



Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Programa de Posgrado

Tesis

DETERMINACION DE ZONAS DE RIESGO POR INUNDACION
EN LAS CUENCAS URBANAS DEL ARROYO TOPO CHICO
Y RIO LA SILLA EN LA ZONA METROPOLITANA DE
MONTERREY PARA SU EMPLEO EN LA GESTION DE RIESGO

que para obtener el grado de
Maestría en Ciencias del Agua
(Gestión Integral del Agua de cuencas y Acuíferos)

presenta
Amalio Cardona Rodríguez

Tutor: M.I. Ernesto Aguilar Garduño

Jiutepec, Morelos

2009



Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Programa de Posgrado

Tesis

**DETERMINACIÓN DE ZONAS DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LAS
CUENCAS URBANAS DEL ARROYO TOPO CHICO Y RÍO LA SILLA EN LA
ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY PARA SU EMPLEO EN LA
GESTIÓN DE RIESGO**

que para obtener el grado de
Maestría en Ciencias del Agua
(Gestión Integral del Agua de Cuencas y Acuíferos)

presenta
Amalio Cardona Rodríguez

Tutor: M.I. Ernesto Aguilar Garduño

Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada "DETERMINACIÓN DE ZONAS DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN LAS CUENCAS URBANAS DEL ARROYO TOPO CHICO Y RÍO LA SILLA EN LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY PARA SU EMPLEO EN LA GESTIÓN DE RIESGO", otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

AMALIO CARDONA RODRÍGUEZ

Jiutepec, Morelos 8-Diciembre-2009

Lugar y fecha

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'A' and 'R' intertwined, enclosed within a circle. The signature is positioned above a horizontal line.

Firma



DEDICATORIA

A mis padres por darme la oportunidad de realizar mis estudios y el logro de metas.

A mi esposa María Elena Serrato Arguello por su comprensión y apoyo durante la realización del posgrado.

Amir Essau, Nahum Azael, Miranda Nazareth, Melani Namibia, mis hijos que han sido mi motivación en la vida.

A todos mis hermanos.

AGRADECIMIENTOS

Al M.I. Ernesto Aguilar Garduño, M.I. Juan Fco Gómez Martínez, Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco y M.C. José Alberto Balancán Soberanis miembros del Comité Tutorial por todo su apoyo y tiempo brindado.

Los datos del levantamiento LIDAR, ortofotos y datos vectoriales, para este estudio fueron proporcionados por la Agencia para la Planeación del Desarrollo Urbano del Gobierno del Estado de Nuevo León. Este estudio no hubiera sido posible sin esta información.

Al Ing. Pedro Garza Treviño, Director General del Organismo de Cuenca Río Bravo de la Comisión Nacional del Agua y al Biol. Sergio Ramírez Almaraz, Director Técnico por las facilidades brindadas para realizar el posgrado y el trabajo de tesis.

Finalmente a mis compañeros del equipo de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos del Organismo de Cuenca Río Bravo, por su constante motivación para concluir este trabajo.

RESUMEN

La metodología desarrollada para la evaluación de las inundaciones fluviales en las subcuencas del río La Silla y arroyo Topo Chico, se realizó utilizando los programas HEC-HMS, HEC-RAS, y las extensiones de modelación geoespacial HEC-GeoRAS, HEC-GeoHMS para implementar los modelos hidrológicos e hidráulicos en plataforma ArcGis 9.1.

El objetivo general de este estudio fue la determinación de las zonas de riesgo por inundación en los cauces de las cuencas urbanas, para su empleo en la atención a emergencias y como herramienta en la gestión del riesgo.

El trabajo contempla básicamente dos procesos: la construcción del modelo hidrológico con información digital en escala 1:50,000 y la simulación para la obtención de los hidrogramas de diseño; la construcción del modelo hidráulico de la red dendrítica de los cauces principales con el levantamiento LIDAR (Ligth detection and ranging) y la simulación para la determinación de áreas de riesgo de inundación.

Ambos procesos se realizaron con apoyo de los Sistemas de Información Geográfica en Argis 9.1 y la interfaz para la modelación hidrológica geoespacial HECGeo-HMS e hidráulica HECGeo-RAS. El producto final fue la obtención de mapas de inundación para determinar las áreas que pueden ser potencialmente afectadas, la frecuencia e intensidad de las mismas, constituyéndose en instrumentos de planificación y gestión territorial que permiten definir limitaciones en ciertos usos de suelo y en la localización espacial de las actividades humanas.

Finalmente, se efectuó la zonificación de la amenaza por inundaciones relacionando la intensidad de la inundación (tirantes de agua) y la frecuencia con que se presentan (periodo de retorno) para la clasificación de las zonas sujetas a inundación, este proceso se realizó en ArcGis 9.1 para los periodos de retorno de 5, 10, 20, 50, 100 años considerados en la metodología.

ÍNDICE

	Página
Dedicatoria.....	3
Agradecimientos.....	4
Resumen.....	5
Capitulo 1 INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes.....	12
1.2 Importancia del estudio.....	12
1.3 Planteamiento del problema.....	13
1.4 Objetivos del estudio.....	16
1.4.1 Objetivo general.....	16
1.4.2 Objetivos específicos.....	16
Capitulo 2 REVISIÓN DE LITERATURA	
2.1. Desastre natural.....	17
2.1.1 Inundación.....	18
2.2 Paradigmas sobre desastre naturales.....	19
2.2.1 Paradigma fatalista.....	19
2.2.2 Paradigma fisicalista.....	19
2.2.3 Paradigma ambientalista o ecológico.....	20
2.3 Conceptos sobre riesgo.....	20
2.3.1 Peligro o amenaza.....	21
2.3.2 Vulnerabilidad.....	21
2.3.3 Exposición.....	22
2.3.4 Evaluación de la amenaza y vulnerabilidad por medio de los sistemas de información geográfica.....	22
2.4 La cuenca hidrológica y la gestión de riesgo.....	22
2.4.1 Los sistemas de información geográfica en la gestión de riesgo (SIG)..	23
Capitulo 3 CARACTERÍSTICAS FISIGRÁFICAS DE LAS SUBCUENCAS	
3.1 Descripción del área de estudio.....	25
3.1.1 Clima.....	27
3.1.2 Precipitación.....	27
3.1.3 Edafología.....	29
3.1.4 Cobertura vegetal y uso de suelo.....	31
3.2 Características fisiográficas de las subcuencas.....	33
3.2.1 Trazo de subcuencas y red de drenaje en ArcGis 9.1.....	33
3.2.2 Discretización de las subcuencas.....	34
3.2.3 Área de la subcuenca.....	36
3.2.4 Pendiente media de la subcuenca y del cauce principal.....	36
3.2.5 Tiempo de concentración y tiempo de retraso.....	38
3.2.6 Cálculo del número de curva del SCS (Soil Conservation Service).....	39
3.3 Cálculo de tormentas de diseño.....	43
3.3.1 Selección de las estaciones climatológicas e influencia en cada subcuenca.....	44
3.3.2 Análisis de frecuencias de las series máximas anuales de precipitación en 24 horas.....	46
3.3.3 Distribución temporal de las tormentas de diseño.....	54

Capitulo 4 MODELACIÓN HIDROLÓGICA (evaluación de la amenaza)	
4.1 Modelo hidrológico con HEC-HMS.....	61
4.1.1 Modelo de cuenca.....	62
4.1.1.1 Métodos de cálculo en el modelo hidrológico.....	64
4.1.2 Modelo meteorológico (cálculo de la precipitación media.....	67
4.1.3 Series de tiempo (distribución temporal de la lluvia.....	67
4.2 Avenidas de diseño para los periodos de retorno.....	67
Capitulo 5 MODELACIÓN HIDRÁULICA (evaluación de la vulnerabilidad)	
5.1 Modelo hidráulico con HEC-RAS.....	70
5.1.1 Levantamiento LIDAR y modelo digital de elevación.....	70
5.1.2 Construcción de la geometría del modelo.....	72
5.1.3 Métodos de cálculo en el modelo hidráulico.....	75
5.1.4 Coeficiente de rugosidad de Manning.....	76
5.1.5 Gastos máximos.....	78
5.1.6 Condiciones de frontera del modelo hidráulico.....	79
5.1.7 Estructuras de cruce, puentes y alcantarillas considerados en el modelo..	80
5.2 Mapas de inundación y zonificación de la amenaza por inundaciones...	82
Capitulo 6 CONCLUSIONES	89
ANEXO 1 Mapas de inundación con la zonificación de amenazas en la subcuenca del río La Silla	92
ANEXO 2 Mapas de inundación con la zonificación de amenazas en la subcuenca del arroyo Topo Chico	98
ANEXO 3 Resultado de la simulación hidráulica por período de retorno, para la sección transversal típica del cauce principal del río La Silla	104
ANEXO 4 Resultado de la simulación hidráulica por período de retorno, para la sección transversal típica del cauce principal del arroyo Topo Chico	105

BIBLIOGRAFÍA



Abreviaturas

AMM: Área Metropolitana de Monterrey
APDUNL: Agencia para la Planeación del Desarrollo Urbano de Nuevo León
CENAPRED: Centro Nacional de Prevención de Desastres
CETENAL: Centro de Estudios del Territorio Nacional
FAO: Food and Agriculture Organization
UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
HEC-HMS: Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Model System
HEC-GeoHMS: Hydrologic Engineering Center - Geospatial Hydrologic Model System
HEC-GeoRAS: Hydrologic Engineering Center – Geospatial River Analysis System
HEC-RAS: Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
INEGI: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
PND: Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012
PNH: Programa Nacional Hídrico 2007-2012
LIDAR: Ligth Detection And Raning
MDE: Modelo Digital de Elevaciones
SARH: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos
SEDESOL: Secretaría de Desarrollo Social
SIG: Sistema de Información Geográfica

Índice de Tablas

	Página
3.1 Descripción de los grupos hidrológicos de suelos.....	40
3.2 Grupo hidrológico de los suelos encontrados en la subcuenca en estudio.....	40
3.3 Valores de número de curva de acuerdo al uso de suelo y tipo de suelo para las subcuencas de estudio.....	41
3.4 Características fisiográficas de las subcuencas.....	43
3.5 Parámetros de los tramos de cauce obtenidos con la extensión HECGeo-HMS...	43
3.6 Pesos espaciales de cada pluviómetro en cada subcuenca.....	44
3.7 Estaciones climatológicas que influyen en las subcuencas en estudio.....	47
3.8 Series máximas anuales de precipitación en 24 horas.....	47
3.9 Función de probabilidad que más se ajustó a las series de datos históricos.....	52
3.10 Alturas de precipitación en mm calculados para las tormentas de diseño en las estaciones climatológicas.....	54
3.11 Pluviómetros automáticos que integra la red del sistema de alertamiento hidrometeorológico de Monterrey.....	55
3.12 Número de eventos mayores a 15 mm en los pluviómetros automáticos que integra la red del sistema de alertamiento hidrometeorológico de Monterrey.....	55
3.13 Características de los eventos de lluvia mayores a 15 mm registrados en los pluviómetros automáticos durante el periodo junio 2005-octubre 2007...	56
3.14 Pesos temporales de cada pluviómetro automático en cada subcuenca.....	60
4.1 Descripción de los elementos hidrológicos en el programa HEC-HMS.....	62
4.2 Gastos pico en m ³ /s obtenidos en las subcuencas y sistios de interés.....	68
5.1 Principales estructuras de cruce en los cauces que fueron consideradas en el modelo en la subcuenca del río La Silla y del Arroyo Topo Chico.....	81

Índice de Figuras

		Página
1.1	Efectos de las inundaciones ocasionadas por Erika en el 2003 y por un sistema frontal en el 2007 en la zona metropolitana de Monterrey.....	14
3.1	Mapa de México donde se indica el área de estudio en el estado de Nuevo León.....	25
3.2	Localización del área de estudio, indicando el límite de las subcuencas del río La Silla y Arroyo Topo Chico.....	26
3.3	Trayectoria de ciclones y tormentas tropicales que han impacto al estado de Nuevo León.....	28
3.4	Mapa con la distribución de suelos en la subcuenca del arroyo Topo Chico.....	30
3.5	Mapa de distribución de los tipos de suelo en la subcuenca del río La Silla.....	31
3.6	Mapa con la distribución de cobertura vegetal en la subcuenca del Arroyo Topo Chico.....	32
3.7	Mapa con la distribución de cobertura vegetal en la subcuenca del río La Silla..	33
3.8	Mapa de discretización de la subcuenca arroyo Topo Chico.....	35
3.9	Mapa de discretización de la subcuenca del río la Silla.....	36
3.10	Perfil del cauce para el cálculo de la pendiente media mediante el criterio de Taylor y Schwartz.....	38
3.11	Mapa de número de curva de la subcuenca del río La Silla.....	41
3.12	Mapa de número de curva de la subcuenca del arroyo Topo Chico.....	42
3.13	Polígonos de Thiessen para la subcuenca del río la Silla.....	45
3.14	Polígonos de Thiessen subcuenca arroyo Topo Chico.....	46
3.15	Curva de magnitud frecuencia de la precipitación máxima en 24 horas para las estaciones consideradas.....	54
3.16	Curva media porcentual acumulada de la precipitación y tiempo para los eventos registrados en el periodo 2005-2007 de los pluviómetros automáticas..	56
3.17	Hietograma tipo para 24 horas de duración para la estación convencional Monterrey, considerando la curva media del pluviómetro Arroyo seco (AS-06)...	57
3.18	Curva masa de las tormentas mayores a 30 mm analizadas en 420 minutos para los pluviómetros automáticos.....	59
3.19	Hietograma para la estación convencional Monterrey, considerando la curva masa media del pluviómetros Fierro (FE-04).....	59
4.1	Modelo de cuenca del río La Silla y los sitios de cálculo de hidrogramas.....	63
4.2	Modelo de cuenca del Arroyo Topo Chico y los sitios de cálculo de hidrogramas	64
4.3	Hidrogramas de diseño a la salida de la subcuenca del río La Silla.....	68
4.4	Hidrogramas de diseño a la salida de la subcuenca del Arroyo Topo Chico.....	69
5.1	Modelo digital de elevación en formato raster de la subcuenca del río La Silla con una resolución espacial de 4.0 m.....	71
5.2	Modelo digital de elevación en formato raster de la subcuenca del río La Silla con una resolución espacial de 5.0 m.....	72
5.3	Barra de menú de la herramienta HEC-GeoRAS para crear las diferentes capas para la representación del modelo hidráulico del río.....	73
5.4	Red geométrica del modelo dendrítico de la subcuencas del río La Silla.....	74
5.5	Red geométrica del modelo dendrítico de la subcuenca del arroyo Topo Chico..	75
5.6	Asignación de los coeficientes de rugosidad "n" en la sección transversal.....	77
5.7	Condiciones existente en el canal del cauce y las márgenes para la selección de coeficientes de rugosidad "n" en la sección transversal del río La Silla.....	77

5.8	Asignación de los coeficientes de rugosidad “n” en la sección transversal del arroyo Topo Chico.....	77
5.9	Condiciones existente en el canal del cauce y las márgenes para la selección de coeficientes de rugosidad “n” en la sección transversal del arroyo Topo Chico.....	78
5.10	Gastos máximos en la subcuenca del río La Silla.....	78
5.11	Gastos máximos en m ³ /s en la subcuenca del arroyo Topo Chico.....	79
5.12	Condiciones de frontera consideradas para el cálculo de los perfiles de agua en el río La Silla.....	80
5.13	Condiciones de frontera consideradas para el cálculo de los perfiles de agua en el arroyo Topo Chico.....	80
5.14	Tirantes de agua en una sección transversal para cada gasto analizado en el río La Silla	82
5.15	Tirantes de agua en una sección transversal para cada gasto analizado en el arroyo Topo Chico.....	83
5.16	Perfil hidráulico del cauce principal río La Silla para los gastos transitados.....	84
5.17	Perfil hidráulico del cauce principal arroyo Topo Chico para los gastos transitados.....	84
5.18	Límite del polígono de inundación con la zonificación de amenazas en la subcuenca del río La Silla.....	85
5.19	Mapa con el límite del polígono de inundación con la zonificación de amenazas en la subcuenca del río la Silla.....	86
5.20	Mapa con el límite del polígono de inundación con la zonificación de amenazas en la subcuenca del arroyo Topo Chico.....	87

Capítulo 1 INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

México se encuentra situado en una región afectada por diversos fenómenos naturales que anualmente causan daños, pérdidas económicas y lamentablemente, pérdida de vidas humanas. (CENAPRED, 2005)

La ubicación del país y sus características geográficas favorecen también el embate de fenómenos hidrometeorológicos. Asociadas a los huracanes o de manera independiente, también se presentan lluvias torrenciales que provocan inundaciones y deslaves.

Por sus efectos, los desastres pueden tener importantes consecuencias en el ámbito económico y social, en el desarrollo de una región e inclusive llegar a comprometer la seguridad nacional, y por tanto, su impacto puede incidir significativamente en el bienestar y calidad de vida de sus habitantes. Así, en las últimas dos décadas (1980-1999), los efectos causados por los desastres en México, significaron, en promedio anual, pérdidas de 500 vidas humanas y daños materiales por 700 millones de dólares. (Bitrán, 2001)

Los destrozos causados por el Huracán Gilberto el 17 de septiembre de 1988, afectaron seriamente la economía de Nuevo León causando la muerte de cientos de personas, dejando a otras sin empleo, vivienda y alimentación. Las cifras finales fueron de 180 muertes, 30 mil evacuados y 20 mil damnificados. (Bitrán, 2001)

Para el periodo 1996-2003, se calculó que los costos monetarios del deterioro ambiental, incluyendo los desastres naturales, representaron un promedio anual de aproximadamente 10.36% del PIB en México. De no detenerse esta situación, el crecimiento económico del país, así como el bienestar de todos los mexicanos, se verá seriamente comprometido. (PND 2007-2012)

El presente estudio da a conocer las principales amenazas naturales de tipo hidrológico, que inciden en las cuencas urbanas del río La Silla y del Arroyo Topo Chico, para posteriormente definir las áreas críticas o de mayor riesgo ante la ocurrencia de un evento hidrológico. Para tal fin, se empleó el Sistema de Información Geográfica (SIG), como herramienta para la elaboración de los mapas de amenaza que nos indicarán cuales son los elementos expuestos de la sociedad (viviendas, vialidades, infraestructura en general) en las dos cuencas en análisis ante la ocurrencia de un evento hidrológico. El desarrollo de mapas de inundación para la zonificación, es parte de los componentes no estructurales, el primer producto que debe ser obtenido para estas medidas es un mapa de inundación que represente el alcance de las zonas inundadas para un determinado caso real o hipotético de tormentas y de esta manera contar con una herramienta que oriente la gestión de riesgo en estas cuencas.

1.2 Importancia del estudio

Dentro del proceso del conocimiento, el enfoque sistémico, es tal vez el más aplicable para abordar la conceptualización de cuenca hidrológica y su posterior desarrollo. Un enfoque sistémico de lo que se considera cuenca, facilita un mejor conocimiento de su estructura y función

en términos que puede definir elementos y relaciones. Además, permite analizar y evaluar factores involucrados dentro de contextos mayores o menores desde diversos escenarios (administrativos, económicos, naturales, socio-culturales, etc.) (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2004)

En México, el enfoque sistémico y gestión de cuencas hidrológicas para la reducción de la vulnerabilidad y riesgo a desastres naturales, aun es incipiente, prueba de ello es, como en los centros urbanos importantes, la deforestación, el cambio de uso de suelo (urbanización) y la existencia de asentamientos humanos en zonas inundables, ocasionan que, ante la incidencia de tormentas locales en las cuencas aumenten los caudales de escurrimiento, que bajan a gran velocidad arrastrando piedras y lodo, afectando la infraestructura de la ciudad y viviendas.

La gestión de cuencas debe tener como un enfoque fundamental, la reducción de esta vulnerabilidad, principalmente la asociada a fenómenos hidrometeorológicos, específicamente a inundaciones que se abordan con este trabajo.

La necesidad de actualizar los mapas de inundación y obtener hidrogramas realistas en respuesta a eventos o tormentas específicas que se presentan en las cuencas en estudio y las inundaciones que puedan generar, es evidente su obtención para la gestión.

La evaluación de las inundaciones provee una clara visualización de las zonas afectadas y la necesidad de protección contra las inundaciones o la necesidad de políticas y la regulación de llanuras de inundación. En general, "después del hecho" los proyectos son normalmente propuestos basados en la historia reciente de los daños que dejan las inundaciones. Una metodología como la desarrollada ayudará a la evaluación de una gama de posibles eventos para identificar mejor las medidas de reducción de las inundaciones.

Por otra parte, se pretende contribuir a la estrategia 3.3 del Eje rector 3 en el PND 2007-2012 referente a prevenir y atender los riesgos naturales, que contempla sensibilizar a las autoridades y a la población de la existencia de riesgos y la necesidad de incorporar criterios para la prevención de desastres en los planes de desarrollo urbano y en el marco normativo de los municipios. (PND 2007-2012)

Todas las declaraciones anteriores permiten no sólo la planificación sino también de la previsión mediante el pronóstico anticipado de las zonas probables de ser afectadas.

1.3 Planteamiento del problema

El crecimiento de la mancha urbana de la zona metropolitana de Monterrey, está afectando y en las próximas décadas, seguirá afectando con más intensidad la respuesta hidrológica de las cuencas, debido a una urbanización creciente con el consecuente incremento del escurrimiento directo que provocan las lluvias a causa de los nuevos desarrollos urbanos que están cubriendo de concreto y asfalto esta gran urbe.

Específicamente en las cuencas objeto de estudio, los eventos hidroclimatológicos mas recientes (Emily en julio 2005, frentes fríos) han ocasionado caos vial en avenidas principales y retrasos de tiempos que afectan entre otros, al comercio; inundaciones en zonas habitacionales, comerciales e

industriales; daños en la infraestructura pluvial existente (socavación en la canalización, azolve de colectores), daños a infraestructura vial y urbana en general.

Se tienen nuevas configuraciones de la llanura de inundación debido a las recientes modificaciones de flujo de las corrientes por puentes, alcantarillas, sistemas de drenaje de aguas o invasiones.



Figura 1.1 Efectos de las inundaciones ocasionadas por Erika en el 2003 y por un sistema frontal en el 2007 en la zona metropolitana de Monterrey.

El Gobierno del Estado de Nuevo León ha realizado acciones estructurales comprendidas en el proyecto denominado "Proyecto para la Construcción de Infraestructura de Control de Inundaciones en el AMM", que busca atacar la problemática de inundación en 19 puntos de riesgo, dentro de las cuencas urbanas, de un total de 53 identificados como zonas de inundación. En el año 2006, se atendieron 5 zonas más, a través de 6 proyectos de infraestructura pluvial que busca beneficiar a los municipios de Apodaca, Escobedo, Guadalupe, Juárez y Monterrey. En orden de prioridad tiene identificados poco más de 420 puntos potencialmente inundables a todo lo ancho y largo de la mancha urbana del AMM.

Por otra parte, desde el año 2007, el gobierno de Nuevo León ha trabajado en la elaboración del Atlas de Peligros Naturales con un enfoque holístico de los fenómenos naturales que afectan a la AMM, con el objeto de aplicar este instrumento en la iniciativa de reforma a la Ley de Ordenamiento Territorial de los Asentamientos Humanos y de Desarrollo Urbano presentada ante el Congreso del Estado, dichas reformas, tienen como fin el tener un mayor control en cuanto a autorizaciones para el desarrollo de asentamientos humanos (urbanización).

Se está en el desarrollo de mejores prácticas para mitigar las pérdidas debido a la capacidad destructiva de las inundaciones. Con el continuo crecimiento de la población, es cierto que sin la debida orientación, un gran número de viviendas se construirán en las zonas de riesgo a inundaciones. Los recientes desastres naturales con los huracanes Gilberto y Emily han demostrado que la gestión de las inundaciones es un tema pertinente e importante.

Por lo anteriormente expuesto, este estudio contribuye a las acciones emprendidas por el Gobierno del Estado de Nuevo León así como, atender lo establecido en el sexto objetivo del PNH 2007-2012, referente a prevenir los riesgos derivados de fenómenos meteorológicos e hidrometeorológicos y atender sus efectos, específicamente en materia de ordenamiento territorial, para la delimitación de las áreas más vulnerables en términos de inundación, evitando la instalación de asentamientos humanos en ellas, y en la medida de lo posible, proceder a la

reubicación de los habitantes que ya existen en estas zonas, con el fin de garantizar su seguridad. (PNH 2007-2012)

Para este caso, se estudió la problemática, en dos subcuencas urbanas, la cuenca del río La Silla y arroyo Topo Chico, utilizando el Sistema de Información Geográfica (SIG) para visualizar a través de mapas de riesgo las principales áreas críticas, y emprender acciones de planificación o emergencia orientadas a reducir la vulnerabilidad de las cuencas al riesgo de inundaciones, que podrían afectar la seguridad de la población y la infraestructura de la ciudad.

Además, el propósito fue llegar a establecer una zonificación de la amenaza por inundaciones.

Conocida el área de inundación para diferentes periodos de retorno o frecuencia, los criterios para determinar el nivel de amenaza fueron definidos con los mismos criterios de período de retorno e intensidad (profundidad de flujo).

Los criterios empleados para la clasificación de las zonas inundables fue el empleado por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales.

- **Zonas de amenaza alta.** Son aquellas zonas en donde la inundación de cualquier frecuencia (periodo de retorno) supera 1 m produciendo graves daños a la población e infraestructura expuesta a ésta. También se considera zona de alta amenaza aquella inundación de alta frecuencia con profundidades de agua desde 0.5 a 1 m.
- **Zonas de amenaza media.** Son aquellas zonas en donde la inundación de frecuencia alta es menor a 0.5 m, y la inundación de frecuencia moderada es menor a 1 m, y producirá generalmente daños reparables a viviendas e infraestructura, pero no destrucción total, y algunas pérdidas de vidas.
- **Zonas de amenaza baja.** Son aquellas zonas en donde la inundación de frecuencia moderada no supera 0.5 m produciendo daños leves a la población e infraestructura. Las inundaciones de frecuencia baja pueden llegar hasta 1 m.

Estos criterios, resultan de la relación entre frecuencia de las inundaciones (periodo de retorno) y su intensidad (tirante o profundidad). Esta forma de evaluar la amenaza es comúnmente usada en países como Australia, Estados Unidos, Suiza.

Lo anterior se representa gráficamente en la siguiente matriz.

Intensidad (tirante del flujo m)	Alta h ³ 1.0 m	Alta	Alta	Alta
	Media 0.5 m£ h < 1.0 m	Alta	Media	Baja
	Baja 0.25 m£ h < 0.5 m	Media	Baja	Baja
		Alta Tr£ 10	Media 10 < Tr£ 50	Baja 50 < Tr£ 100
		Frecuencia o Periodo de retorno (años)		

El conocimiento de las zonas con diferentes niveles de amenaza (intensidad vs frecuencia o probabilidad) se ha utilizado en los procesos de ordenamiento y planificación territorial, por lo que éstos deben representar el uso que se le puede dar y los daños potenciales a que éste uso estaría expuesto.

1.4 Objetivos del estudio

1.4.1 Objetivo General

Determinar las zonas de riesgo por inundación en los cauces de las cuencas urbanas, del arroyo Topo Chico y río La Silla para su empleo en la atención a emergencias y como herramienta en la gestión del riesgo.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Modelar los eventos hidrológicos en dos subcuencas urbanas que presentan un potencial peligro de inundaciones.
2. Determinar los límites de las zonas amenazadas por inundación por medio de simulaciones hidráulicas del cauce principal y sus principales tributarios en las subcuencas utilizando el programa HEC-RAS y la extensión HEC-Geo RAS.
3. Establecer la relación entre la profundidad del flujo y frecuencia (periodo de retorno) para la clasificación de las zonas inundables de las subcuencas.

Capítulo 2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Desastre natural

Un desastre es una situación que se genera como resultado de la manifestación de un fenómeno de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre que, al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en una población, causa alteraciones intensas en las condiciones normales de funcionamiento de una comunidad.

El concepto de desastre y su percepción social no sólo ha variado con el tiempo sino que también ha variado la perspectiva disciplinar desde la cual se ha abordado, el campo se limita a lo que se denomina desastres naturales para referirse a la producción de fenómenos severos de la naturaleza (terremotos, erupciones volcánicas, huracanes, inundaciones), de carácter inesperado y con una visión fatalista de los mismos, en el sentido de su consideración de inevitables.

Actualmente los desastres naturales constituyen un problema sin resolver, en el sentido de que no deben considerarse simplemente sucesos de la naturaleza sino que son situaciones que resultan de la interacción entre lo natural y, la organización y estructura de la sociedad. (Calderón et al., 2003)

Equivocadamente, se tiene la percepción de que los desastres se deben exclusivamente a los peligros o amenazas. Se suele señalar, por ejemplo, al huracán o al sismo como el responsable de las pérdidas durante un desastre o emergencia. En realidad, es la sociedad en su conjunto, la que se expone con su infraestructura física, organización, preparación y cultura característica, al encuentro de dichos fenómenos, manifestando usualmente diversos grados de vulnerabilidad en estos aspectos. Se concluye por tanto, que los desastres no son naturales, es decir, son producto de condiciones de vulnerabilidad y exposición derivados en gran medida por aspectos socioeconómicos y de desarrollo no resueltos, como elevados índices de construcciones informales, marginación, pobreza, escaso ordenamiento urbano y territorial, entre otros. (CENAPRED, 2006)

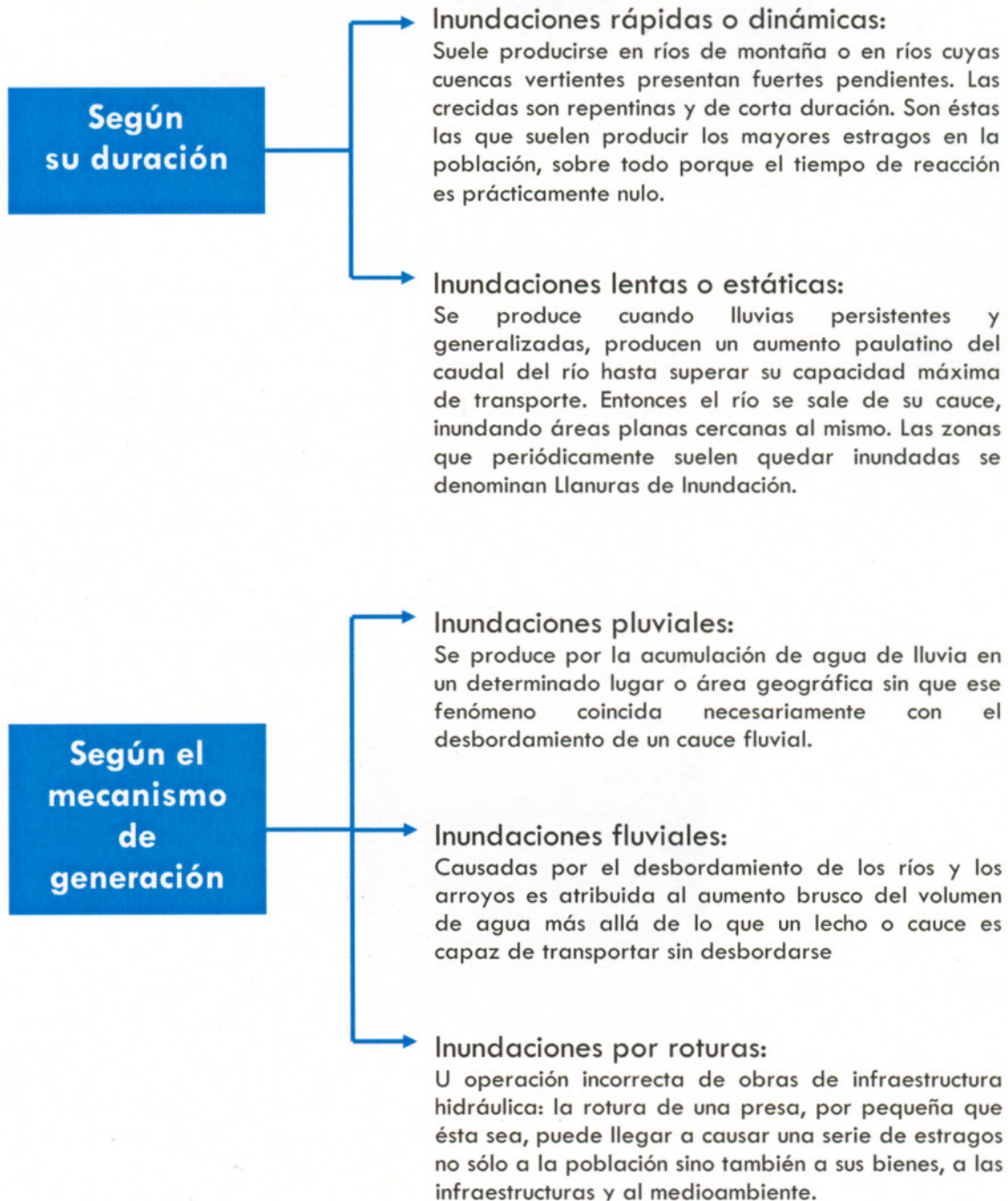
La Ley General de Protección Civil define desastre como el estado en que la población de una o más entidades federativas, sufre severos daños por el impacto de una calamidad devastadora, sea de origen natural o antropogénico, enfrentando la pérdida de sus miembros, infraestructura o entorno, de tal manera que la estructura social se desajusta y se impide el cumplimiento de las actividades esenciales de la sociedad, afectando el funcionamiento de los sistemas de subsistencia.

La definición de desastre usada por la Estrategia Internacional de Reducción del Desastre (EIRD): una ruptura seria del funcionamiento de una comunidad o una sociedad que causa pérdidas humanas, materiales, económicas o medioambientales que superan la habilidad de la comunidad afectada o de la sociedad para lidiar con esta ruptura usando sus propios medios. (IV Foro Mundial del Agua, 2004)

2.1.1 Inundación

Ahora bien, las inundaciones como caso específico de desastre natural se producen cuando lluvias intensas o continuas sobrepasan la capacidad de retención o infiltración del suelo, la capacidad máxima de transporte del río o arroyo es superada y el cauce principal se desborda e inunda los terrenos cercanos a los propios cursos de agua. Las inundaciones son un evento natural y recurrente para un río. (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, 2005)

Las inundaciones pueden clasificarse según su: Duración y Mecanismo de generación.



2.2 Paradigmas sobre desastres naturales

Paradigma se define como, cuerpo de ideas y nociones aceptado por una comunidad científica particular como explicación o modelo que define los problemas, métodos y soluciones que son considerados legítimos dentro de un campo de conocimiento. (Kuhn 1960, citado por Capurro, 2007).

Para indagar sobre cual ha sido la evolución del pensamiento relativo al concepto de desastres naturales, es imprescindible fundamentarse en la lectura de textos y escritos que han surgido a lo largo del tiempo en relación a este concepto. La historia de las ideas no es simplemente una cronología del pensamiento, mecánicamente construida. Se trata de una sinergia de las ideas mismas cruzada por el entendimiento de las circunstancias individuales, colectivas o institucionales en las cuales surgieron. (Lavell, 2004).

2.2.1 Paradigma fatalista

La percepción fatalista, es en el sentido de su consideración de inevitables provocados por el destino e incluso por causas sobrenaturales o divinas (actos de Dios). Esta percepción de los desastres considera la resignación como única alternativa a los mismos y la imposibilidad humana de intervenir en ellos o mitigarlos lleva a estudiar exclusivamente los patrones de rescate, recuperación y gradual retorno a la normalidad. (Calderón et al., 2003)

En el pasado, antes de que la Ciencia hubiera alcanzado el desarrollo que hoy tiene, la tesis de que los desastres eran "Actos de Dios", incomprensibles para los mortales pero supuestamente poseedores de una lógica divina inescrutable, era la más difundida. (Ayala-Carcedo, 2002)

2.2.2 Paradigma fisicalista

La visión fisicalista consiste en un enfoque que atribuye a las amenazas físicas la causalidad casi única de los desastres, sin aportar contenido, ni hacer referencias a las causales de orden social. Existe un enfoque unidimensional del problema, con un énfasis tradicional en el problema, visto desde la perspectiva del desastre per se y no sus condiciones necesarias de existencia, cuales son el riesgo y sus procesos de construcción social. Para entender de qué hablamos, solamente hay que pensar en la dificultad que aún existe para lograr eliminar de nuestro léxico el mal concebido concepto de "desastres naturales", y sus connotaciones fisicalistas o de causalidades externas a la sociedad. (Lavell, 2004).

Esta visión fisicalista del riesgo, es propia de los exponentes de las ciencias naturales o con la visión ingenieril del riesgo, donde la vulnerabilidad constituye un factor estructural relacionada con las características y calidad de la infraestructura construida.

El evento físico, sea terremoto, huracán, inundación u otro, hoy se ve más como un detonador de condiciones de desastre que como una causa unilateral de los mismos. El concepto de "desastre natural" se ha desmitificado, relegando la naturaleza a una posición subordinada, necesaria, en la explicación de la distribución social y territorial de daños y pérdidas.

2.2.3 Paradigma ambientalista o ecológico

El enfoque ambientalista o ecológico orientado hacia el análisis de los riesgos y desastres, sostiene la noción de que la reducción del impacto de las amenazas no puede restringirse a la introducción de medidas estructurales (ingenieriles). Más bien, la solución descansaría en una adecuada combinación de medidas estructurales con cambios en el comportamiento humano, incentivados y regulados por normas, leyes y decretos, además de procesos de educación que conducen a comportamientos más congruentes con el nivel y tipo de amenaza existente. Estas ideas, aparecen por primera vez en un artículo clásico publicado por Gilbert White en 1942, sobre el problema de la reducción de las inundaciones en los Estados Unidos, donde critica severamente el enfoque basado en el uso unilateral de las medidas ingenieriles. Sus críticas iban a tener un impacto importante en las prácticas de manejo, substanciando la introducción de medidas de regulación del uso de la tierra, de zonificación y, de manejo ambiental y planificación de cuencas. (Lavell, 2004).

Este enfoque, relaciona la degradación en las cuencas hidrológicas y los desastres que se suscitan en las mismas, sobre todo en la dirección con referencia a la degradación de los entornos ambientales construidos, particularmente las ciudades; en la década pasada se vio un comienzo del trabajo dedicado a la consideración de los desastres urbanos, dado el peso a las ciudades en la economía y la población (enfoque socio-natural).

La caótica urbanización, la irracional apropiación del espacio y la transformación/degradación del hábitat en las ciudades, la pobreza lastimosa a la que están sometidas las poblaciones, que obliga a la deforestación, la construcción de viviendas inadecuadas y la ocupación de zonas de alta amenaza, es el producto de muchos años de modelos económicos excluyentes. (Mansilla, 2005)

2.3 Conceptos sobre riesgo

El tema del riesgo dentro de la prevención de desastres ha sido tratado y desarrollado por diversas disciplinas que han conceptualizado sus componentes de manera diferente, aunque en la mayoría de los casos, de manera similar.

La existencia de un riesgo implica la presencia de un agente perturbador (fenómeno natural o generado por el hombre) que tenga la probabilidad de ocasionar daños a un sistema afectable (asentamientos humanos, infraestructura, planta productiva, etc.) en un grado tal que constituye un desastre. (SEDESOL)

El riesgo es una condición latente o potencial y su nivel o grado, depende de la intensidad probable del evento desencadenante y de los niveles de vulnerabilidad existentes. Así entendido, el riesgo es la probabilidad de ocurrencia de un desastre. Para que exista un riesgo, debe haber tanto elementos detonadores (sean de orden natural, siconatural, antrópico y/o tecnológico), como una población vulnerable a sus impactos. Los desastres ocurren cuando no se conoce o no se actúa adecuadamente frente a los riesgos a los que estamos expuestos. (Herzer et al., 2004)

En forma cuantitativa se ha adoptado una de las definiciones más aceptadas del riesgo, entendido como la función de tres factores: la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino, es decir, el peligro o amenaza, la vulnerabilidad y el valor de los bienes expuestos. Definido mediante la siguiente ecuación: (CENAPRED, 2005)

$$\text{Riesgo} = f(\text{Peligro, Vulnerabilidad, Exposición})$$
$$R = f(P, V, E)$$

El presente estudio aborda únicamente los riesgos de orden natural y específicamente los relacionados con eventos hidrológicos y las inundaciones que originan en las cuencas urbanas del río La Silla y Arroyo Topo Chico.

2.3.1 Peligro o Amenaza

La amenaza o peligro se refiere a la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de origen natural, que se concentra durante un determinado período de tiempo y en un lugar, afectando a un componente o a la totalidad del sistema territorial expuesto. (Horcajada et al., 2000)

La amenaza está en función de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno y de su intensidad. La intensidad a su vez, se puede definir en función de la profundidad y la velocidad del agua, así como de la duración de las inundaciones.

La forma más común de representar el carácter probabilístico de un fenómeno natural de tipo hidrológico es, en términos de un periodo de retorno (o de frecuencia), que es el lapso que en promedio transcurre entre la ocurrencia de fenómenos de cierta intensidad.

$$\text{Amenaza por inundación} = f(\text{Intensidad} \times \text{Probabilidad de ocurrencia})$$

Donde:

Intensidad = f (profundidad de agua, duración, velocidad)

Probabilidad = f (precipitaciones, eventos desencadenantes (huracanes y tormentas),

2.3.2 Vulnerabilidad

La Vulnerabilidad se define como la predisposición o susceptibilidad intrínseca de los componentes antrópicos del sistema territorial para ser dañados total (destrucción) o parcialmente (deterioro) debido al impacto de la amenaza.

Se vincula, generalmente, con la situación socioeconómica y con los niveles de ordenación e institucionalización del sistema territorial donde potencialmente pueden impactar adversamente las elevadas precipitaciones. (Horcajada et al., 2000).

CENAPRED distingue en términos generales dos tipos de vulnerabilidades, la vulnerabilidad física y la vulnerabilidad social. Siendo la primera más factible de cuantificar, en términos físicos, por ejemplo la resistencia que ofrece una construcción ante las fuerzas de los vientos producidos por un huracán, a diferencia de la segunda, que puede valorarse cualitativamente y relativa, ya que está relacionada con aspectos económicos, educativos, culturales, así como el grado de preparación de las personas.

2.3.3 Exposición

Por último, el concepto de exposición se refiere a la distribución espacial de la población, actividades económicas, bienes materiales, obras de ingeniería civil, servicios públicos, etc., sobre las que puede impactar el fenómeno natural peligroso.

Constituye la expresión espacial de la interrelación entre los eventos lluviosos extraordinarios y sus consecuencias (avenidas) y los elementos vulnerables del sistema territorial. (Horcajada et al., 2000).

2.3.4 Evaluación de la amenaza y vulnerabilidad por medio de los sistemas de información geográfica.

Dada la necesidad de introducir, tratar, analizar y presentar los datos cartográficos, en la aplicación de la metodología utilizada se han empleado, Sistemas de Información Geográfica.

Estas herramientas vienen utilizándose en el análisis de los riesgos naturales con diferentes niveles de desarrollo. En el caso más sencillo, los SIG han sido utilizados como simples sistemas de cartografía automatizada, esto es, como herramientas para introducir, gestionar y representar datos cartográficos. Hoy en día, sin embargo, se aprovechan cada vez más todas las funciones de los SIG (en particular, las funciones de análisis espacial) en el análisis de los riesgos. (Etxeberria et al., 2005)

El procesamiento de datos espaciales ha generado nueva información acerca del mundo y que sirve para el apoyo en la toma de decisiones. Las decisiones finales suelen tratar de mejorar la calidad de vida del hombre por ejemplo, a través de una gestión ambiental o un análisis de evaluación multicriterio.

Las aplicaciones en los modelos de probabilidad-riesgo mediante un SIG se ocupan de la probabilidad de ocurrencia de un suceso y del daño que pueden ocasionar. Un modelo de probabilidad representa la probabilidad de que ocurra un suceso potencialmente dañino, y la vulnerabilidad sería el daño potencial que causaría el suceso. (Felicísimo, 1999)

En el caso de este estudio, la metodología empleada mediante un SIG, considera el empleo de esta herramienta para alimentar los modelos hidrológico e hidráulico, y mostrar los resultados obtenidos tras la ejecución de estos a fin de evaluar las zonas inundables en las cuencas.

2.4 La cuenca hidrológica y la gestión de riesgo

La cuenca hidrológica es el centro de la gestión, y es la unidad básica para la gestión integral del desarrollo sostenido, sobre todo, si se trata de la prevención ante desastres naturales como los ocasionados por eventos hidrológicos; y no solamente es el manejo de los recursos agua y suelo, como se viene haciendo prioritariamente.

La Ley de Aguas Nacionales considera los riesgos en su concepto de la Gestión del Agua, que se define como: proceso sustentado en el conjunto de principios, políticas, actos, recursos, instrumentos, normas formales y no formales, bienes, recursos, derechos, atribuciones y responsabilidades, mediante el cual coordinadamente el Estado, los usuarios del agua y las organizaciones de la sociedad, promueven e instrumentan para lograr el desarrollo sustentable en beneficio de los seres humanos y su medio social, económico y ambiental, (1) el control y manejo del agua y las cuencas hidrológicas, incluyendo los acuíferos, por ende, su distribución y administración, (2) la regulación de la explotación, uso o aprovechamiento del agua, y (3) la preservación y sustentabilidad de los recursos hídricos en cantidad y calidad, considerando los riesgos ante la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios y daños a ecosistemas vitales y al medio ambiente. La gestión del agua comprende en su totalidad a la administración gubernamental del agua; (LAN, 2004).

La gestión de riesgo abarca tanto las políticas y acciones de mitigación, diagnóstico, preparación y prevención de desastres que tienden a reducir la vulnerabilidad, como las estrategias de atención durante la emergencia y la capacidad de respuesta frente a los impactos inmediatos de un desastre, la rehabilitación y la reconstrucción.

Dentro de este aspecto, se incluyen las actividades de tipo legislativo y normativo relacionadas con el uso del suelo, las normativas de construcción, las medidas de seguridad ciudadana, la reglamentación de las técnicas de construcción, que ofrecen más seguridad frente a determinados eventos, como terremotos, huracanes e inundaciones. (Herzer et al., 2004)

Una de las características de la gestión del riesgo, es que cruza múltiples áreas de acción institucional. En algún momento, se relaciona con la gestión de los recursos naturales, o con la planificación urbana, regional y sectorial, con la gestión de la seguridad ciudadana y el desarrollo sostenible, entre otras.

Es precisamente esta diversidad de entidades especializadas, la que da a la gestión del riesgo un matiz sumamente complicado. La concertación, la coordinación, la posibilidad de lograr la compatibilidad y la integración intersectorial, en un marco consensual, es una de las claves para implementar una gestión exitosa. Esta es una tarea compleja que involucra lo económico, lo político, lo social y lo cultural. (Herzer et al., 2004)

2.4.1 Los sistemas de información geográfica en la gestión de riesgos (SIG)

Administrar, regular, controlar y planificar las acciones que se desarrollan en un territorio determinado constituye una tarea muy compleja. En este sentido, identificar las variables que intervienen en el proceso de administración, permite conocer una parte del problema, paralelamente resulta imprescindible comprender y analizar las interrelaciones que existen entre esas variables. De este modo, es posible construir no sólo el escenario de comportamiento en un momento dado, sino simular comportamientos posibles, deseados o no, para conducir la gestión en el sentido deseado; o en el peor de los casos, poder reaccionar a tiempo ante situaciones imprevistas.

La tecnología de Sistemas de Información Geográfica constituye en este sentido, una de las herramientas adecuadas de manejo de información, ya que al usar el modelo de base de datos geo-relacional se asocia un conjunto de información gráfica en forma de planos o mapas a bases de datos digitales. (Salgado, 2005)

En muchos casos, la elaboración de mapas de riesgo pasa por un proceso de superposición de múltiples variables. Este proceso, de cierta complejidad, mediante técnicas tradicionales, se convierte en una sencilla operación en el caso de utilizar los sistemas de información geográfica (SIG). Para el caso de las inundaciones, integra información procedente de aplicaciones de simulación (HEC-RAS) que permiten modelizar procesos para la delimitación de zonas inundables. (Vallejo et al., 2000)

Capítulo 3 CARACTERÍSTICAS FISIGRÁFICAS DE LAS SUBCUENCAS

3.1 Descripción del área de estudio

El área objeto de este estudio corresponde a las subcuencas del río La Silla y del Arroyo Topo Chico, que se ubican en la porción sur y norte, respectivamente, de la mancha urbana de la Zona Metropolitana de Monterrey, ambas subcuencas forman parte del área de contribución del río Santa Catarina que se encuentra en la cuenca 24-F, río San Juan, en la región hidrológica 24 Río Bravo Conchos (Figura 3.1).

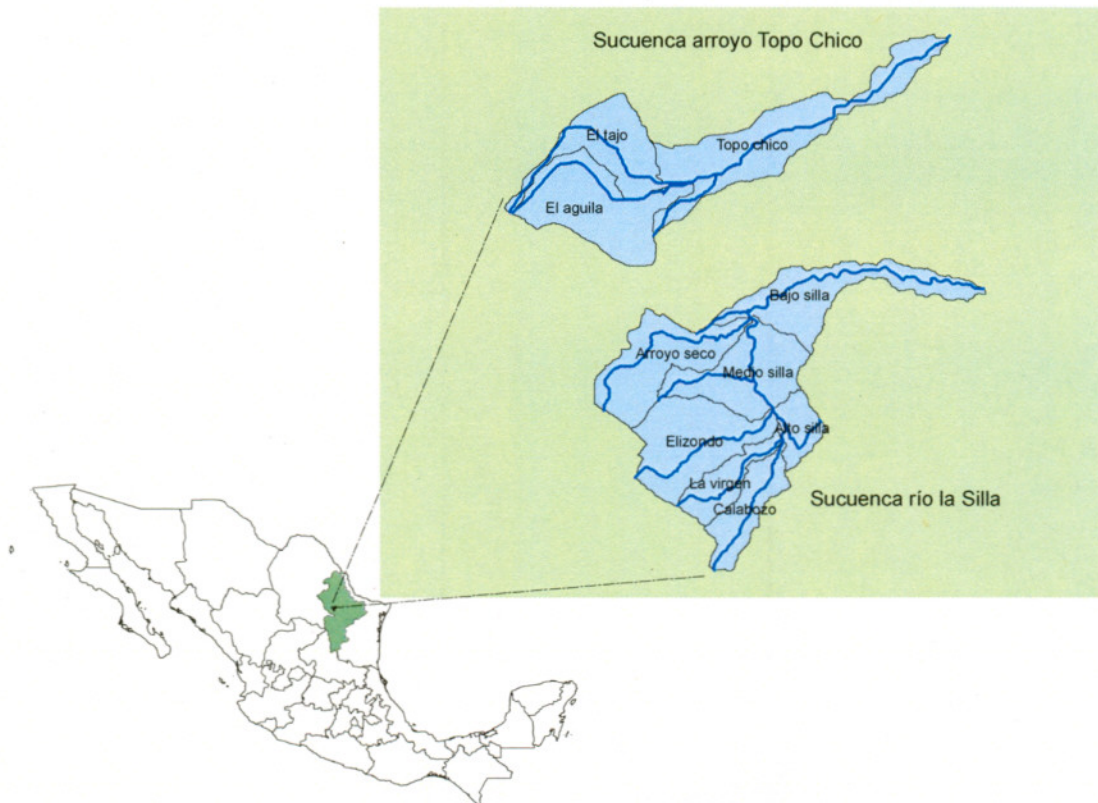


Figura 3.1 Mapa de México donde se indica el área de estudio en el estado de Nuevo León.

La ubicación de las subcuencas, se encuentran en el cuadrante formado por las coordenadas UTM zona 14: 352000, 2820000 y 408000, 2856000 (Figura 3.2).

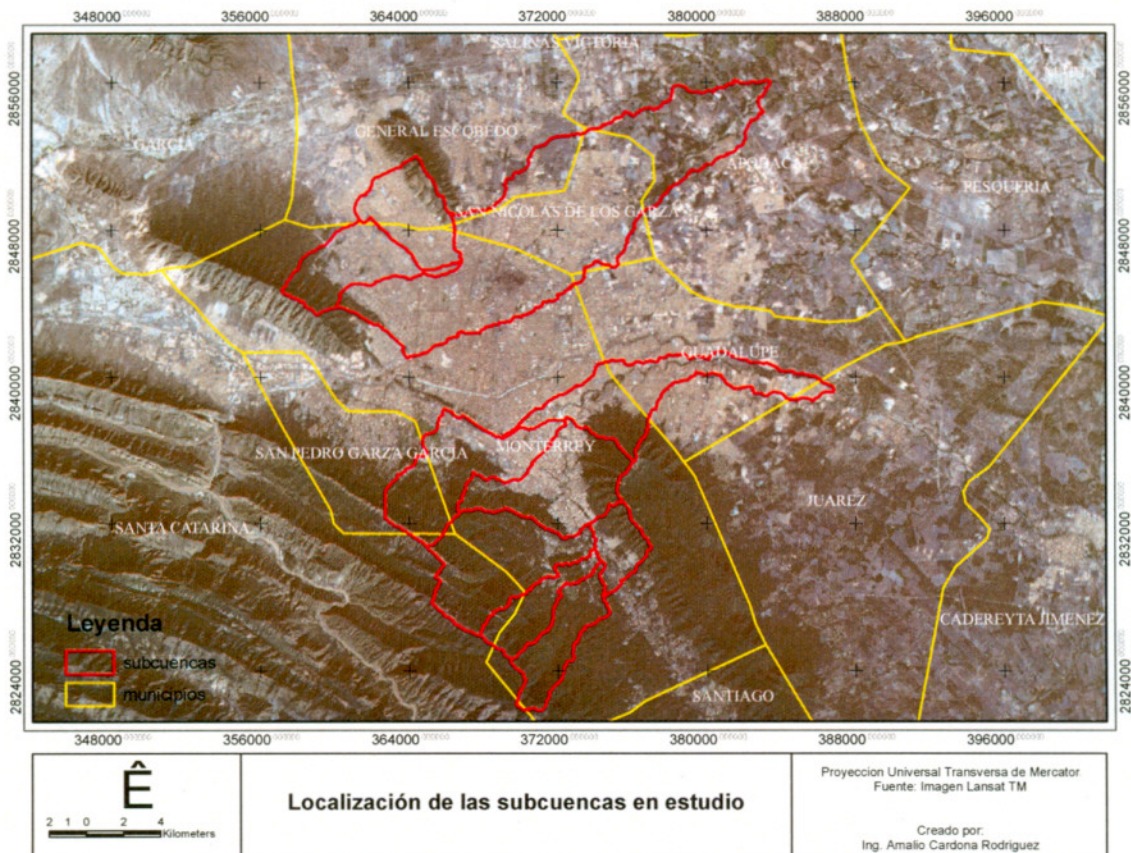


Figura 3.2 Localización del área de estudio, indicando el límite de las subcuencas del río la Silla y arroyo Topo Chico.

Ambas subcuencas presentan un grado de urbanización importante, que para este caso, se estudia como la problemática y su efecto en la modificación de la respuesta hidrológica, como consecuencia del cambio de uso de suelo e incremento de la superficie impermeable dentro de las mismas.

En este trabajo, se realizó la modelación hidrológica de ambas subcuencas para la determinación del escurrimiento directo relacionado a tormentas de diseño para diferentes periodos de retorno (evaluación de la amenaza o peligro), que a su vez sirvieron para analizar el escurrimiento dentro de los principales cauces de las subcuencas mediante la aplicación del software HEC-RAS para delinear los polígonos de inundación correspondientes, que nos indicarán cuales son los elementos expuestos de la sociedad, ante la ocurrencia de lluvias intensas en las subcuencas (evaluación de la vulnerabilidad).

La Figura 3.2, muestra cuales son los municipios que se ubican en forma parcial en las subcuencas y corresponden a: Monterrey, San Nicolás de los Garza, Escobedo y Apodaca en el caso del arroyo Topo Chico, y San Pedro Garza García, Santa Catarina, Monterrey, Guadalupe y Benito Juárez para el río La Silla. Estos municipios forman parte de la zona metropolitana de Monterrey, N.L.

Los resultados del II conteo de población y vivienda 2005 realizado por el INEGI, indican que la ciudad de Monterrey, Nuevo León se ubica como la tercera zona metropolitana más poblada en el país, después del Valle de México y Guadalajara, con una población de 3.7 millones y una tasa de crecimiento en el periodo 2000-2005 de 1.9%. (INEGI, 2005)

La actividad económica en esencia corresponde a actividad industrial, comercial y de construcción.

Respecto a los recursos naturales, la subcuenca del río La Silla aún se encuentran extensiones importantes de bosque de encino y bosque de encino-pino, la más importante población boscosa se ubica en las partes más altas en cuanto a elevación, que pertenece a los municipios de Monterrey, y Guadalupe, (Figura 3.7). Sin embargo, la urbanización en los últimos años se ha disparado hacia estas zonas que anteriormente eran conservadas como áreas de infiltración y recarga de acuíferos y que a la vez amortiguan la magnitud de los escurrimientos hacia aguas abajo.

La subcuenca, está conformada por una corriente principal, a la cual se le denomina río La Silla y una serie de afluentes superficiales que conforman varias microcuencas, entre los principales están las formadas por el arroyo la Virgen, el Calabozo, Elizondo y Arroyo Seco.

En el caso de la subcuenca del Arroyo Topo Chico, ésta presenta un alto grado de urbanización, en la parte alta, existe un área pequeña de bosques de encino y hacia la parte baja, prácticamente en la salida de la subcuenca, zonas de matorral espinoso tamaulipeco (Figura 3.6).

Esta subcuenca, está conformada por la corriente principal llamada arroyo Topo Chico, al cual confluyen dos afluentes importantes denominados arroyo el Tajo y canal el Águila.

3.1.1 Clima

La provincia de la sierra madre oriental presenta una distribución climática muy compleja, ya que se encuentran diversos tipos de climas, secos extremos, semiseco, templados y semicálidos. Estos se deben a la marcada diferencia de altitudes en la sierra. Las diferencias de temperatura son ocasionadas por las cadenas montañosas que producen un efecto de condensación, que a su vez, genera lluvias que se concentran en la vertiente este de la sierra, mientras que en la vertiente oeste, se presenta el fenómeno conocido como sombra orográfica, con menor precipitación y da lugar a los llanos o bolsones con clima seco o semiseco en las zonas de transición de la sierra al altiplano, algunas porciones en la partes altas con climas templado y semicálido (INEGI, 1986).

3.1.2 Precipitación

El régimen de precipitaciones que genera escurrimientos importantes en las subcuencas, se deben a la influencia de ciclones tropicales del océano Atlántico en los meses de junio a noviembre, y a la influencia de sistemas frontales (frentes fríos) en los meses de septiembre a diciembre así como a la presencia de células convectivas.

Ha habido ocasiones en que los ciclones han penetrado en el estado de Nuevo León, los ciclones de julio y agosto de 1909, agosto de 1938, ingresaron al estado ocasionando inundaciones en Monterrey por el desbordamiento del río Santa Catarina. Mas recientemente, los ciclones Beulah

en septiembre de 1967, Gilberto en septiembre de 1988, la tormenta tropical Gabrielle en agosto de 1995 y Emily en julio de 2005, han producido los mismos efectos, a su paso por la zona metropolitana de Monterrey, (Figura 3.3)

Este tipo de eventos, generan condiciones propicias para la ocurrencia de inundaciones, producidas por crecientes rápidas en los cauces principales que atraviesan la zona metropolitana de Monterrey, de ahí la necesidad de contar con mejores medidas para mitigar las pérdidas debido a la capacidad destructiva de las inundaciones, dado que el continuo crecimiento de la población, sin una debida regulación, un gran número de viviendas se construirán en las zonas en riesgo de inundación.

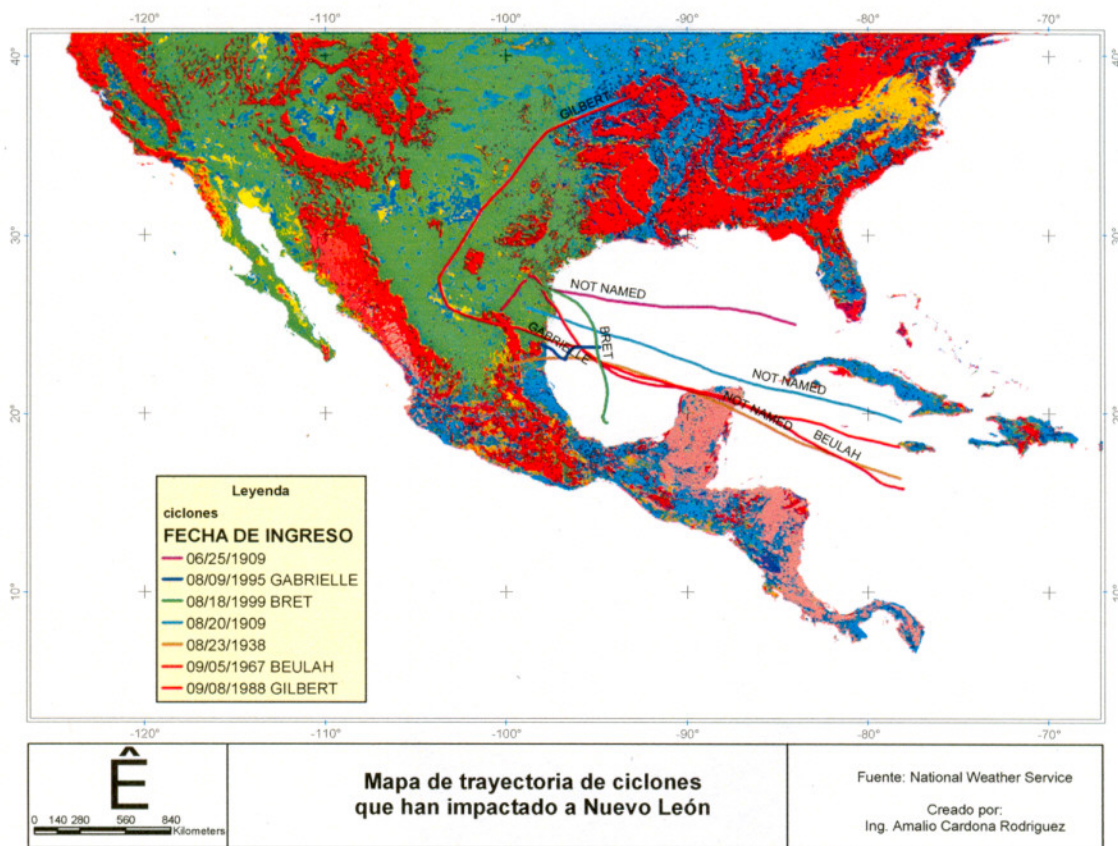


Figura 3.3 Trayectoria de ciclones y tormentas tropicales que han impacto al estado de Nuevo León.

Finalmente, de acuerdo a los registros históricos de precipitación con que cuenta cada estación; la precipitación media anual para el caso del río La Silla es de 651.53 mm y para el arroyo Topo Chico de 569.75 mm.

3.1.3 Edafología

De acuerdo a la clasificación de suelos de la FAO-UNESCO (1970) modificada por CETENAL, que usa los horizontes y características de diagnóstico para la descripción de las unidades de suelo, se distingue para el área de estudio, las siguientes unidades y subunidades (INEGI, 1998).

Litosol: se encuentran en todas las sierras de México, barrancas, lomeríos y en algunos terrenos planos. Se caracterizan por su profundidad menor de 10 cm, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido, no tiene subunidades. Esta clase se distribuyen en la parte más alta de las subcuencas.

Regosol: tiene poco desarrollo y por ello no presentan capas muy diferenciadas entre sí. Muchas veces están asociados con Litosoles y con afloramientos de roca o tepetate. Frecuentemente son someros. En este caso se presenta la subunidad regosol calcáricos formada por materiales calcáricos. Se distribuye en las partes bajas o planas de las subcuencas.

Vertisol: se caracterizan por su estructura masiva y su alto contenido de arcilla, la subunidad existente es vertisol crómico. Se distribuyen en la parte media y baja de las subcuencas por donde se desarrollan los cauces principales de drenaje.

Xerosol: tiene una capa superficial muy pobre en humus y debajo un suelo rico en arcillas, muchas veces presentan a cierta profundidad aglomeraciones de caliche con algún grado de dureza. Presenta la subunidad háplica y se distribuye en la parte alta de las subcuencas.

Luvisol: se caracterizan por tener un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo. La morfología de estos suelos se caracteriza por la presencia de un horizonte ócrico A1 (0-25 cm), en la zona de estudio se presenta en zonas pequeñas y corresponde a la subunidad ortico.

Rendzina: tiene una capa superficial abundante en materia orgánica que descansa sobre roca caliza, generalmente son suelos arcillos y poco profundos (25 cm), en su mayor parte se localizan sobre las partes altas de la sierra de la subcuenca del Arroyo Topo Chico.

Feozem: se caracteriza por tener una capa superficial rica en materia orgánica, son de profundidad variable y se encuentran en cualquier tipo de relieve, las subunidades que se encuentran en la zona son feozem calcárico.

Castañozem: frecuentemente tiene mas de 70 cm de profundidad presentan una capa rica en materia orgánica con acumulación de caliche suelto o ligeramente cementado en el subsuelo, la subunidad existente en la parte alta de la subcuencas del arroyo Topo Chico es castañozem háplico con acumulación calcárea abajo del horizonte A.

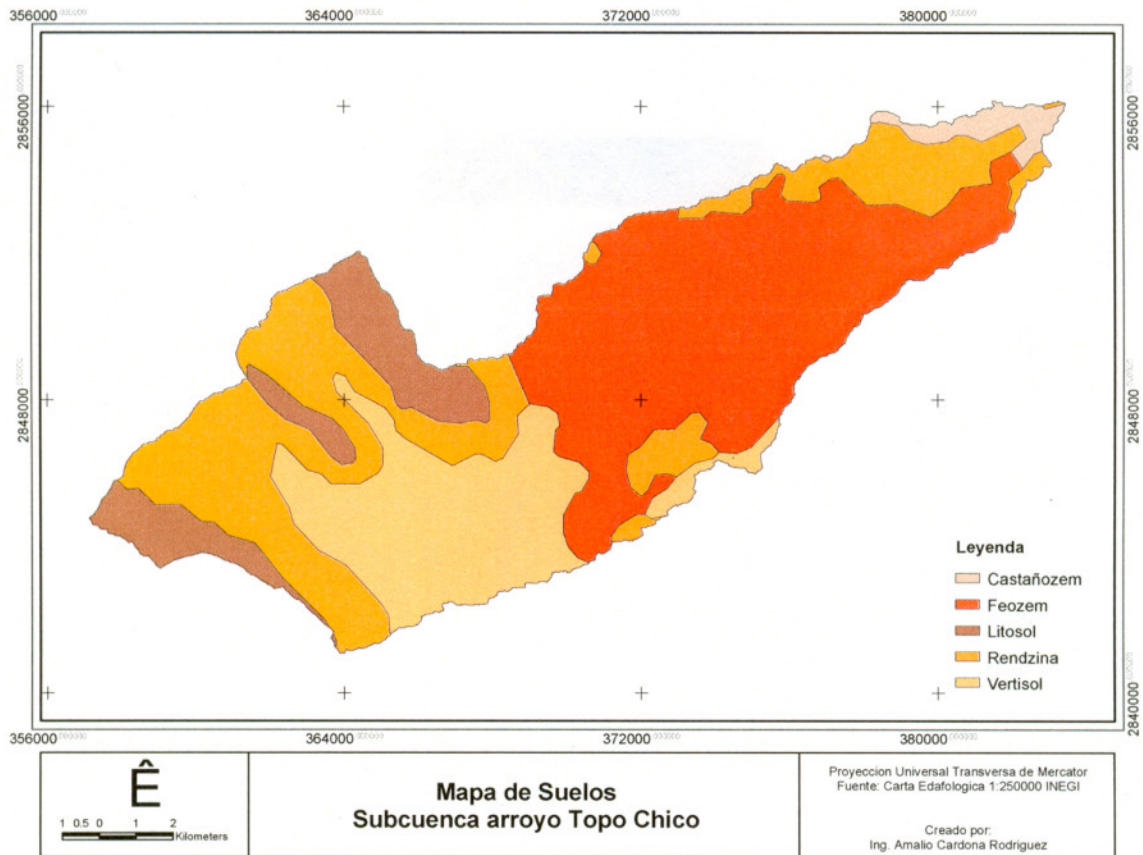


Figura 3.4 Mapa con la distribución de suelos en la subcuenca del arroyo topo chico

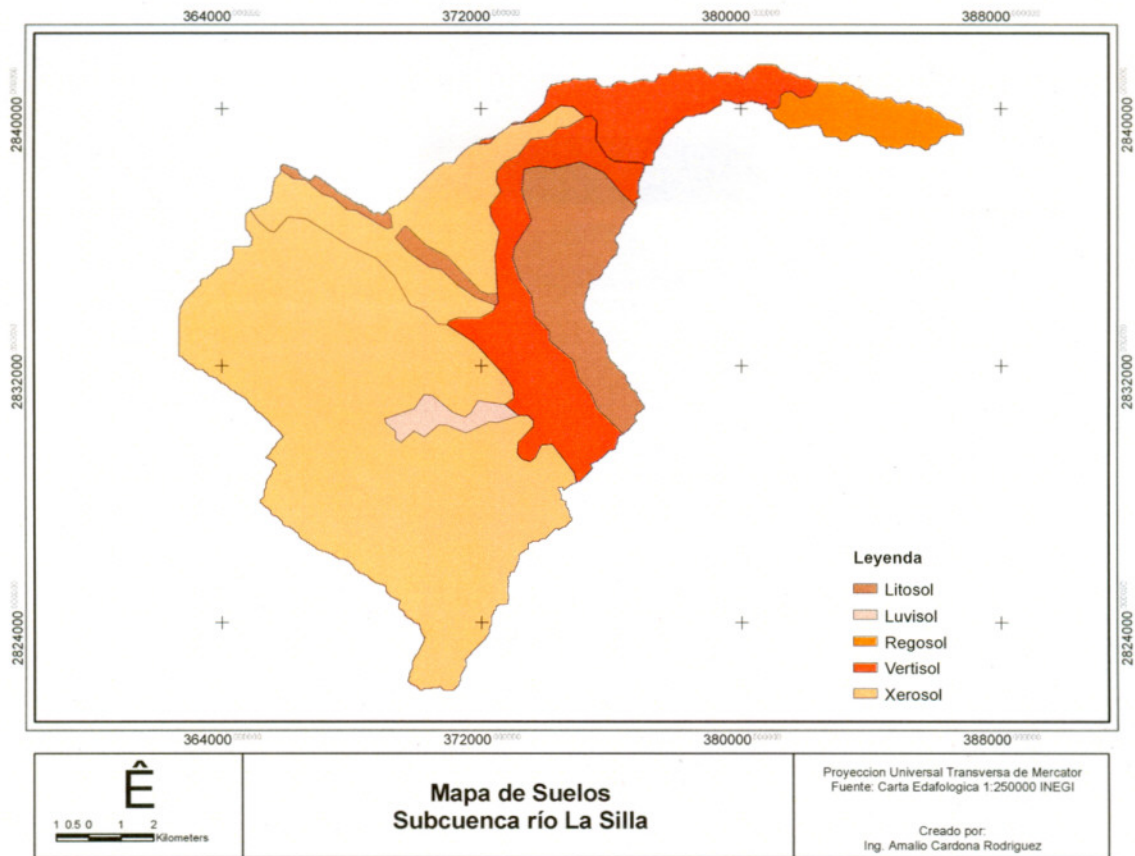


Figura 3.5 Mapa de distribución de los tipos de suelo en la subcuenca del río la Silla.

3.1.4 Cobertura vegetal y uso de suelo

Los ecosistemas que prevalecen en general en el área de estudio se describen a continuación (INEGI, 1998):

Matorral submontano: se localiza en las partes medias de las subcuencas en cuanto altitud se refiere (cañones de la sierra). Existen tres estratos que van de 2 a 5 metros de alto, un estrato medio de 1 a 2 metros de alto y el último de menos de 0.8 metros de alto, se encuentran en contacto con los bosques de encino y bosques de encino-pino.

Bosques: los bosques de encino y bosque de encino-pino, en general se ubican en zonas donde la humedad es más favorecida, en la sierra que corresponde a las partes de mayor altitud en las subcuencas, las especies tienen alturas que van desde 8 hasta 17 metros, éstas zonas integran las áreas de amortiguamiento de las lluvias.

Matorral desértico rosetófilo: está conformado por especies cuyo estrato va desde 0.4 hasta 1.5 metros de altura y se encuentra en contacto con los bosques de encino en las zonas de mayor altitud.

Los demás tipos de cobertura vegetal corresponden a pastizal inducido y pastizal cultivado y en menor proporción a chaparral.

El uso de suelo denominado zona urbana, está integrado por los desarrollos habitacionales, industriales e infraestructura como vialidades que en conjunto forman una capa impermeable dentro de las subcuencas, para este caso, ocupa una superficie importante.

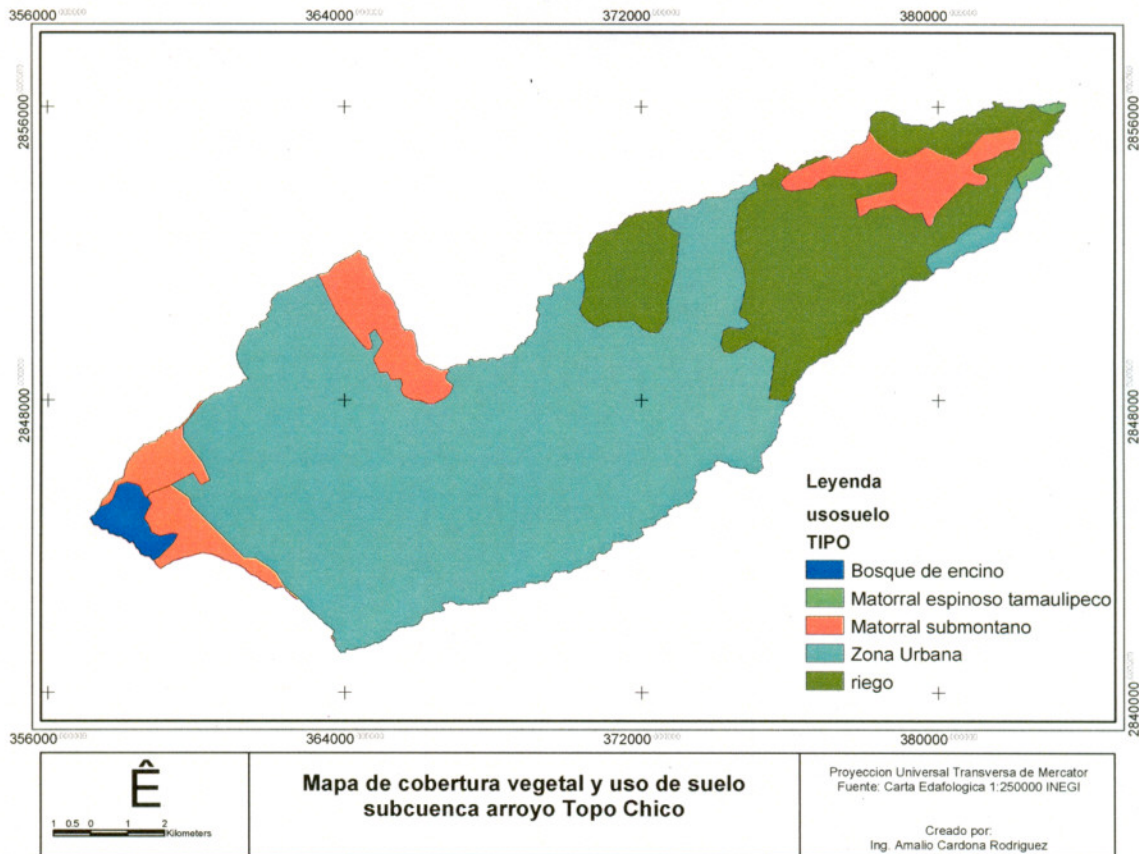


Figura 3.6 Mapa con la distribución de cobertura vegetal en la subcuenca del arroyo topo chico

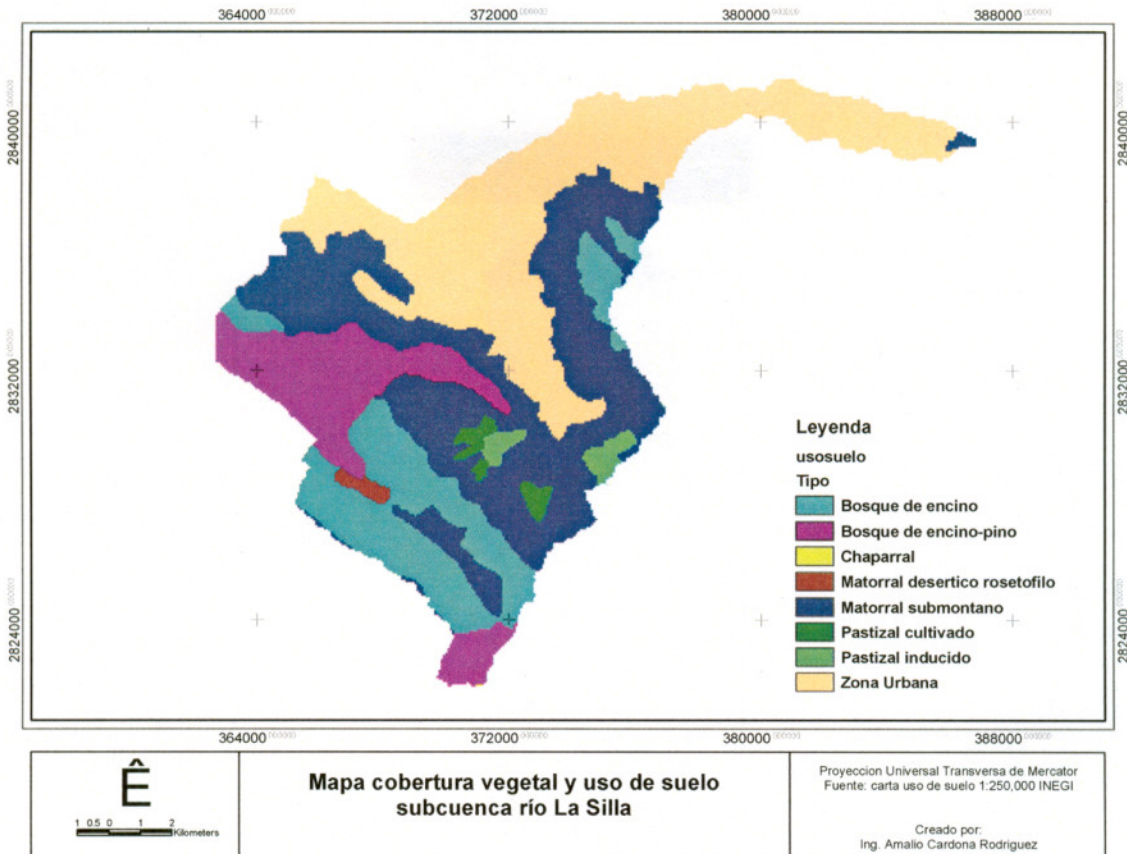


Figura 3.7 Mapa con la distribución de cobertura vegetal en la subcuenca del río la silla

3.2 Características fisiográficas de las subcuencas

Los parámetros fisiográficos relacionados con la respuesta hidrológica de las subcuencas fueron obtenidos del procesamiento de los MDE del área de estudio, empleando la herramienta denominada Arch Hydro Tools y el uso de la extensión para la modelación hidrológica geoespacial HEC Geo-HMS para ArcGis 9.1. El procedimiento que se siguió para la obtención de las características fisiográficas y la creación del modelo hidrológico es el que a continuación se describe.

3.2.1 Trazo de subcuencas y red de drenaje en ArcGis 9.1

El primer paso en la modelación hidrológica involucra la delineación de la red de drenaje y el trazo de las cuencas, para la obtención de las características fisiográficas, tales como área, pendiente, longitud de cauces y densidad de la red de drenaje. Tradicionalmente, esto ha sido hecho manualmente (y todavía lo es) usando mapas topográficos con curvas de nivel. Con la disponibilidad de los modelos digitales de elevación (MDE) y las utilerías desarrolladas para GIS,

las propiedades fisiográficas de las cuencas pueden ser extraídas mediante procesos automatizados.

El procesamiento de los MDE para el trazo de las cuencas está referido como un preprocesamiento del terreno, los archivos necesarios para este proceso consisten en el MDE de la zona de interés en formato raster, en este caso, se utilizó una resolución de celdas de 30x30 metros, los MDE se generaron a partir las curvas de nivel de las cartas topográficas digitales correspondientes a las cartas G14C15, G14C16, G14C25 y G14C26, en escala 1:50,000. No obstante, estos MDE pueden obtenerse de la página web del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). El otro archivo necesario, fueron los datos de la hidrología o corrientes como archivo shapefile que contenga la red de drenaje para el área de estudio, que también puede obtenerse de INEGI.

La herramienta usada en el preprocesamiento del terreno, corresponde a las aplicaciones desarrolladas por El Centro de Investigación de Recursos Agua, CRWR por sus siglas en inglés, de la Universidad de Texas, en Austin y ESRI (Environmental System Research Institute), llamadas Water Resources (Recurso Hídrico), y se refiere al Arch Hydro Tools, que se empleó en el programa ArcGis 9.1 para el trazo de las subcuencas, la red de drenaje y algunas otras características que en conjunto, describen los patrones de drenaje de una cuenca. Estos resultados sirvieron como archivos de entrada para la modelación hidrológica realizada con el programa HEC-HMS.

3.2.2 Discretización de las subcuencas

Debido a que en las subcuencas, las características de las precipitaciones no son uniformes en el espacio, fue necesaria la discretización de las mismas para determinar hidrogramas en los puntos de interés de las subcuencas.

Este proceso se realizó con la herramienta Arc Hydro Tools, donde se definió la red de drenaje y el área de aportación de cada escurrimiento. En este paso se clasificaron todas las celdas con flujo precedente de un número de celdas mayor a un umbral definido por el usuario como pertenecientes a la red de drenaje. El umbral puede especificarse como área en unidades del MDE al cuadrado o como número de celdas. El valor por default del algoritmo es de 1% y cuanto menor sea el umbral, resulta una red de drenaje más densa y mayor será el número de subcuencas que defina Arc Hydro Tools.

El criterio para realizar la discretización fue considerar un valor umbral de área de drenaje para generar un río de 12,200 celdas, que corresponde a un área de: $12,200 \times 30 \text{ m} \times 30 \text{ m} / 1,000,000 \text{ m}^2 = 10.98 \text{ km}^2$. Los valores de 30 m son las dimensiones de las celdas que forman el raster del MDE utilizado para la delineación de las cuencas como se cito anteriormente.

Con este criterio, la subcuenca del río La Silla, se dividió en siete microcuencas que corresponden a los afluentes llamados Calabozo, la Virgen, Elizondo, arroyo Seco y el cauce principal en Alto Silla, Medio Silla y Bajo Silla.

En el Arroyo Topo Chico, la discretización fue de tres microcuencas: para el arroyo el Tajo, canal el Águila y el cauce principal del Topo Chico.

En la Figura 3.8 y 3.9 se presentan los mapas con la discretización utilizada en cada subcuenca.

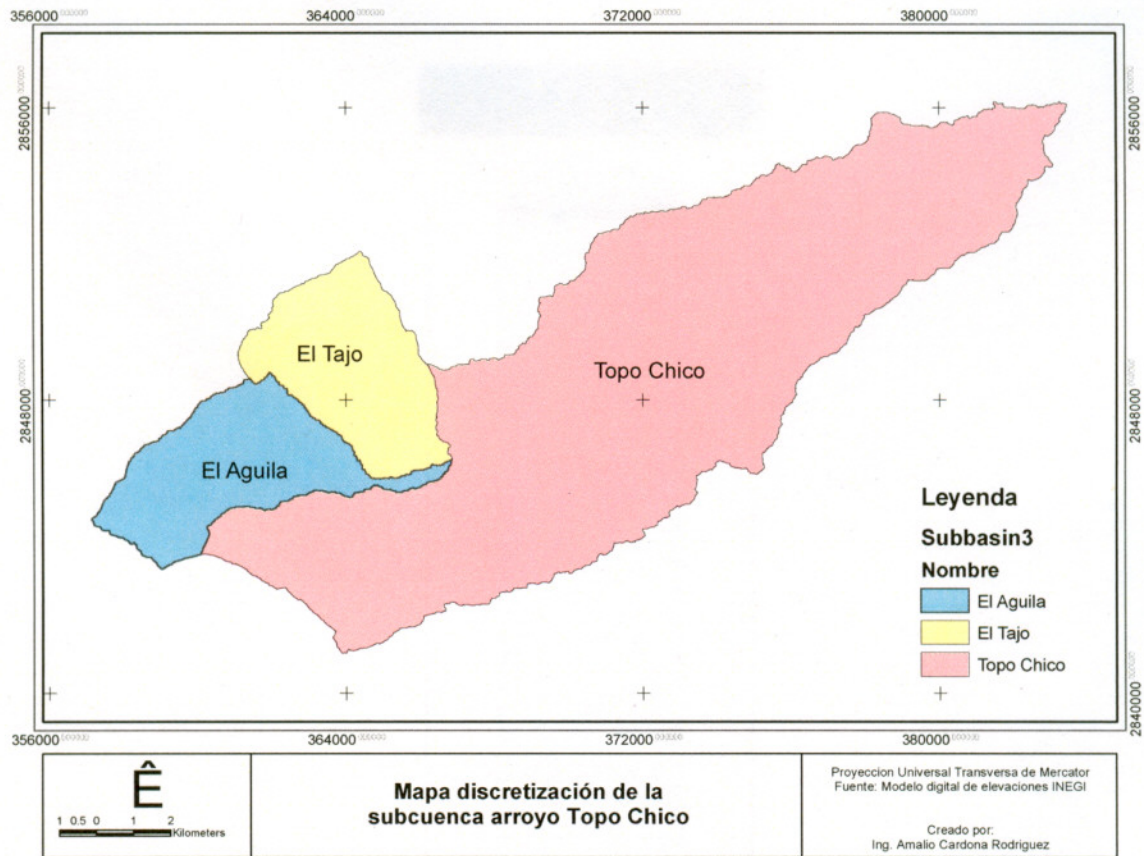


Figura 3.8 Mapa de discretización de la subcuenca arroyo Topo Chico.

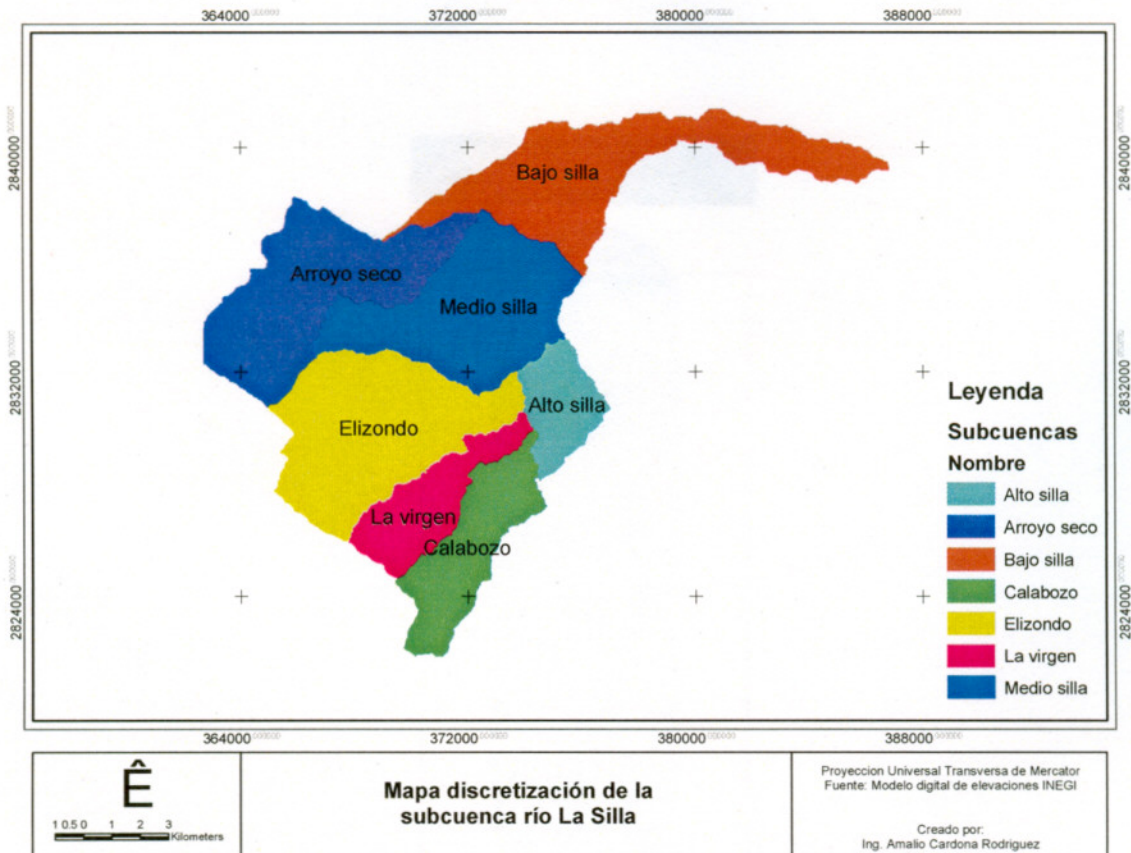


Figura 3.9 Mapa de discretización de la subcuenca del río la Silla.

3.2.3 Área de la subcuenca

El cálculo del área involucró el preprocesamiento del terreno realizado a los MDE descrito en el punto 3.2.1 y la aplicación del criterio para la discretización de las subcuencas del punto 3.2.2, ambos procesos permitieron determinar automáticamente el área de drenaje de las microcuencas en que se dividieron las dos subcuencas a efecto de aplicar un modelo hidrológico semidistribuido para el cálculo de los gastos de escurrimiento.

Los resultados de las áreas estimadas se presentan en la tabla 3.4 con el resumen de las características fisiográficas de las subcuencas.

3.2.4 Pendiente media de la subcuenca y del cauce principal

La pendiente media de las subcuencas se calculó a partir del procesamiento del MDE creado en el punto 3.2.1, con el cual se generó un raster de pendientes. Con el uso de la extensión HEC Geo-HMS y los polígonos de las microcuencas, se calculó la pendiente para cada una de ellas, como el valor promedio definido en el raster de pendientes previamente creado.

Los resultados de la pendiente media de las microcuencas definidas en cada subcuenca se presentan en la tabla 3.4.

Mientras que la pendiente media del cauce principal en cada una de las microcuencas definidas en el río La Silla y del arroyo Topo Chico, se calculó aplicando el criterio de Taylor y Schwartz, que considera en esencia dividir el cauce principal en tramos donde se obtienen pendientes parciales para determinar una especie de pendiente ponderada, mediante la expresión siguiente:

$$S = \frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}}$$

Donde:

S= pendiente media (m/m)

L= Longitud total del cauce (m)

l_1 = Longitud del tramo 1 del cauce (m)

S_1 = Pendiente del tramo 1 del cauce

Cabe mencionar que la extensión HEC Geo-HMS, determina automáticamente este parámetro, sin embargo considera el criterio simplificado en el cálculo de la pendiente media que consiste en determinar el desnivel entre los extremos del cauce y dividirla entre su longitud. No obstante, mediante la opción de River Profile de esta extensión se obtiene gráficamente el perfil del cauce principal y una tabla con los datos del perfil que permite aplicar directamente la expresión de Taylor y Schwartz, facilitando su cálculo.

En la Figura 3.10 se ejemplifica lo anterior para el caso del Arroyo Seco en la subcuenca del río La Silla.

Los resultados de la pendiente media de los cauces principales de las microcuencas definidas en cada subcuenca se presentan en la tabla 3.4.

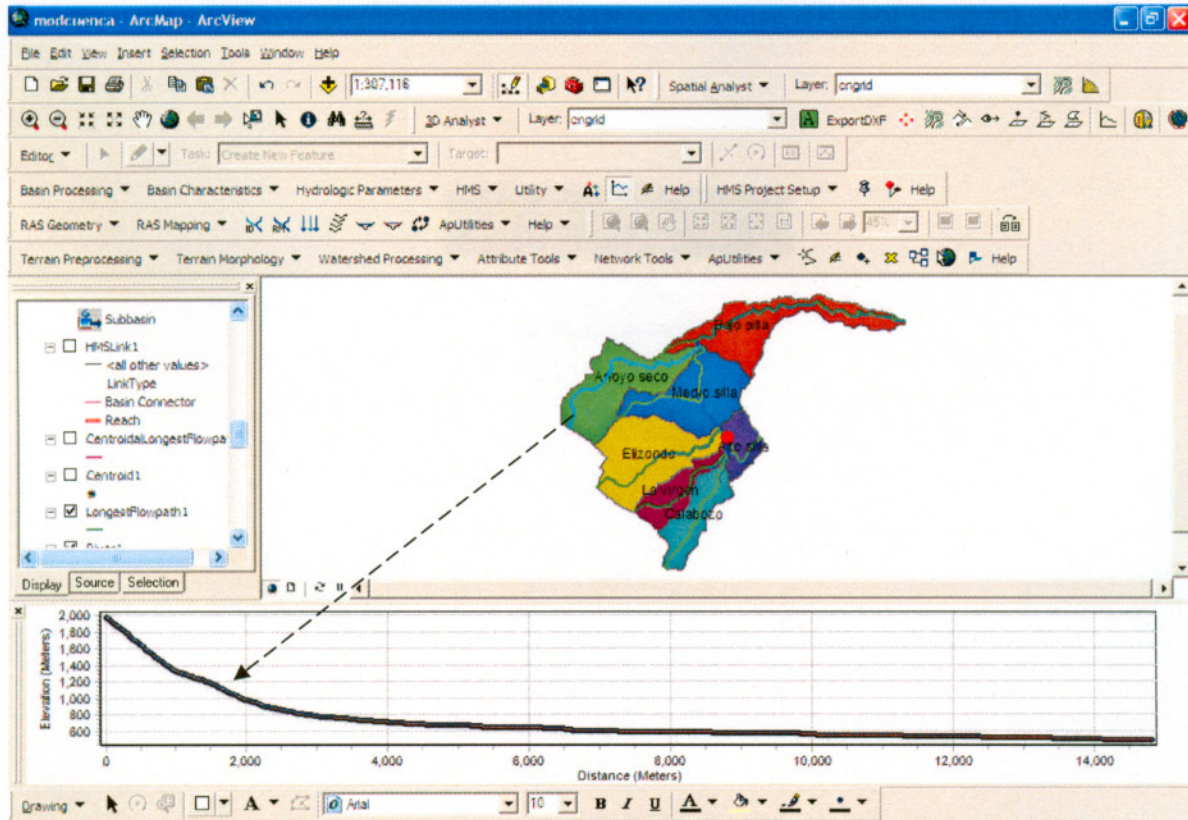


Figura 3.10 Perfil del arroyo seco para el cálculo de la pendiente media mediante el criterio de Taylor y Schwartz

3.2.5 Tiempo de concentración y tiempo de retraso

El tiempo de concentración es el tiempo que transcurre desde que el agua inicia su recorrido desde el punto más alejado de la cuenca hasta la salida de la misma. El tiempo de concentración depende de la longitud máxima del cauce principal y de la pendiente del mismo.

El criterio que se empleó para estimar el tiempo de concentración fue el de Kirpich mediante la expresión siguiente:

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

Donde:

t_c = Tiempo de concentración (hr)

S = Pendiente media del cauce principal (adimensional)

L = Longitud del cauce principal (m)

Esta expresión se aplicó a cada uno de los cauces principales de las microcuencas definidas y los resultados obtenidos son los que se presentan en la tabla 3.4.

El tiempo de retraso es el tiempo que transcurre del centro de masa de la precipitación al pico del hidrograma. Para este caso, se consideró el tiempo de retaso como 0.6 del tiempo de concentración dado que se trata de cuencas menores de 250 km².

$$t_r = 0.6t_c$$

3.2.6 Cálculo del Número de Curva del SCS (Soil Conservation Service)

El método de número de curva está en función del uso de suelo y el grupo hidrológico de los suelos en una cuenca, es el método mas común para predecir el volumen de escurrimiento de un evento de precipitación, de acuerdo al Servicio de Conservación de Recursos Naturales de los Estados Unidos de Norteamérica, (antes Servicio de Conservación de Suelos), muchos de los modelos hidrológicos usan este método para determinar el escurrimiento directo. (Xiaoyong Zhan et. al, 2004)

Para generar el número de curva se utilizó el tema que contiene la cobertura vegetal y el uso del suelo así como el tema de la edafología (tipo de suelo) de las subcuencas, descritos en el punto 3.1.3 y 3.1.4; posteriormente, con el uso de la extensión HEC-Geo HMS en ArcGis 9.1 se crea una malla de número de curva que es usada para determinar cuanta lluvia se infiltra en el suelo (pérdida) y cuanta lluvia contribuye al escurrimiento directo (lluvia efectiva) dentro del modelo hidrológico.

En la Figura 3.11 y 3.12 se presentan los mapas de número de curva obtenidos con este procedimiento.

La información que se consideró para crear la malla número de curva corresponde a las siguientes cartas vectoriales:

- Carta edafológica G1407 escala 1:250,000 serie I. Esta carta se basa en la clasificación mundial de suelos FAO/UNESCO de 1968 la cual fue modificada y adaptada para el país por el CETENAL en 1970. La última actualización de esta carta se realizó en 1998.
- Carta de uso del suelo y vegetación G1407 escala 1:250,000 serie II con captura en campo en el año 1998.

La utilización del método citado, inicia con la asignación de cada tipo de suelo presente en la subcuenca a un grupo hidrológico de suelo en función de las características de infiltración de cada suelo (SCS, 1986).

Tabla 3.1 Descripción de los grupos hidrológicos de suelos.

Grupo hidrológico de suelo	Características
A	Suelos con alto grado de infiltración aun cuando están inundados. Suelos arenosos o gravosos profundos con excelente drenaje.
B	Suelos con un moderado grado de infiltración cuando están inundados. Son suelos de textura fina a media.
C	Suelos con un bajo grado de infiltración cuando están inundados. Son suelos que presentan capas impermeables o suelos de textura fina a muy fina.
D	Suelos con un grado de infiltración muy bajo cuando están inundados. Suelos con alto contenido de arcilla, suelos con capas endurecidas de arcilla cerca de la superficie o suelos superficiales sobre un material rocoso.

A partir de las definiciones de los grupos hidrológicos de suelo presentado en la Tabla 3.1, se procedió a identificar y categorizar todos los suelos encontrados en las subcuencas asignándoles el valor correspondiente, conforme a la metodología descrita en el instructivo de hidrología de la S.A.R.H. (SARH, 1987). El resultado de esta categorización se presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Grupo hidrológico de los suelos encontrados en la subcuenca en estudio.

Unidad	Subunidad	Área (km ²)	Grupo hidrológico de suelo
Río la Silla			
Vertisol	crómico	31.23	C
Xerosol	hálpico	87.00	C
Xerosol	lúvico	19.60	D
Litosol	No aplica	19.71	D
Luvisol	ortico	2.71	C
Regosol	calcárico	6.78	B
Total		167.03	
Arroyo Topo Chico			
Vertisol	crómico	31.45	C
Rendzina	No aplica	47.67	D
Feozem	calcárico	61.82	C
Litosol	No aplica	16.25	D
Castañozem	hálpico	3.34	C
Total		160.53	

De las cartas vectoriales de uso de suelo, se identificaron las clases de cobertura vegetal para las subcuencas bajo estudio. En general se ubicaron 8 tipos de uso de suelo diferentes, predominando los de matorral submontano, zona urbana, bosque de encino y bosque de encino-pino.

La siguiente Tabla 3.3 muestra la clasificación establecida para cobertura vegetal y uso de suelo en las subcuencas con los grupos hidrológicos correspondientes:

Tabla 3.3 Valores de número de curva de acuerdo al uso de suelo y tipo de suelo para las subcuencas de estudio.

Valor	Descripción	Área (km ²)	Grupo Hidrológico			
			A	B	C	D
Río La Silla						
1	Zona Urbana	55.68	77	86	91	94
2	Matorral submontano	58.01	46	68	78	84
3	Bosque de encino	26.88	36	60	70	76
4	Bosque de encino pino	21.14	36	60	70	76
5	Pastizal cultivado	2.06	39	61	74	80
6	Pastizal inducido	2.38	39	61	74	80
7	Matorral desértico rosetófilo	0.87	46	68	78	84
8	Chaparral	0.10	46	68	78	84
Total		167.03				
Arroyo Topo Chico						
1	Matorral submontano	17.82	46	68	78	84
2	Área agrícola	35.04	46	68	78	84
3	Matorral espinoso tamaulipeco	0.56	36	60	70	76
4	Zona Urbana	104.92	67	78	85	89
5	Bosque de encino	2.19	77	86	91	94
Total		160.53				

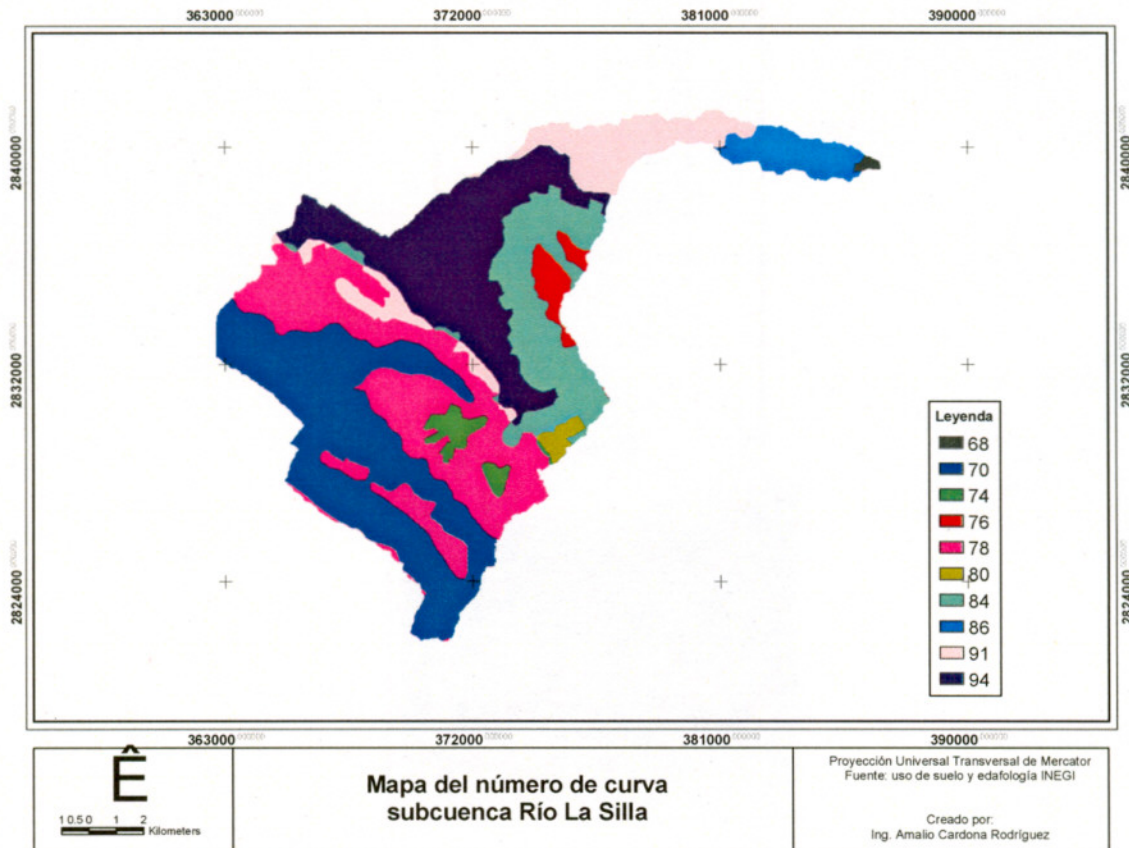


Figura 3.11 Mapa de número de curva de la subcuenca del río La Silla

Con el uso de la extensión HEC Geo-HMS y los polígonos de las microcuencas, se calculó el número de curva promedio para cada una de las mismas, como el valor promedio de la malla de número de curva previamente creada.

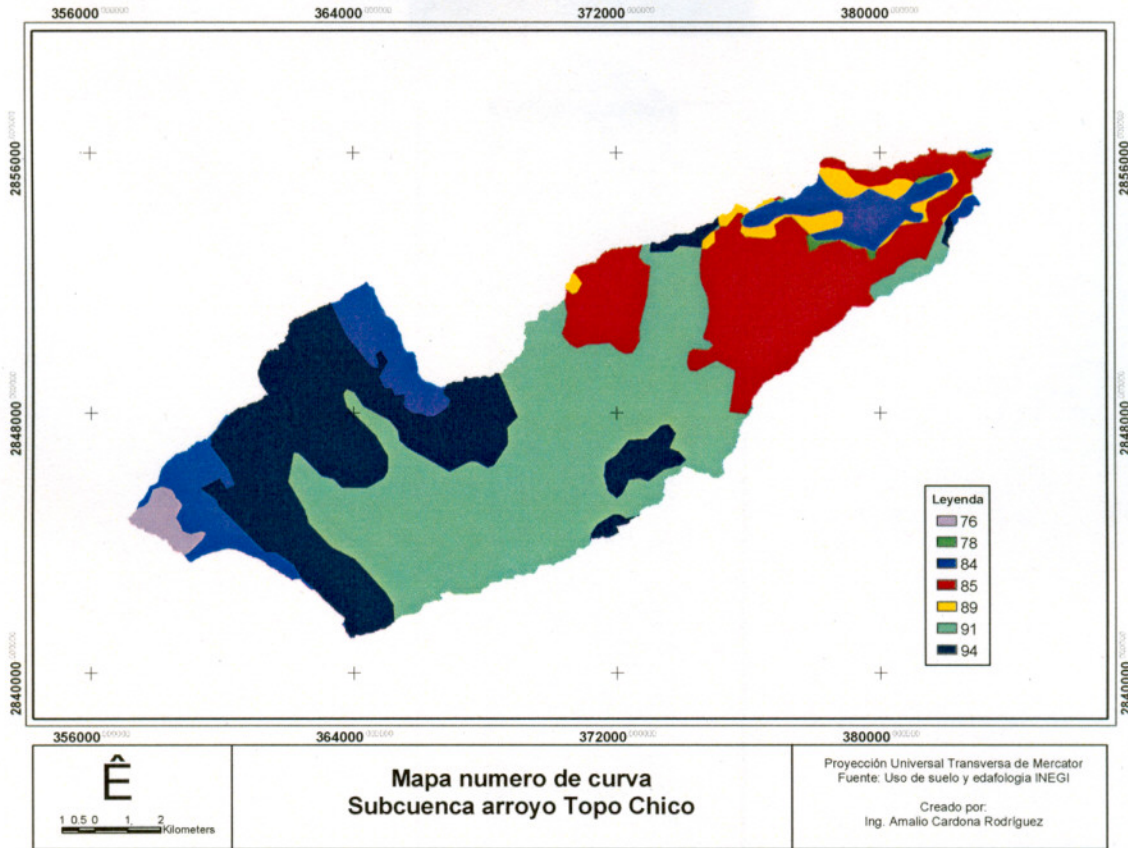


Figura 3.12 Mapa de número de curva de la subcuenca del arroyo Topo Chico

Finalmente, una vez realizados los pasos anteriores, las características fisiográficas de las subcuencas como área, pendiente del cauce y de la subcuenca, número de curva, se obtuvieron como se mencionó, con el uso de la extensión HEC Geo-HMS en ArcGis 9.1, resultando los parámetros que se indican en la Tabla 3.4 y en la Tabla 3.5 los parámetros de los tramos de cauce necesarios para el tránsito de los hidrogramas obtenidos.

Tabla 3.4 Características fisiográficas de las subcuencas

Subcuenca	Nombre	Longitud cauce mas largo (km)	Pendiente cauce (m/m)	Área (km ²)	Tc (hr)	CN	Pendiente de cuenca (%)	Tiempo retraso (hr)
Río La Silla								
W90	Bajo Silla	22.363	0.002	32.72	7.93	89	13.5	4.76
W100	Seco	14.802	0.007	31.44	3.56	82	31.2	2.14
W110	Medio Silla	12.605	0.004	30.14	3.91	86	35.1	2.34
W120	Elizondo	11.881	0.012	34.38	2.45	74	51.5	1.47
W130	Alto Silla	5.859	0.006	9.24	1.85	84	37.3	1.11
W140	La Virgen	9.518	0.016	12.71	1.85	75	52.2	1.11
W150	Calabozo	10.262	0.014	16.49	2.06	74	52.4	1.24
Arroyo Topo Chico								
W70	Topo Chico	31.093	0.005	120.76	7.19	89	27.8	4.31
W80	El Tajo	10.101	0.007	19.58	2.66	91	18.0	1.59
W110	El Águila	13.757	0.012	20.18	2.74	89	4.70	1.64

Tabla 3.5 Parámetros de los tramos de cauce obtenidos con la extensión HECGeo-HMS

Tramo	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	K (hr)	X
Río La Silla				
R20	18.844	0.002	6.95	0.2
R40	7.663	0.004	2.66	0.2
R50	2.722	0.006	1.03	0.2
Arroyo Topo Chico				
R20	21.652	0.004	5.93	0.2

3.3 Cálculo de tormentas de diseño

Generalmente los datos de lluvia locales no son suficientes, ni en duración de registro y precisión para hacer funcionar y ajustar los modelos hidrológicos. Surgió entonces, la necesidad de establecer las lluvias llamadas de proyecto o diseño que son estadísticamente equivalentes a las lluvias reales, aunque no necesariamente observadas. (Torres A., 2004)

En el estudio de avenidas, las tormentas de diseño, representa la lluvia que genera un gasto extremo. Una tormenta de diseño puede definirse mediante un valor de profundidad de precipitación en un punto o mediante un hietograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta (Chow, 1994). La precipitación asociada a un periodo de retorno generalmente produce un escurrimiento con diferente periodo de retorno.

Las tormentas de diseño se calculan a partir del análisis de los registros de lluvia de las estaciones climatológicas que espacialmente se encuentran en el área de influencia de las subcuencas objeto de análisis.

3.3.1 Selección de las estaciones climatológicas e influencia en cada subcuenca

La selección de las estaciones climatológicas se realizó a partir del análisis espacial con respecto a cada subcuenca mediante el método conocido como polígonos de Thiessen o de Voronoi, donde cada estación tiene un área de influencia o peso.

Las estaciones seleccionadas con este procedimiento fueron: 19052 Monterrey, 19015 el Cerrito, 19018 el Pajonal, 19058 Santa Catarina para la subcuenca del río La Silla.

Para la subcuenca del arroyo Topo Chico se seleccionaron las estaciones: 19004 Apodaca, 19185 el Canadá, 76393 Observatorio meteorológico, 19058 Santa Catarina.

En la Figura 3.13 y 3.14 se presentan las estaciones con influencia espacial en las dos subcuencas de acuerdo al criterio de los polígonos de Thiessen. Y en la tabla 3.6 se indican los pesos espaciales de cada estación climatológica para la discretización realizada en las subcuencas en estudio.

Tabla 3.6 Pesos espaciales de cada pluviómetro en cada subcuenca

Subcuenca	Nombre	Estación			
		El Pajonal	Monterrey	Santa Catarina	El Cerrito
Río La Silla					
W90	Bajo Silla	-	1.00	-	-
W100	Seco	0.01	0.81	0.18	-
W110	Medio Silla	-	1.00	-	-
W120	Elizondo	0.36	0.58	-	0.06
W130	Alto Silla	-	0.41	-	0.59
W140	La Virgen	0.29	-	-	0.71
W150	Calabozo	0.03	-	-	0.97
Arroyo Topo Chico					
Subcuenca	Nombre	Apodaca	El Canadá	Observatorio	Santa Catarina
W70	Topo Chico	0.13	0.30	0.56	0.01
W80	El Tajo	-	-	1.00	-
W110	El Águila	-	-	0.64	0.36

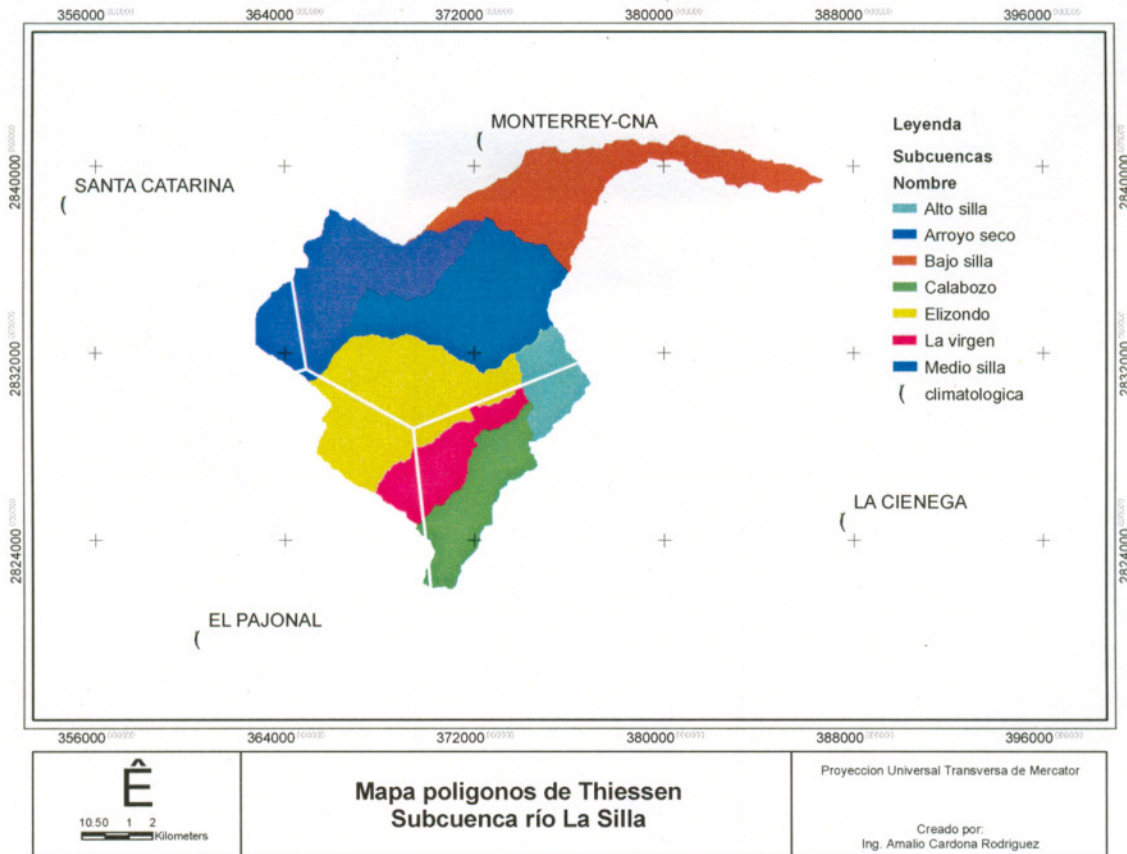


Figura 3.13 Polígonos de Thiessen para la subcuenca del río la Silla

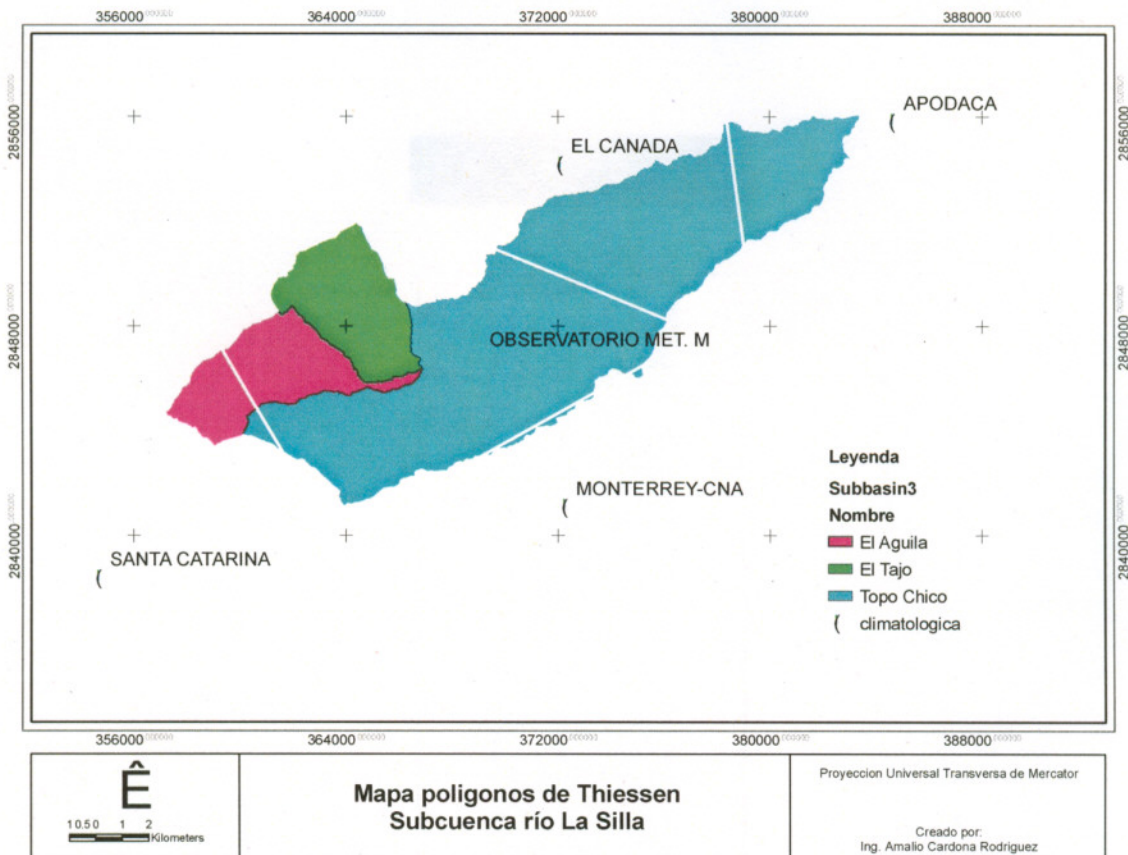


Figura 3.14 Polígonos de Thiessen subcuenca arroyo Topo Chico

3.3.2 Análisis de frecuencias de las series máximas anuales de precipitación en 24 horas

El análisis de frecuencia de valores máximos es un desarrollo matemático establecido en el campo de la hidrología, para predecir la ocurrencia de los principales eventos hidrológicos tales como precipitaciones, escurrimientos, evaporaciones, temperaturas y algunos más. En general, se puede decir que la estructura matemática del análisis de frecuencia de valores máximos radica en utilizar en forma conjunta la herramienta de las funciones de distribución de probabilidad y las series de tiempo constituidas por valores máximos, y a partir de su vinculación, predecir su ocurrencia para diferentes periodos de retorno o probabilidades. (Breña, 2007)

El análisis de frecuencias de eventos extremos se basa en los siguientes supuestos:

- a) Los eventos climáticos o hidrológicos extremos son una variable aleatoria que puede ser expresada mediante una distribución de probabilidad.
- b) La serie de eventos extremos es independiente; es decir, la magnitud de cada suceso no tiene correlación con los sucesos anteriores.

c) La distribución de probabilidad que explica el proceso extremo no varía en el tiempo, ni tampoco cambia en función de la magnitud de la variable. (Beguería, 2002)

Los datos de precipitación utilizados en este estudio, son los registros de lluvias máximas en 24 horas de las estaciones climatológicas ubicadas en la zona de influencia del área de análisis señaladas en el punto 3.3.1, las estaciones climatológicas son administradas por el Organismo de Cuenca Río Bravo de la Comisión Nacional del Agua con sede en la Cd. de Monterrey, éstas se relacionan en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Estaciones climatológicas que influyen en las subcuencas en estudio.

Clave	Estación	Coordenadas		Registro de datos	Longitud (años)
		Longitud	Latitud		
19052	Monterrey	100° 16' 18"	25° 40' 57"	1960-2007	48
76393	Observatorio meteorológico	100° 18' 17"	25° 44' 01"	1977-2007	31
19004	Apodaca	100° 08' 59"	25° 48' 59"	1964-2007	32
19185	El Canadá	100° 16' 29"	25° 48' 02"	1984-2007	24
19015	El Cerrito	100° 11' 36"	25° 30' 36"	1958-2007	46
19018	El Pajonal	100° 23' 19"	25° 29' 21"	1960-2007	48
19058	Santa Catarina	100° 26' 48"	25° 39' 23"	1960-2007	48

La estación Apodaca tiene un periodo de 1990 al 2001 que dejó de operar, reanudándose en el 2002.

Estudios de Escalante en el 2004, sobre la influencia del tamaño de muestra en el análisis de frecuencias, utilizando los coeficientes de correlación (R). Observó en general que, cuando se usan muestras menores a 20 años la variación del coeficiente R es alta, y tiende a estabilizarse para tamaños mayores a 20 años. En este sentido, la longitud de las series utilizadas varía entre 24 y 48 años, por lo que se considera aceptable para el estudio.

En la tabla 3.8, se muestran las series máximas anuales de precipitación en 24 horas de las estaciones citadas con anterioridad.

Tabla 3.8 Series máximas anuales de precipitación en 24 horas (mm).

Año	Apodaca	El Canadá	El Cerrito	Observatorio	Monterrey	El Pajonal	Santa Catarina
1958			200.0				
1959			53.0				
1960					53.8	54.0	40.5
1961					48.0	50.0	40.0
1962			119.0		147.5	70.0	84.0
1963			190.0		103.7	101.0	57.0
1964	78.9		80.5		140.0	63.0	97.5
1965	74.0		110.0		49.0	58.0	68.0
1966	58.0		194.0		105.0	60.0	44.0
1967	71.0		108.0		143.0	101.0	90.0
1968	48.5		80.5		73.0	26.0	65.0
1969	38.0		61.0		64.0	45.0	47.0
1970	61.5		320.0		71.0	83.0	60.8
1971	96.0		35.0		82.0	20.0	69.5
1972	42.5		75.0		72.0	20.0	42.5
1973	132.5		246.0		140.0	80.0	100.0

Tabla 3.8 Series máximas anuales de precipitación en 24 horas (mm).

Año	Apodaca	El Canadá	El Cerrito	Observatorio	Monterrey	El Pajonal	Santa Catarina
1974	129.0		128.0		148.0	40.0	151.5
1975	102.5		132.0		94.5	80.0	62.1
1976	121.0		175.0		101.5	60.0	68.2
1977	63.0		187.0	118.0	103.3	113.0	80.1
1978	72.5		112.0	180.0	180.0	62.0	93.5
1979	53.5		89.0	63.5	63.5	86.0	59.0
1980	51.0		114.0	43.6	43.0	98.3	59.5
1981	51.0		82.0	75.8	110.5	85.0	61.4
1982	52.0		26.5	120.6	48.5	69.0	48.9
1983	49.0		116.0	60.8	109.0	80.0	107.5
1984	25.0	32.9	99.5	32.7	53.0	68.0	40.0
1985	74.5	75.2	95.0	50.8	61.0	54.0	52.0
1986	57.5	66.0	228.0	157.9	156.5	42.0	84.4
1987	52.5	39.0	50.0	35.4	47.0	48.0	70.7
1988	253.0	204.5	330.5	149.7	183.9	326.0	57.7
1989	32.0	41.7	92.5	50.1	78.0	56.5	77.4
1990		45.5	82.5	80.5	100.5	74.0	90.1
1991		70.7	84.0	43.2	49.4	36.0	57.5
1992		45.5	59.5	56.4	38.0	30.0	23.0
1993		87.8	108.0	66.8	77.7	47.0	105.0
1994		105.0	91.0	157.5	59.0	80.0	63.0
1995		49.0	143.0	62.4	28.0	48.0	60.7
1996		89.0	135.0	106.9	125.2	32.0	52.9
1997		67.0	79.8	41.0	45.0	48.8	65.2
1998		37.5	192.0	50.7	44.0	78.0	69.5
1999		98.0	67.0	77.6	74.4	59.0	82.0
2000		84.0	170.0	67.2	104.0	30.0	80.0
2001		63.0	118.0	65.4	83.5	83.0	167.0
2002	120.0	110.0	114.0	86.0	140.0	102.0	98.6
2003	72.0	80.0		93.1	76.5	95.0	121.8
2004	100.0	120.0		129.1	139.5	32.0	47.0
2005	165.0	188.0	330.0	190.9	248.0	293.0	44.5
2006	88.0	98.0	65.0	134.2	88.0	60.0	44.0
2007	56.0	118.0	58.0	81.0	49.0	27.0	20.0
Longitud	32	24	46	31	48	48	48

Tomando en cuenta estos datos, se realizó el análisis de frecuencias para determinar cual de las funciones de distribución de probabilidad era la que mas se ajustaba a los máximos de las series anuales para cada una de las estaciones. Este ejercicio se efectuó con la ayuda del programa AX "ajuste de funciones de probabilidad" versión 1.05 desarrollado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres, que evalúa si una serie de datos se ajusta a una de las distribuciones siguientes: Normal, Lognormal, Exponencial, Gumbel, Gamma, Doble Gumbel.

Para determinar el ajuste, existen métodos cuantitativos que miden la bondad de ajuste entre los elementos de las muestras de eventos hidrológicos y las funciones de distribución de probabilidad. El método del Error Estándar de Ajuste (EEA) desarrollado por Kite (1977) mide cuantitativamente la bondad de ajuste entre los valores observados x_o de una muestra de datos y los calculados x_e con una función de distribución de probabilidad con el apoyo de la expresión: (Breña, 2007)

$$EEAj = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_o - x_e)^2}{n - p}}$$

Donde:

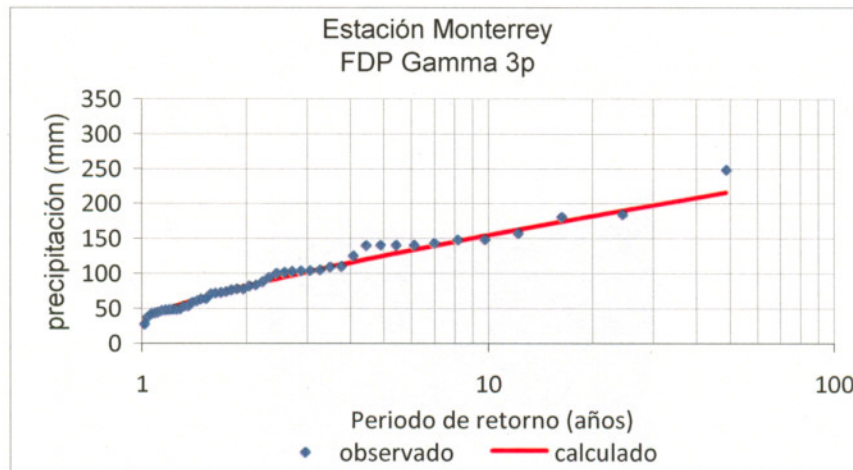
x_e = valor calculado por la F.D.

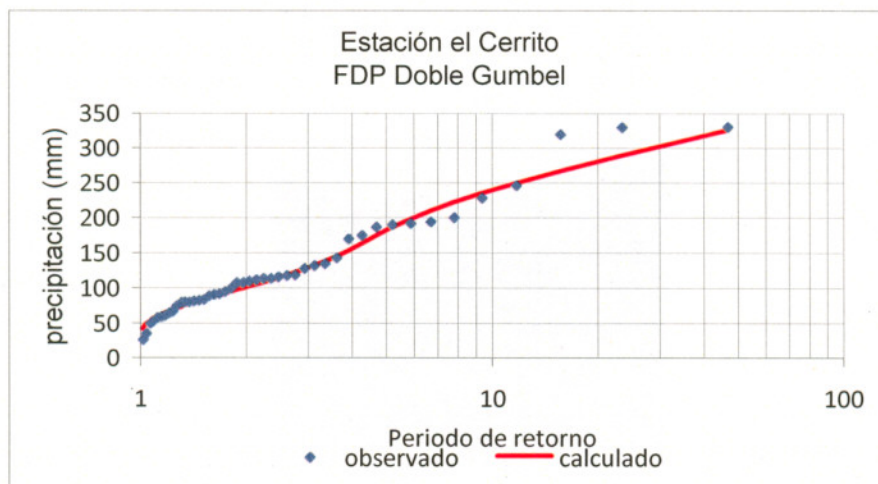
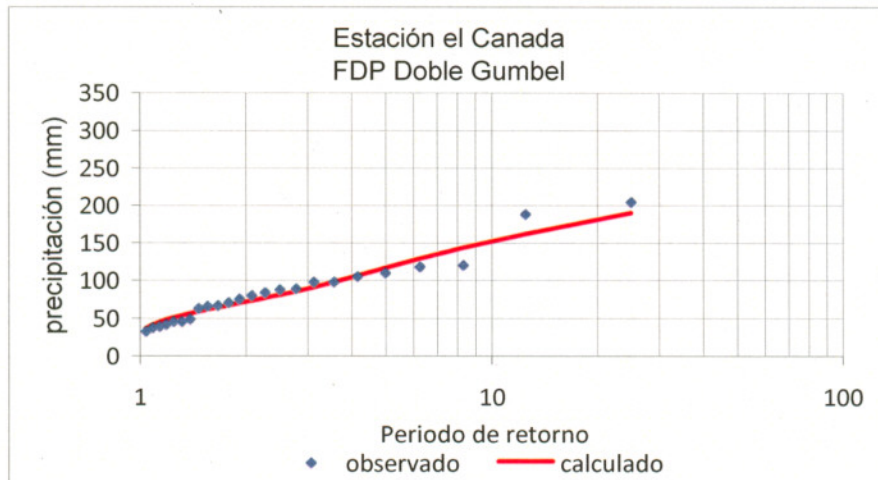
x_o = valor de la muestra

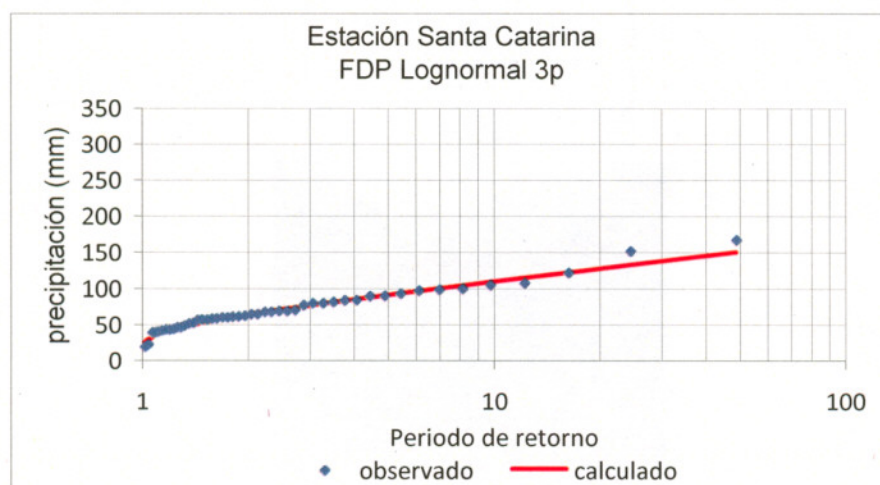
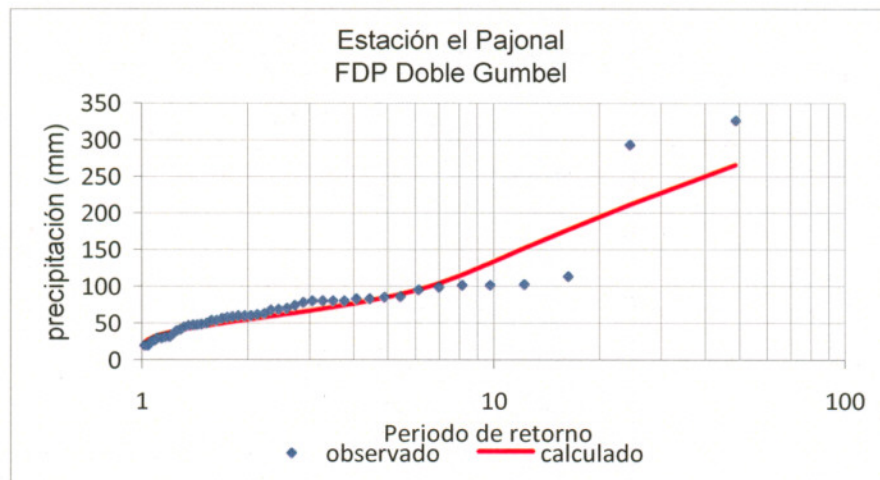
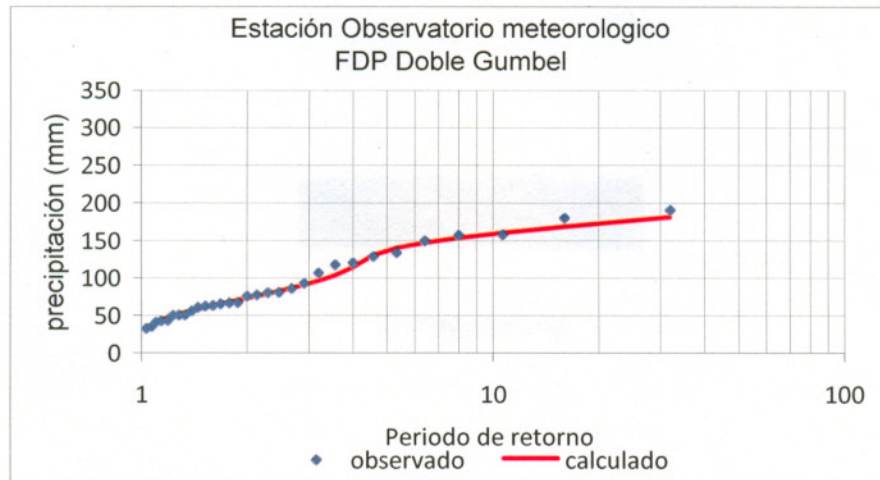
n = tamaño de la muestra

p = número de parámetros de ajuste de la F.D.

La función de distribución que tenga el menor error estándar fue la más adecuada de las demás funciones de distribución analizadas, en las gráficas de abajo se observa cual función es la que mas se ajustó para cada estación.







Una vez seleccionada la función de distribución de probabilidad, se calcularon las tormentas de diseño para diferentes periodos de retorno o probabilidad de ocurrencia.

Para nuestro caso, se determinaron tormentas de diseño para los periodos de retorno que se definieron en el estudio y corresponden a 5, 10, 20, 50, 100, a fin de asociarlos con los eventos que están vivos en la memoria de la población, ya que eventos para periodos de retorno mayores, sería difícil que recordaran los habitantes.

Los resultados del análisis de frecuencias de las series de datos se presentan en la tabla 3.9, donde se observa cual fue la función de distribución de probabilidad que más se ajustó para cada unas de las estaciones consideradas.

Tabla 3.9 Función de probabilidad que más se ajustó a las series de datos históricas.

Estación: Apodaca (hp-Tr)

FDP	EEAj	Periodo de retorno (Tr)				
		5	10	20	50	100
Gamma 2p						
Gamma 3p	15.2	108.1	134.1	158.8	189.8	211.9
Lognormal 3p	17.1	103.4	126.9	150.4	182.3	207.2
Gumbel 2p	18.8	103.3	124.2	144.2	170.2	189.7
Doble Gumbel	11.3	104.3	146.2	180.5	220.6	249.5

Estación: El Canada (hp-Tr)

FDP	EEAj	Periodo de retorno (Tr)				
		5	10	20	50	100
Gamma 2p	13.8	114.2	137.0	157.9	183.5	201.9
Gamma 3p		EL MODELO NO TIENE SOLUCION				
Lognormal 3p	13.3	110.3	135.3	160.3	194.0	220.4
Gumbel 2p	14.3	110.5	133.0	154.6	182.5	203.5
Doble Gumbel	10.7	117.6	153.0	182.1	216.8	242.0

Estación: El Cerrito (hp-Tr)

FDP	EEAj	Periodo de retorno (Tr)				
		5	10	20	50	100
Gamma 2p	19.1	177.2	217.1	253.9	299.6	332.5
Gamma 3p	16.5	177.2	221.1	262.4	314.2	351.3
Lognormal 3p	14.9	173.3	220.5	268.8	336.1	389.9
Gumbel 2p	21.5	170.3	207.7	243.7	290.2	325.1
Doble Gumbel	12.9	183.3	240.3	281.3	329.4	364.0

Estación: Observatorio meteorológico (hp-Tr)

FDP	EEAj	Periodo de retorno (Tr)				
		5	10	20	50	100
Gamma 2p	10.0	120.0	144.3	166.4	193.7	213.3
Gamma 3p	7.7	119.8	152.5	184.1	223.9	251.7
Lognormal 3p	10.3	115.9	142.9	169.9	206.6	235.3
Gumbel 2p	11.4	115.7	139.8	162.9	192.8	215.2
Doble Gumbel	5.0	138.1	159.8	173.7	189.9	201.6

Estación: Monterrey (hp-Tr)

FDP	EEAj	Periodo de retorno (Tr)				
		5	10	20	50	100
Gamma 2p	8.9	127.4	152.7	175.8	204.3	224.7
Gamma 3p	7.2	127.2	156.3	183.8	218.8	243.0
Lognormal 3p	7.5	124.8	153.8	182.8	222.0	252.6
Gumbel 2p	9.4	123.9	149.5	174.0	205.8	229.6
Doble Gumbel	8.2	134.2	163.4	185.9	212.7	232.1

Estación: El Pajonal (hp-Tr)

FDP	EEAj	Periodo de retorno (Tr)				
		5	10	20	50	100
Gamma 2p	31.9	102.3	126.9	149.7	178.2	198.6
Gamma 3p	29.3	101.5	131.4	160.2	196.5	221.8
Lognormal 3p	31.1	94.2	119.1	144.6	180.0	208.4
Gumbel 2p	33.4	95.0	116.0	136.2	162.3	181.8
Doble Gumbel	21.2	85.8	133.4	194.8	267.8	320.2

Estación: Santa Catarina (hp-Tr)

FDP	EEAj	Periodo de retorno (Tr)				
		5	10	20	50	100
Gamma 2p	6.6	91.9	107.2	121.0	137.9	149.9
Gamma 3p		EL MODELO NO TIENE SOLUCION				
Lognormal 3p	4.8	92.3	110.5	128.3	151.6	169.4
Gumbel 2p	5.5	90.7	107.5	123.6	144.5	160.1
Doble Gumbel	6.0	92.9	113.8	130.5	150.5	165.0

La técnica empleada para la determinación de los parámetros de las funciones de distribución de probabilidad fue la de máxima verosimilitud. Esta técnica es la más versátil, ya que se puede aplicar en gran cantidad de situaciones, y por ello es uno de métodos más empleados.

Las funciones de distribución de probabilidad que mejor se ajustaron a las series de datos fueron: Doble Gumbel, Lognormal 3 parámetros y Gamma 3 parámetros.

Existe consistencia con la función Doble Gumbel en el sentido que se ajusta a 5 de las 7 estaciones consideradas, ya que como se mencionó con anterioridad, los tipos de eventos de precipitación que ocurren en la región se asocian a eventos de tipo convectivo, de tipo frontal y eventos debido a la actividad ciclónica, éstos generan dos poblaciones, en cuanto a la magnitud de las lluvias donde ésta función se ajustó muy bien ya que considera las dos poblaciones.

La inconsistencia con las demás estaciones puede deberse a que éstas solo han registrado eventos de tipo convectivo o frontal, donde el mejor ajuste se tiene con las funciones de distribución de una sola población.

Con estas funciones de distribución en el programa AX, se calcularon las tormentas de diseño en los periodos de retorno considerados en el estudio. En la Tabla 3.10 y Figura 3.15 se observan los resultados obtenidos.

Tabla 3.10 Alturas de precipitación en mm calculados para las tormentas de diseño en las estaciones climatológicas.

Periodo de retorno (Tr)	Estación climatológica						
	Apodaca	El Canadá	El Cerrito	Monterrey	Observatorio Meteorológico	El Pajonal	Santa Catarina
5	104.30	117.55	182.39	127.16	138.08	85.82	92.25
10	146.15	153.02	239.84	156.32	159.77	133.38	110.54
20	180.47	182.13	281.05	183.81	173.66	194.83	128.27
50	220.61	216.84	329.20	218.28	189.86	267.80	151.58
100	249.50	241.99	363.90	242.97	201.56	320.15	169.38

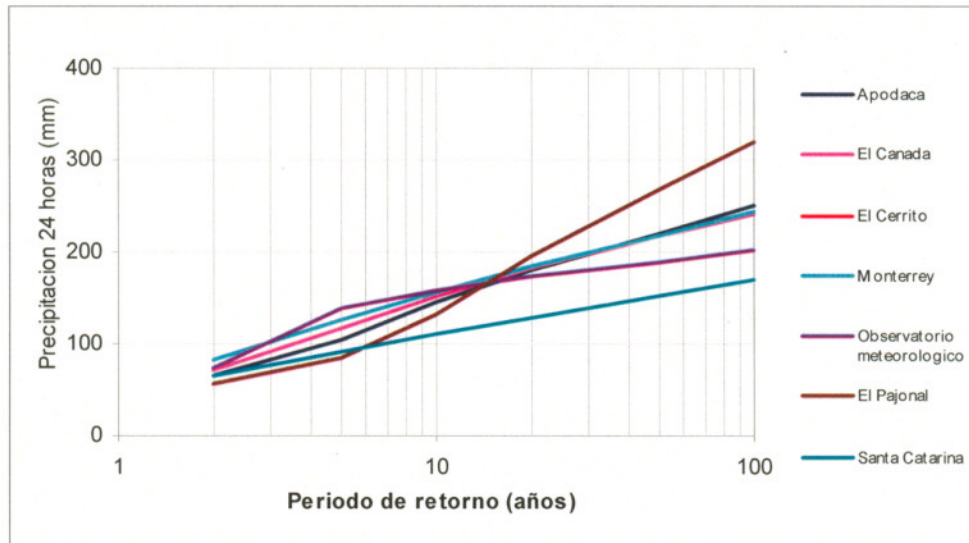


Figura 3.15 Curva de magnitud frecuencia de la precipitación máxima en 24 horas para las estaciones consideradas

3.3.3 Distribución temporal de las tormentas de diseño.

Conocida la cantidad de precipitación para los periodos de retorno, el otro punto a tratar fue la distribución temporal de esta precipitación, es decir desagregarla, para establecer los hietogramas que integrarán en modelo meteorológico en programa de cómputo HEC-HMS que fue utilizado para la obtención de los hidrogramas asociados a las tormentas.

El nivel de información habitual disponible en la cuencas son los datos de precipitación máxima en 24 horas como ya vimos anteriormente, en este sentido, es necesario establecer pautas de reparto temporal de la lluvia. Es necesario proponer relaciones entre lluvias de cierta duración y las de duración en 24 horas, como el propuesto por Emil Kuichling y C. E. Gransky de los EUA (1889) recomendable cuando no existe información de estaciones pluviográficas en la zona.

Otro planteamiento recomendable, es considerar los patrones propios extraídos de los observatorios existentes en la zona o de estaciones automáticas que registren los patrones de distribución de las tormentas, en este aspecto, es conveniente no utilizar patrones derivados de observatorios diferentes, que reflejan situaciones meteorológicas que no tienen nada que ver con nuestra zona de estudio.

Bajo este criterio, se utilizaron los registros de precipitación de la red de pluviómetros que forman el sistema de alertamiento hidrometeorológico de Monterrey que fueron instaladas por CENAPRED en el año 2002, en coordinación con la CONAGUA y Protección Civil del Gobierno del Estado de Nuevo León.

La red está integrada de 8 pluviómetros automáticos que transmiten vía radio, la precipitación que registra, los datos son registrados a intervalos de 10 minutos y almacenados en una base de datos en Access. En la tabla 3.11 se enlistan los pluviómetros que integran esta red.

Tabla 3.11 Pluviómetros automáticos que integra la red del sistema de alertamiento hidrometeorológico de Monterrey

Clave	Estación	Coordenadas		Registro de datos	Longitud (años)
		Longitud	Latitud		
AS-06	Arroyo seco	100° 20' 36"	25° 38' 03"	2002-2007	6
EZ-07	Estanzuela	100° 14' 42"	25° 35' 32"	2002-2007	6
CU-03	Ciudad universitaria	100° 18' 49"	25° 43' 31"	2002-2007	6
MI-02	Mitras	100° 22' 42"	25° 43' 56"	2002-2007	6
SM-01	San Martín	100° 21' 05"	25° 49' 12"	2002-2007	6
OB-05	Obispo	100° 32' 31"	25° 42' 04"	2002-2007	6
FE-04	Fierro	100° 16' 18"	25° 40' 58"	2002-2007	6

Ahora bien, al inicio de la operación de esta red, se tuvieron problemas en la transmisión de los datos por lo que se decidió desechar la información de los años 2002-2004 que presentaban demasiados registros con el estatus de no comunicación.

Inicialmente el procedimiento que se considero para definir el patrón de distribución de las lluvias, consistió en revisar los registros disponibles en los siete pluviómetros automáticos, se individualizaron los diferentes eventos de precipitación ocurridos en el periodo de junio a octubre de los años 2005 al 2007, para una magnitud superior o igual a 15 mm.

Los eventos identificados fueron integrados para su análisis conjunto y la obtención de las variables siguientes: precipitación total, duración total, curva porcentual acumulada de precipitación contra tiempo y con ello se determinó un patrón de distribución de las tormentas en 24 horas.

Tabla 3.12 Numero de eventos mayores a 15 mm en los pluviómetros automáticos que integra la red del sistema de alertamiento hidrometeorológico de Monterrey

Estación	Año 2005					Año 2006					Año 2007					Total
	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	
AS-06	0	1	0	1	1	0	0	0	4	0	2	1	1	0	0	11
EZ-07	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	Sin transmisión					2
CU-03	0	2	0	1	1	1	1	0	7	0	2	0	0	1	0	16
MI-02	0	2	0	0	1	0	0	0	2	0	3	1	1	2	0	12
SM-01	0	1	0	0	0	Sin transmisión					Sin transmisión					1
OB-05	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	Sin transmisión					3
FE-04	0	3	0	2	2	1	0	0	5	0	1	0	2	3	0	19

La Tabla 3.12 refleja el número de eventos registrados (mayor a 15 mm) en el tiempo de análisis (2005-2007), tanto los simultáneos como los que afectaron a uno o dos de los pluviómetros. El pluviómetro Fierro fue donde se diferenciaron más eventos ocurridos (19), seguido de Ciudad Universitaria, Mitras y Arroyo Seco. El pluviómetro San Martín prácticamente ha estado sin operar.

Tabla 3.13 Características de los eventos de lluvia mayores a 15 mm registrados en los pluviómetros automáticos durante el periodo junio 2005-octubre 2007

Concepto	AS-06	EZ-07	CU-03	MI-02	OB-05	FE-04	SM-01
Precipitación total (mm)	1287.50	1267.25	1496.50	1227.00	464.25	1933.25	313.25
Precipitación eventos mayores a 15 mm	540.25	388.25	621.25	664.30	229.50	687.50	213.25
Numero de eventos	11	2	16	12	3	19	1
% de lluvia caída en eventos	42.0	30.6	41.5	54.1	49.4	35.6	68.1

En este primer criterio, el procedimiento consistió en considerar todos los eventos mayores a 15 mm para cada pluviómetro, como uno solo para obtener su precipitación total y la duración total, y calcular de forma porcentual la distribución de la precipitación en el tiempo.

Con este criterio, se llegaron a establecer curvas masa porcentual para cada pluviómetro, en la Figura 3.16 se presenta las curvas obtenidas. Sin embargo, se obtuvieron curvas masa prácticamente simétrica que no representan la distribución temporal de la lluvia al analizar de manera independiente cada evento de precipitación.

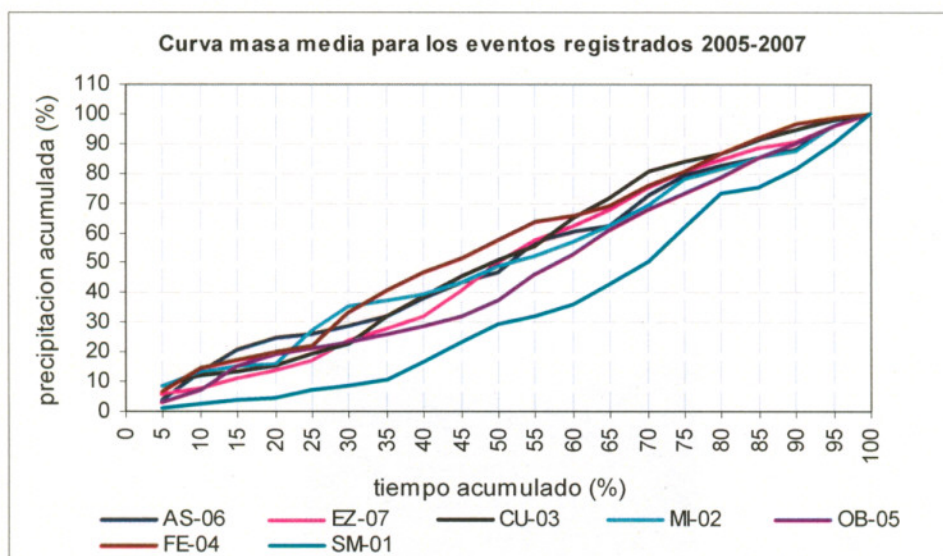


Figura 3.16 Curva media porcentual acumulada de la precipitación y tiempo para los eventos registrados en el periodo 2005-2007 de los pluviómetros automáticos.

Con estas curvas, se elaboraron los histogramas para 24 horas y se encontró que en general, las tormentas presentan dos picos en su distribución uno en la parte central y otro hacia el final, tal y como se presenta en la Figura 3.17 donde se distribuyó una tormenta de diseño de 5 años para la estación convencional Monterrey.

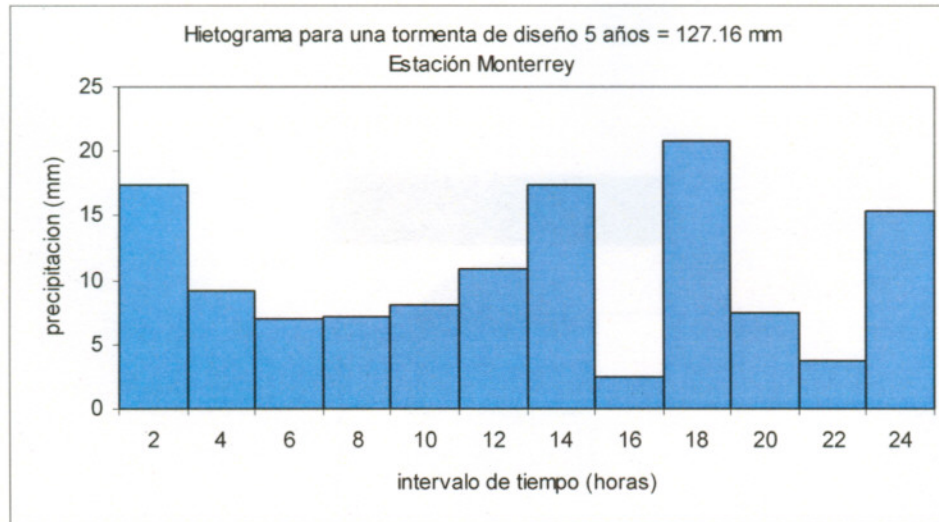
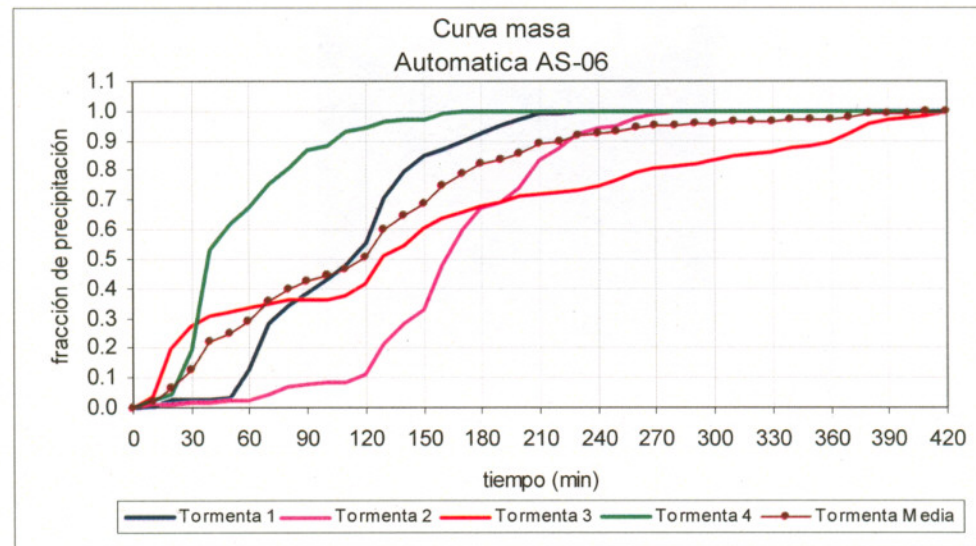
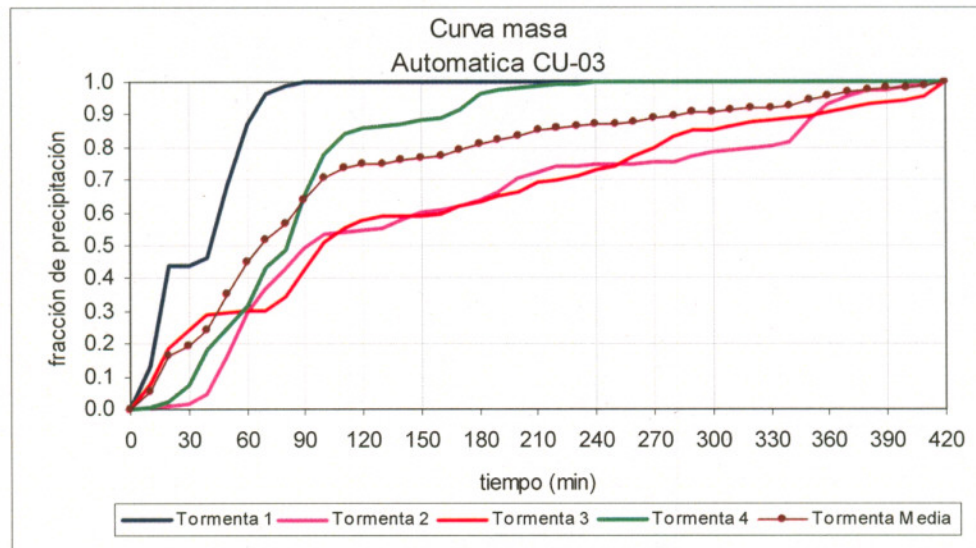
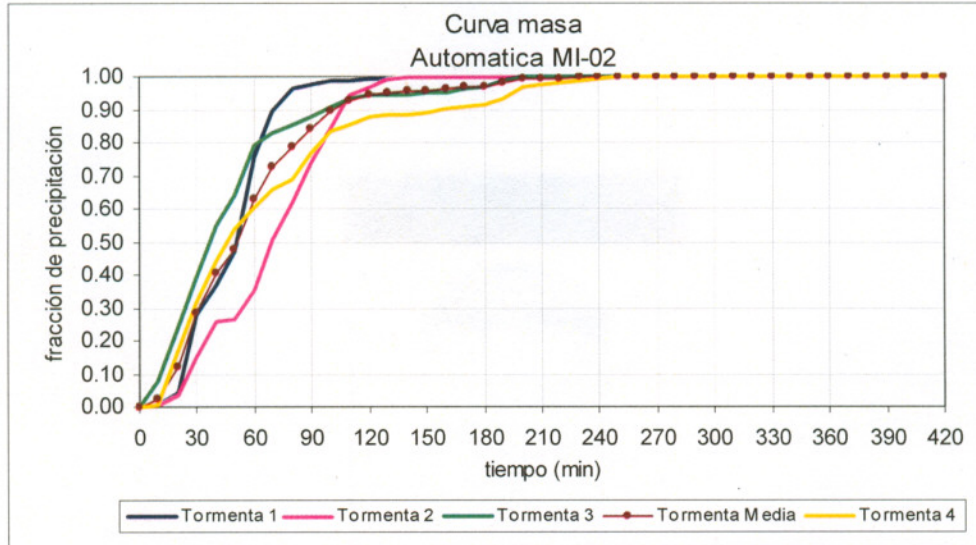


Figura 3.17 Hietograma tipo para 24 horas de duración para la estación convencional Monterrey, considerando la curva masa media del pluviómetro Arroyo seco (AS-06).

No obstante, este criterio de análisis de las tormentas, como se mencionó no representa la forma temporal en que éstas ocurren en la zona, así como los efectos que producen, motivo por el cual se decidió analizar en forma independiente los eventos de precipitación mayores a 30 mm registrados en los pluviómetros automáticos y obtener las curvas masa para una duración de 420 minutos (7 horas).

Las curvas masa de cada evento, se expresó como fracción para cada $\Delta t=10$ minutos de la tormenta registrada, y finalmente obtener una curva masa promedio que representara el comportamiento temporal de las lluvias de cada pluviómetro.

En la Figura 3.18 se presenta las curva masa promedio para los pluviómetros automáticos MI-02 (Mitrás), CU-03 (Ciudad Universitaria), AS-06 (Arroyo Seco) y FE-04 (Fierro) que son las que tienen influencia temporal en las subcuencas analizadas de acuerdo a los polígonos de Thiessen y que fueron consideradas en la modelación hidrológica.



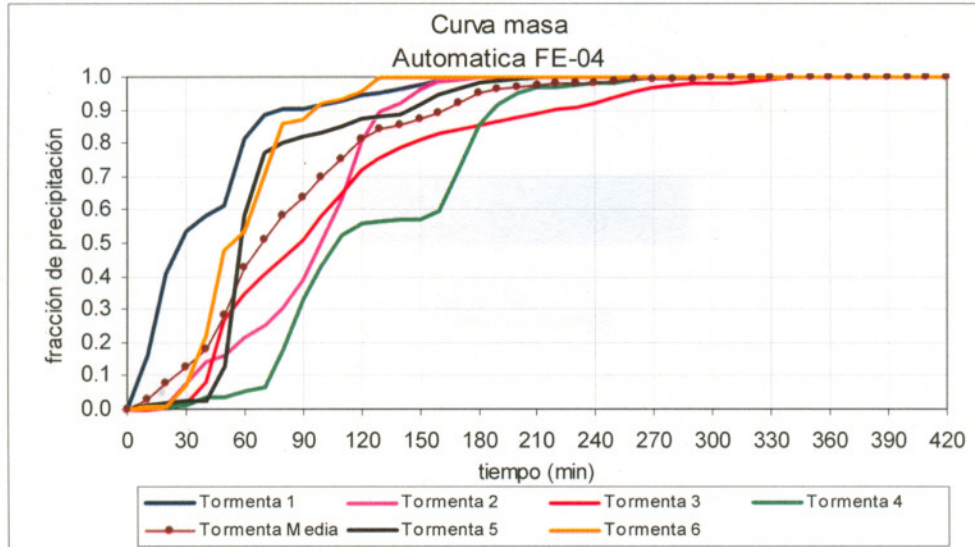


Figura 3.18 Curva masa de las tormentas mayores a 30 mm analizadas en 420 minutos para los pluviómetros automáticos.

En términos generales, se observa una tendencia donde las tormentas presentan su mayor pendiente o mayor altura de precipitación en los primeros 120 minutos (2 horas), periodo en que se producen los escurrimientos que pueden generar problemas de inundación en las zonas aledañas al cauce de las corrientes. Con esta curva masa, se obtuvieron los hietogramas para la distribución temporal de las lluvias de diseño, como el que se presenta en la Figura 3.19.

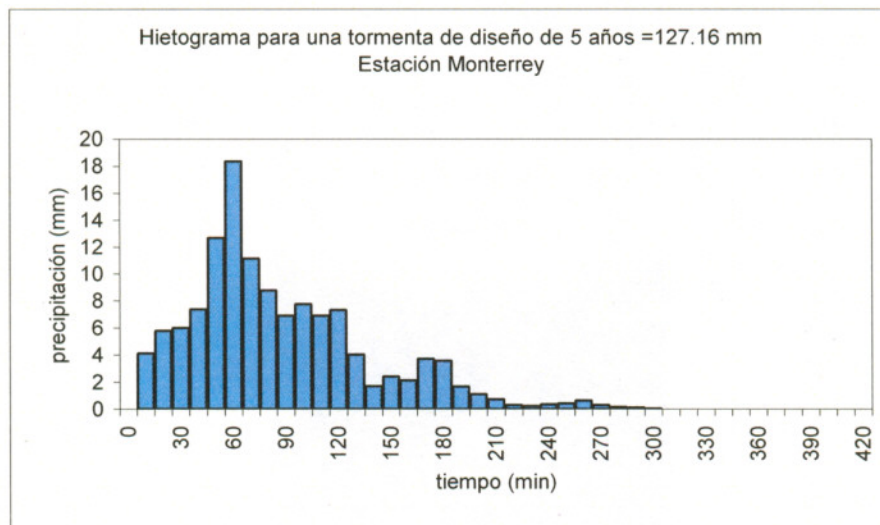


Figura 3.19 Hietograma para la estación convencional Monterrey, considerando la curva masa media del pluviómetro automático Fierro (FE-04).

El hietograma presenta la altura de precipitación mayor hacia la parte central del mismo.

Con las estaciones automáticas se hizo el mismo análisis de polígonos de Thiessen para asignarle el peso en la distribución temporal de la lluvia en la cuenca.

En la tabla 3.14 se presentan los pesos temporales de los pluviómetros automáticos en cada una de las subcuencas objeto de este estudio.

Tabla 3.14 Pesos temporales de cada pluviómetro automático en cada subcuenca

Subcuenca	Nombre	Estación	
		Arroyo seco AS-06	Fierro FE-04
Río La Silla			
W90	Bajo Silla	0.03	0.97
W100	Seco	0.92	0.08
W110	Medio Silla	0.87	0.13
W120	Elizondo	1.00	--
W130	Alto Silla	1.00	--
W140	La Virgen	1.00	--
W150	Calabozo	1.00	--
Arroyo Topo Chico			
Subcuenca	Nombre	Estación	
		Mitras MI-02	Ciudad Universitaria CU-03
W70	Topo Chico	0.10	0.90
W80	El Tajo	0.76	0.24
W110	El Águila	0.96	0.04

Capítulo 4

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

4.1 Modelo hidrológico con HEC-HMS

Un modelo hidrológico comprende un conjunto de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico, con el objetivo de simular numéricamente los procesos identificados en el estudio. Los modelos hidrológicos pretenden reproducir matemáticamente el fenómeno de transformación de la lluvia en escurrimiento. Tienen la ventaja de poder simular aceptablemente el proceso hidrológico de la generación de la crecida, si se estiman satisfactoriamente los parámetros necesarios.

Específicamente en este estudio, la construcción del modelo hidrológico se llevó a cabo con el uso de la extensión HEC-GeoHMS en el programa ArcGis 9.1, para interconectar los elementos hidrológicos definidos en la discretización de las subcuencas mencionadas en el punto 3.2.2 y para la obtención de las características fisiográficas presentadas en la tabla 3.4 y 3.5.

La extensión HEC-GeoHMS, permite al final preparar un archivo con la representación del sistema hidrológico usando una red esquemática con elementos de cuenca (subcuenca, nodos, confluencias, tramos de río etc.) y su conectividad. El archivo sirve de entrada al programa HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos, el cual permite simular la respuesta que tendrá la cuenca en su escurrimiento superficial, como producto de una precipitación, mediante la representación de la cuenca como un sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos. Cada componente modela un aspecto del proceso lluvia-escurrimiento dentro de la cuenca. La representación de un componente requiere un conjunto de parámetros que especifiquen las características particulares del mismo y las relaciones matemáticas que describen el proceso físico. El resultado del proceso de modelaje es el cálculo de los hidrogramas del escurrimiento en sitios elegidos de la cuenca del río. (Villon, 2002).

El HEC-HMS es un programa de simulación hidrológica tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar los hidrogramas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico) a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, gasto base y conversión en escurrimiento directo que han alcanzado cierta popularidad en los Estados Unidos y en nuestro país.

El programa se deriva directamente del HEC-1, y conserva en esencia la misma filosofía de introducción de datos y secuencia de cálculos. El HEC-HMS, incluye la mayor parte de las rutinas de HEC-1 (algunas parecen haber sido obviadas) e incorpora como elementos adicionales:

- Un método de transformación lineal del escurrimiento (basado en una modificación del hidrograma unitario de Clark) que puede utilizarse en una representación de la cuenca a través de celdas, con datos distribuidos de precipitación obtenidos por ejemplo de registros de radar (una opción tecnológica que no tiene aún aplicación en nuestro país).
- Una opción de pérdida distribuida de humedad en suelos que aplica el mismo principio de las celdas y puede utilizarse en simulaciones sobre períodos largos (días o meses) y
- Una opción de optimización, un poco más versátil que la del HEC-1.

El programa trabaja con tres módulos básicos que definen en su conjunto el proyecto de simulación de la cuenca:

1. Modelo de cuenca. Esta componente es donde se representa la cuenca real, en la filosofía del HEC-HMS, aquí es donde se realizan las conexiones entre subcuencas, además los valores de las características fisiográficas de cada una de las subcuencas como: área de la cuenca, tiempo de retraso, y número de escurrimiento.
2. Modelo meteorológico. En esta componente es donde se especifican las estaciones que tienen influencia (y el valor de influencia de cada una) en las subcuencas, además se especifica la distribución temporal de la lluvia, también es donde se ingresan los valores de precipitación obtenidos del análisis de frecuencias.
3. Especificaciones de control donde se establece la hora de inicio y final de la simulación.








Para este estudio, la modelación hidrológica de acuerdo a la discretización de las subcuencas considero los afluentes principales del río La Silla, y del arroyo Topo Chico.

4.1.1 Modelo de cuenca

El modelo de cuenca representa la cuenca física, se desarrolla conectando elementos hidrológicos. Los elementos hidrológicos usan modelos matemáticos para describir los procesos físicos que se producen en la cuenca. Los elementos hidrológicos son: subcuenca (subbasin), tramo (reach), unión (juntion), fuente (source), sumidero (sink), depósito (reservoir), derivación (diversion).

En la tabla 4.1 se indica la descripción de cada elemento hidrológico que considera el programa HEC-HMS. (Hydrologic Modeling System, 2005)

Tabla 4.1 Descripción de los elementos hidrológicos en el programa HEC-HMS

Elemento hidrológico	Descripción
Subbasin 	Representa la cuenca física. Dada la precipitación, el escurrimiento se calcula restando las pérdidas y transformando el exceso de precipitación en caudal en los puntos de interés.
Reach 	Se usa para transitar el escurrimiento generado en algún punto de la cuenca hacia aguas abajo hasta otro punto. El resultado de este transporte es un retardo y una atenuación del hidrograma de entrada.
Juntion 	Se usa para sumar caudales que provienen de elementos hidrológicos ubicados aguas arriba. El resultado es la suma de los hidrogramas de todos los elementos conectados en la unión
Source 	Se usa para introducir caudal dentro del modelo de cuenca.
Sink 	Representa el punto de salida de la cuenca
Reservoir 	Modela la retención y atenuación de un hidrograma causado por un embalse o presa
Diversion 	Modela un flujo de agua que se deriva de un tramo de cauce

Como se mencionó con anterioridad, los parámetros de entrada que requiere el HEC-HMS fueron obtenidos utilizando la extensión HEC Geo-HMS en ArcGis 9.1 y del procesamiento previo de información de uso de suelo, edafológica, cuencas etc., para crear al final, una serie de elementos hidrológicos conectados dentro de la subcuenca del río La Silla y Arroyo Topo Chico.

Los parámetros principales calculados con esta extensión fueron:

- Área de drenaje de los afluentes principales, longitud de los cauces, pendiente del cauce y de la cuenca, centroide de la cuenca, tiempo de retraso entre otros.
- El método para el cálculo de hidrogramas.
- El método de cálculo de la lluvia efectiva, en este caso se empleó el número de curva o CN, desarrollando una serie de cálculos adicionales que consideran las variables de cobertura vegetal o uso de suelo, tipo de suelo.
- Finalmente el método de tránsito de avenidas en los cauces.

Al final se obtuvo una representación esquemática del modelo de la cuenca, como se observa en la Figura 4.1 y 4.2.

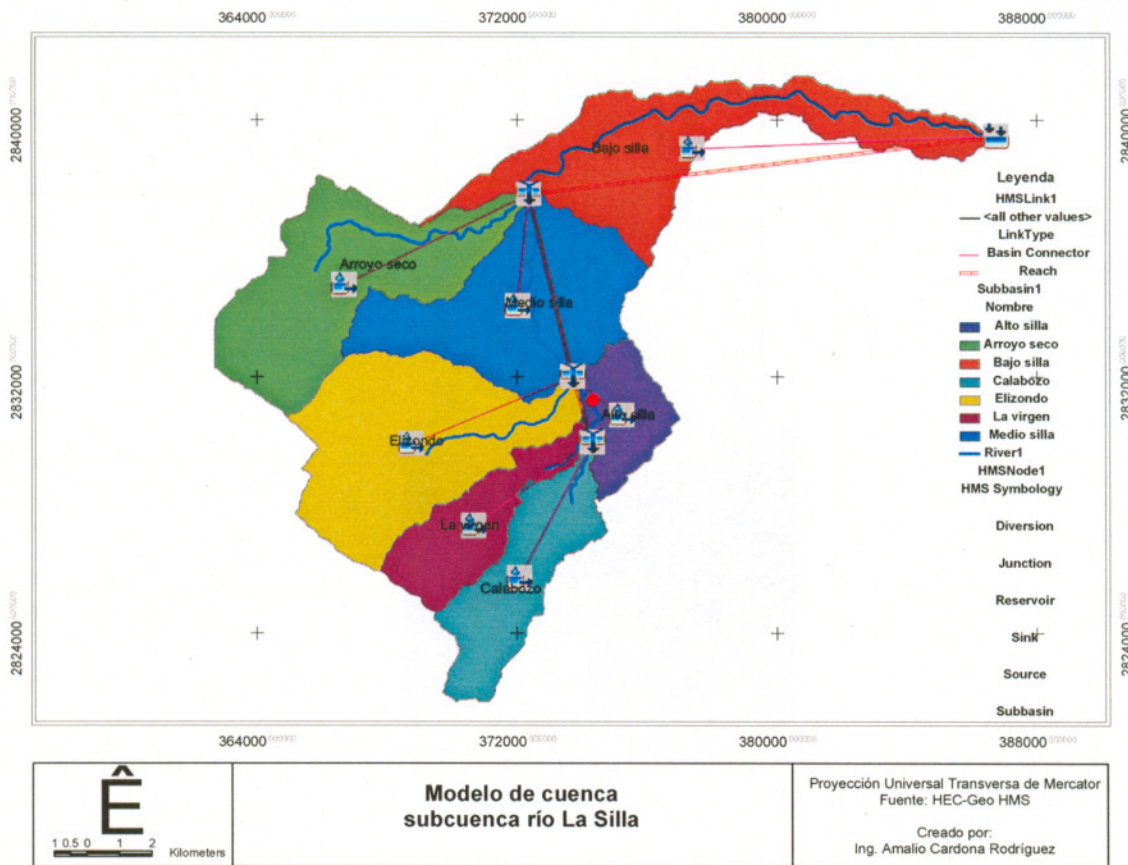


Figura 4.1 Modelo de cuenca del río la Silla y los sitios de calculo de hidrogramas.

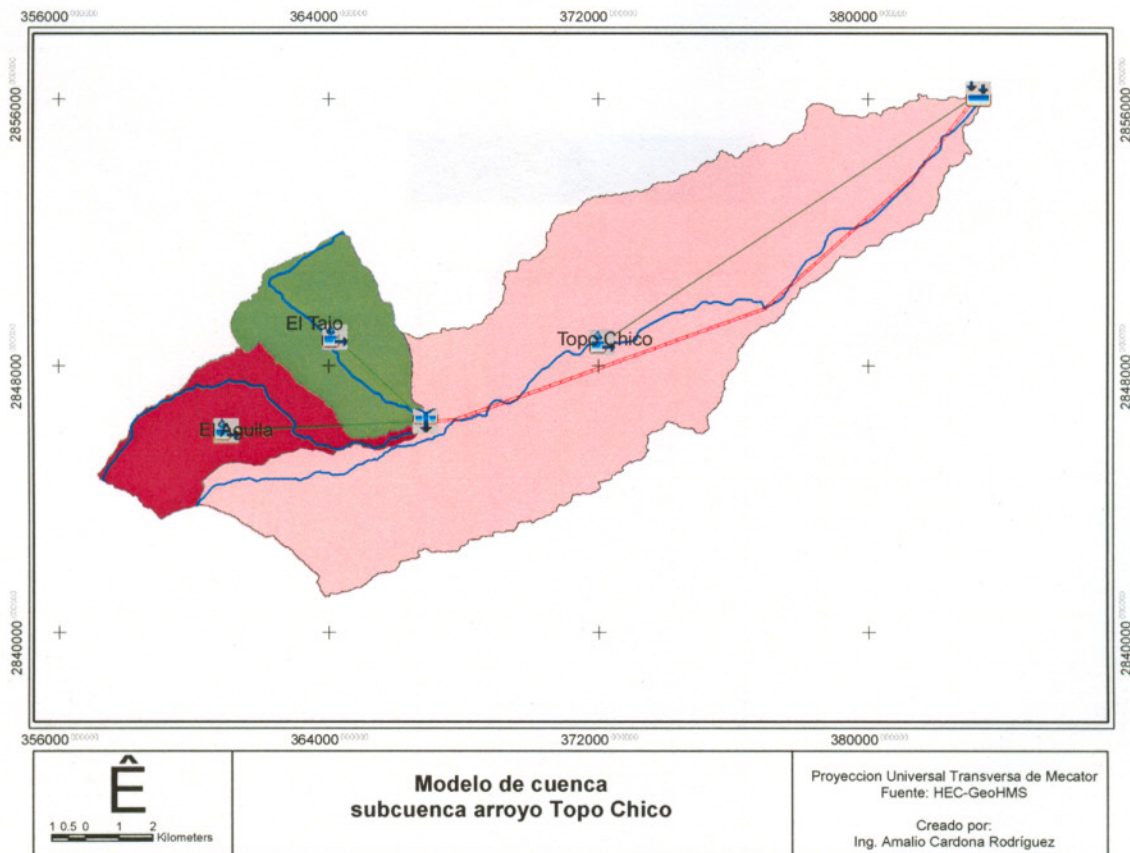


Figura 4.2 Modelo de cuenca del arroyo Topo Chico y los sitios de calculo de hidrogramas.

4.1.1.1 Métodos de cálculo considerados en el modelo hidrológico

El programa HEC-HMS considera una gama métodos de cálculo que, para una mayor referencia pueden ser consultados en el manual del programa, para este caso en particular, el cálculo de la lluvia efectiva, la transformación de la lluvia efectiva en escurrimiento y el flujo base se consideraron los siguientes métodos:

Cálculo de la lluvia efectiva: se empleó el método del Soil Conservation Service (SCS), que requiere parámetros de perdidas iniciales, número de curva y porcentaje de permeabilidad. Estos datos se obtuvieron como se describe en el punto 3.2.6 con el procesamiento de información de uso de suelo y edafología de las subcuencas en el ArcGis 9.1.

Dicho método asume pérdidas iniciales P_o , es decir, lluvias menores a P_o no producen escurrimiento superficial y a partir de esta cantidad, parte de la precipitación escurre superficialmente (S) y otra parte, es retenida (R), la ecuación básica es:

$$\frac{R}{S} = \frac{Pe}{P - P_o}$$

Donde:

Pe = precipitación efectiva (mm)

P = precipitación total (mm)

P_o = abstracción inicial (mm)

Del análisis obtenido para muchas cuencas experimentales, se desarrolló una relación empírica para la abstracción inicial $P_o = 0.2S$, donde

$$S(\text{mm}) = \frac{25400}{NC} - 254, \text{ quedando } P_o = 0.2 \left(\frac{25400}{NC} - 254 \right) (\text{mm})$$

Por lo que se define la ecuación siguiente para la precipitación efectiva:

$$P_e = \frac{(P - P_o)^2}{P - P_o + S}$$

Del análisis de cuencas pequeñas SCS sugiere una condición promedio con la ecuación:

$$P_e = \frac{P - \frac{5080}{NC} + 50.8 \frac{1}{NC}}{P + \frac{20320}{NC} - 203.2}, (\text{mm})$$

NC = número de curva (adimensional) que está en función del grupo hidrológico del suelo y uso del suelo, tabla 3.3.

Cálculo de hidrogramas: para la transformación de la lluvia efectiva obtenida en el paso anterior, en escurrimiento, se empleó el método del hidrograma unitario del Soil Conservation Service; es un hidrograma sintético en el cual, el gasto se expresa por la relación del gasto q con respecto al gasto pico q_p y el tiempo por la relación del tiempo t con respecto al tiempo de ocurrencia del pico en el hidrograma t_p .

Donde los valores de q_p y t_p pueden estimarse del hidrograma unitario triangular mediante las siguientes ecuaciones:

$$q_p = \frac{2.08A}{t_p}$$

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r$$

$$t_r = 0.6t_c$$

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

Donde:

q_p = gasto pico (m^3/s)

t_p = tiempo pico (h)

t_r = tiempo de retraso (h)

t_c = tiempo de concertación (h)

d_e = duración de la lluvia en exceso (h)

A = Área de la cuenca (km^2)

L = Longitud del cauce principal (km)

S = Pendiente media cauce (m/m)

Gasto base: de acuerdo al régimen de escurrimiento de estas corrientes (intermitente), se determinó que la contribución del gasto base en el hidrograma de la subcuenca, como cero.

Tránsito de hidrogramas: el método para el tránsito de los hidrogramas en los tramos de cauce establecidos en el modelo hidrológico fue el de Muskingum, que considera los siguientes parámetros:

K = parámetro de almacenamiento que tiene unidades de tiempo y su valor es aproximadamente igual al tiempo de viaje del pico de la creciente a lo largo del tramo del cauce, para este caso se estimó mediante la ecuación de Kirpich.

x = este parámetro varía entre 0.0 y 0.5, en el primer valor se incrementa la atenuación del pico del hidrograma que se transita en el tramo del cauce y en el segundo valor, no hay atenuación del pico de la creciente, para este caso, se tomó un valor de 0.2 como un valor medio.

El método considera que el almacenamiento (S) en un tramo de río puede descomponerse en dos partes: almacenamiento en prisma, KO , que sería proporcional al gasto de salida (O) y el almacenamiento en cuña, que sería función de la diferencia entre el gasto de entrada y el de salida $KX(I-O)$.

$$S_{prisma} = KO$$

$$S_{cuña} = KX(I - O)$$

El almacenamiento total resulta sumando las expresiones anteriores

$$S = K[XI + (1 - X)O]$$

Donde:

S = almacenamiento en el tramo considerado de un cauce

I = gasto de entrada en ese tramo

O = gasto de salida de ese tramo

K, X = constantes para ese tramo de cauce

4.1.2 Modelo meteorológico (cálculo de la precipitación media)

El modelo calcula la entrada de precipitación que requiere un elemento de subcuenca, el modelo meteorológico para el cálculo de la precipitación media puede usar varios métodos, como pluviómetros con pesos (Thiessen), tormentas asociadas a frecuencias conocidas como I-D-Tr, precipitación por celdas (imágenes de radar), tormentas tipo del SCS, hietograma especificado, etc.

En este caso, para el cálculo de la precipitación media en las subcuencas, el método considerado fue el de pluviómetros con pesos o Thiessen, ingresando las tormentas de diseño determinadas en las estaciones climatológicas convencionales para cada periodo de retorno, para la distribución temporal se consideraron los pesos de las estaciones automáticas del sistema de alertamiento hidroclimatológico (tabla 3.6 y tabla 3.14).

4.1.3 Series de tiempo (distribución temporal de la lluvia)

Los datos de series temporales requeridos en el modelo de cuenca y meteorológico, para la distribución temporal de las tormentas de diseño, se ingresaron considerando la curva masa promedio obtenidas del análisis de las lluvias registradas en las estaciones automáticas del sistema de alertamiento hidroclimatológico MI-02 (Mitrás), CU-03 (Ciudad Universitaria) en el caso de la subcuenca del arroyo Topo Chico y AS-06 (Arroyo Seco) y FE-04 (Fierro) para la subcuenca del río La Silla, información que se presenta en el punto 3.3.3 y en la Figura 3.18.

4.2. Avenidas de diseño para los periodos de retorno

La variación del volumen de escurrimiento en función del tiempo como consecuencia de un evento de precipitación, en las corrientes de una cuenca y específicamente en el punto de salida, son los denominados hidrogramas de crecidas.

La modelación hidrológica produjo hidrogramas para las microcuencas de los afluentes principales definidos en la discretización considerada, hidrogramas de tránsito por los tramos de cauce e hidrogramas en salida de la subcuenca.

El resumen de estos resultados se presenta en la tabla 4.2, donde se presentan los gastos máximos para los diferentes periodos de retorno.

Tabla 4.2 Gastos pico en m³/s obtenidos en las subcuencas y sitios de interés.

Río La Silla							
Subcuenca	Nombre	Área Km ²	Tr= 5	Tr= 10	Tr= 20	Tr= 50	Tr= 100
W90	Bajo Silla	32.72	128.32	165.78	201.43	246.40	278.73
W100	Seco	31.44	151.74	202.08	251.03	313.42	359.00
W110	Medio Silla	30.14	167.43	218.47	267.22	328.68	373.06
W120	Elizondo	34.38	141.98	223.64	316.82	432.84	517.57
W130	Alto Silla	9.24	90.84	123.63	149.18	179.72	201.64
W140	La Virgen	12.71	97.81	150.20	196.26	250.70	289.90
W150	Calabozo	16.49	148.71	217.66	268.93	329.37	372.99
J18	Confluencia	29.20	245.90	367.30	464.28	578.92	661.92
J23	Confluencia	72.82	416.78	628.81	825.81	1066.17	1240.31
J28	Confluencia	134.40	549.07	776.93	993.63	1263.40	1460.15
Salida		167.12	363.37	502.74	635.82	802.80	924.38
Arroyo Topo Chico							
W70	Topo Chico	120.76	471.85	600.39	696.98	811.70	894.96
W80	El Tajo	19.58	221.26	261.55	287.43	317.67	339.54
W110	El Águila	20.18	195.03	234.75	264.58	301.38	328.72
J28	Confluencia	39.76	416.30	496.30	552.01	619.04	668.26
Salida		160.52	624.80	783.04	900.30	1039.70	1141.10

La representación gráfica de los hidrogramas de diseño obtenidos a la salida de las subcuencas del río La Silla y arroyo Topo Chico, se muestra en las Figuras 4.3 y 4.4.

Hidrogramas de diseño

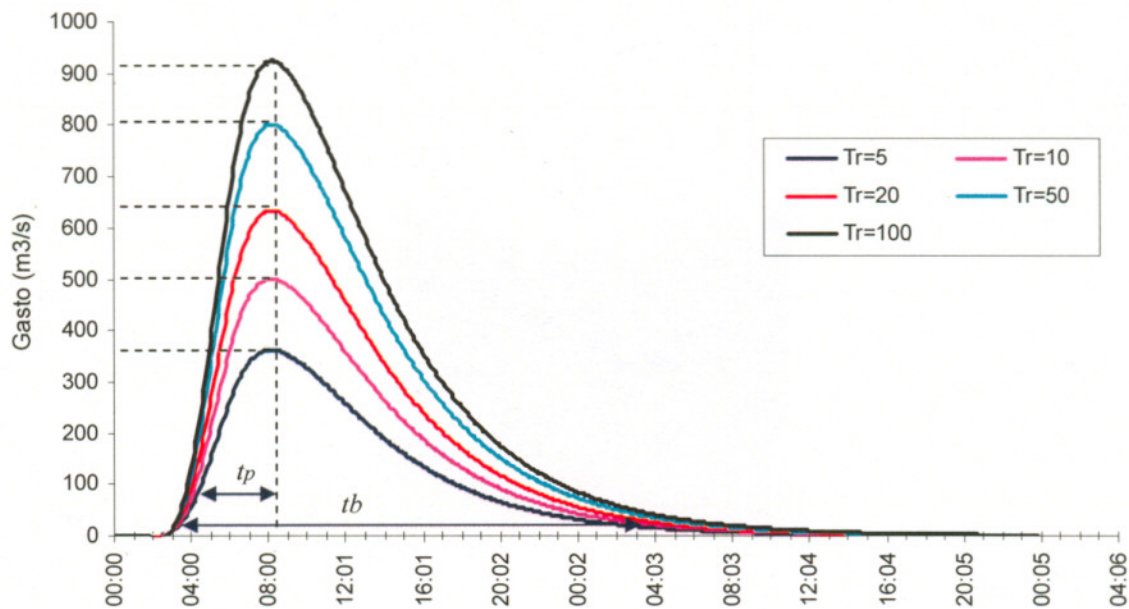


Figura 4.3 Hidrogramas de diseño a la salida de la subcuenca del río La Silla.

Hidrogramas de diseño

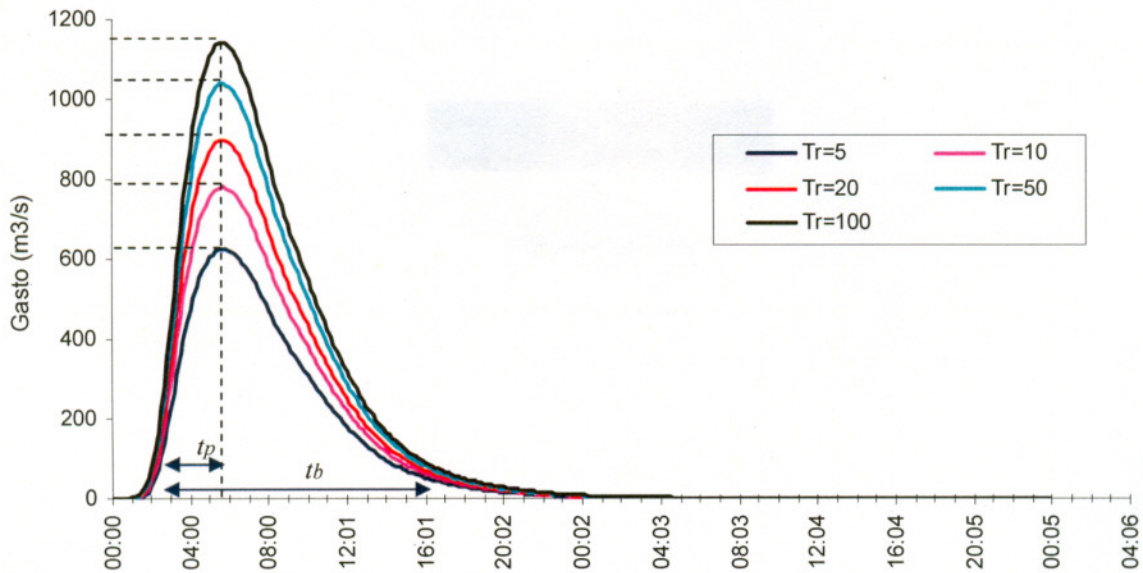


Figura 4.4 Hidrogramas de diseño a la salida de la subcuenca del arroyo Topo chico

Del análisis de la respuesta hidrológica de las subcuencas del río La Silla y del arroyo Topo Chico presentados en las Figuras 4.3 y 4.4, se pueden hacer los siguientes comentarios: el gasto máximo ocurre a las 5 horas que es el tiempo pico (t_p) o el tiempo que transcurre desde el inicio de la creciente hasta que se alcanza el gasto máximo, para la subcuenca de arroyo Topo Chico el gasto máximo ocurre a un tiempo pico de 3 horas. Por otra parte, el tiempo estimado de duración de la creciente es de 24 y 18 horas respectivamente, este tiempo es el tiempo base (t_b). Estas diferencias en los tiempos de respuesta es congruente con el grado de urbanización existente en las subcuencas.

Capítulo 5 MODELACIÓN HIDRÁULICA

5.1 Modelo Hidráulico en HEC-RAS

Para realizar las modelaciones hidráulicas se utilizó el programa de cómputo HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) de dominio público generado en el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos.

El sistema HEC-RAS en su versión mas reciente (4.0 beta) contiene fundamentalmente cuatro componentes de análisis hidráulicos unidimensionales, para (1) flujo permanente en el cálculo del perfil hidráulico, (2) simulación de flujo no permanente y (3) cálculo del transporte de sedimentos y (4) análisis de calidad del agua. Para este caso, se empleo la versión 3.1.3 de este programa.

En el componente de la superficie libre del agua para flujo permanente, realiza los cálculos de los perfiles para un flujo gradualmente variado. El sistema puede manejar una gran red de canales (un sistema dendrítico), o simplemente la corriente de un río. Se pueden manejar modelaciones para un régimen subcrítico, supercrítico y para un régimen de flujo mixto.

Los efectos de varias obstrucciones tales como puentes, alcantarillas, vertedores y estructuras en el cauce pueden ser considerados en los cálculos. Así mismo, hay capacidad para estimar el cambio en el perfil de la superficie del agua debido a acciones estructurales como mejoras en los canales y diques.

La elaboración del modelo hidráulico, se llevó a cabo con el uso de la extensión HEC-GeoRAS en el programa ArcGis 9.1, extensión que permitió trazar la red dendrítica de los cauces de las subcuencas con la representación del sistema de ríos, usando una red esquemática con elementos del modelo (secciones transversales, puentes, alcantarillas etc.). El archivo obtenido sirvió de entrada al programa HEC-RAS, donde se realiza propiamente la modelación hidráulica para los gastos que fueron obtenidos en el modelo hidrológico.

Los resultados de esta modelación, son los tirantes de agua calculados en cada sección transversal de la red de ríos y los perfiles de la superficie libre de agua, resultados que son exportados al programa ArcGis 9.1, para completar el procesamiento con la extensión HEC-GeoRAS y obtener un mapa de inundación en formato raster asociado a cada periodo de retorno.

5.1.1 Levantamiento LIDAR (Light Detecting and Ranging) y modelo digital de elevación

La tecnología LIDAR (Light Detecting and Ranging) es una técnica de percepción remota que consiste en la medición del terreno a distancia mediante un sistema láser. Actualmente el LIDAR es la tecnología más precisa para la generación de modelos digitales del terreno. El LIDAR ha revolucionado la generación de MDE de alta precisión para distintas aplicaciones, principalmente en la elaboración de cartografía para estudios hidráulicos.

El Gobierno del Estado de Nuevo León a través de la Agencia para la Planeación del Desarrollo Urbano, realizó en abril del 2007, el levantamiento LIDAR de la zona metropolitana de Monterrey, el propósito fue emplear los productos (curvas de nivel, MDE, ortofotos) en la elaboración del Atlas de Riesgos de la ciudad.

En el caso de las subcuencas en estudio, la información del modelo digital de elevación, curvas de nivel y ortofotos fue proporcionada por la citada Agencia.

En la Figuras 5.1 y 5.2, se muestra el modelo digital de elevación para la subcuenca del río La Silla y Topo Chico, en formato raster con celdas de tamaño 4.0 m y 5.0 m respectivamente, en cada celda se asigna un valor predominante de altura sobre el nivel medio del mar. Se observa claramente la planicie de inundación (zona roja) donde existe una mayor densidad de urbanización, mientras que las partes altas de la cuenca (zonas verdes y amarillas) existe una menor urbanización que aun funcionan como áreas de amortiguamiento de las precipitaciones. El caso del Arroyo Topo Chico, es una subcuenca prácticamente urbanizada en su parte alta y media quedando una zona aun sin desarrollar, en la parte baja que es, donde han presentado problemas de desbordamientos.

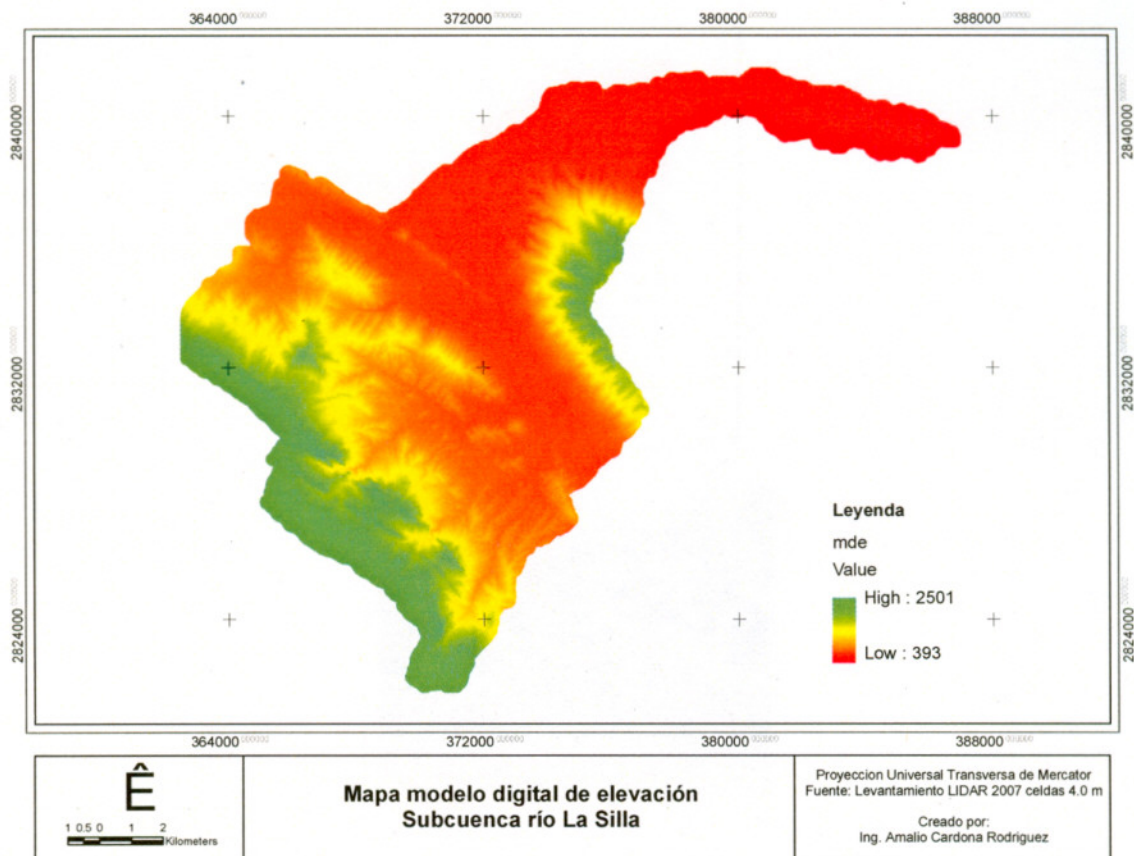


Figura 5.1 Modelo digital de elevación en formato raster de la subcuenca del río La Silla con una resolución espacial de 4.0 m

Este modelo digital de elevación fue empleado en la construcción de la red geométrica del modelo hidráulico, para la representación del sistema de ríos en la subcuenca y de las secciones transversales que se usan en la simulación hidráulica del sistema.

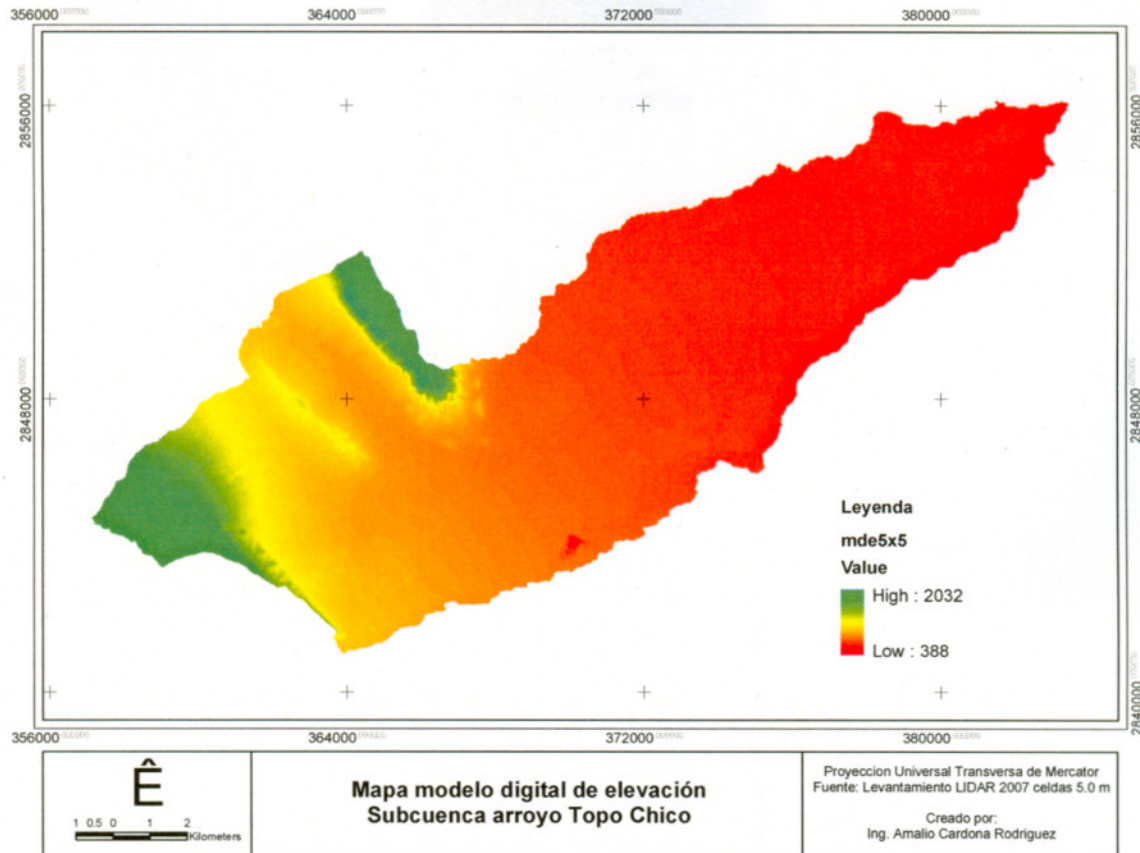


Figura 5.2 Modelo digital de elevación en formato raster de la subcuenca del río La Silla con una resolución espacial de 5.0 m

5.1.2 Construcción de la geometría del modelo

Primeramente, fue necesario realizar el trazo de la corriente principal y sus afluentes en las dos subcuencas. Como se mencionó la herramienta utilizada fue el HEC-GeoRAS, mediante la opción RAS Geometry que permite crear las capas de información correspondientes al río principal, las secciones transversales normales al cauce, la trayectoria del flujo, el uso del suelo en la zona adyacente al cauce para el coeficiente de rugosidad “n” de la ecuación de Manning, la definición de obstrucciones a la conducción hidráulica dentro de la trayectoria del río como puentes y alcantarillas. (HEC-GeoRAS GIS Tools, 2005)

En la Figura 5.3 se presenta la barra del menú de la herramienta HEC-GeoRAS que se usó para crear las capas de información mencionadas.

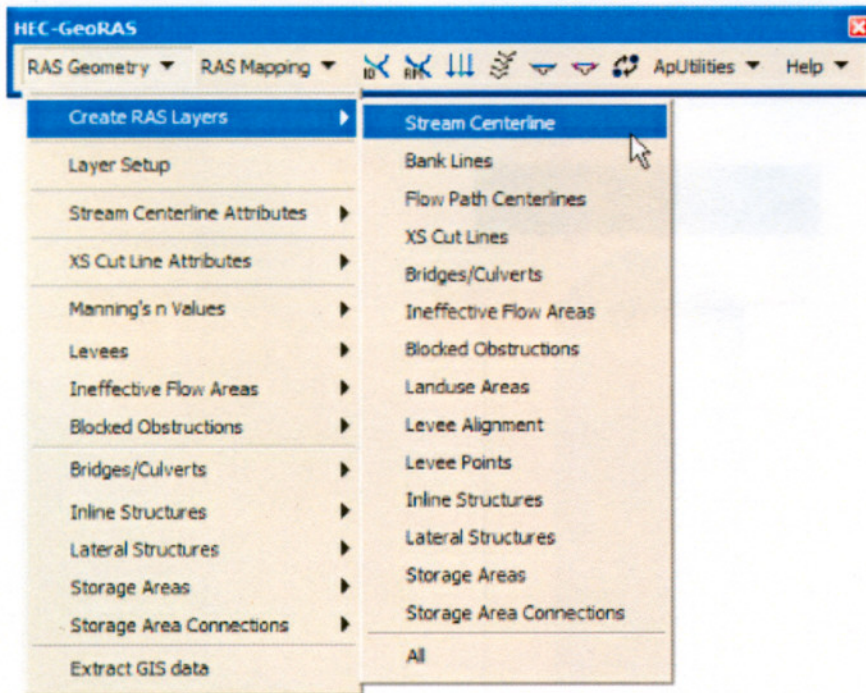


Figura 5.3 Barra de menú de la herramienta HEC-GeoRAS para crear las diferentes capas del modelo hidráulico del río.

Para realizar el trazo de los cauces, se empleó como apoyo las curvas de nivel equidistantes a 0.5 m y ortofotos que fueron proporcionadas por la Agencia para la Planeación del Desarrollo Urbano del Gobierno del Estado de Nuevo León.

Una vez definido el trazo de los cauces sobre el modelo digital de elevaciones se extrajeron las coordenadas de las secciones transversales con la herramienta HEC-GeoRAS. Las secciones fueron extraídas a cada 50 m para la red dendrítica definida.

Al final, se obtuvo un archivo con la representación del sistema de ríos que se compone de un cauce principal, el río La Silla y Arroyo Topo Chico, sus tributarios principales, arroyo Calabozo, la Virgen, Elizondo, arroyo Seco para el primer caso y canal el Águila y arroyo el Tajo, para el segundo caso.

En la Figura 5.4 y 5.5 se presenta el esquema de la red dendrítica modelada para las subcuencas, con las secciones transversales y el sentido del flujo.

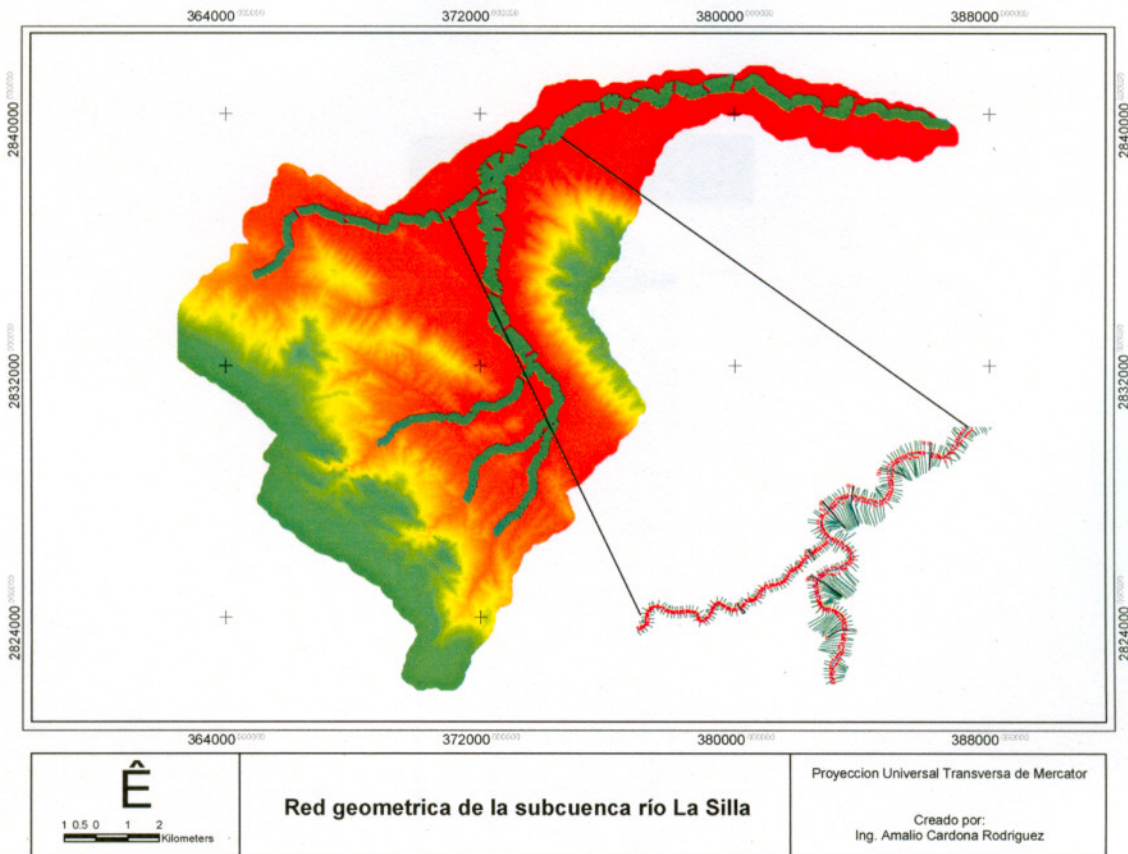


Figura 5.4 Red geométrica del modelo dendrítico de la subcuenca del río La Silla

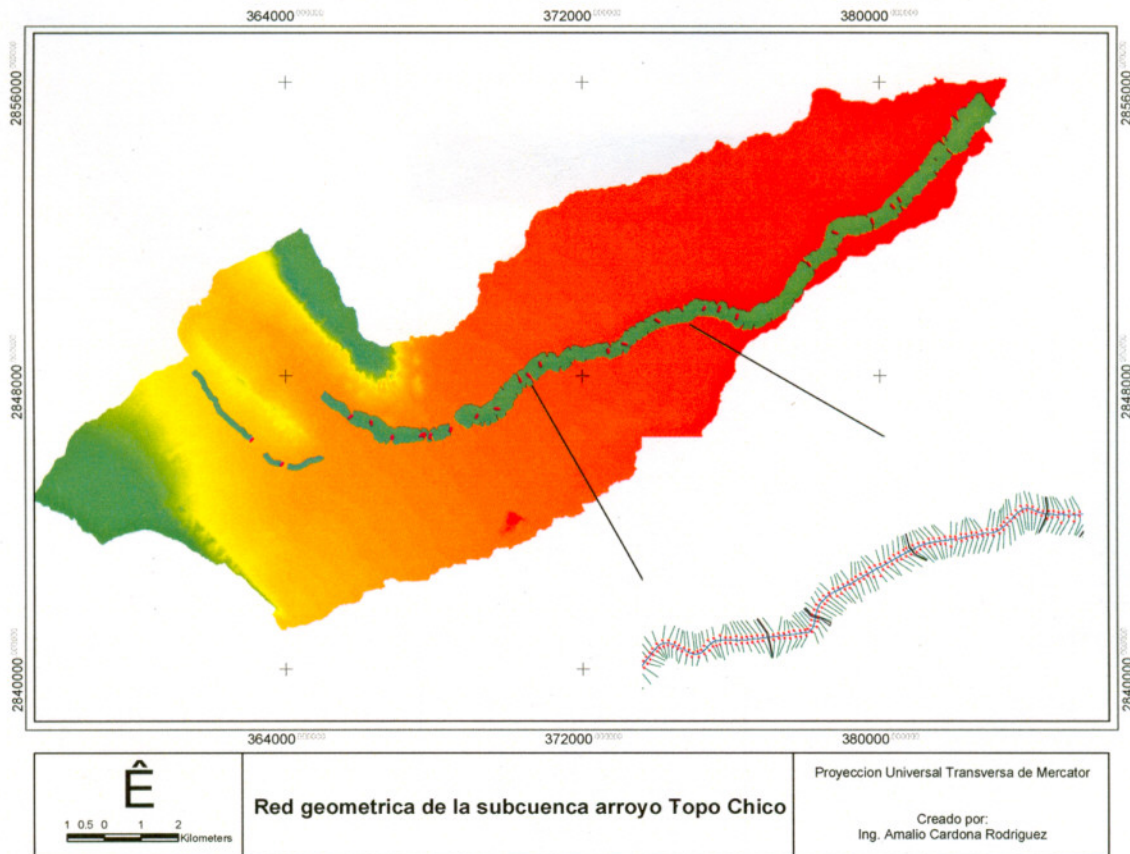


Figura 5.5 Red geométrica del modelo dendrítico de la subcuenca del arroyo Topo Chico

5.1.3 Métodos de cálculo en el modelo hidráulico

El programa HEC-RAS realiza el análisis para flujo permanente y flujo no permanente. Para este caso, se consideró el flujo permanente, transitando los gastos máximos de los hidrogramas obtenidos en el modelo hidrológico del capítulo 4.

El cálculo del tirante de agua se determina a través de la ecuación de energía, resolviendo ésta de manera iterativa entre dos secciones transversales del cauce. La ecuación de energía se muestra a continuación:

$$z_1 + y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} + h_f$$

Donde:

z_1, z_2 = es la elevación del canal de las secciones aguas arriba (1) y aguas abajo (2).

y_1, y_2 = es el tirante de agua sobre la superficie del canal en las secciones aguas arriba (1) y aguas abajo (2).

a_1, a_2 = coeficientes de velocidad.

V_1, V_2 = velocidad promedio en el canal.

h_f = pérdidas de energía entre las secciones (1) y (2).

El proceso de solución se lleva a cabo satisfaciendo ambas partes de la ecuación. Con base en las condiciones de frontera definidas al modelo ya sea para aguas arriba o aguas abajo dependiendo del régimen de flujo que se pretende modelar, el programa comienza la iteración hasta lograr la convergencia con una tolerancia de 0.003 m en los tirantes.

El modelo hidráulico del sistema se realizó considerando puentes y vados sobre el cauce con aportación de gasto de los tributarios.

La longitud de ríos analizada para la subcuenca del río La Silla fue de 55.3 kilómetros (cauce principal y tributario), dividida en dos tramos: tramo 1 aguas arriba de la confluencia con el arroyo Seco, tramo 2 aguas abajo de esta confluencia, el número de secciones transversales fue de 1106 en total. En el caso del arroyo Topo Chico la longitud del río fue de 29.4 km (cauce principal y tributario), dividida en dos tramos: tramo 1 aguas arriba de la confluencia con el canal el Águila y tramo 2 aguas abajo de esta, el número de secciones transversales fue de 518 en total.

5.1.4 Coeficiente de rugosidad de Manning

La selección de un valor apropiado para valor de n de Manning es muy significativa en los perfiles de superficie de agua calculados. La selección de los valores de rugosidad “ n ” fue de acuerdo a las condiciones actuales del canal principal del río y el espacio comprendido hacia ambas márgenes del mismo, así como las condiciones de la planicie de inundación.

Obteniendo valores de rugosidad diferentes de acuerdo a la posición horizontal de la sección transversal, estos valores se obtuvieron del manual de referencia del programa HEC-RAS.

En el cauce del río La Silla y tributarios, en el canal principal se asignó el valor de 0.045 de acuerdo a las condiciones observadas en campo, que corresponde a escurrimientos naturales, con algunas pozas, piedras y maleza, y al espacio comprendido entre las márgenes izquierda y derecha del canal principal y la zona construida con viviendas dentro de la planicie de inundación se asignó un valor máximo de 0.080 que corresponde a planicies de inundación con árboles y obstrucciones.

En el cauce del arroyo Topo Chico y tributarios, dado que se trata de cauces que han sido canalizados y encauzados los valores de rugosidad asignados al canal canalizado fue de 0.013 como valor normal que corresponde a concreto acabado y en las márgenes construidas con viviendas un valor máximo de 0.08; después de la avenida Santo Domingo, la sección va encauzada con gaviones en los taludes, desde este sitio, se eligió un valor de rugosidad de 0.04 que corresponde a rocas irregulares.

Los valores de rugosidad se representan esquemáticamente en la sección transversal de la Figura 5.6 de la estación RS=14954.9 del cauce del río La Silla, tramo 2 y en la Figura 5.7 la fotografía de un sitio representativo donde se aprecian las condiciones de campo existentes consideradas para la selección del valor de rugosidad. En la Figura 5.8 y 5.9 los valores de rugosidad correspondientes al arroyo Topo Chico de la estación RS=21749.58.

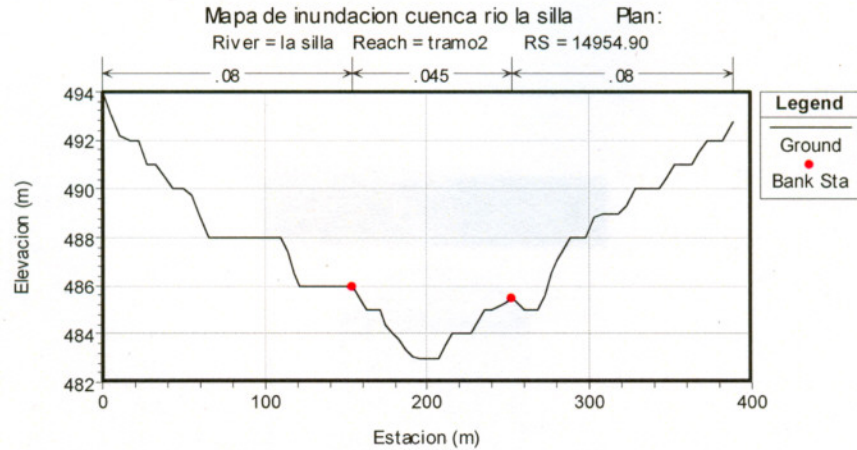


Figura 5.6 Asignación de los coeficientes de rugosidad "n" en la sección transversal del cauce río la Silla.



Figura 5.7 Condiciones existente en el canal del cauce y las márgenes para la selección de coeficientes de rugosidad "n" en la sección transversal del río la Silla.

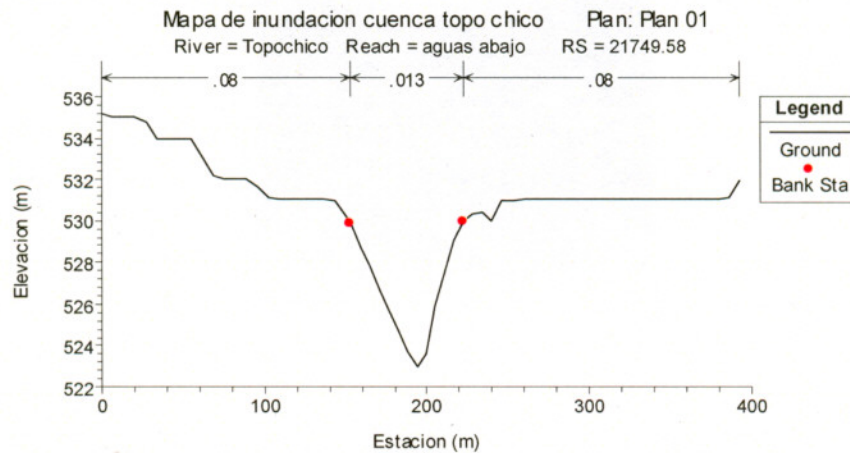


Figura 5.8 Asignación de los coeficientes de rugosidad "n" en la sección transversal del arroyo Topo Chico.



Figura 5.9 Condiciones existente en el canal del cauce y las márgenes para la selección de coeficientes de rugosidad "n" en la sección transversal del arroyo Topo Chico.

5.1.5 Gastos máximos

La información de gastos se requiere para calcular el perfil de la superficie libre del agua. El modelo HEC-RAS, realizó el cálculo del perfil de la superficie del agua, en un análisis unidimensional para flujo permanente, sólo para el gasto pico gradualmente variado en ríos. Los gastos máximos fueron calculados previamente en el modelo HEC-HMS.

En la Figura 5.10 y 5.11 se presentan los gastos máximos para cada período de retorno analizados en el modelo hidráulico de la subcuenca del río la Silla y del arroyo Topo Chico.

Steady Flow Data - flujos

File Options Help

Enter/Edit Number of Profiles (2000 max): 5 Reach Boundary Conditions Apply Data

Locations of Flow Data Changes

River: arroyo seco

Reach: tributario River Sta: 10650 Add A Flow Change Location

Flow Change Location		Profile Names and Flow Rates					
River	Reach	R5	$t_r=5$	$t_r=10$	$t_r=20$	$t_r=50$	$t_r=100$
1	arroyo seco tributario	10650	152	202	251	313	359
2	calabozo aguas arriba	7300	149	218	269	329	373
3	calabozo aguas abajo	2795.368	275	405	509	633	724
4	elizondo tributario	6700	142	224	317	433	518
5	la silla tramo1	25968.57	378	575	743	950	1101
6	la silla tramo2	18452.06	363	503	636	803	924
7	la virgen tributario	4600	93	150	196	251	290

Edit Steady flow data for the profiles [m³/s]

Figura 5.10 Gastos máximos en m³/s en la subcuenca del río la Silla.

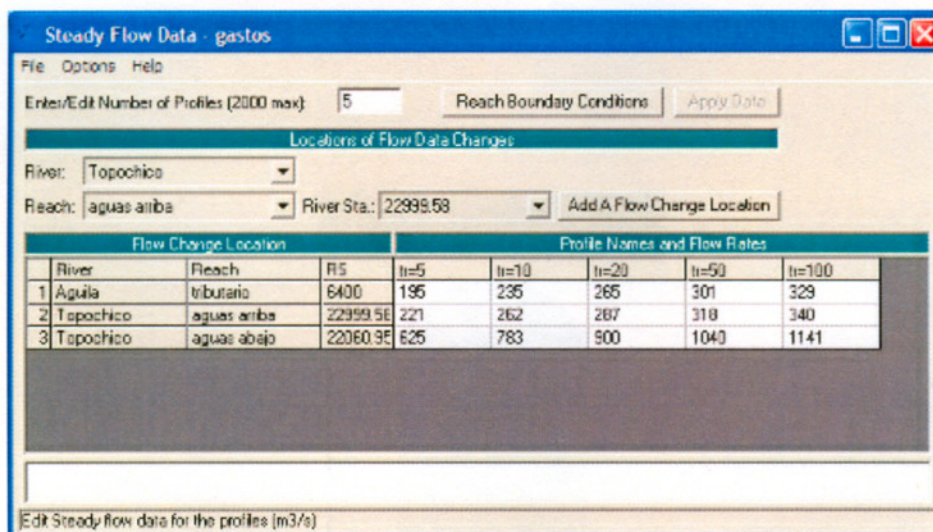


Figura 5.11 Gastos máximos en m³/s en la subcuenca del arroyo Topo Chico.

5.1.6 Condiciones de frontera del modelo hidráulico

Las condiciones de frontera son necesarias para establecer el estado inicial de la superficie del agua y que el programa HEC-RAS inicie los cálculos.

Inician con un valor conocido definido por las condiciones de frontera y prosiguen aguas arriba o aguas abajo según el régimen de flujo que se esté modelando (subcrítico o supercrítico). En el caso de un régimen subcrítico, las condiciones de frontera son solo necesarias aguas abajo (fin del sistema de ríos). Para un régimen supercrítico, sólo se necesita la condición de frontera aguas arriba y en caso de modelar un régimen mixto, se requieren ambas.

Paras las subcuencas en estudio, dadas las condiciones de los cauces el régimen de flujo pasa de una condición subcrítica a supercrítica y viceversa, por lo que se consideró modelar un régimen mixto, definiendo las condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo, considerando el estado inicial de la superficie del agua con la profundidad normal. En la Figura 5.12 y 5.13 se presentan las condiciones de frontera asignadas al sistema de ríos.

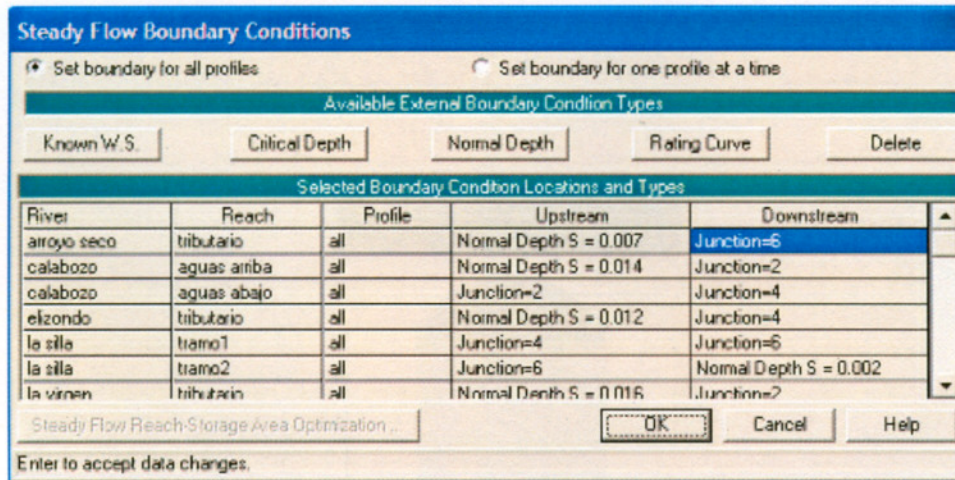


Figura 5.12 Condiciones de frontera consideradas para el cálculo de los perfiles de agua en el río La Silla.

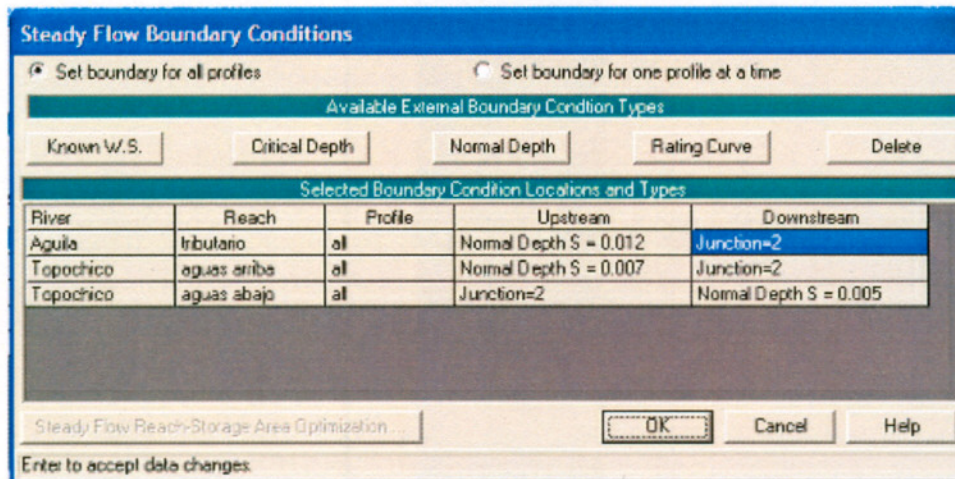


Figura 5.13 Condiciones de frontera consideradas para el cálculo de los perfiles de agua en el arroyo Topo Chico.

5.1.7 Estructuras de cruce, puentes y alcantarillas considerados en el modelo

El modelo hidráulico implicó, la incorporación de estructuras como puentes y vados que ubicaban en la trayectoria de los ríos, a fin de determinar su efecto en el tránsito de los gastos determinados en modelo hidrológico.

La información requerida en HEC-RAS para incorporar estas estructuras se obtuvo del mismo procesamiento de datos en el ArcGis 9.1 con la herramienta de HEC-GeoRAS y ortofotos, en este caso fue necesario efectuar mediciones en campo para obtener datos sobre la equidistancia entre pilas, altura y ancho de las pilas, altura de la trabe y ancho del puente, información que es necesario completar en HEC-RAS debido a que los datos de los puentes y alcantarillas es la mas incompleta en el archivo que se importa de ArcGis.

Se modelaron las estructuras que se indican en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Principales estructuras de cruce en los cauces que fueron consideradas en el modelo de la subcuenca del río la Silla y del arroyo Topo Chico.

Río	Tramo	Ancho puente (m)	Nomenclatura
La silla	tramo1	11.0	Puente Lago Erie
La silla	tramo1	10.0	Puente Alfonso Reyes
La silla	tramo2	15.0	Puente Lázaro Cárdenas
La silla	tramo2	8.0	Alcantarilla Parque Pipo
La silla	tramo1	11.0	Puente Pase de Las Fuentes
La silla	tramo1	20.0	Puente Solidaridad
La silla	tramo2	10.0	Puente el Realito
La silla	tramo2	10.0	Alcantarilla Arteaga
La silla	tramo2	30.0	Puente Chapultepec
La silla	tramo2	24.0	Puente Las Américas
La silla	tramo2	10.0	Puente Tolteca
La silla	tramo2	30.0	Puente Benito Juárez
La silla	tramo2	26.0	Puente López Mateos
La silla	tramo2	15.0	Puente Parque Pipo
La silla	tramo2	25.0	Puente Dos Ríos
La silla	tramo2	10.0	Puente Av. México
La silla	tramo1	9.0	Puente Canoas
arroyo seco	tributario	30.0	Puente Revolución
arroyo seco	tributario	30.0	Puente Félix U Gómez
arroyo seco	tributario	50.0	Puente Lázaro Cárdenas
arroyo seco	tributario	30.0	Alcantarilla Fundadores
Topo Chico	tramo2	24.5	Puente Rangel Frías
Topo Chico	tramo2	21.0	Puente Bernardo Reyes
Topo Chico	tramo2	8.0	Puente Calle Terán
Topo Chico	tramo2	8.0	Puente Calle Copan
Topo Chico	tramo2	40.0	Puente FFCC
Topo Chico	tramo2	46.0	Alcantarilla Barragán
Topo Chico	tramo2	323.0	Alcantarilla F García Lorca
Topo Chico	tramo2	35.0	Puente Universidad
Topo Chico	tramo2	25.0	Puente Calle Parques de Anahuac
Topo Chico	tramo2	52.0	Puente Juan Pablo II
Topo Chico	tramo2	17.0	Puente Av. las Puentes
Topo Chico	tramo2	16.0	Puente Av. San Nicolás
Topo Chico	tramo2	16.0	Puente Av. de las Puentes
Topo Chico	tramo2	15.0	Puente Av. Santo Domingo
Topo Chico	tramo2	10.0	Puente Vicente Guerrero
Topo Chico	tramo2	8.0	Puente Antiguo Camino S Domingo
Topo Chico	tramo2	10.0	Puente Calle Hidalgo
Topo Chico	tramo2	14.0	Puente Camino Mezquital-S Rosa
Topo Chico	tramo2	9.0	Puente Av. Chopo
Topo Chico	tramo2	10.0	Puente Av. Reforma
Topo Chico	tramo2	10.0	Puente Lib. Rubén García
Topo Chico	tramo2	14.0	Puente Av. Zaragoza
Topo Chico	tramo2	14.0	Puente 5 de Mayo
Águila	tributario	574.0	Alcantarilla Calle Marsala
Águila	tributario	181.0	Alcantarilla Rangel Frías

Los algoritmos de modelación, del programa HEC-RAS, permiten utilizar aproximaciones diferentes de acuerdo a los gastos bajos (por abajo de nivel de la trabe) o gastos altos (por encima del puente) modelados. Para ambos casos, se seleccionó como opción en la modelación la ecuación de energía.

5.2 Mapas de inundación y zonificación de la amenaza por inundaciones

Esta parte, es el proceso final donde los resultados obtenidos en la modelación hidráulica realizada con HEC-RAS, se plasman en los mapas y define las planicies de inundación para cada subcuenca.

El modelo hidráulico permitió, determinar los límites de las áreas de inundación, para los gastos que fueron obtenidos con anterioridad en el modelo hidrológico. Como resultado se obtuvieron valores de profundidades del gasto en todas las secciones transversales consideradas.

En la Figura 5.14 se indica la sección transversal de la estación RS=14954.9, tramo 2 del cauce principal del río la Silla, con los tirantes de agua obtenidos para cada gasto relacionado a los periodos de retorno. Y en la Figura 5.15 la sección transversal de la estación RS=21749.58 tramo 1 del canal Topo Chico con los tirantes resultantes en los gastos transitados.

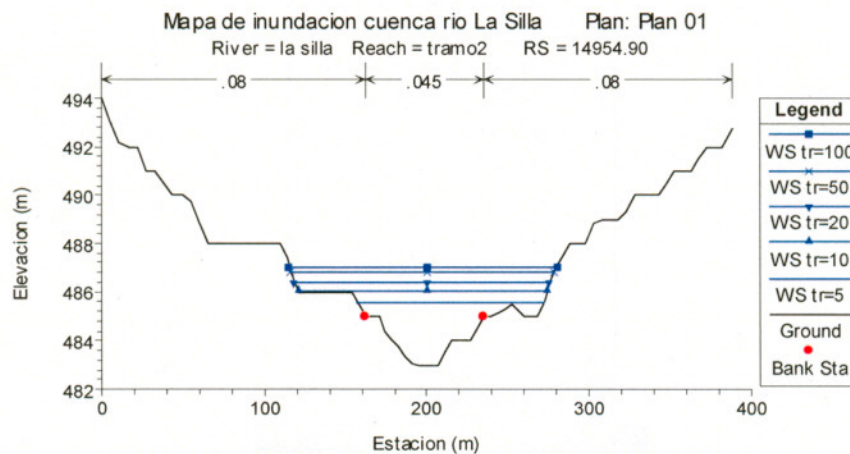


Figura 5.14 Tirantes de agua en una sección transversal para cada gasto analizado en el río La Silla.

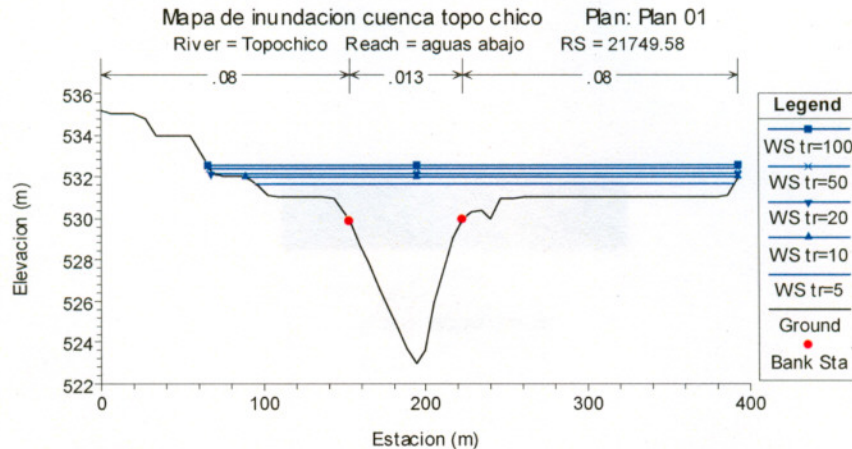


Figura 5.15 Tirantes de agua en una sección transversal para cada gasto analizado en el arroyo Topo Chico.

Los resultados de las simulaciones de HEC-RAS fueron exportadas a ArcGis 9.1, donde se continuo el proceso con la herramienta HEC-GeoRAS. Para cada gasto analizado en el modelo hidráulico, se creó un modelo digital de la superficie libre de agua en formato raster. El raster de la superficie libre de agua y del terreno se interceptó para obtener como resultado las profundidades del gasto en las zonas inundadas así como los límites de los polígonos de inundación.

Dicha modelación hidráulica es ilustrada a través del mapa de amenaza de inundación para los períodos de retorno establecidos en el estudio.

Es importante mencionar que el análisis de gastos fue hecho, sin considerar arrastre de sedimentos, sin embargo, con las velocidades que se registran el arrastre de sedimentos definitivamente ocurre erosionando las paredes de la sección transversal y depositando material a lo largo del trayecto por lo que la capacidad de la sección puede verse disminuida, en el caso del río La Silla, donde los cauces están sin canalizar a excepción del arroyo Seco.

En lo que respecta al perfil del agua en el cauce, en la Figura 5.16, aparece el perfil hidráulico del tramo 1 del cauce principal del río La Silla, con los niveles de los hombros derecho (ROB) e izquierdo (LOB) representados mediante líneas discontinuas de color violeta y verde respectivamente. Las secciones en donde la línea de la superficie de agua (varios colores) esté por encima de las líneas de los hombros indican que el agua rebasó los márgenes del canal principal y se encuentra el agua dentro de la planicie de inundación, ya sea por la margen izquierda, derecha o por ambas. En la Figura 5.17 se presenta esta misma información para el cauce principal del arroyo Topo Chico.

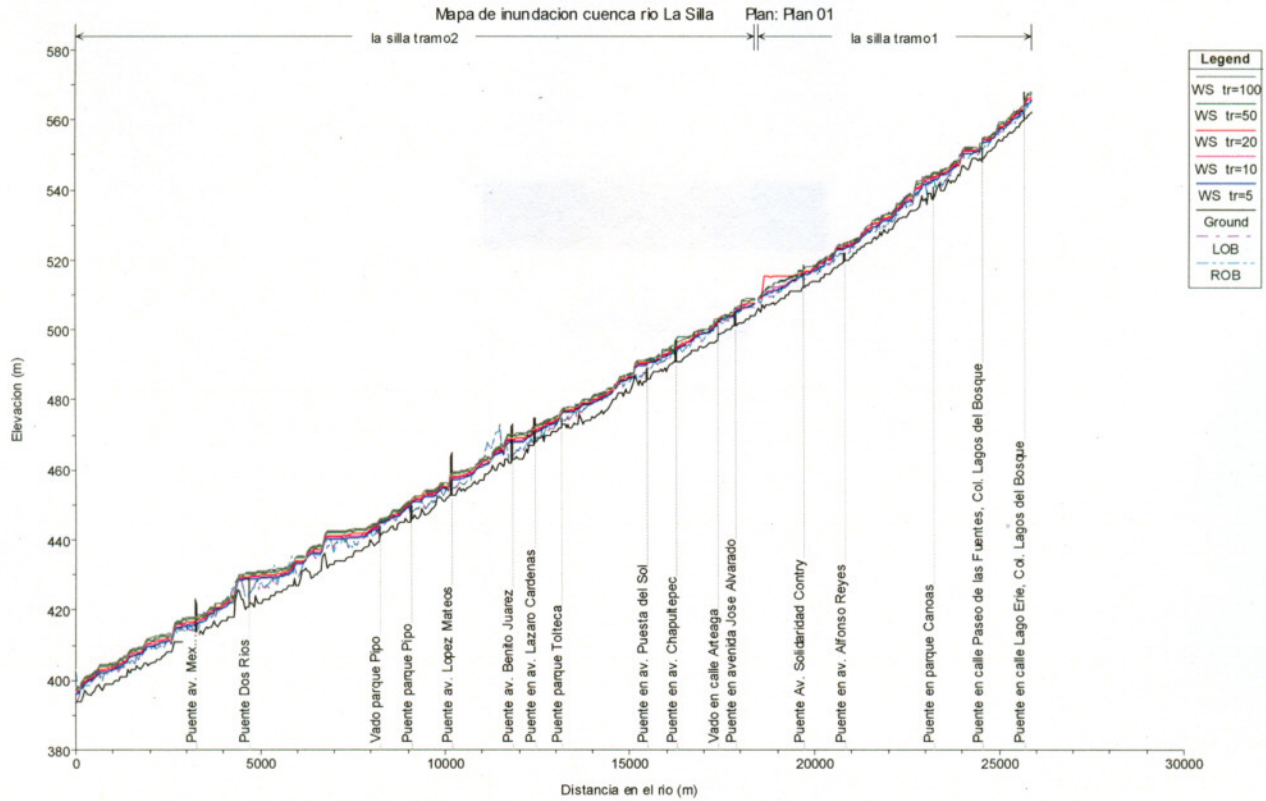


Figura 5.16 Perfil hidráulico del cauce principal río La Silla para los gastos transitados.

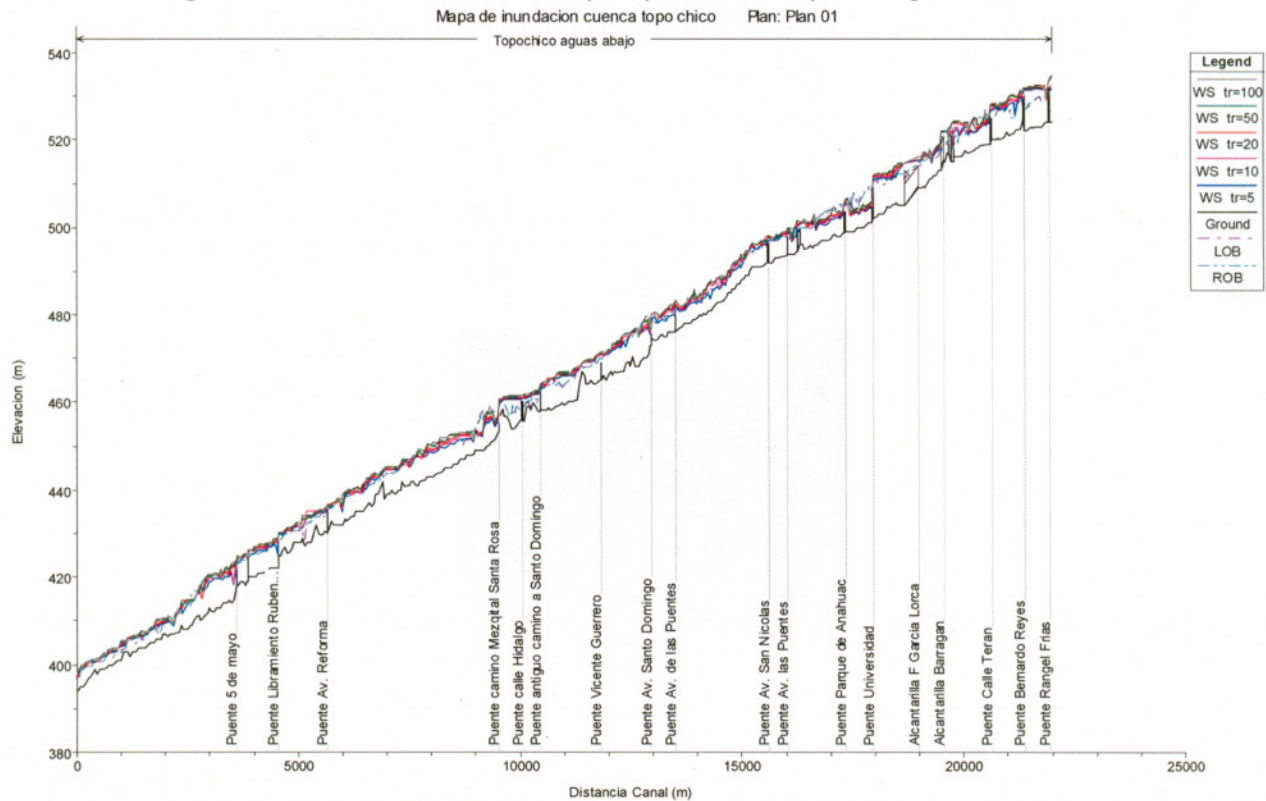


Figura 5.17 Perfil hidráulico del cauce principal arroyo Topo Chico para los gastos transitados.

Aplicando la matriz descrita en el punto 1.3 para la clasificación de las zonas inundables, se crearon los mapas bajo los criterios siguientes:

- **Zonas de amenaza alta.** zonas en donde la inundación de cualquier periodo de retorno supera 1 m produciendo graves daños a la población e infraestructura expuesta. También se considera zona de alta amenaza aquella inundación de alta frecuencia con profundidades de agua desde 0.5 a 1 m.
- **Zonas de amenaza media.** zonas en donde la inundación de frecuencia alta es menor a 0.5 m, y la inundación de frecuencia moderada es menor a 1 m, y producirá generalmente daños reparables a viviendas e infraestructura, pero no destrucción total, y algunas pérdidas de vidas.
- **Zonas de amenaza baja.** zonas en donde la inundación de frecuencia moderada no supera 0.5 m produciendo daños leves a la población e infraestructura. Las inundaciones de frecuencia baja pueden llegar hasta 1 m.

En la Figura 5.18 se muestra el mapa de zonificación de amenazas de la subcuenca del río la Silla, sobre como se distribuye el tirante de agua para el periodo de retorno de 20 años y el limite del polígono de inundación.

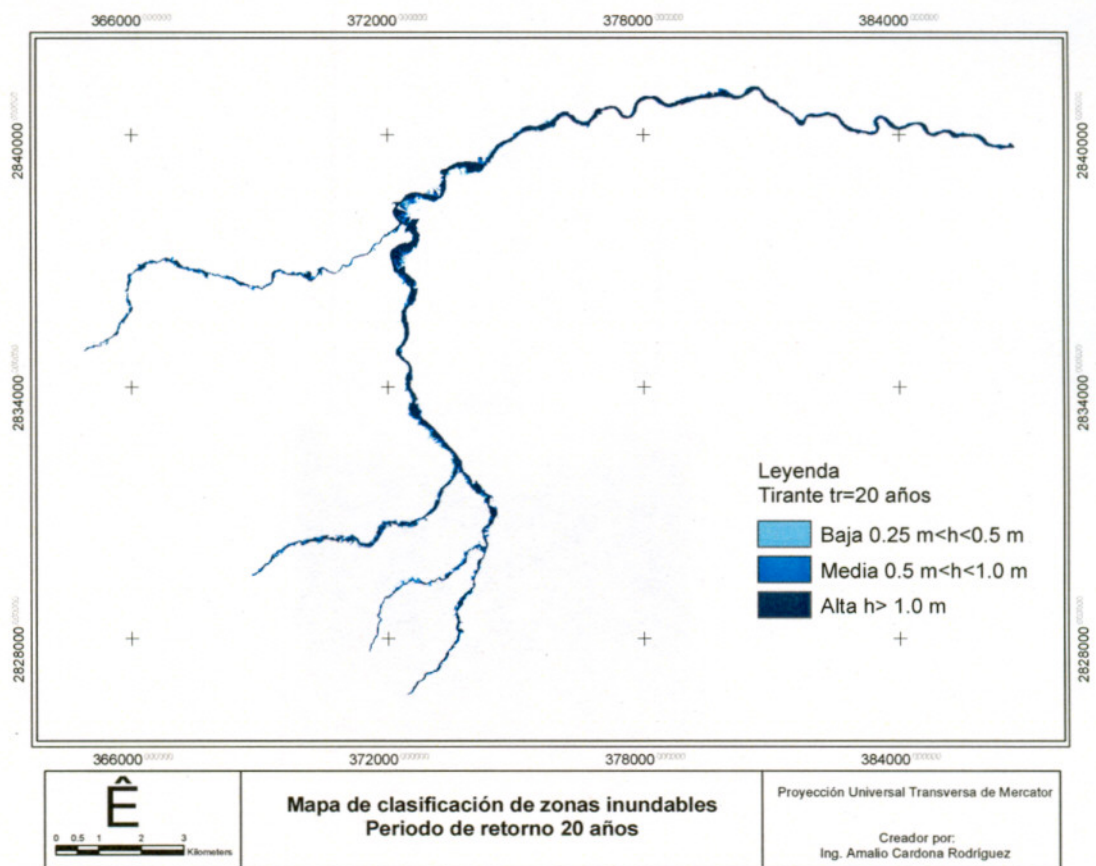


Figura 5.18 Limite del polígono de inundación con la zonificación de amenazas en la subcuenca del río la Silla.

En la Figura 5.19 se presenta un acercamiento a este mismo mapa, a la altura de la confluencia del arroyo seco y el cauce principal del río la silla, donde se observan las áreas habitacionales e infraestructura expuesta cuando se presenten los gastos asociados a este periodo de retorno.

Cabe mencionar como algunas estructuras de cruce (puentes y alcantarillas), producen el incremento en el nivel de agua por la obstrucción que ocasionan debido a insuficiencia hidráulica, en la Figura 5.16, del perfil hidráulico del río La Silla se puede observar esta situación, donde algunas estructuras producen remanso ocasionando el desbordamiento del cauce con la consecuente inundación de las zonas habitacionales ubicadas en las márgenes de aguas arriba, como se observa en la Figura 5.19.

Mientras que en el arroyo Topo Chico, prácticamente las estructuras de cruce son insuficientes hidráulicamente, en los periodos de retorno mayores (Figura 5.17) ocasionando el desbordamiento del cauce e inundaciones en las zonas aledañas al arroyo que se encuentran urbanizadas (Figura 5.20).

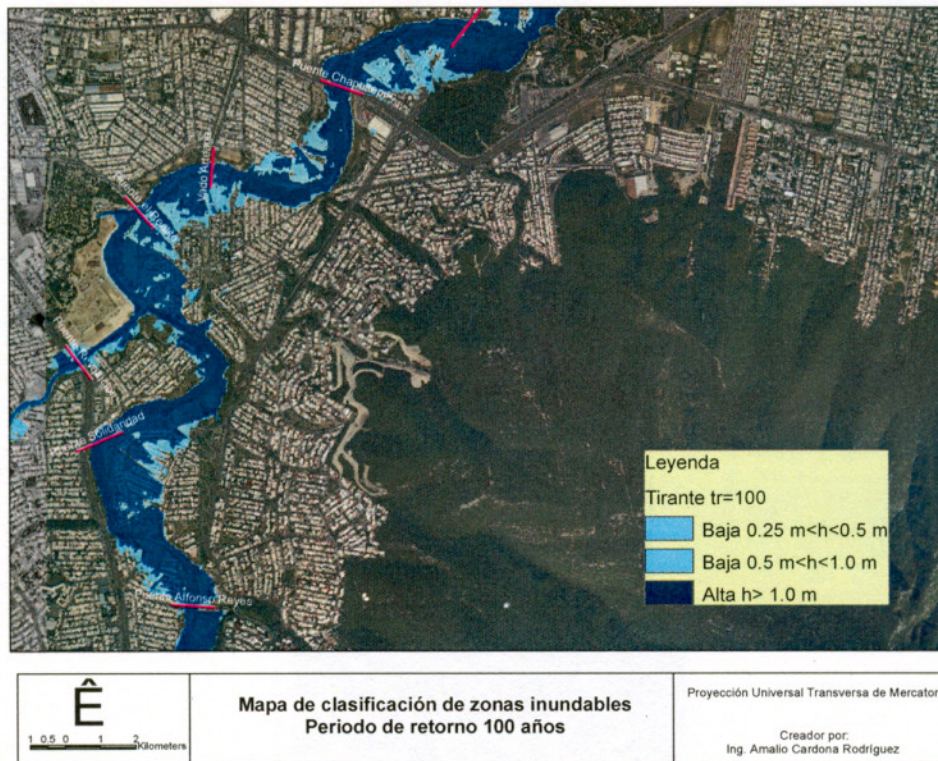


Figura 5.19 Mapa con el límite del polígono de inundación con la zonificación de amenazas en la subcuenca del río la Silla.

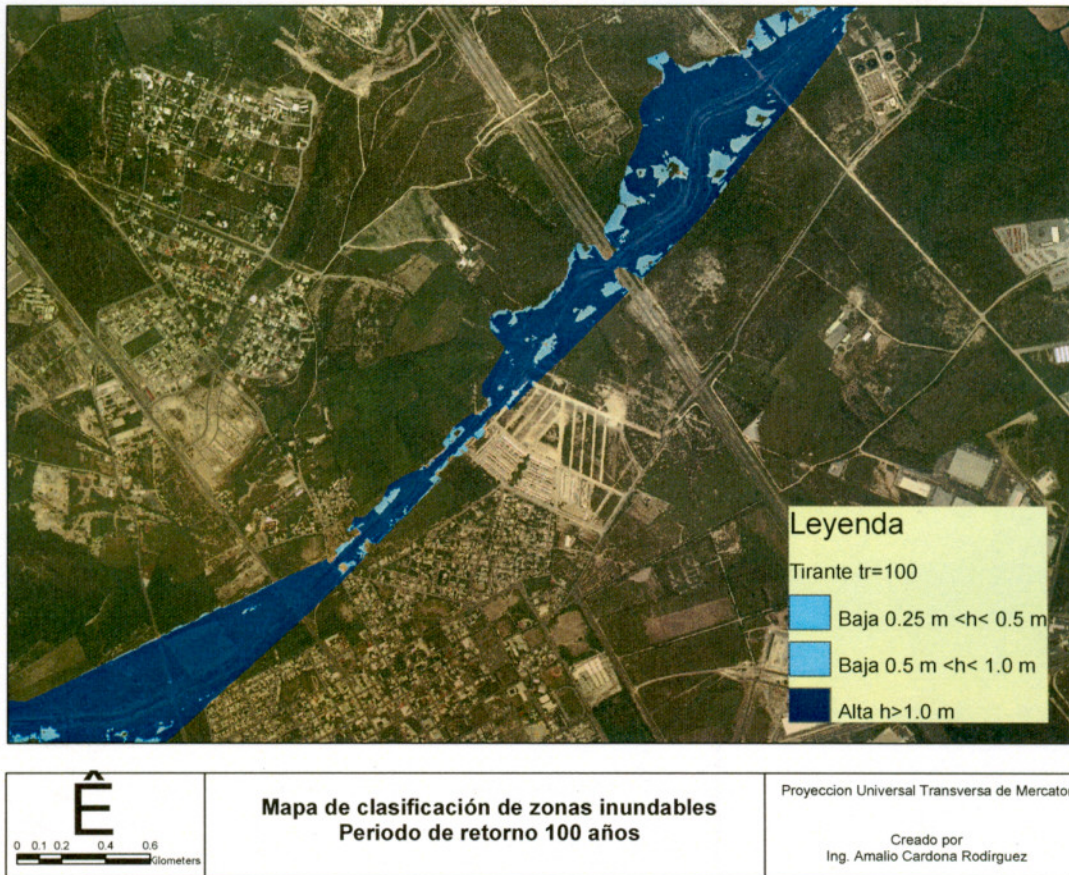


Figura 5.20 Mapa con el límite del polígono de inundación con la zonificación de amenazas en la subcuenca del arroyo Topo Chico

En el anexo I se incluyen los mapas de inundación con el criterio de la zonificación de amenazas de las dos subcuencas en los diferentes periodos de retorno analizados.

Las áreas con la zonificación de amenazas de inundación del mapa anterior, son de interés para los municipios, ya que indican cuales son las zonas pobladas probables a inundarse, cuales son aquellas con posibilidades de desarrollo poblacional o de alguna actividad económica donde las inundaciones son menos frecuentes.

En este sentido, los resultados obtenidos contribuyen a la toma de decisiones durante el proceso de la gestión del riesgo, donde confluyen las instancias Federal, Estatal y Municipal para atender la problemática relacionada a inundaciones mediante la implementación de medidas (estructurales y no estructurales) para la disminución de los daños que estas producen.

En materia de ordenamiento territorial y planificación del territorio y para implementar acciones para la prevención, intervención y minimización de los impactos durante la incidencia de fenómenos hidrometeorológicos, primero contribuyen en los planes de desarrollo urbano de los Municipios, con la presentación de las zonas propensas a inundaciones y segundo a la atención de emergencias bajo el esquema que se indica en la tabla 5.2 de la matriz de amenazas, señalando

las acciones necesarias en el caso que existan asentamientos humanos o de ordenamiento territorial cuando estas zonas aun no han sido desarrolladas.

Tabla 5.2 Matriz de amenazas a inundaciones para la implementar acciones de prevención y ordenamiento territorial.

Leyenda mapa	Perdidas y daños previsibles en caso de ocupación para asentamientos humanos	Implicaciones para el ordenamiento territorial
Amenaza Alta Azul Oscuro	Las personas están en riesgo tanto dentro como fuera de las viviendas. Existe peligro de destrucción de las viviendas y daños en el menaje de las mismas.	Zona de prohibición, no apta para la instalación, crecimiento o densificación de asentamientos humanos. Las áreas ya edificadas en la medida de lo posible deben ser reubicadas o protegidas con obras de protección y sistemas de alertamiento.
Amenaza Media Azul	Las personas están en riesgo afuera de sus viviendas. Existen daños en las viviendas dependiendo de los materiales de construcción.	Zona de reglamentación, se puede permitir la expansión y densificación de asentamientos humanos, siempre y cuando se respeten los reglamentos de ocupación de suelos y normas de construcción apropiadas.
Amenaza Baja Celeste	El peligro para las personas es débil. Las viviendas pueden sufrir daños leves pero daños importantes hacia el interior de las mismas.	Zonas de sensibilización, para los asentamientos humanos que se encuentran en estas áreas y conozcan y aplique reglas apropiadas ante estas.

Capítulo 6 CONCLUSIONES

La metodología para la evaluación de las inundaciones fluviales en la subcuenca del río La Silla y arroyo Topo Chico, se realizó utilizando los programas HEC-HMS, HEC-RAS, y las extensiones HEC-GeoRAS, HEC-GeoHMS para implementar los modelos hidrológicos e hidráulicos en plataforma ArcGis 9.1, el modelo hidrológico se desarrolló con información de INEGI que consistió en los modelos digitales de elevaciones en escala 1:50000, mientras que el modelo hidráulico, se utilizó la información de un levantamiento LIDAR realizado en el año 2007 por la APDUNL que consistió en modelos digital de elevaciones con una resolución espacial de 4.0 y 5.0 metros.

La primera etapa, consistió en el cálculo de los gastos máximos para cada una de las microcuencas que corresponden a los tributarios principales de las subcuencas mencionadas, esta fase fue desarrollada aplicando un modelo hidrológico semidistribuido, utilizando la extensión HEC-GeoHMS en ArcGis 9.1 y el programa HEC-HMS, para obtener los parámetros necesarios en la generación de los gastos máximos.

En la segunda etapa, se determinaron las zonas de riesgo de inundación a través del uso de la extensión HEC-GeoRAS en ArcGis 9.1 para crear la geometría del modelo y el programa HEC-RAS para generar los polígonos de inundación. La tercera etapa, corresponde a la zonificación de la amenaza por inundaciones relacionando la intensidad de la inundación (tirantes de agua) y la frecuencia con que se presentan (periodo de retorno) para la clasificación de las zonas sujetas a inundación, este proceso se realizó en ArcGis 9.1 en los periodos de retorno de 5, 10, 20, 50, 100 años considerados.

En el anexo II, se presentan los resultados del modelo hidráulico, los resultados del programa son para cada una de las secciones transversales que se trazaron en los diferentes tributarios, lo que genera una gran cantidad de información a manera de ilustración se presenta únicamente la información de algunas secciones transversales típicas del cauce principal de las subcuencas.

De acuerdo a lo anterior se establecen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. El análisis de los riesgos a inundación en las subcuencas estudiadas mediante la metodología empleada mejora la propuesta por CENAPRED 2007 básicamente en la resolución espacial de los datos para la elaboración del modelo hidráulico, con los datos Lidar, Ortofotos del año 2007, además del formato y la forma de su manejo en el SIG.
2. La delimitación de las áreas inundables, a través de los modelos HEC-HMS, HEC-RAS, y sus extensiones HEC-GeoHMS, HEC-GeoRAS para aplicación en ArcGis 9.1 son aceptables para la generación de mapas de inundación con la resolución espacial de los datos Lidar empleados.
3. Aunque las subcuencas son similares en área de aportación, la subcuenca del arroyo Topo Chico fue la que registró los gastos máximos más altos para los periodos de retorno analizados, debido a que el uso de suelo, en la parte alta y media de la subcuenca, es urbano en un alto porcentaje. Mientras que la subcuenca del río La Silla, se encuentra menos perturbada en el uso de suelo en su parte alta, que resulta una zona de amortiguamiento de las lluvias.

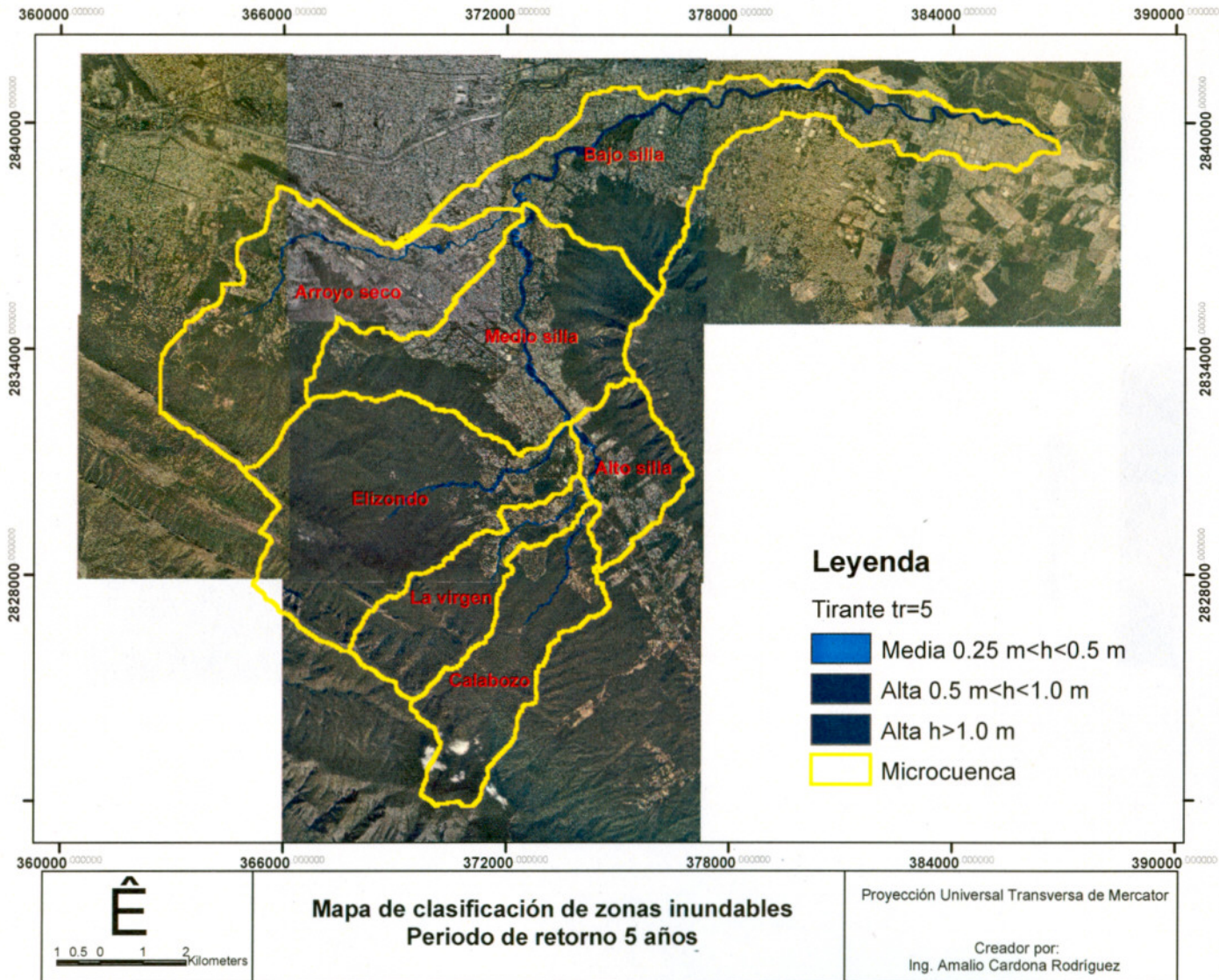
4. El comportamiento hidráulico de las estructuras como puentes, vados y alcantarillas ubicados en los cauces principales y tributarios en general, resultó adecuado para los gastos asociados a bajos periodos de retorno (5-20 años) y fueron insuficientes para los gastos de periodos de retorno mayores (50-100 años), ocasionando remansos y el desbordamiento del cauce con la consecuente inundación de las zonas ubicadas en las márgenes. Esta situación refleja la necesidad de rediseñar algunas estructuras para que cumplan hidráulicamente.
5. La resolución del modelo digital de elevaciones del levantamiento Lidar empleado en la modelación hidráulica resultó aceptable, ya que las secciones transversales tuvieron un detalle bueno y produjo mapas de inundación con buena resolución en las dos subcuencas.
6. Los mapas de inundación obtenidos forman parte de las medidas no estructurales y contribuyen a las acciones de planeación, prevención y emergencia frente a las inundaciones que realiza la Comisión Nacional del Agua conjuntamente con el gobierno del Estado y Municipios a través del Sistema Nacional de Protección Civil. Los resultados de este estudio sirven de base para la gestión del riesgo que permite elaborar el Plan de Emergencia Municipal.
7. La clasificación de las zonas inundables mediante el criterio que relaciona la intensidad (tirante de agua) y la frecuencia (periodo de retorno) permite cartografiar las zonas de riesgo según su nivel de amenaza (alto, medio, bajo) e indican los daños potenciales que puede ocasionar una inundación a la población local, a sus bienes y las implicaciones para el ordenamiento territorial.
8. Respecto a la Gestión de Riesgo, el estudio contribuye a la toma de decisiones de las partes interesadas en el ordenamiento territorial y planificación, con el apoyo de iniciativas y acciones que reduzcan la causalidad de las inundaciones como, evitar la instalación de asentamientos humanos en las zonas de alto riesgo hidrológico y en la medida de lo posible a la reubicación de los habitantes que ya existen en estas zonas o en su defecto efectuar las medidas estructurales que garanticen su seguridad.
9. Esta propuesta, aporta información para regular la urbanización en las zonas determinadas como inundables, sensibilizar a la población que se encuentra en estas zonas, y evitar los cambios indiscriminados de uso de suelo de las zonas que prestan a la zona metropolitana, un servicio ambiental en el control de las inundaciones.
10. Con relación a las medidas de mitigación el uso de estos modelos, permite la valoración de alternativas sean obras o de control del cauce (control de pendiente) para disminuir los efectos de las inundaciones.
11. Integrar y automatizar el uso de este tipo de modelos con la información de lluvias en tiempo real que generan las estaciones automáticas de CENAPRED instaladas en la zona metropolitana de Monterrey, permiten obtener mapas de inundación cuasi en tiempo real para situaciones de alertamiento a la población en la época de lluvias.
12. Un aspecto importante de estudiar, es el arrastre de sedimentos por los cauces de las subcuencas que producen cambios en la geometría de la sección con el asolvamiento y disminución de capacidad hidráulica del cauce.

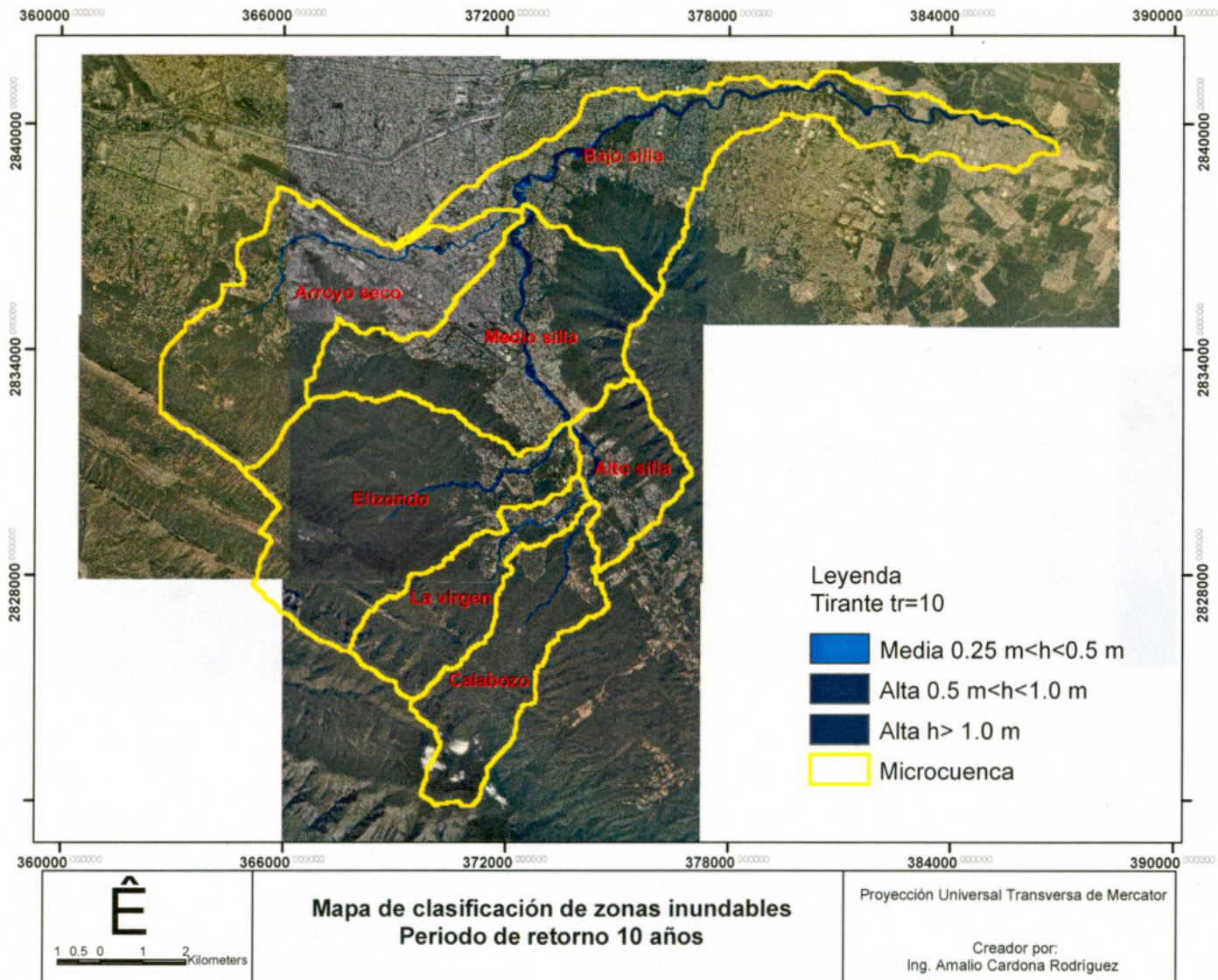
13. Plantear algunos escenarios prospectivos, en cuanto al cambio de uso de suelo en la subcuenca del río La Silla, que es la menos perturbada, para establecer su efecto en la magnitud de los escurrimientos para determinar las zonas que dan un servicio ambiental en cuanto a inundaciones.

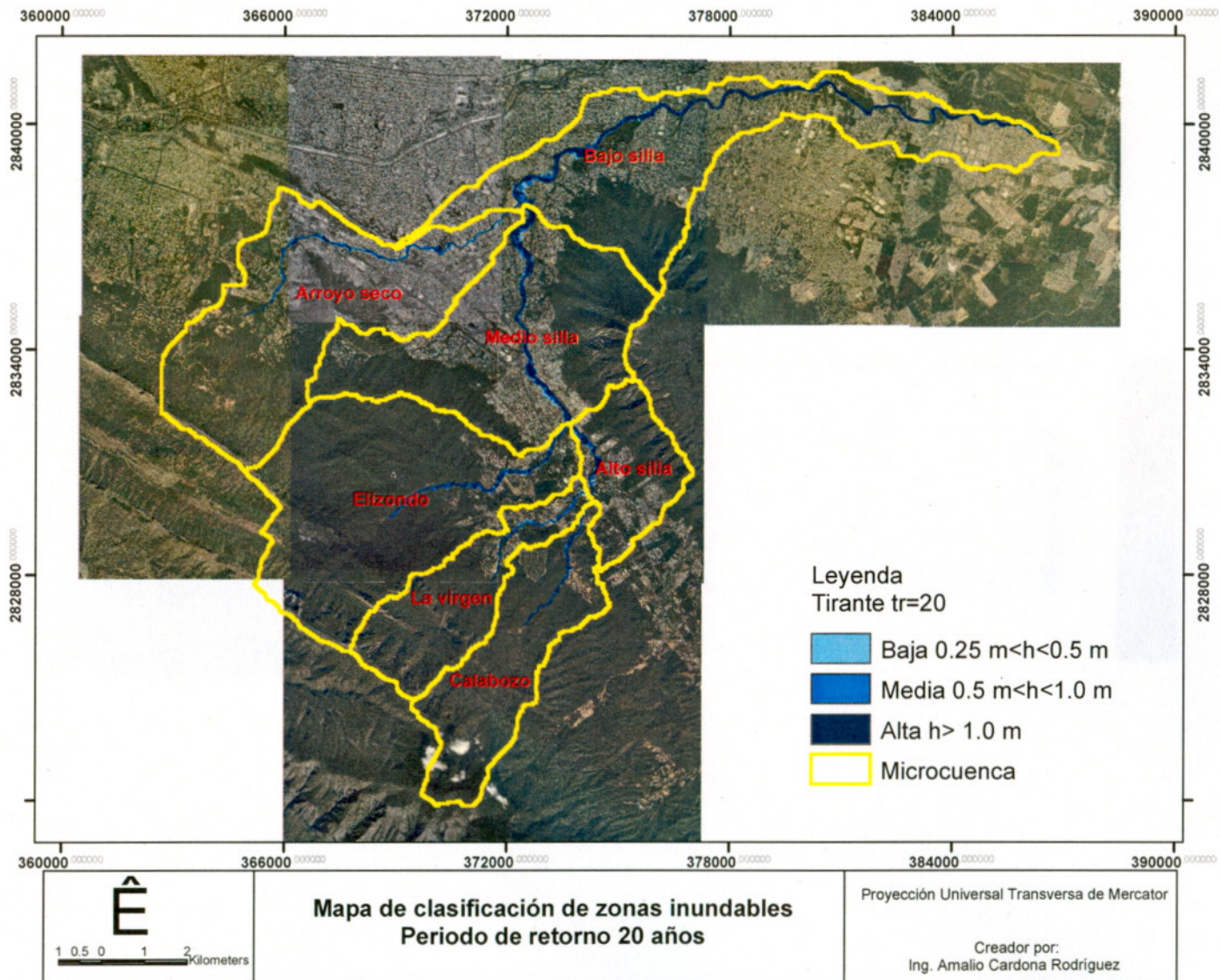
14. En la reforma de la Ley de Ordenamiento territorial de los asentamientos humanos y de desarrollo urbano del estado de Nuevo León, han sido conceptualizadas las zonas de riesgo, con lo cual se pretende asegurar el desarrollo y construcción con los procedimientos que garanticen la prevención de aquellos eventos que puedan poner en peligro la vida de los habitantes. Trabajos como éste, pretenden contribuir a este esfuerzo del Estado, en cuanto a la elaboración de cartografía de zonas inundables, que facilite la consulta pública disponible en la zona metropolitana de Monterrey.

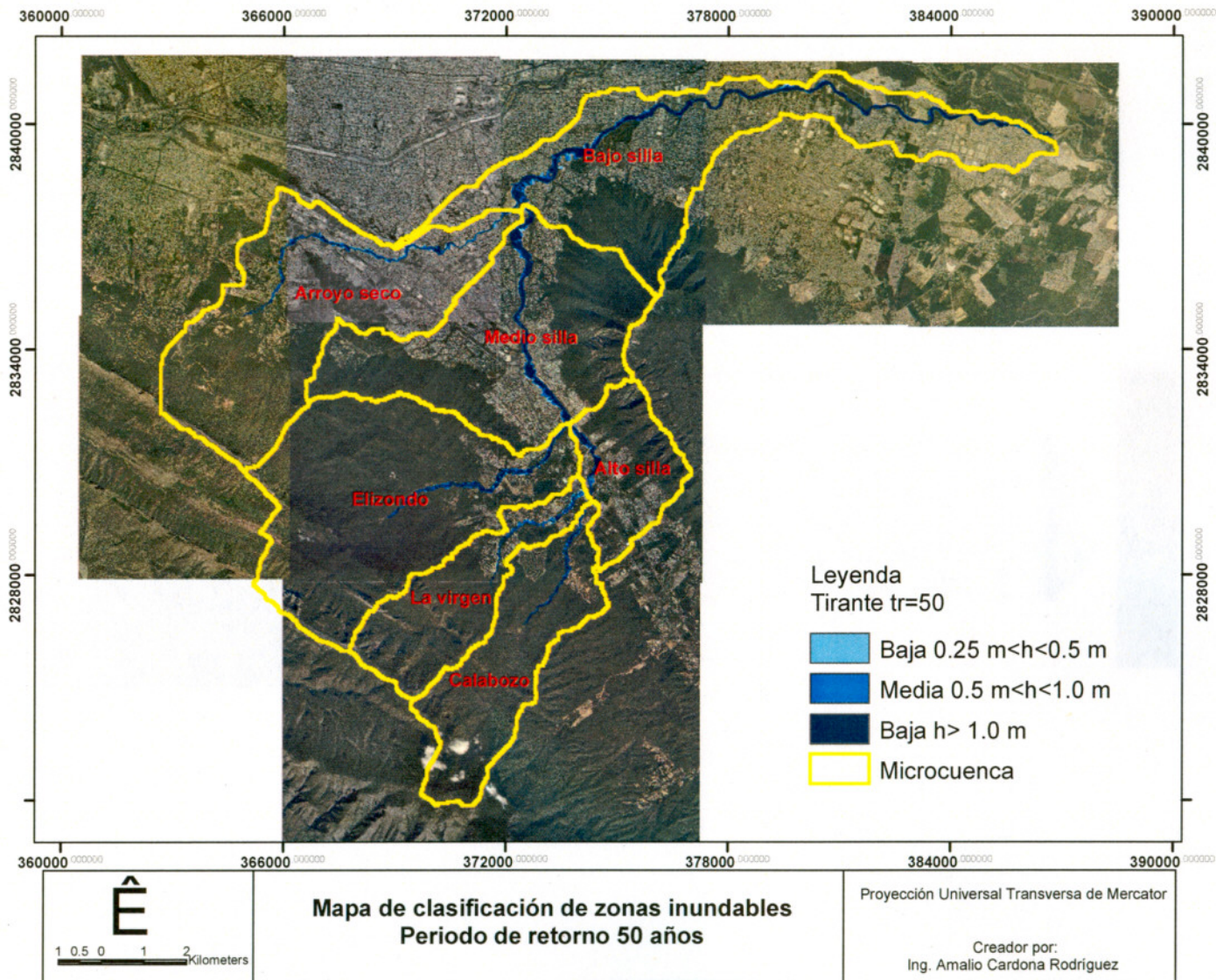


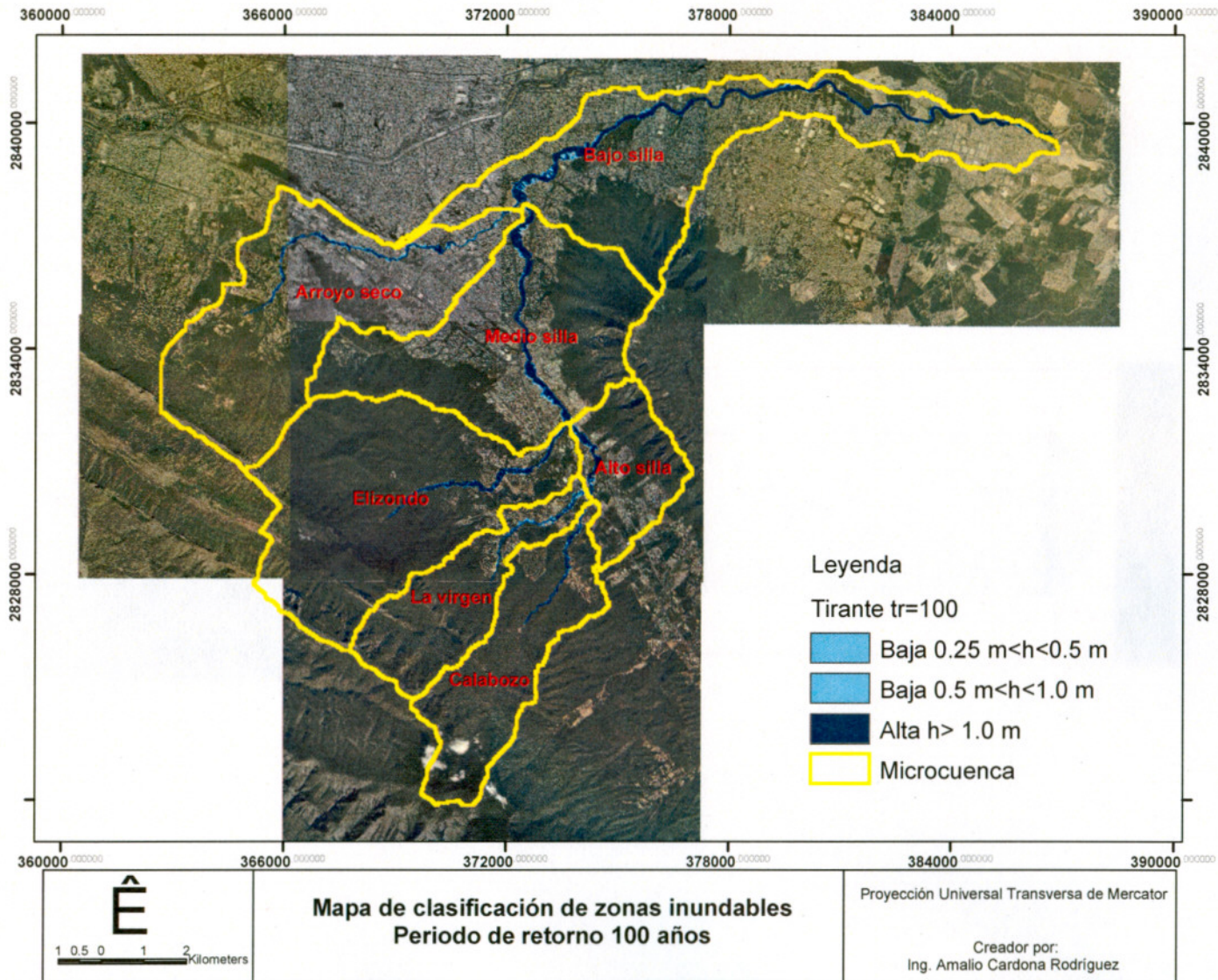
ANEXO 1 Mapas de inundación con la zonificación de amenazas en la subcuenca del río La Silla





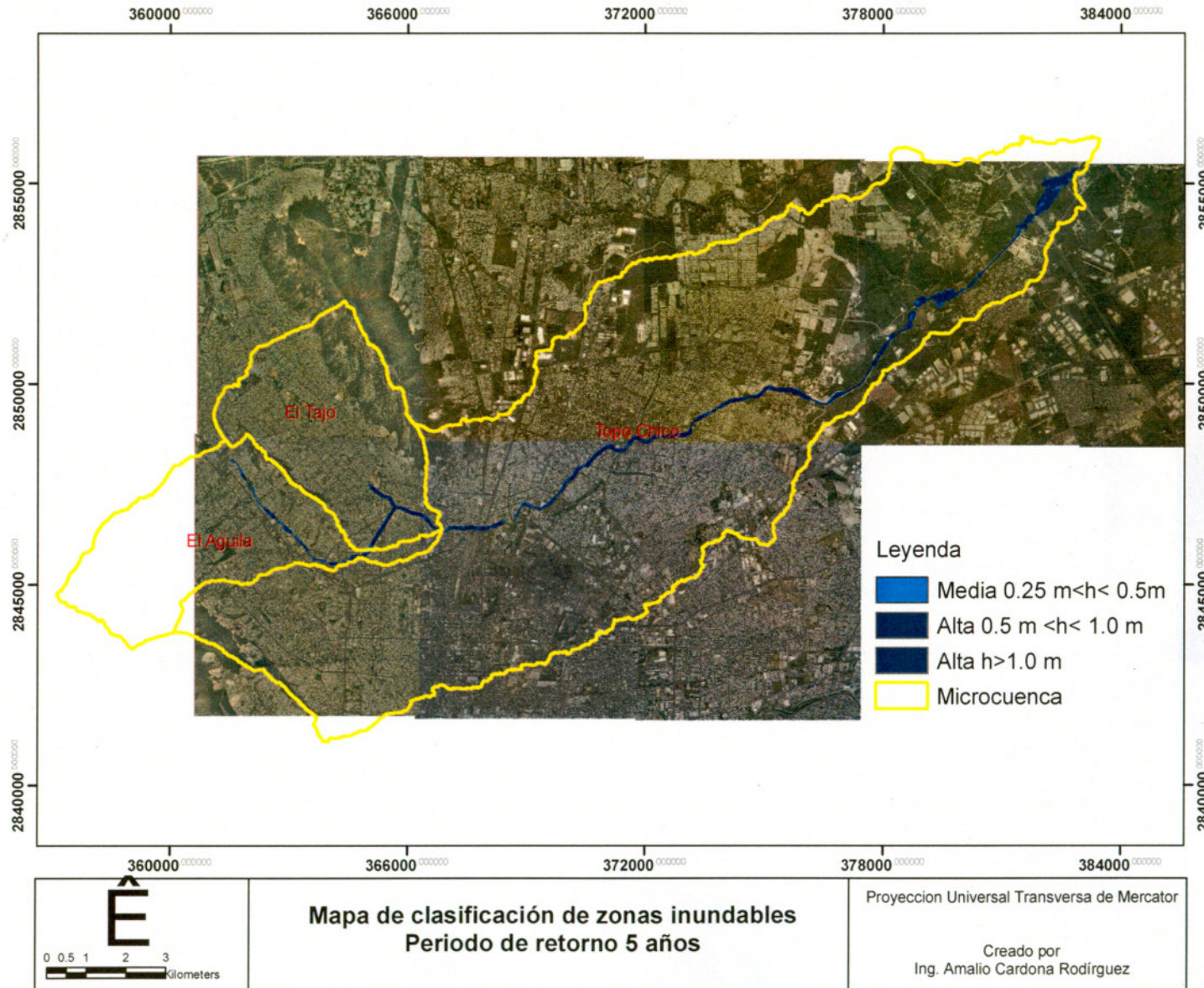


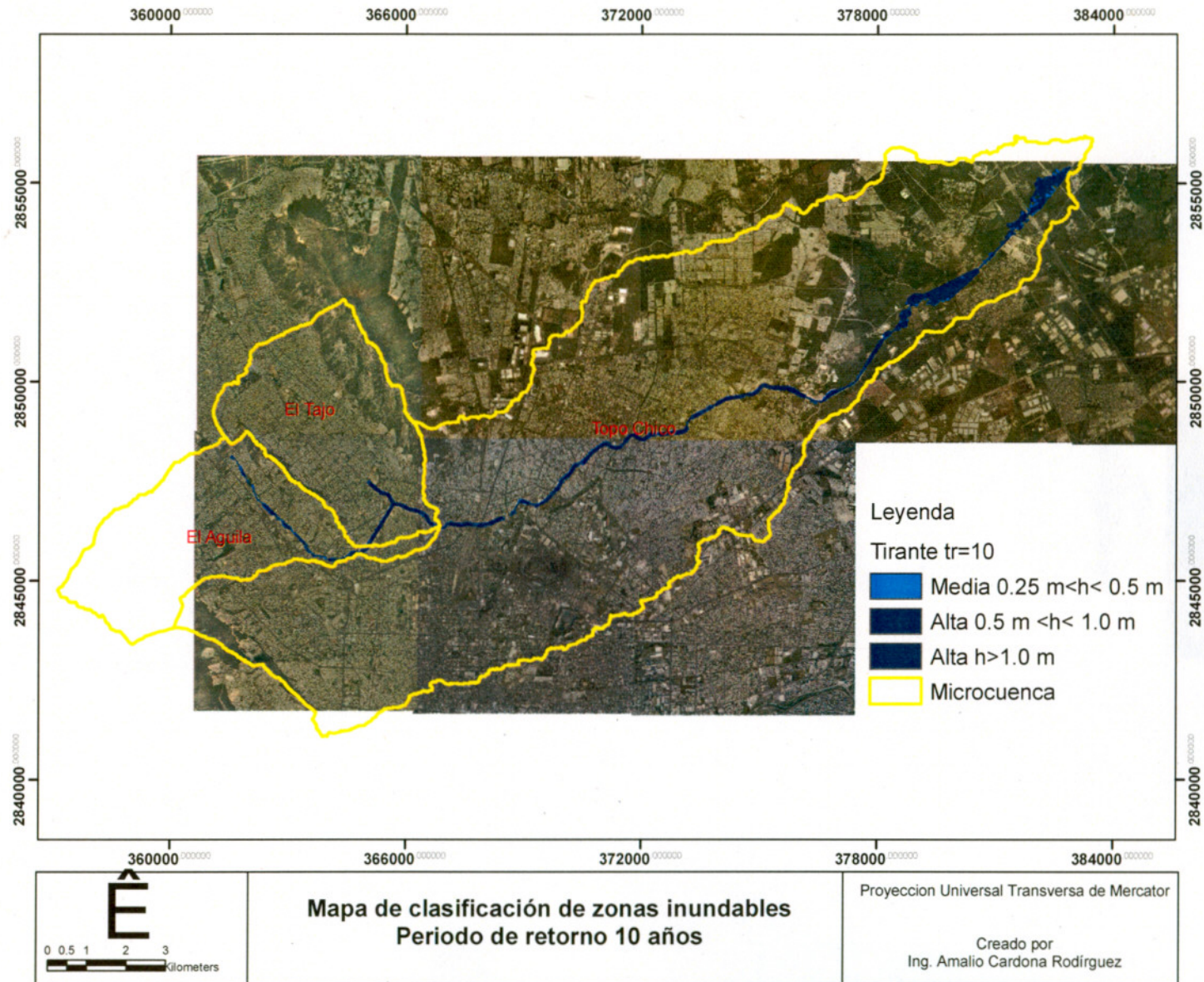


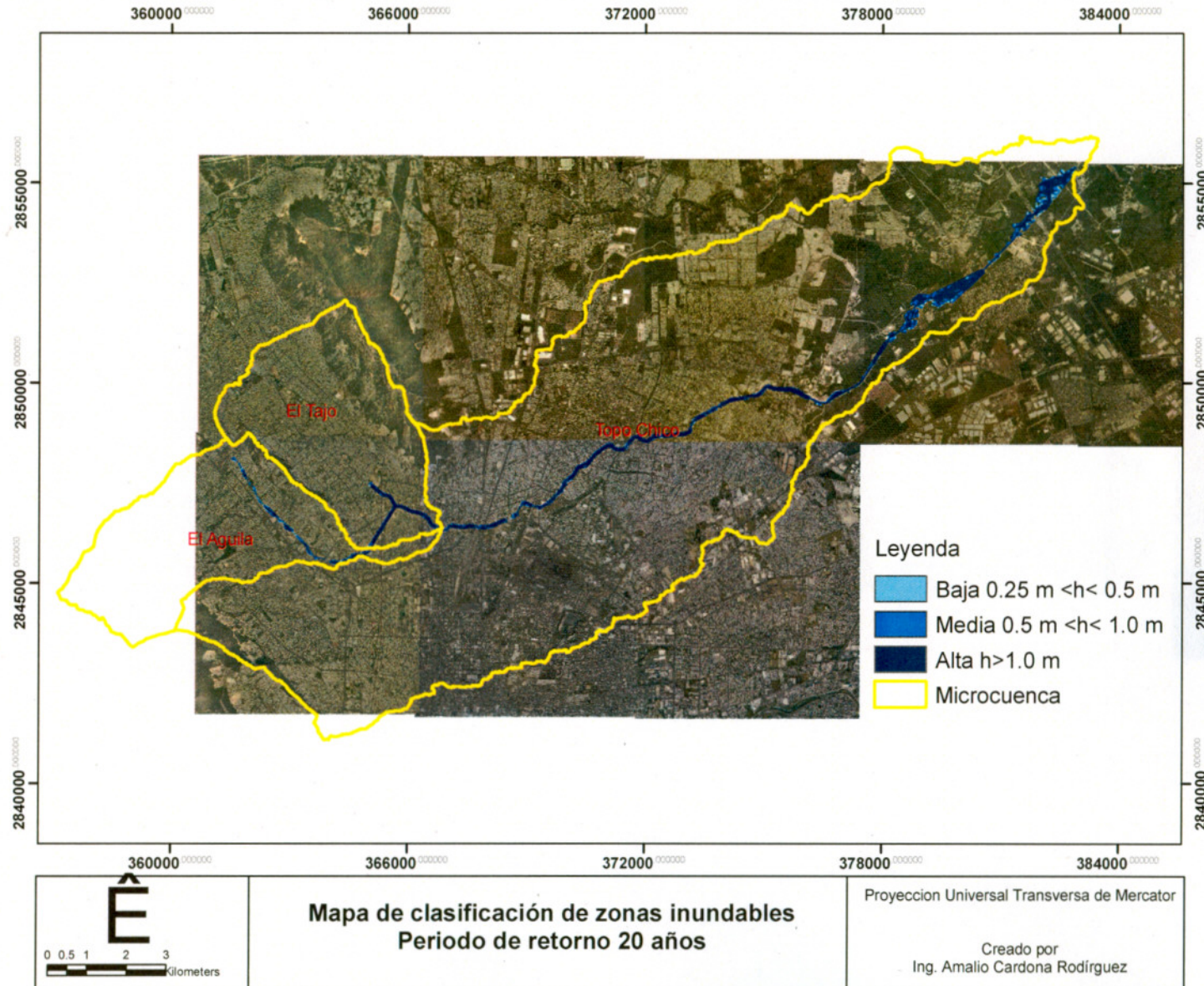


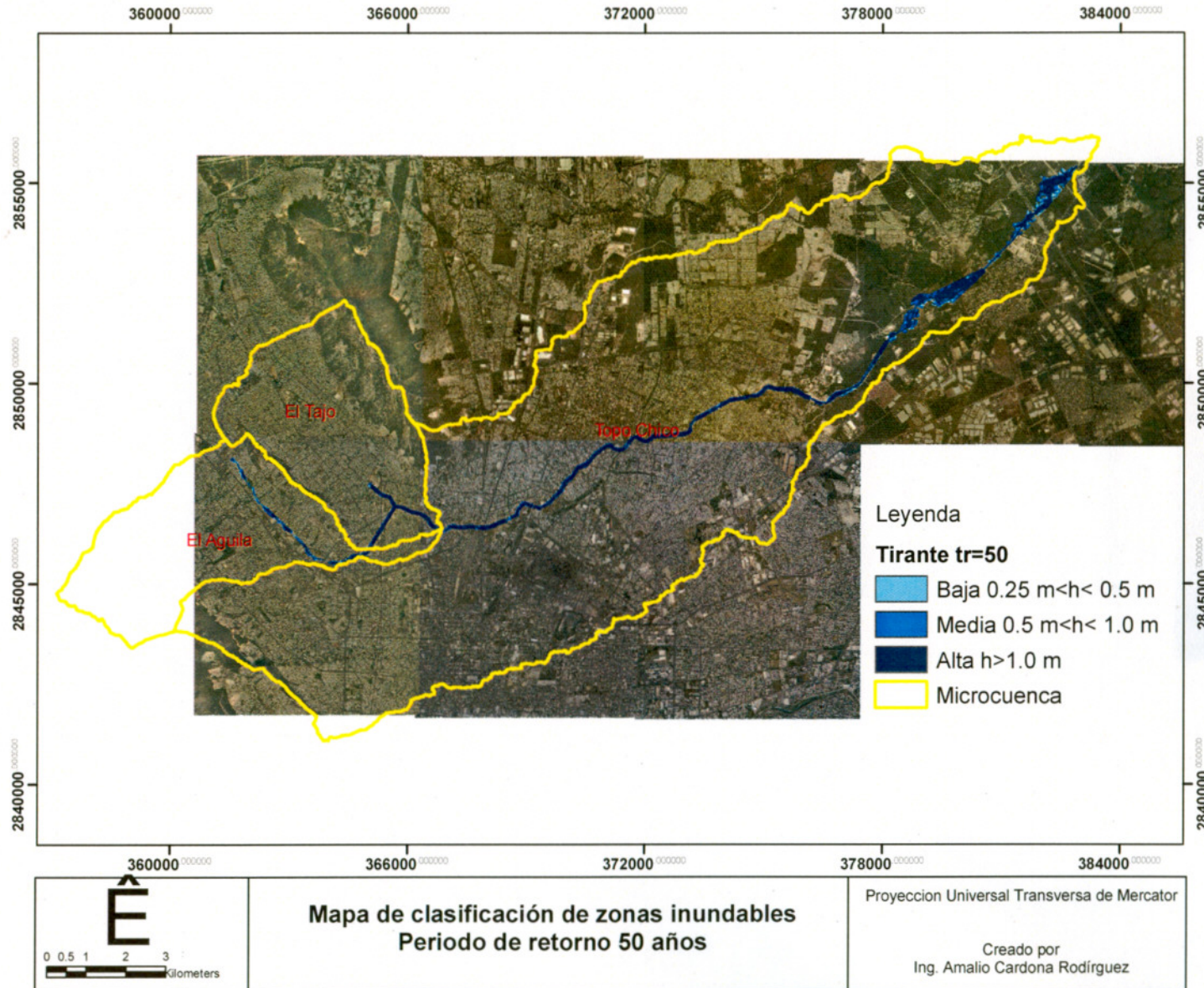


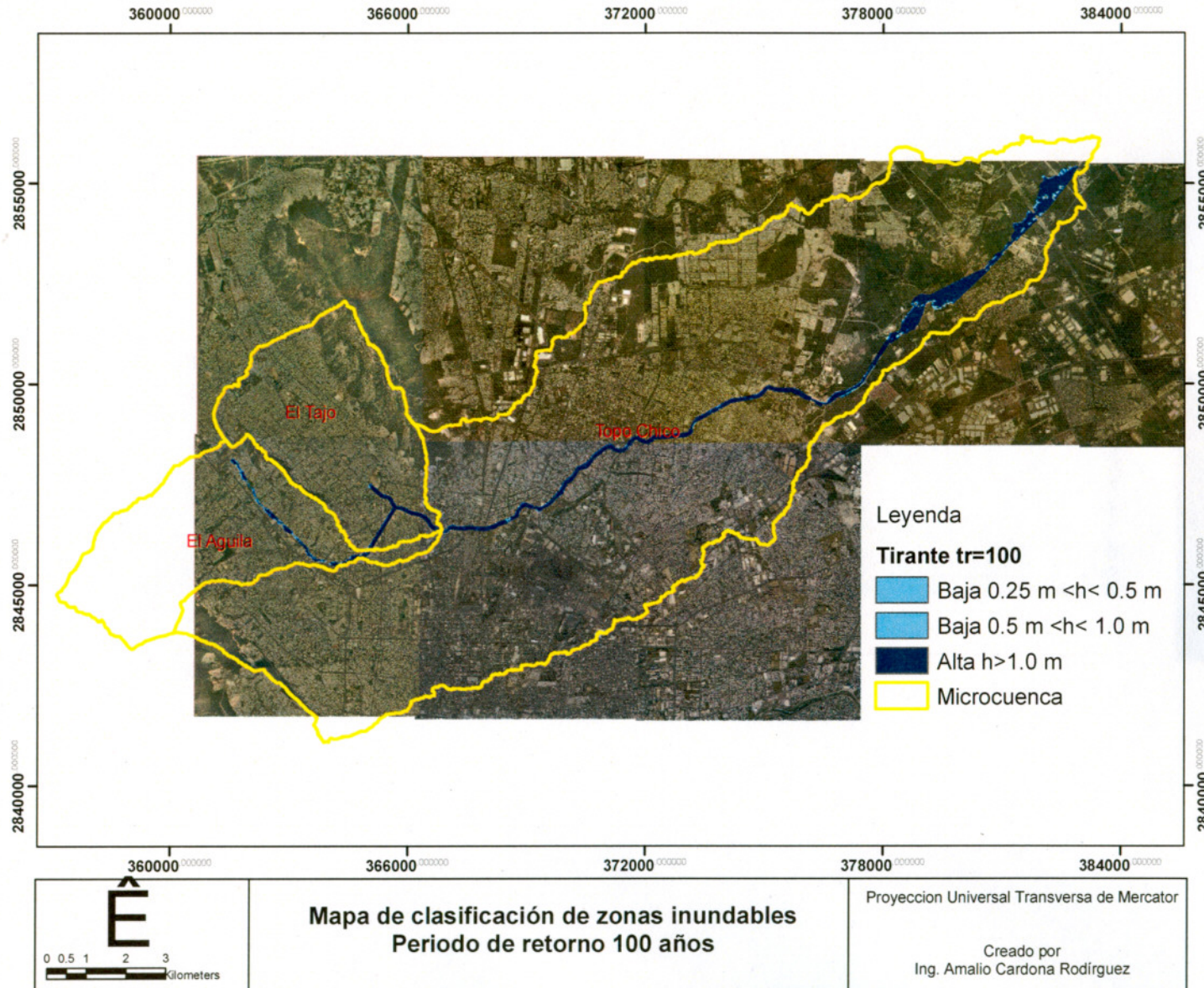
ANEXO 2 Mapas de inundación con la zonificación de amenazas en la subcuenca del arroyo Topo Chico











Anexo 3 Resultado de la simulación hidráulica por período de retorno, para la sección transversal típica del cauce principal del río La Silla

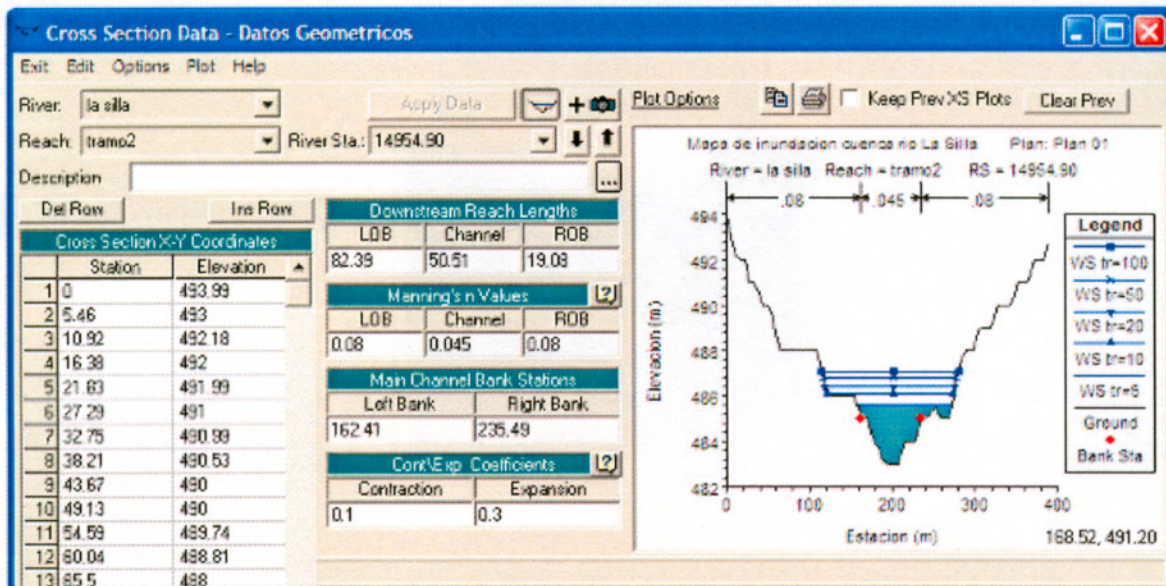
Profile Output Table - Standard Table 1

File Options Std. Tables Locations Help

HEC-RAS Plan: Plan 01 River: la silla Reach: tramo2 [Reload Data]

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Ch
tramo2	14954.90	tr=5	363.00	483.00	485.57		485.97	0.007985	2.83	140.98	114.64	0.69
tramo2	14954.90	tr=10	503.00	483.00	486.03		486.46	0.006424	2.98	196.51	152.54	0.65
tramo2	14954.90	tr=20	636.00	483.00	486.41		486.86	0.005546	3.08	255.29	157.43	0.62
tramo2	14954.90	tr=50	803.00	483.00	486.81		487.28	0.005089	3.25	317.80	162.10	0.60
tramo2	14954.90	tr=100	924.00	483.00	487.06		487.56	0.004901	3.37	359.07	165.27	0.60
tramo2	14904.39	tr=5	363.00	481.00	485.57	483.96	485.76	0.001576	1.98	223.02	99.80	0.34
tramo2	14904.39	tr=10	503.00	481.00	486.00	484.42	486.26	0.001933	2.37	266.99	107.62	0.39
tramo2	14904.39	tr=20	636.00	481.00	486.33	484.77	486.66	0.002240	2.69	306.97	122.49	0.42
tramo2	14904.39	tr=50	803.00	481.00	486.68	484.98	487.09	0.002602	3.06	350.33	129.54	0.46
tramo2	14904.39	tr=100	924.00	481.00	486.90	485.51	487.37	0.002816	3.29	388.73	148.18	0.48
tramo2	14855.60	tr=5	363.00	482.00	485.34		485.62	0.005432	2.36	153.64	88.25	0.57
tramo2	14855.60	tr=10	503.00	482.00	485.75		486.10	0.005405	2.63	191.41	93.32	0.59
tramo2	14855.60	tr=20	636.00	482.00	486.08		486.50	0.005286	2.85	226.91	140.92	0.59
tramo2	14855.60	tr=50	803.00	482.00	486.44		486.92	0.005129	3.09	279.18	149.36	0.60
tramo2	14855.60	tr=100	924.00	482.00	486.68		487.19	0.005031	3.23	314.77	152.64	0.60
tramo2	14804.39	tr=5	363.00	482.00	485.18		485.40	0.002984	2.06	181.81	100.62	0.44
tramo2	14804.39	tr=10	503.00	482.00	485.59		485.87	0.003182	2.38	227.14	116.89	0.47
tramo2	14804.39	tr=20	636.00	482.00	485.92		486.26	0.003344	2.63	266.86	125.06	0.49

Sección transversal típica del cauce principal del río La Silla con los niveles de los gastos de cada periodo de retorno.

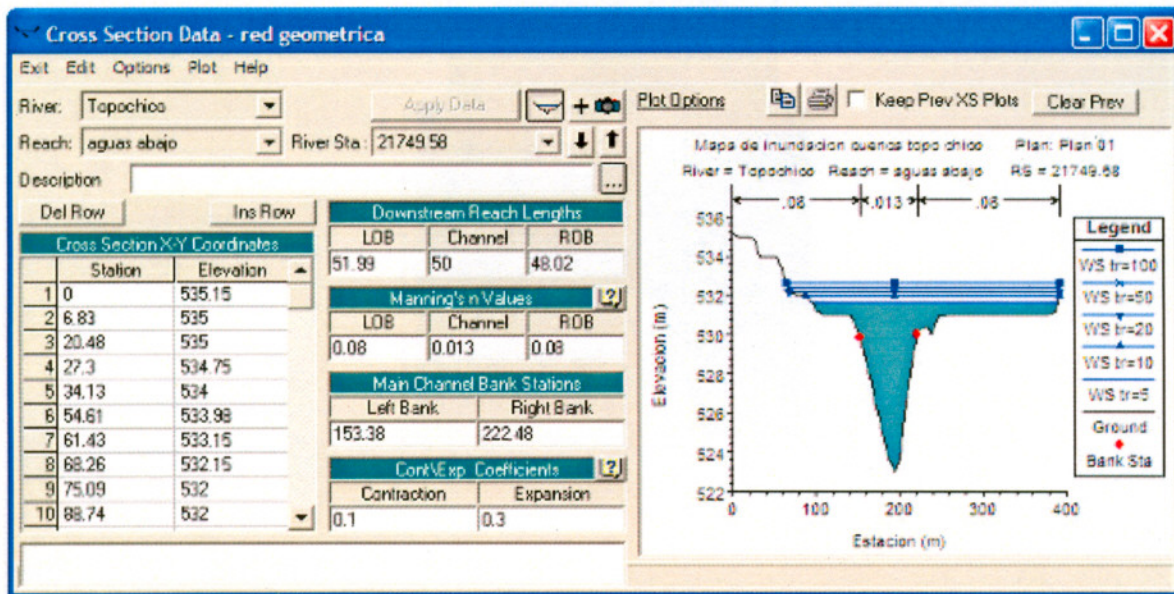


Anexo 4 Resultado de la simulación hidráulica por período de retorno, para la sección transversal típica del cauce principal del arroyo Topo Chico

Profile Output Table - Standard Table 1												
HEC-RAS Plan												
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
aguas abajo	21749.58	tr=5	625.00	523.00	531.65		531.79	0.000053	1.68	531.15	295.69	0.23
aguas abajo	21749.58	tr=10	783.00	523.00	531.98		532.17	0.000066	1.95	628.87	303.68	0.26
aguas abajo	21749.58	tr=20	900.00	523.00	532.20		532.42	0.000076	2.14	698.68	324.85	0.28
aguas abajo	21749.58	tr=50	1040.00	523.00	532.45		532.71	0.000086	2.35	780.45	326.56	0.30
aguas abajo	21749.58	tr=100	1141.00	523.00	532.62		532.91	0.000093	2.49	835.85	327.72	0.32
aguas abajo	21699.58	tr=5	625.00	522.96	531.66		531.79	0.000041	1.63	647.62	294.78	0.21
aguas abajo	21699.58	tr=10	783.00	522.96	531.98		532.16	0.000053	1.91	744.23	301.60	0.24
aguas abajo	21699.58	tr=20	900.00	522.96	532.20		532.41	0.000062	2.11	814.28	324.94	0.26
aguas abajo	21699.58	tr=50	1040.00	522.96	532.45		532.71	0.000071	2.33	895.92	327.04	0.28
aguas abajo	21699.58	tr=100	1141.00	522.96	532.62		532.91	0.000078	2.47	951.20	328.46	0.30
aguas abajo	21649.58	tr=5	625.00	522.61	531.39	528.61	531.76	0.000136	2.80	472.15	274.27	0.37
aguas abajo	21649.58	tr=10	783.00	522.61	531.61	529.22	532.12	0.000182	3.32	532.31	276.78	0.43
aguas abajo	21649.58	tr=20	900.00	522.61	531.73	529.61	532.37	0.000220	3.70	567.24	278.22	0.47
aguas abajo	21649.58	tr=50	1040.00	522.61	531.85	529.88	532.65	0.000271	4.16	601.38	279.63	0.53
aguas abajo	21649.58	tr=100	1141.00	522.61	531.91	530.61	532.84	0.000314	4.50	616.82	280.26	0.57
aguas abajo	21599.58	tr=5	625.00	522.86	531.53	527.85	531.69	0.000054	1.80	622.84	281.06	0.24
aguas abajo	21599.58	tr=10	783.00	522.86	531.81	528.35	532.03	0.000071	2.12	700.89	283.45	0.27
aguas abajo	21599.58	tr=20	900.00	522.86	531.99	528.66	532.25	0.000083	2.35	758.68	306.50	0.30

Total flow in cross section.

Sección transversal típica del cauce principal del arroyo Topo Chico con los niveles de los gastos de cada periodo de retorno.



Bibliografía

- 1 Ayala-Carcedo Francisco J., 2002, El sofisma de la imprevisibilidad de las inundaciones y la responsabilidad social de los expertos. Un análisis del caso español y sus alternativas, Instituto Geológico y Minero de España, Ministerio de Ciencia y Tecnología, Boletín de la A.G.E. N.º 33 – 2002
- 2 Beguería Portugués Santiago, 2002, Revisión de métodos paramétricos para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos en Climatología e Hidrología: El uso de series de excedencias y su comparación con las series de máximos anuales Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC). Campus de Aula Dei. Zaragoza, VII Reunión Nacional de Climatología, Grupo de Clima de la Asociación de Geógrafos Españoles
- 3 Bitrán Bitrán Daniel, 2001, "Características del Impacto Socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-99". Libro 1. Serie impacto Socioeconómico de los Desastres en México, CENAPRED.
- 4 Breña Puyol Agustín Felipe, 2007 Modelos Probabilísticas de Valores Máximos en Hidrología: Un Nuevo Enfoque, UAM-I. Depto. de Ingeniería de Procesos e Hidráulica
- 5 Capurro Rafael, 2007, Epistemología y Ciencia de la Información, Enlace: revista venezolana de información, tecnología y conocimiento, enero-abril, año/vol. 4, numero 001, Universidad de Zulia, Venezuela.
- 6 CENAPRED 2006, Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos, fenómenos hidrometeorológicos.
CENAPRED 2005, Enrique Guevara., Roberto Quasas, Oscar Zepeda, El Atlas Nacional de Riesgos, Sistema Integral de Información sobre Riesgo de Desastres
- 7 CNA, 1993, Manual de Ingeniería de Ríos, Estudio Hidrológico para Obras de Protección, Capítulo 3
- 8 Comisión Nacional del Agua, 2004, Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento.
- 9 Diario Oficial de la Federación, 2007, Decreto por el que se aprueba el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012
- 10 Escalante, C.A. y Reyes, L., 2004, Influencia del Tamaño de Muestra en la Estimación del Factor de Lluvia R. Inf. tecnológica, vol.15, no.4, p.105-110. ISSN 0718-0764.
- 11 Etxeberria Ramírez Paulo, Edeso Fito José Miguel y Brazaola Rojo Adolfo, 2005, Propuesta de una metodología para crear mapas de peligros naturales en Guipúzcoa utilizando SIG, Geofocus (artículos), n° 5, Revista internacional del ciencia y tecnología de la información geográfica
- 12 Herzer Hilda, Caputo María Graciela, Celis Alejandra, 2004, Gestión de riesgos de desastre ENSO en América Latina, CENTRO estudios sociales y ambientales, ENSO Argentina.

- 13 Horcajada Herrera Tamara, Simancas Cruz Moisés R. y Dorta Antequera Pedro, 2000, La constatación y validación de los mapas de riesgo de avenidas en pequeñas cuencas hidrográficas mediante sistemas de información geográfica. Propuesta metodológica y aplicación a la ordenación del territorio, Departamento de Geografía, Universidad de La Laguna, Boletín de la A.G.E. N.º 30 – 2000.
- 14 Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, 2005, Inundaciones Fluviales, Mapas de Amenazas recomendaciones técnicas para su elaboración.
- 15 Instituto de Hidrológica, Meteorología y Estudios Ambientales 2004, "Guía técnica científica para la ordenación y manejo de cuencas en Colombia".
- 16 IV Foro Mundial del Agua, 2006, Eje temático 5, Manejo de Riesgos, México, D.F.
- 17 Lavell Thomas Allan, 2004, La Red de estudios sociales en prevención de desastres en América latina, la Red: antecedentes, formación y contribución al desarrollo de los conceptos, estudios y la práctica en el tema de los riesgos y desastres en América Latina: 1980-2004
- 18 Ley General de Protección Civil, 2000, Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 12 de mayo de 2000, Última reforma publicada DOF 24-04-2006.
- 19 Mansilla Elizabeth 2005, Katrina, Stan y Wilma: tres desastres en busca de un paradigma. Revista Nueva Sociedad.
- 20 Maria Anu, 1997, Introduction to modeling and simulation, State University of New York at Binghamton, Department of systems science and industrial Engineering Binghamton, NY
- 21 Salgado Montoya Ramón Antonio, 2005, Análisis integral del riesgo a deslizamientos e inundaciones en la microcuenca del río Gila, Copán, Honduras, programa de educación para el desarrollo y la conservación escuela de postgrado, Turrialba, Costa Rica.
- 22 SARH, 1987, Dirección General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos, Instructivo de hidrología para determinar avenida máxima ordinaria. México, D.F.
- 23 SEDESOL, Jarque Uribe Carlos M, Salcedo Aquino Roberto, González García de Alba Ligia, Hernández Sotela Ricardo, Zonas de riesgo en centros de población: ¿Cómo identificarlas?
- 24 Torres Abello Eduardo Andrés, 2004, Universidad Pontificia Javeriana, Bogota Colombia.
- 25 US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2005 HEC-RAS River Analysis System, version 3.1.3 Hydraulic Reference Manual
- 26 US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2005 HEC-HMS Hydrologic Modeling System, version 3.0.1 Hydraulic Reference Manual
- 27 US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2005 HEC-GeoRAS GIS Tools for support of HEC-RAS using ArcGis 9.1, version 4.0 User Manual



28 Vallejo Villalta Ismael, Camarillo Naranjo Juan Mariano, 2000, La Gestión de los riesgos naturales en el ámbito de protección civil, Dpto. de Geografía Física y A.G.R., Universidad de Sevilla, Boletín de la A.G.E. N.º 30 - 2000,

29 Xiaoyong Zhan, Min-Lang Huang, 2004, ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps, Environmental Modelling and Software.