1230	5

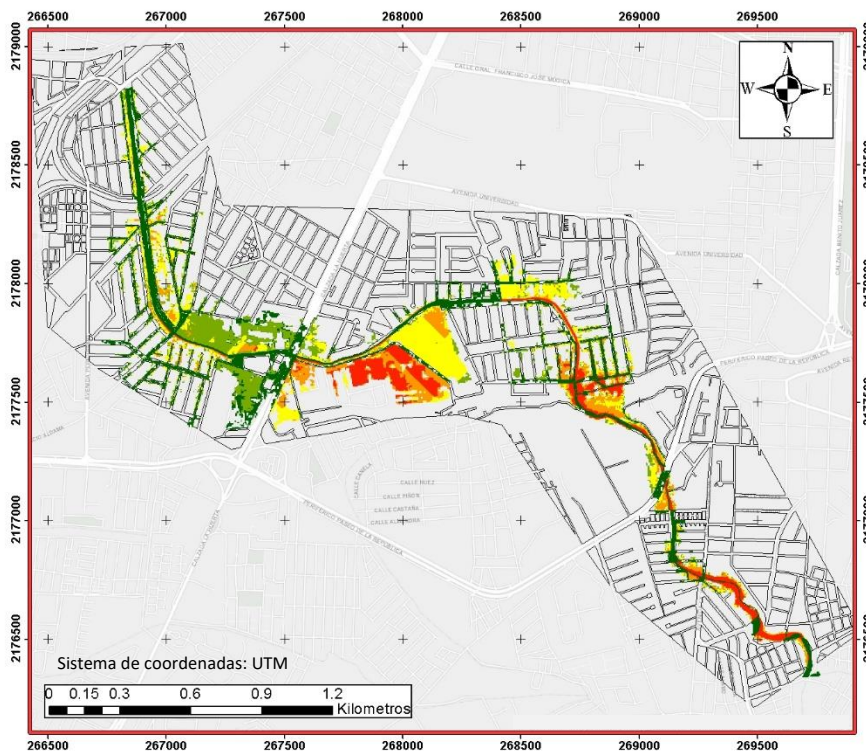




*****Nota: Los valores correspondientes a las pérdidas de vidas fueron multiplicados por 10 para lograr una mejor visualización en el histograma***

6.3.3.Tr 10 años

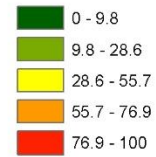




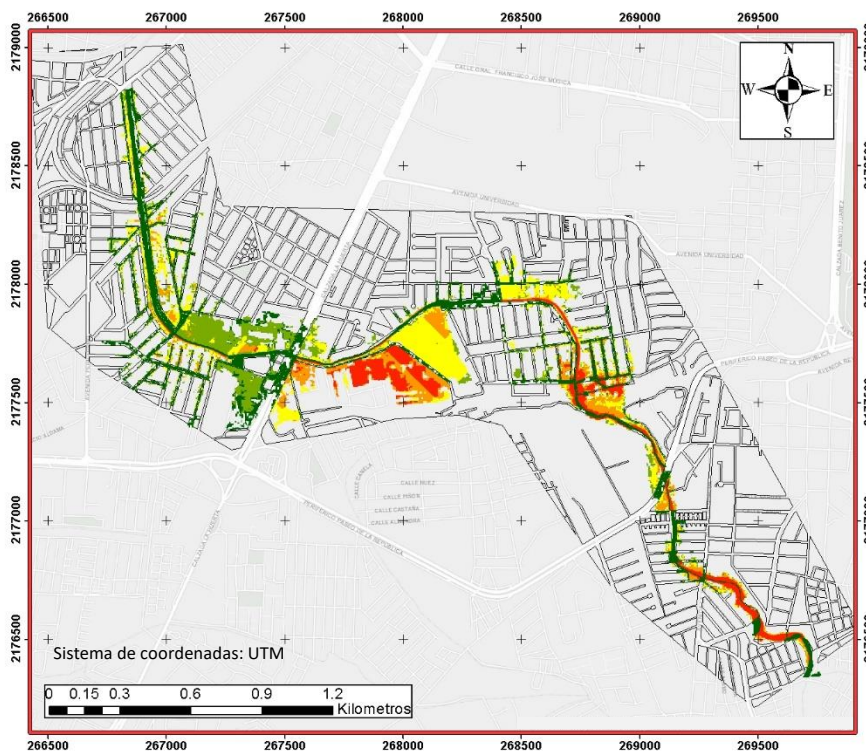
Simbología

Porcentaje Daños tr10

Estructuras



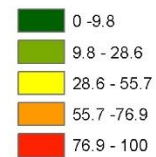
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



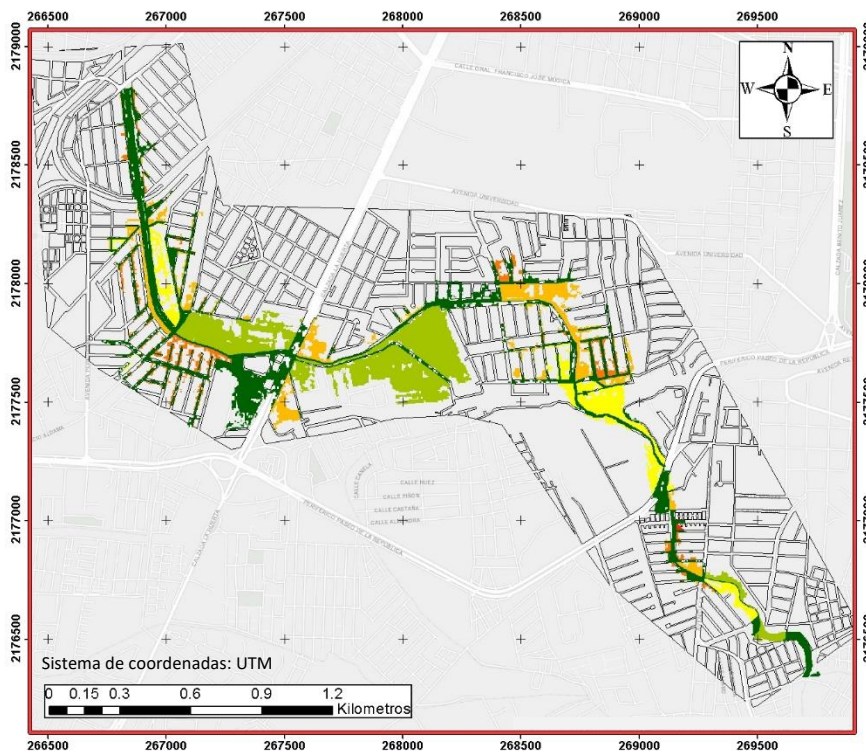
Simbología

Porcentaje Daños tr10

Contenido



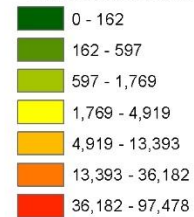
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



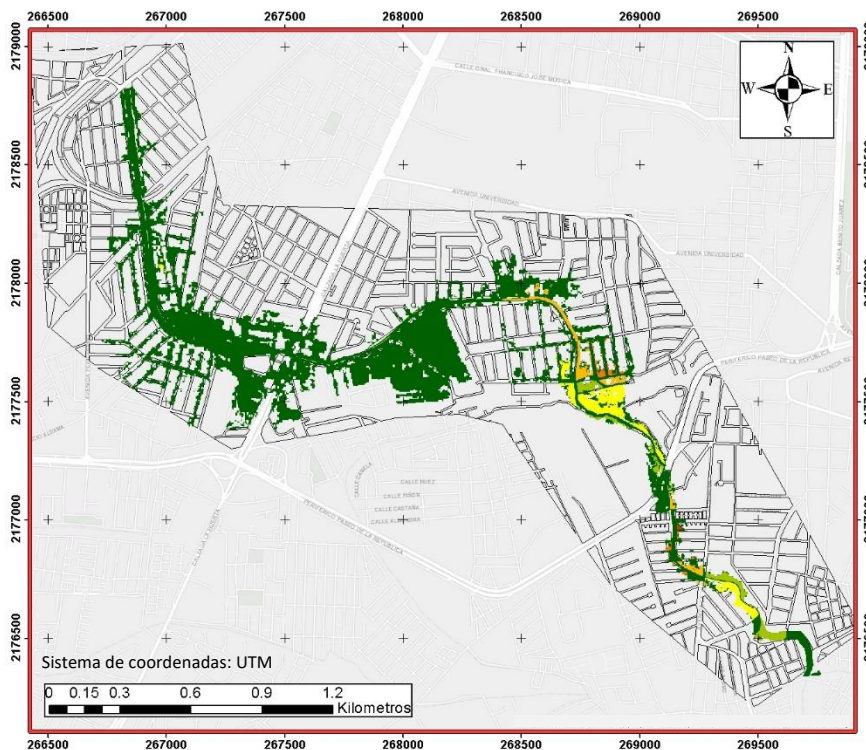
Simbología

Población en riesgo tr10

Densidad (hab/km2)



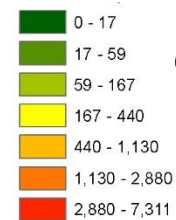
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Pérdidas de vidas tr10

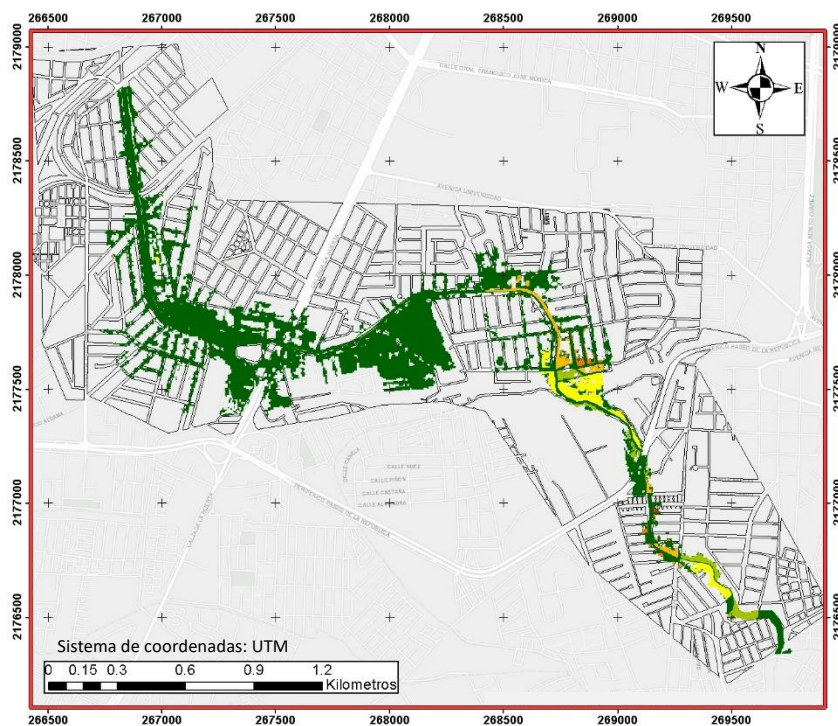
Densidad (hab/km2)



C3

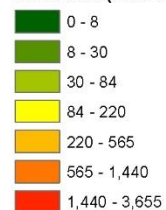


Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

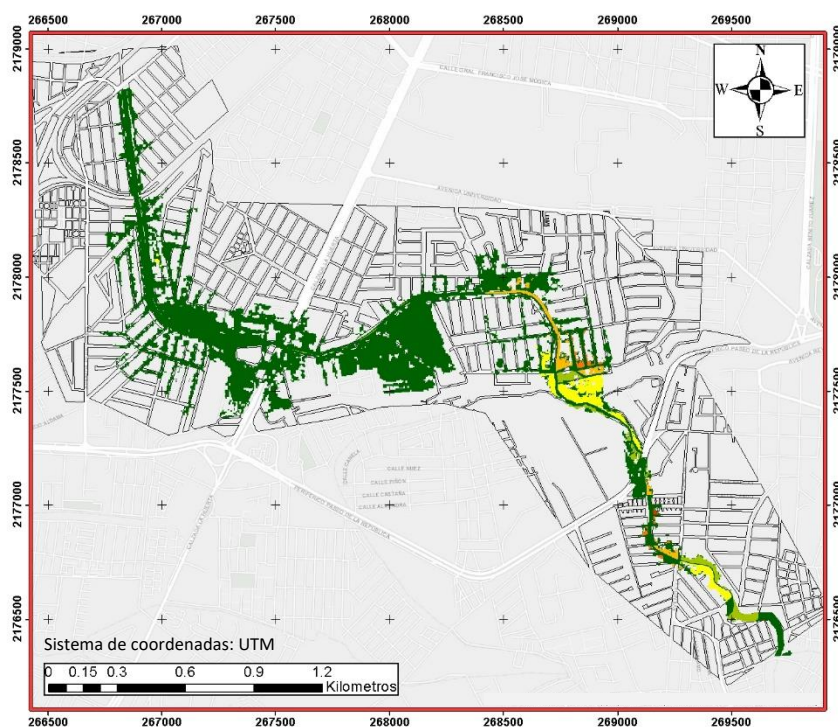
Pérdidas de vida tr 10
Densidad (hab/km2)



C5

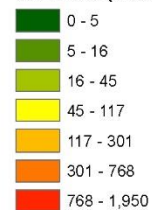


Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Pérdida de vidas tr 10
Densidad (hab/km2)

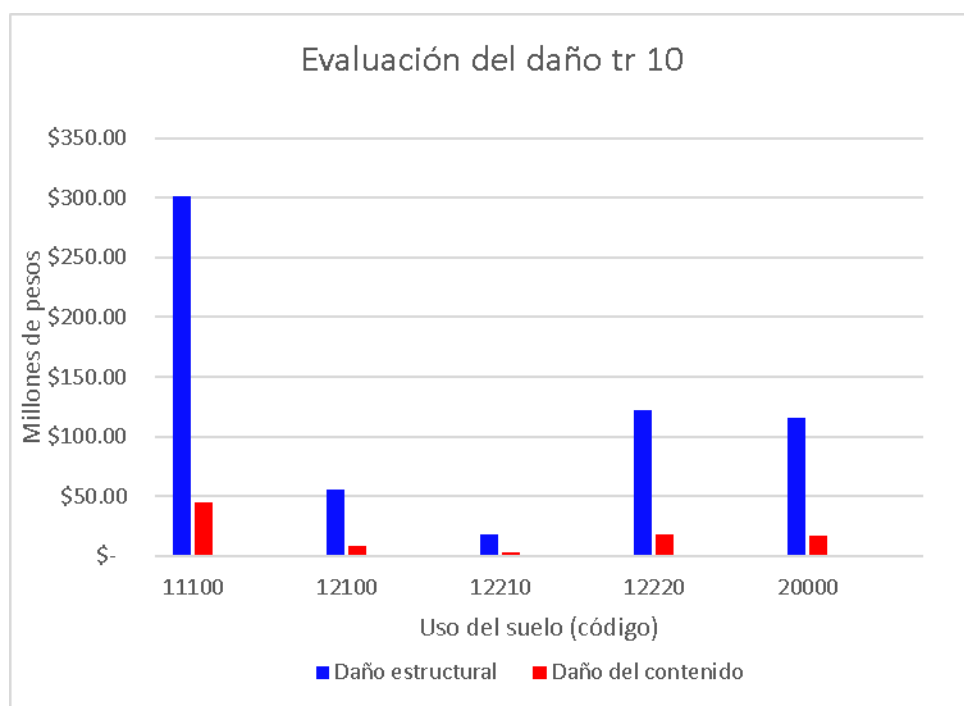


C7

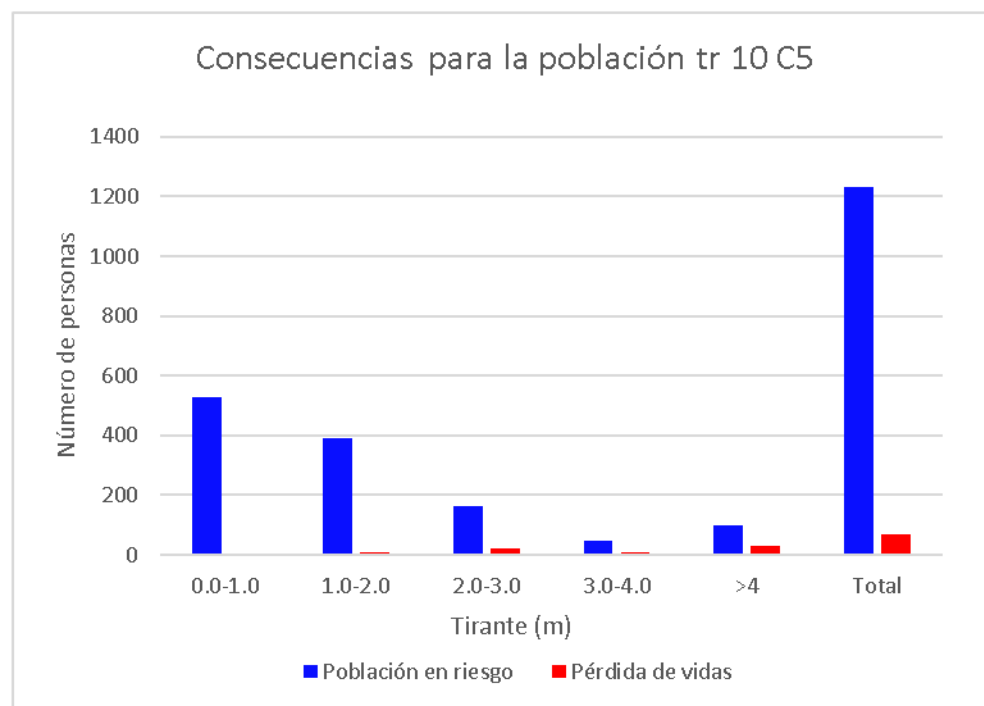


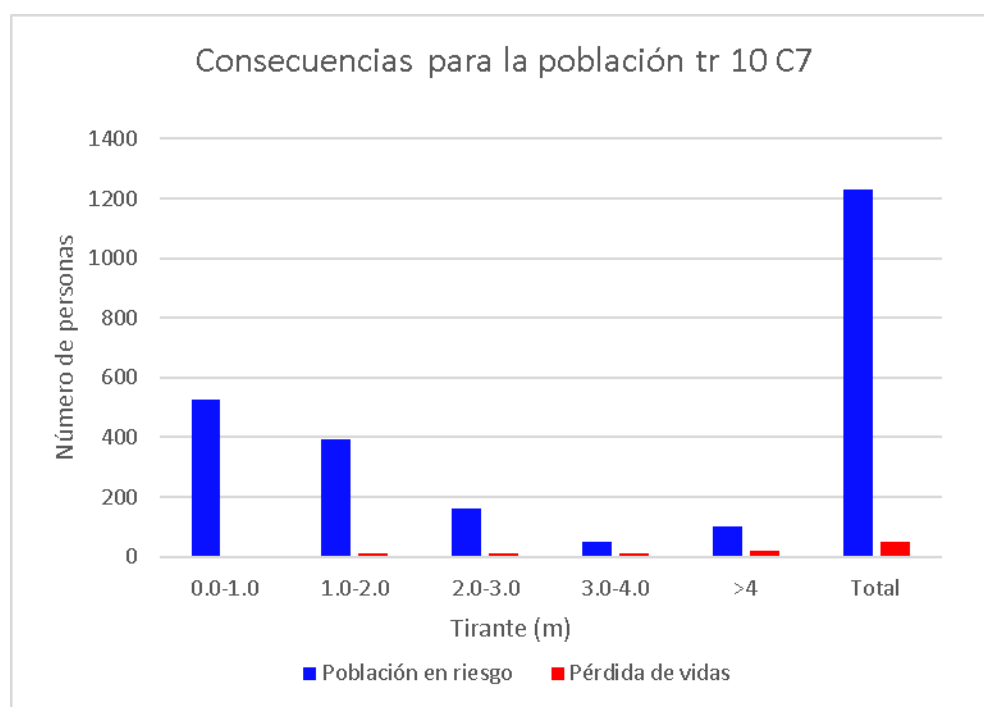
Elaboró: PIC Chrystopher Franco

Tr 10						
Code	Uso de suelo	Área (m ²)	Valor estructural (pesos)	Valor del contenido (pesos)	Daños estructurales (pesos)	Daños del contenido (pesos)
11100	Tejido urbano continuo (densidad >80%)	262300	\$ 641,801,600.00	\$ 96,257,200.00	\$ 301,779,200.00	\$ 45,260,700.00
12100	Industrial	74100	\$ 300,305,800.00	\$ 45,060,700.00	\$ 55,595,500.00	\$ 8,342,100.00
12210	Caminos de alta velocidad y terrenos aledaños	800	\$ 43,295,400.00	\$ 6,494,300.00	\$ 18,335,600.00	\$ 2,750,300.00
12220	Otros caminos y terrenos aledaños	6300	\$ 250,130,000.00	\$ 37,519,500.00	\$ 122,414,100.00	\$ 18,362,100.00
20000	Zonas agrícolas, áreas seminaturales y humedales	75700	\$ 153,128,400.00	\$ 22,935,200.00	\$ 115,339,200.00	\$ 17,275,200.00



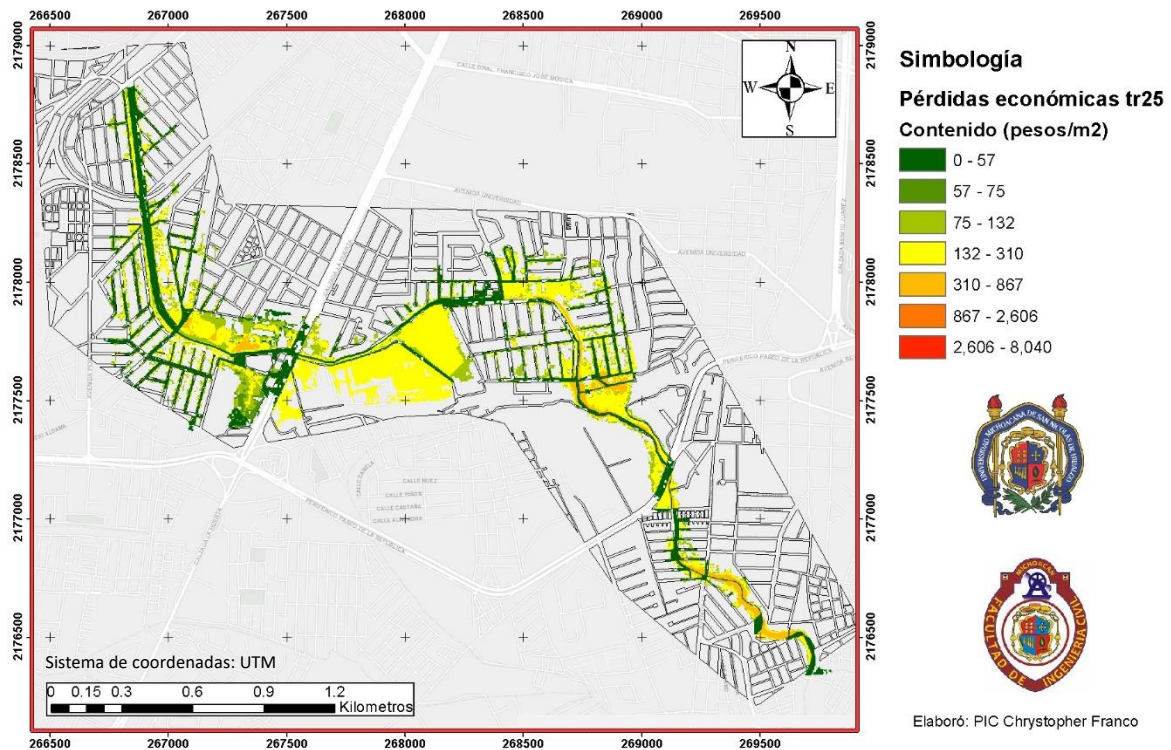
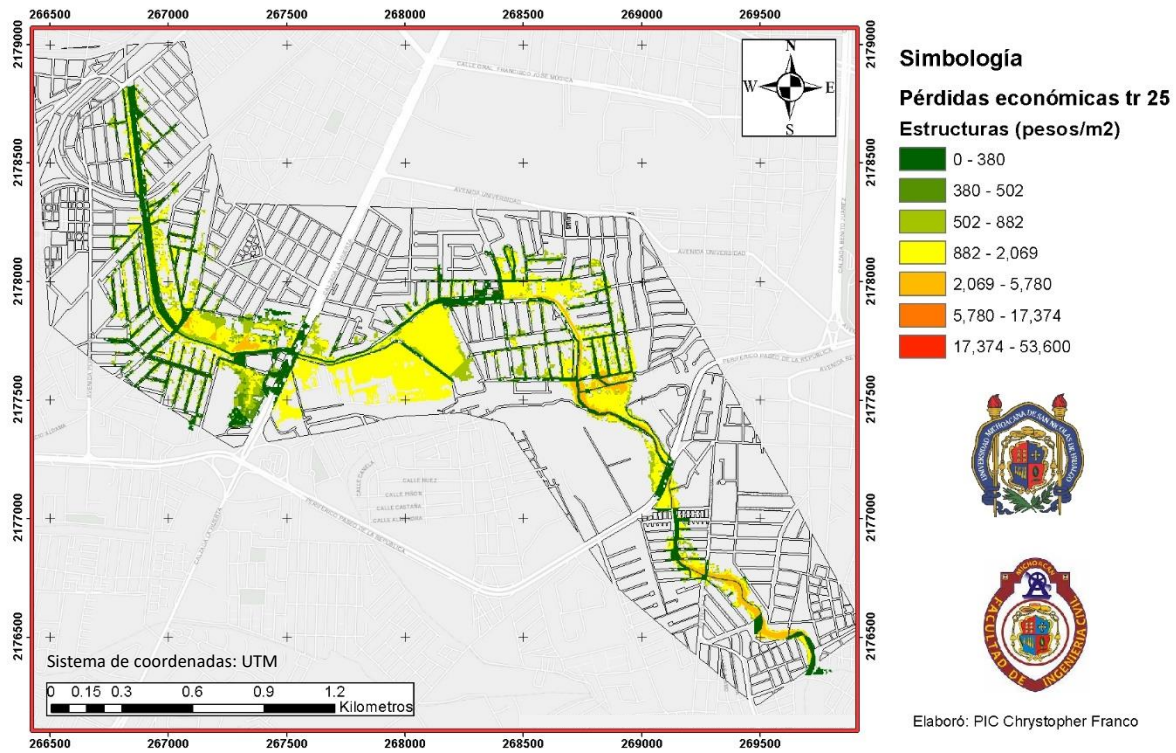
tr 10 años C3					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	180456	494	33	527	1
1.0-2.0	173809	368	23	391	2
2.0-3.0	73600	154	9	163	3
3.0-4.0	24969	45	4	49	2
>4	62134	94	6	100	6
Total	514968	1155	75	1230	14
tr 10 años C5					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	180456	494	33	527	0
1.0-2.0	173809	368	23	391	1
2.0-3.0	73600	154	9	163	2
3.0-4.0	24969	45	4	49	1
>4	62134	94	6	100	3
Total	514968	1155	75	1230	7
tr 10 años C7					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	180456	494	33	527	0
1.0-2.0	173809	368	23	391	1
2.0-3.0	73600	154	9	163	1
3.0-4.0	24969	45	4	49	1
>4	62134	94	6	100	2
Total	514968	1155	75	1230	5

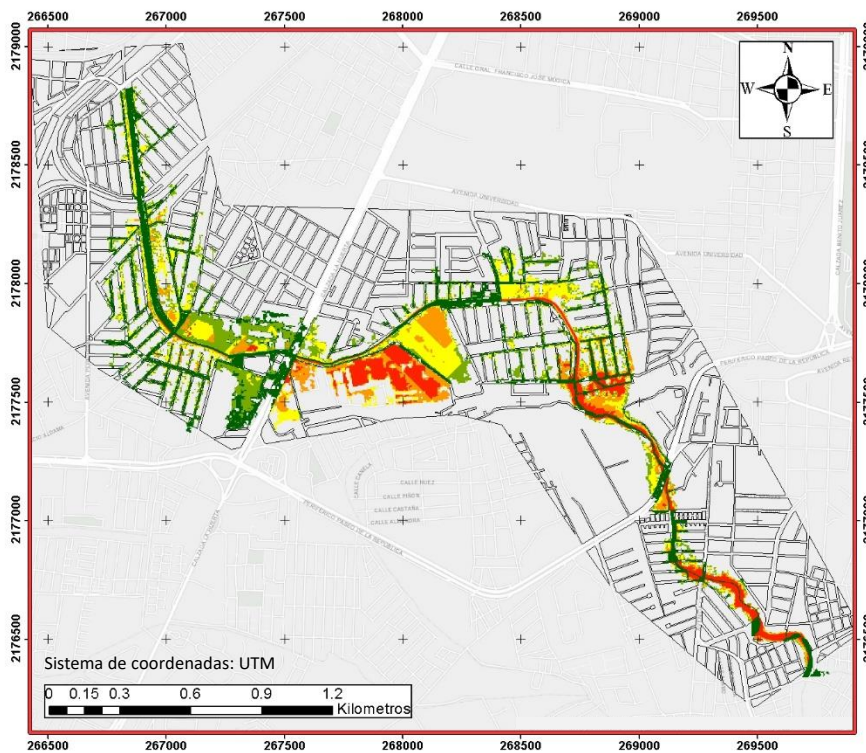




*****Nota: Los valores correspondientes a las pérdidas de vidas fueron multiplicados por 10 para lograr una mejor visualización en el histograma***

6.3.4. Tr 25 años

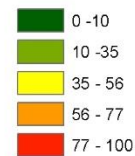




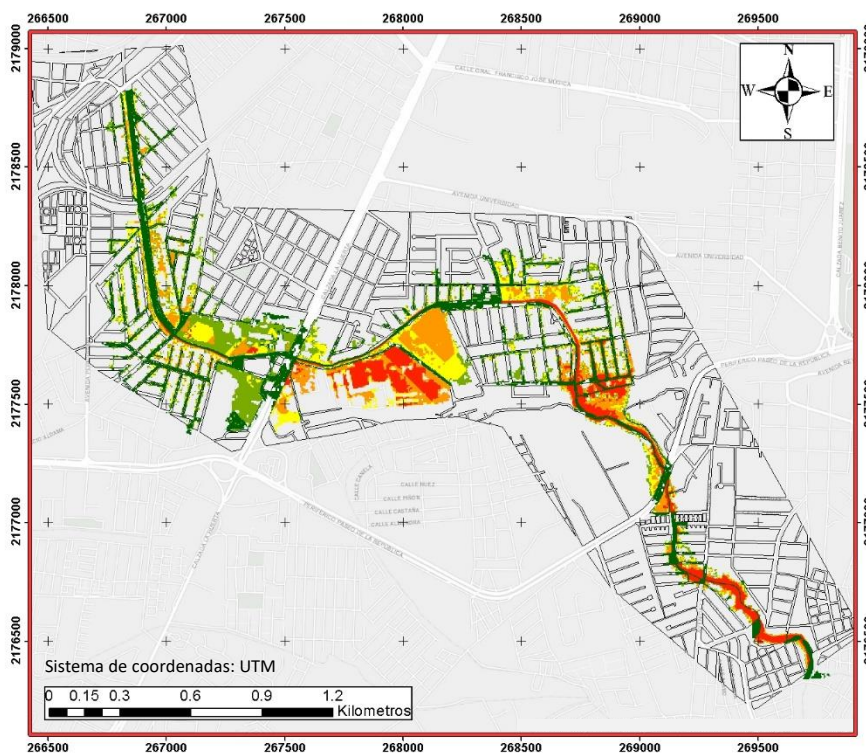
Simbología

Porcentaje Daños tr25

Estructuras



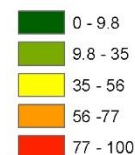
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



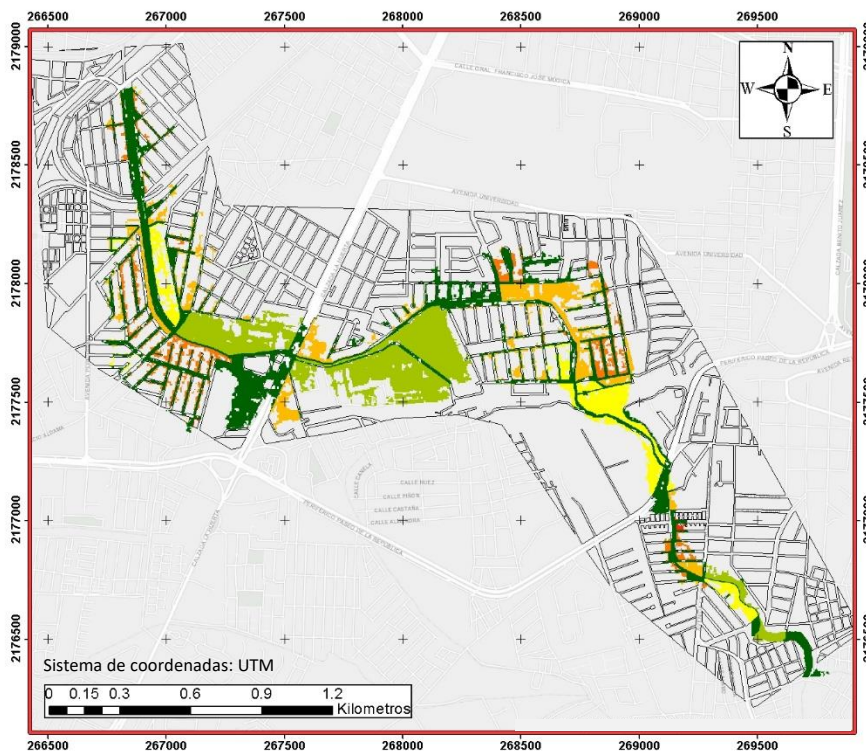
Simbología

Porcentaje Daños tr25

Contenido



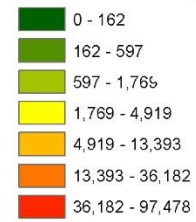
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



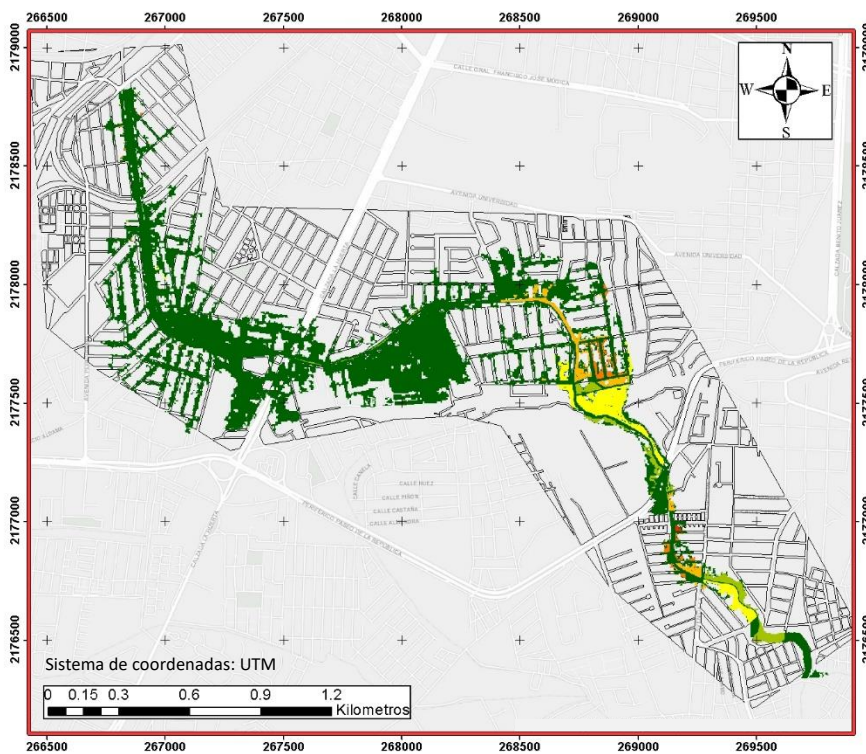
Simbología

Población en riesgo tr25

Densidad (hab/km2)



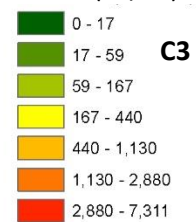
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



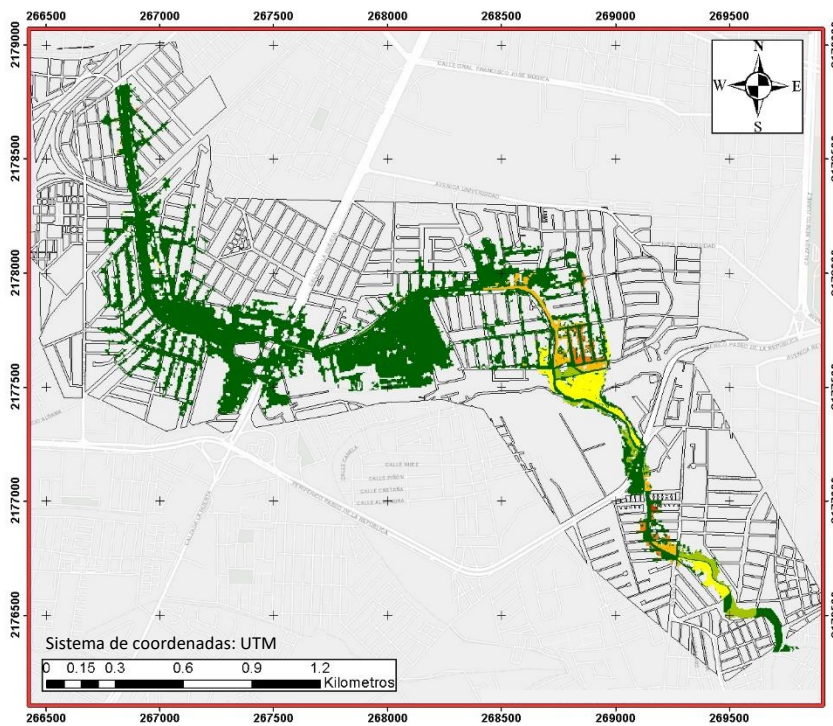
Simbología

Pérdidas de vidas tr25

Densidad (hab/km2)

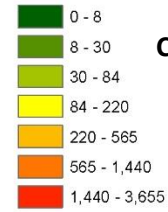


Elaboró: PIC Chrystopher Franco

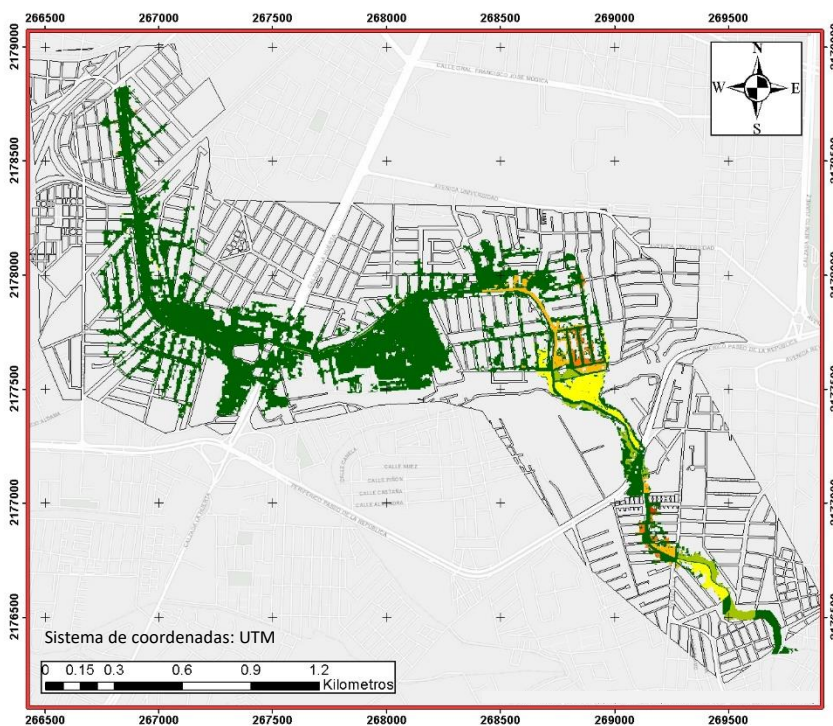


Simbología

Pérdidas de vidas tr 25
Densidad (hab/km2)

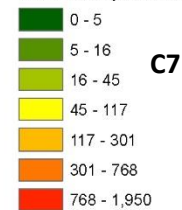


Elaboró: PIC Chrystopher Franco



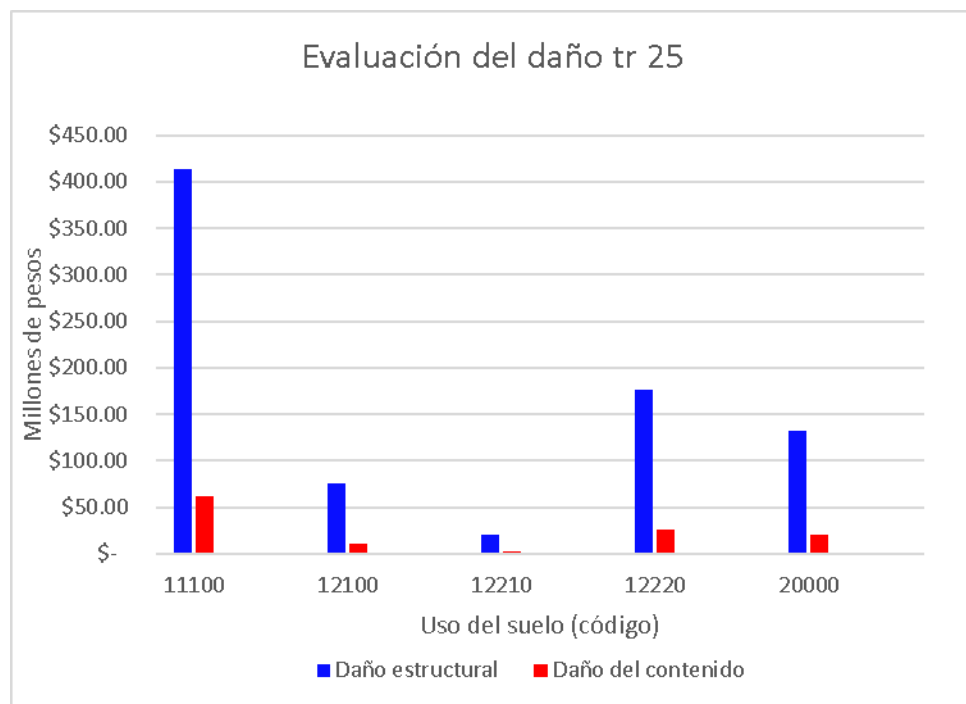
Simbología

Pérdida de vidas tr 25
Densidad (hab/km2)

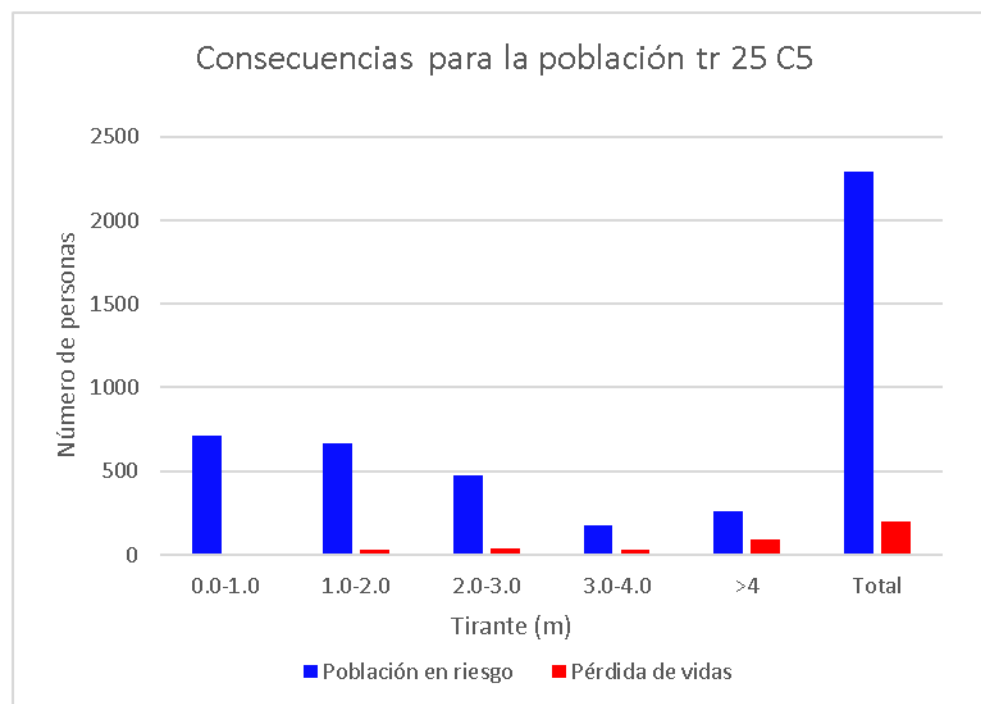
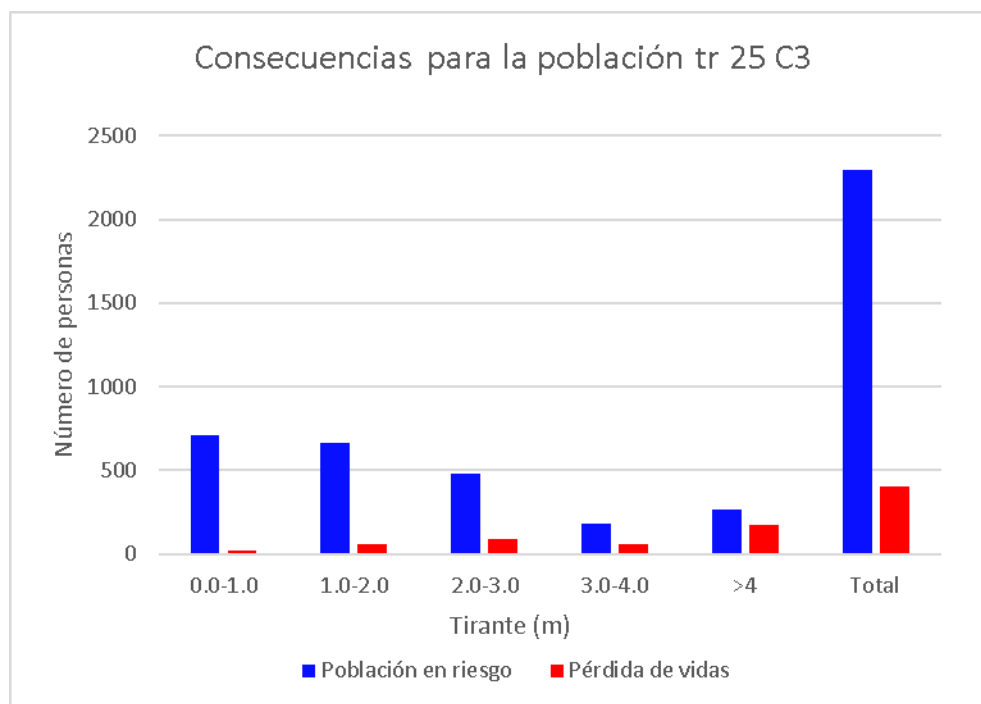


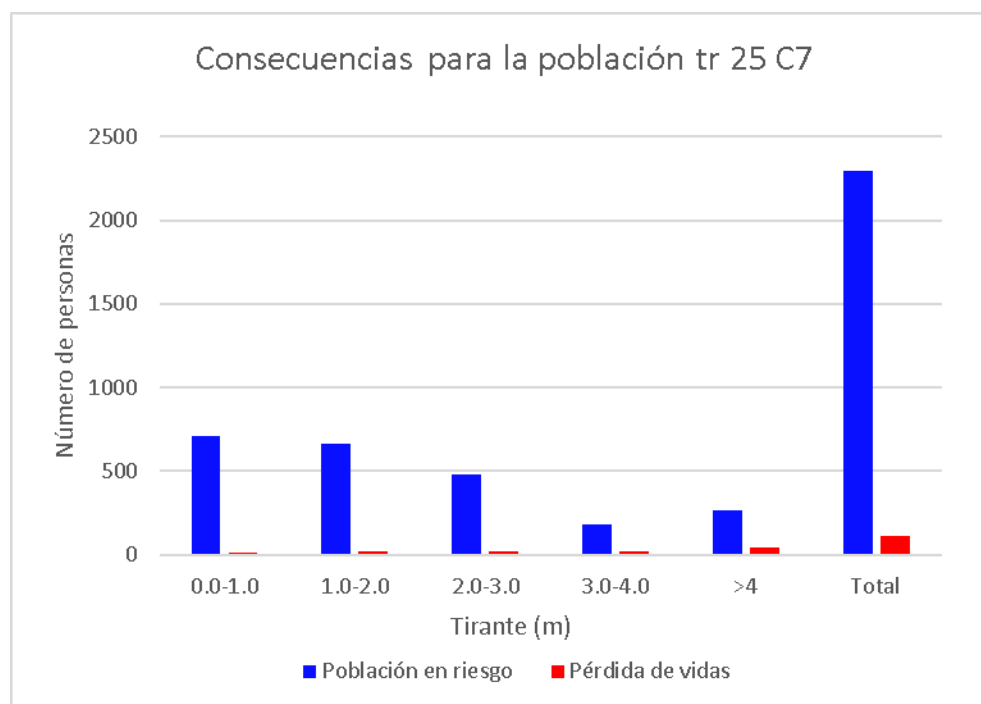
Elaboró: PIC Chrystopher Franco

Tr 25						
Code	Uso de suelo	Área (m ²)	Valor estructural (pesos)	Valor del contenido (pesos)	Daños estructurales (pesos)	Daños del contenido (pesos)
11100	Tejido urbano continuo (densidad >80%)	329200	\$ 805,630,600.00	\$ 120,828,000.00	\$ 413,309,100.00	\$ 61,988,000.00
12100	Industrial	80500	\$ 326,318,800.00	\$ 48,963,900.00	\$ 74,997,600.00	\$ 11,253,300.00
12210	Caminos de alta velocidad y terrenos aledaños	800	\$ 45,024,000.00	\$ 6,753,600.00	\$ 20,937,400.00	\$ 3,140,600.00
12220	Otros caminos y terrenos aledaños	8300	\$ 330,794,500.00	\$ 49,620,000.00	\$ 175,645,000.00	\$ 26,346,800.00
20000	Zonas agrícolas, áreas seminaturales y humedales	85100	\$ 172,125,900.00	\$ 25,780,600.00	\$ 132,074,900.00	\$ 19,781,900.00



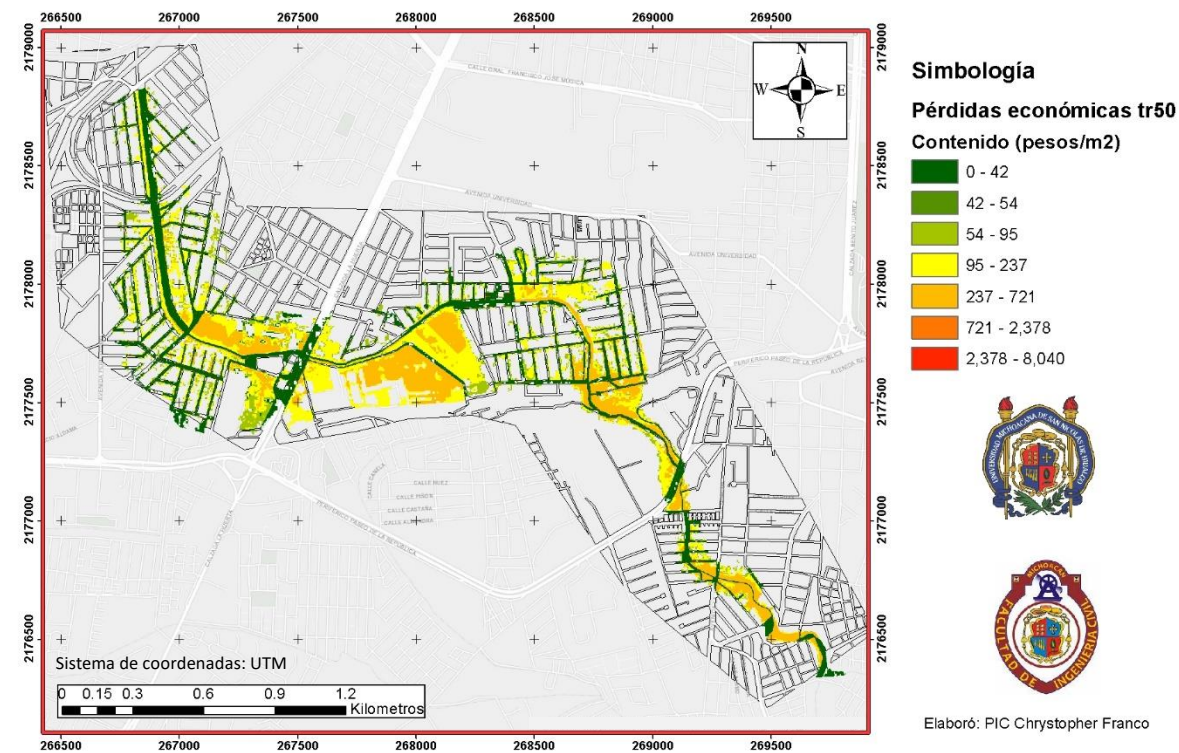
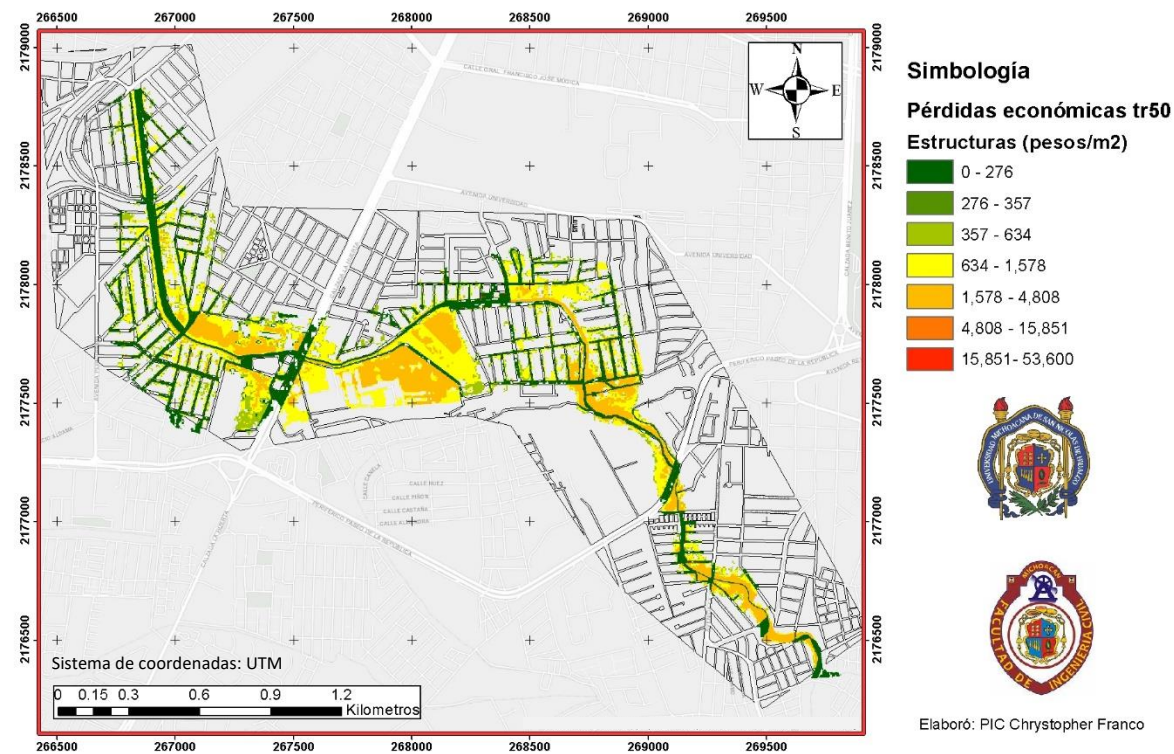
tr 25 años C3					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	174470	667	43	710	2
1.0-2.0	208068	622	45	667	6
2.0-3.0	168784	445	32	477	9
3.0-4.0	73420	167	11	178	6
>4	115119	246	16	262	17
Total	739861	2147	147	2294	40
tr 25 años C5					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	174470	667	43	710	1
1.0-2.0	208068	622	45	667	3
2.0-3.0	168784	445	32	477	4
3.0-4.0	73420	167	11	178	3
>4	115119	246	16	262	9
Total	739861	2147	147	2294	20
tr 25 años C7					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	174470	667	43	710	1
1.0-2.0	208068	622	45	667	2
2.0-3.0	168784	445	32	477	2
3.0-4.0	73420	167	11	178	2
>4	115119	246	16	262	4
Total	739861	2147	147	2294	11

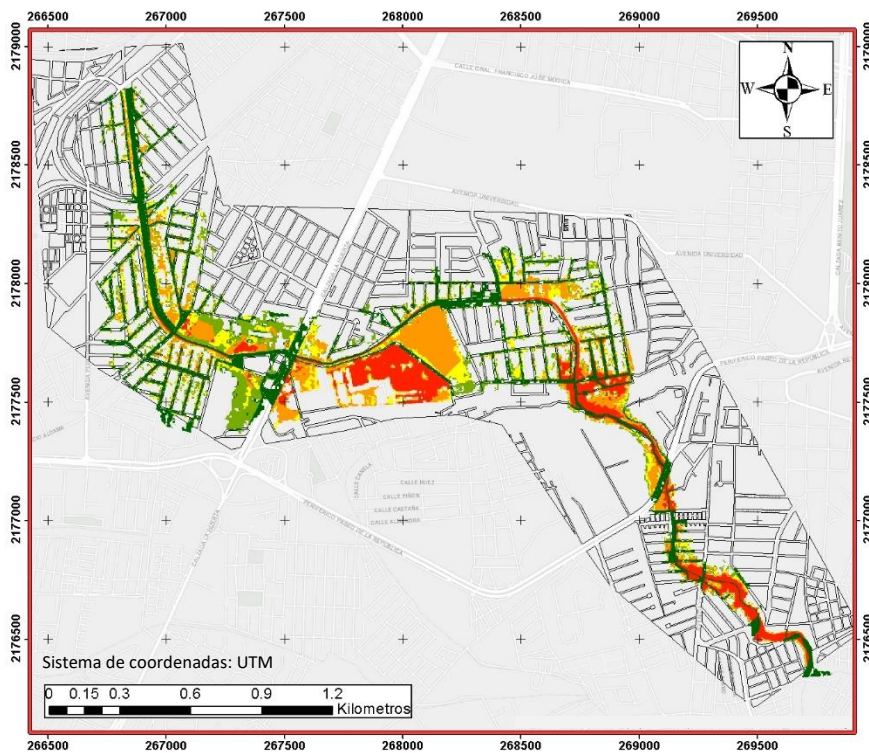




*****Nota: Los valores correspondientes a las pérdidas de vidas fueron multiplicados por 10 para lograr una mejor visualización en el histograma***

6.3.5. Tr 50 años

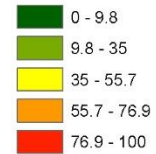




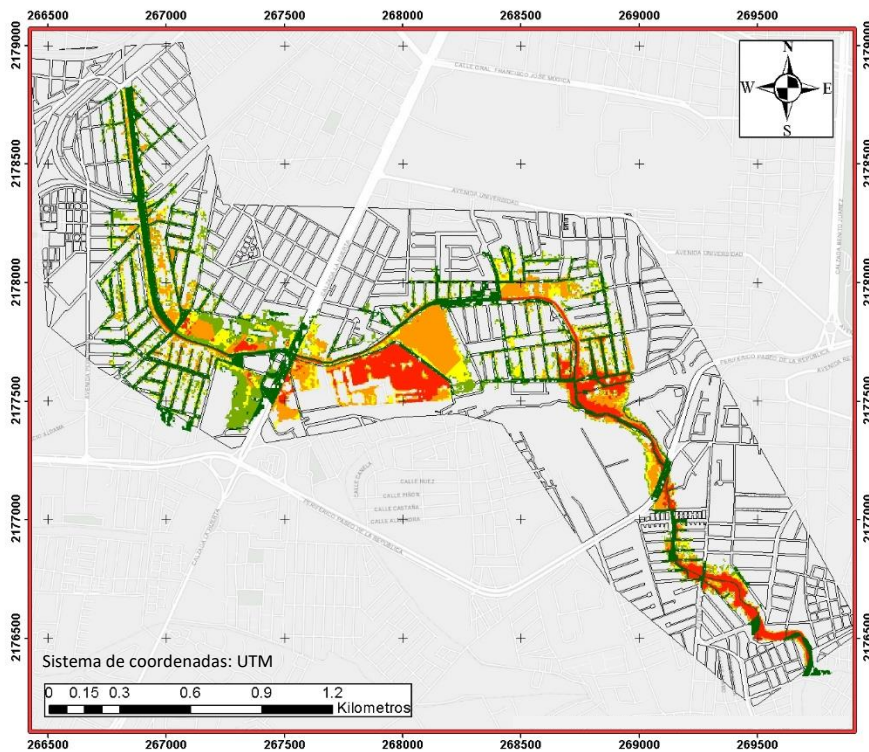
Simbología

Porcentaje Daños tr50

Estructuras



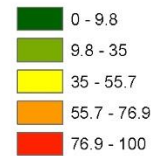
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Porcentaje Daños tr50

Contenido



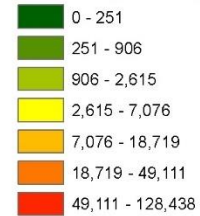
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



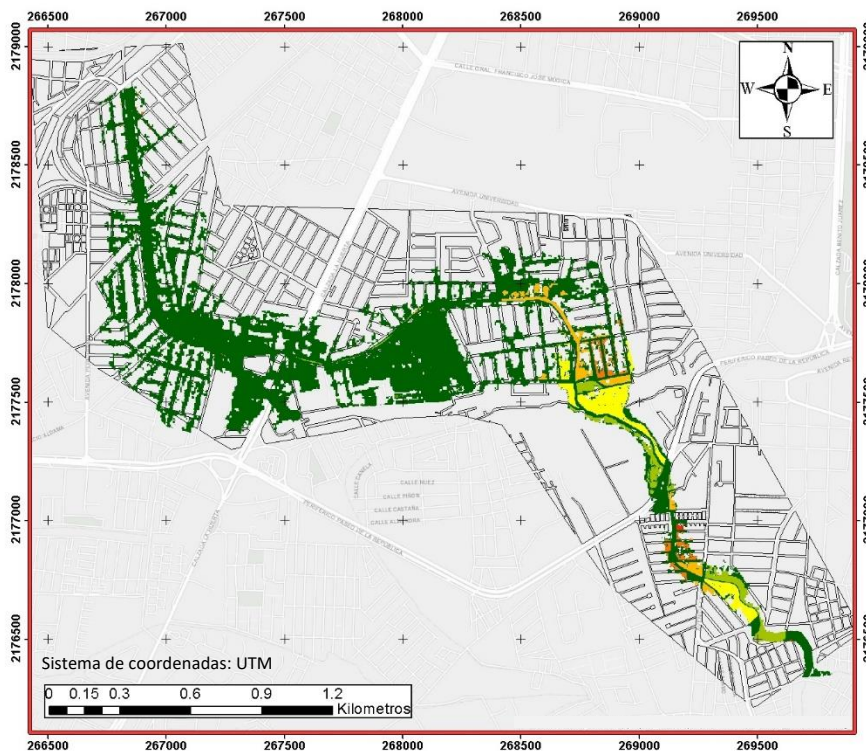
Simbología

Población en riesgo tr50

Densidad (hab/km2)



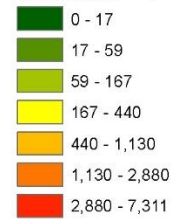
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Pérdidas de vidas tr50

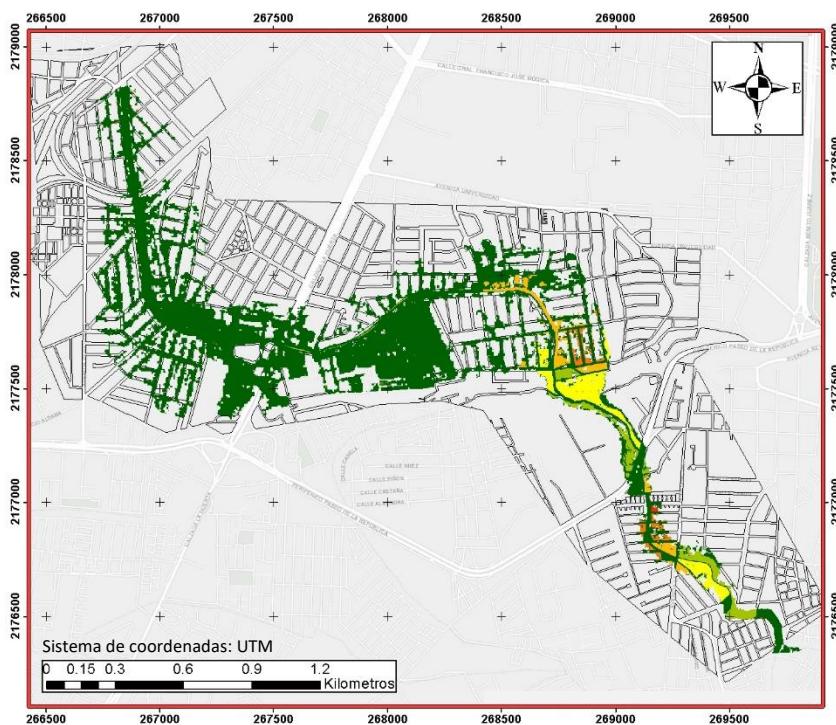
Densidad (hab/km2)



C3



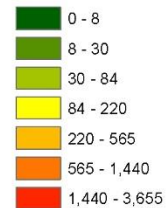
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Pérdidas de vida tr 50

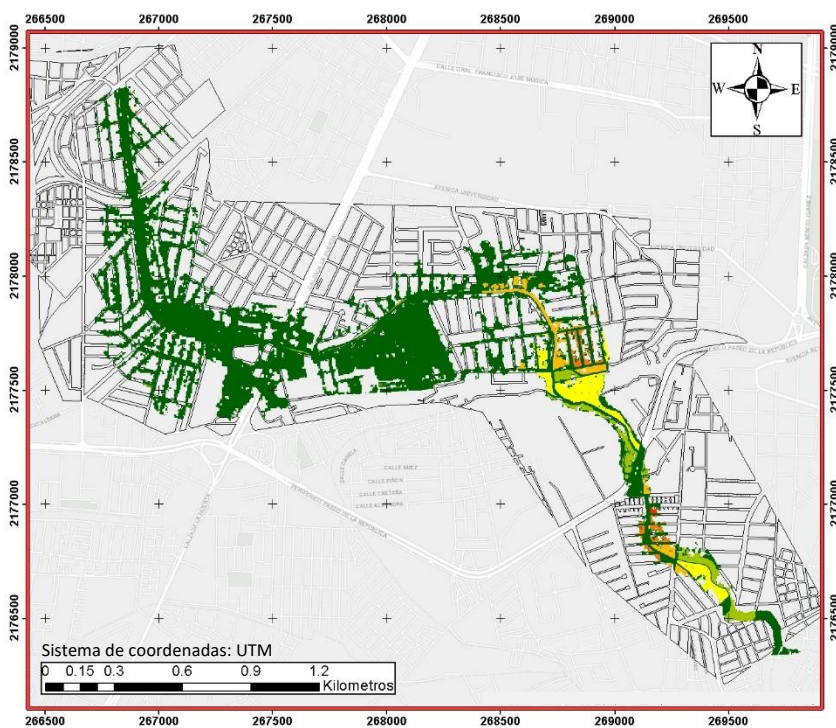
Densidad (hab/km2)



C5



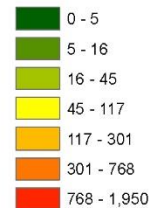
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Pérdida de vidas tr 50

Densidad (hab/km2)

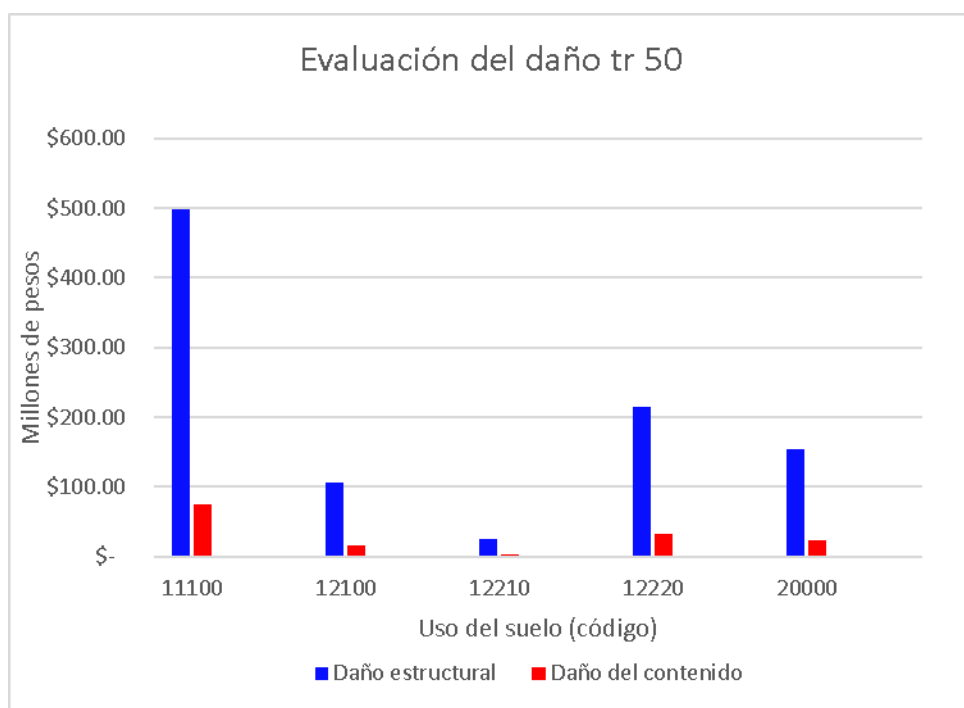


C7

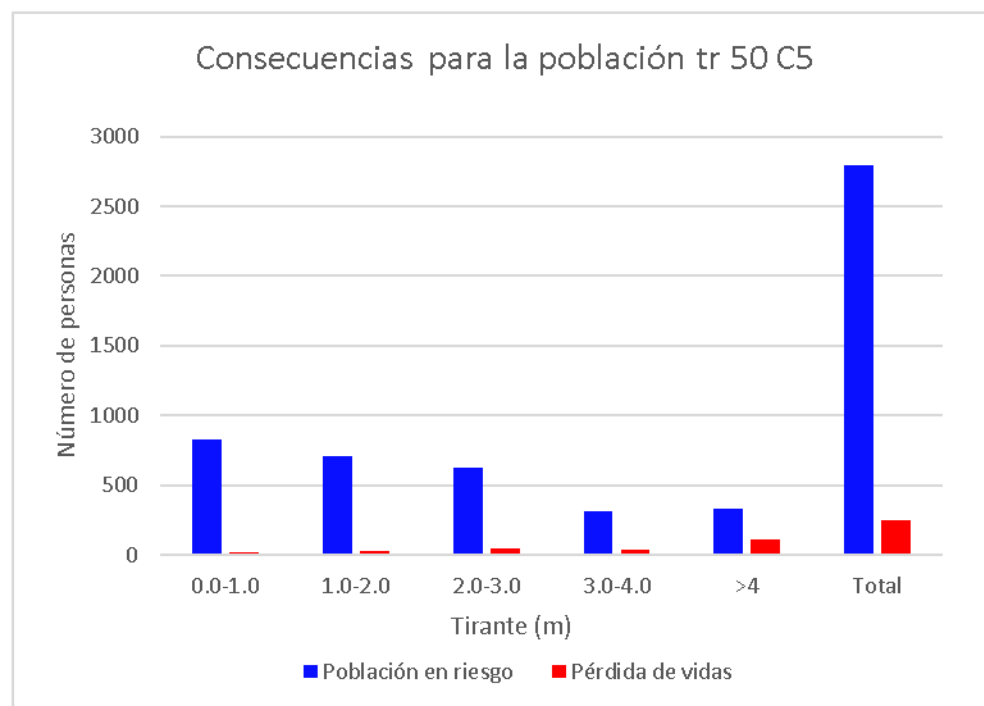
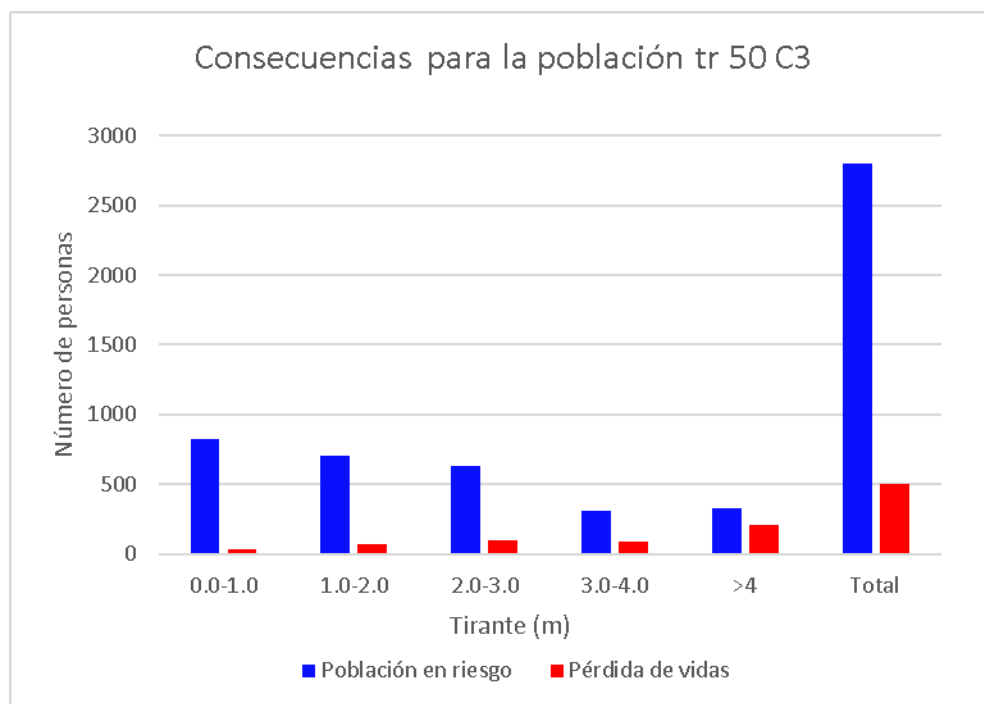


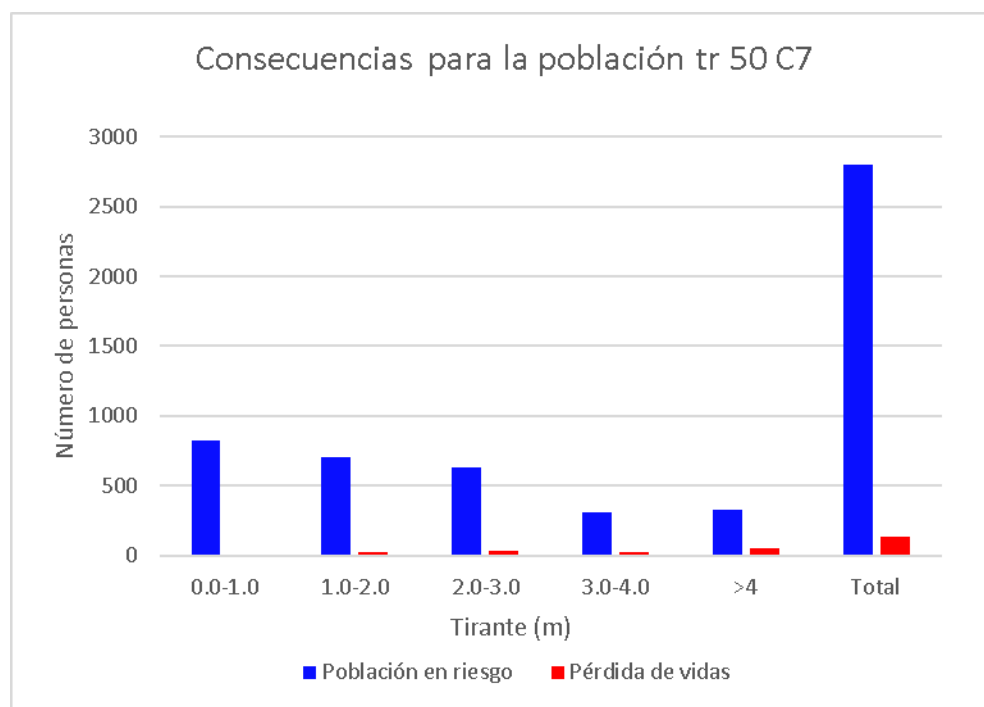
Elaboró: PIC Chrystopher Franco

Tr 50						
Code	Uso de suelo	Área (m ²)	Valor estructural (pesos)	Valor del contenido (pesos)	Daños estructurales (pesos)	Daños del contenido (pesos)
11100	Tejido urbano continuo (densidad >80%)	385200	\$ 942,548,900.00	\$ 141,363,300.00	\$ 498,988,300.00	\$ 74,837,900.00
12100	Industrial	84100	\$ 340,779,800.00	\$ 51,133,900.00	\$ 106,953,000.00	\$ 16,048,200.00
12210	Caminos de alta velocidad y terrenos aledaños	900	\$ 50,611,800.00	\$ 7,591,800.00	\$ 25,677,800.00	\$ 3,851,700.00
12220	Otros caminos y terrenos aledaños	9700	\$ 388,535,400.00	\$ 58,281,000.00	\$ 214,640,500.00	\$ 32,196,300.00
20000	Zonas agrícolas, áreas seminaturales y humedales	93500	\$ 189,112,300.00	\$ 28,324,800.00	\$ 153,818,000.00	\$ 23,038,500.00



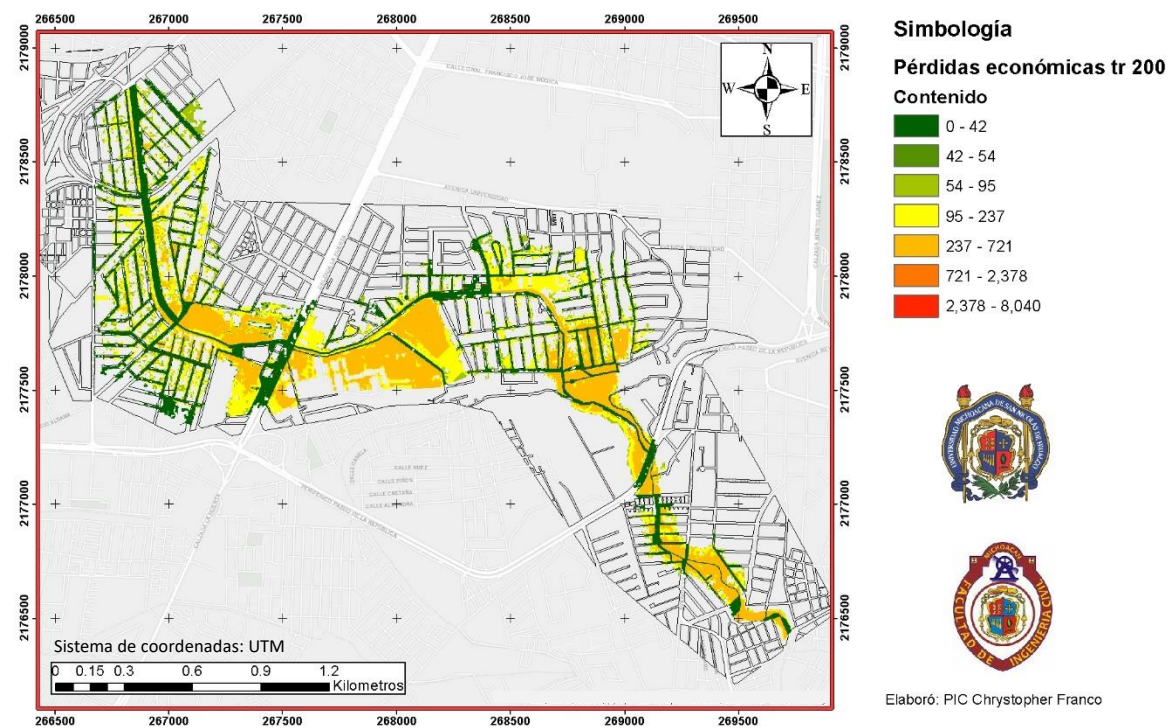
tr 50 años C3					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	172373	780	44	824	3
1.0-2.0	194819	662	44	706	7
2.0-3.0	214907	586	41	627	10
3.0-4.0	121777	291	19	310	9
>4	142997	312	19	331	21
Total	846873	2631	167	2798	50
tr 50 años C5					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	172373	780	44	824	2
1.0-2.0	194819	662	44	706	3
2.0-3.0	214907	586	41	627	5
3.0-4.0	121777	291	19	310	4
>4	142997	312	19	331	11
Total	846873	2631	167	2798	25
tr 50 años C7					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	172373	780	44	824	1
1.0-2.0	194819	662	44	706	2
2.0-3.0	214907	586	41	627	3
3.0-4.0	121777	291	19	310	2
>4	142997	312	19	331	5
Total	846873	2631	167	2798	13

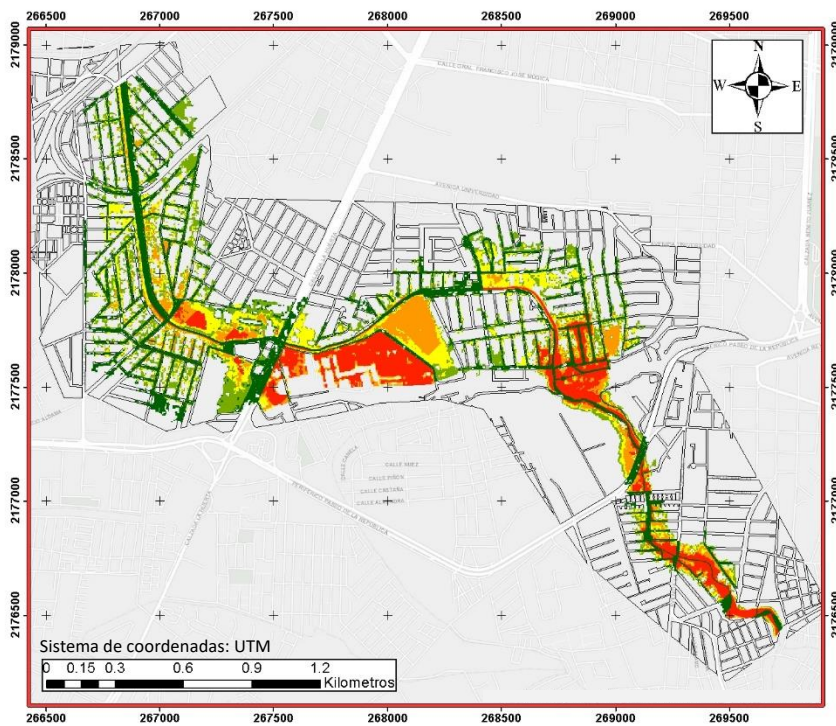




*****Nota: Los valores correspondientes a las pérdidas de vidas fueron multiplicados por 10 para lograr una mejor visualización en el histograma***

6.3.6. Tr 200 años

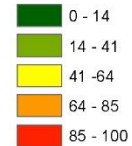




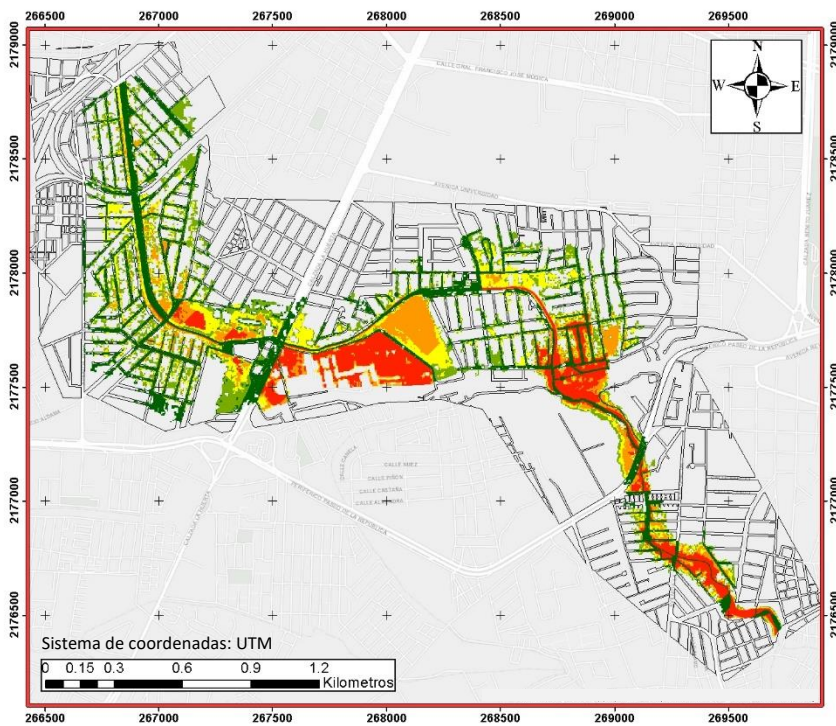
Simbología

Porcentaje Daños tr200

Estructuras



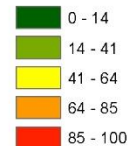
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



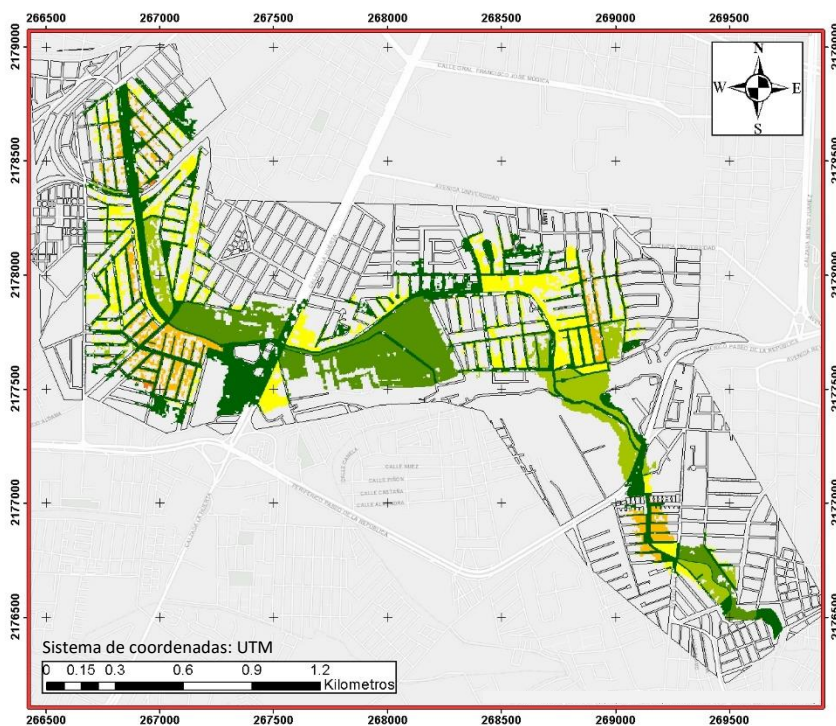
Simbología

Porcentaje Daños tr200

Contenido



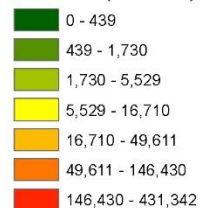
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



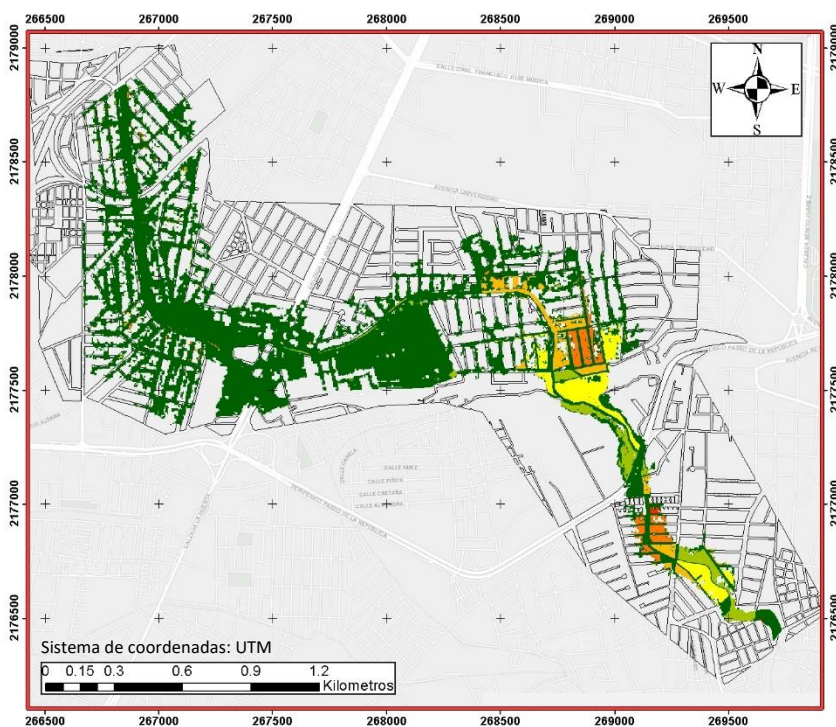
Simbología

Población en Riesgo tr 200

Densidad (hab/km²)



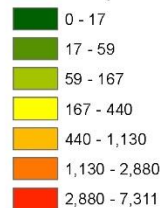
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Pérdidas de Vida tr 200

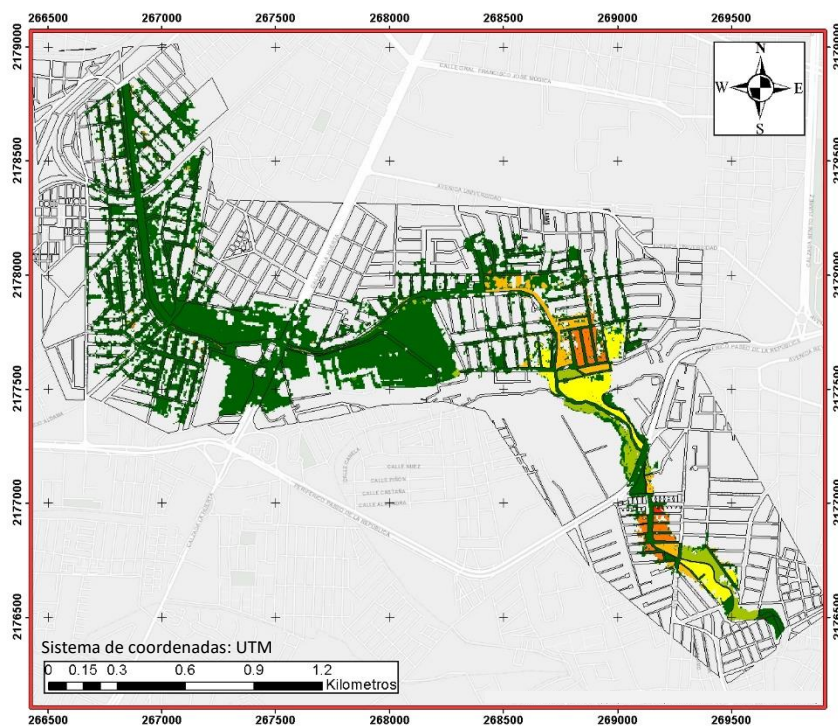
Densidad (hab/km²)



C3



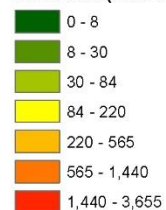
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



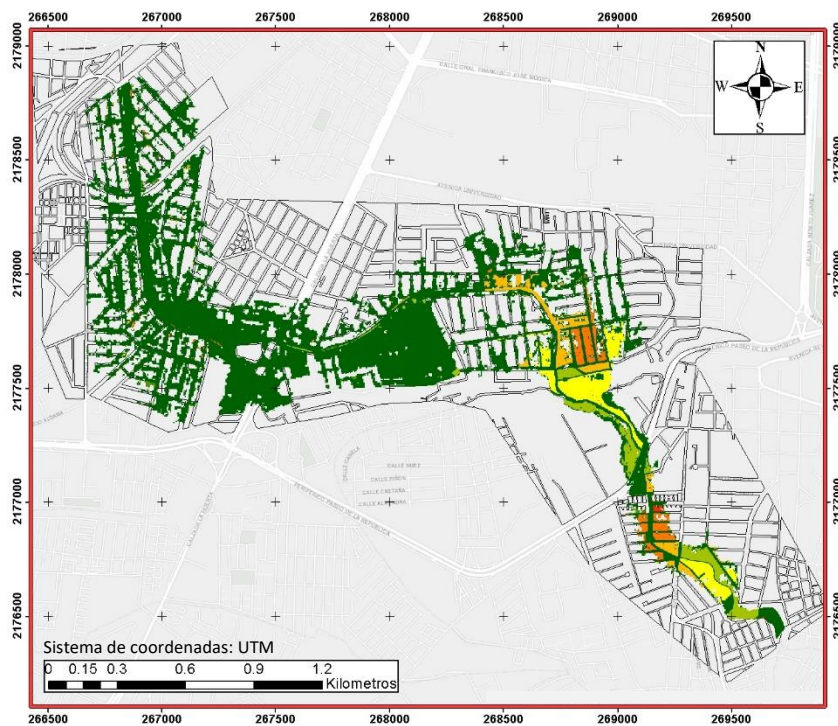
Simbología

Pérdidas de vida tr 200

Densidad (hab/km2)



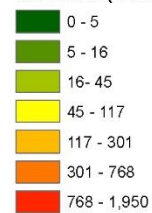
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

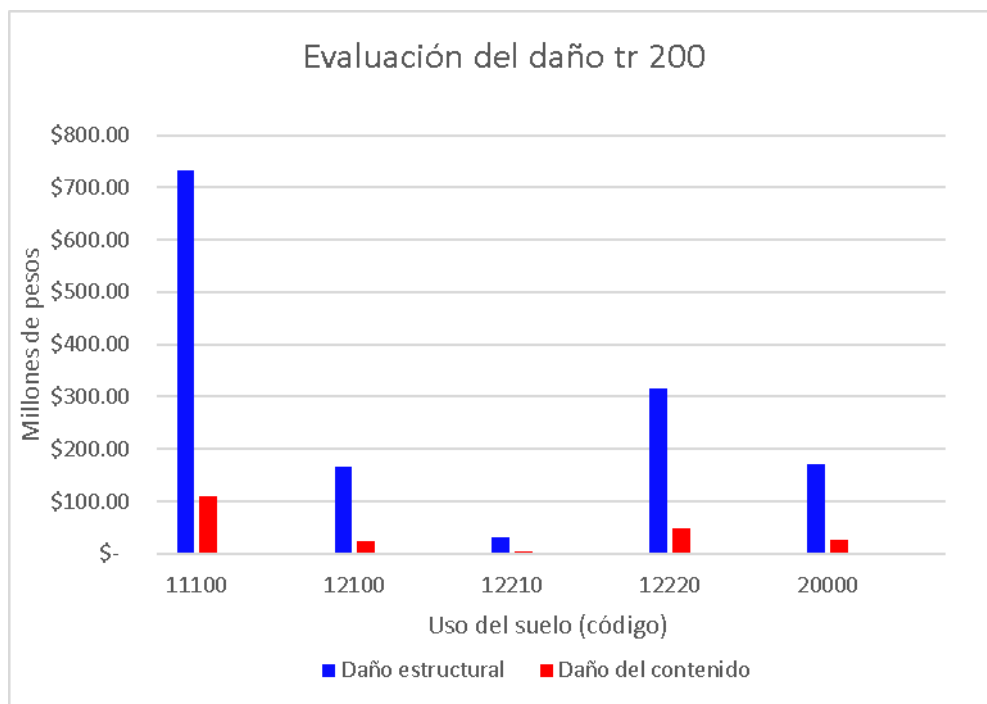
Perdida de vidas tr 200

Densidad (hab/km2)

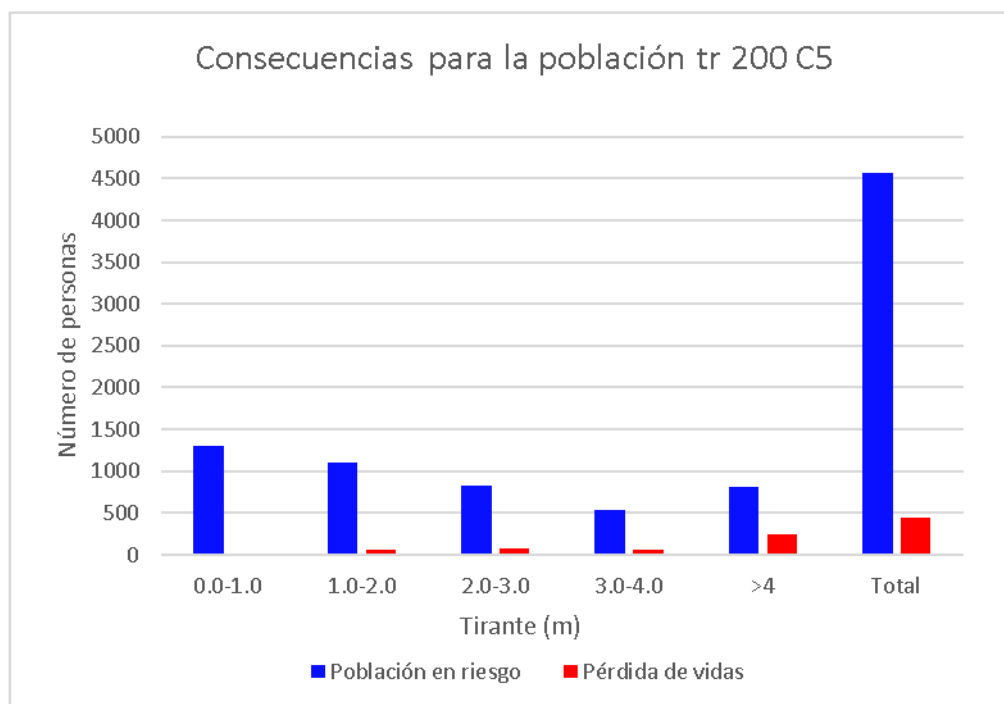


Elaboró: PIC Chrystopher Franco

Tr 200						
Code	Uso de suelo	Área (m ²)	Valor estructural (pesos)	Valor del contenido (pesos)	Daños estructurales (pesos)	Daños del contenido (pesos)
11100	Tejido urbano continuo (densidad >80%)	535400	\$ 1,310,129,000.00	\$ 196,493,100.00	\$ 731,752,800.00	\$ 109,748,000.00
12100	Industrial	88400	\$ 358,120,700.00	\$ 53,735,800.00	\$ 166,432,100.00	\$ 24,973,000.00
12210	Camino de alta velocidad y terrenos aledaños	1000	\$ 55,476,000.00	\$ 8,321,400.00	\$ 31,663,700.00	\$ 4,749,600.00
12220	Otros caminos y terrenos aledaños	13300	\$ 531,398,300.00	\$ 79,710,400.00	\$ 316,800,500.00	\$ 47,520,500.00
20000	Zonas agrícolas, áreas seminaturales y humedales	94800	\$ 191,691,400.00	\$ 28,711,100.00	\$ 170,393,300.00	\$ 25,521,100.00



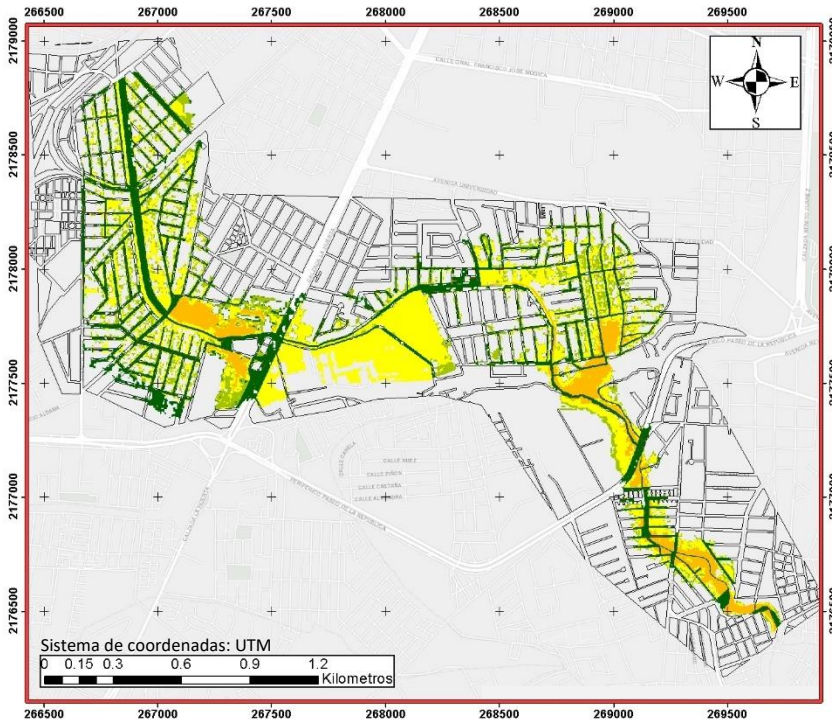
tr 200 años C3					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	201038	1227	68	1295	5
1.0-2.0	217041	1029	67	1096	11
2.0-3.0	218204	774	49	823	14
3.0-4.0	183315	511	31	542	12
>4	267013	758	54	812	47
Total	1086611	4299	269	4568	89
tr 200 años C5					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	201038	1227	68	1295	2
1.0-2.0	217041	1029	67	1096	6
2.0-3.0	218204	774	49	823	7
3.0-4.0	183315	511	31	542	6
>4	267013	758	54	812	24
Total	1086611	4299	269	4568	45
tr 200 años C7					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	201038	1227	68	1295	1
1.0-2.0	217041	1029	67	1096	3
2.0-3.0	218204	774	49	823	4
3.0-4.0	183315	511	31	542	3
>4	267013	758	54	812	13
Total	1086611	4299	269	4568	24



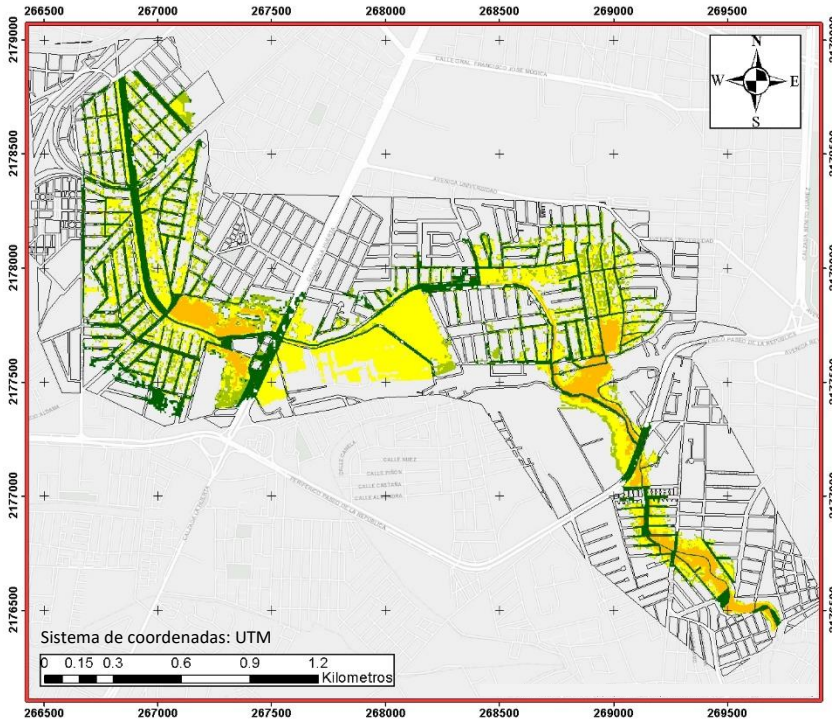


*****Nota: Los valores correspondientes a las pérdidas de vidas fueron multiplicados por 10 para lograr una mejor visualización en el histograma***

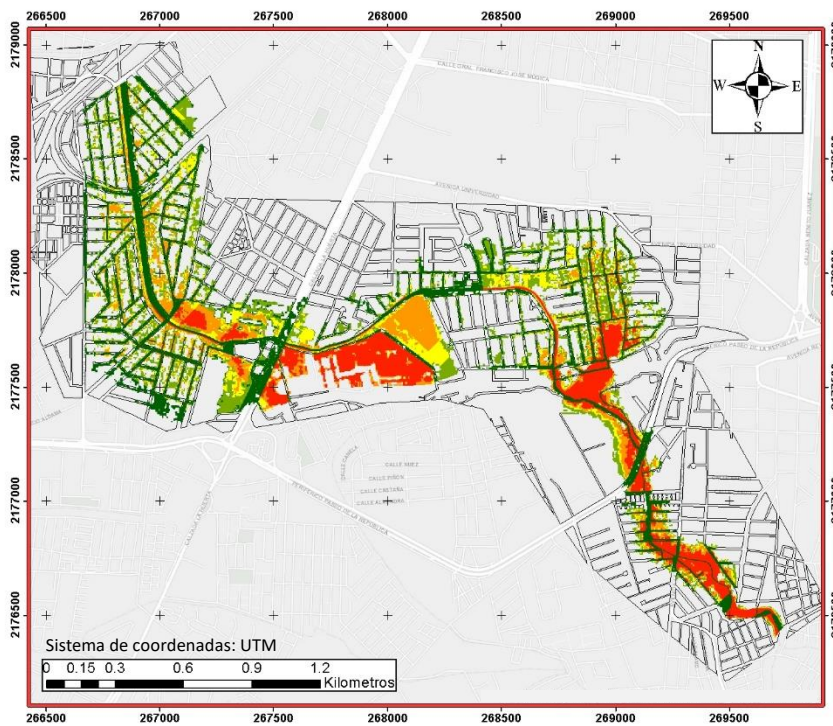
6.3.7. Tr 500 años



Elaboró: PIC Chrystopher Franco



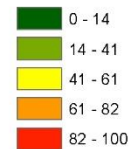
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



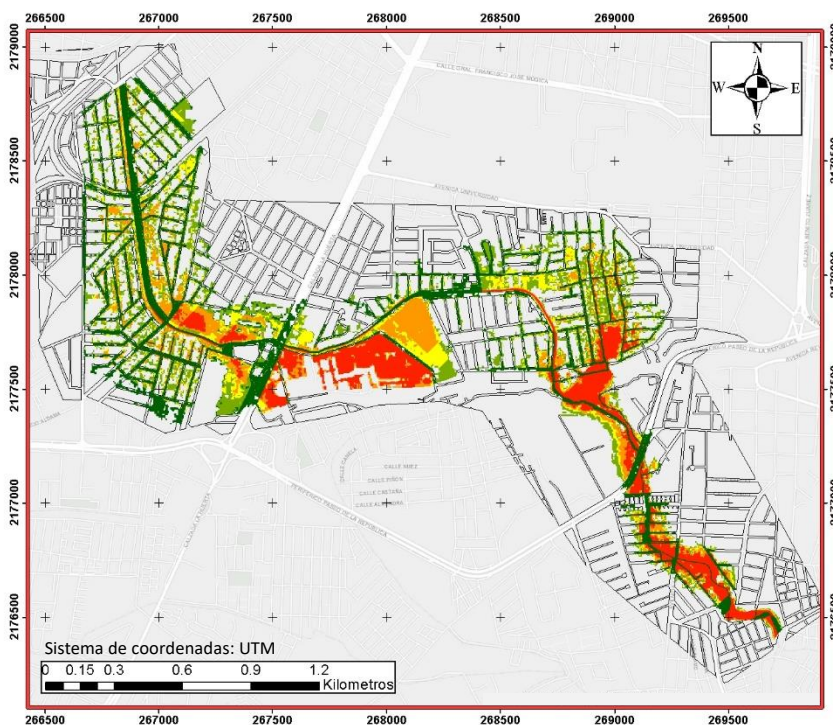
Simbología

Porcentaje Daños tr 500

Estructuras



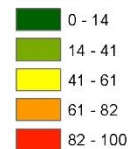
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



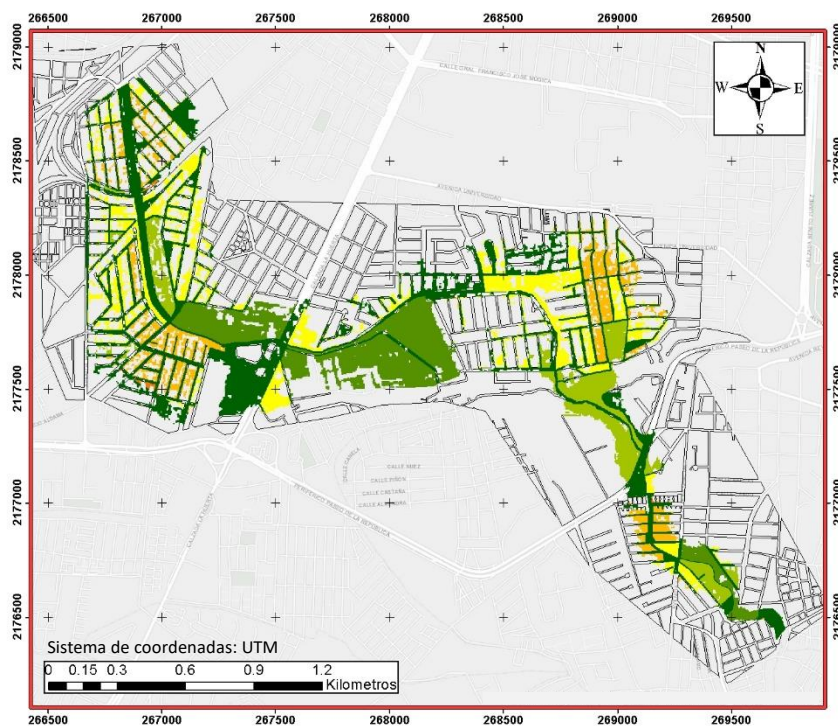
Simbología

Porcentaje Daños tr 500

Contenido



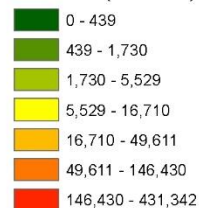
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



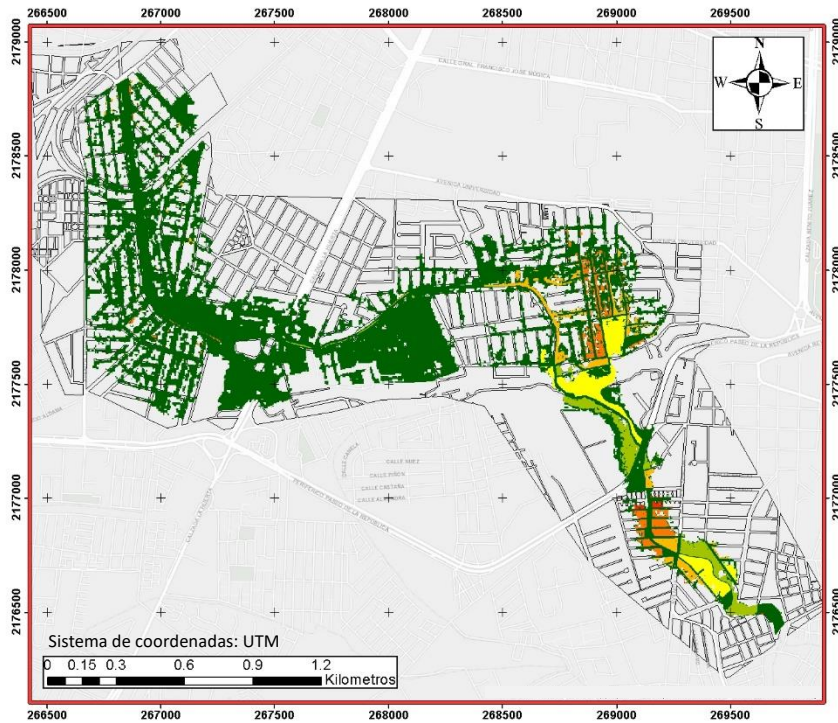
Simbología

Población en riesgo tr 500

Densidad (hab/km2)



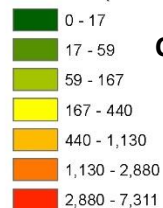
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Pérdidas de vida tr 500

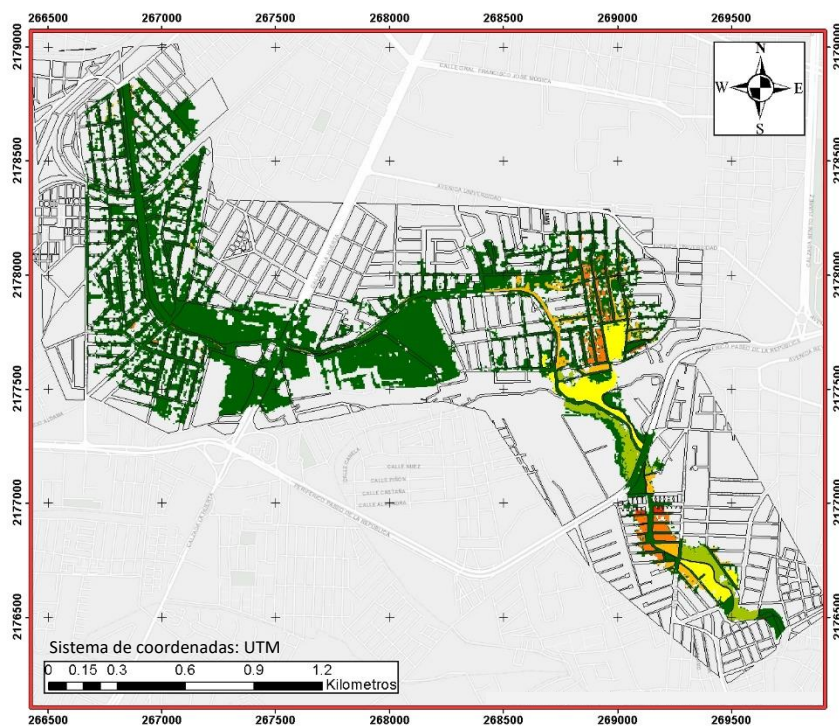
Densidad (hab/km2)



C3



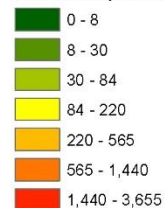
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Pérdidas de vida tr 500

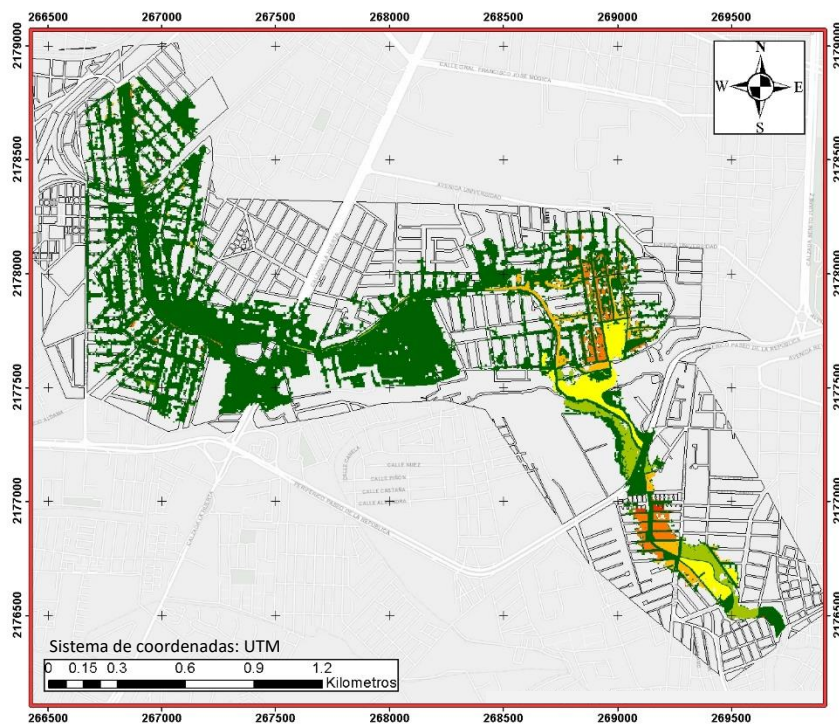
Densidad (hab/km2)



C5



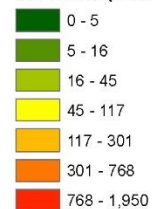
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Pérdida de vidas tr 500

Densidad (hab/km2)

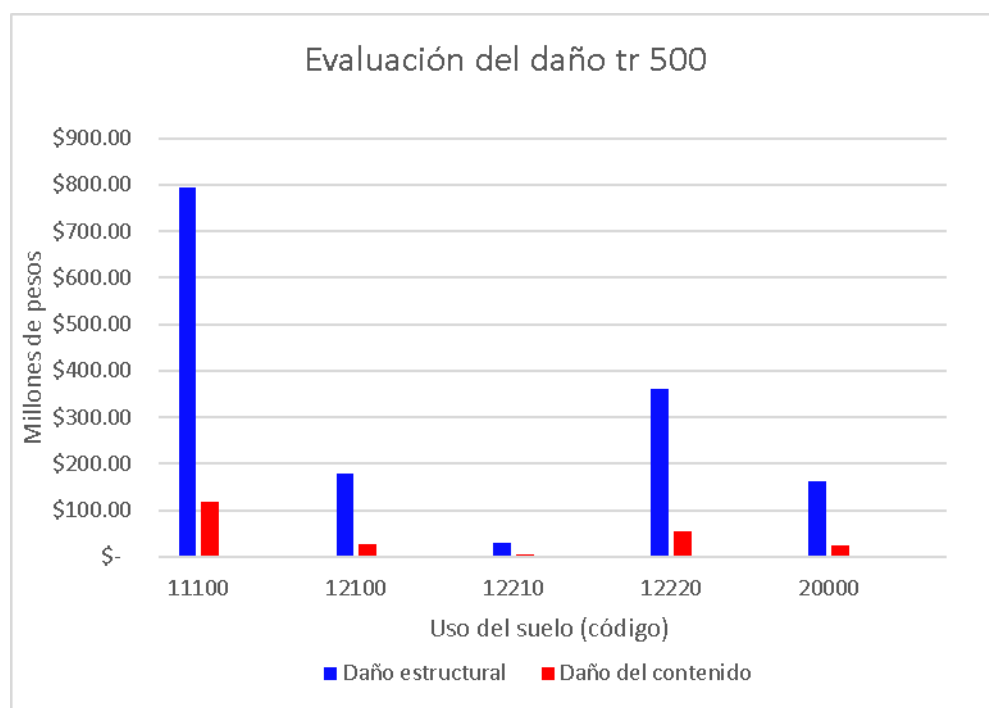


C7

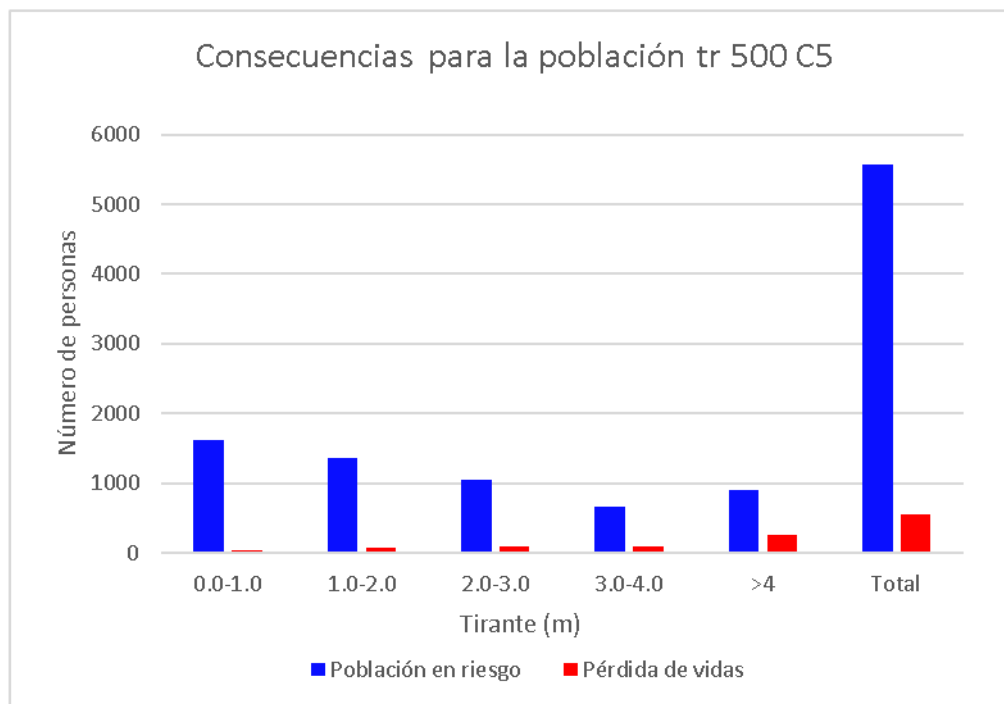
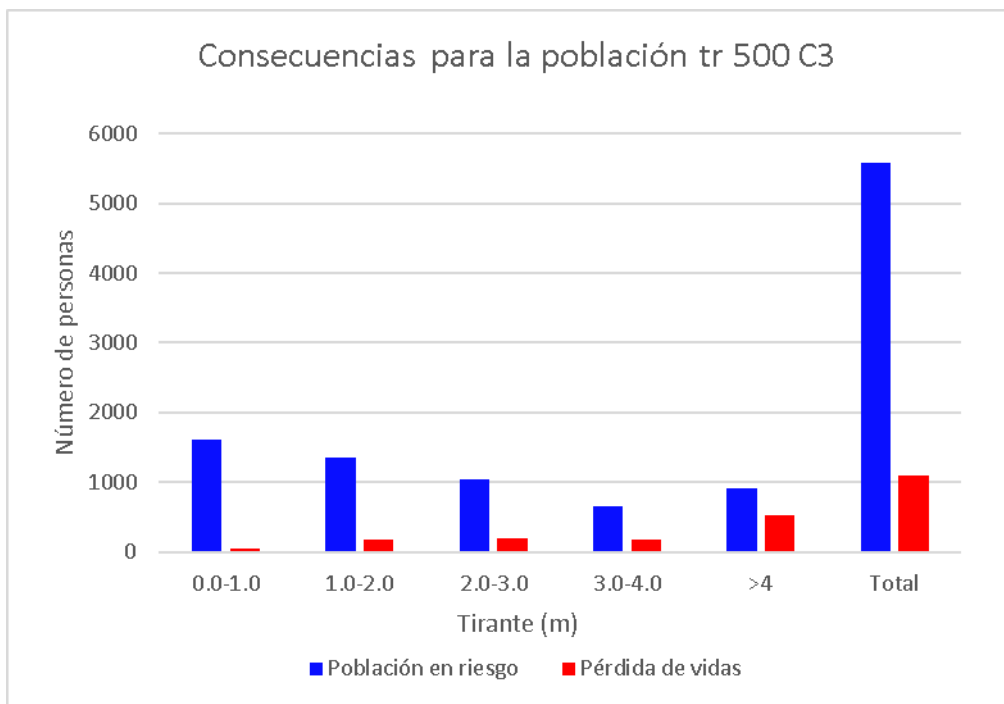


Elaboró: PIC Chrystopher Franco

Tr 500						
Code	Uso de suelo	Área (m ²)	Valor estructural (pesos)	Valor del contenido (pesos)	Daños estructurales (pesos)	Daños del contenido (pesos)
11100	Tejido urbano continuo (densidad >80%)	598700	\$ 1,464,999,900.00	\$ 219,719,100.00	\$ 792,974,500.00	\$ 118,930,000.00
12100	Industrial	89300	\$ 361,929,700.00	\$ 54,307,300.00	\$ 178,557,200.00	\$ 26,792,400.00
12210	Caminos de alta velocidad y terrenos aledaños	1000	\$ 54,417,400.00	\$ 8,162,600.00	\$ 29,593,900.00	\$ 4,439,100.00
12220	Otros caminos y terrenos aledaños	14200	\$ 569,636,700.00	\$ 85,446,300.00	\$ 359,736,400.00	\$ 53,960,800.00
20000	Zonas agrícolas, áreas seminaturales y humedales	91800	\$ 185,638,700.00	\$ 27,804,500.00	\$ 161,193,800.00	\$ 24,143,200.00



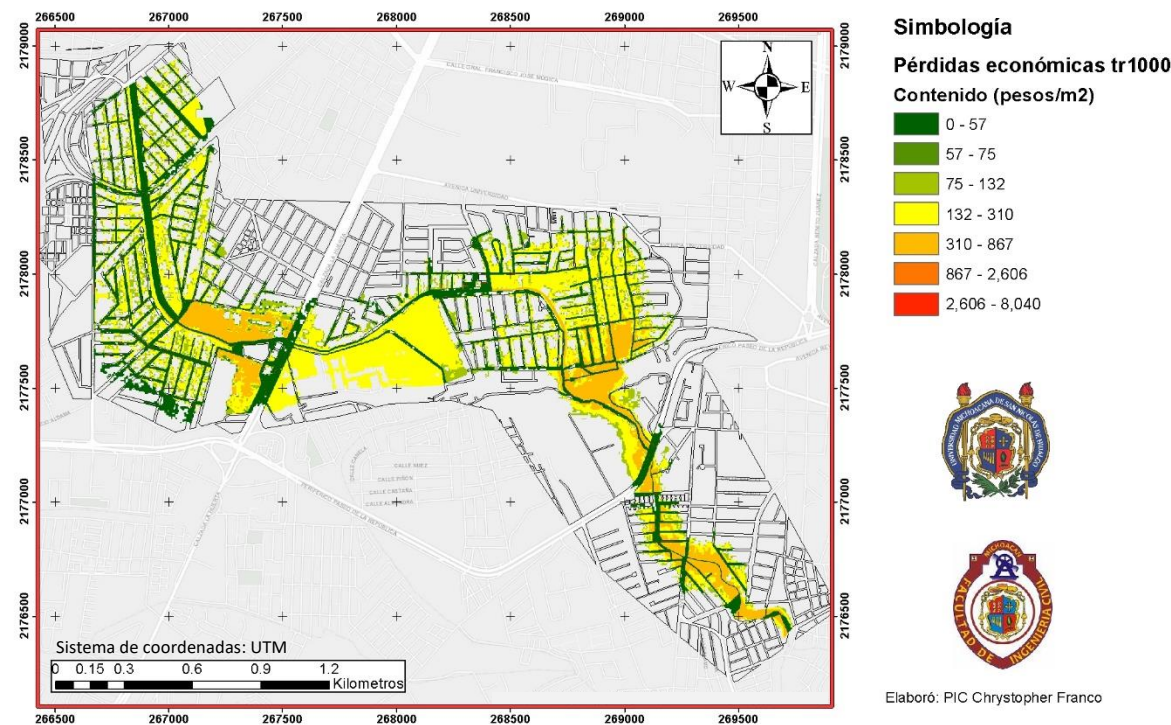
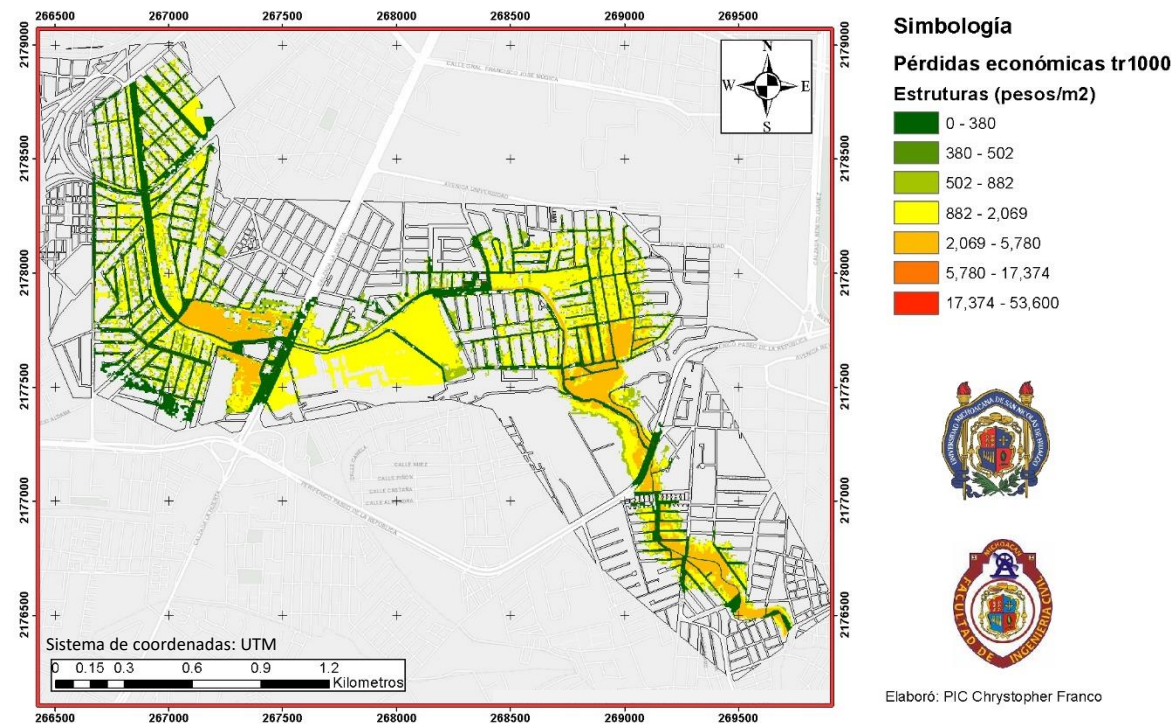
tr 500 años C3					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	215255	1516	93	1609	5
1.0-2.0	248586	1262	91	1353	17
2.0-3.0	251664	979	69	1048	19
3.0-4.0	181578	623	37	660	17
>4	270813	844	65	909	52
Total	1167896	5224	355	5579	110
tr 500 años C5					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	215255	1516	93	1609	3
1.0-2.0	248586	1262	91	1353	8
2.0-3.0	251664	979	69	1048	9
3.0-4.0	181578	623	37	660	9
>4	270813	844	65	909	26
Total	1167896	5224	355	5579	55
tr 500 años C7					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	215255	1516	93	1609	2
1.0-2.0	248586	1262	91	1353	4
2.0-3.0	251664	979	69	1048	5
3.0-4.0	181578	623	37	660	4
>4	270813	844	65	909	14
Total	1167896	5224	355	5579	29

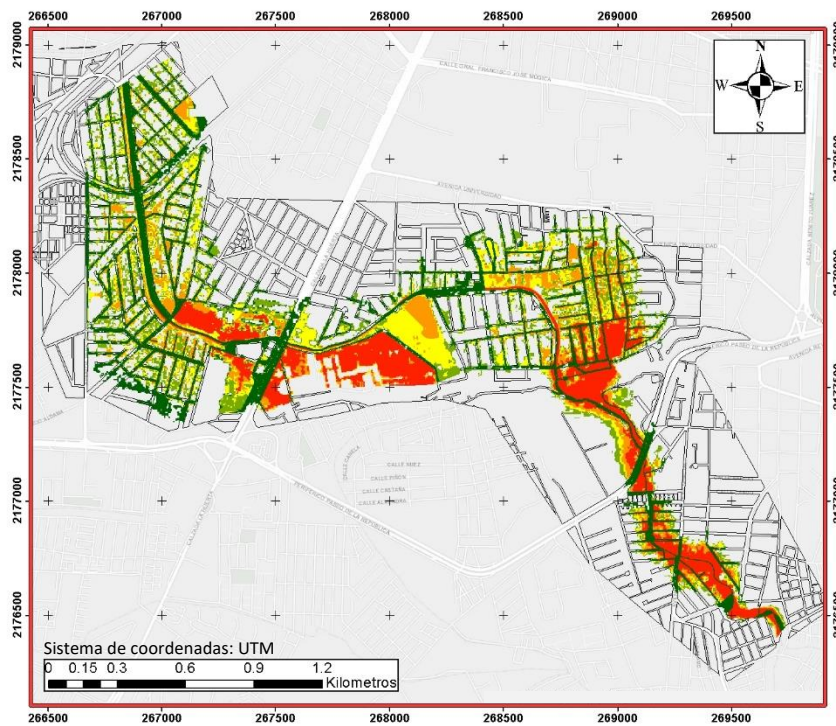




*****Nota: Los valores correspondientes a las pérdidas de vidas fueron multiplicados por 10 para lograr una mejor visualización en el histograma***

6.3.8. Tr 1000 años

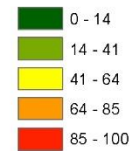




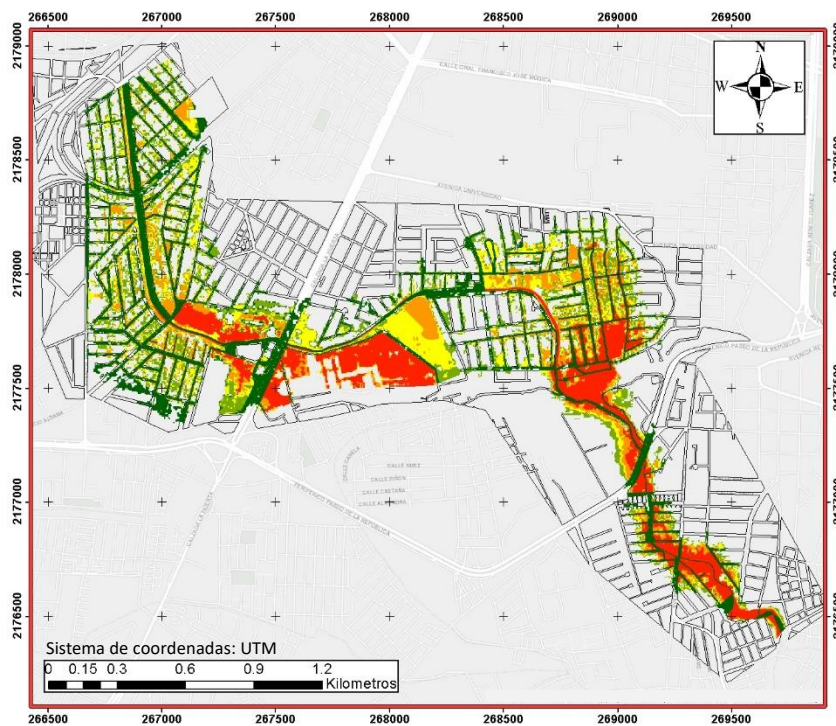
Simbología

Porcentaje de daños tr1000

Estructuras



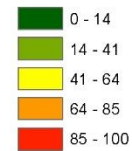
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Porcentaje de daños tr1000

Contenido



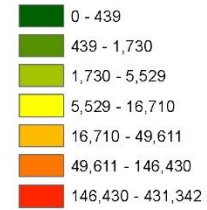
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



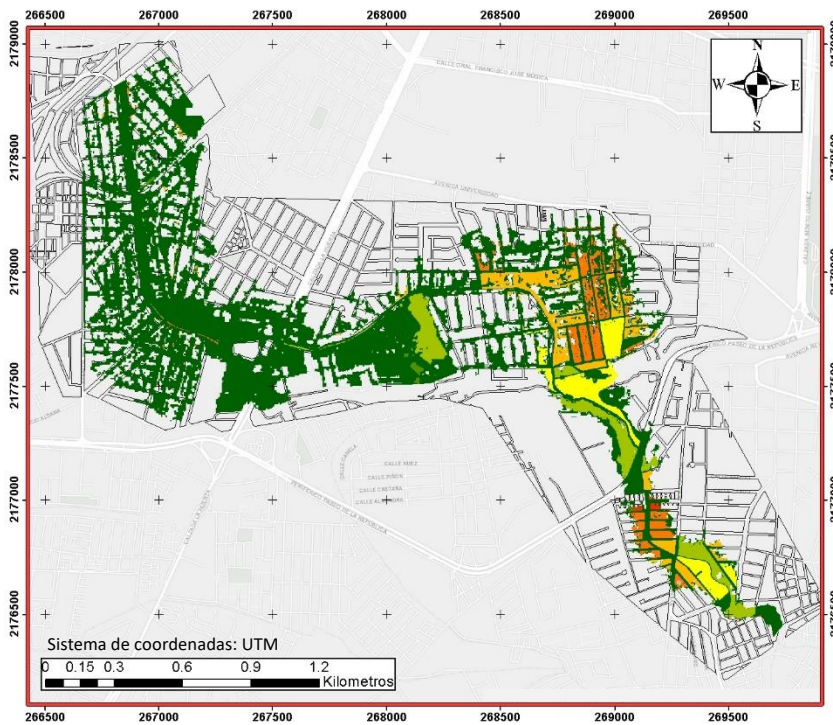
Simbología

Poblacion en riesgo tr 1000

Densidad (hab/km2)



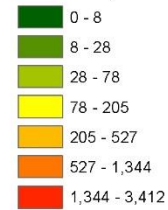
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



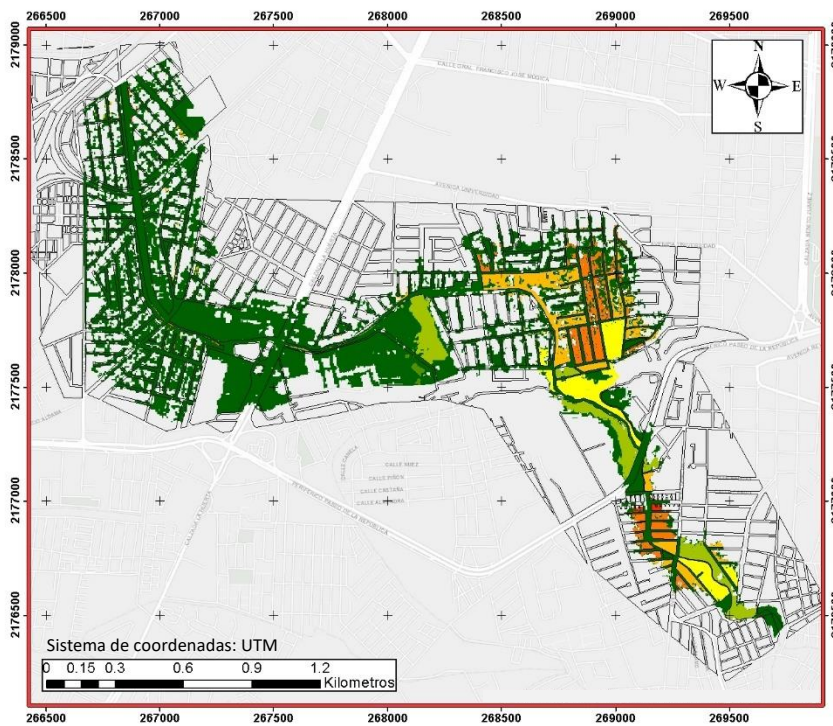
Simbología

Pérdida de vidas tr 1000

Densidad (hab/km2)



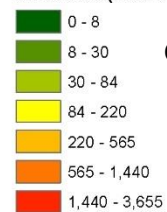
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



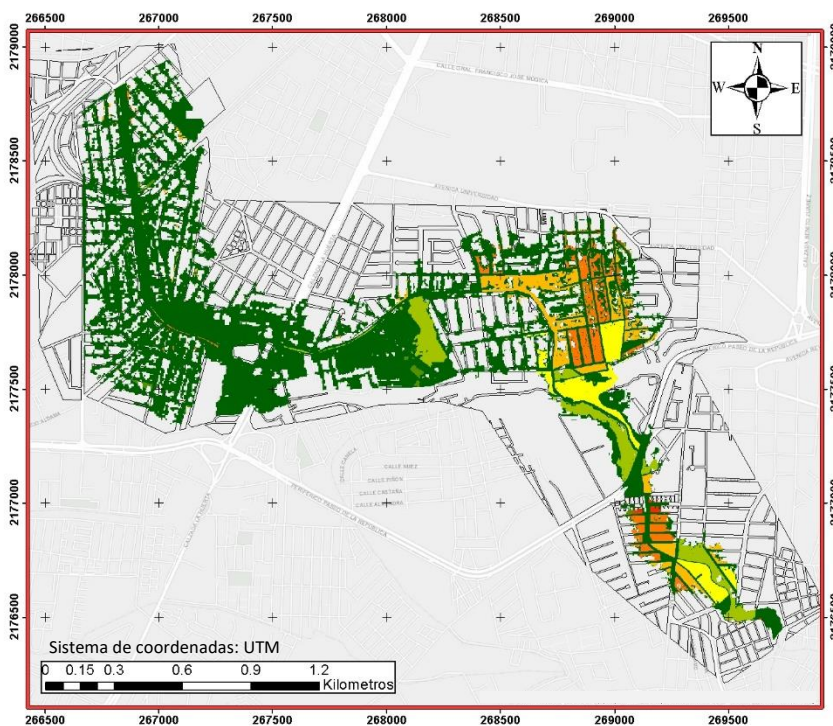
Simbología

Pérdidas de vida tr 1000

Densidad (hab/km2)



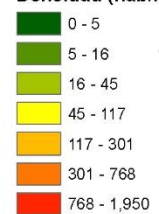
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

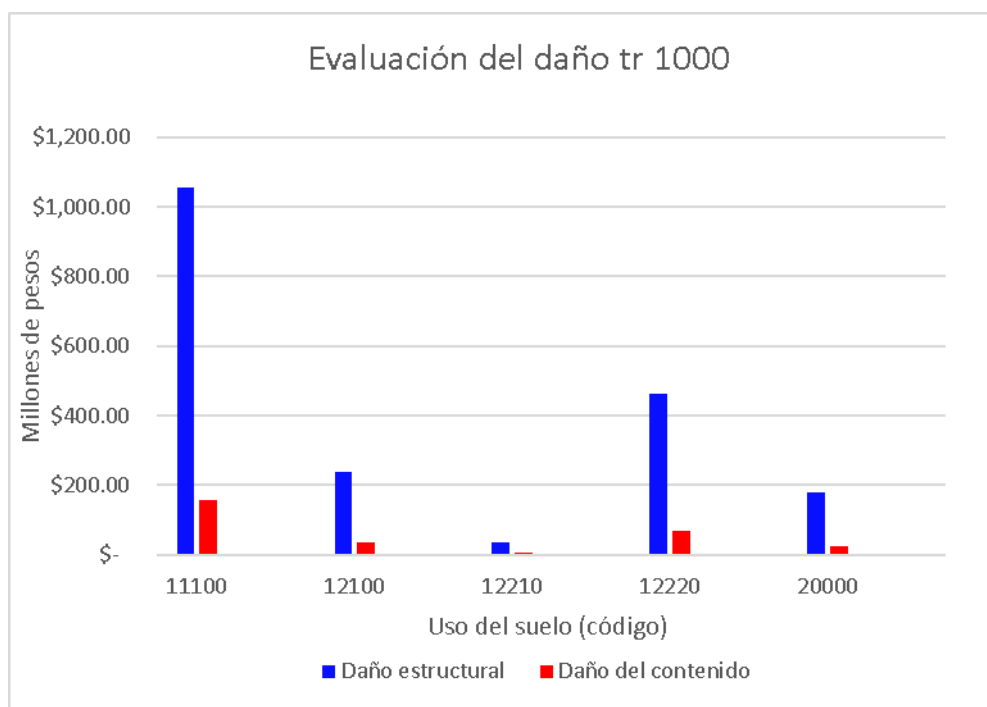
Pérdida de vidas tr 1000

Densidad (hab/km2)

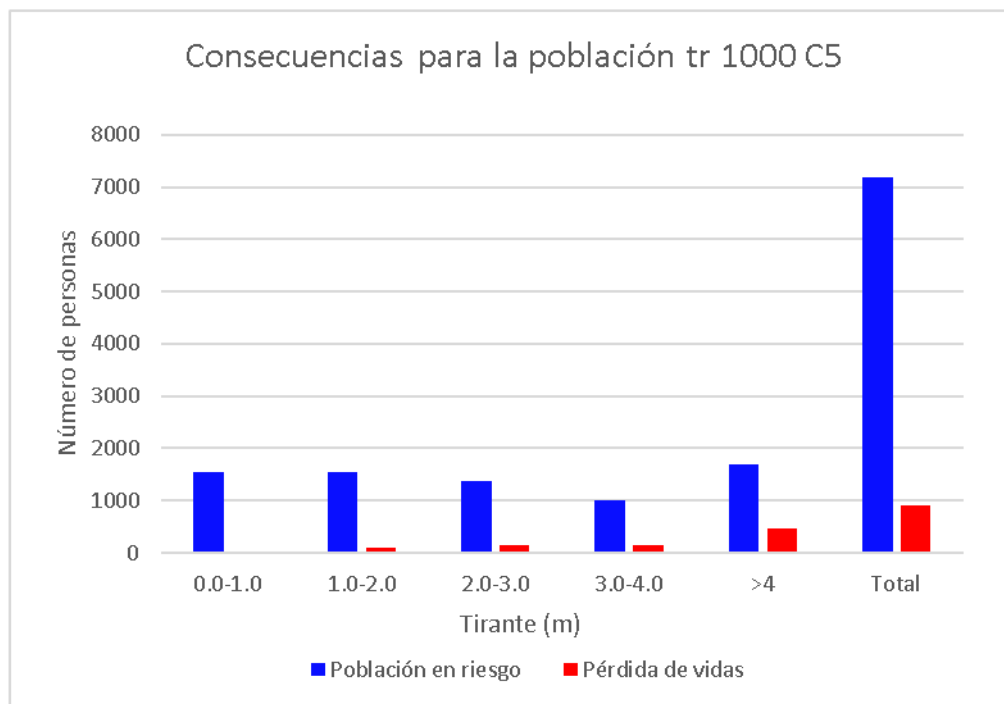
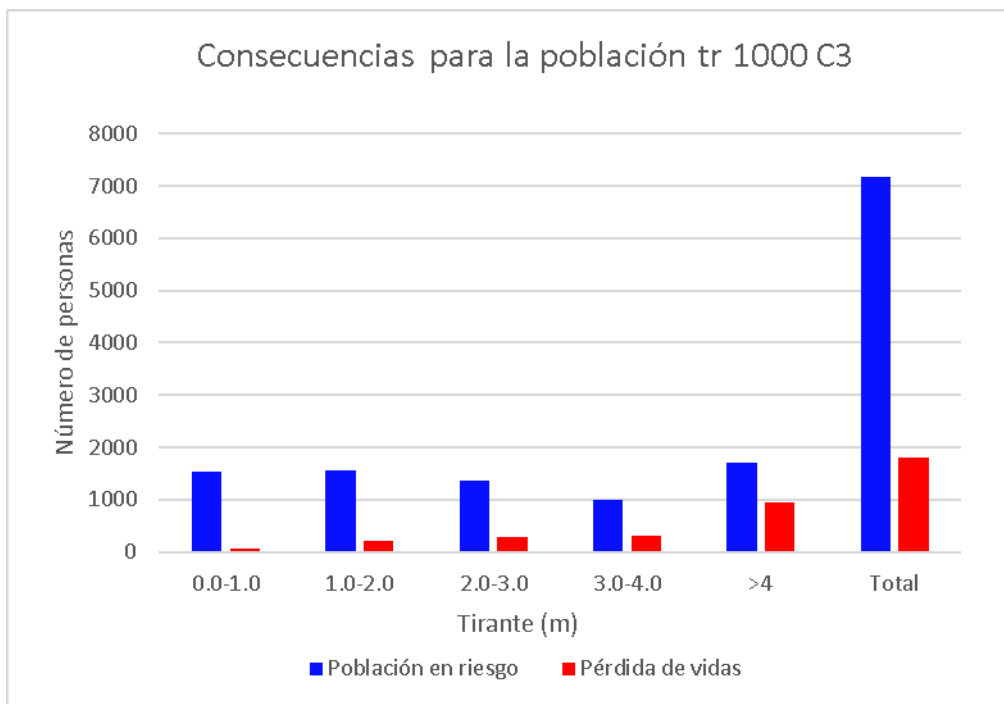


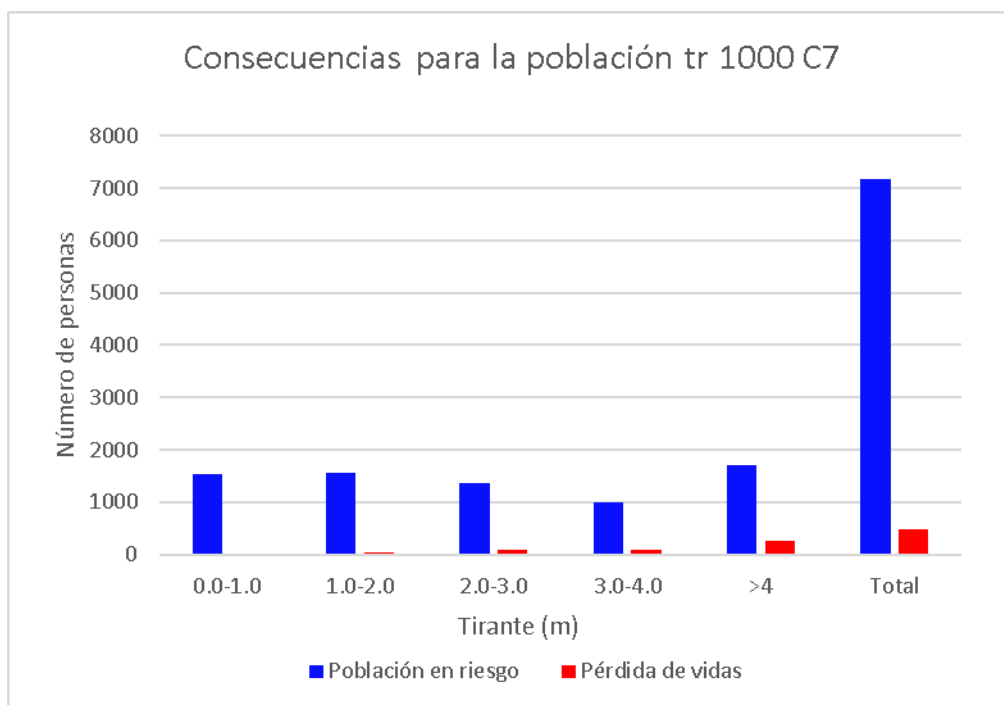
Elaboró: PIC Chrystopher Franco

Tr 1000						
Code	Uso de suelo	Área (m ²)	Valor estructural (pesos)	Valor del contenido (pesos)	Daños estructurales (pesos)	Daños del contenido (pesos)
11100	Tejido urbano continuo (densidad >80%)	739800	\$ 1,810,234,200.00	\$ 271,497,900.00	\$ 1,055,348,000.00	\$ 158,280,800.00
12100	Industrial	93000	\$ 376,682,400.00	\$ 56,520,900.00	\$ 236,963,400.00	\$ 35,556,200.00
12210	Caminos de alta velocidad y terrenos aledaños	1100	\$ 58,611,600.00	\$ 8,791,700.00	\$ 36,135,600.00	\$ 5,420,300.00
12220	Otros caminos y terrenos aledaños	16400	\$ 657,032,700.00	\$ 98,556,200.00	\$ 461,267,800.00	\$ 69,190,600.00
20000	Zonas agrícolas, áreas seminaturales y humedales	96800	\$ 195,856,300.00	\$ 29,334,900.00	\$ 178,188,600.00	\$ 26,688,600.00



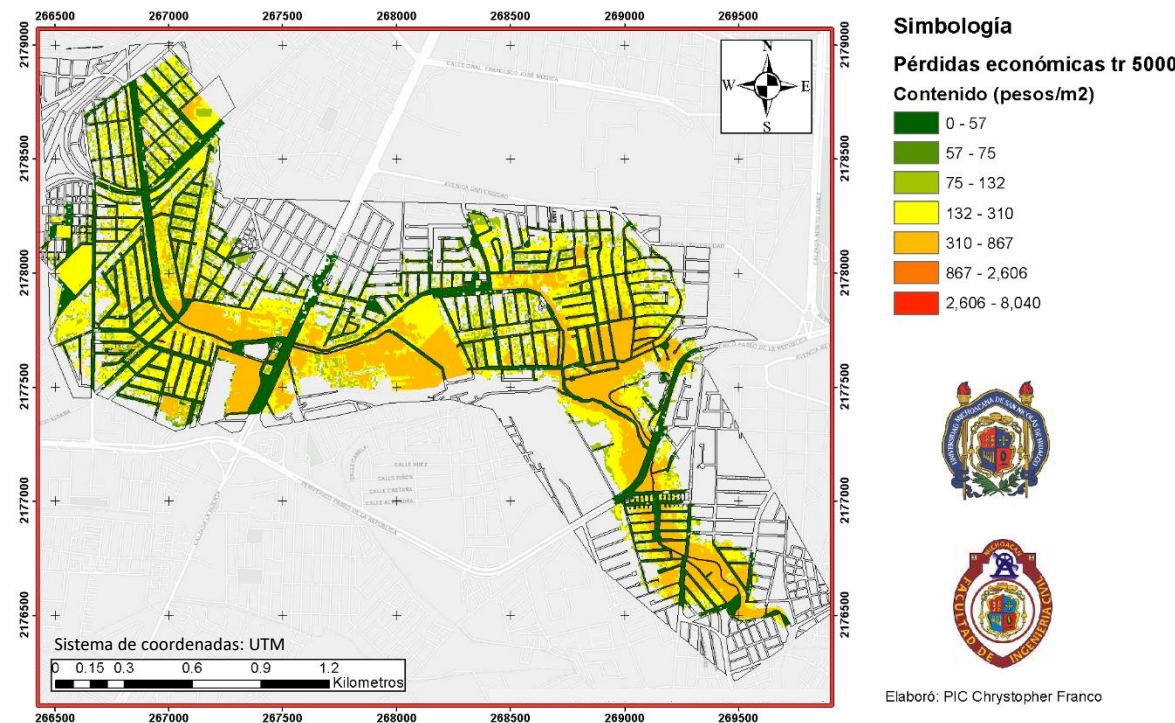
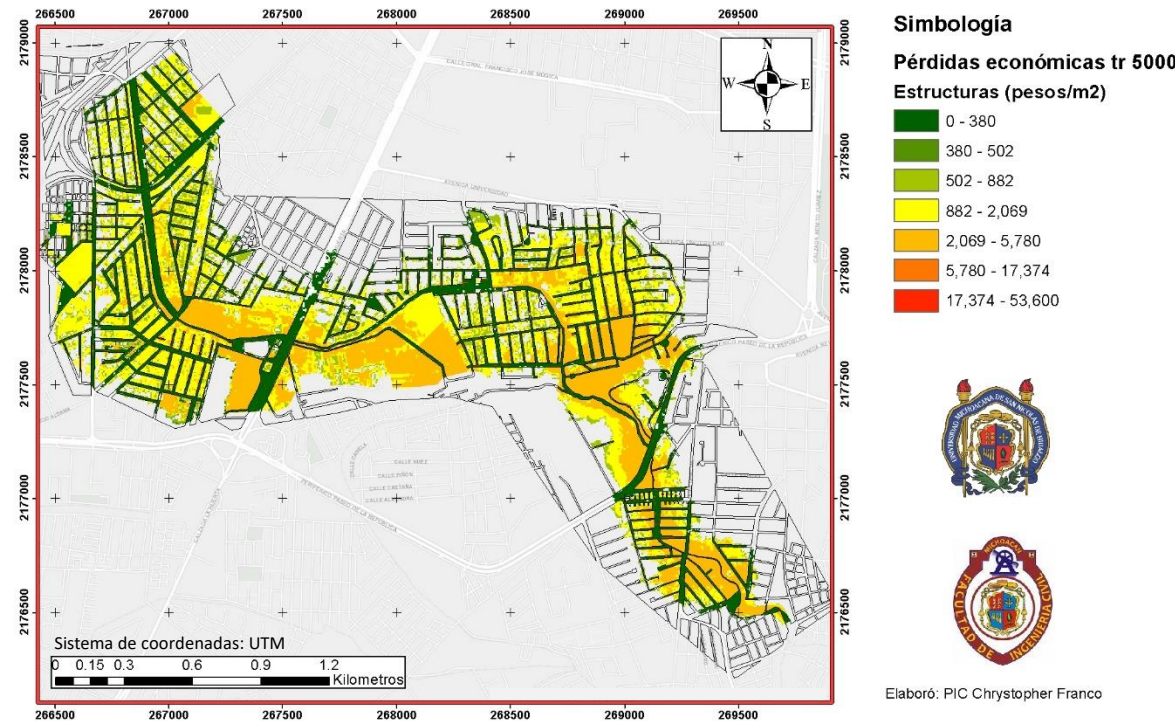
tr 1000 años C3					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	189276	1458	89	1547	6
1.0-2.0	220718	1464	91	1555	21
2.0-3.0	295760	1286	88	1374	29
3.0-4.0	238565	934	64	998	31
>4	431094	1584	119	1703	94
Total	1375413	6726	451	7177	181
tr 1000 años C5					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	189276	1458	89	1547	3
1.0-2.0	220718	1464	91	1555	10
2.0-3.0	295760	1286	88	1374	15
3.0-4.0	238565	934	64	998	15
>4	431094	1584	119	1703	47
Total	1375413	6726	451	7177	90
tr 1000 años C7					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	189276	1458	89	1547	2
1.0-2.0	220718	1464	91	1555	5
2.0-3.0	295760	1286	88	1374	8
3.0-4.0	238565	934	64	998	9
>4	431094	1584	119	1703	25
Total	1375413	6726	451	7177	49

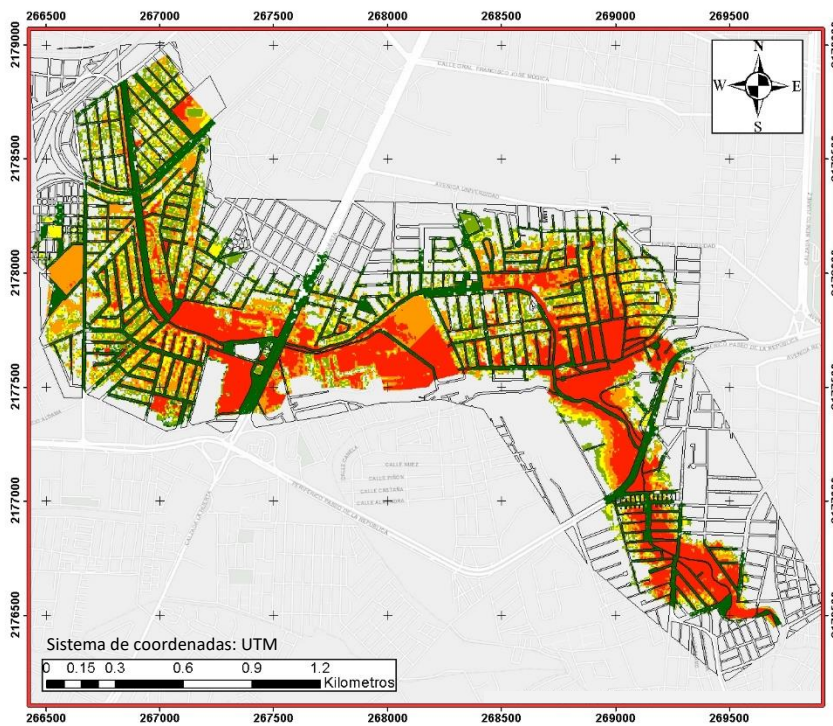




*****Nota: Los valores correspondientes a las pérdidas de vidas fueron multiplicados por 10 para lograr una mejor visualización en el histograma***

6.3.9. Tr 5000 años

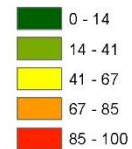




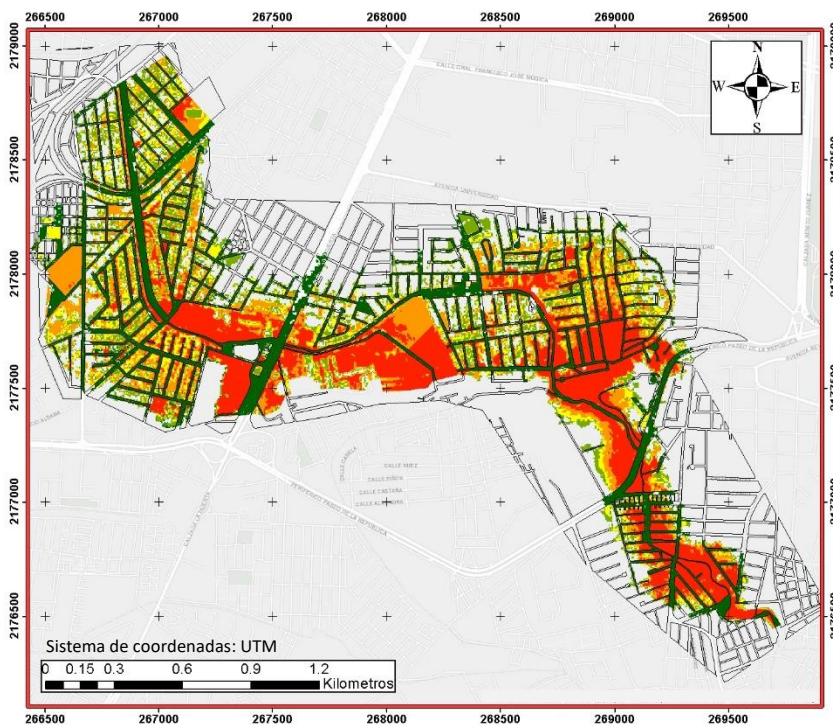
Simbología

Porcentaje de daños tr 5000

Estructuras



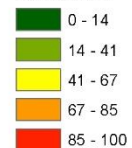
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



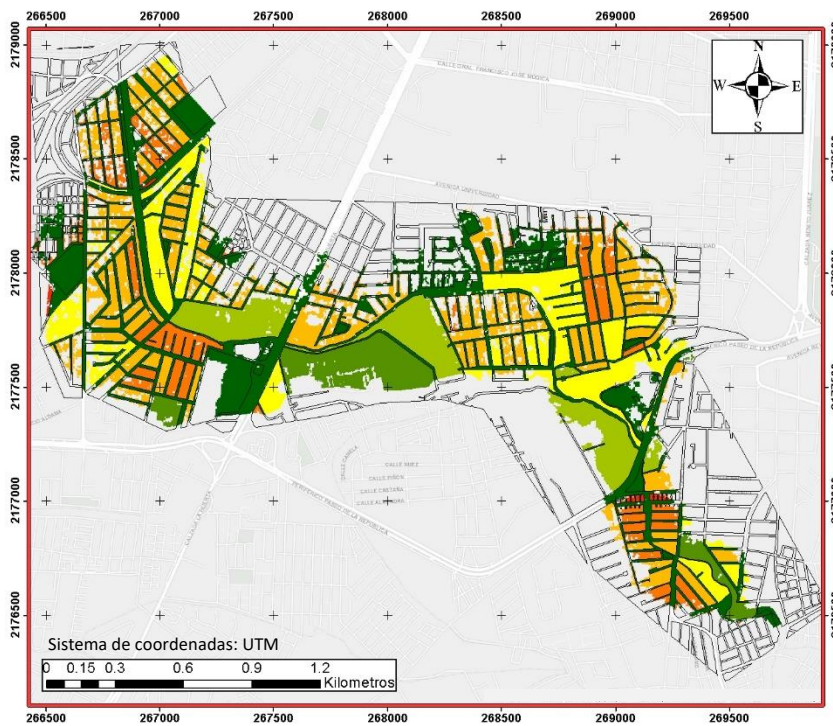
Simbología

Porcentaje de daños tr 5000

Contenido



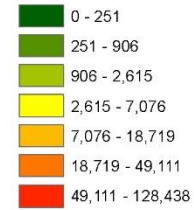
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



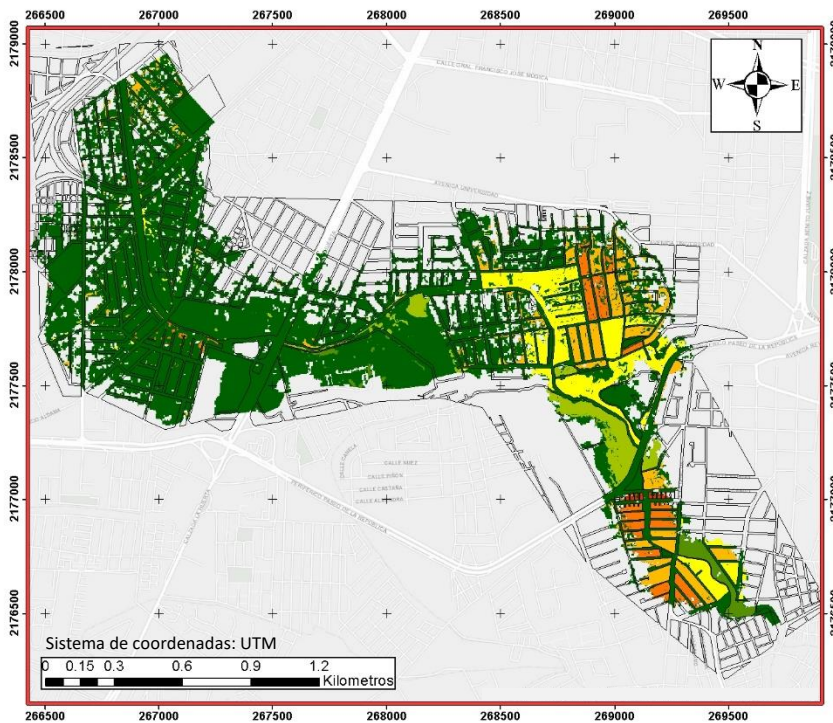
Simbología

Población en riesgo tr 5000

Densidad (hab/km2)



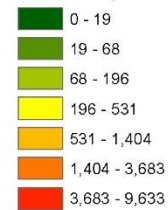
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Pérdidas de vida tr 5000

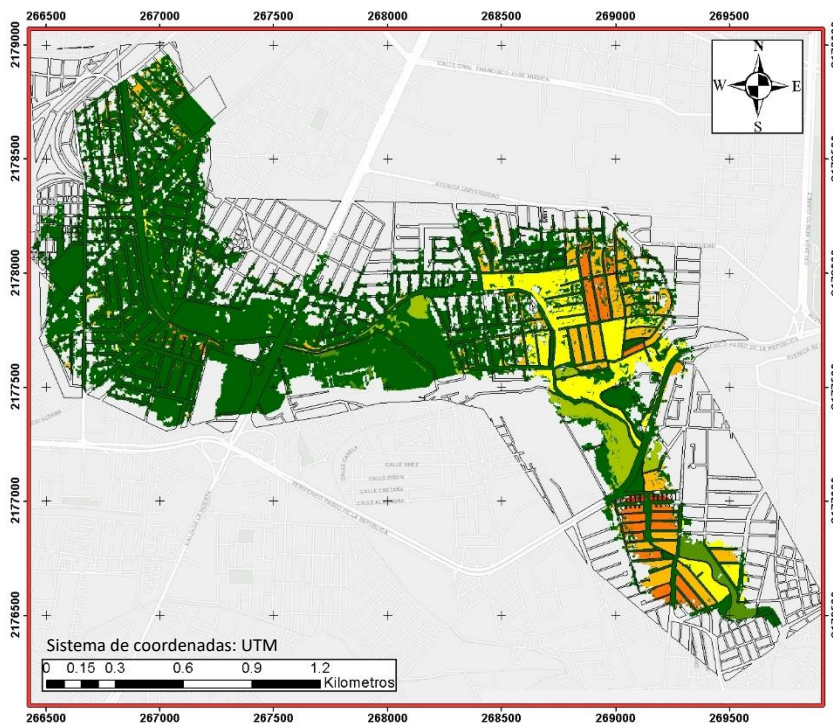
Densidad (hab/km2)



C3



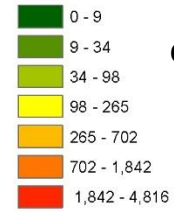
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Pérdidas de vida tr 5000

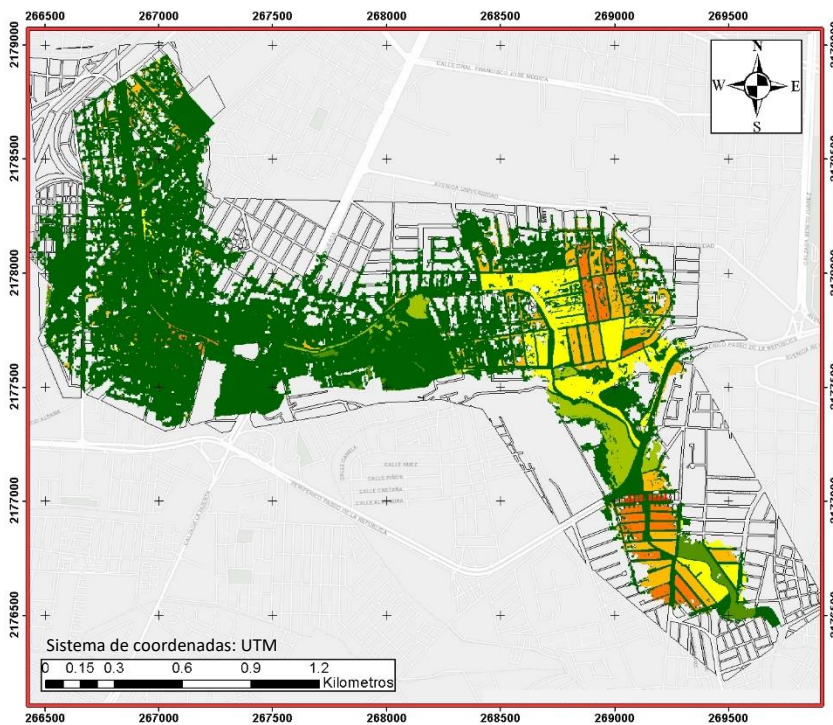
Densidad (hab/km2)



C5



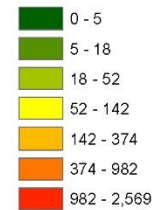
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Pérdida de vidas tr 5000

Densidad (hab/km2)

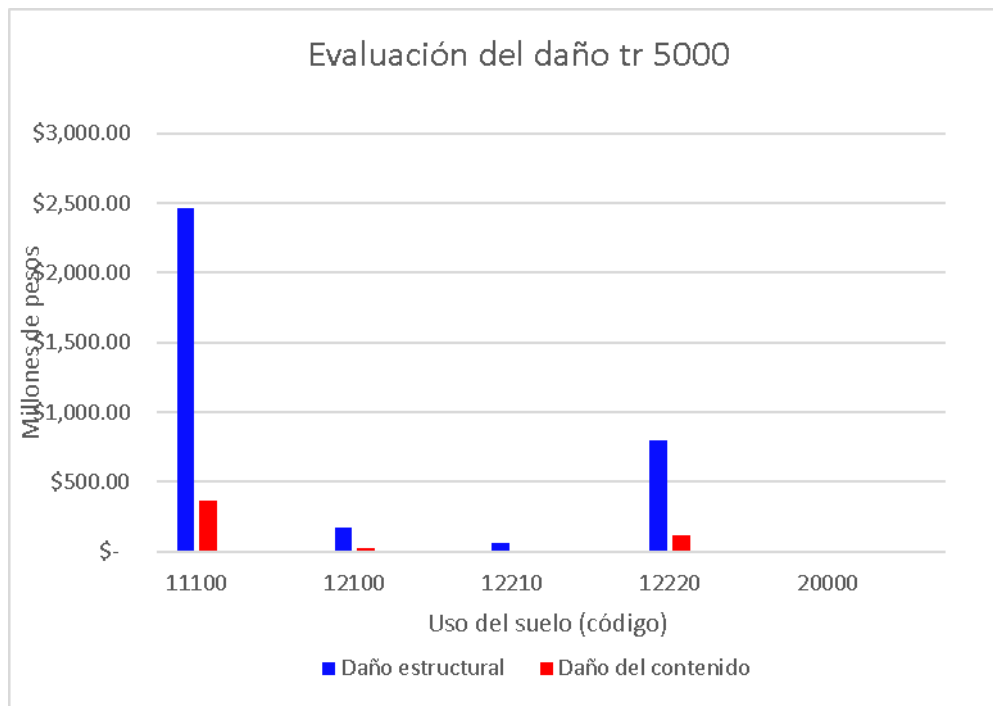


C7

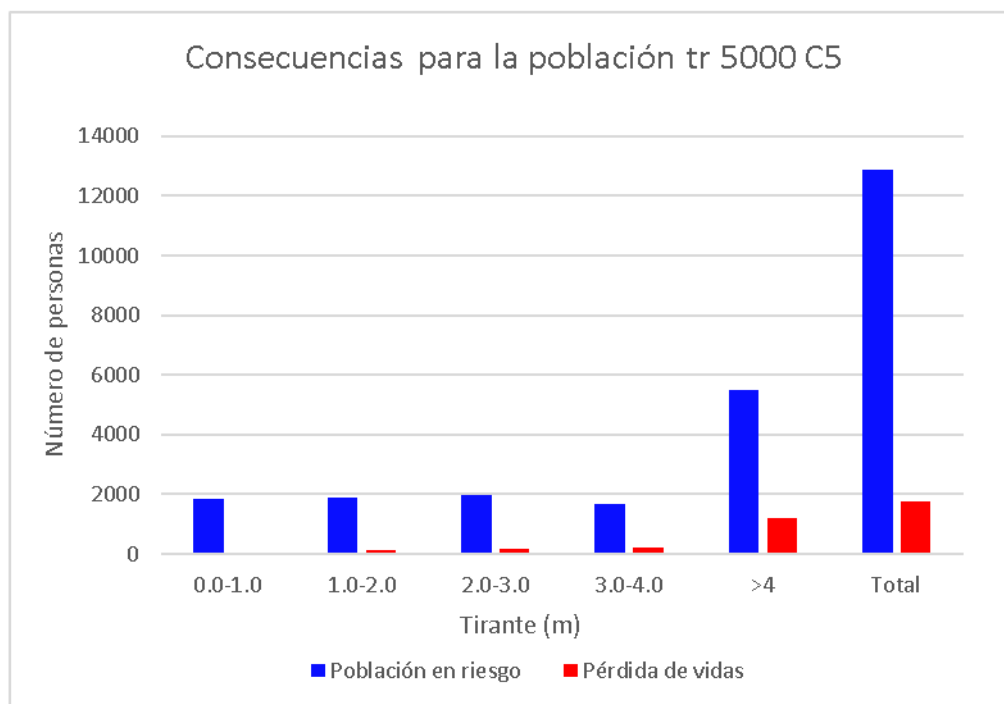
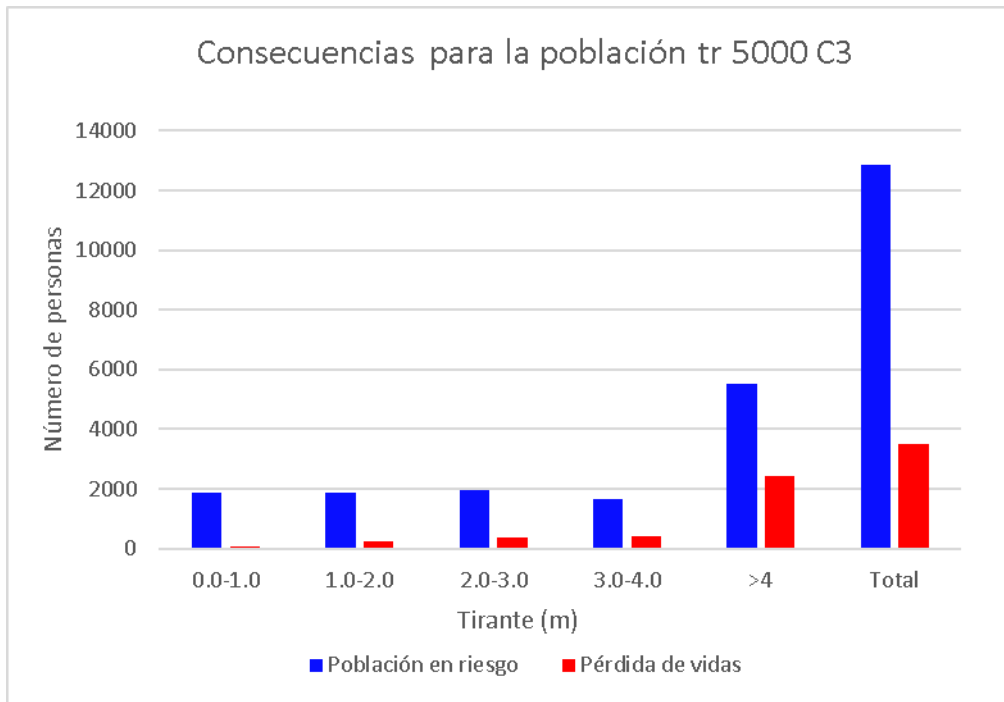


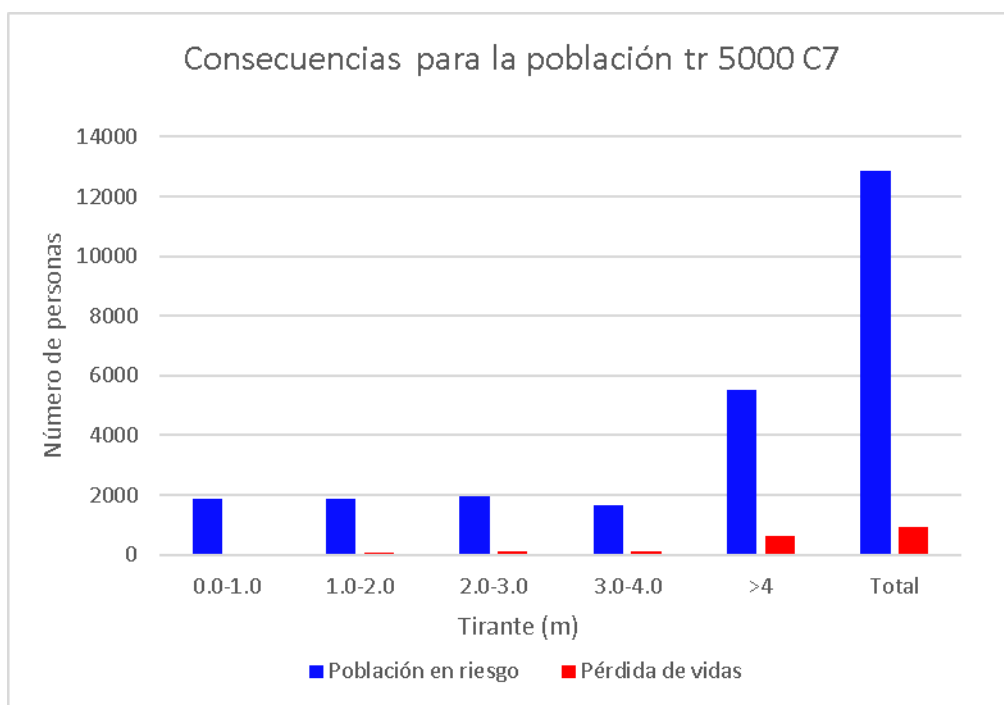
Elaboró: PIC Chrystopher Franco

Tr 5000						
Code	Uso de suelo	Área (m ²)	Valor estructural (pesos)	Valor del contenido (pesos)	Daños estructurales (pesos)	Daños del contenido (pesos)
11100	Tejido urbano continuo (densidad >80%)	1467400	\$ 3,590,832,600.00	\$ 538,551,300.00	\$ 2,459,465,500.00	\$ 368,870,800.00
12100	Industrial	57900	\$ 234,677,600.00	\$ 35,213,200.00	\$ 174,032,900.00	\$ 26,113,500.00
12210	Caminos de alta velocidad y terrenos aledaños	1300	\$ 69,532,600.00	\$ 10,429,900.00	\$ 64,138,300.00	\$ 9,620,700.00
12220	Otros caminos y terrenos aledaños	23900	\$ 957,704,300.00	\$ 143,657,100.00	\$ 796,476,800.00	\$ 119,472,500.00
20000	Zonas agrícolas, áreas seminaturales y humedales	7300	\$ 14,683,400.00	\$ 2,199,200.00	\$ 11,559,600.00	\$ 1,731,400.00



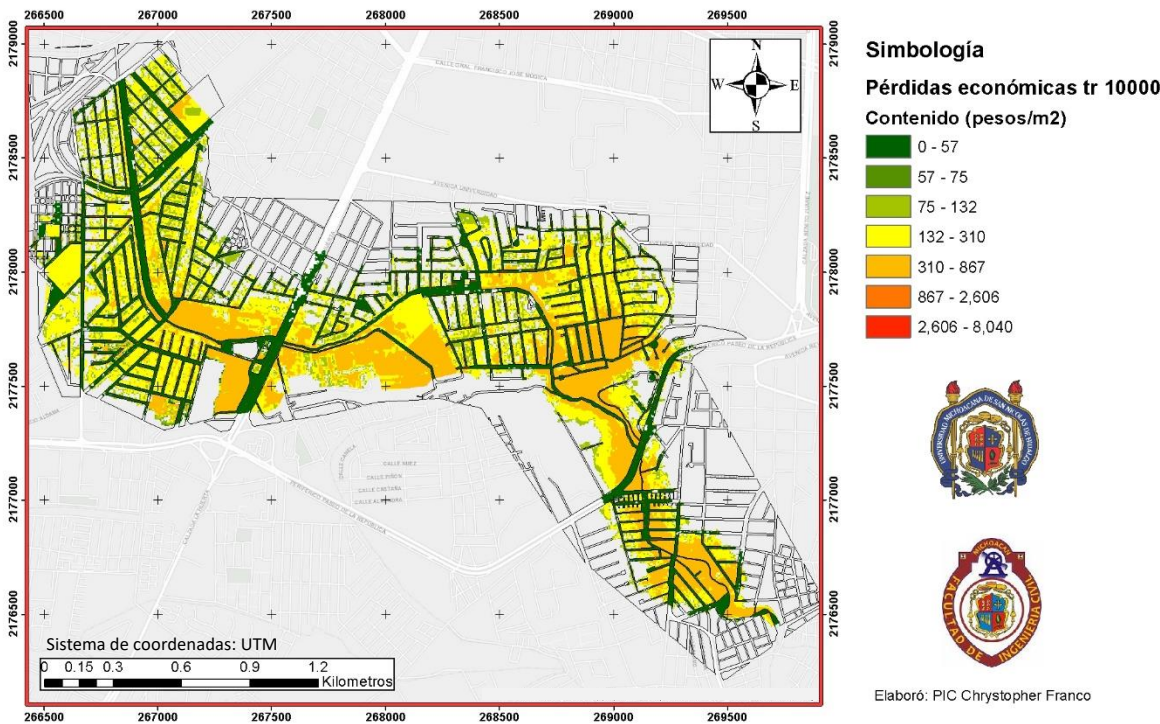
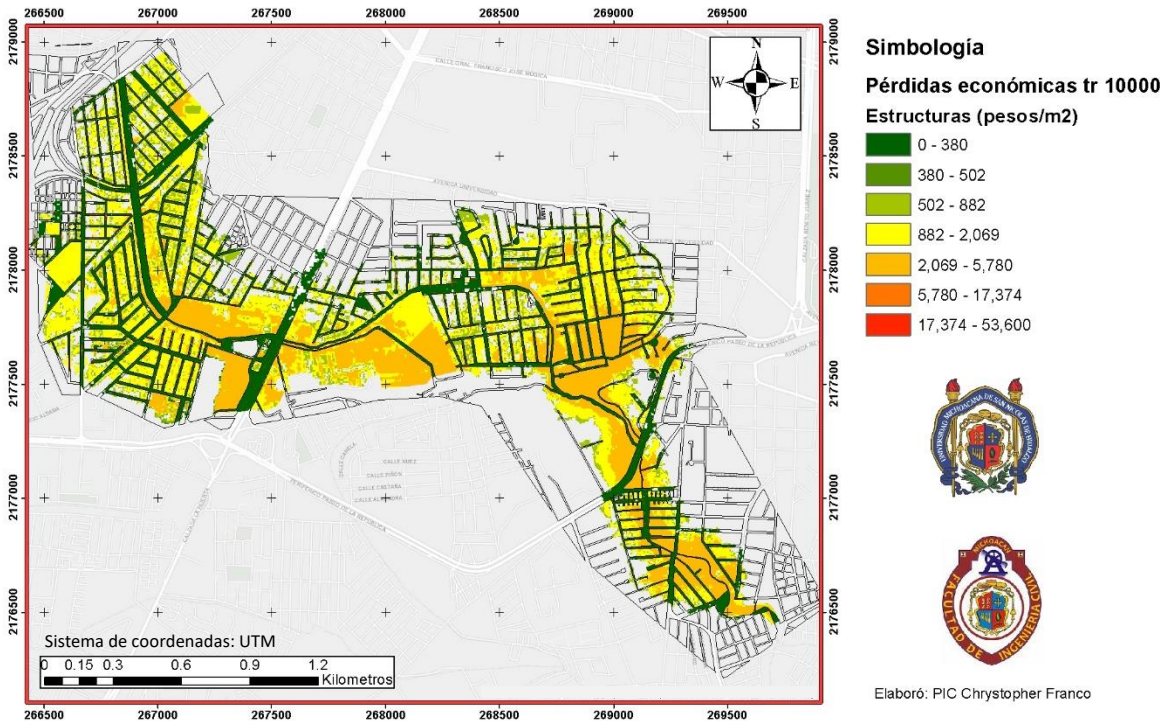
tr 5000 años C3					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	213568	1759	99	1858	8
1.0-2.0	225668	1770	106	1876	22
2.0-3.0	232584	1846	124	1970	38
3.0-4.0	221735	1574	97	1671	42
>4	1250022	5145	353	5498	241
Total	2143577	12094	779	12873	351
tr 5000 años C5					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	213568	1759	99	1858	4
1.0-2.0	225668	1770	106	1876	11
2.0-3.0	232584	1846	124	1970	19
3.0-4.0	221735	1574	97	1671	21
>4	1250022	5145	353	5498	120
Total	2143577	12094	779	12873	175
tr 5000 años C7					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	213568	1759	99	1858	2
1.0-2.0	225668	1770	106	1876	6
2.0-3.0	232584	1846	124	1970	10
3.0-4.0	221735	1574	97	1671	11
>4	1250022	5145	353	5498	64
Total	2143577	12094	779	12873	93

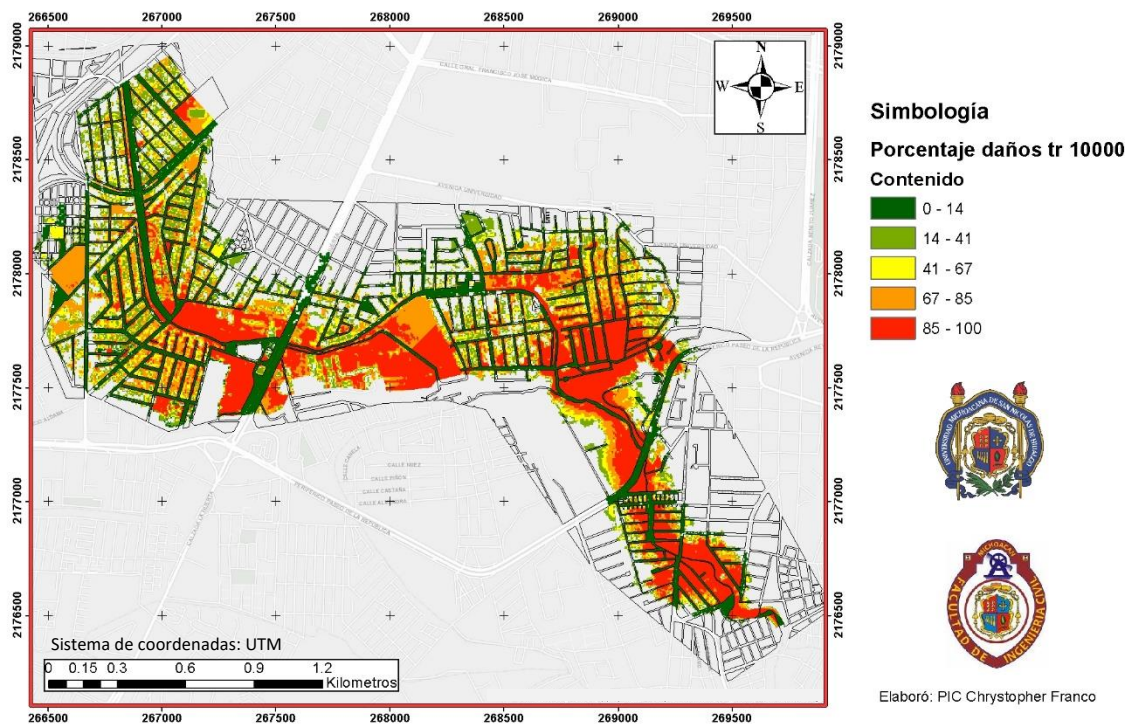
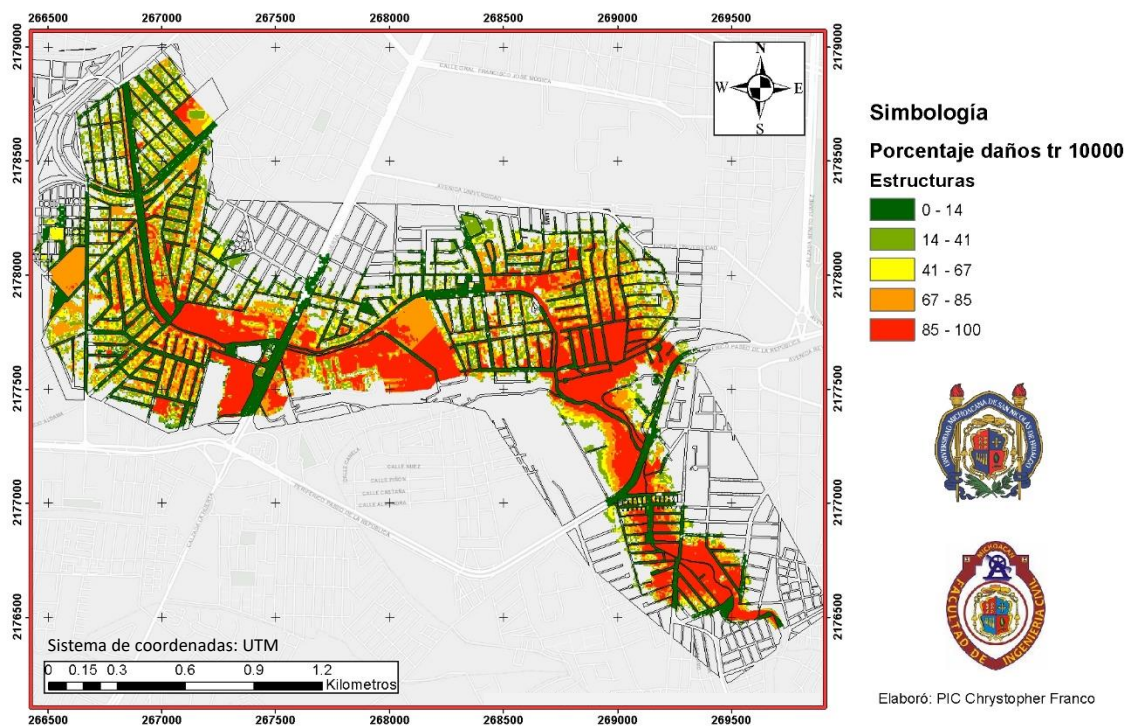


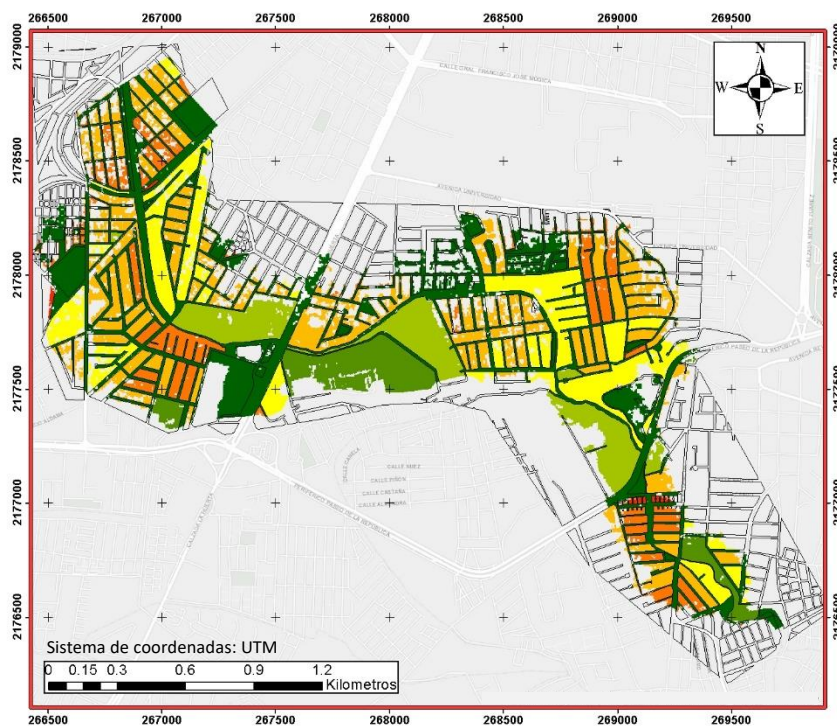


*****Nota: Los valores correspondientes a las pérdidas de vidas fueron multiplicados por 10 para lograr una mejor visualización en el histograma***

6.3.10.Tr 10000 años



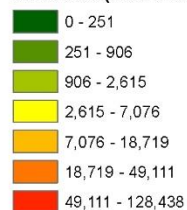




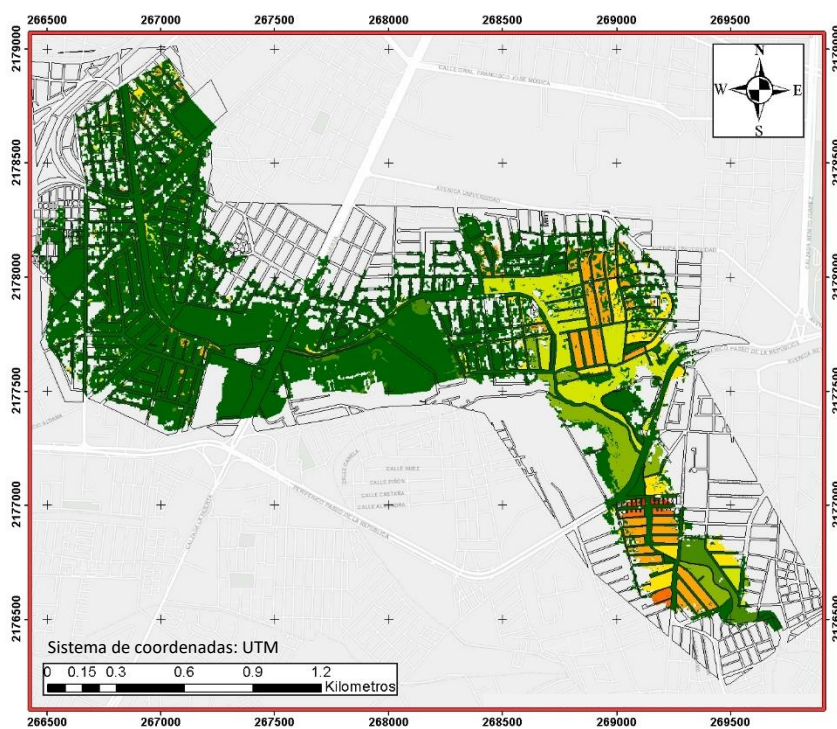
Simbología

Población en riesgo tr 10000

Densidad (hab/km2)



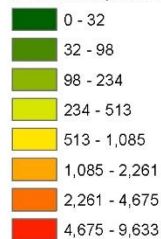
Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Pérdidas de vida tr 10000

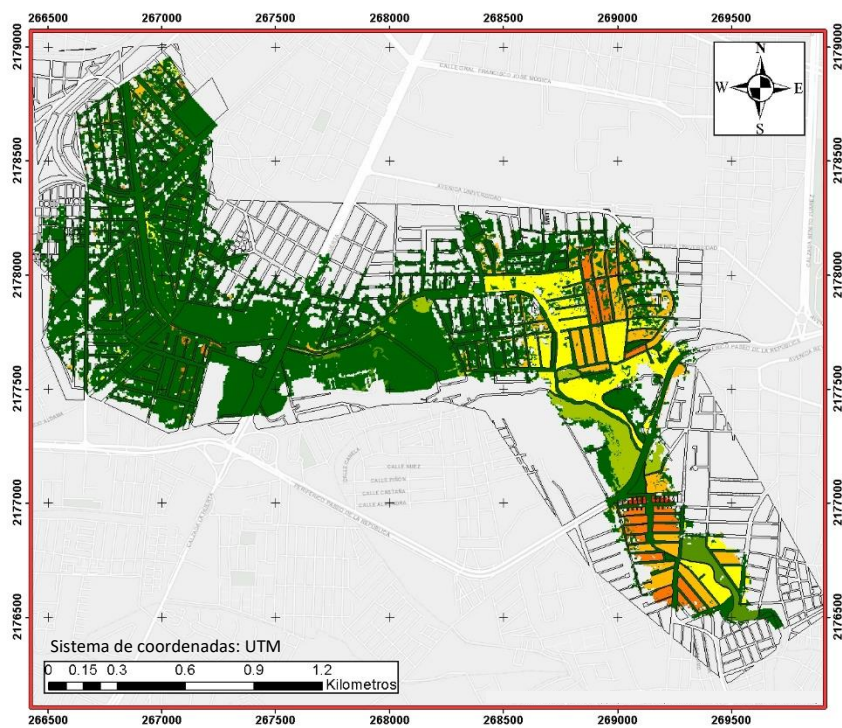
Densidad (hab/km2)



C3

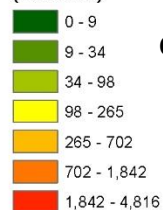


Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

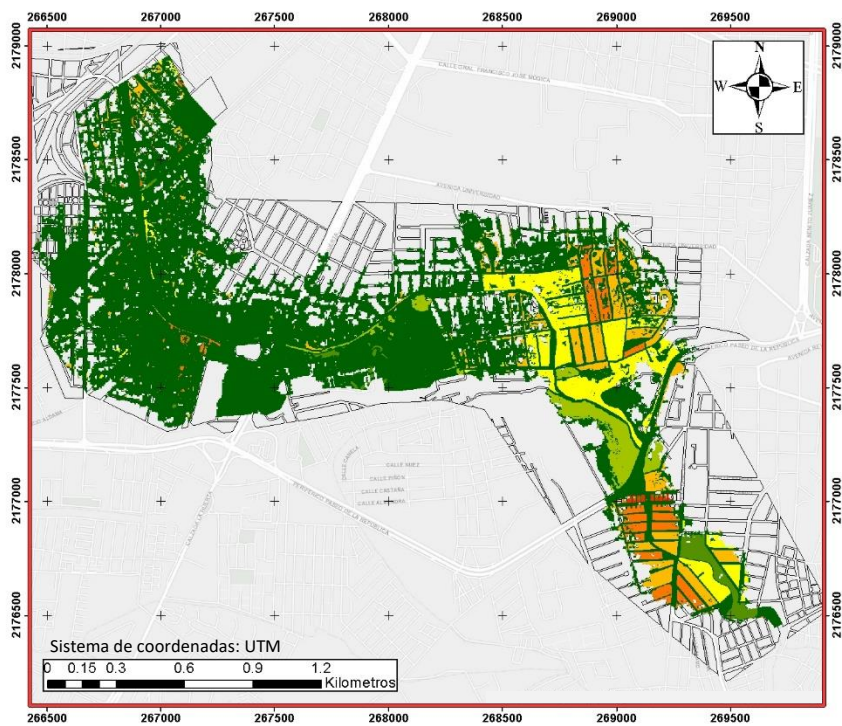
Pérdidas de vida tr 10000
(hab/km2)



C5

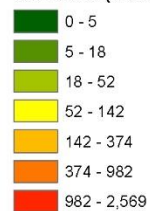


Elaboró: PIC Chrystopher Franco



Simbología

Pérdida de vidas tr 10000
Densidad (hab/km2)

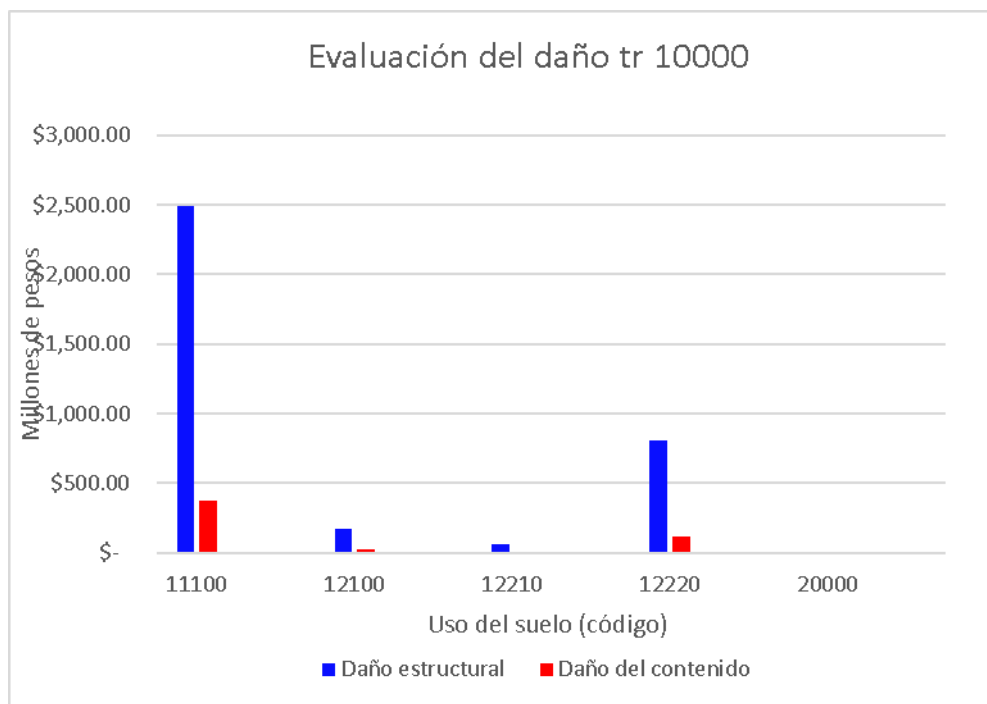


C7

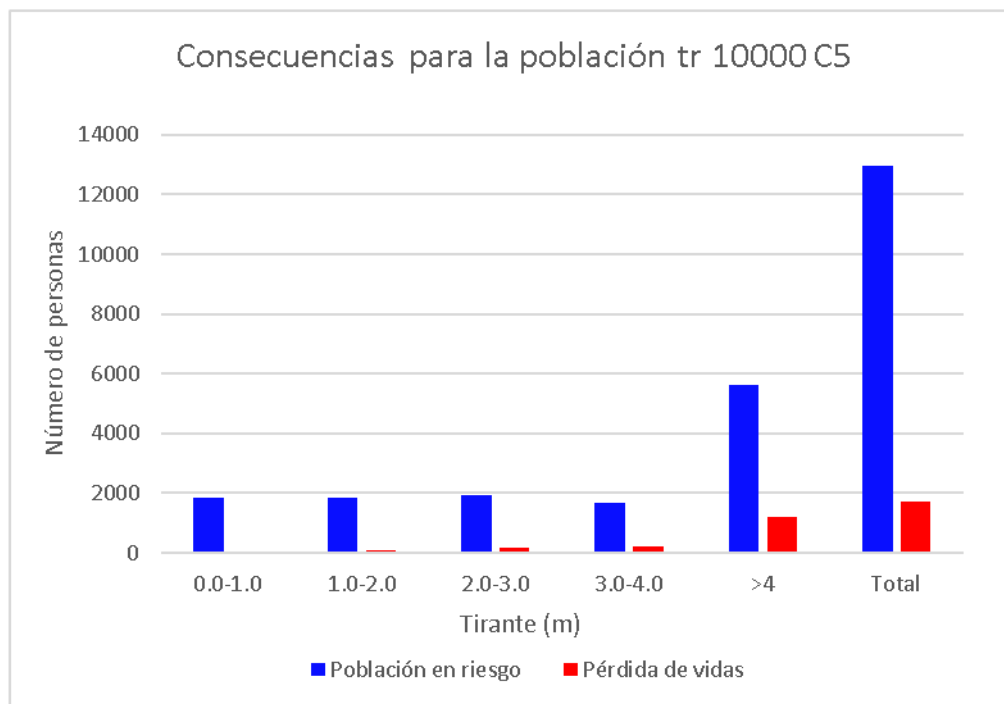
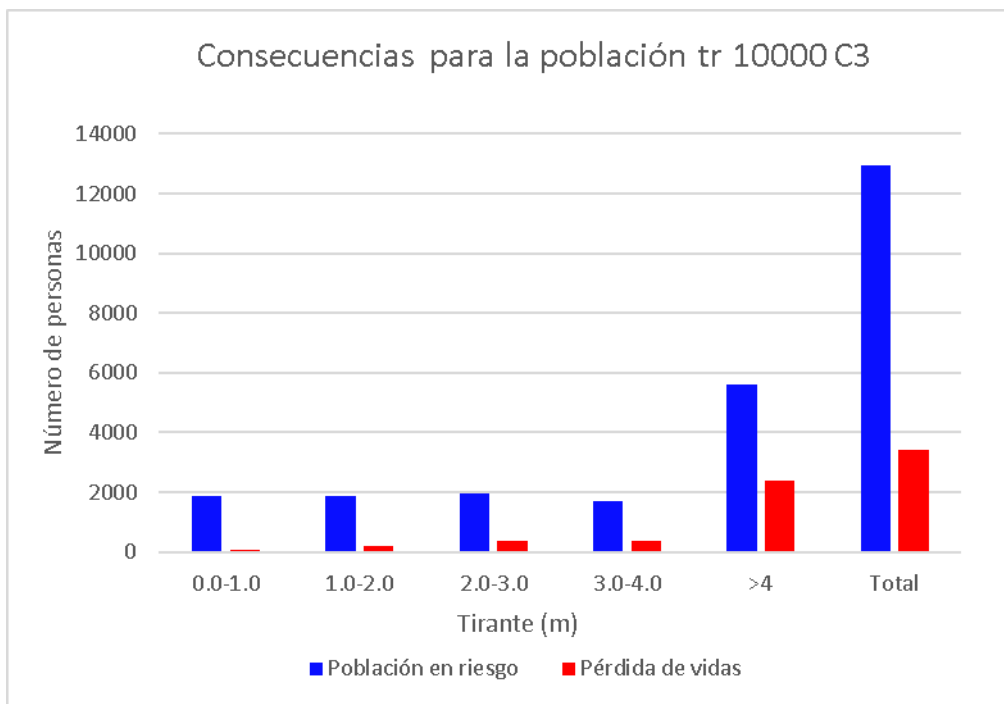


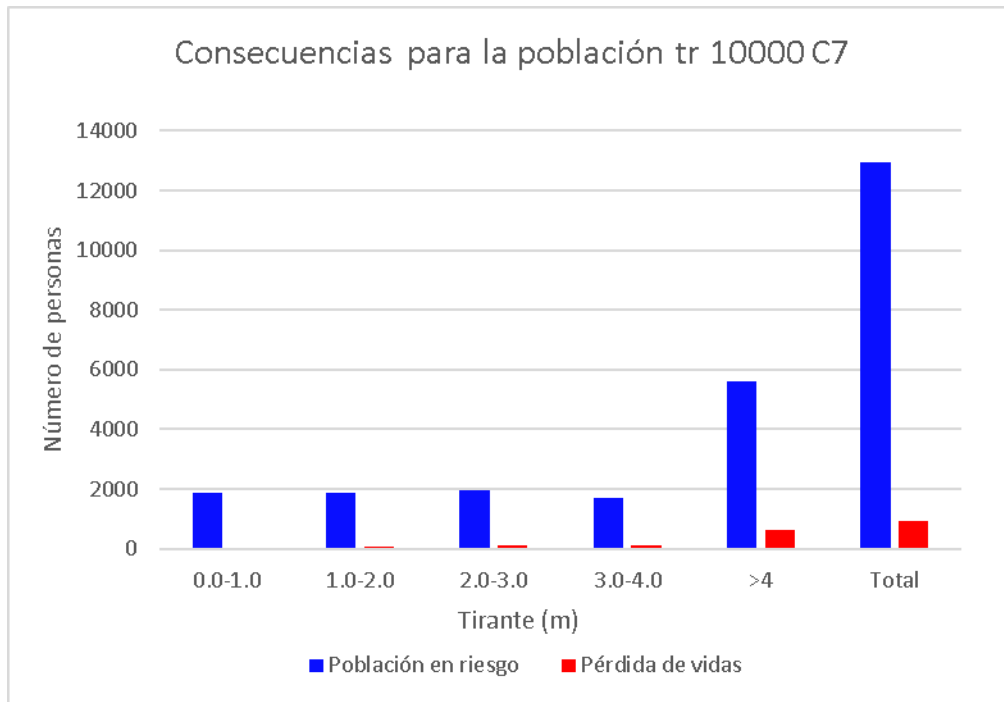
Elaboró: PIC Chrystopher Franco

Tr 10000						
Code	Uso de suelo	Área (m ²)	Valor estructural (pesos)	Valor del contenido (pesos)	Daños estructurales (pesos)	Daños del contenido (pesos)
11100	Tejido urbano continuo (densidad >80%)	1480100	\$ 3,621,845,000.00	\$ 543,204,900.00	\$ 2,490,125,600.00	\$ 373,468,800.00
12100	Industrial	58200	\$ 235,971,200.00	\$ 35,407,300.00	\$ 175,636,900.00	\$ 26,354,200.00
12210	Caminos de alta velocidad y terrenos aledaños	1300	\$ 69,559,400.00	\$ 10,433,900.00	\$ 64,144,700.00	\$ 9,621,700.00
12220	Otros caminos y terrenos aledaños	24100	\$ 964,853,900.00	\$ 144,729,700.00	\$ 803,176,400.00	\$ 120,477,400.00
20000	Zonas agrícolas, áreas seminaturales y humedales	7300	\$ 14,683,400.00	\$ 2,199,200.00	\$ 11,559,600.00	\$ 1,731,400.00



tr 10000 años C3					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	214698	1759	99	1858	7
1.0-2.0	224585	1750	104	1854	21
2.0-3.0	230186	1821	120	1941	35
3.0-4.0	223771	1594	97	1691	39
>4	1267060	5256	359	5615	239
Total	2160300	12180	779	12959	341
tr 10000 años C5					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	214698	1759	99	1858	4
1.0-2.0	224585	1750	104	1854	10
2.0-3.0	230186	1821	120	1941	18
3.0-4.0	223771	1594	97	1691	20
>4	1267060	5256	359	5615	119
Total	2160300	12180	779	12959	171
tr 10000 años C7					
Tirante (m)	Área inundada	Residentes en riesgo	Residentes temporales en riesgo	Población total en riesgo	Pérdida de vidas
0.0-1.0	214698	1759	99	1858	2
1.0-2.0	224585	1750	104	1854	6
2.0-3.0	230186	1821	120	1941	10
3.0-4.0	223771	1594	97	1691	11
>4	1267060	5256	359	5615	64
Total	2160300	12180	779	12959	93





*****Nota: Los valores correspondientes a las pérdidas de vidas fueron multiplicados por 10 para lograr una mejor visualización en el histograma***

7. Bibliografía

- Escuder-Bueno, Ignacio [et al] (2013) Metodología completa y cuantitativa de análisis del riesgo de inundación en zonas urbanas.
- Cardona, O. D. (2001). La necesidad de pensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. In *Una crítica y una revisión necesaria para la gestión. Ponencia presentada en el International Work Conference on Vulnerability in Disaster Theory and Practice. Holanda: Centro de Estudios sobre Desastres de la Universidad de Wageningen.*
- Raffaele Albano, Leonardo Mancusi, Aurelia Sole & Jan Adamowski (2017) *FloodRisk: a collaborative, free and open-source software for flood risk analysis*, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8:2, 1812-1832, DOI: 10.1080/19475705.2017.1388854
- Campos Aranda, D. F. (1992). *Procesos de Ciclo Hidrológico* (Segunda Reimpresión ed.). Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Albano, R. (s. f.). *The QGIS Plug-in FloodRisk ver.1.0 User Manual* (Primera ed.). FloodRiskGroup.
- Te Chow, V. (2005). *Hidráulica de canales abiertos* (1a. ed.). Santa fe de Bogotá: Mcgraw-hill interamericana.
- Mijares, A. F. J. (2010). *Fundamentos De Hidrología De Superficie* (1.a ed.). Limusa.
- Betsholtz, A., & Nordlöf, B. (2017). Potentials and limitations of 1D, 2D and coupled 1D-2D flood modelling in HEC-RAS: A case study on Høje river. Lund University: Lund, Sweden, 128.
- Salinas, M. A. S. (1999). *Obras de Protección Contra Inundaciones* (Primera edición). Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- CENAPRED. (N/D). Atlas Nacional de Riesgos. 02/02/2022, de CENAPRED Sitio web: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/IGOPP/glosario.php>
- Gobierno de España. (09/07/2010). Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación. 02/02/2022, de Boletín Oficial de Estado Sitio web: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2010-11184
- Staff, F. (2021, 20 septiembre). Conagua alerta de posible desbordamiento del río Tula, en Hidalgo. Forbes México. <https://www.forbes.com.mx/conagua-alerta-de-posible-desbordamiento-del-rio-tula-en-hidalgo/>
- O. (2020, 10 julio). Se desborda dren y se inundan cuatro colonias tras tormenta en Morelia. La Voz de Michoacán. <https://www.lavozdemichoacan.com.mx/michoacan/morelia-appmobil/se-desborda-arroyo-y-se-inundan-cuatro-colonias-en-morelia/>
- Vicenteño, D. R. E. Y. (2021, 21 septiembre). Aumenta la alerta por inundaciones; inician evacuaciones. Excélsior. <https://www.excelsior.com.mx/nacional/aumenta-la-alerta-por-inundaciones-inician-evacuaciones/1472672>
- Mancusi, L., Albano, R., & Sole, A. (2016, febrero). FloodRisk: a QGIS plugin for flood consequences estimation. Research Gate. https://www.researchgate.net/profile/Leonardo-Mancusi-2/publication/295626726_FloodRisk_a_QGIS_plugin_for_flood_consequences_estimation/links/56cc1be308ae5488f0dc50f4/FloodRisk-a-QGIS-plugin-for-flood-consequences-estimation.pdf

- Diario Oficial de la Federación. Comisión Nacional del Agua. Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. México: CONAGUA; 2015
- Dirección de Catastro del Gobierno de Michoacán. (2012–2021). C. Valores Unitarios Rústicos por Hectárea 2021 (Versión 2021) [Costos de referencia para la clasificación de la construcción]. <https://secfinanzas.michoacan.gob.mx/wp-content/uploads/2021/01/Tablas-de-Valores-2021b.pdf>
- Inventario Nacional de Vivienda (Versión 2016). (2016). [Describe la población de la zona en base al trazo urbano, proporcionando información de cada manzana como: número de habitantes, viviendas habitadas, población temporal, así como información de servicios básicos con los que cuentan las viviendas.]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/descarga/?ti=13&ag=01>