

**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

**POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

**ANÁLISIS DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA  
ZONA METROPOLITANA DE SAN LUIS POTOSÍ**

Tesis que presenta

**María Angelina Candia Monsiváis**

Para obtener el grado de

**Maestra en Geociencias Aplicadas**

**Director de la Tesis:**

**Dra. Birgit Steinich**

San Luis Potosí, S.L.P., Febrero de 2015



## Constancia de aprobación de la tesis

La tesis "**Análisis de riesgo por inundación en la zona metropolitana de San Luis Potosí**" presentada para obtener el Grado de Maestra en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **María Angelina Candia Monsivais** y aprobada el **cinco de febrero del dos mil quince** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

**Dra. Birgit Steinich**  
Directora de la tesis

**Dr. Pablo Dávila Harris**  
Miembro del Comité Tutorial

**Dr. José Alfredo Ramos Leal**  
Miembro del Comité Tutorial



**IPICYT**

# Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

## Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 004 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 5 días del mes de febrero del año 2015, se reunió a las 18:30 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dra. Birgit Steinich</b>	<b>Presidenta</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. José Alfredo Ramos Leal</b>	<b>Secretario</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. Pablo Dávila Harris</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**MAESTRA EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

sustentó la C.

**María Angelina Candia Monsivais**

sobre la Tesis intitulada:

*Análisis de riesgo por inundación en la zona metropolitana de San Luis Potosí*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dra. Birgit Steinich**

El Jurado, después de deliberar, determinó

**APROBARLA**

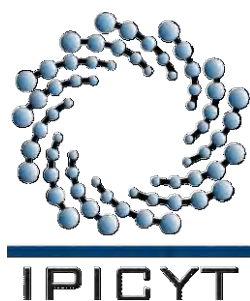
Dándose por terminado el acto a las 19:30 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 5 días del mes de febrero de 2015.

  
**Dr. Marcial Bonilla Marín**  
Secretario Académico

  
**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento del Posgrado





## **Créditos Institucionales**

Esta tesis fue elaborada en la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección de la Dra. Birgit Steinich.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (289396) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

# Dedicatorias

A mis hijos Natalia y Juanito.

## **Agradecimientos**

Al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica y a la división de Geociencias Aplicadas por darme la oportunidad de formar parte de este programa de posgrado.

A mi aún esposo por estar conmigo en las buenas, en las malas y en las peores y por haberme dado espacio cuando fue necesario.

A mis padres que siempre me han apoyado incondicionalmente.

A los profesores de IPICYT por enseñarme tantas cosas nuevas para mí y por tenerme paciencia.

A la Dra. Birgit Steinich por aceptarme como su alumna, dirigir mi trabajo de tesis, tenerme demasiada paciencia, apoyarme y sobre todo por confiar en mí.

A mis compañeros y amigos de IPICYT: Rosaira, Zenón, Ángeles, Jensen, Pablo, Alex, Claudia, Tony y los nuevos, que son muchos, por su amistad, los buenos momentos y por su ayuda tanto académica como personal.

A todos ustedes muchas gracias

## Lista de tablas

Tabla 1 Descripción del CEM	5
Tabla 2 Descripción de las cartas topográficas utilizadas	6
Tabla 3 Descripción de las AGEBS	6
Tabla 4 Información del mapa de uso de suelo y vegetación	7
Tabla 5 información del mapa de edafología	7
Tabla 6 Información del plano de colectores pluviales	8
Tabla 7 Información de planos de colectores sanitarios	8
Tabla 8 Localización de estaciones climatológicas analizadas	9
Tabla 9 Información de isoyetas IDF	9
Tabla 10 Precipitación promedio para cada estación	34
Tabla 11 Precipitaciones máximas anuales de la estación "El Peaje"	37
Tabla 12 PMA promedio para cada estación	38
Tabla 13 Número primo asignado de acuerdo al tipo de suelo	44
Tabla 14 Posibles valores de Número de Curva	46
Tabla 15 Datos utilizados para generar indicadores de vulnerabilidad	55
Tabla 16 Características de cada subcuenca discretizada	64

## Lista de figuras

Figura 1 Ubicación de la zona de estudio	3
Figura 2 Ríos y arroyos de la zona de estudio	4
Figura 3 Proceso de formación inundaciones	20
Figura 4 El ciclo hidrológico visto como un sistema	21
Figura 5 Hietograma triangular de diseño	25
Figura 6 Continuo de Elevaciones Mexicano zona de estudio	32
Figura 7 Interpolación de la precipitación media calculada	35
Figura 8 Hietograma triangular de baja intensidad	36
Figura 9 Hietograma triangular de intensidad moderada	36
Figura 10 Interpolación de la PMA promedio	38
Figura 11 Hietograma triangular intensidad media	39
Figura 12 Interpolación de isoyetas IDF de periodo de retorno de 10 años	40
Figura 13 Curva IDF para periodo de retorno de 10 años	41
Figura 14 Interpolación isoyetas IDF de periodo de retorno de 100 años	42
Figura 15 Curva IDF para periodo de retorno de 100 años	43
Figura 16 Mapa de edafología reclasificado	44
Figura 17 Mapa de uso de suelo y vegetación reclasificado	45
Figura 18 Mapa de pendientes en la zona de influencia	47
Figura 19 Mapa de Respuesta Hidráulica	48
Figura 20 Mapa de escurrimientos	50
Figura 21 Mapa de zonas inundables reportadas	51
Figura 22 Mapa de profundidades	52
Figura 23 Mapa de pendientes en la zona urbana	53
Figura 24 Cuencas definidas como área de influencia	59
Figura 25 Hietogramas generados	60
Figura 26 Subcuencas discretizadas en SWMM	61
Figura 27 Mapa de Número de Curva obtenido	61
Figura 28 Nodos descritos en SWMM	65
Figura 29 Conductos descritos en SWMM	65
Figura 30 Indicador de respuesta hidráulica	66
Figura 31 Indicador de escurrimiento	67
Figura 32 Indicador de prevalencia	67
Figura 33 Indicador de elevación	68
Figura 34 Indicador de pendiente	68
Figura 35 Mapa de amenaza de inundación	69
Figura 36 Indicador de exposición humana	70
Figura 37 Indicador de exposición viviendas	70
Figura 38 Indicador de rezago social	71
Figura 39 Mapa de vulnerabilidad	71
Figura 40 Mapa de riesgo por inundación en la ZMSLP	72



## Resumen

Análisis de riesgo por inundación en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí

Palabras clave: riesgo, inundaciones urbanas, amenaza, vulnerabilidad, análisis multicriterio, SIG, algebra de mapas.

En la ZMSLP se presentan inundaciones asociadas con lluvias de corta duración y altas intensidades éstas no corresponden a inundaciones convencionales, en el sentido que difícilmente se presenta desbordamiento de ríos y no se presentan en grandes extensiones de terreno; sin embargo la presencia de agua en lugares donde normalmente no la hay, que incluso pueden ser los cauces urbanizados de ríos, provoca riesgo para la población.

Para la evaluación del riesgo se recurrió al uso de Sistemas de información geográfica, mediante algebra de mapas se utilizaron técnicas de análisis multicriterio para evaluar parámetros de distinta naturaleza, expuestos como indicadores tanto de amenaza como de vulnerabilidad.

Se evaluaron los índices de amenaza y vulnerabilidad compuestos por indicadores de distinta naturaleza, obteniendo como resultado zonas de alto índice de amenaza, así como zonas de alta vulnerabilidad; sin embargo, al relacionarlos el valor máximo obtenido fue de 0.64, lo cual representa un valor de peligro medio, lo que indica que las zonas de mayor amenaza no coinciden con las de mayor vulnerabilidad.

## **Abstract**

Flood risk analysis in the Metropolitan Area of San Luis Potosí

Keywords: risk, urban floods, hazard, vulnerability, multi-criteria analysis, GIS, map algebra.

In the Metropolitan Area of San Luis Potosí floods are related to high-intensity and short-duration rainfall events. These floods are not typically river overflows nor do they cover large areas. However, the presence of water in places that are normally dry, like ephemeral urbanized river channels, are causing considerable risk to the population.

Geographic Information Systems are used to assess risk. Map algebra and multi-criteria analysis techniques are used to evaluate parameters of different nature, which are expressed as indicators of hazard and vulnerability.

Hazard and vulnerability indices are integrated by different indicators that are evaluated separately. Areas of high values of the hazard index are identified, as well as areas of high vulnerability index. Comparing both indices show a maximum value of risk of 0.64, which represents an average value of danger. This result indicates that the areas of greatest hazard do not match the most vulnerable ones.

## ÍNDICE GENERAL

CONSTANCIA DE APROBACIÓN DE LA TESIS.....	II
CRÉDITOS INSTITUCIONALES .....	III
ACTA DE EXAMEN.....	IV
DEDICATORIAS.....	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
LISTA DE TABLAS.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
RESUMEN .....	X
ABSTRACT .....	XI

## CONTENIDO

<b>GENERALIDADES.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
Objetivo general .....	2
Objetivos específicos.....	2
<b>JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>ZONA DE ESTUDIO .....</b>	<b>2</b>
Ubicación.....	2
Hidrografía .....	3
Topografía.....	4
<b>DATOS DE PARTIDA.....</b>	<b>4</b>
Cartográficos .....	4
Continúo de Elevaciones Mexicano (CEM).....	4
Cartas topográficas.....	5
Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB).....	6
Mapas temáticos: .....	6
Uso de suelo y vegetación.....	6
Edafología .....	7
Colectores pluviales.....	8
Colectores Sanitarios.....	8
Datos meteorológicos.....	8
Estaciones climatológicas.....	8
Isoyetas IDF .....	9
<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>10</b>
<b>ANÁLISIS DE RIESGO.....</b>	<b>10</b>
<b>ANÁLISIS MULTICRITERIO .....</b>	<b>12</b>
Indicadores .....	12
Índices .....	13
Proceso de normalización: .....	13
Proceso de ponderación: .....	14
<b>SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>

<b>GRASS GIS.....</b>	<b>16</b>
<b>ALGEBRA DE MAPAS.....</b>	<b>16</b>
<b>INUNDACIONES.....</b>	<b>17</b>
Clasificación.....	17
De acuerdo a su origen.....	17
Inundaciones pluviales .....	17
Inundaciones Fluviales .....	18
Inundaciones costeras.....	18
Inundación por falla de infraestructura hidráulica.....	18
De acuerdo al tiempo de respuesta de la cuenca.....	19
Inundaciones lentas .....	19
Inundaciones súbitas .....	19
Proceso y formación de las inundaciones.....	19
<b>CICLO HIDROLÓGICO .....</b>	<b>20</b>
<b>CUENCA HIDROLÓGICA .....</b>	<b>21</b>
<b>PRECIPITACIÓN .....</b>	<b>22</b>
Medición de la precipitación.....	22
Red de estaciones pluviométricas .....	22
Variabilidad en el tiempo.....	23
Periodo de retorno .....	23
Variabilidad en el espacio.....	23
Tormentas de diseño.....	24
Método del hietograma triangular .....	24
Método del bloque alterno .....	25
<b>MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA AMENAZA .....</b>	<b>26</b>
<b>MODELACIÓN HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA .....</b>	<b>27</b>
<b>SWMM 5.0.....</b>	<b>28</b>
METODOLOGÍA.....	29
Recopilación de la información .....	29
Obtención de los indicadores .....	29
Rango .....	30
Constitución.....	30

<b>Formulación .....</b>	<b>30</b>
<b>Dominio .....</b>	<b>31</b>
<b>INDICADORES DE AMENAZA .....</b>	<b>31</b>
Indicador de respuesta hidrológica .....	31
Límites del área de influencia.....	31
Módulo atmosférico.....	32
Tormentas de diseño: .....	32
Baja intensidad.....	33
Intensidad moderada .....	36
Intensidad media .....	37
Intensidad alta.....	39
Intensidad muy alta .....	41
Modulo del terreno .....	43
Área y ancho .....	43
Numero de curva: .....	43
Pendiente: .....	47
Módulo de transporte.....	47
Simulación.....	48
Indicador de escurrimiento .....	49
Indicador de prevalencia.....	51
Indicador de elevación .....	52
Indicador de pendiente.....	53
<b>FORMULACIÓN DE LA AMENAZA.....</b>	<b>54</b>
<b>ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD.....</b>	<b>54</b>
<b>INDICADORES DE VULNERABILIDAD .....</b>	<b>56</b>
Indicador de exposición humana .....	56
Indicador de exposición de viviendas .....	56
Rezago social .....	57
<b>FORMULACION DE LA VULNERABILIDAD .....</b>	<b>58</b>
<b>ANÁLISIS DEL RIESGO.....</b>	<b>58</b>
<b>RESULTADOS .....</b>	<b>59</b>
<b>INDICADORES DE AMENAZA .....</b>	<b>59</b>
Indicador de respuesta hidrológica .....	59
Módulo atmosférico.....	59
Módulo del terreno .....	60
Módulo de transporte.....	65
Simulación.....	66
Normalización .....	66

Indicador de escurrimiento .....	67
Indicador de prevalencia .....	67
Indicador de elevación .....	68
Indicador de pendiente.....	68
<b>FORMULACIÓN DE LA AMENAZA.....</b>	<b>69</b>
<b>ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD.....</b>	<b>70</b>
Indicador de exposición humana.....	70
Indicador de exposición de viviendas .....	70
Indicador de rezago social.....	71
<b>FORMULACIÓN DE LA VULNERABILIDAD .....</b>	<b>71</b>
<b>MAPA DE RIESGO POR INUNDACIÓN.....</b>	<b>72</b>
DISCUSIÓN.....	73
CONCLUSIONES .....	75
BIBLIOGRAFÍA.....	76

# GENERALIDADES

## INTRODUCCIÓN

El agua representa un desafío en cuanto al desarrollo de una ciudad, desde su fundación se busca la disponibilidad de ésta; sin embargo pocas o nulas veces se toma en cuenta la relación que tendrá el crecimiento de la ciudad respecto, no solo a la disponibilidad del agua; sino también a la distribución y comportamiento que presenta ésta en el entorno cambiante. Esto ocasiona muchas veces situaciones no esperadas como son las inundaciones urbanas.

Las inundaciones urbanas representan un peligro que ha venido cobrando mayor importancia en la actualidad, principalmente porque las zonas urbanas están en crecimiento y porque los procesos de urbanización alteran los componentes del ciclo hidrológico (Tucci y Bertoni, 2006), provocando que episodios de lluvia que anteriormente no eran significativos, ahora tengan consecuencias peligrosas o desastrosas, provocando devastación generalizada, daños económicos e incluso pérdida de vidas humanas.

Aunque las inundaciones rurales puedan extenderse en territorios mucho más extensos y afectar a los sectores más pobres de la población, las inundaciones urbanas son mucho más costosas y difíciles de manejar (Jha, 2012). Esto es debido a que los asentamientos urbanos presentan una mayor concentración de pobladores, así como de activos económicos y sociales.

La población y economía mundial son hoy en día predominantemente urbanas. En América Latina más del 75 por ciento de la población habita espacios urbanos y la mayoría de las megas ciudades del mundo están ubicadas en áreas de gran amenaza física (Llavel, 2000).

La estimación de las crecientes en áreas y cuencas urbanas depende enormemente del estado de urbanización, ya que ésta genera importantes alteraciones tanto en la red de escurrimiento natural como en los procesos de infiltración del suelo. Los usos urbanos y la red de transporte, intervienen o en ocasiones reemplazan los cursos naturales de agua, afectando la geometría de la red de drenaje (May, 1998). Todas estas variaciones debidas al grado de urbanización implican que el análisis probabilístico de los registros de crecientes, si los hubiera, es irrelevante, ya que éstos no corresponden a las condiciones de desarrollo futuras, o incluso actuales. Se requiere además, la consideración simultánea de las medidas de abatimiento y control de crecientes, ya que éstas modifican la respuesta hidrológica de las áreas o cuencas urbanizadas (Campos, 1999).

La problemática de las inundaciones en el Valle de San Luis Potosí se debe principalmente a las precipitaciones pluviales con altas intensidades y poca duración, tiempos cortos de concentración de escurrimientos generados por las sierras San Miguelito y Álvarez, falta de infraestructura para captación y/o desvío de las aguas pluviales, crecimiento poco controlado de la zona urbana y rezago en la implementación de infraestructura anteriormente planteada para frenar o controlar las inundaciones (H. Ayuntamiento de Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P., 2010)



## OBJETIVOS

### **Objetivo general**

Mediante el uso de SIG elaborar mapas de riesgo por inundación en la zona metropolitana de San Luis Potosí.

### **Objetivos específicos**

Comprender algunos de los fenómenos hidrometeorológicos más importantes en la región, desde el punto de vista de los daños que ocasionan.

Conocer los peligros y amenazas para saber dónde, cuándo y cómo nos afectan, identificar y establecer las características y los niveles actuales de riesgo que implican esos fenómenos.

## JUSTIFICACIÓN

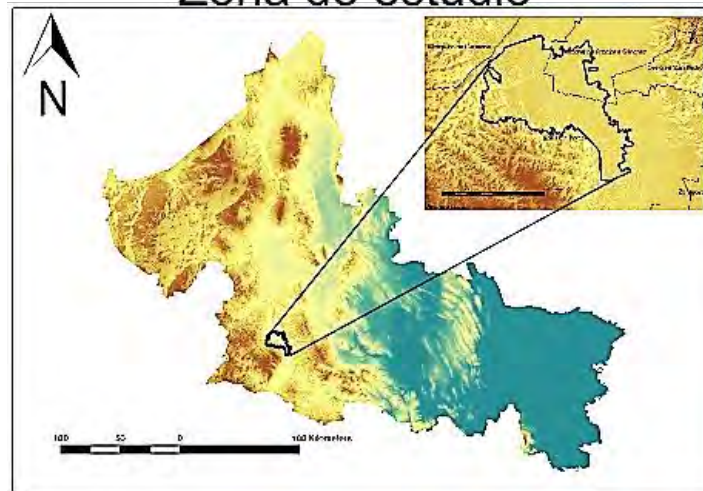
Los mapas de peligro y riesgo de inundación son herramientas visuales que ayudan a comunicar las amenazas existentes en un área, pueden ser usados como herramientas complementarias en la toma de decisiones ya sea para planificar el desarrollo, proyectar alguna respuesta ante emergencias y/o para la formulación de políticas.

## ZONA DE ESTUDIO

### **Ubicación**

En la presente se refiere a la zona metropolitana de San Luis Potosí como al área que comprende la mancha urbana entre los municipios de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez, ésta se localiza en la porción central y suroccidental del estado de San Luis Potosí, se encuentra localizada dentro del Valle de San Luis Potosí y conforma un polígono de forma irregular con un área de aproximadamente 175 km<sup>2</sup>.

## Zona de estudio



*Figura 1 Ubicación de la zona de estudio*

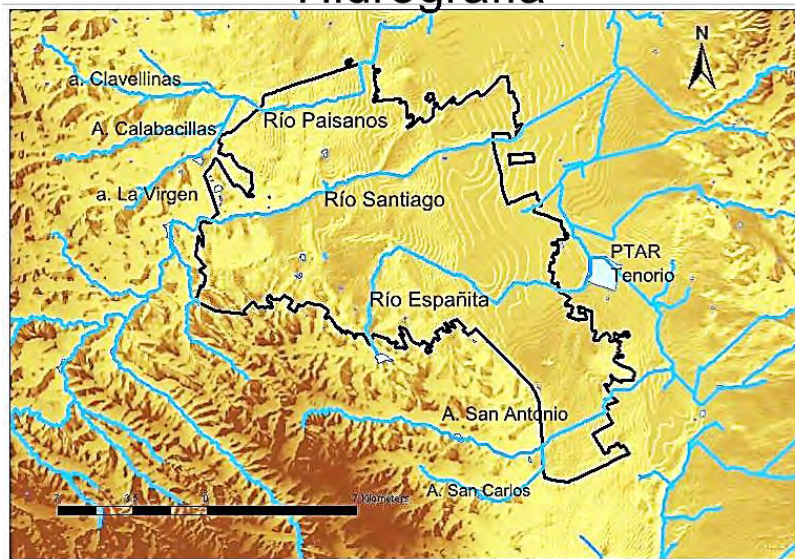
### **Hidrografía**

La Zona Metropolitana de San Luis Potosí se ubica en la porción sur de la región hidrológica “El Salado”, conclave RH37, específicamente en la cuenca denominada Presa San José-Los Pilares y otras, subcuenca Presa San José (rh37gb).

Las principales corrientes del Valle de San Luis Potosí son el río Santiago, el río Españita, el río Paisanos y los arroyos Mexquitic, San Antonio y San Carlos, todas estas corrientes originadas al poniente y sur del valle, y sobre los cuales existe infraestructura hidráulica de captación y regulación de escurrimientos, así como cauces naturales, artificiales y urbanizados.

Todas estas corrientes son efímeras en las que solo circula agua durante escasos días al año y siempre como resultado de precipitaciones de fuerte intensidad horaria, descargan en la porción norte del valle, debido a sus características topográficas, en las zonas denominadas Lagunas del Norte y zona del ejido La Tinaja, aunque generalmente desaparecen en las llanuras debido a infiltraciones y evaporaciones.

## Hidrografía



*Figura 2 Ríos y arroyos de la zona de estudio*

### **Topografía**

El Valle de San Luis Potosí forma parte de la Provincia Fisiográfica de la Mesa Central, se ubica entre las dos grandes cordilleras del país, razón por la cual su clima es semiárido y por consecuencia con corrientes de régimen intermitente y sin descarga al mar.

Tiene un relieve definido por un valle tectónico limitado por sierras de elevación intermedia: Al norte, por un pilar volcano-tectónico denominado Alto “La Melada”, al suroccidente y occidente, por la Sierra de San Miguelito y al oriente, por la Sierra de Álvarez.

### **DATOS DE PARTIDA**

Para desarrollar la presente tesis se partió de la siguiente información y datos:

### **Cartográficos**

Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)

Disponible en formato digital en el portal del INEGI.

El Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) es un producto que representa las elevaciones del territorio continental mexicano, mediante valores que indican puntos sobre la superficie del terreno, cuya ubicación geográfica se encuentra definida por coordenadas (X, Y), a las que se le integran valores que representan las elevaciones (Z). Los puntos se encuentran espaciados y distribuidos de modo regular.

<b>Características</b>	<b>Descripción</b>
Año de publicación	2013
Resolución	15 m x 15 m
Valores de Z	Enteros positivos y negativos.
Unidades de Z	Metros
Datos de referencia geodésica	El datum corresponde a ITRF92 época 1988.0, elipsoide GRS80, coordenadas geográficas.
Cobertura geográfica	Territorio continental de los Estados Unidos Mexicanos
Error medio cuadrático	4.9 m
Medio de distribución	Principalmente por internet mediante el portal del INEGI. Considera diversas opciones.
Formato de distribución	BIL (Banda entrelazada por línea). Forma Raster.
Software utilizado para su generación	ArcGis 10.1

*Tabla 1 Descripción del CEM*

#### Cartas topográficas

Disponibles en formato digital en el portal del INEGI, se utilizaron las cartas f14a73, f14a74, f14a83, 14a84, f14c13 y f14c14 a una escala 1:50000.

Son una serie de mapas que representan gráficamente los principales rasgos físicos, naturales y culturales que hay en nuestro país.

Contienen información como: los nombres y ubicación de las localidades urbanas y rurales; las principales obras de infraestructura hechas por el hombre; la representación del relieve; los rasgos hidrográficos más representativos como son: ríos, arroyos, presas y lagunas.

<b>Clave</b>	<b>Entidad</b>	<b>Título</b>	<b>Escala</b>	<b>Edición</b>	<b>Datum</b>	<b>Formato</b>
f14a73	San Luis Potosí	Ahualulco del Sonido Trece	1:50 000	2001	ITRF92	shp
f14a74	San Luis Potosí	Villa Hidalgo	1:50 000	2000	ITRF92	shp

f14c13	San Luis Potosí	San Francisco	1:50 000	1998	Norteamericano de 1927	shp
f14c14	San Luis Potosí	Santa María del Río2	1:50 000	2000	Norteamericano de 1927 Esferoide Clarke 1866.	shp

*Tabla 2 Descripción de las cartas topográficas utilizadas*

### Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB)

Proporcionada en formato digital por INEGI correspondiente a la base de datos del Sistema para la Consulta de Información Censal (SCINCE) 2010.

Un área geoestadística básica urbana es un área geográfica ocupada por un conjunto de manzanas perfectamente delimitadas por calles, avenidas, andadores o cualquier otro rasgo de fácil identificación en el terreno y cuyo uso del suelo es principalmente habitacional, industrial, de servicios, comercial, etcétera, y sólo son asignadas al interior de localidades urbanas.

<b>Características</b>	<b>Descripción</b>
Clave	24
Localidad	San Luis Potosí
Origen	SCINCE 2010
Formato	Shapefile
Datum	International_Terrestrial_Reference_Frame_1992
Proyección	Lambert_Conformal_Conic

*Tabla 3 Descripción de las AGEBs*

### Mapas temáticos:

Uso de suelo y vegetación

Disponible en formato digital en el portal del INEGI, bajo el título de “Conjuntos de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250, 000 - Serie V”.

Contiene información del Uso del Suelo y Vegetación obtenida a partir de la aplicación de técnicas de fotointerpretación con imágenes de satélite Landsat TM5 seleccionadas del año 2011. Esta interpretación está apoyada con trabajos de campo realizados de abril a junio de 2012. Los Conjuntos de Datos contienen la ubicación, distribución y extensión de diferentes comunidades vegetales y usos agrícolas con sus respectivas variantes en tipos de vegetación, de usos agrícolas, e información ecológica relevante.

<b>Características</b>	<b>Descripción</b>
Clave	USV250S5_UNION
Escala	1:250000
Año de publicación	2013
Formato	Shapefile
Datum	International_Terrestrial_Reference_Frame_1992
Proyección	Lambert_Conformal_Conic

*Tabla 4 Información del mapa de uso de suelo y vegetación*

## Edafología

Proporcionado por el Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) Disponible en formato digital en el portal de Geoinformación de la CONABIO, bajo el título de “edafología”.

El mapa muestra los diferentes tipos de suelo que se encuentran a nivel nacional a partir de la unión de 32 coberturas: 17 a escala 1:250,000 y 15 a 1:1000,000. La información que se maneja es: tipo de suelo, textura, fase física, fase química. Los mapas digitalizados (INEGI) se obtuvieron a través del proyecto P147 Enriquecimiento y uso de la base de datos geográficos del INIFAP apoyado por CONABIO (1994).

<b>Características</b>	<b>Descripción</b>
Clave	eda251mgw
Escala	1:1000000
Año de publicación	2001
Formato	Shapefile
Datum	International_Terrestrial_Reference_Frame_1992
Proyección	Lambert_Conformal_Conic

*Tabla 5 información del mapa de edafología*

## Colectores pluviales

La información disponible corresponde al plano de la red de colectores pluviales, proporcionado por el IMPLAN y disponible para su descarga en la página [implansanluis.gob.mx](http://implansanluis.gob.mx), en este se muestra la localización de los colectores pluviales existentes y en proyecto. En la presente se tomaron en cuenta únicamente los ya existentes.

<b>Características</b>	<b>Descripción</b>
Clave de plano	MTO-SLP-SGS-IFCP01
Año de revisión	2012
Formato	PDF
Proporcionado por	IMPLAN

*Tabla 6 Información del plano de colectores pluviales*

## Colectores Sanitarios

La información utilizada corresponde al plano 4-2 localización de colectores sanitarios, así como datos de diámetros de los mismos indicados en los anexos 4 del documento “Estudio del Manejo de Las Aguas Pluviales en la ZMSLP” proporcionado por la Comisión Estatal del Agua (CONAGUA, 2009).

<b>Características</b>	<b>Descripción</b>
Clave de plano	Plano 4-2
Elaborado	UASLP
Convenio	CNA-DLSLP-UASLP-08/05-RF-CC
Año	2008
Formato	PDF
Proporcionado por	CEA

*Tabla 7 Información de planos de colectores sanitarios*

## Datos meteorológicos

### Estaciones climatológicas

Para el análisis climático y precipitación se recurrió a la información disponible en la Red de estaciones climatológicas, disponible en El Banco Nacional de Datos Climatológicos y proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional y la Comisión Nacional del Agua, esta información incluye climatología diaria, estadísticas, normales meteorológicas, valores extremos y valores mensuales. En la presente se analizaron los datos de estadísticas y valores extremos para las 17 estaciones que se enlistan a continuación.

<b>ID</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>Z</b>
-----------	---------------	----------	----------	----------

<b>24004</b>	Armadillo	-100.6553	22.245	1628
<b>24024</b>	El peaje	-101.1153	22.0906	2109
<b>24034</b>	La salitrera	-100.5844	21.9378	1893
<b>24042</b>	Mexquitic	-101.125	22.28	2014
<b>24046</b>	Ojo caliente	-100.7622	21.8497	1759
<b>24061</b>	La concordia	-101.1767	22.3197	1900
<b>24069</b>	Los filtros	-100.9772	22.1528	1870
<b>24070</b>	Golondrinas	-101.0222	22.2075	1903
<b>24078</b>	Santiago	-101.2678	21.8736	2221
<b>24081</b>	Soledad Diez Gutiérrez	-100.9408	22.1831	1850
<b>24101</b>	Villa de reyes	-100.9333	21.8039	1820
<b>24106</b>	Zaragoza	-100.7319	22.0375	1983
<b>24111</b>	SLP	-100.975	22.1497	1871
<b>24153</b>	Colonia Juárez	-100.9117	22.245	1837
<b>24163</b>	Bledos	-101.1158	21.8381	1954
<b>24179</b>	Xoconoxtle	-100.71	22.0983	2068
<b>24197</b>	El terrero	-100.8867	22.4	1849

*Tabla 8 Localización de estaciones climatológicas analizadas*

#### Isoyetas IDF

Se utilizaron las curvas isoyetas de intensidad - duración – periodo de retorno disponibles en el portal de internet de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (<http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/isoyetas/>) para el estado de San Luis Potosí, éstas son presentadas con duraciones de 5, 10, 30, 60, 120 y 240 minutos para los periodos de retorno (tr) de 10, 20, 25, 50, y 100 años, también se tienen con duración de 24 horas para tr de 10, 25, 50, 100, 500 y 1000 años.

<b>Características</b>	<b>Descripción</b>
Clave	Isoyetas SLP IDF
Elaborado	SCT
Año	Sin referencia
Formato	PDF
Proporcionado por	SCT

*Tabla 9 Información de isoyetas IDF*



## MARCO TEÓRICO

### ANÁLISIS DE RIESGO

La determinación de áreas de riesgo por inundación normalmente se lleva a cabo a través de enfoques subjetivos, incluso intuitivos, debido a que el significado de riesgo por sí mismo se puede interpretar de diferentes maneras. El concepto de riesgo tiene un significado variable según el contexto en el que se emplea y, por esa razón, la interpretación adoptada debe ser aclarada previamente a cualquier análisis (Zonensein et al ,2008).

En 1979 la UNDRO (United Nations Disaster Relief Office) en conjunto con la UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) promovieron una reunión de especialistas en la materia, ahí se propuso la unificación de las definiciones de diversos términos relacionados con riesgo y desastres, mismos que fueron plasmados en el reporte denominado “Desastres naturales y análisis de la vulnerabilidad”, en éste aparece la siguiente fórmula general para la evaluación del riesgo:

$$R_t = E * R_s = E (H * V) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- $R_t$ : Es el riesgo total
- $E$ : Son los elementos en riesgo, es decir; la población, los edificios y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y la infraestructura expuesta de un área determinada.
- $R_s$ : Es el riesgo específico, definido como el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un proceso particular y como una función de la amenaza y de la vulnerabilidad.
- $H$ : es la amenaza, peligro o peligrosidad, definida como la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado.
- $V$ : es la vulnerabilidad, definida como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso.

Posteriormente en 1985 Cardona propuso eliminar la variable Exposición (E) por considerarla implícita en la vulnerabilidad. (Maskrey, 1993)

De tal manera que la ecuación utilizada para expresar los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo tomó la siguiente forma:

$$R_{ie} |t = f (A_i, V_e)|t \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- $R_{ie}$ : Es el riesgo, entendido como la probabilidad de pérdida de un elemento  $e$ , ante un suceso de intensidad  $i$ .
- $A_i$ : Es la amenaza, entendida como la probabilidad de que un suceso de intensidad mayor o igual a  $i$  se presente.
- $V_e$ : es la vulnerabilidad, entendida como la predisposición intrínseca de un elemento  $e$  a ser afectado.
- Todo esto en un periodo de exposición  $t$ .

Debido a que el riesgo no solo se presenta como la pérdida de un elemento; sino como diferentes consecuencias económicas, sociales o ambientales, y a que dentro de la vulnerabilidad se pueden considerar diversos factores de naturaleza aún más diversa, se han desarrollado diversas metodologías que abordan el tema del riesgo desde una perspectiva holística (Cardona y Hurtado, 2000) ,(Hernández et al, 2012), (Carreño et al, 2006),(Díez et al, 2008),(Román et al, 2012).

Estas metodologías conllevan a un sinfín de formulaciones matemáticas, las cuales sin embargo coinciden en la descripción de dos factores en común que son la amenaza y la vulnerabilidad.

Por lo anterior y de forma simplificada se define el análisis de riesgo como el estudio de las consecuencias adversas que implica una amenaza, tales consecuencias están en función no solo de la intensidad y frecuencia de tal amenaza sino de otro factor que determina su magnitud que es la vulnerabilidad.

De esta forma en la presente tesis se utiliza la siguiente formulación modificada de Cardona, (1985).

$$R_i |t = f (A_d, V_d)|t \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$R_i$  : es el riesgo entendido como la posibilidad de daño o efectos adversos (Stewart y Melchers, 1997), ante un suceso de intensidad  $i$ .

$A_d$ : es la amenaza explicada por uno o varios descriptores.

$V_d$ : es la vulnerabilidad explicada por uno o varios descriptores.

Con esta formulación se permite cierto grado de libertad de decisión para utilizar diferentes índices e indicadores como descriptores de una situación o escenario en particular, permitiendo elegir aquellos que se consideren de mayor importancia en casos particulares ya sea por su disponibilidad o por su grado de relevancia.

Para realizar un análisis de riesgo se deben seguir tres pasos: estimar la amenaza o peligro, evaluar la vulnerabilidad y llevar a cabo la estimación del riesgo como

resultado de relacionar los dos parámetros anteriores (Taylor et al, 1998). Esta tarea enfrenta la necesidad de afrontar cuestiones de naturaleza muy diversa y relacionarlas entre sí, por lo que la forma más conveniente de abordarla es mediante el análisis multicriterio.

## ANÁLISIS MULTICRITERIO

El análisis multicriterio es una herramienta analítica que permite tomar en cuenta variables de diversa índole, así como su importancia relativa. Este tipo de análisis además da un valor agregado al estudio que se realice, ya que de esta forma se incluyen diferentes percepciones de un mismo problema, meta fundamental al perseguir una concepción holística del riesgo.

Un ejemplo de análisis multicriterio es el uso de índices e indicadores. Esta metodología permite combinar la información asociada a los indicadores, de naturalezas y significados distintos, trasladándolos a un solo valor. Este resultado, deberá ser representativo de una situación real. (Zonensein et al, 2008) De esta forma es importante definir estos dos conceptos.

### Indicadores

Es una variable que se traduce a otra en el plano empírico; es una medida sustitutiva de información que permite calificar un concepto abstracto. Se mide en porcentajes, tasas y razones para permitir comparaciones.(Hernández et al, 2012) Dicho de otra forma es un atributo medido y comparado con otro, mediante un proceso estadístico o matemático, que represente el valor o meta perseguida, con la finalidad de obtener un valor sin unidades de medición.

Características de los indicadores.

Entre las principales características que deben cumplir los indicadores destacan las siguientes (Mondragón, 2002):

:

- Estar inscrito en un marco teórico o conceptual, que le permita asociarse firmemente con el evento al que el investigador pretende dar forma.
- Ser específicos, es decir, estar vinculados con los fenómenos sobre los que se pretende actuar
- Ser explícitos
- Estar disponibles para varios años
- Ser relevantes y oportunos
- Ser claro y de fácil comprensión
- Ser reproducible
- Ser técnicamente sólido
- Ser sensible a cambios en el fenómeno
- De preferencia ser medible a partir del acervo de datos disponible

## Índices

Es un conjunto de indicadores relacionados entre sí, que pretende representar el efecto conjunto de tales indicadores en un solo valor.

Las propiedades que caracterizan a un índice incluyen (Zonensein et al, 2008):

- Rango: definido por sus extremos máximos y mínimos, que comprenden todos los valores que el índice puede asumir.
- Formulación: la expresión matemática que representa la relación entre el conjunto de indicadores que componen el índice.
- Constitución: el conjunto de indicadores que componen el índice.
- Dominio: el ámbito espacial (i.e. local, regional, global, etc.) donde el índice es aplicable.

Para poder obtener índices e indicadores a partir de datos, como ya se mencionó, se necesita seguir un proceso matemático para unificar los datos disponibles y para asignar peso adecuado a cada una de las variables. Con esta finalidad se recurre a los procesos de normalización y ponderación.

### Proceso de normalización:

Este proceso se efectúa para unificar criterios. Con la finalidad de poder realizar operaciones matemáticas con los indicadores que componen cada uno de los índices utilizados para el análisis de riesgo. Por ser éstos de naturaleza y unidades variadas, deben ser previamente normalizados según una escala común.

Para obtener esta escala, en la presente tesis, cada uno de los datos que compone el índice se compara con un valor “esperado” con las mismas unidades, de esta forma se eliminan las unidades de medida y se unifican las variables a utilizar.

La formulación matemática utilizada para este proceso fue la siguiente:

$$I_X = \frac{VO_X}{VE_x} + C \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde

$I_X$ : es el indicador de la variable X.

$VO_x$ : es el Valor Observado de la variable X.

$VE_x$ : es el Valor Esperado para la variable X.

$C$ : es un factor de corrección utilizado para mantener los valores dentro del rango deseado.

En la presente tesis los datos esperados corresponden a los máximos observados, o un valor ligeramente superior; de esta forma el valor que adquiere cada indicador será siempre menor a 1.

En el caso de los índices que están formados por varios indicadores, se realiza además un proceso de ponderación para mantener esta unificación de criterios.

### **Proceso de ponderación:**

Este proceso se refiere a la asignación de los pesos de cada uno de los indicadores que componen los índices, éstos deben ilustrar la importancia de cada uno con respecto a los demás en la determinación de cada índice y deben cumplir con las siguientes condiciones:

El peso asignado a cada uno de los indicadores ( $p_i$ ) es debe tener un valor entre cero y uno.

$$0 \leq p_i \leq 1$$

La sumatoria de todos los pesos asignados a los indicadores debe ser igual a 1

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1$$

La recomendación general en cuanto al número total de indicadores a evaluar para cada índice es no emplear más de nueve, debido a que un número mayor puede dificultar la asignación concertada de la ponderación.

Una vez evaluadas tanto la amenaza como la vulnerabilidad y unificar ambos parámetros es posible llevar a cabo la estimación del riesgo relacionando ambos parámetros mediante la suma ponderada de los elementos que lo componen, utilizando la siguiente formula:

$$R_i \Big| t = \sum_{i=1}^n (I_i^A * p_i^A) + \sum_{i=1}^n (I_i^V * p_i^V) \Big| t \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$R_i$ : es la posibilidad de daño o efectos adversos ante un suceso de intensidad  $i$

$I_i^A$  : es el indicador de amenaza previamente normalizado

$p_i^A$ : es el peso asignado al indicador de amenaza asignado en función de su importancia relativa.

$I_i^V$  : es el indicador de vulnerabilidad previamente normalizado

$p_i^V$ : es el peso asignado al indicador de vulnerabilidad asignado en función de su importancia relativa

Tomando en cuenta que cada una de las ecuaciones anteriores se debe aplicar en un área geográfica definida, dentro de la cual las variables pueden diferir unas de otras se recurrió al uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

## SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

La tecnología del Sistema de Información Geográfica (SIG) es un sistema que por medio de computadoras y datos geográficos ayuda a un mejor entendimiento del medio en que vivimos y nos permite resolver los problemas que diariamente afrontamos. El SIG es usado para diagnosticar y evaluar el grado de amenaza y vulnerabilidad en un espacio georreferenciado.

Antes de la disponibilidad amplia de tecnología informática en los años 80 (Maskrey, 1998), los análisis de riesgos fueron realizados utilizando técnicas analógicas, como la superposición manual de mapas temáticos. Esa técnica había sido utilizada durante muchos años para producir mapas de las amenazas ambientales, sin embargo tales técnicas tienen fuertes limitaciones para el análisis de riesgos.

Con la aparición de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han desarrollado técnicas para el análisis de riesgo en cuencas urbanas basadas en análisis multi-criterio y en la ponderación de factores combinatorios de distinta naturaleza.

Un SIG puede capturar datos geográficos en diferentes formatos, tienen la ventaja de almacenar grandes volúmenes de datos en un formato digital en diferentes estructuras de bases de datos y permiten la integración de números ilimitados de capas temáticas, utilizando diferentes algoritmos para llevar a cabo operaciones espaciales.

También permiten la representación gráfica de la información geográfica en muchos formatos diferentes, permitiendo centralizar e integrar información normalmente dispersa en diferentes formatos, en diferentes organizaciones, para producir "nueva" información.

Según la Organización de los Estados Americanos (OEA), el uso de los SIG para el análisis de riesgos ofrece una serie de ventajas, puede multiplicar la

productividad, reducir costos y dar resultados de más alta calidad que técnicas manuales, asimismo, facilitar la toma de decisiones y mejorar la coordinación entre agencias. Adicionalmente, puede mejorar la amplitud y profundidad de los análisis de riesgos, orientar los procesos de desarrollo, y asistir a planificadores en la selección de medidas de mitigación y la implementación de acciones de preparativos y respuesta. El uso de un SIG puede ahorrar tiempo en la preparación de mapas y facilitar la evaluación de diferentes estrategias de desarrollo, referente a usos de tierra existentes y potenciales. Mediante la combinación de diferentes fuentes de información, un SIG puede descubrir información nueva y valiosa sobre los riesgos, que permita ayudar a los planificadores a evaluar el impacto de las amenazas. (Maskrey, 1998)

Para el desarrollo de la presente tesis se utilizó el software libre GRASS GIS

## GRASS GIS

Geographic Resources Analysis Support System (GRASS), es un sistema de información geográfica libre, que puede soportar información tanto raster como vectorial y posee herramientas de procesamiento digital de imágenes, es usado para el manejo y análisis de datos georreferenciados, procesamiento de imágenes, producción de gráficos y mapas así como modelación y visualización espacial.

Originalmente en 1982 fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Laboratorio de Investigación de Ingeniería de la Construcción del Ejército de los Estados Unidos (USA-CERL) como herramienta para la supervisión y gestión medioambiental. En 1997, ante el anuncio de USA-CERL GRASS de que dejaría de dar soporte al programa, la Universidad de Baylor se hace cargo de su desarrollo. A partir de esta fecha aumenta su aceptación dentro del mundo académico. El 26 de octubre de 1999 con la versión 5.0 se libera el código del programa bajo licencia GNU GPL. GRASS era uno de los primeros ocho proyectos de la Fundación Open Source Geospatial Foundation (OSGeo).

La versión utilizada fue win GRASS 6.4.4.

## ALGEBRA DE MAPAS

La técnica utilizada consiste en construir índices de amenaza y vulnerabilidad, mediante la combinación de diferentes capas temáticas, las cuales deben estar en un formato Raster, adecuado para poder realizar cálculos matemáticos. Cada capa representa diferentes variables y en cada una se describen las características espaciales, temporales y/o atributos asociada con la amenaza o vulnerabilidad. A

cada variable se le asigna un peso o valoración particular; asimismo, se definen diferentes algoritmos para combinar las variables en cuestión.

Esta técnica se presta para el estudio de los procesos sociales y naturales que configuran el riesgo, para determinar áreas con niveles relativos de riesgo, sobre todo a una baja resolución. Conforme se aumenta la resolución, se requiere incorporar más capas, y la combinación de ellas se vuelve más complicada.

## INUNDACIONES

El glosario internacional de hidrología (World Meteorological Organization & Unesco, 2013) define una inundación como el desbordamiento del agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua, la acumulación de agua procedente de drenajes en zonas que normalmente no se encuentran anegadas o bien, el encharcamiento controlado para riego.

Desde el punto de vista de riesgo, la última definición se puede descartar ya que se supone como un fenómeno deseado y controlado que no representa amenaza alguna.

### Clasificación

En México el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) ha realizado una clasificación para las inundaciones de acuerdo a su origen y otra de acuerdo al tiempo de respuesta de la cuenca, de esta forma los tipos de inundaciones que se pueden presentar son los siguientes:

#### De acuerdo a su origen

Dependiendo de las causas que originen la inundación éstas se clasifican en cuatro grupos que son:

- Inundaciones pluviales
- Inundaciones fluviales
- Inundaciones costeras e
- Inundaciones por falla de infraestructura hidráulica

#### Inundaciones pluviales

Este tipo de inundación es la que se produce como consecuencia de la precipitación, cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente se acumula en un determinado lugar. Su principal característica es que el agua acumulada es agua precipitada en esa zona y no agua proveniente de otro lugar.

Este tipo de inundación es causado por una serie de precipitaciones intensas o persistentes, lo cual se puede dar en dos casos. Puede producirse por una lluvia intensa durante considerablemente poco tiempo o por una lluvia persistente o moderada durante un extenso período de tiempo. El primero de estos casos es el



que posee el mayor peligro para la población y sus bienes y el que plantea los principales inconvenientes a los servicios de coordinación e intervención para prevenir y controlar sus daños, ya que hacen que el tiempo de respuesta de la población y de los servicios de emergencia sea más reducido.

### Inundaciones Fluviales

Se generan por aumento del nivel de agua debido al desbordamiento de los ríos, en este tipo de inundaciones el agua que se desborda corresponde a precipitaciones registradas en cualquier parte de la cuenca tributaria. La causa principal de los desbordamientos de los ríos es el aumento brusco del volumen de agua en un lecho o cauce, provocado por intensas precipitaciones, así como por intensos procesos de escorrentía, ya sea directamente o en zonas de la cuenca aguas arriba. Cabe señalar que el volumen que escurre sobre los cauces aumenta con el área de aportación de la cuenca; además existen otros factores que intensifican la inundación como son: Los deslizamientos del terreno, los arrastres de sólidos, la acumulación de sedimentos, los estrechamientos, los puentes, la deforestación, entre otros.

### Inundaciones costeras

Estas inundaciones pueden clasificarse en dos tipos de acciones: dinámicas y estáticas. Son acciones dinámicas del mar aquellas que son provocadas por un tsunami o maremoto. Sin embargo, este tipo de inundaciones no es muy común. Las acciones estáticas del mar no originan por sí solas las inundaciones pero contribuyen de manera directa a su generación, ya que con marea alta, por ejemplo, obstaculizan el drenaje de los ríos en sus desembocaduras y de esta manera frenan la evacuación de las aguas fluviales al mar abierto, que es su desagüe natural final.

### Inundación por falla de infraestructura hidráulica

Afortunadamente las inundaciones por insuficiencia de obras de almacenamiento y control han sido poco frecuentes, se trata de un hecho circunstancial poco probable y no necesariamente relacionado con los fenómenos meteorológicos, sino más bien con los geológicos o con la técnica. La propagación de la onda en este caso resultará tanto más dañina cuanto mayor sea el caudal, el tiempo de propagación y los elementos existentes en la zona, como asentamiento humano o infraestructura. Los diferentes factores por los cuales dichas obras pueden presentar fallas en su funcionamiento hidráulico son los siguientes:

- Diseño escaso
- Mala operación y
- Falta de mantenimiento o término de la vida útil

## De acuerdo al tiempo de respuesta de la cuenca

El tiempo de respuesta de la cuenca se entiende como el tiempo que tardan en manifestarse los efectos desde que comienza a llover hasta que se genera el escurrimiento. De acuerdo a este criterio los tipos de inundaciones son los siguientes:

- Inundaciones lentas
- Inundaciones súbitas

### Inundaciones lentas

Se presenta comúnmente en zonas donde la pendiente del cauce es pequeña en los cuales, después de la precipitación, el suelo se satura y la escorrentía generada excede la capacidad del cauce lo que provoca desbordamiento sobre sus márgenes. En las inundaciones lentas el agua desalojada puede permanecer horas o días sobre el terreno inundado.

### Inundaciones súbitas

Generalmente son el resultado de lluvias repentinas e intensas que ocurren en áreas específicas. Se caracterizan porque pequeñas corrientes se pueden transformar, en cuestión de minutos, en violentos torrentes capaces de causar grandes daños. Este tipo de inundaciones son usuales en las zonas urbanas como consecuencia de la “cubierta impermeable” formada artificialmente por los edificios y calles, así como por la deforestación.

## Proceso y formación de las inundaciones

La causa primera generadora de las inundaciones es de carácter climatológico, es decir, la intensidad y la concentración de las precipitaciones. Este y otros factores, descritos en el ciclo hidrológico, ayudan a entender el proceso natural que genera, en primer lugar, el volumen de las escorrentías y posteriormente de las avenidas causantes de las inundaciones.

El proceso por el que se producen las inundaciones urbanas puede describirse en los siguientes pasos:

- a) El entorno físico estaba en equilibrio.
- b) Se desborda el río y las zonas adyacentes se inundan, sin que esto signifique en sí, un problema.
- c) Aparecen asentamientos humanos aledaños al río.
- d) Cuando el río se desborda, los asentamientos humanos se ven afectados.
- e) Adicionalmente se produce deforestación y erosión por actividades humanas.
- f) Lo anterior agrava los problemas debidos a las inundaciones.

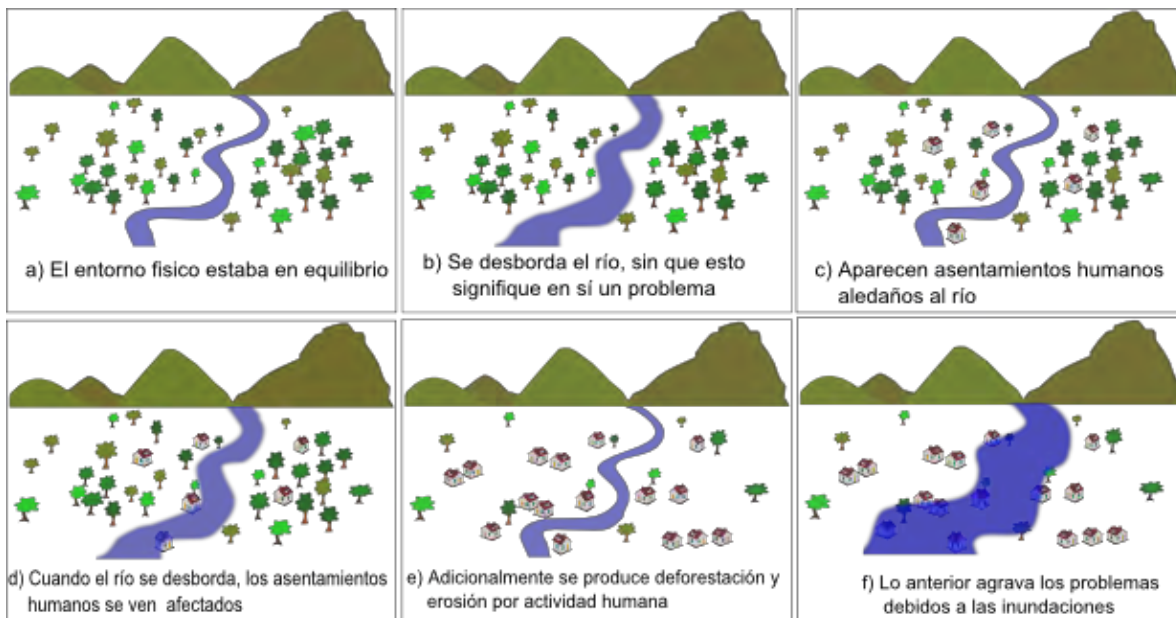


Figura 3 Proceso de formación inundaciones

El inciso a y b se refieren al equilibrio general descrito por el ciclo hidrológico, mientras que c y d describen cambios generados por la urbanización, por lo que se llega a considerar esta como un factor importante en el análisis de riesgo. Finalmente los últimos dos incisos hacen referencia a procesos continuos de cambio como un recordatorio de que el riesgo al que se está expuesto no es constante.

## CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico describe la circulación general del agua desde el océano hacia la atmósfera y de ésta al suelo y subsuelo para finalmente regresar al océano.

Entendido como un sistema, se puede definir al ciclo hidrológico como un conjunto de elementos o procesos físicos unidos a través de alguna forma de interdependencia, que actúa sobre un grupo de variables de entrada para convertirlas en las de salida, esta interdependencia se trata de explicar mediante procesos hidrológicos. (Aranda, 1987)

En la figura 2 se describe el ciclo hidrológico como un sistema donde cada una de las flechas representa un proceso, cada rectángulo una variable y cada bloque, de diferente color, un subsistema.

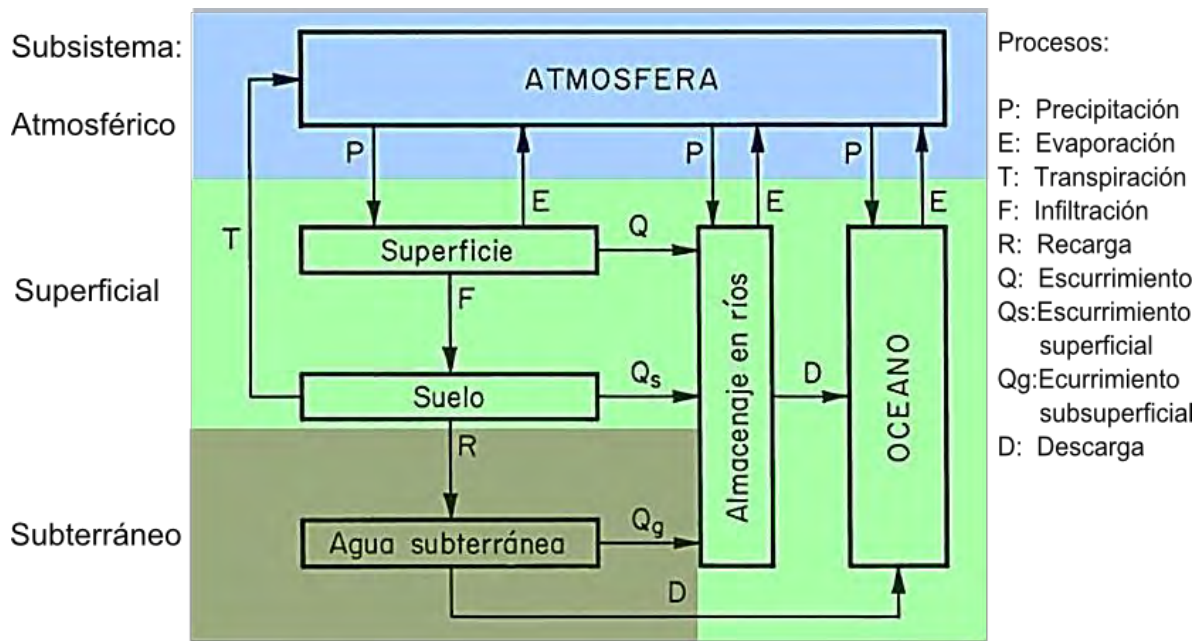


Figura 4 El ciclo hidrológico visto como un sistema

El ciclo hidrológico puede dividirse en subsistemas: en uno atmosférico, otro de agua superficial y otro de agua subterránea. En conjunto, estos subsistemas integran toda el agua que existe en el planeta (Aranda, 1987).

Al analizar inundaciones el subsistema de interés es el de agua superficial. Para este subsistema la precipitación se considera como una entrada, el agua precipitada se dispersa sobre la tierra de diferentes maneras, una parte es retenida temporalmente en el suelo al ser interceptada por las plantas o las construcciones así como al ser absorbida por el suelo para ser utilizada por las plantas, esta parte eventualmente regresa a la atmósfera por evaporación o transpiración, mientras que la otra parte fluye por la superficie del terreno para formar el escurrimiento superficial; una porción de este escurrimiento se infiltra o evapora mientras que otra llega hasta los océanos u otros cuerpos de agua.

### CUENCA HIDROLÓGICA

La cuenca es la unidad hidrológica superficial más utilizada. Consiste en una porción de territorio que se puede aislar de forma que, si esta fuese impermeable, toda el agua que escurriría por ella drenaría por un mismo punto.

Dos tipos de cuenca se pueden reconocer, endorreicas y exorreicas (Ramírez, 2012).

Las cuencas endorreicas son aquella que terminan en un lago central y cuenca exorreicas aquellas cuencas que drenan fuera de la unidad hidrológica. Es un

elemento que permite controlar las cantidades de agua para poder hacer una contabilidad de la misma (Mijares, 1993).

## PRECIPITACIÓN

El estudio de la precipitación es básico dentro de cualquier estudio hidrológico, dado que ésta constituye la principal, y en algunos casos la única, entrada de agua a la cuenca.

Para incorporar la precipitación en el análisis de riesgo, es necesario determinar la cantidad, intensidad y duración de la precipitación, sobre una base espacial y temporal. Para esto es necesario contar con registros que describa el comportamiento de la precipitación en determinada zona. Esta información puede estar disponible en forma de registros históricos, mapas de isoyetas, curvas de Intensidad – Duración - Frecuencia (IDF), o incluso algún estudio hidrológico de la zona.

La forma más habitual de incorporar la lluvia en el análisis hidrológico es mediante tormentas de proyecto definidas para determinados periodos de retorno (T) preestablecidos.

### **Medición de la precipitación.**

En la superficie del terreno las precipitaciones se pueden cuantificar ya sea con pluviómetros o pluviógrafos, la diferencia radica en que con un pluviómetro únicamente se registra la altura de la precipitación y se requiere de la intervención humana para la obtención de las lecturas, éstas generalmente miden cada 24 horas, mientras que con un pluviógrafo es posible el registro automático de la altura instantánea, por lo que es posible registrar además la evolución de la precipitación con el tiempo, permitiendo así calcular la intensidad de la lluvia en cada momento.

### Red de estaciones pluviométricas

Hace referencia a un conjunto de pluviómetros distribuidos dentro de una zona en particular, a fin de tener una medida confiable de la distribución espacial de la precipitación.

En México el organismo encargado de realizar el acopio de la información climatológica nacional es el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) además es el organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a escala nacional y local en nuestro país. El Servicio Meteorológico Nacional, depende de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la cual forma parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Los registros obtenidos a partir de estas mediciones se utilizan para reconstruir lo más fiable posible de la evolución espacial y temporal de los eventos de lluvia.

### **Variabilidad en el tiempo.**

A partir de los datos registrados en las redes de monitoreo es posible determinar el comportamiento de los eventos de lluvia temporalmente, es decir la frecuencia con la que se presenta determinado fenómeno, desde la presencia o ausencia de lluvia durante un periodo de tiempo (que puede ser desde un día hasta varios años) hasta la evaluación de eventos máximos de lluvia o de sequía, así como valores promedio en determinado lapso de tiempo.

#### Periodo de retorno

El periodo de retorno o de recurrencia (T), se refiere al lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada; es decir al intervalo en que un valor extremo alcanza o supera un valor “x” al menos una sola vez. Este periodo se considera como el inverso de la probabilidad, del m-ésimo evento de los n registros.

$$T = \frac{n + 1}{m} \qquad P = \frac{m}{n + 1}$$

Donde:

T = Período de retorno (años).

n = Número de años de registro.

m = Número de orden.

P = Probabilidad.

La necesidad de disponer de amplios períodos de retorno contrasta con la disponibilidad de series de datos climatológicos, por lo que muchas veces es necesario recurrir a estimaciones estadísticas para conocer la variabilidad temporal de un evento.

Existen varios métodos de ajuste de distribución para valores máximos, por mencionar algunos ejemplos la distribución Gumbel, la ley SQRT-ET máx, y Log Pearson. Al ajustar los datos disponibles de precipitación a estas leyes es posible determinar la probabilidad de ocurrencia de valores máximos.

### **Variabilidad en el espacio**

Los datos registrados en las estaciones meteorológicas son puntuales y en muchas ocasiones condicionados por su situación geográfica, al tener que localizarse en puntos de en los que sea fácil mantener una lectura periódica de las variables que se estén analizando.

La estimación de la precipitación areal, va desde el método simple y popular del inverso de la distancia, pasando por métodos determinísticos como interpolaciones polinomiales, hasta técnicas más complejas, basadas en interpolación estadística, como el caso de kriging.

Mediante empleo de técnicas de interpolación espacial es posible asignar valores de precipitación, o alguna otra variable, a cierta área a partir de datos puntuales.

### **Tormentas de diseño**

Una tormenta de diseño se define como un patrón de precipitación para la utilización en el diseño de un sistema hidrológico (Cruz, 2001).

Cuando se dispone de información pluviográfica, que incluye la duración de la lluvia así como la intensidad, es posible obtener una lluvia de diseño que corresponda, ya sea a una lluvia histórica registrada, a un diseño con serie temporal de lluvias o bien a una lluvia de proyecto.

Una tormenta de diseño con información de una lluvia histórica registrada se refiere a aquella que se describe con datos medidos de un evento en particular, de preferencia que esté presente en la memoria de la población. Su principal desventaja es que únicamente representa ese evento en particular, por lo que es difícil asignar un periodo de retorno a la misma.

La obtención de tormentas de diseño con una serie temporal de lluvias implica el análisis estadístico de la información histórica disponible en la o las estaciones pluviométricas, esto con la finalidad de establecer tormentas que correspondan a un periodo de retorno definido.

Una lluvia de proyecto se refiere a una tormenta que no es real; sino elaborada a partir de información ya procesada como pueden ser un patrón de intensidad de lluvia o curvas de Intensidad Duración Frecuencia. A la tormenta diseñada se le asigna un periodo de retorno o de recurrencia acorde a los datos utilizados para su elaboración.

Los métodos utilizados en la presente para la obtención de las mismas se describen a continuación.

#### **Método del hietograma triangular**

Para la construcción de un hietograma de diseño mediante este método se debe conocer tanto la lámina de precipitación de diseño como la duración de la misma.

La duración ( $t_d$ ) se considera como la base de un triángulo creado para representar esta tormenta, de aquí su nombre, mientras que la lámina de precipitación ( $P$ ) se representa por el área de dicho triángulo; de esta forma se obtiene un hietograma triangular como el mostrado en la figura 3.

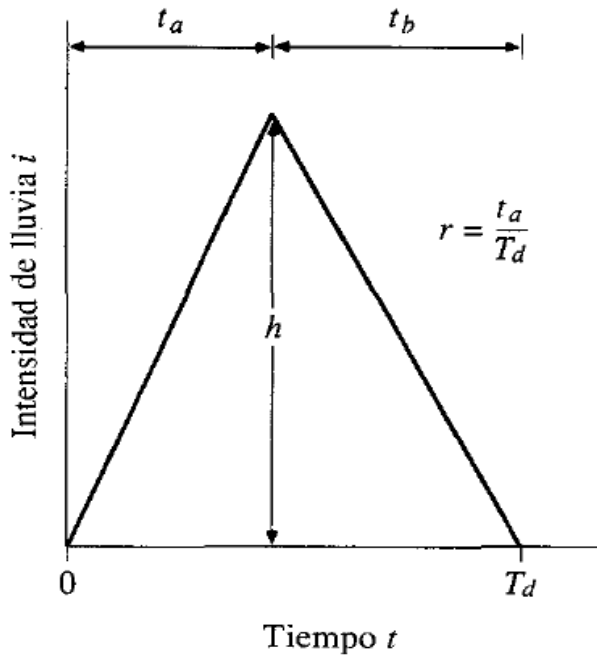


Figura 5 Hietograma triangular de diseño

Donde la longitud de la base es  $T_d$  y la altura es  $h$ ; Luego la lámina total de precipitación en el hietograma está dada por:

$$P = \frac{1}{2} T_d * h$$

De donde:

$$h = \frac{2P}{T_d}$$

Chow & Saldarriaga, (1994) definen un coeficiente de avance de tormenta como la relación del tiempo antes del pico  $t_a$  con respecto al tiempo total  $T_d$ :

$$r = \frac{t_a}{T_d}$$

Tomando estas consideraciones una vez establecidos el tiempo de duración y la lámina de precipitación; así como el coeficiente de avance de tormenta, es posible calcular la altura del triángulo.

#### Método del bloque alterno

El hietograma de diseño producido por este método especifica la profundidad de precipitación que ocurre en  $n$  intervalos de tiempo sucesivos de duración  $\Delta t$  sobre una duración total de  $T_d = n\Delta t$ . el procedimiento para obtenerlo es el siguiente:

A partir de la curva de Intensidad Duración Frecuencia correspondiente al periodo de retorno deseado se lee gráficamente el valor de la intensidad para diversos intervalos de tiempo  $\Delta t$ ,  $2\Delta t$ ,  $3\Delta t$ , etc. La profundidad de precipitación se obtiene al multiplicar la intensidad por la duración.

Tomando diferencias entre valores sucesivos de precipitación se encuentra la cantidad de precipitación que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo.

Estos incrementos o bloques se reordenan en una secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida  $T_d$  y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para así obtener el hietograma de diseño.



## MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA AMENAZA

Para la estimación de una inundación, que en la presente es considerada como la amenaza se dispone de variadísimos métodos de cálculo, mismos que pueden ser agrupados en términos generales como sigue:

- Métodos Empíricos
- Métodos Históricos.
- Métodos de Correlación Hidrológica de Cuencas
- Métodos Estadísticos o Probabilísticos.
- Métodos Hidrológicos

Los métodos empíricos tienen la desventaja de utilizar datos derivados de la observación empírica de la respuesta de alguna cuenca o cuencas en particular, el inconveniente principal que presentan los resultados obtenidos de la aplicación de las Fórmulas Empíricas, deriva del hecho de que éstas se están utilizando en cuencas distintas a aquellas en las que fueron deducidas, por lo que sus coeficientes deberían ser ajustados, lo cual resulta sumamente difícil.

Los métodos históricos consisten en la investigación y recopilación de datos sobre las inundaciones ocurridas en el área de interés. En realidad, los métodos históricos aunque permitan conocer la magnitud de alguna inundación que se presentó en algún año anterior, no permiten prever la proporción de una inundación mayor a la máxima conocida, lo cual es muy probable que se presente.

Por otra parte, los métodos históricos están altamente limitados por la carencia o insuficiencia de datos (registros históricos).

Los métodos de correlación hidrológica de cuencas se emplean cuando en una cuenca bajo estudio no se cuenta con datos directos de inundaciones ni con datos hidrométricos y pluviométricos, en este caso la estimación de la avenida máxima, que producirá la inundación, puede calcularse mediante correlación con los datos de gastos máximos de una cuenca próxima, cuyas características climáticas (régimen de precipitaciones, vientos, etc.), topográficas (magnitud, pendiente, altitud, orientación y forma de la cuenca), geológicas (zonas permeables, impermeables, rocas, etc.), edafológicas (tipos de suelos, espesores, etc.) y de cobertura vegetal, sean lo más similares posible con la cuenca en estudio y que en la cuenca vecina su registro hidrométrico sea amplio.

El principal inconveniente es encontrar esa analogía entre una cuenca y otra.

Los métodos estadísticos o probabilísticos consisten en estimar la magnitud de la avenida máxima a partir de un registro de gastos máximos anuales instantáneos conocidos, por su extrapolación mediante la estimación de su distribución de probabilidades a diversos períodos de retorno.

El principal inconveniente de estos métodos es que requieren contar con la información hidrométrica de avenidas máximas anuales. Sin embargo, en aquellos casos en que se disponga de una serie amplia y de garantía (mínimo 8 años), los métodos Estadísticos permiten obtener unos resultados seguros y aceptables.

Los métodos hidrológicos son utilizados cuando se cuenta con poca o ninguna información de mediciones directas que permitan conocer la historia de los escurrimientos en el sitio de interés, por lo que se debe recurrir a estimarlos a partir de los datos de precipitación, además, cuando la cuenca ha estado o estará sujeta a cambios de importancia (por ejemplo, por la construcción de obras de almacenamiento, urbanización y deforestación en partes de la cuenca, etc.), estos cambios modifican el régimen del escurrimiento, su registro histórico no representa correctamente el comportamiento futuro de la corriente.

La relación entre la precipitación y el escurrimiento es compleja; depende en parte de las características de la cuenca y en parte de la distribución de la lluvia en la cuenca y en el tiempo.

Debido a lo complejo del fenómeno y a que la cantidad y calidad de la información disponible varía de un problema a otro, se ha desarrollado una gran cantidad de métodos para relacionar la lluvia con el escurrimiento. Dichos métodos van desde simples fórmulas empíricas, hasta modelos extremadamente detallados basados en principios de la física.

En la presente se recurre a la aplicación de un modelo hidráulico hidrológico.

## MODELACIÓN HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA

Un modelo es una representación del medio ambiente utilizado para simular las condiciones ambientales y su respuesta ante estímulos o impactos determinados. Una vez que el modelo ha sido seleccionado o construido pueden ser evaluados los efectos de la acción propuesta y sus alternativas (Castro y Carrasco, 2011).

Simular el comportamiento de una cuenca con ayuda de un modelo matemático permite obtener información imprescindible para realizar el análisis de la amenaza por inundación, ya que los modelos facilitan la manipulación de las variables que intervienen en el proceso de conversión lluvia – caudal, aportando datos sobre la distribución espacial de la esorrentía superficial y mejorando la calidad de la cartografía de zonas con riesgo de inundación.

Por la gran variedad de modelos existentes para el cálculo de precipitación - escurrimiento, conviene agruparlos en diferentes categorías con el objeto de escoger el más adecuado para un caso particular.

Los modelos existentes se pueden dividir en tres grandes grupos (Ponce, 1989):

Modelos que requieren únicamente las principales características físicas promedio de la cuenca en estudio. A este grupo se le conoce como “Modelos Empíricos de la Relación Lluvia-escurrimiento”, los que han sido obtenidos relacionando mediciones simultáneas de lluvia y de escurrimiento con las características de las cuencas.

Modelos para los que es necesario contar con registros simultáneos de precipitación y escurrimiento. A este grupo se le conoce como “Modelos Hidrológicos” o de caja negra, los cuales se calibran a partir de los datos de ingreso y salida de la cuenca sin tomar en cuenta explícitamente sus características físicas.

Modelos para los que se debe disponer de las características físicas detalladas de la cuenca; así como los registros simultáneos de precipitación y escurrimiento. A este grupo pertenecen los modelos que a partir de la información detallada de las características físicas de la cuenca y de la aplicación de las fórmulas fundamentales de la hidráulica, pretenden simular el proceso de escurrimiento en toda la cuenca.

### SWMM 5.0

El *Storm Water Management Model* (modelo de gestión de aguas pluviales) fue desarrollado por la Agencia de Protección del Medioambiente (EPA) de los Estados Unidos, siendo éste un modelo dinámico de simulación de precipitaciones que posee la capacidad de calcular el impacto de la esorrentía y evaluar la eficacia de las estrategias de mitigación propuestas para garantizar la conservación de las fuentes de agua.

Es un modelo numérico que permite simular el comportamiento hidrológico, hidráulico y de calidad de un sistema de drenaje urbano, se desarrolló en 1971, funciona bajo sistema Windows proporcionando un entorno que permite el ingreso de datos de “entrada” para el área de drenaje, además de simular el comportamiento hidráulico permite estimar la calidad del agua y observar todos los resultados en gran variedad de formatos, incluyendo mapas de contorno o isolíneas para el área de drenaje, gráficos y tablas de evolución a lo largo del tiempo, diagramas de perfil y análisis estadísticos de frecuencia.

El “Modelo de Gestión de Aguas Pluviales” EPA SWMM 5.0, es dinámico en la simulación de precipitaciones que se puede emplear para un único evento o para efectuar una simulación continua en periodo extendido. El modelo permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada básicamente a través de alcantarillados urbanos.

SWMM 5.0 considera el sistema de drenaje como un conjunto de elementos y flujos dentro de módulos o capas. Cada una de estas capas representa diversos procesos hidrológicos o hidráulicos como son la precipitación, la generación de esorrentía superficial o el flujo de aguas pluviales en la red.

La capa inicial es la capa atmosférica que representa la precipitación que cae sobre la cuenca, en SWMM se considera mediante el objeto Rain gage.

La capa de terreno representa la cuenca que recibe la precipitación proveniente de la capa atmosférica en ésta se llevan a cabo procesos como las pérdidas de

precipitación y la generación de escorrentía superficial, éstos se consideran a través de las objetos subcatchments.

Finalmente la capa de transporte es la que recibe la escorrentía superficial de la capa de terreno, analiza el recorrido del agua, generada por la escorrentía, mediante un sistema compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, bombas y elementos reguladores. Esta capa es modelada a través de objetos tipo nodes (nodos o pozos) y links (conductos) que representan a los elementos propios de una red de drenaje.

## METODOLOGÍA

Para realizar el análisis de riesgo, en la presente se recurrió al análisis multicriterio utilizando índices e indicadores que describen la situación de amenaza y de vulnerabilidad, los datos utilizados y la metodología que se siguió fue la siguiente:

### Recopilación de la información

En esta etapa se compilaron los datos necesarios para llevar a cabo tanto el análisis de la vulnerabilidad como de la amenaza por inundación, dentro del área de estudio. La información recabada se encontró disponible en diferentes formatos, por lo que fue necesario, en algunos casos, procesarla para su manejo en la plataforma GRASS SIG, los datos iniciales corresponden a los descritos en generalidades dentro de los datos de partida y corresponden a datos necesarios para el cálculo de indicadores que describan la situación de amenaza y vulnerabilidad en la zona de estudio.

### Obtención de los indicadores

Primeramente se dividieron en indicadores de amenaza e indicadores de vulnerabilidad.

Dentro de los indicadores de amenaza se consideraron:

- Indicador de repuesta hidráulica
- Indicador de respuesta hidrológica
- Indicador de prevalencia
- Indicador de pendiente
- Indicador de elevación

Mientras que como indicadores de la vulnerabilidad se consideraron:

- Indicador de exposición de población
- Indicador de exposición de viviendas
- Índice de rezago social

La información de partida fue procesada para generar los indicadores antes mencionados, procurando que éstos presentaran las siguientes características:

## Rango

Se determinó que el valor que adquieran los índices e indicadores sea adimensional y sus valores estarán entre 0.01 y 1, el mínimo y el máximo riesgo, respectivamente. La escala inicia en un valor muy cercano a cero (0.01) debido a que sí el valor del límite inferior fuese cero (0) se asumiría que no existe riesgo y esto no es real, debido a que siempre existirá un nivel de riesgo por pequeño que éste sea. Cabe mencionar que, para poder realizar operaciones matemáticas entre los diferentes indicadores, los cuales son de naturaleza y unidades variadas, éstos debieron ser previamente normalizados según una escala común. En la presente todos los indicadores fueron ajustados a la misma escala, que asume valores entre 0.1 y 10.

## Constitución

Cada uno de los índices obtenidos en la presente se compone por diferentes indicadores tomando como condición que cada indicador provenga de datos o información confiable y referente a la situación de amenaza o vulnerabilidad, según corresponda, en la zona de estudio.

## Formulación

La relación que se estableció entre los indicadores para obtener los índices de amenaza y vulnerabilidad corresponde a cada una de las partes de la ecuación 5 y para cada índice adquiere la siguiente forma:

$$\hat{I}_x = \sum_{i=1}^n (I_i^x * p_i^x) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$\hat{I}_x$ : Es el índice, ya sea de amenaza o de vulnerabilidad.

$I_i^x$ : es el indicador de amenaza o vulnerabilidad previamente normalizado.

$p_i^x$ : es el peso asignado a cada indicador, asignado en función de su importancia relativa.

En cuanto a la normalización de los indicadores ésta se realizó mediante la ecuación 4 descrita anteriormente:

$$I_x = \frac{VO_x}{VE_x} + C \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$I_x$ : es el indicador de la variable X.

$VO_x$ : es el Valor Observado de la variable X.

$VE_x$ : es el Valor Esperado para la variable X.

$C$ : es un factor de corrección utilizado para mantener los valores dentro del rango deseado.

En lo referente a la ponderación, la asignación de los pesos para los indicadores, se determinó de forma que la suma de todos los indicadores que conforman cada índice fuera de 1 (o del 100%), asignando un valor a cada indicador, de forma que represente la importancia de éste con respecto a los demás.

En el caso de los índices se asignó un peso igual a cada uno de ellos 50% a la amenaza y 50% a la vulnerabilidad.

## Dominio

El análisis realizado en la presente fue en un ámbito local, abarca la Zona Metropolitana de San Luis Potosí y los resultados se presentan a una resolución de celdas de 15m x 15m.

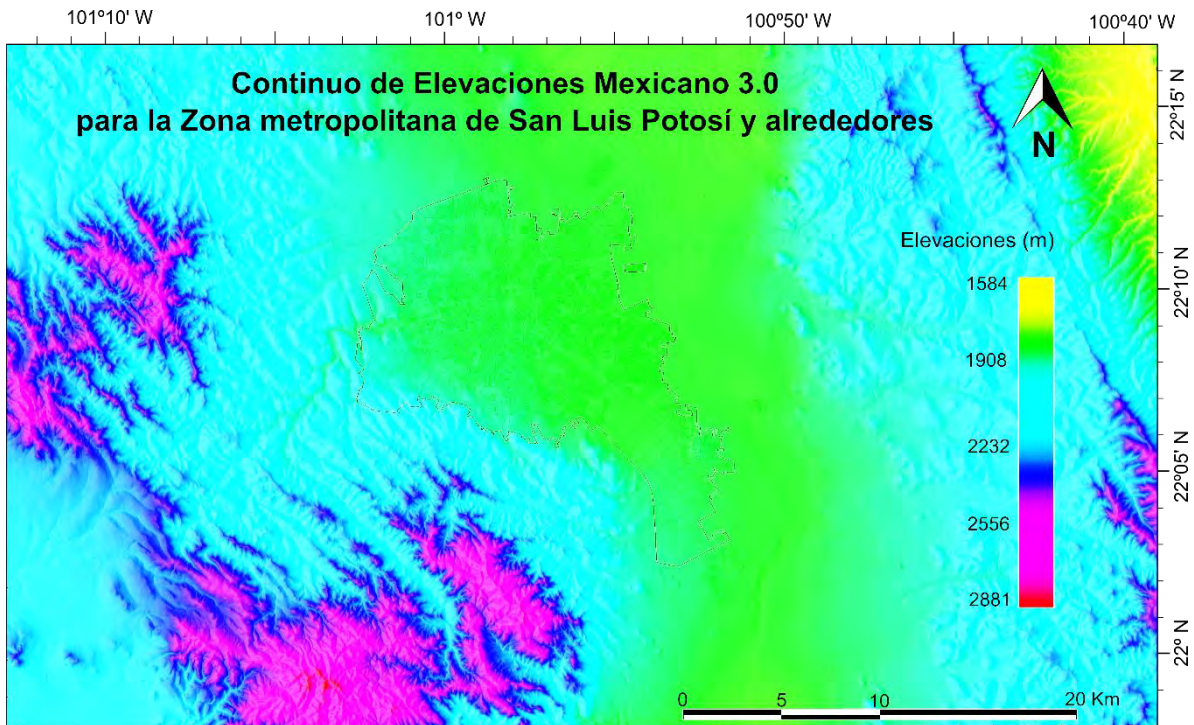
## INDICADORES DE AMENAZA

### **Indicador de respuesta hidrológica**

Para determinar este indicador se realizó una simulación utilizando el modelo de gestión de aguas pluviales EPA SWMM versión 5.0, este parámetro es el que mayor trabajo requirió ya que abarca desde la caracterización del área de influencia, la determinación de las lluvias de diseño que servirán como datos de entrada, para los diferentes escenarios, así como el análisis de la respuesta obtenida.

### Límites del área de influencia

Partiendo del Continuo de Elevaciones Mexicano, se analizó inicialmente un área correspondiente a la totalidad de la mancha urbana procurando además incluir el área de las sierras de Álvarez y San Miguelito; resultando en una región delimitada por las siguientes coordenadas: Al norte 22° 17', al sur: 21° 58', al este: -100° 39' y al oeste -101° 13'.



*Figura 6 Continuo de Elevaciones Mexicano zona de estudio*

Dentro de esta región se estableció el área de influencia, para este fin se utilizaron las herramientas de modelación hidrológica y análisis de cuenca en GRASS, específicamente mediante el comando `r.watershed` se generó un mapa que delimita las cuencas naturales dentro de la región antes mencionada, con lo cual se concretaron seis cuencas que tienen influencia directa sobre el área urbana.

Una vez definida el área de influencia, se realizó la representación de la misma dentro del modelo de gestión de aguas pluviales EPA SWMM 5.0.

Como se mencionó anteriormente SWMM considera el sistema de drenaje como un conjunto de elementos y flujos dentro de módulos o capas. Cada uno de estos módulos requiere de ciertos datos necesarios para el funcionamiento básico del modelo.

### Módulo atmosférico

Tormentas de diseño:

Conforman los datos de entrada para este módulo. Debido a los escasos registros de duración e intensidad de precipitaciones en la zona de estudio se establecieron tormentas de diseño de diferente intensidad, tomando en cuenta los datos disponibles.

## Baja intensidad

Para obtener ésta se utilizaron datos de la Red de Estaciones Climatológicas proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional y la Comisión Nacional del Agua, correspondientes a estadística descriptiva de cada estación.

Las estaciones analizadas fueron las 17 descritas en generalidades dentro de los datos de partida.

El valor utilizado para determinar estas tormentas fue el de precipitación media, pero este fue re calculado para considerar únicamente los valores de días con lluvia.

Para determinar la precipitación media se tomaron en cuenta los valores reportados en estadísticas, de lluvia promedio en cada estación, pero estos fueron recalculados, ya que este valor representa el valor promedio considerando todos los días registrados, con datos, incluyendo aquellos en los que no se presenta lluvia.

La precipitación media fue re calculada con la finalidad de obtener un valor de lluvia promedio considerando únicamente los días en los que se presentan lluvias. Para obtenerlo se utilizó el valor reportado de lluvia promedio, éste se multiplicó por el número de datos registrados para obtener un valor de lluvia acumulada; una vez obtenido el acumulado se calculó un nuevo valor promedio tomando en cuenta únicamente aquellos días en los que sí se registró lluvia; así el valor acumulado se dividió entre el número de días con lluvia para, de esta forma, obtener un valor de lluvia promedio considerando únicamente los días que sí presentaron lluvia.

Ejemplo:

Para la estación 24024 “El Peaje” se reporta una precipitación media de 1.1 mm, con una cuenta de 16,715 días con datos medidos en un periodo de 1964 a 2011, utilizando esta información se calculó el valor de lluvia acumulada resultando en 18,386.5 mm acumulados.

$$1.1\text{mm} \times 16,715 = 18,386.5\text{mm}$$

También se reportan 15,554 días sin lluvia, para el mismo periodo, este valor se resta a la cuenta total para obtener los días con lluvia resultando en 1,161 días con lluvia.

$$16,715 \text{ días} - 15,554 \text{ días} = 1,161 \text{ días}$$

Este dato se utiliza para calcular el nuevo valor de la precipitación media, considerando ahora solo los días con lluvia. Se dividió la lluvia acumulada entre los días con lluvia resultando para esta estación de 15.8 mm

$$18,386.5 \text{ mm} / 1,161 \text{ días} = 15.8 \text{ mm} / \text{ día}$$



Los resultados de precipitación media para cada estación se presentan en la siguiente tabla:

ID	Nombre	Media	Cuenta	Lluvia acumulada	Sin lluvia	Con lluvia	Nuevo promedio
24004	Armadillo	1.6	17546	28073.6	15921	1625	<b>17.3</b>
24024	El peaje	1.1	16715	18386.5	15554	1161	<b>15.8</b>
24034	La salitrera	1.7	12548	21331.6	11467	1081	<b>19.7</b>
24042	Mexquitic	1.1	22335	24568.5	20902	1433	<b>17.1</b>
24046	Ojo caliente	1	14054	14054	13221	833	<b>16.9</b>
24061	La concordia	0.9	16180	14562	15318	862	<b>16.9</b>
24069	Los filtros	1.1	21667	23833.7	20350	1317	<b>18.1</b>
24070	Golondrinas	1.6	7985	12776	7254	731	<b>17.5</b>
24078	Santiago	1.1	15617	17178.7	14531	1086	<b>15.8</b>
24081	Soledad Diez Gtz.	0.9	20211	18189.9	19072	1139	<b>16.0</b>
24101	Villa de reyes	1	16159	16159	15347	812	<b>19.9</b>
24106	Zaragoza	0.9	17390	15651	16408	982	<b>15.9</b>
24111	SLP	1	11613	11613	10960	653	<b>17.8</b>
24153	Col. Juárez	1	5654	5654	5339	315	<b>17.9</b>
24163	Bledos	1	10856	10856	10176	680	<b>16.0</b>
24179	Xoconoxtle	1	10703	10703	10002	701	<b>15.3</b>
24197	El terrero	0.9	8417	7575.3	7960	457	<b>16.6</b>

*Tabla 10 Precipitación promedio para cada estación*

Una vez obtenidos los valores de precipitación media para cada estación, éstos fueron integrados en un archivo tipo shape para su manejo en GRASS.

A continuación se realizó interpolación por el método de ponderación por distancia (IDW: Inverse Distance Weighting); de esta forma se obtuvo un mapa tipo raster, con información de precipitación promedio que abarca la totalidad del área de influencia.

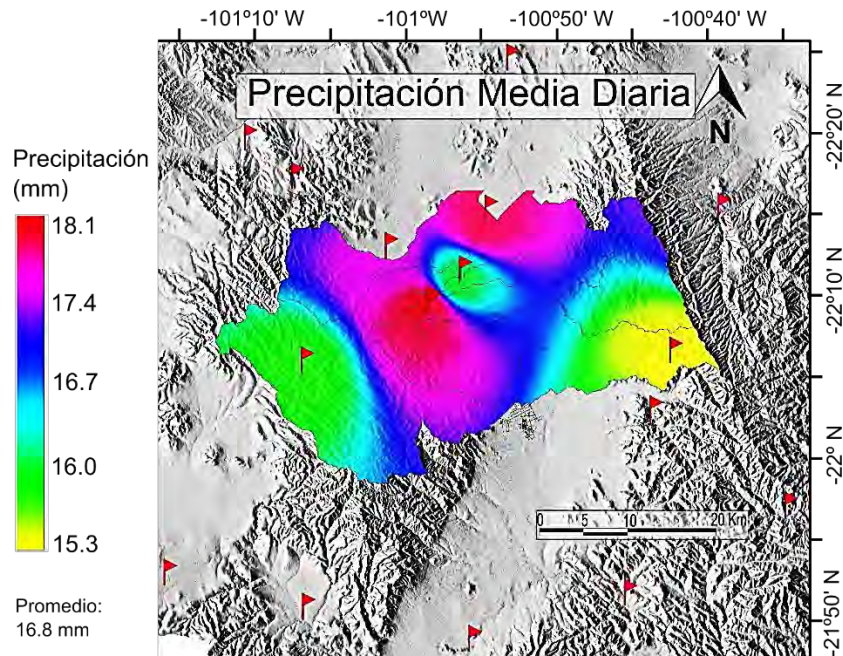
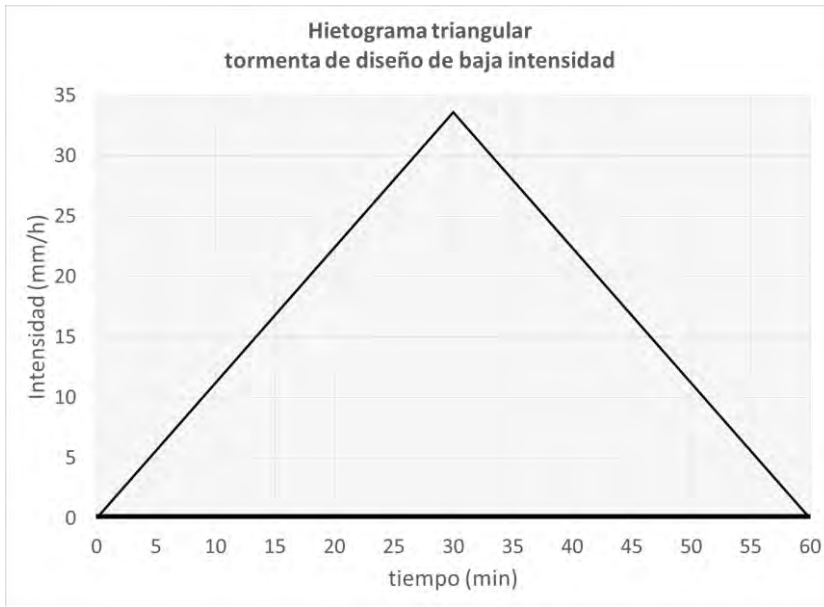


Figura 7 Interpolación de la precipitación media calculada

Haciendo uso de las herramientas estadísticas de GRASS se determinó un solo valor promedio, el cuál sirve como base para aplicar el método del hietograma triangular, asumiendo una duración de 60min.

Para construir el hietograma, se consideró como altura de la precipitación (P) 16.8mm y tiempo de duración ( $T_d$ ) de 60 minutos, el coeficiente de avance de tormenta (r) se estableció con un valor de 0.5 con estos datos se aplicaron las formulas del método del hietograma triangular.

Con lo que se calcularon las alturas de los hietogramas, que corresponde a la intensidad máxima de la tormenta, dando como resultado en este caso 33.6 mm/h.

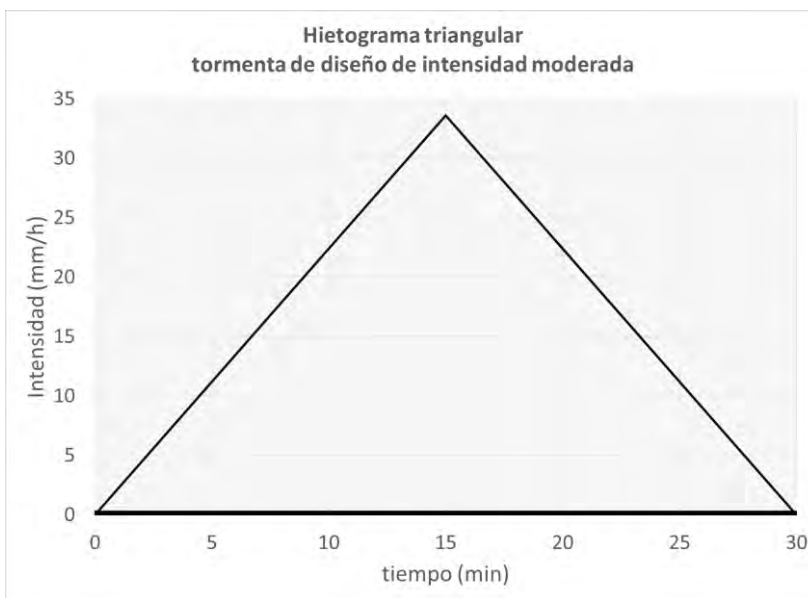


Posteriormente se calculó la altura de la precipitación por intervalos de 5 min, calculando el área correspondiente a cada intervalo, para de esta manera obtener el hietograma en el formato necesario para el funcionamiento del modelo.

*Figura 8 Hietograma triangular de baja intensidad*

### Intensidad moderada

Para obtener ésta, se utilizaron los mismos datos del caso anterior, con la única diferencia que el tiempo de duración se redujo a media hora.



Nuevamente se aplicó el método del hietograma triangular, considerando de nuevo 16.8mm como altura de la precipitación (P), coeficiente de avance de tormenta (r) de 0.5 y reduciendo el tiempo de duración (Td) a 30 minutos.

*Figura 9 Hietograma triangular de intensidad moderada*

A continuación se calculó la altura de la precipitación por intervalos de 5 min, calculando el área correspondiente a cada intervalo, para de esta manera obtener el hietograma en el formato necesario para el funcionamiento del modelo.

#### Intensidad media

Para establecer las tormentas de diseño se utilizaron los valores de Precipitación Máxima Anual promedio ( $\overline{PMA}$ ) de cada estación, en este caso se utilizaron los datos de precipitación máxima anual, considerando el periodo de 1991 a 2010.

Ejemplo:

Para la estación 24024 "El Peaje" se reportan los siguientes valores de lluvia máxima anual:

Año	Lluvia máxima anual (mm)
1991	51.5
1992	35
1993	86.5
1994	40
1995	60
1996	37.5
1997	44.5
1998	35
1999	48.5
2000	30.5
2001	36
2002	34.5
2003	30.8
2004	38
2005	35.3
2006	44
2007	47.8
2008	46
2009	40
2010	60

*Tabla 11 Precipitaciones máximas anuales de la estación "El Peaje"*

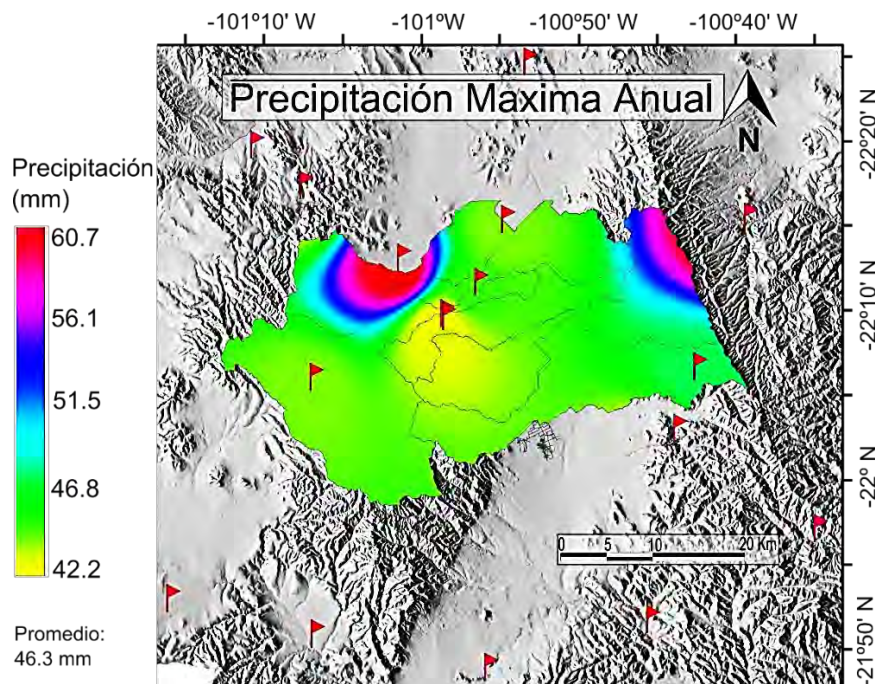
El valor promedio de las Precipitaciones Máximas Anuales se calcula dividiendo la suma de todos los valores entre el número de datos, obteniendo como resultado en este caso una  $\overline{PMA}$  de 44.1 mm.

Los valores obtenidos para cada estación se enlistan en la siguiente tabla:

ID	Nombre	$\overline{PMA}$ (mm)
24004	Armadillo	61.3
24024	El peaje	44.1
24034	La salitrera	69.7
24042	Mexquitic	43.3
24046	Ojo caliente	41.4
24061	La concordia	42.4
24069	Los filtros	42.2
24070	Golondrinas	60.7
24078	Santiago	51.3
24081	Soledad Diez Gutiérrez	44.8
24101	Villa de reyes	47.0
24106	Zaragoza	42.1
24111	SLP	43.2
24153	Col. Juárez	44.1
24163	Bledos	39.7
24179	Xoconoxtle	47.3
24197	El terrero	36.5

*Tabla 12 PMA promedio para cada estación*

Una vez obtenidos los valores de  $\overline{PMA}$ , éstos fueron integrados en un archivo tipo shape, junto con la localización de cada estación, para su manejo en GRASS y se realizó interpolación por el método de ponderación por distancia para obtener mapas tipo raster, con información de  $\overline{PMA}$  en el área de influencia.



*Figura 10 Interpolación de la PMA promedio*

Posteriormente mediante las herramientas estadísticas de GRASS se obtuvo el valor promedio, que representa el valor de cantidad de lluvia en toda el área de influencia y en base a éste se determinó el hietograma correspondiente aplicando el método del hietograma triangular y asumiendo una duración de una hora para la tormenta de diseño de intensidad alta.

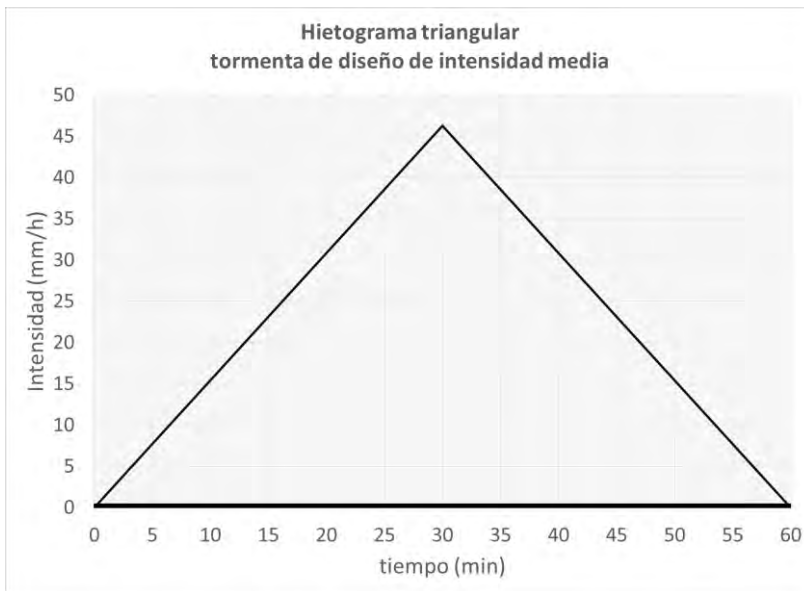


Figura 11 Hietograma triangular intensidad media

Para determinar el siguiente hietograma se consideró como altura de la precipitación ( $P$ ) 46.3mm y como tiempo de duración ( $T_d$ ) una hora, el coeficiente de avance de tormenta ( $r$ ) de 0.5.

Con estos datos se aplicaron las formulas del método del hietograma triangular antes mencionadas y de estableció el hietograma de diseño correspondiente.

### Intensidad alta

Para obtener se auxilió de las curvas isoyetas de intensidad - duración – periodo de retorno de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para el estado de San Luis Potosí. Utilizando éstas se elaboraron hietogramas de diseño, mediante el método del bloque alterno para un periodo de retorno de 10 años. La metodología que se siguió fue la siguiente:

Digitalización de las curvas isoyetas: debido a que estas se encuentran disponibles en formato PDF, el primer paso fue la digitalización de las mismas, para lograr su uso en el SIG. Para cada periodo de retorno se digitalizaron cinco imágenes, correspondientes a duraciones de 5, 10, 20, 30 y 60 minutos de duración. Obteniendo de esta forma archivos tipo shape con datos puntuales de precipitación para cada periodo de retorno y duración.



## Interpolación

Una vez digitalizados se realizó una interpolación por el método IDW; de esta forma se obtuvieron archivos tipo raster, con información de intensidad de lluvia, para cada duración, los cuales abarcan la totalidad del área de influencia.

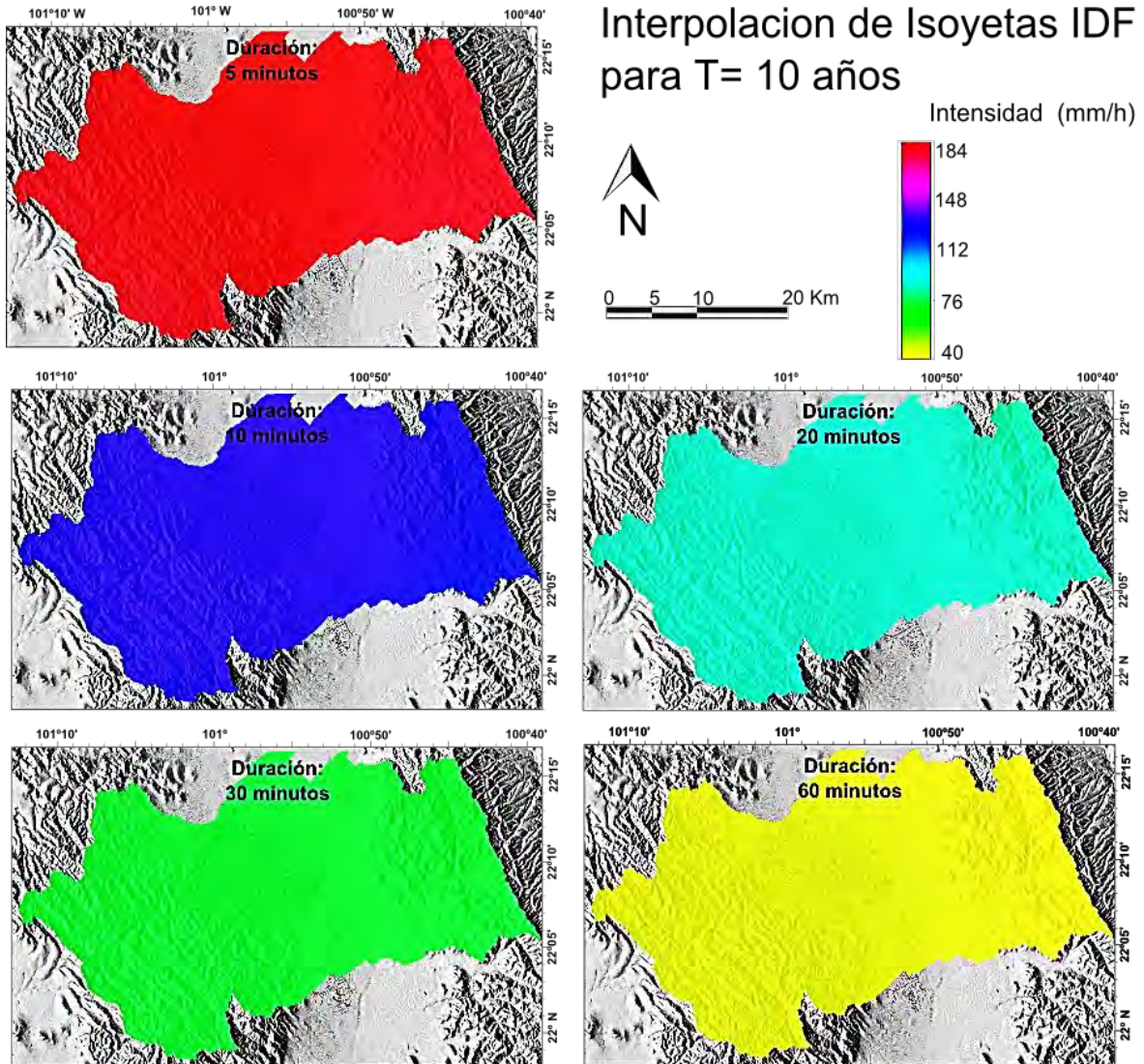
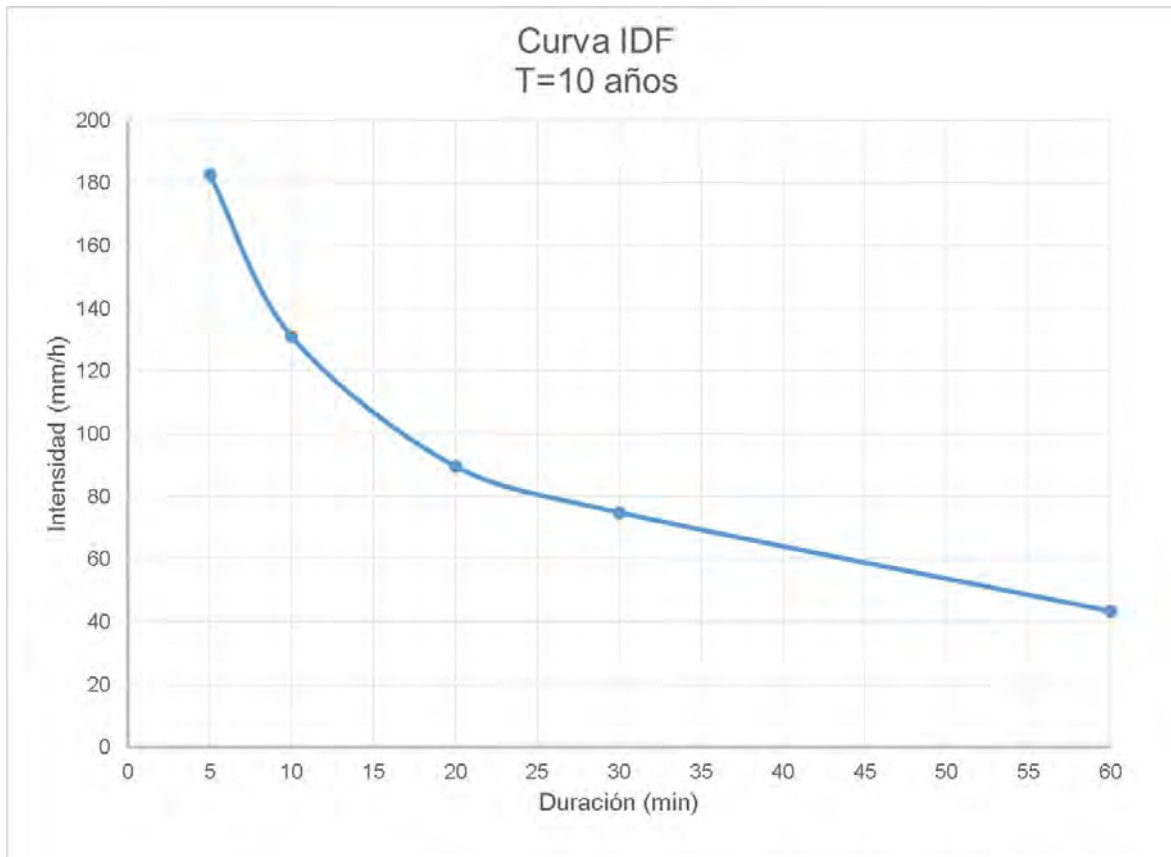


Figura 12 Interpolación de isoyetas IDF de periodo de retorno de 10 años

A partir de éstos y mediante las herramientas estadísticas de GRASS se obtuvo un valor de precipitación promedio, que representa el valor de intensidad de lluvia en toda el área de influencia, para cada duración. Una vez obtenido el valor representativo para la zona de influencia, para cada duración, se graficaron éstos para construir así la curva de Intensidad Duración Frecuencia (IDF), la cual sirve de base para obtener la lluvia de diseño aplicando el método del bloque alterno.



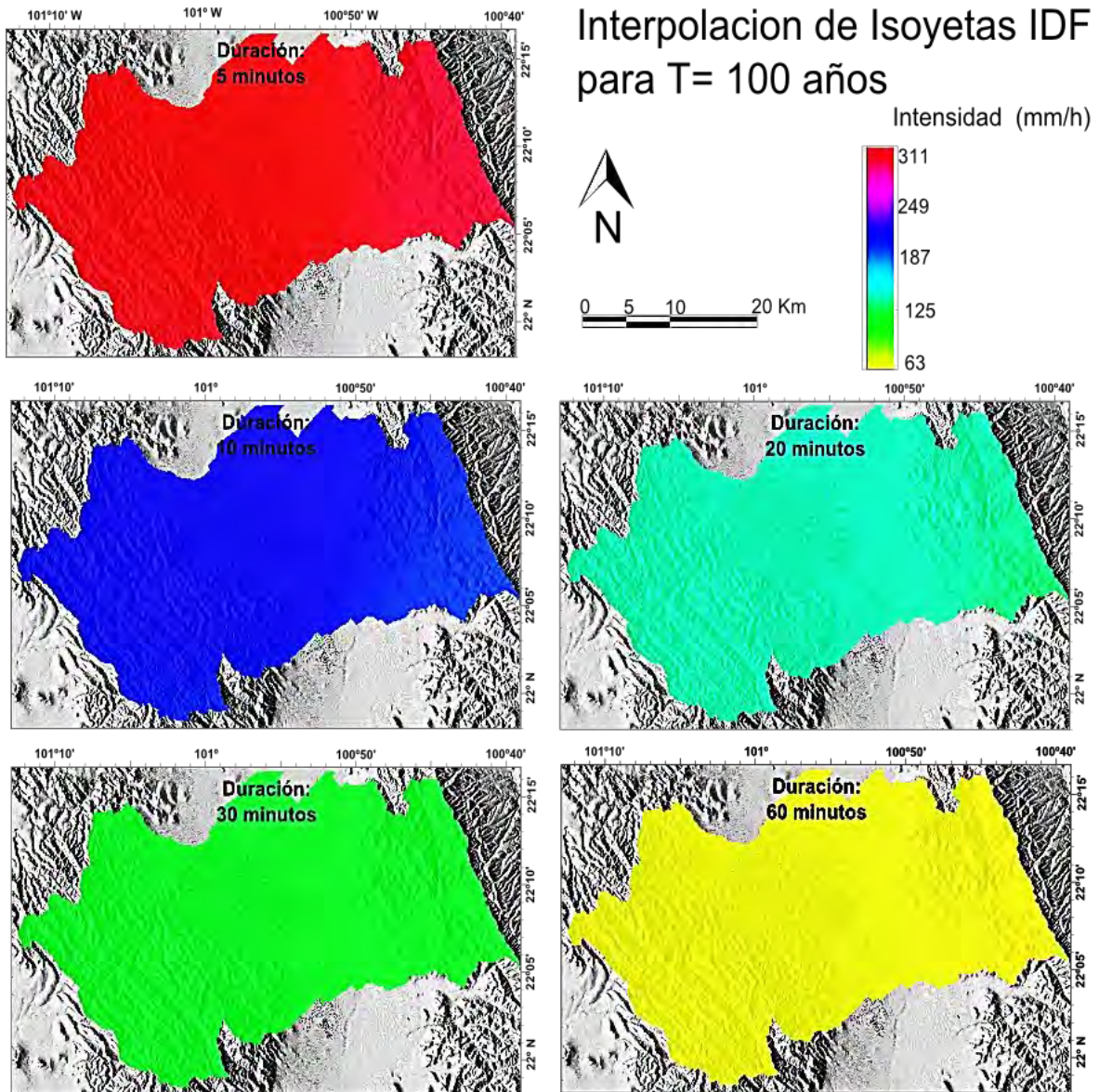
*Figura 13 Curva IDF para periodo de retorno de 10 años*

Finalmente los datos necesarios para el funcionamiento del modelo son los hietogramas de diseño generados mediante el método del bloque alterno.

Intensidad muy alta

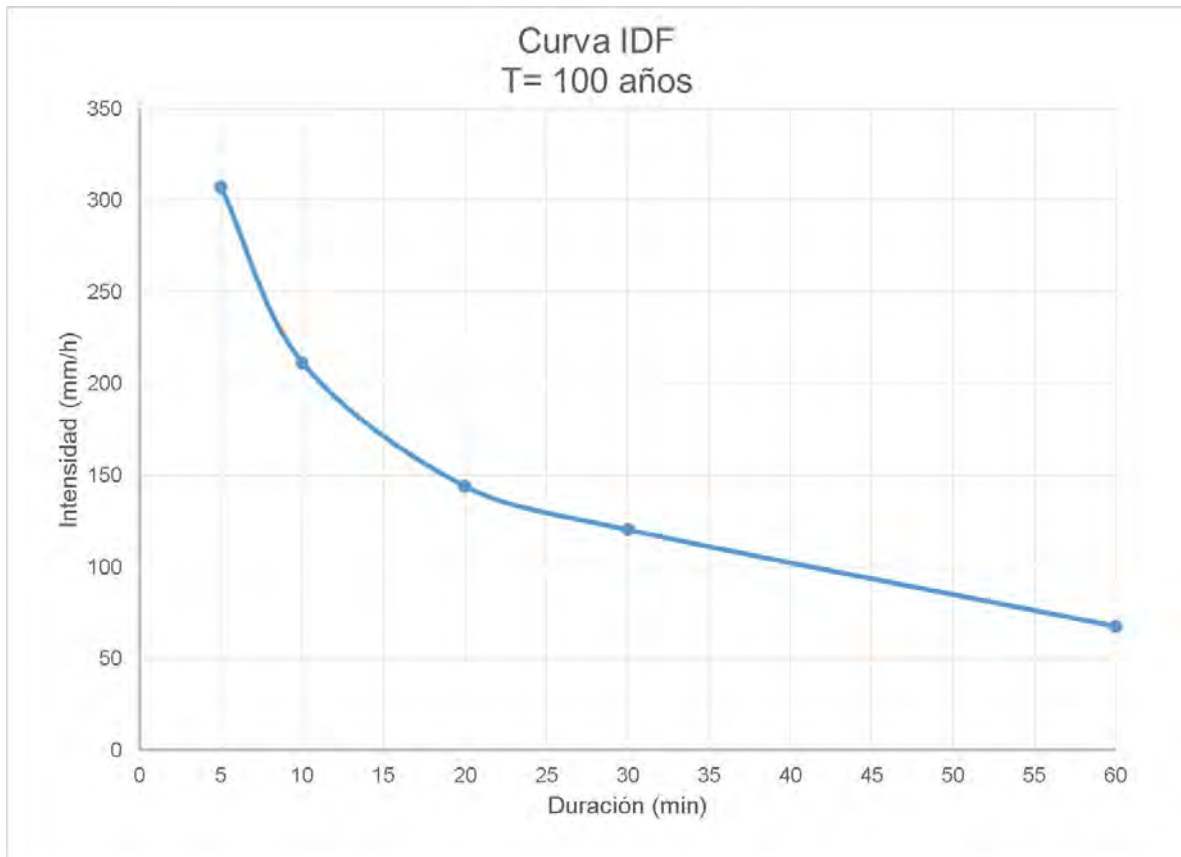
Nuevamente se partió de las curvas isoyetas de intensidad - duración – periodo de retorno de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para el estado de San Luis Potosí, seguido de su digitalización e interpolación.





*Figura 14 Interpolación isoyetas IDF de periodo de retorno de 100 años*

Posteriormente se obtuvo el valor de intensidad promedio para cada duración y éstos se usaron para construir la curva de IDF de 100 años de periodo de retorno, la cual sirve de base para obtener la tormenta de diseño aplicando el método del bloque alterno.



*Figura 15 Curva IDF para periodo de retorno de 100 años*

Aplicando el método del bloque alterno a partir de las curvas IDF de 100 años de periodo de retorno se obtiene el histograma de diseño correspondiente a una tormenta con probabilidad muy baja de ocurrencia.

#### Modulo del terreno

Se refiere a las subcuencas en sí y a las características de cada una, como son número de curva, pendiente, área y ancho de las mismas. En este caso las seis cuencas inicialmente definidas como área de influencia fueron discretizadas en otras de menor tamaño, considerando que las subcuencas discretizadas tuvieran valores de pendiente y número de curva similares.

#### Área y ancho

Las características de forma como área y ancho de cada subcuenca se calcularon automáticamente al trazar de forma manual cada una dentro de SWMM manteniendo activada la opción de auto – length.

#### Numero de curva:

Para determinar este parámetro se siguió una metodología adaptada de la propuesta por Ferrer et al 1995, donde a cada una de las variables que interviene

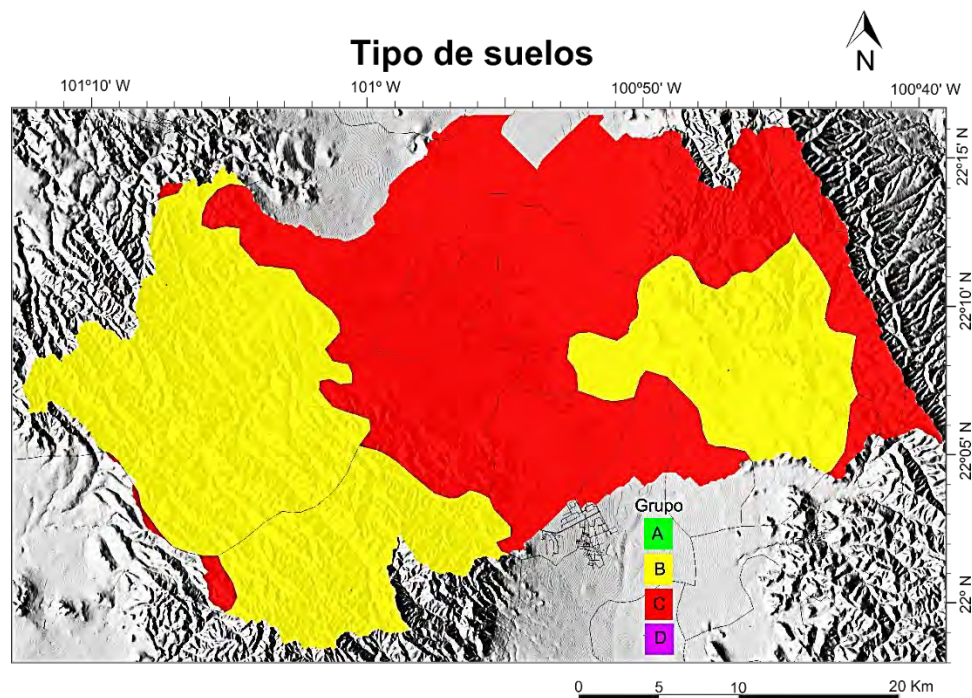
en la obtención del número de curva se le asignó un número primo, dada la singularidad de éstos, el producto de ellos siempre dará un número diferente, de esta forma conociendo el resultado del producto, se puede saber qué características de textura y uso de suelo se trata y de esta forma se podrá encontrar el Numero de Curva en tablas.

Se partió de los mapas de edafología y de uso de suelo y vegetación los cuales se encuentran disponibles en formato shape, éstos se rasterizaron asignando valores correspondientes a números primos. En el caso del mapa de edafología los valores asignados fueron tomando en cuenta el tipo de suelo y su textura.

Se asignó un número primo para cada uno de los cuatro grupos que establece el SCS, asignando números primos de acuerdo a la información disponible sobre textura del suelo.

Textura del suelo	No. Primo asignado	Grupo correspondiente
Gruesa	2	A
Media con fase física lítica	3	B
Media	5	C
Fina	7	D

*Tabla 13 Número primo asignado de acuerdo al tipo de suelo*



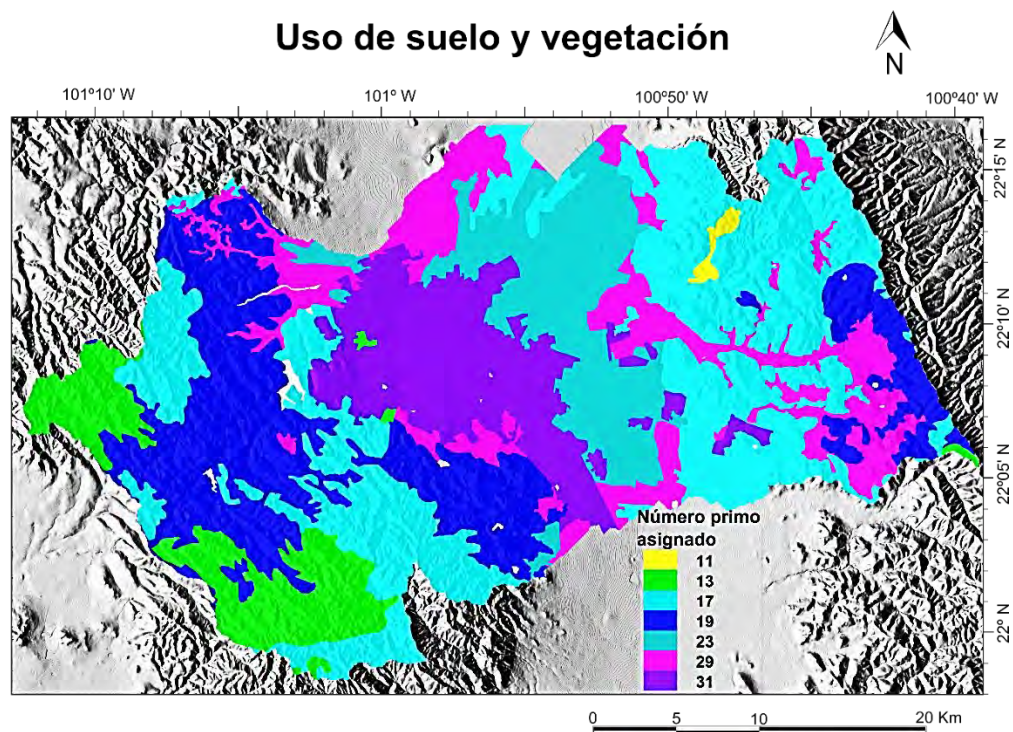
*Figura 16 Mapa de edafología reclasificado*



Mientras que a la información del mapa de uso de suelo y vegetación se le asignaron los siguientes valores:

Descripción en USV250S5_UNION	Cobertura correspondiente	Número primo asignado
Desprovisto de vegetación	Sin cultivo	11
Bosques	Bosques	13
Vegetación secundaria arbustiva, matorrales y mezquitales	Arbustos desérticos	17
Pastizales	Pastizales	19
Agricultura de riego	Cultivos en hileras	23
Agricultura de temporal	Cobertura de residuos de cultivos	29
Asentamientos humanos y zonas urbanas	Áreas urbanas en desarrollo	31

*Tabla 14 Número primo asignado de acuerdo al uso de suelo y vegetación*



*Figura 17 Mapa de uso de suelo y vegetación reclasificado*

Una vez reclasificados los mapas se multiplicaron éstos mediante álgebra de mapas, obteniendo así 28 posibles combinaciones de textura y uso de suelo en la zona de estudio, estas combinaciones conforman el número de curva que se asignó de acuerdo a la siguiente tabla:

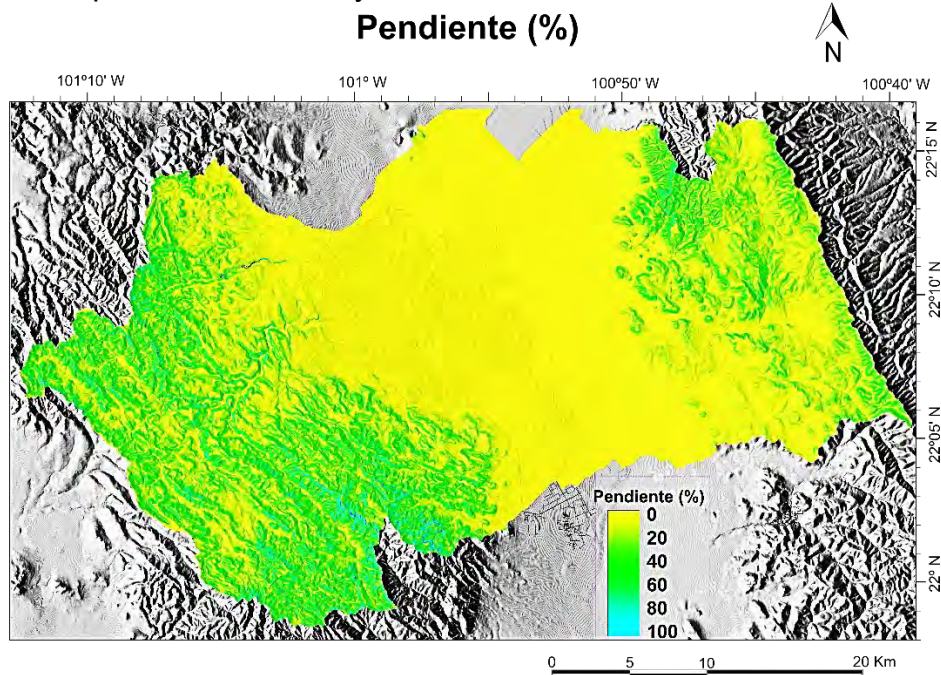
	Grupo de suelo	A	B	C	D
	No. Primo	2	3	5	7
Uso de suelo	NC				
Desprovisto de vegetación	11	<b>77</b>	<b>86</b>	<b>91</b>	<b>94</b>
Bosques	13	<b>30</b>	<b>55</b>	<b>70</b>	<b>77</b>
Vegetación secundaria arbustiva, matorrales y mezquitales	17	<b>55</b>	<b>72</b>	<b>81</b>	<b>86</b>
Pastizales	19	<b>68</b>	<b>79</b>	<b>86</b>	<b>89</b>
Agricultura de riego	23	<b>72</b>	<b>81</b>	<b>88</b>	<b>91</b>
Agricultura de temporal	29	<b>76</b>	<b>85</b>	<b>90</b>	<b>93</b>
Asentamientos humanos y zonas urbanas	31	<b>77</b>	<b>86</b>	<b>91</b>	<b>94</b>

*Tabla 14 Posibles valores de Número de Curva*

Una vez obtenido el mapa raster de Numero de curva se determinó el valor promedio para cada área de aporte discretizada y este valor fue el que se utilizó como valor de entrada en el modelo.

Pendiente:

Este parámetro se determinó usando las herramientas de análisis del terreno en GRASS, mediante el comando `r.slope.aspect`, obteniendo valores en porcentaje para cada celda de 15 x 15 metros, nuevamente se calculó el valor promedio para cada área de aporte discretizada y se utilizó éste como dato de entrada en SWMM



*Figura 18 Mapa de pendientes en la zona de influencia*

### Módulo de transporte

Para describirlo se utilizaron mapas de ubicación de colectores pluviales, así como de los principales colectores sanitarios. También se tomó en cuenta la ubicación y capacidad de las presas ubicadas en la zona.

Dentro del modelo de gestión, se representa cada colector por medio de pozos y conductos, entre los datos de entrada se consideraron: La longitud del conducto, profundidad de los pozos de registro, forma, dimensiones y material del conducto.

La longitud de los conductos fue calculada automáticamente al trazar los conductos de forma manual, la profundidad de los pozos se consideró de tres metros por debajo del terreno, mientras que la forma, dimensiones y material de los conductos se especificó de acuerdo a la información disponible, en algunos casos, como son los colectores sanitarios, sí se cuenta con dicha información (CONAGUA) y en otros la información fue aproximada.



## Simulación

Una vez caracterizada el área de influencia así como las tormentas de diseño se realizó la simulación obteniendo resultados de inundaciones; considerados como salida de agua de la red de drenaje por los pozos o bien por conductos que entren en carga. Cada pozo fue considerado como un punto y cada conducto como una línea.

Para emplear estos resultados en un mapa se trasladó la ubicación de estos puntos y líneas a GRASS, posteriormente mediante el comando v.buffer, estos puntos se trasformaron en áreas tomando en consideración el volumen que sale de la red de drenaje, de esta manera se generaron cinco mapas de respuesta hidrológica, correspondientes a la respuesta de cada una de las tormentas de diseño. A cada mapa se le fijó un valor de uno y posteriormente mediante algebra de mapas en GRASS se sumaron; de esta manera el valor más alto posible para este indicador es de cinco y se presenta en las zonas donde hay inundaciones en todos los escenarios determinados, hasta llegar a un valor de uno cuando la inundación únicamente se observa en un escenario.

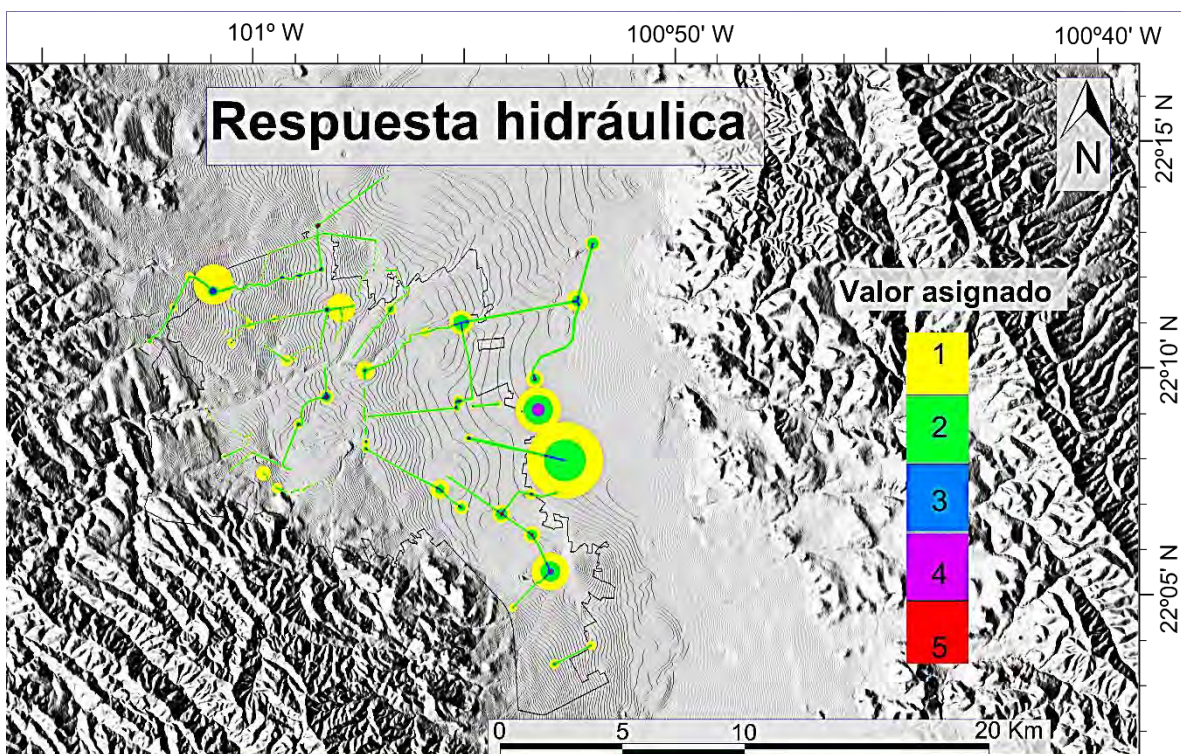


Figura 19 Mapa de Respuesta Hidráulica

El resultado de la simulación, así como los siguientes indicadores únicamente fueron evaluados dentro de la zona de estudio, que pertenece al área urbana.

Para normalizar el indicador de respuesta hidráulica, en toda la zona de estudio se utilizó la ecuación 4 que tomó la siguiente forma:

$$I_{rh} = \frac{V_e}{4.5} + 0.01$$

Donde:

$I_{rh}$  : Indicador de respuesta hidráulica.

$V_e$  : Valor asignado a cada celda.

4.5: Valor esperado corresponde a un valor ligeramente superior al máximo observado.

0.01: valor de corrección, útil en casos donde las celdas presentan valor de cero.

## **Indicador de escurrimiento**

Para el indicador de escurrimientos se parte nuevamente del CEM proporcionado por INEGI; con el uso de las herramientas de modelación hidrológica en GRASS y mediante el uso del módulo `r.watershed` se obtuvieron mapas de las corrientes formadas para diferentes valores de área mínima de aportación; sin embargo al realizar este procedimiento se observó que en algunos casos las corrientes generadas no podían considerarse realistas, ya que atravesaban terreno por el cual se sabe hay construcciones. Por tal motivo se procedió a ajustar el CEM original haciendo uso del mapa de calles (eje vial) proporcionado por INEGI.

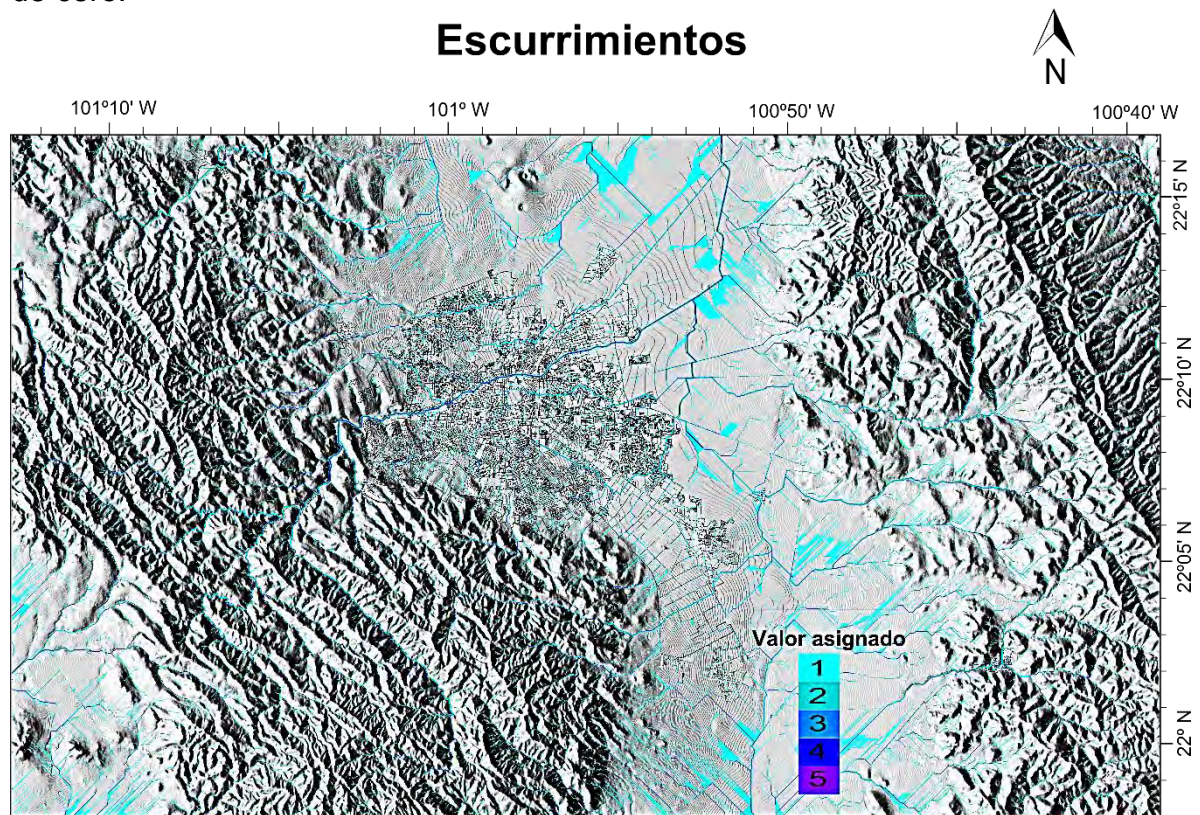
El razonamiento seguido para ajustar el mapa de elevaciones fue que las calles están 20 cm por debajo del terreno indicado en el CEM (asumiendo que todas ellas cuentan con banquetas) de esta manera se utilizó el mapa eje vial, disponible en formato shape, éste se rasterizó dando un valor de 0.2m a cada una de las calles y se nombró ajuste calles, posteriormente, haciendo álgebra de mapas, al CEM original se restó el mapa ajuste calles para obtener de esta forma el CEM ajustado el cual se utilizó como base para realizar el procedimiento de obtención de corrientes con las herramientas de modelación hidrológica en GRASS y mediante el uso del módulo `r.watershed`.

Para obtener el indicador de escurrimiento se generaron 5 mapas de corrientes, para diferentes valores de área mínima de aportación, uno de 100 celdas, 1000



celdas, 10000 celdas, 100000 celdas y 1000000 de celdas que debido a la resolución que se manejó (de 15m x15m) corresponden a aproximadamente a 0.02 Km<sup>2</sup> (2 hectáreas), 0.2 km<sup>2</sup> (20 hectáreas), 2 km<sup>2</sup>, 20 km<sup>2</sup> y 200 km<sup>2</sup> de área de aportación.

En este caso se asumió que las corrientes con mayor área de aportación son las que representan mayor amenaza; así que se generó un mapa raster sumando los cinco anteriores, generando así, un mapa con valores del 1 a las corrientes con menor área de aportación, hasta llegar al 5 para aquellas con mayor área de aportación, aquellas celdas donde no se generaron corrientes presentan un valor de cero.



*Figura 20 Mapa de escurrimientos*

Para normalizar el indicador de escorrimento se utilizó la ecuación 4 que tomó la siguiente forma:

$$I_e = \frac{V_e}{5.5} + 0.01$$

Donde:

$I_e$  : Indicador de escorrimentos.

$V_e$  : Valor de escorrimento asignado a cada celda.

5.5: Valor esperado.

0.01: valor de corrección.

## Indicador de prevalencia

Para el indicador de prevalencia se partió del plano 5-6 “zonas de inundación detectadas por Protección Civil, INTERAPAS y CONAGUA” disponible en el documento “Estudio del Manejo de las aguas pluviales en la ZMSLP” y del anexo de zonas inundables del mismo documento, a partir de éstos se digitalizaron las zonas detectadas y se les asignó un valor del 1 al 4 de acuerdo al nivel reportado en el documento citado, en el cual se reportan cuatro niveles: bajo, leve, medio y grave.

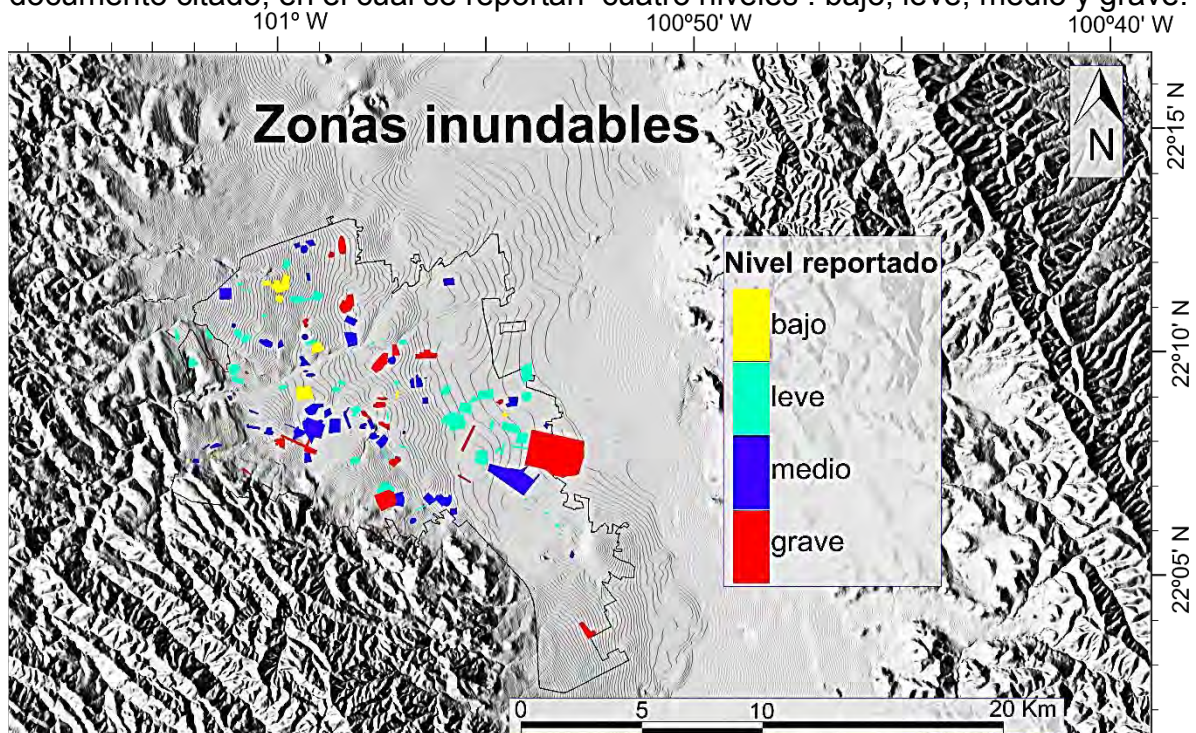


Figura 21 Mapa de zonas inundables reportadas

Para normalizar el indicador de prevalencia la ecuación 4 tomó la siguiente forma:

$$I_p = \frac{V_p}{4.5} + 0.01$$

Donde:

$I_p$  : Indicador de prevalencia.

$V_p$  : Valor de prevalencia asignado a cada celda.

4.5: Valor esperado.

0.01: valor de corrección.



## Indicador de elevación

Para el indicador de elevación se partió del CEM proporcionado por INEGI, mediante el uso de las herramientas estadísticas de GRASS se identificó la cota más baja del terreno en el área de estudio, siendo esta de 1841 m, se definió esta área, mediante la creación de un mapa raster denominado seed, a partir de éste y mediante las herramientas de modelación hidrológica en GRASS, utilizando el módulo r.lake se determinó el área de inundación de un lago virtual obtenido por el llenado del terreno para diferentes profundidades siendo la mayor de 100 m, considerando que la mayor profundidad del lago virtual se genera en la cota más baja del terreno, y es ésta la que presenta mayor riesgo de inundación.



Figura 22 Mapa de profundidades

Para normalizar este indicador se consideraron los valores de profundidad obtenidos y mediante el uso de álgebra de mapas en GRASS se procedió como sigue:

$$I_e = \frac{P (m)}{105 m} + 0.01$$

Donde:

$I_e$ : Indicador de elevación

$P$ : Valor de profundidad asignado a cada celda.

105: Valor esperado.

0.01: valor de corrección.

## Indicador de pendiente

Para su obtención se partió nuevamente del CEM proporcionado por INEGI, a partir de éste y con las herramientas de análisis del terreno usando el módulo slope and aspect se obtiene un mapa raster con valores de pendiente en porcentaje, la premisa en este caso es que a menor pendiente existe mayor riesgo de inundación ya que el agua de escurrimiento fluye con menor velocidad o incluso se encharca en lugares donde la pendiente llega a cero %.

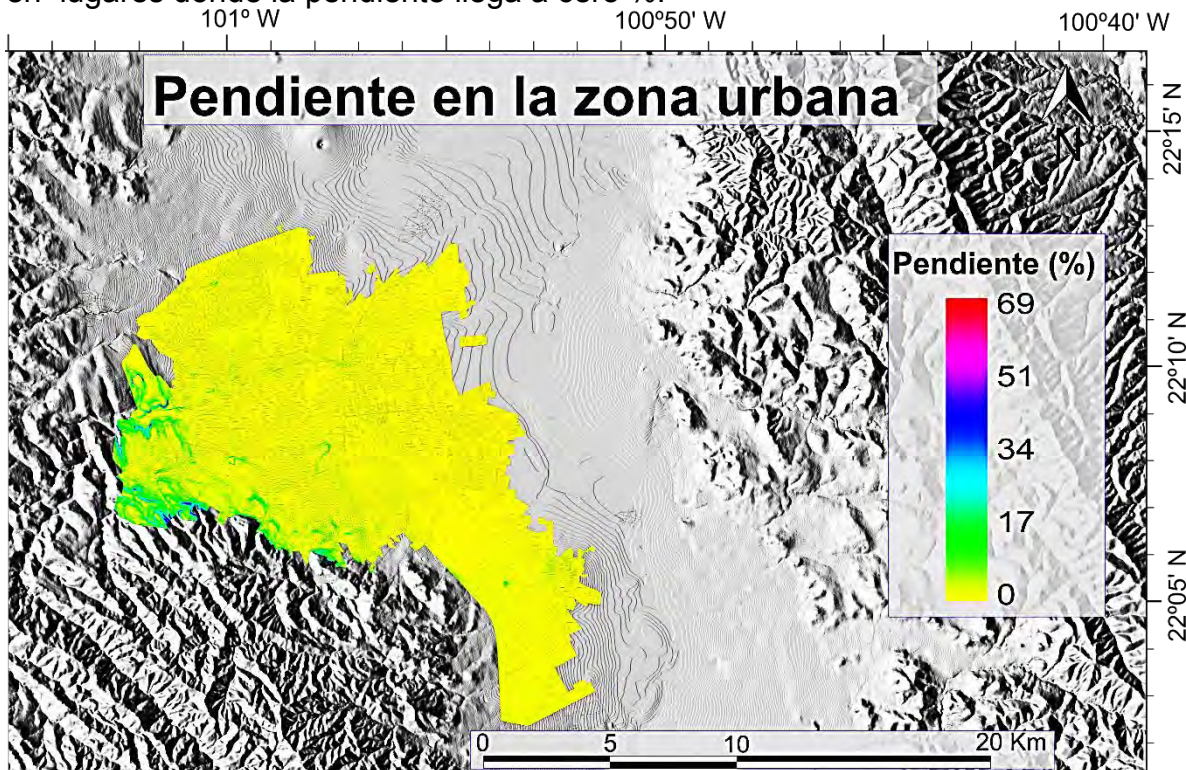


Figura 23 Mapa de pendientes en la zona urbana

Dado que en este caso el valor que representa mayor riesgo de inundación es de cero % de pendiente y el mayor valor observado en el área de estudio es de 68.6 % se recurrió a hacer una resta, para de esta forma tener valores más grandes (de mayor amenaza) a menor pendiente y viceversa. Este indicador se obtuvo con la siguiente formulación:

$$I_p = \frac{68.6 - P}{70} + 0.01$$

Donde:

$I_p$ : indicador de pendiente

$P$ : Valor de pendiente asignado a cada celda.

70: Valor esperado.

0.01: valor de corrección.

Una vez obtenidos cada uno de los indicadores en el rango y dominio deseado se procedió a la asignación de pesos.

## FORMULACIÓN DE LA AMENAZA

Considerando los cinco indicadores evaluados en la presente, se decidió asignar el mismo peso a cada uno de ellos, resultando de esta forma un peso del 20% para cada uno de ellos.

Mediante algebra de mapas se continuó con el proceso de obtención del índice de amenaza utilizando la parte referente a amenaza de la ecuación 5 resultando como sigue:

$$\hat{I}_a = \left( \sum_{i=1}^n (I_i^a * p_i^a) \right)$$

Donde:

$\hat{I}_a$  : Es el índice de amenaza

$I_i^a$  : Es el indicador de amenaza previamente normalizado

$p_i^a$  : Es el peso asignado a cada indicador de vulnerabilidad asignado en función de su importancia relativa, en este caso = 0.2

De esta forma se obtuvo como resultado final el mapa de índice de amenaza correspondiente.

## ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD

Los indicadores elegidos para evaluar la vulnerabilidad fueron aquellos que describieran aspectos de la vulnerabilidad que de acuerdo a Cardona, O.D., 2006, pueden subdividirse en tres categorías o factores que son: Exposición, susceptibilidad física y fragilidades socioeconómicas y falta de resiliencia, ya que estos son los factores de los que se origina la vulnerabilidad.

Los datos de partida corresponden a datos estadísticos proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) mediante el Sistema para la Consulta de Información Censal (SCINCE) 2010. En el cual se expone una selección de indicadores sobre las características sociodemográficas de la población y las viviendas del país captados por el Censo de Población y Vivienda 2010, desagregados hasta el nivel de área geoestadística básica (AGEB).

Dentro de aquellos indicadores que describen la exposición como un factor de vulnerabilidad se tomaron en cuenta la población total y el número de viviendas, mientras que para fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia se tomó en cuenta el índice de rezago social. Cabe recordar que estos datos se encuentran disponibles

a un nivel de desagregación de AGEBs, con estos datos se obtuvieron los indicadores para evaluar la vulnerabilidad en la zona de estudio.

No.	Tipo de dato	Nombre del indicador	Descripción
1	Absoluto	Población total	Total de personas que residen habitualmente en un área geográfica determinada. Incluye la estimación del número de personas en viviendas particulares sin información de ocupantes. Incluye a la población que no especificó su edad.
267	Absoluto	Total de viviendas	Viviendas particulares habitadas, deshabitadas, de uso temporal y colectivo. Incluye a las viviendas sin información de ocupantes.
646	Relativo	Índice de rezago social	El Índice de Rezago Social incorpora indicadores de educación, de acceso a los servicios de salud y a los servicios básicos, calidad y espacios en la vivienda y activos en el hogar.

*Tabla 15 Datos utilizados para generar indicadores de vulnerabilidad*

Estos indicadores se utilizaron para obtener el índice de vulnerabilidad con las siguientes características:

Rango: Al igual que el índice de amenaza sus valores deben estar entre 0.01 y 1, el mínimo y el máximo riesgo, respectivamente.

Constitución: El índice de vulnerabilidad en la presente se compone por los indicadores de exposición de población, exposición de viviendas y de rezago social

Formulación: La relación que se estableció entre los indicadores para obtener el índice de vulnerabilidad, corresponde a la parte de vulnerabilidad en la ecuación 5 y toma la siguiente forma:

$$\hat{I}_v = \sum_{i=1}^n (I_i^V * p_i^V)$$

Donde:

$\hat{I}_v$  : Es el índice de vulnerabilidad.

$I_i^V$  : Es el indicador de vulnerabilidad previamente normalizado. Incluye los indicadores de exposición humana, exposición de viviendas y rezago social.

$p_i^V$  : Es el peso asignado a cada indicador de vulnerabilidad asignado en función de su importancia relativa.



En cuanto a la normalización de los indicadores ésta se realizó, nuevamente mediante la ecuación 4.

Dominio: Debe corresponder al mismo utilizado en el caso del análisis de la amenaza, siendo éste de 15m x 15m.

## INDICADORES DE VULNERABILIDAD

### Indicador de exposición humana

Para el indicador de exposición de población se evaluó el dato denominado población total, disponible en la base de datos del SCINCE 2010.

Posteriormente mediante algebra de mapas se calculó la densidad de población tomando en cuenta el área de AGEB y el número de personas que residen en ellas con la siguiente fórmula:

$$D_p = \frac{P_T}{A} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$D_p$ : Densidad de población

$P_T$ : Población Total

$A$ : Área

A continuación se normalizaron estos datos para obtener un valor adimensional utilizando la ecuación 4 la cual tomó la siguiente forma:

$$I_p = \frac{D_p}{32000} + 0.01$$

Donde:

$I_p$ : Indicador de población.

$D_p$ : Densidad de población calculada para cada pixel de 15 x 15 m con unidades de habitantes / Km<sup>2</sup>.

3200: Valor esperado, sus unidades son habitantes / Km<sup>2</sup>.

0.01: Valor de corrección.

### Indicador de exposición de viviendas

De igual forma, se realizó algebra de mapas para calcular la densidad de viviendas en cada AGEB y de esta forma obtener valores en el dominio correspondiente. A partir del dato denominado viviendas totales se utilizó la siguiente fórmula:

$$D_v = \frac{V_T}{A}$$

Donde:

$D_v$ : Densidad de viviendas

$V_T$ : Viviendas Totales

$A$ : Área

Posteriormente mediante el uso de algebra de mapas en GRASS se normalizaron sus valores mediante la ecuación 4 la cual usando los valores obtenidos en el paso anterior, tomó la siguiente forma:

$$I_v = \frac{D_v}{9500} + 0.01$$

Donde:

0.01: Es un valor de

$I_v$ : Es el indicador de viviendas

$D_v$ : Es la densidad de viviendas

9500: Es el valor esperado

### Rezago social

Para este indicador se utilizó el dato denominado índice de rezago social, el cual ya se encuentra disponible en del dominio necesario, por lo que se prosiguió con la normalización utilizando la ecuación 4, que adquirió la siguiente forma:

$$I_r = \frac{\acute{I}_r}{5.5} + 0.01$$

Donde:

0.01: es un valor de

$I_r$ : es el indicador de rezago social

$\acute{I}_r$ : es el índice de rezago social (dato inicial)

5.5: es el valor esperado.



## FORMULACION DE LA VULNERABILIDAD

Una vez obtenidos los indicadores adimensionales, que se encuentran dentro del rango y dominio necesarios, se aplicó la ecuación 6 para obtener el índice de vulnerabilidad.

$$\hat{I}_v = \sum_{i=1}^n (I_i^V * p_i^V)$$

Los pesos asignados cada indicador fueron los siguientes:

Indicador de exposición de población = 30 % = 0.3  
Indicador de exposición de viviendas = 20 % = 0.2  
Indicador de rezago social = 50 % = 0.5

De esta manera se logró como resultado final el mapa de índice de vulnerabilidad correspondiente.

## ANÁLISIS DEL RIESGO

Finalmente, con los mapas de amenaza y vulnerabilidad disponibles, se calculó el riesgo en la zona de estudio, asignando un peso del 50% a la amenaza y 50% a la vulnerabilidad.

Mediante algebra de mapas se utilizó la ecuación 5 que adquirió la siguiente forma:

$$R_i = (I_i^A * 0.5) + (I_i^V * 0.5)$$

Donde:

$R_i$ : Es el riesgo de inundación

$I_i^A$ : Es el índice de amenaza

$I_i^V$ : Es el índice de vulnerabilidad

0.5: es el peso asignado a ambos índices

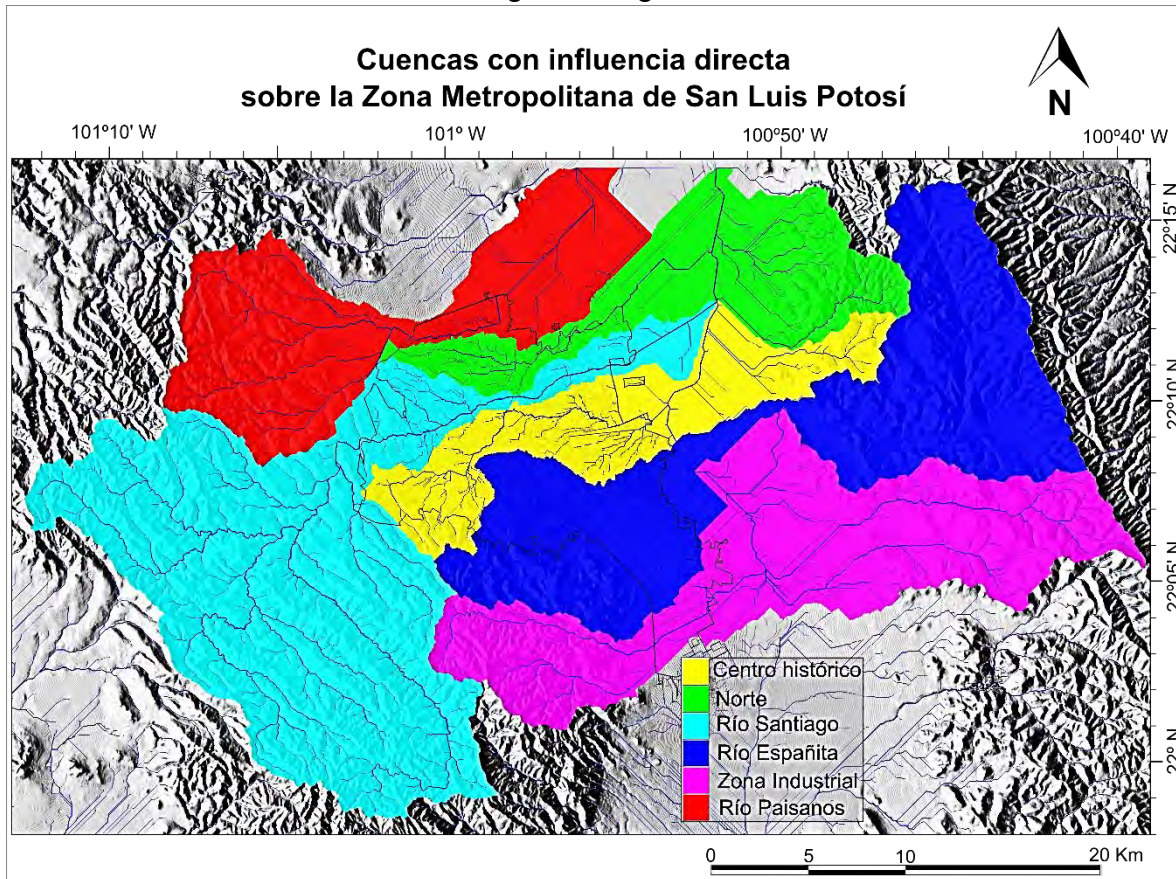
Con esto se generó el mapa de riesgo por inundación en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí.

## RESULTADOS

### INDICADORES DE AMENAZA

#### Indicador de respuesta hidrológica

Las seis cuencas definidas que delimitan el área de influencia se presentan en la siguiente figura.



*Figura 24 Cuencas definidas como área de influencia*

Una vez delimitada el área de influencia que resulta en un área total ligeramente mayor a los 1000 km<sup>2</sup>, se realizó la representación general de la misma dentro del modelo de gestión de aguas pluviales EPA SWMM 5.0.

#### Módulo atmosférico

La capa atmosférica se considera mediante el objeto rain gage y dentro de éste se consideraron las tormentas de diseño definidas como sigue:

Con la aplicación de las metodologías antes mencionadas se establecieron hietogramas de diseño para tormentas con distinta intensidad generando de esta forma cinco hietogramas de diseño.

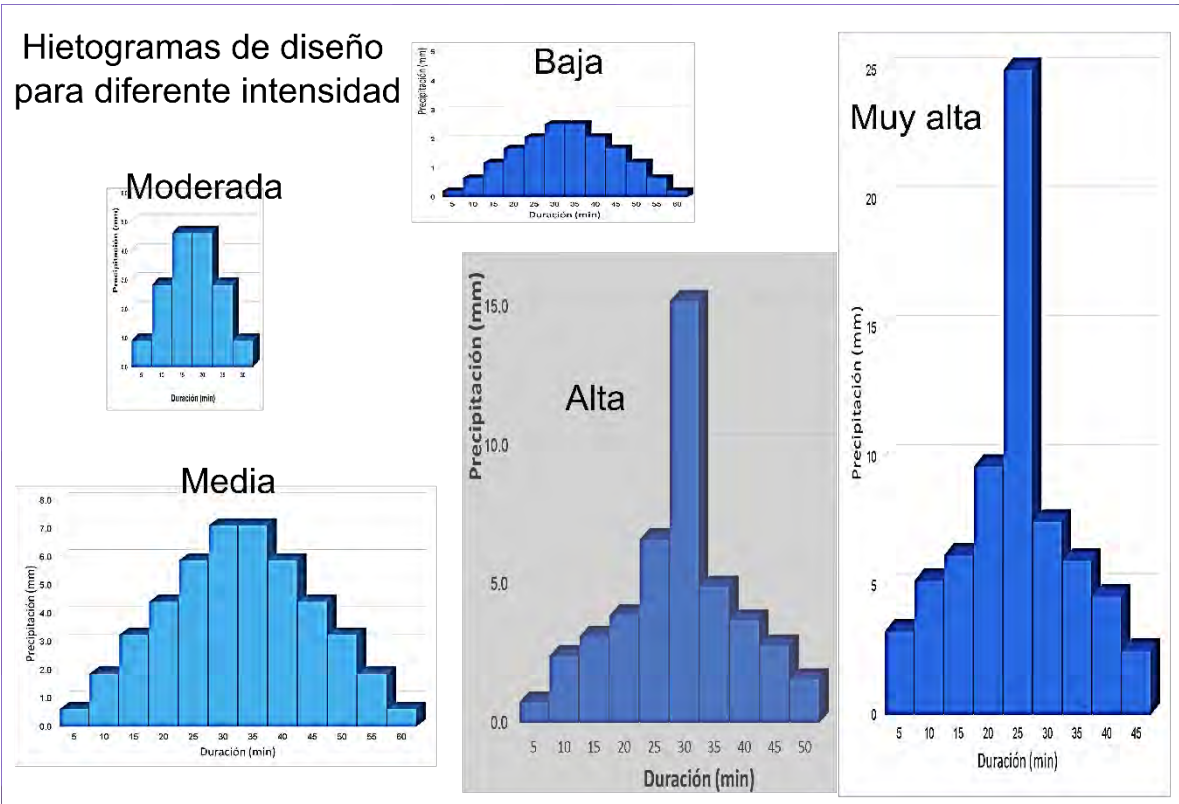


Figura 25 Hietogramas generados

Módulo del terreno

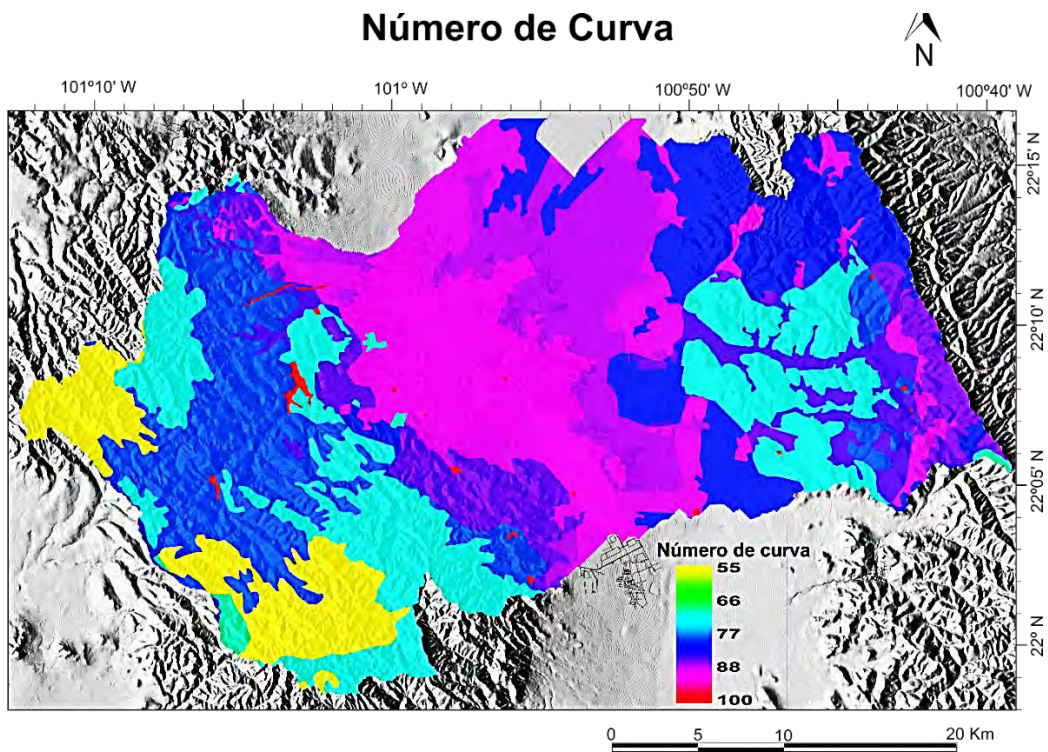
Las seis cuencas originalmente definidas fueron discretizadas en otras de menor tamaño resultando en un total de 108 subcuencas que se presentan en la siguiente figura.





*Figura 26 Subcuencas discretizadas en SWMM*

La información correspondiente a estas subcuencas como número de curva y pendiente fue obtenida a partir de los mapas raster obtenidos en GRASS y asignada a cada subcuenca.



*Figura 27 Mapa de Número de Curva obtenido*

Los resultados de número de curva mostraron valores desde 55, hasta 100 para los cuerpos de agua, observándose un valor promedio general de 80.34. Los valores asignados a cada subcuenca se muestran en la tabla 16

Los resultados para el cálculo de pendiente muestran valores de cero o muy cercanos a cero en la zona del valle, mientras que ésta aumenta en las zonas serranas. El promedio general de pendiente, para la zona de influencia es de 15.39 %, los resultados promedio para cada subcuenca se muestran en la siguiente tabla.

<b>Subcuenca</b>	<b>Área</b>	<b>Ancho</b>	<b>CN</b>	<b>Pendiente</b>
SC1	6090.01	3000	69.00	39.40
SC2	8184.67	5000	65.00	35.00
SC3	11742.48	6100	70.00	30.30
SC4	2132.99	3500	76.00	18.60
SC5	1809.95	2200	76.00	18.60
SC6	4268.74	5000	76.00	18.60
SC7	1329.44	2000	80.00	1.00
SC8	12676.24	5000	77.00	20.00
SC9	12772.13	7000	71.80	18.00
SC10	4444.18	5000	73.50	0.79
SC11	6011.58	7000	81.00	14.70
SC12	2383.03	3200	80.00	5.00
SC13	859.66	1500	77.00	0.50
SC14	3502.32	3000	73.60	18.00
SC15	417.11	1200	80.00	30.00
SC16	343.93	900	82.00	7.00
SC17	38.43	500	77.92	0.99
SC18	64.81	500	77.92	0.99
SC19	27.20	250	77.92	0.99
SC20	28.78	500	77.92	0.99
SC21	65.60	700	77.92	0.99
SC22	60.96	200	77.92	0.99
SC23	33.08	500	77.92	0.99
SC24	52.03	250	77.92	0.99
SC25	45.44	400	77.92	0.99
SC26	47.54	500	77.92	0.99
SC27	43.18	500	77.92	0.99
SC28	158.59	500	77.92	0.99
SC29	215.30	500	77.92	0.99

<b>Subcuenca</b>	<b>Área</b>	<b>Ancho</b>	<b>CN</b>	<b>Pendiente</b>
SC30	167.79	800	77.92	0.99
SC31	225.45	1000	77.92	0.99
SC32	62.28	500	77.92	0.99
SC33	67.64	500	77.92	0.99
SC34	147.01	700	88.62	0.84
SC35	95.40	700	88.62	0.84
SC36	67.82	700	88.62	0.84
SC37	130.40	500	88.62	0.84
SC38	40.64	500	88.62	0.84
SC39	70.28	600	88.62	0.84
SC40	100.29	900	88.62	0.84
SC41	60.72	700	88.62	0.84
SC42	31.15	300	88.62	0.84
SC43	30.58	200	88.62	0.84
SC44	14.81	200	88.62	0.84
SC45	283.62	1000	88.62	0.84
SC46	50.38	500	88.62	0.84
SC47	18.90	300	88.62	0.84
SC48	80.65	500	88.62	0.84
SC49	21.56	300	88.62	0.84
SC50	542.25	1200	88.62	0.84
SC51	226.29	900	88.62	0.84
SC52	343.58	1500	82.00	0.70
SC53	116.33	700	82.00	0.70
SC54	66.13	500	82.00	0.70
SC55	47.25	500	79.00	0.70
SC56	413.32	600	82.00	0.70
SC57	114.47	500	82.00	0.70
SC58	66.23	500	82.00	0.70
SC59	164.96	900	82.00	0.70
SC60	86.55	500	82.00	0.70
SC61	167.74	700	82.00	0.70
SC62	58.21	300	82.00	0.70
SC63	41.93	400	82.00	0.70
SC64	51.83	500	82.00	0.70
SC65	112.42	700	82.00	0.70
SC66	85.79	300	82.00	0.70
SC67	76.13	400	82.00	0.70
SC68	74.85	600	82.00	0.70
SC69	177.61	1000	82.00	0.70
SC70	371.77	1200	82.00	0.70
SC71	1247.32	2000	82.00	0.70

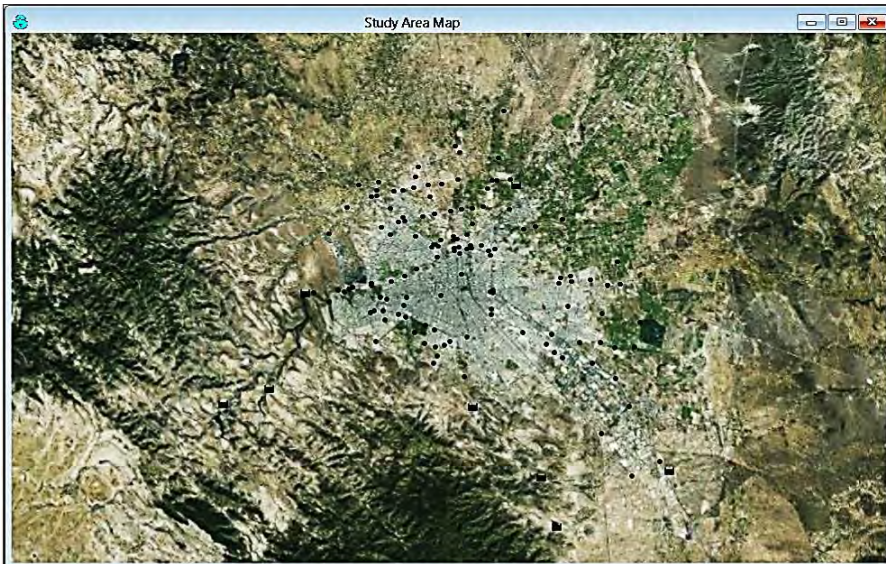


<b>Subcuenca</b>	<b>Área</b>	<b>Ancho</b>	<b>CN</b>	<b>Pendiente</b>
SC72	621.53	1000	70.00	40.00
SC73	52.93	500	70.00	40.00
SC74	278.92	500	67.00	20.00
SC75	78.04	400	80.00	40.00
SC76	228.91	500	70.00	10.00
SC77	86.65	500	80.00	5.00
SC78	237.00	600	70.00	40.00
SC79	137.61	600	70.00	40.00
SC80	90.51	600	80.00	10.00
SC81	400.06	1500	94.00	0.34
SC82	262.66	1000	94.00	0.34
SC83	131.66	800	94.00	0.34
SC84	356.01	1300	90.00	0.34
SC85	342.00	1300	90.00	0.34
SC86	167.06	500	94.00	0.34
SC87	206.87	500	87.00	0.34
SC88	473.59	1500	87.00	0.34
SC89	250.64	800	87.00	0.34
SC90	854.09	2000	87.00	0.34
SC91	456.71	1500	87.00	0.34
SC92	174.21	500	87.00	0.34
SC93	281.89	500	87.00	0.34
SC94	535.03	1300	70.00	4.23
SC95	1143.95	500	79.00	4.23
SC96	687.04	800	80.00	4.23
SC97	591.30	2000	87.10	4.23
SC98	746.26	1500	82.50	5.00
SC99	587.78	1500	82.50	5.00
SC100	651.84	1500	82.50	5.00
SC101	825.06	1200	82.50	5.00
SC102	908.03	500	82.50	5.00
SC103	1382.08	2000	82.50	5.00
SC104	2081.22	2000	71.00	39.50
SC105	1815.65	2700	71.00	39.50
SC106	1216.40	2000	78.10	2.95
SC107	185.20	900	78.10	2.95
SC108	507.86	1200	78.10	2.95

*Tabla 16 Características de cada subcuenca discretizada*

Los datos asignados a cada subcuenca se pueden revisar en la sección subcatchment summary del status report generado al realizar la simulación en SWMM

## Módulo de transporte



Se definieron 135 nodos que corresponden a pozos o puntos control de la red de drenaje, de éstos ocho se presentan como unidades de almacenamiento y seis corresponden a presas.

*Figura 28 Nodos descritos en SWMM*

Sus características se pueden revisar en la sección de node summary dentro status report.



Además se definieron 131 links que corresponden a los conductos o tuberías propios de la red de drenaje tanto natural como artificial cuyas características se presentan en la sección de link summary dentro del status report.

*Figura 29 Conductos descritos en SWMM*

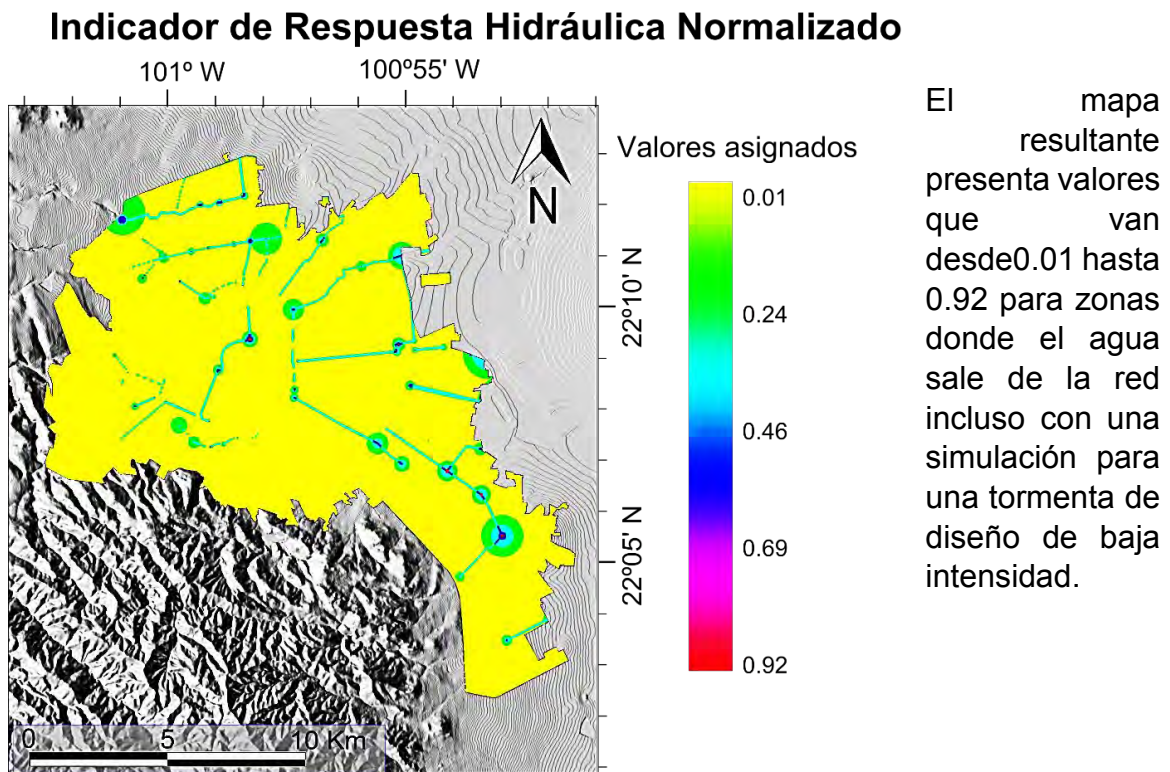


## Simulación

Los resultados de la simulación fueron exportados a GRASS utilizando la información del status report que contiene cada nodo que se inunda y la cantidad en volumen de agua que sale del mismo, estos datos se utilizaron para generar mapas de zonas inundable en función del volumen desalojado en cada nodo, posteriormente se realizó algebra de mapas para generar un solo mapa que incluyera los resultados de los cinco escenarios evaluados, pertenecientes a las cinco tormentas de diseño de diferente intensidad.

## Normalización

Como último paso se normalizó este indicador mediante la ecuación 4 resultando un mapa raster con valores adimensionales que van desde 0.01 en aquellas zonas donde no se detectaron inundaciones durante las simulaciones hasta valores de 0.92 para lugares en los que en cada simulación, aún con la tormenta de más baja intensidad, se pronosticó insuficiencia en la red de drenaje para desalojar los escurrimientos.



*Figura 30 Indicador de respuesta hidráulica*

Los valores normalizados de este indicador se representan en la siguiente figura.

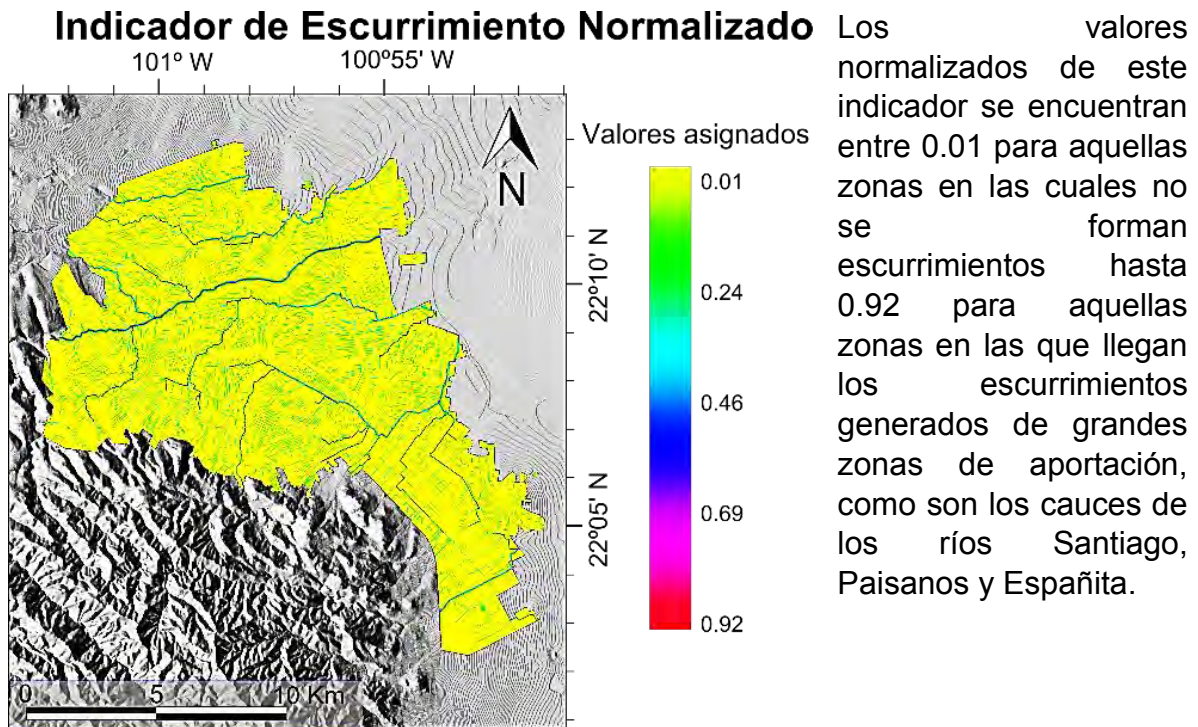


Figura 31 Indicador de escurrimiento

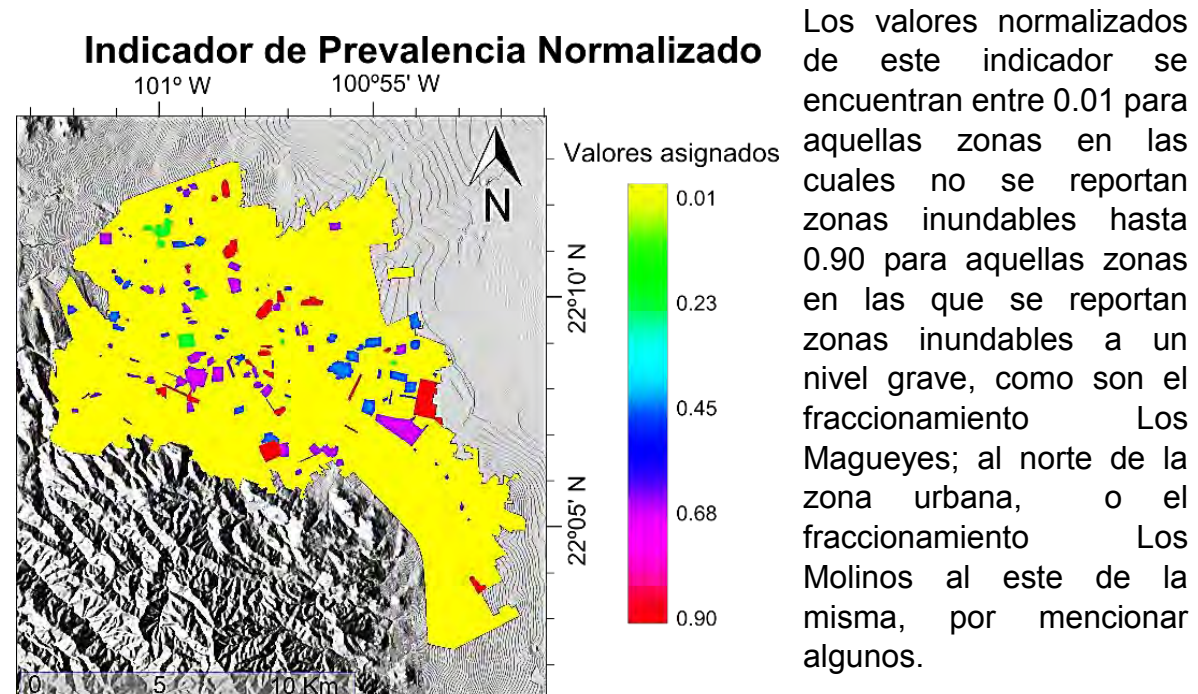
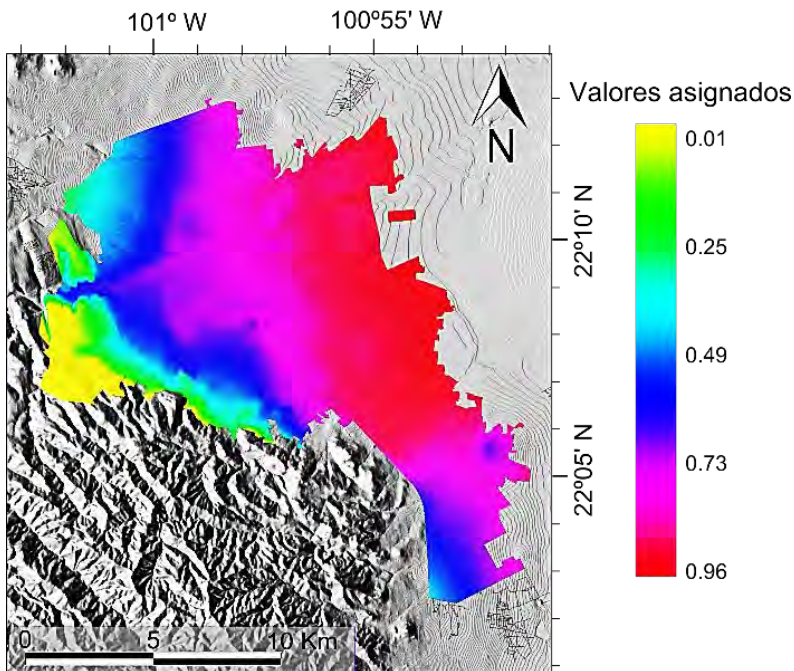


Figura 32 Indicador de prevalencia



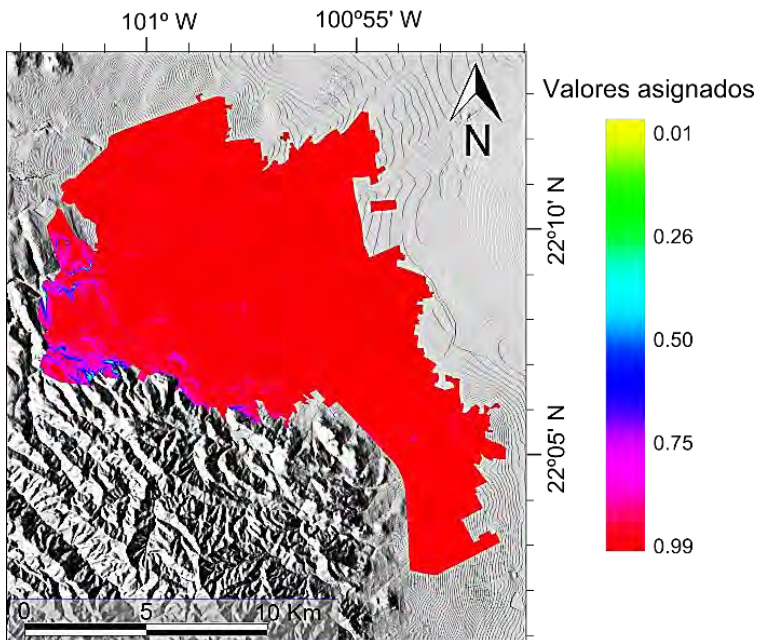
### Indicador de Elevación Normalizado



Los valores normalizados de este indicador se encuentran entre 0.01 para las zonas más altas del área urbana donde se encuentran las colonias Lomas de San Luis y Rinconada de los Andes, mientras que valores de hasta 0.96 se encuentran en las partes bajas del área urbana y abarcan la parte este del área urbana, incluyendo gran parte de la zona industrial.

Figura 33 Indicador de elevación

### Indicador de Pendiente Normalizado



Los valores normalizados de este indicador muestran un valor alto para la mayor parte del área urbana, ya que ésta se encuentra erguida en zonas donde la pendiente es menos pronunciada; sin embargo esta cualidad del terreno, como ya se mencionó favorece los encharcamientos o inundaciones, por lo que resultó en un valor alto de peligrosidad.

Figura 34 Indicador de pendiente

## FORMULACIÓN DE LA AMENAZA

El índice de amenaza queda conformado finalmente por cinco indicadores que son: Indicador de repuesta hidráulica, indicador de escurrimientos, Indicador de prevalencia, indicador de pendiente e indicador de elevación, cada uno con peso igual de 0.2 o del 20 %

### Mapa de amenaza de inundación

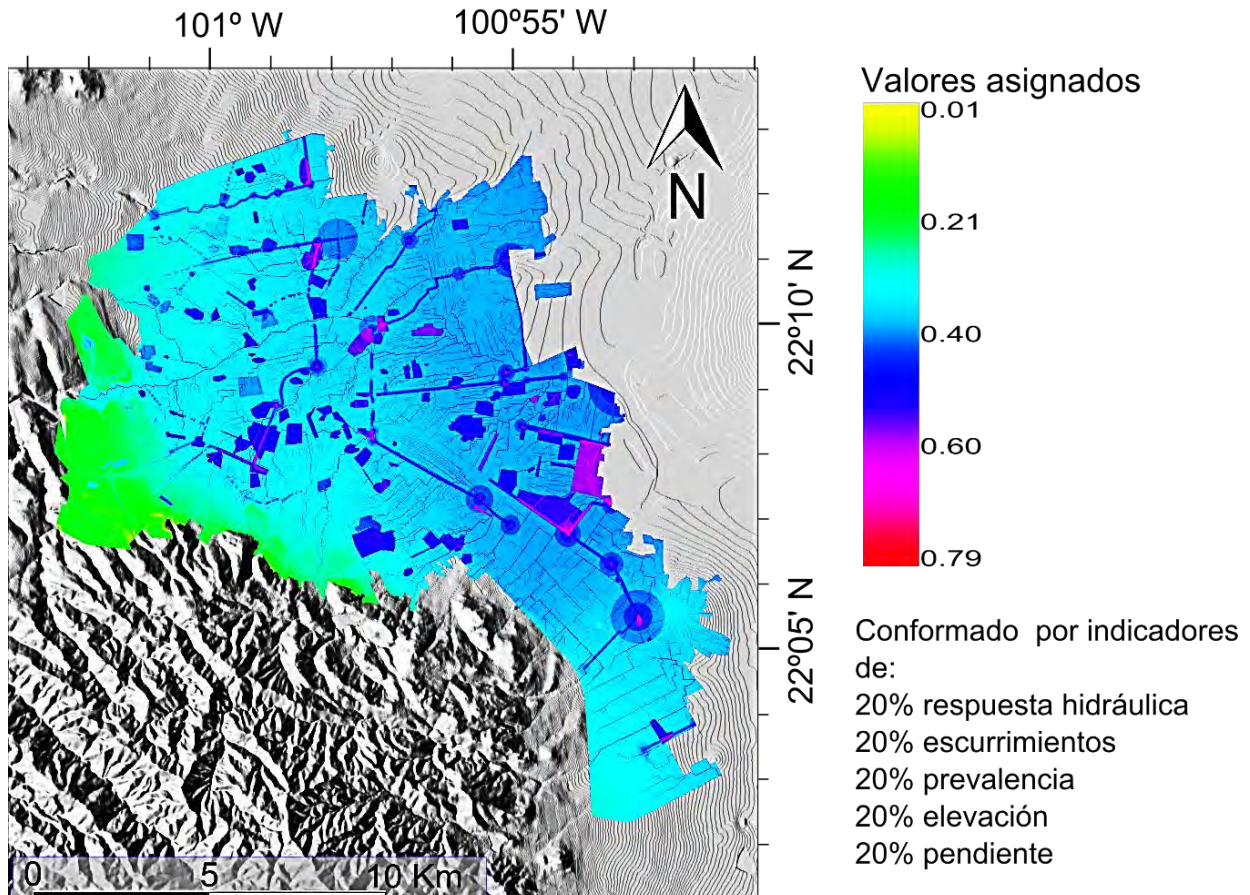


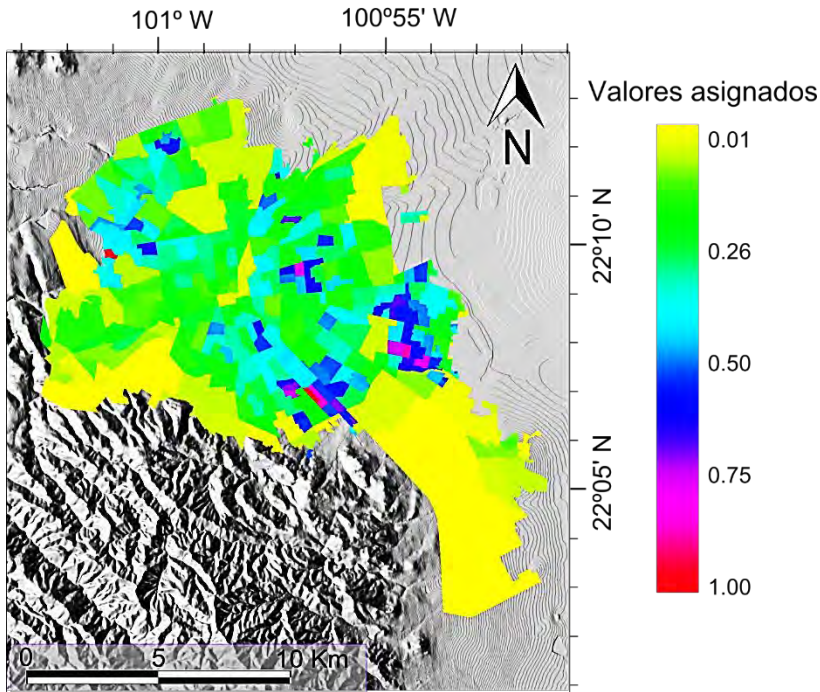
Figura 35 Mapa de amenaza de inundación

Los resultados muestran valores desde 0.01 en las zonas más altas hasta 0.79 en las zonas que representan mayor amenaza de inundación, tanto por su altitud, como por los resultados obtenidos en la simulación, además de coincidir con zonas reportadas como inundables.



# ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD

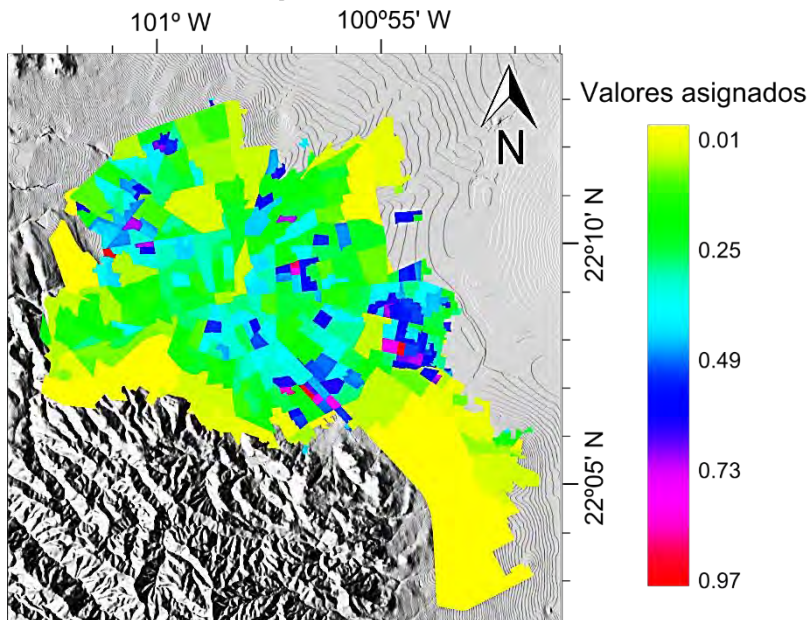
## Indicador de Exposición Humana Normalizado



El resultado obtenido fue un mapa raster que muestra valores de exposición de población dentro del rango definido que fue de 0.01 a 1 obteniendo un máximo correspondiente a 0.99 un mínimo de 0.01 en zonas en las que el conteo de población es cero.

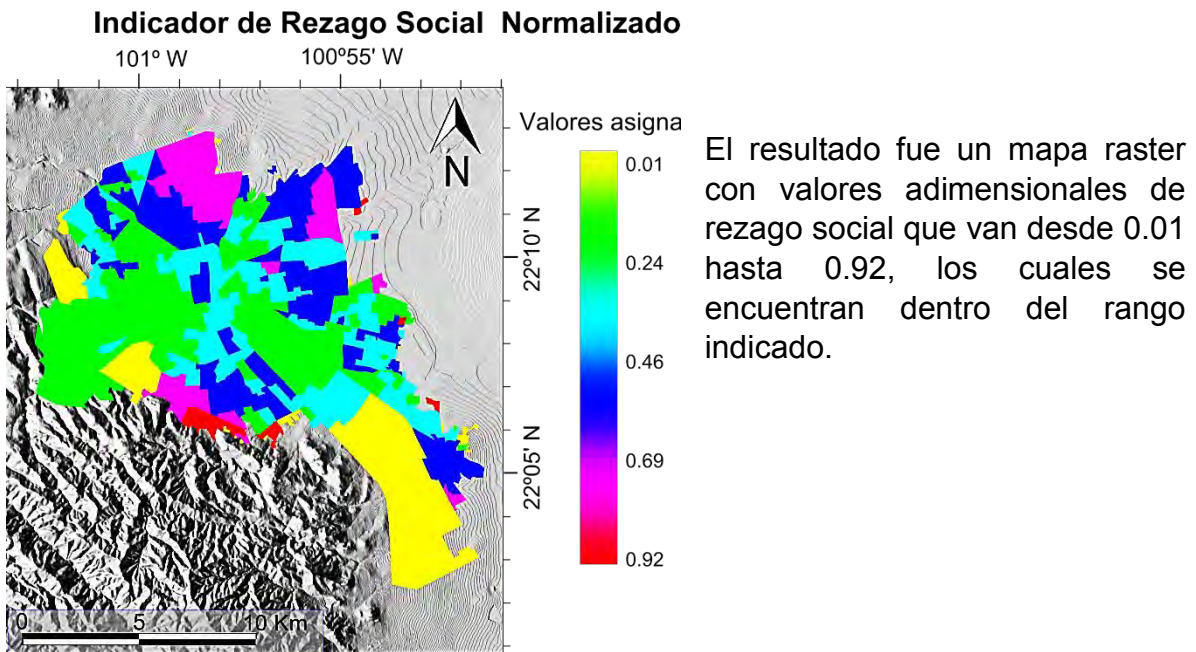
Figura 36 Indicador de exposición humana

## Indicador de Exposición de Viviendas Normalizado



El resultado de la normalización fue un mapa raster con valores de exposición de viviendas que va desde 0.01 hasta 0.97, valores que se encuentran dentro del rango definido.

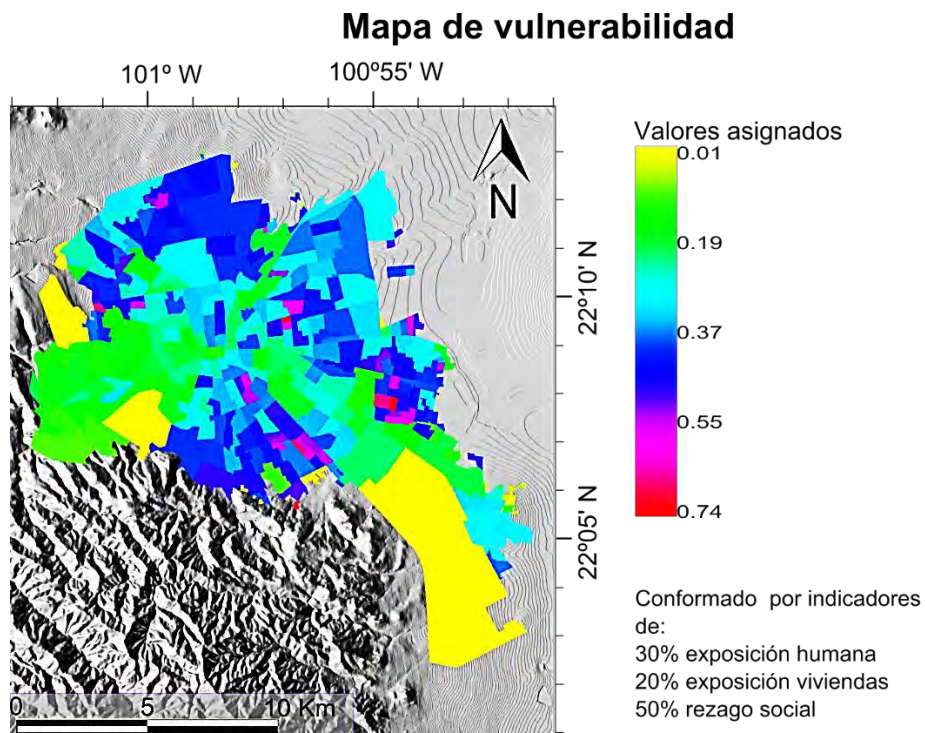
Figura 37 Indicador de exposición viviendas



*Figura 38 Indicador de rezago social*

## FORMULACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Finalmente se aplicó la ecuación 6 para determinar el valor del índice de vulnerabilidad siendo este el resultado:



*Figura 39 Mapa de vulnerabilidad*



## MAPA DE RIESGO POR INUNDACIÓN

Se obtuvo como resultado final un mapa de riesgo por inundación de la Zona Metropolitana de San Luis Potosí. Con valores de riesgo que van desde 0.64 en zonas que resultaron con mayor riesgo hasta valores de 0.04 en aquellas que resultaron de menor riesgo.

### Mapa de Riesgo por Inundación

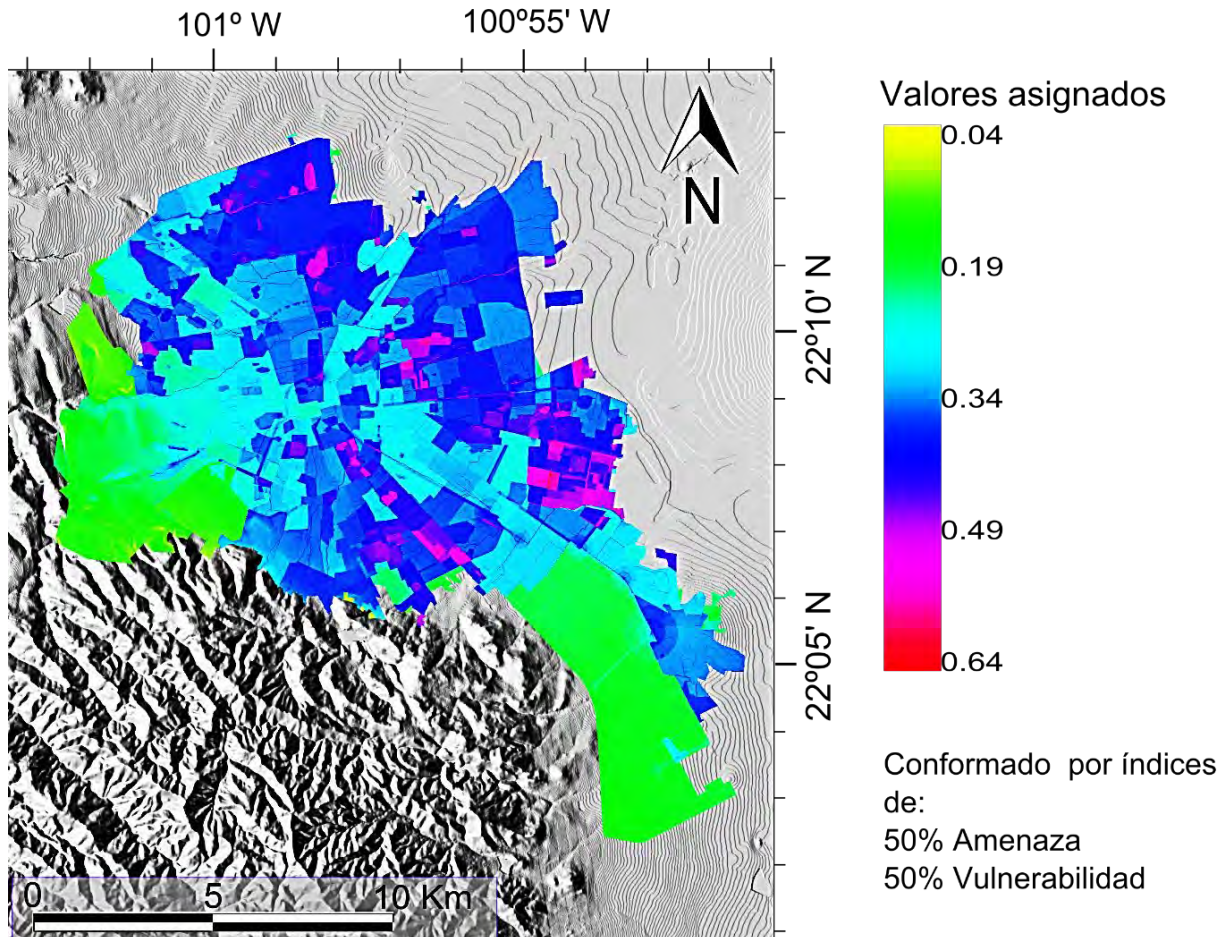


Figura 40 Mapa de riesgo por inundación en la ZMSLP



## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos para cada indicador demuestran la importancia del análisis multicriterio, ya que cada uno de ellos aporta en cierto grado al riesgo existente en la zona de estudio.

En lo referente al análisis de la amenaza se optó por usar un modelo hidráulico hidrológico ya que este tipo de modelos permiten evaluar la respuesta de la cuenca a partir de datos de precipitación y tomando en cuenta la red de drenaje urbana y las obras de protección en la zona. En este caso los resultados obtenidos están en función tanto a características atmosféricas que son las tormentas de diseño, como a los rasgos del terreno y de la red de drenaje en sí; aun así la respuesta obtenida está fuertemente limitada por la representación previa de los elementos a evaluar, por lo que los resultados son muy específicos y puntuales pero también resultaron congruentes con la información disponible acerca de las inundaciones.

Cada uno de los indicadores considerados representa un atributo determinante del riesgo por inundación, algunos de estos son inherentes al terreno como la elevación y la pendiente, otros hacen referencia a la respuesta hidráulica; como el de escurrimientos, o respuesta hidrológica como el indicador del mismo nombre y también se consideraron aquellas zonas que se saben inundables por experiencias reportadas en el pasado, dentro del indicador de prevalencia.

El valor máximo obtenido para el índice de amenaza resulto ser de 0.79 y se presenta en zonas donde valores altos del indicador de respuesta hidráulica coinciden con valores altos del indicador de prevalencia, esto se observa en las colonias ubicadas al oriente de la zona de estudio como son: Las Mercedes, Los Silos, Los Molinos, La Libertad, Cactus y Los Gómez; además, de que estas colonias se encuentran en la parte con menor altitud de la zona de estudio y reciben escurrimientos tanto de la sierra de Álvarez por cauces naturales; como de la zona urbana por colectores pluviales y sanitarios.

Otra zona identificada con alto índice de amenaza se observa sobre los colectores pluviales Mexinox, boulevard San Luis y lateral carretera 57, los cuales están conectados entre sí, y reciben escurrimientos desde la sierra de San Miguelito, así como de la zona industrial y del centro de la zona urbana, éstos también se localizan en la zona de menor elevación y presentan valores altos de prevalencia.

En el centro de zona de estudio el colector Mariano Jiménez exhibe salida de agua, incluso en escenarios de baja intensidad a la altura de la colonia El Montecillo, donde la tubería cambia drásticamente de pendiente.

En la colonia Pedroza también se obtienen resultados de salida de agua de la red de drenaje, aún en escenarios de baja intensidad, debido a que la red de drenaje es insuficiente para desalojar los escurrimientos generados en la cuenca Norte. En

esta zona nuevamente se observan valores altos para el indicador de prevalencia, elevación y pendiente por lo que da como resultado un índice de amenaza alto.

En la colonia Los Magueyes al norte de la zona de estudio la capacidad del río Paisanos disminuye y los escurrimientos provocan desbordamiento en esta zona ya urbanizada; aunque, a poca distancia se encuentra la zona agrícola, donde esta misma agua se utiliza para riego.

En cuanto al análisis de la vulnerabilidad el proceso de obtención de los indicadores no fue tan arduo gracias a la disponibilidad de información poblacional por parte de INEGI.

Los resultados obtenidos para vulnerabilidad muestran un valor máximo de 0.74 en áreas pequeñas y bien definidas; como son: El condado del Sauzal, fraccionamiento El Marqués, fraccionamiento La Libertad y fraccionamiento Valle del Progreso. Este valor máximo del índice de vulnerabilidad implica que hay zonas donde coincidan valores máximos de los tres indicadores evaluados; sin embargo, cabe destacar que el área que representan éstas es muy pequeña; en cambio, se obtuvieron grandes áreas con valores mínimos de índice de vulnerabilidad como son el fraccionamiento Los Pirules, las colonias Garita de Jalisco, Prados de San Luis y Balcones Del Valle; así como, el parque Tangamanga I y la zona industrial.

Los resultados tan bajos en cuanto al índice de vulnerabilidad en el parque Tangamanga I; así como, en la zona industrial, son un claro ejemplo de la subjetividad a la que está expuesta el análisis de riesgo, de tal forma que una zona que en realidad es percibida como de alto riesgo por inundación, como es la zona industrial, y con mucha razón ya que se encuentra en una zona de amenaza importante, pero al no presentar las características definidas como determinantes de la vulnerabilidad el valor asignado al riesgo disminuye, esto no quiere decir que en realidad no haya riesgo de inundación en esa zona, o que no sea vulnerable, quiere decir que ese fue el valor obtenido tomando en cuenta los parámetros analizados y de ser requerido se deben tomar en cuenta otros parámetros que describan mejor el grado de vulnerabilidad percibido en esa zona.

Al combinar ambos índices se obtuvo como resultado máximo un valor de 0.64 de riesgo, en zonas donde el índice de amenaza o el índice de vulnerabilidad presentan valores altos.

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que las zonas de menor altitud son las más propensas a inundación y esto se ve reflejado en la prevalencia del fenómeno, así como en los resultados de las simulaciones, además de que en esta zona la pendiente del terreno es mínima y presenta escurrimientos naturales. Por todo lo anterior; es decir porque muchos de los indicadores coinciden en cuanto a zonas de valores máximos, el índice de amenaza da como resultado un valor máximo alto (de 0.79) localizado en zonas donde coinciden valores máximos de cada indicador.

En cuanto al índice de vulnerabilidad el valor máximo obtenido fue de 0.74, esto indica que también existen zonas en las que coinciden valores máximos para cada indicador de vulnerabilidad evaluado; sin embargo estas zonas son pequeñas. Cabe resaltar que la obtención de valores mínimos de vulnerabilidad en la zona de estudio se presentan en colonias donde cada uno de los indicadores de vulnerabilidad es mínimo, pero también en zonas como el parque Tangamanga I y la zona industrial donde los indicadores evaluados no reflejan en realidad la vulnerabilidad de estas áreas ya que su uso no es como viviendas; sin embargo, ambos lugares son zonas de gran afluencia recreativa y laboral respectivamente.

El valor máximo de riesgo obtenido fue de 0.64 en zonas donde se presentan valores máximos de amenaza o de vulnerabilidad, o bien valores medios para ambos. Este valor revela que no se presentan zonas en las que coincidan valores máximos del índice de amenaza y del índice de vulnerabilidad.

El análisis de riesgo por inundación resulta complicado de realizar ya que los índices e indicadores a utilizar no están estrictamente definidos, y con razón, como ya se mencionó una inundación es muy diferente de otra desde su proceso de formación, su duración o sus causas, si a esto se agrega la urbanización, que influye directamente sobre las características de interés, este análisis resulta aún más versátil e incluye rasgos no sólo naturales, sino también antropogénicos.

La necesidad de elegir entre diferentes alternativas, las cuales han de evaluarse en base a varios criterios ha llevado a desarrollar diferentes herramientas analíticas, como son las técnicas de análisis multicriterio, en la presente se evaluaron diversos criterios de manera independiente; sin embargo mediante la aplicación del análisis multicriterio fue posible incluir cada uno de los indicadores, todos de naturaleza muy diferente en un solo valor que representa el riesgo por inundación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio (1993). *Fundamentos de Hidrología de superficie*. México: Limusa.
- Aranda, (1987). *Procesos del ciclo hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Cardona,(2006). Midiendo lo inmedible. In *Milenio Ambiental* (Vol. 4, pp. 60 –5). Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo de Canadá (CIID). Programa de Pobreza Urbana y Ambiente (UPE).
- Cardona y Hurtado (2000). Modelación numérica para la estimación holística del riesgo sísmico urbano, considerando variables técnicas, sociales y económicas. In *Métodos Numéricos en Ciencias Sociales (MENCIS 2000)*. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE).
- Carreño, Cardona y Barbat (2007). Urban Seismic Risk Evaluation: A Holistic Approach. *Natural Hazards*, 40(1), 137–172. doi:10.1007/s11069-006-0008-8
- Castro y Carrasco, (2011). *Utilización de modelos matemáticos para la formulación de una propuesta de gestión ambiental en la zona noroccidental del río Cali*. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- Chow y Saldarriaga, J. G. (1994). *Hidrología aplicada*. Santa fé de Bogotá: McGraw-Hill.
- CONAGUA. (2009). Estudio del manejo de las aguas pluviales en la zona metropolitana de la Cd. San Luis Potosí (ZMSLP), Estado de San Luis Potosí. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Cruz Gamiz, (2001). Determinación de tormentas de diseño. *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, 22, 27–0.
- Díez Herrero, Laín Huerta y Llorente, (2008). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones: guía metodológica para su elaboración*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- H. Ayuntamiento de Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P. (2010). Atlas Municipal de Riesgo.
- Hernández y Cubillos, (2012). Índices e indicadores propuestos para la evaluación del riesgo de inundación por falla del sistema de alcantarillado en una cuenca

- urbana. In *XX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*. Barranquilla, Colombia.
- Maskrey. (1993). *Los desastres no son naturales* (Primera edición.). Colombia: La red.
- Maskrey, (1998). *Navegando entre brumas: la aplicación de los sistemas de información geográfica al análisis de riesgo en América Latina*. Soluciones Prácticas.
- Mondragón, (2002). ¿Qué son los indicadores? *Revista de Información Y Análisis*, (num. 19).
- Orozco. (2012). *Hidrología esencial*. Editorial Digital Tecnológico de Monterrey
- Ponce, (1989). *Engineering hydrology: principles and practices*. [S.l.]: Simon And Schuster Trade.
- Stewart y Melchers R.E. (1997). *Probabilistic Risk Assesment of Engineering Systems*. Springer Netherlands.
- Tucci y Bertoni. (2006). *Gestión de Inundaciones Urbanas*. World Meteorological Organization.
- World Meteorological Organization, & Unesco. (2013). *International glossary of hydrology = Glossaire international d'hydrologie = Mezhdunarodnyĩ gidrologicheskiĩ slovar' = Glosario hidrológico internacional*.
- Zonensein, Miguez, de Magalhaes, Valentin y Mascarenhas, (2008). 11th International Conference on Urban Drainage. In *Flood risk indexas an urban management tool*. Edinburgh, Scotland, UK.