



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL

ANÁLISIS DE INUNDACIÓN EN EL VALLE DEL GUADIANA  
DURANGO, MÉXICO

TESIS  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA:  
PATRICIA MALAGON ZAMORA

DIRECTORES:  
DR. ARMANDO CORTÉS ORTIZ  
DR. EDUARDO SÁNCHEZ ORTIZ



Victoria de Durango, Dgo., Noviembre de 2012



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Durango, Dgo. siendo las 14:45 horas del día 26 del mes de Noviembre del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR-IPN DGO para examinar la tesis titulada:

**Análisis de riesgo de inundación en el Valle del Guadiana, Durango, México**

Presentada por la alumna:

**MALAGÓN**

**ZAMORA**

**PATRICIA**

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre(s)

Con registro:

B	1	0	1	0	7	9
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

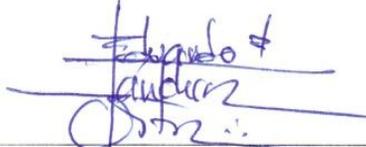
**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN GESTIÓN AMBIENTAL**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

  
Dr. Armando Cortés Ortiz

  
Dr. Eduardo Sánchez Ortiz

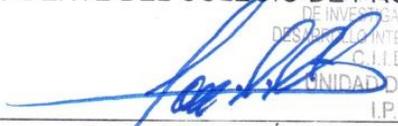
  
Dr. Marco Antonio Márquez Linares

  
Dr. Gustavo Pérez Verdín

  
M. en C. Noelia Rivera Quintero



PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
Dr. José Antonio Ávila Reyes



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

México, D.F. a 21 de Noviembre del 2012

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR Durango en su sesión extraordinaria No. 7 celebrada el día 19 del mes de Octubre conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

<u>MALAGÓN</u>	<u>ZAMORA</u>	<u>PATRICIA</u>							
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre (s)							
		Con registro: <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px 5px;">B</td> <td style="padding: 2px 5px;">1</td> <td style="padding: 2px 5px;">0</td> <td style="padding: 2px 5px;">1</td> <td style="padding: 2px 5px;">0</td> <td style="padding: 2px 5px;">7</td> <td style="padding: 2px 5px;">9</td> </tr> </table>	B	1	0	1	0	7	9
B	1	0	1	0	7	9			

Aspirante de: Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:  
Análisis de riesgo de inundación en el Valle del Guadiana, Durango, México

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:

2.- Se designa como Directores de Tesis a los Profesores:  
Dr. Armando Cortés Ortiz y Dr. Eduardo Sánchez Ortiz

3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:  
CIIDIR-IPN Unidad Durango

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

Directores de Tesis

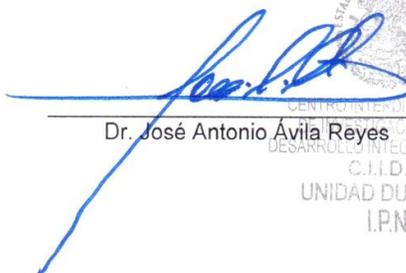
  
\_\_\_\_\_  
Dr. Armando Cortés Ortiz

Aspirante

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Patricia Malagón Zamora

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Eduardo Sánchez Ortiz

Presidente del Colegio

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Antonio Ávila Reyes

  
 CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
 DE INVESTIGACIÓN PARA EL  
 DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
 C.I.I.D.I.R  
 UNIDAD DURANGO  
 I.P.N.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de **DURANGO, DGO.**, el día **26** del mes de **NOVIEMBRE** del año **2012**, la que suscribe **PATRICIA MALAGÓN ZAMORA** alumna del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN GESTIÓN AMBIENTAL** con número de registro **B101079**, adscrita a **CIIDIR-IPN UNIDAD DURANGO**, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **DR. ARMANDO CORTÉS ORTIZ** y del **DR. EDUARDO SÁNCHEZ ORTIZ** y cede los derechos del trabajo intitulado **ANÁLISIS DE RIESGO DE INUNDACIÓN EN EL VALLE DEL GUADIANA, DURANGO, MÉXICO**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección [malag0n@live.com.mx](mailto:malag0n@live.com.mx). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

PATRICIA MALAGÓN ZAMORA

Nombre y firma

## **LUGAR DONDE SE REALIZÓ**

Esta tesis fue realizada con el financiamiento de CONACYT 372954 bajo la dirección de: Dr. Armando Cortes Ortiz y el Dr. Eduardo Sánchez Ortiz en el Laboratorio de Geomática del CIIDIR-IPN, Unidad Durango, en la ciudad de Durango, Dgo., México.

**DEDICATORIA**

A mi madre, por siempre impulsarme a mejorar.

## **AGRADECIMIENTOS**

A CONACyT por otorgarme la beca no. 372954 durante el periodo 2010-2012, asignada a través del Programa Nacional de Posgrados de Calidad. Además del apoyo de Becas Mixtas, para estancia de investigación, durante el periodo Febrero-Mayo 2012.

Al director y miembros del CIIDIR-IPN Unidad Durango, por facilitarme las instalaciones del centro, para el desarrollo del trabajo de tesis.

A mis directores de tesis: Dr. Armando Cortés Ortiz y Dr. Eduardo Sánchez Ortiz. Del comité de tesis al Dr. Gustavo Pérez Verdín, y de mi comisión revisora a M.C. Noelia Rivera Quintero y Roberto Valencia Vázquez por su apoyo, esfuerzos e interés durante el desarrollo de mi tesis de investigación.

Al Dr. Francisco Carreño Conde, la Dra. Irene de Bustamante y el Ing. Luis de Celis Barquero, con quienes trabajé durante mi estancia de investigación en la Fundación IMDEA Agua, situada en Alcalá de Henares, Madrid, España, durante el periodo Febrero-Junio del 2012. Por su apoyo, esfuerzos e interés durante mi estadía.

A la Asociación de Universidades Iberoamericanas de Posgrado, por otórgame el apoyo de coste de transporte aéreo para trasladarme al sitio dónde realice mi estancia de investigación.

A mis amigos: Maihualy, Manzana, Laura, Edgar, Javier, Alba, Diana e Imelda, por su apoyo, consejos y ayuda.

## ÍNDICE

GLOSARIO	xi
LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS	xiii
RELACIÓN DE FIGURAS	xv
RELACIÓN DE TABLAS	xvii
RESUMEN	xviii
ABSTRACT	xix
INTRODUCCIÓN	1
I.ANTECEDENTES	
1. DESASTRE NATURAL	3
1.1 Clasificación de desastres	4
1.2 Aspectos socio-económicos del desastre	5
1.3 Aspectos socio-culturales del desastre	5
1.4 Evaluación de desastre	6
Técnicas de cartografía	7
Sistemas de información geográfica	7
Sensores remotos	8
Concepto de inundación	8
Clasificación de las inundaciones	9
2. RIESGO	10
2.1 Evaluación de riesgo	10
2.2 El peligro en el riesgo	11
Análisis de peligro	11
2.3 La Vulnerabilidad en el riesgo	12
Análisis de vulnerabilidad	12
3 ANÁLISIS DE RIESGO DE INUNDACIÓN	13
3.1 Uso de cartografía en el análisis de inundación	13
Estimación del peligro	14
Estimación de la vulnerabilidad	14
3.2 Modelación hidrodinámica	15
Base matemática de modelación	15
Simulación hidráulica	17

Importancia del MDE en la simulación hidráulica	19
Uso de HEC-RAS para el cálculo de peligro	20
Interfaz HEC-GeoRAS en SIG's	22
4 INUNDACIONES EN EL VALLE DEL GUADIANA	22
II JUSTIFICACIÓN	23
III OBJETIVOS	
1. Objetivo general	24
2 Objetivos específicos	24
IV MATERIALES Y MÉTODOS	
1 ÁREA DE ESTUDIO	25
1.1 Descripción del área de estudio	25
1.2 Ubicación geográfica	25
1.3 Topografía	
Altitud	27
Pendiente	27
1.4 Clima	
Temperatura	29
Precipitación	30
Tipo de clima	31
1.4 Hidrografía	
Corrientes de agua	32
Cuerpos de agua	33
1.5 Suelos	34
1.5 Usos de suelo	34
1.6 Vías de comunicación	36
1.7 Asentamientos humanos y aspectos socioeconómicos	36
2 EVALUACIÓN DE LOS DATOS DE ELEVACIÓN DEL TERRENO	38
2.1 Datos topográficos disponibles	38
2.2 Cálculo del muestreo de errores	39
3 EVALUACIÓN DEL PELIGRO	40
3.1 Cálculo de peligro de inundación	40
Metodología de evaluación en HEC-RAS	41
3.2 Verificación de campo de los ríos de estudio	42

4 ESTIMACIÓN DE VULNERABILIDAD	42
4.1 Cálculo de Vulnerabilidad	43
Selección de indicadores	43
Estandarización y valorización	43
Estimación de vulnerabilidad	44
5 ANÁLISIS DE RIESGO	45
5.1 Confluencia de Amenaza y Vulnerabilidades	45
V RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
1 DATOS DE ELEVACIÓN DEL TERRENO	47
1.1 Datos topográficos disponibles	47
1.2 Muestreo de errores	51
2 PELIGRO	
2.1 Geometría de cauces	52
2.2 Simulación en HEC-RAS	
Condiciones de contorno	53
Gráfico tridimensional	54
Secciones transversales	55
2.3 Mapa de peligro	60
3 VULNERABILIDAD	61
3.1 Vulnerabilidad social	61
3.3 Vulnerabilidad económica	62
4 RIESGO	63
4.1 El Peligro y la Vulnerabilidad social	63
4.2 El Peligro y la vulnerabilidad económica	64
VI CONCLUSIONES	66
VII RECOMENDACIONES	68
BIBLIOGRAFÍA	70
ANEXO I: Tabla de elevaciones y estimador utilizados en el cálculo del error cuadrático medio	75
ANEXO II: Imágenes de los ríos de estudio	77
ANEXO III: Tabla de distribución del riesgo en función de la vulnerabilidad social y económica	83

## GLOSARIO

**Flujo subcrítico:** se presenta cuando el número de Froude es menor de 1. Donde el número de Froude es la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que representan el efecto de la gravedad del estado del flujo en canales abiertos.

**Flujo gradualmente variado:** se caracteriza porque es un régimen de flujo permanente, lo que implica que las variables hidráulicas por sección de un cauce permanecen constantes en el tiempo pero varían sección a sección. Por lo que se admite en éste una distribución hidrostática de presiones.

**Flujo permanente:** se presenta cuando la profundidad de flujo no cambia o puede suponerse constante durante un intervalo de tiempo considerado.

**Geometría hidráulica:** se refiere comúnmente a la sección transversal del cauce y su estudio se basa en las relaciones existentes entre los caudales y los niveles de agua y los diferentes parámetros hidráulicos y geométricos, como el área hidráulica, el ancho, la pendiente, la rugosidad y la velocidad del agua, entre otras.

**Hidráulica general:** estudia mediante análisis y experimentación el equilibrio y movimiento de los líquidos, específicamente el agua.

**Hidrodinámica:** parte de la hidráulica que estudia el movimiento de los fluidos, prescindiendo de las condiciones naturales de los líquidos, resuelve los problemas prácticos mediante proceso de análisis matemáticos.

**Hidrología:** ciencia que estudia el agua en la Tierra, su distribución, propiedades físicas y químicas, sus movimientos y transformaciones, así como su relación con el medio ambiente.

**Hidrograma:** gráfico de gasto (volumen de escurrimiento por unidad de tiempo) medido de forma continua para una determinada sección transversal de un río, contra el tiempo (en el que fue medido el gasto).

**Periodo de retorno:** es la inversa de la probabilidad de que se presente la lluvia de diseño en un determinado intervalo de tiempo.

**Simulación:** proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias, dentro de los límites impuestos por un cierto criterio.

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRONIMOS

**ASTER** Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

**CENAPRED** Centro Nacional de Prevención de Desastres

**CONAGUA** Comisión Nacional del Agua.

**COSUDE** Ayuda Humanitaria y Cuerpo Suizo de Ayuda Humanitaria

**DANE** Departamento Nacional de Estadística

**FOPAE:** Fondo de Prevención y Atención de Emergencias

**GITS** Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos

**HEC-GeoRAS** Hydrologic Engineering Center – GIS Tools for Support of River  
Analysis System

**HEC-RAS** Hydrologic Engineering Center – River Analysis System

**INAFED** Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal

**INEGI** Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía

**MDE** Modelo digital de elevación

**MDT** Modelo digital de terreno

**METI** Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan

**NASA** National Aeronautics and Space Administration

**OEA** Organización de Estados Americanos

**SEMARNAT** Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales

**TIN** Red de Triángulos Irregulares

## RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1: Procedimiento general de elaboración de análisis de riesgo	7
Figura 2: Ubicación del Valle del Gadiana en el municipio de Durango, con municipios de colindancia	26
Figura 3: Área de estudio con atributos principales	26
Figura 4: Distribución de elevaciones representada por curvas de nivel	28
Figura 5: Distribución de pendiente del terreno en porcentaje	28
Figura 6: Isotherma de temperatura media anual (16°) en el Valle del Gadiana.	29
Figura 7: Distribución de la precipitación media anual	30
Figura 8: Distribución de climas en el Valle del Gadiana	31
Figura 9: Hidrografía de datos topográficos vectoriales	32
Figura 10: Distribución de cuerpos de agua en el Valle del Gadiana	33
Figura 11: Suelos presentes en la zona de estudio	35
Figura 12: Uso de suelo en el Valle del Gadiana	35
Figura 13: Vías de comunicación en la zona de estudio	36
Figura 14: Centros de población representados por áreas y puntos.	37
Figura 15: Significado de los mapas de riesgo y amenaza de inundación (Hamad, 2008)	46
Figura 16: Mapa conceptual de la construcción o evaluación de riesgo.	46
Figura 17: Tamo del Río Durango a partir del cual se extrajeron las secciones transversales para contrastar los datos topográficos	47
Figura 18: Izquierda: TIN construido a partir de curvas de nivel 1:50,000. Superior derecha: representación gráfica de la primera sección transversal. Inferior derecha: representación gráfica de la última sección transversal	48
Figura 19: Izquierda: TIN construido a partir de curvas de nivel 1:50,000 y elevaciones tomadas en campo. Superior derecha: representación gráfica de la primera sección transversal. Inferior derecha: representación gráfica de la última sección transversal	49

Figura 20: Izquierda: TIN construido a partir de MDE 1:50,000. Superior derecha: representación gráfica de la primera sección transversal. Inferior derecha: representación gráfica de la última sección transversal	50
Figura 21: Izquierda: TIN construido a partir de MDE ASTER. Superior derecha: representación gráfica de la primera sección transversal. Inferior derecha: representación gráfica de la última sección transversal	51
Figura 22: Acercamiento al Arroyo Seco y el Tunal, que muestra el cálculo de la geometría de los cauces	53
Figura 23: Simulación para un periodo de retorno de $T_r = 100$ años. En todos los tramos	55
Figura 24: Sección 39405.67 del Tramo Alto de la Saucedá	56
Figura 25: Sección 6371.450. Izquierda: sección transversal completa del Tramo bajo de la Saucedá. Derecha: Acercamiento a la geometría del cauce	57
Figura 26: Sección 18563.49. Izquierda: sección transversal completa del tramo alto del río Durango. Derecha: acercamiento de geometría del cauce	57
Figura 27: Sección 11716.47. Sección transversal del tramo bajo del río Durango	58
Figura 28: Meandros en el Humedal de Málaga. Imagen multi espectral en falso color de GeoEye del 5 de febrero de 2012	59
Figura 29: Zonas de depresiones topográficas e inundables a lo largo del río. Imagen multi espectral en falso color de GeoEye del 5 de febrero de 2012	59
Figura 30: Distribución de peligro en el Valle del Guadiana	60
Figura 31: Distribución de la vulnerabilidad social por localidad	61
Figura 32: Distribución de la vulnerabilidad económica por localidad	62
Figura 33 Localización de las localidades con nivel de riesgo en función de la vulnerabilidad social	63
Figura 34: Distribución de las localidades con nivel de riesgo en función de la vulnerabilidad económica	65

## RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de desastres	4
Tabla 2: Lista de modelos hidráulicos (Vásquez 2003).	9
Tabla 3: Datos requeridos para el cálculo de peligro (Elaboración propia)	18
Tabla 4: Tipo de vulnerabilidad (Modificado a partir de Salgado, 2005)	43
Tabla 5: Valoración de indicadores (Salgado, 2005)	44
Tabla 6: Caracterización de vulnerabilidad (Salgado, 2005)	44
Tabla 7: Error cuadrático medio	52
Tabla 8: Escenarios de simulación	54
Tabla 9: Localidades con Mayor riesgo social	64
Tabla 10: Localidades con mayor riesgo económico	65

## RESUMEN

En el presente estudio se realizó un análisis de desastre por inundaciones en el Valle del Guadiana, Durango, México. Utilizando el enfoque de construcción de riesgo, se identificaron en mapas digitales el peligro de inundación y su relación con la vulnerabilidad de los elementos socioeconómicos expuestos. El peligro se analizó mediante una metodología hidrológico-hidráulica con la aplicación del modelo hidrodinámico HEC-RAS, con el cuál mediante imágenes satelitales y cartografía del terreno a escala 1:50,000 se generó en interfaz ArcView- HEC-GeoRAS la geometría de los cauces. Con ésta información se simuló el comportamiento de los ríos del área: La Sauceda, Arroyo Seco, El Tunal, Santiago Bayacora, La Vaca y Río Durango, con base a una tormenta de diseño de 1968, aplicando gastos extraordinarios con periodos de retorno de 5, 20 y 100 años. La vulnerabilidad se analizó a partir de la información sociodemográfica del II Censo de Población y Vivienda 2005 del INEGI. Mediante estos análisis se obtuvo una aproximación de la identificación del nivel de riesgo, debido a las limitantes del cálculo de peligro, derivadas del detalle y precisión de la cartografía utilizada. A partir de ésta identificación del nivel de riesgo se ubicaron dos localidades: La Cinco de Mayo y La Ferrería, con muy alto riesgo, lo que permite ubicar a 4,410 personas con prioridad de actuación ante la ocurrencia de inundaciones. Si bien no se logró un ajuste de los resultados de la distribución de la inundación en congruencia con la realidad del terreno, si se determinaron las características de la cartografía necesarias para aplicar modelaciones hidrodinámicas, así como la identificación de otras metodologías que puedan permitir caracterizar los regímenes de inundación en la zona de estudio.

**PALABRAS CLAVE:** inundación, modelación hidráulica, vulnerabilidad, mapeo de riesgo.

## ABSTRACT

In this study, an analysis of disaster by flooding was performed in EL Valle del Guadiana in Durango, Mexico, by means of risk construction approach. The purpose was to identify in digital maps the flooding risks and their relation with the socio-economic vulnerability of the area. The risk was analyzed through the hydrologic-hydraulic methodology with the use of the HEC-RAS software, which by satellite images and terrain mapping at a 1:50,000 scale, the geometry of the riverbeds was created and used in the simulation of the behavior of the rivers of the area: La Saucedá, Arroyo Seco, El Tunal, Santiago Bayacora, La Vaca y Río Durango. The analysis was, based on a design storm of 1968, considering extraordinary discharges with return periods of 50, 20 and 100 years. A vulnerability index was estimated using socio-demographic information of the INEGIS's II Conteo de Población y Vivienda 2005. From the risk analysis, two locations were identified: Cinco de Mayo and La Ferrería, as of very high risk, which suggests placing 4,410 people with priority in the occurrence of flooding. Though it was not possible to adjust the results of the distribution of the flood to the actual terrain, this work helps to determine the characteristics of the mapping needed to implement hydrodynamic modeling, as well as the identification of other methodologies that may allow the characterization of flooding regimes in the area of study.

**KEY WORDS:** flooding, hydraulic simulation, vulnerability, risk mapping.

## INTRODUCCIÓN

Debido a sus condiciones geográficas, México experimenta a lo largo del año el embate de una gran variedad de desastres naturales, entre los que destacan los fenómenos hidrometeorológicos, los cuales pueden provocar inundaciones, deslaves u otros efectos de esta naturaleza (CNA 2011). Particularmente los desastres naturales por inundación en el Valle del Guadiana, son entendidos mediante su mecanismo de reacción, a partir de la definición de inundación pluvial, ya que no se generan por un exceso en las precipitaciones, si no que guardan relación con la acumulación de agua en las depresiones del terreno debido a la topografía de baja pendiente (Ahmed 2008) y al comportamiento hidráulico de la zona. En este sentido han sido estudiados por instituciones como la CONAGUA, que en el 2006 generó el Proyecto Ejecutivo para la Construcción del Drenaje Pluvial del Valle del Guadiana, en busca de determina la distribución de los escurrimientos mediante análisis hidrológicos. Sin embargo este tipo de procesos aportan sólo el panorama específico de la distribución de la lámina de agua, dejando de lado la influencia de la inundación con respecto a los factores socio-económicos involucrados. Debido a esto es que las inundaciones deben ser caracterizadas en función del riesgo que generan, conceptualizándoles como la relación entre el peligro y las vulnerabilidades con el fin de evaluar las consecuencias sociales, económicas y ambientales de un evento (COSUDE 2002). En este sentido la investigación ha venido desarrollando tecnologías que permiten la inclusión de Sistemas de Información Geográfica (OEA 1993) y modelación hidrodinámica mediante simulación hidráulica (Vázquez 2003), para llevar a cabo estudios detallados, para generar a partir de estos una descripción no sólo del fenómeno si no de la distribución de los elementos expuestos, a partir de lo cual se puedan generar políticas de actuación y mitigación (FOPAE 2012). Es por eso que estas metodologías fueron aplicadas en el presente estudio. Sin embargo es importante mencionar que este tipo de análisis plantean el uso de cartografía de detalle, a partir de la cual se busca identificar lo más cercano a la realidad las características del fenómeno de inundación (Pérez et al. 2010). Situación que forma un marco de referencia para explicar que mediante el presente estudio, se obtuvo una aproximación de la identificación del nivel de

riesgo, debido a las limitantes del cálculo de peligro, derivadas del detalle y precisión de la cartografía utilizada. A partir de ésta aproximación se identifico que la zona de conflicto se circunscribe al río la Saucedá, observándose mayores complicaciones en la confluencia del resto de los ríos de estudio, con éste. Además se identificaron dos localidades: La Cinco de Mayo y La Ferrería, con muy alto riesgo socio-económico ante inundaciones, permitiendo ubicar a 4,410 personas con prioridad de actuación en función de su vulnerabilidad.

## ANTECEDENTES

### 1 DESASTRE NATURAL

Los desastres tienen un efecto negativo sobre las condiciones de vida de la población y en el desempeño económico de los países o regiones en que ocurren. Las secuelas se prolongan más allá del corto plazo y, en ocasiones, provocan cambios irreversibles tanto en las estructuras económicas y sociales como en el medio ambiente (CEPAL 2003).

El Centro Nacional de Prevención de Desastres conceptualiza los desastres como “el estado en que la población de una o más entidades, sufre daños severos 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” (CENAPRED 2012).

Otra conceptualización lo define como un evento de la naturaleza de condición extrema que proviene de procesos geofísicos, lo cual no resulta del todo preciso, ya que ésta definición separa el fenómeno de los factores con los que puede o no interactuar. Por lo tanto la definición de desastre que mejor se ajusta al presente estudio lo refiere en función de la ubicación de su impacto como cualquier fenómeno de carácter geofísico natural que se presenta en áreas en las que se distribuyen asentamientos humanos e infraestructura, provocando pérdidas y daño económico (Rodríguez 2007). En éste sentido el énfasis de que un desastre es un fenómeno natural, se debe hacer para excluir del contexto los eventos originados por el hombre o aquellos que no están relacionados con el entorno físico. En función de esto, los desastres no se pueden evaluar como un carácter aislado, sino que es necesario incluir la convergencia de la amenaza y los factores de vulnerabilidad, examinándolo bajo el concepto de riesgo (Rodríguez 2007).

### 1.1 Clasificación de desastres

La clasificación de los desastres depende del punto de vista de quien categoriza, ya que éste puede variar las conceptualizaciones que se tengan. Debido a esto es recomendable partir de divisiones preestablecidas por algún organismo institucional internacional, que lo categorice de forma generalizada, para el caso se utiliza la propuesta de las Naciones Unidas, que divide los desastres dependiendo del grupo de fenómenos naturales que pueden generarlos (INDECI 2003). En éste caso el discriminar conceptos tiene por finalidad darle peso a la problemática de los daños y es contraria a percibir los desastres como un mal que resulta inevitable debido a la existencia de fuerzas naturales incontrolables (OEA 1993). La clasificación es la siguiente:

**Tabla 1:** Clasificación de desastres, modificado de Ahmed (2008)

<b>GENERADOS POR</b>	<b>TIPO</b>
<b>GEODINÁMICA INTERNA</b>	Terremotos
	Maremotos o tsunamis
	Actividad volcánica: fumarólica y eruptiva
<b>GEODINÁMICA EXTERNA</b>	Deslizamientos
	Derrumbes
	Aludes
	Aluviones
	Desglaciación
<b>FENÓMENOS METEREOLÓGICOS</b>	Cambio climático
	Inundaciones
	Sequías
	Temporales (con vendavales)
	Granizo
<b>ORIGEN BIOLÓGICO</b>	Plagas
	Epidemias

## **1.2 Aspectos socio-económicos de los desastres**

Los desastres tienen dos líneas claras con respecto a la importancia dentro del proceso de su entendimiento. En primer término el aspecto social, cuya construcción permite concebirlo no como productor de pérdidas, si no como un proceso que se va conformando a largo plazo a partir de factores generados de las características económicas de la sociedad (Rodríguez 2007). De acuerdo a lo anterior dependiendo del sitio donde se presente el fenómeno y las medidas de prevención aplicadas en función de la ubicación del mismo es la capacidad de la población para prevenirlo o subsanarlo. Sin embargo en países en vías de desarrollo la situación se ve agravada por no tomar en cuenta la distribución de la probabilidad del fenómeno, aunado a la mala planeación (Erlingsson et al. 2001). Por lo que en términos económicos, se considera que un desastre representa lo contrario de la ejecución de un proyecto de inversión, ya que ocasiona daños de devaluación en las inversiones, debido a su presencia se alteran los flujos de producción de bienes y servicios, mermando la disponibilidad y eficiencia (Mártir 2006).

## **1.3 Aspectos socio-culturales de los desastres**

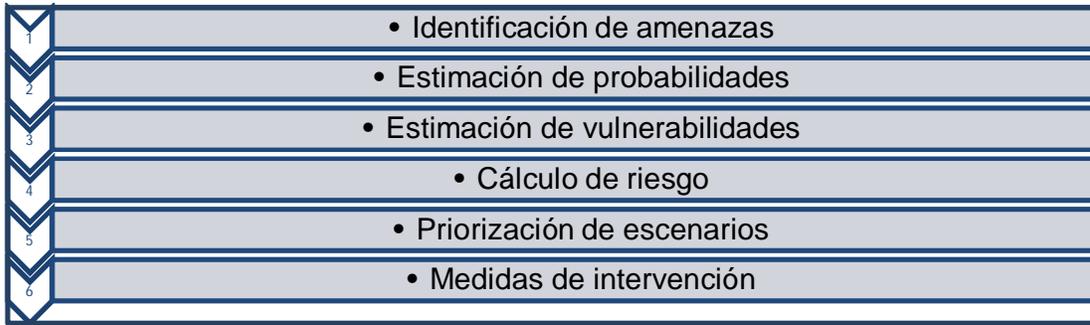
El segundo término de importancia en cuanto al entendimiento de los desastres, radica en su aspecto cultural, con respecto a éste, la discusión acerca de sus impactos en la sociedad se analiza generalmente desde dos perspectivas, es así que las ciencias exactas se ocupan del estudio de la causa-efecto de los impactos físicos de cada uno de los fenómenos existentes. Y las ciencias sociales por otro lado están interesadas en estudiar como impactan éstos a las sociedades, y sobre cómo es la reacción, la respuesta y resiliencia por parte de éstas ante las condiciones que se generan (Rodríguez 2007). Por lo anterior se puede decir que la construcción social de un desastre es un proceso multi casual, en el que las condiciones como marginalidad, densidad de población, pobreza, percepción de riesgos, falta de control territorial, de sistemas de prevención y atención ante desastres, entre otros, van generando desajustes en el territorio, que pueden desencadenar la aparición de nuevos conflictos en una comunidad. Así es que el conocimiento del contexto socioeconómico, así como el desarrollo

de estrategias de adaptación, se vuelven elementos necesarios para delimitar la conceptualización socio-cultural de los desastres (Rodríguez 2007).

#### **1.4 Evaluación de desastre**

La evaluación de desastres es un proceso que busca determinar el impacto que la amenaza ha tenido sobre la sociedad, los requerimientos y prioridades para tomar medidas de emergencia inmediatas para cubrir las necesidades de los afectados, los recursos disponibles y las posibilidades para facilitar y acelerar la recuperación a largo plazo. (Stephenson 1991). Ésta debe planearse y controlarse cuidadosamente. Lo que comprende una serie de actividades como son: la identificación del problema, recopilación de datos, análisis de éstos, informe de conclusiones y diseño de la respuesta ante el desastre (Stephenson 1991). Cada una de estas actividades debe realizarse en el sentido de generar la información necesaria para que los encargados de la toma de decisiones puedan dirigir los esfuerzos en pro de la prevención. Debido a esto es que se han desarrollado en los últimos años estudios en las zonas donde históricamente se reconoce la aparición de desastres para generar así metodologías estandarizadas de evaluación de los mismos(CEPAL 2003).

Existen diversas metodologías para desarrollar análisis de riesgos, es así que la selección de la más apropiada en cada caso depende de la disponibilidad de información y el nivel de detalle que se desee alcanzar (FOPAE 2012). Sin embargo es importante utilizar técnicas mediante el uso de Cartografía, Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota, que permitan aportar la distribución espacial de los impactos, ya que teniendo esta distribución es sencillo generar políticas de actuación ante la presencia de fenómenos como las inundaciones. El procedimiento general para la elaboración del análisis de riesgo se puede enmarcar en seis etapas principales, que pueden observarse en la Figura 1 (FOPAE 2012).

**Figura 1.**

Procedimiento general de elaboración de análisis de riesgo, modificado de FOPAR (2012).

### Técnicas de cartografía

Dentro de las metodologías utilizadas para la evaluación de desastres, destaca fundamentalmente el uso de cartografía, ya que ésta permite zonificar las características del terreno, y ubicar dentro de éstas la distribución de desastres (OEA 1993). En el caso de las inundaciones los mapas se utilizan para delimitar el área potencialmente afectada, tratando de determinar la ocurrencia o no de un suceso en un punto del territorio a partir de la aplicación de diferentes metodologías, como son: la histórica, la geomorfológica y la hidrológico-hidráulica (Ribera 2003). Sin embargo la cartografía presenta una limitación ya que si bien describe con precisión el espacio inundable, en cambio aporta una información más bien escasa sobre qué elementos se verán afectados y con qué intensidad (Ribera 2003).

### Sistemas de información geográfica (SIG)

Los SIG han venido a complementar el uso de la cartografía en la evaluación de desastres ya que permiten dar referencia geográfica a la información sobre una unidad de espacio, además que facilitan el almacenamiento, acceso y análisis de una mayor cantidad de datos en forma de mapas y tabulaciones (OEA 1993). Éstos han hecho más dinámicos los estudios geomorfológicos e hidrológico-hidráulicos, ya que actualmente se desarrollan en sistemas computarizados. Con los SIG's se puede utilizar un gran número de datos de unidades de información que se requieran para el manejo de desastres, particularmente en el contexto de la planificación para el desarrollo, ya que su uso tiene bajos costos y permite

multiplicar la productividad de trabajo, además aporta una mejor calidad en los resultados (OEA 1993).

### **Sensores remotos**

Los sensores remotos pueden ser aplicados en varias de las etapas de la evaluación de desastres de forma complementaria al uso de cartografía, ya que proporcionan información registrada con sensores montados en aeronaves o en satélites, que presentan un panorama de la distribución de las características del terreno así como de la presencia del evento en distintos períodos de tiempo. Estas técnicas pueden ser usadas para revelar la ubicación de eventos naturales históricos, o para identificar las condiciones bajo las cuales probablemente podrían ocurrir, de tal manera que las áreas potenciales de exposición puedan ser identificadas y se puedan introducir medidas aplicables de mitigación al proceso de planificación (OEA 1993). Habiendo conceptualizado el desastre y reconociendo la importancia del uso de los sistemas de información geográfica, es necesario puntualizar que el análisis del presente trabajo está dirigido, de forma puntual, a las inundaciones por lo que es importante entender su dinámica y los factores que en ellas concurren

### **Concepto de inundación.**

Se le llama inundación a la ocupación de agua en zonas que habitualmente están libres de ésta. Dicha ocupación puede producirse cuando ocurren lluvias intensas o continuas que sobrepasan la capacidad de volumen, retención e infiltración del suelo haciendo que los cauces se desborden (SEMARNAT 2009). En zonas de baja pendiente y climas extremos, donde la temporalidad de las lluvias no es constante, se debe tomar en cuenta además de forma paralela en la ocurrencia de la inundación, el fenómeno de agradación. La cual se presenta en periodos de estiaje, cuando el flujo de los ríos disminuye, causando que en las zonas de meandro se formen brazos e islas, por lo que el sedimento expuesto se desplaza por la acción del viento, generando modificaciones en la configuración de fondo, con lo que al existir un incremento en el régimen del flujo, el agua se desplaza a las zonas planas adyacentes generando la inundación (Silva 2010). Ya que una definición de inundación está directamente relacionada a la forma en la que ésta

se presenta es que se vuelve primordial tener una clasificación que ubique el contexto del fenómeno a partir del cual se parte.

**Clasificación de las inundaciones**

Según Ahmed (2008) las inundaciones pueden clasificar por su duración y mecanismo de generación, lo cual se puede ver descrito de forma general en la Tabla 2, a continuación:

**Tabla 2:** Clasificación de inundaciones, modificado de Ahmed (2008).

<b>CLÁSIFICACIÓN</b>	<b>TIPOS DE INUNDACIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>SEGÚN SU DURACIÓN</b>	Inundaciones rápidas o dinámicas	Se presentan en vertientes de zonas con pendientes pronunciadas, se originan por lluvias intensas y de corta duración
	Inundaciones lentas o estáticas	Se presentan por el aumento constante de un caudal debido a lluvias persistentes, al saturar el flujo el río se sale del cauce y se desplaza a zonas planas adyacentes (llanuras de inundación)
<b>SEGÚN EL MECANISMO DE GENERACIÓN</b>	Inundaciones pluviales	Se presentan en suelos poco permeables y no tienen que ser generadas al desbordarse un río, se relacionan con la acumulación de agua en determinados lugares, sin embargo puede generarse por precipitaciones persistentes.
	Inundaciones fluviales	Se originan por crecidas que hacen incapaz al cauce de transportar el flujo de un exceso de lluvias.
	Inundaciones por rotura	Generadas por la operación incorrecta de obras de infraestructura hidráulica, por término de vida útil de éstas o por falta de mantenimiento de las mismas.

En el caso del presente estudio, el comportamiento topográfico, hidrológico e hidráulico condicionan a que las inundaciones sean derivadas del mecanismo de reacción, específicamente del tipo pluvial, debido esto al comportamiento de las lluvias y a problemas de agradación en el terreno. A partir de esto se puede esbozar en función de la baja pendiente del terreno y los datos disponibles de la zona de estudio el tipo de análisis de inundación aplicable. Sin embargo los elementos que justifican las metodologías utilizadas aún se deben enfocar en la caracterización el riesgo.

## **2 RIESGO**

En la determinación del riesgo influye la percepción de los actores sociales (población, autoridades), en este sentido debe ser clara la definición de riesgo desde la que se parte para llevar a cabo un análisis del mismo. Por lo que en el presente estudio el riesgo se conceptualiza como la relación entre la amenazas y las vulnerabilidades con el fin de evaluar las consecuencias sociales, económicas y ambientales de un evento (COSUDE 2002). Debido a que las formas de análisis pueden estar influenciadas por la experiencia, los valores y las prioridades que tengan estos de los involucrados en su estudio, es que adquiere importancia hacer una evaluación objetiva, para que las recomendaciones surgidas de ésta, se ajusten a la realidad de la zona estudiada (COSUDE 2002).

### **2.1 Evaluación de riesgo**

Existen diversos métodos para el cálculo de riesgos debidos a desastres naturales. Entre los métodos que se utilizan están los de análisis cualitativos que pueden aportar, cuando son aplicables, un grado de objetividad superior. Sin embargo, la escasez de datos prohíbe generalmente su aplicación consecuente. En función de lo anterior para permitir una eficiente gestión del riesgo, es más importante identificar correctamente las causas profundas (o factores) que originan el riesgo y que influyen sobre su dinámica (es decir sobre su crecimiento o su reducción), basándose en datos exactos para su cálculo (COSUDE 2002).

Existen también los métodos cuantitativos, en los que se aplican estimaciones numéricas de intensidad o de probabilidad de un fenómeno, o incluso cálculos de

riesgo que pueden sustentar en ciertos casos una afirmación cualitativa sobre el riesgo. Éstos implican el uso de análisis estadísticos y probabilísticos para determinar la ocurrencia de los fenómenos, la vulnerabilidad de los elementos en riesgo y el riesgo inducido (COSUDE 2002). El método a aplicar depende de la recurrencia del fenómeno y de su variación espacial. Sin embargo sea cual sea la metodología utilizada es importante conceptualizar el análisis en dos términos, mediante la zonificación de peligro y la ubicación de la distribución de vulnerabilidad, ya que esto permitirá tener una visión global del riesgo.

## **2.2 El Peligro en el riesgo**

El peligro en el riesgo permite ubicar la distribución y altura de la lámina de agua de la inundación en función, de modo que se pueda ésta ubicar sobre el terreno, para identificar la zona impactada. Su se realiza a través de inventarios de fenómenos, observaciones y mediciones de campo, análisis y revisión de información científica disponible (mapas, fotos aéreas, informes, etc.). Con el fin de conocer la probable ubicación y severidad de un desastre, así como la probabilidad de que ocurran en un tiempo y área específica (COSUDE 2002). Para lo cual existen diversas metodologías de análisis, de las cuales engloban por etapas los procedimientos de cálculo de la probabilidad e intensidad del evento.

### **Análisis de peligro**

Según Ahmed (2008) ya que el peligro está en función de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno y de su intensidad. Y dado que la intensidad se define en función de la profundidad y la velocidad del agua, así como de la duración de la inundación. El análisis de una amenaza por inundación (en función del daño potencial) entonces debe basarse en la probabilidad o frecuencia de ocurrencia del fenómeno y los niveles o altura del agua(Ahmed 2008). En este sentido la intensidad de una inundación depende de varios aspectos, que abarcan: las características del terreno, las características de la red de drenaje, la magnitud de las pendientes de la cuenca, obras realizadas en los cauces, así como la geometría y características de los cauces(Ahmed 2008).

Por otro lado la probabilidad de ocurrencia de inundación está en función del cálculo de los hidrogramas con respecto a los periodos de retorno, y depende esencialmente de la frecuencia de precipitaciones excepcionalmente fuertes. Sobre esto cabe destacar que según Ahmed (2008) si no se tienen registros hidrometeorológicos mayores a 50 años, los métodos de cálculo para periodos de retorno de más de 200 años, pierden precisión en la extrapolación. Aspecto que resulta fundamental para determinar una distribución de la probabilidad que no se aleje demasiado de la realidad del fenómeno.

### **2.3 La vulnerabilidad en el riesgo**

En segundo término para la conformación del riesgo, la vulnerabilidad se aborda como la medida de cuán susceptible es un bien expuesto a ser afectado por un fenómeno perturbador. Desde el punto de vista general, se presenta como la probabilidad de que una comunidad, expuesta a una amenaza natural, según el grado de fragilidad de sus elementos (infraestructura, vivienda, actividades productivas, grado de organización, sistemas de alerta, desarrollo político-institucional y otros), pueda sufrir daños humanos y materiales. La magnitud de esos daños, a su vez, se determina mediante el grado de vulnerabilidad (Salgado 2005).

#### **Análisis de vulnerabilidad**

En el sentido de delimitar el análisis de vulnerabilidad, en su tesis Ahmed en el 2008 menciona que un análisis de riesgo de inundación se puede desarrollar directamente al zonificar la amenaza de inundación, dando énfasis en las etapas en las que ésta se divide y mencionando los marcos de referencia para su cálculo. Es importante identificar lo anterior ya que es reciente la conceptualización de incluir a la vulnerabilidad dentro del análisis de riesgo, para así considerar al desastre en función del factor social, debido a esto es que no se cuenta con una metodología estandarizada para este tipo de análisis, ya que cada zona de estudio tiene características muy particulares.

Conforme ha evolucionado el análisis de vulnerabilidad, ha destacado en su uso la propuesta de Wilches Chaux creada en 1989, que habla sobre vulnerabilidad

global, la cual está compuesta por diferentes vulnerabilidades, las que se integran de una serie de índices que pueden ser seleccionados dependiendo de la zona de estudio; haciendo que el análisis sea determinado por sectores (Salgado 2005). En el caso particular de estudio, el enfoque de análisis partió de la vulnerabilidad social y económica.

En este sentido la vulnerabilidad social se refiere al “nivel de cohesión interna que posee una comunidad, donde cuanto mejor y mayor se desarrollen las interrelaciones dentro de una comunidad, es decir sus miembros entre sí y a su vez con el conjunto social, menor será la vulnerabilidad presente en la misma” (Salgado 2005).

Por otro lado la vulnerabilidad económica “viene directamente dada por los indicadores de desarrollo económico presentes en una población, pudiéndose incluso afirmar que cuanto más deprimido es un sector, mayor es la vulnerabilidad a la que se encuentra ante los desastres” (Salgado 2005).

### **3 ANÁLISIS DE RIESGO DE INUNDACIÓN**

Particularmente en el análisis de riesgo de inundación existen tres metodologías claras, que son: la histórica, la geomorfológica y la hidrológica-hidráulica. El método histórico se limita a cartografiar las áreas inundables en episodios de inundación pasados. El geomorfológico consiste en estudiar las formas del terreno provocadas por el paso del agua, mediante el análisis de las características del terreno (Pérez 2012). Finalmente el hidrológico-hidráulico, se basa en la delimitación de las zonas potencialmente inundables a partir de hidrogramas generados de los registros pluviométricos, mediciones de los caudales y el comportamiento físico del agua en función de la morfología del terreno. Pero éste método tiene una limitación derivada de las características técnicas de los datos requeridos (Pérez 2012).

#### **3.1 Uso de cartografía en el análisis de inundación**

La cartografía es realmente importante en el caso del análisis de inundaciones, ya que existen diferentes parámetros y variables que pueden ser representados

por su componente espacial (profundidad, velocidad, carga de sedimento, etc.), en función de su confluencia con los factores expuestos. Además, esta expresión cartográfica de los niveles de riesgo facilita su integración con las medidas preventivas de carácter territorial, como es la ordenación y gestión de usos y permanencias en áreas de riesgo (Pérez 2012).

### **Estimación del peligro**

La propuesta metodológica seleccionada para su aplicación en el presente estudio es la hidrológico-hidráulica, la cual se sustenta en el análisis de escorrentía, que se plantea mediante modelación hidrodinámica, que simula el comportamiento del flujo. Éste representa la propagación de caudales y niveles de agua en un río durante lluvia extraordinaria (Triviño y Ortiz 2005). Ésta se puede realizar en dos formas, una es partiendo de datos del terreno y de estaciones hidrometeorológicas, para desarrollar un modelo hidrológico que proporcione los hidrogramas necesarios para aplicar un modelo hidráulico, y obtener así la velocidad, distribución y altura de la lámina de agua en la zona de estudio. La segunda opción que es la aplicada en este estudio, se realiza a partir de hidrogramas contruidos mediante métodos estadísticos, en base a una tormenta de diseño, que son utilizados en modelos hidráulicos para obtener los resultados mencionados en el párrafo anterior.

### **Estimación de la vulnerabilidad**

La forma generalizada de construir la vulnerabilidad, parte de conceptualizarla a partir de diferentes tipos de vulnerabilidades (social, económica, ecológica, física, etc.) que sirven para tratarla como un carácter global (Salgado 2005). Cada una de las vulnerabilidades que componen la global, a su vez se constituyen de índices que dependen del tipo de amenaza, y se construyen a partir de variables que se extraen de la información existente sobre las características de la población, lo que permite seleccionar las que representen mejor a la zona de estudio (Salgado 2005). Para construirla pueden utilizarse datos cuantitativos y cualitativos, los cuales se deben estandarizar para lograr uniformidad en el análisis. Dependiendo además del grado de influencia que tienen los valores

dentro del indicador es que se determinan los niveles de severidad en la vulnerabilidad( Salgado 2005).

### **3.2 Modelación hidrodinámica**

Éste tipo de modelación permite la evaluación de inundaciones de forma numérica debido a que describe apropiadamente procesos hidráulicos en sistemas cauce-planicie, además permite representar otros procesos, como el transporte de sedimentos, transporte de contaminantes y escurrimiento subterráneo. Volviéndolos una herramienta complementaria a los modelos físicos cuyo uso puede tornarse extremadamente complejo (Vásquez 2003). El grado de detalle en la representación está en función del tipo y exactitud de las predicciones requeridas, de la calidad de los datos disponibles para parametrizar el modelo y de las escalas espaciales y temporales en las cuales el modelo debe operar. Lo que ha puesto en evidencia la importancia de contar con bases de datos de las características morfológicas, los usos de suelo, la vegetación y las interferencias antrópicas en las planicies de inundación, de modo que se puedan obtener resultados que ajusten con la realidad de la zona estudiada.(García et al 2000).

En función de lo anterior la esorrentía superficial, en ríos de zonas semiáridas, entendida como un sistema abierto donde sus componentes intercambian materia y energía con el entorno, el enfoque sistémico permite tener una visión práctica que ayuda a centrar el análisis en los caracteres de importancia hidrológico-hidráulica, simplificando procedimientos para identificar los factores que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a caudal. Este esquema mejora la comprensión de la esorrentía facilitando su abstracción en modelos matemáticos capaces de simular su comportamiento y de cartografiar su distribución en el espacio.(Triviño y Ortiz 2004).

#### **Base matemática de modelación**

La base matemática que soporta la modelación hidrodinámica supone un flujo gradualmente variado cuya expresión se obtiene de las ecuaciones de Saint Venant que describen el movimiento del agua a superficie libre en un canal y es

el resultado de aplicar principios de la conservación de las masas y la cantidad de movimiento, bajo ciertas hipótesis simplificadas. Las hipótesis son las siguientes (Bautista et al. 2007):

- ❖ El flujo es unidimensional e incompresible, por lo que tiene densidad constante. El tirante hidráulico y la velocidad del flujo varían sólo en la dirección del eje longitudinal del canal. La velocidad es uniforme y la superficie libre es horizontal a través de cualquier sección perpendicular al eje.
- ❖ Las líneas de flujo no tienen curvatura pronunciada, esto significa que el flujo varía gradualmente a lo largo del canal, de forma que las aceleraciones verticales puedan considerarse despreciables. Lo anterior implica que la distribución de presiones sea hidrostática.
- ❖ El fondo del canal es fijo y de pendiente pequeña, de modo que la profundidad del flujo y el tirante son aproximadamente idénticos, de tal suerte que los efectos de socavación y deposición son despreciables.
- ❖ Los coeficientes de resistencia para flujo uniforme permanente turbulento son aplicables de forma que relaciones como la ecuación de Manning pueden utilizarse para describir los efectos de la resistencia.

Con base a estas hipótesis y aplicando los principios de la Conservación de la Masa y de la Conservación de la Cantidad de Movimiento a un volumen de control elemental de longitud  $dx$  en un canal, resultan las ecuaciones 1 y 2, de Continuidad y Momentum (Bautista et al. 2007).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad [1]$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = qV \quad [2]$$

Dónde:

$A(x,t)$  área hidráulica ( $m^2$ )

$Q(x,t)$  el gasto ( $m^3/s$ ) que circula por  $A$

$V(x,t)$  la velocidad media (m/s) en la dirección del flujo  
 $q(x)$  descarga lateral (m<sup>2</sup>/s) ( $q>0$ : flujo entrante y  $q<0$ : flujo saliente)  
 $y(x,t)$  tirante hidráulico (m)  
 $S_f(x,t)$  pendiente de fricción  
 $S_0$  pendiente del fondo del canal  
 $G$  aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

En ésta ecuación la pendiente de la línea de fricción se determina a partir de la fórmula de Manning, la cual se expresa en la ecuación 3:

$$S_f = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{2/3}} \quad [3]$$

En ésta,  $n$  corresponde al coeficiente de fricción de Manning (s/m<sup>1/3</sup>) y  $R$  el radio hidráulico (m), definido por  $R=A/P$ , donde  $P$  es el perímetro mojado (m) (Bautista Capetillo Carlos Francisco et al. 2007). A partir de las ecuaciones anteriores se deduce la ecuación dinámica del flujo gradualmente variado, que es la base de cálculo de los modelos hidrodinámico HEC-RAS. Ésta es igual a la que se obtiene en el análisis del flujo en régimen permanente y a superficie libre cuando se emplea la ecuación de la energía (Bautista et al. 2007), y es como se enuncia a continuación en la ecuación 4:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - F^2} \quad [4]$$

### Simulación hidráulica

Actualmente los modelos hidrodinámicos de simulación hidráulica tienen capacidad para resolver una gama de condiciones de flujo, además de que cuentan con módulos adicionales. Existen muchas formas de clasificar modelos hidrodinámicos sin embargo para el caso se enunciará la basada en el método de cálculo, descrito por Vásquez (2003).

Vásquez (2003) menciona que debido a que el “complejo de la velocidad en el medio continuo del agua es imposible de determinar partícula a partícula, es que

éste se divide en elementos discretos de tamaño finito”. En una dimensión (1D) la discretización se realiza a nivel de secciones transversales, siendo el método de cálculo por etapas: se hace el balance energético en una sección, se asume el tirante crítico y se continúa con la siguiente, por eso los programas que lo manejan son robustos, rápidos y numéricamente confiables (Vásquez 2003).

Los problemas de dos y tres dimensiones (2 y 3 Dimensiones) requieren resolver ecuaciones diferenciales y por lo tanto una discretización más fina mediante el uso de mallas (de filas y columnas equidistantes). Los métodos principales son el Método de Elementos Finitos, el Método de Diferencias Finitas y más recientemente el Método de Volúmenes Finitos (Vásquez 2003).

Estos métodos resuelven las ecuaciones que tienen dominio continuo mediante la solución en un número finitos de puntos discretos. Cuando los valores buscados (tirante, velocidad, etc.) son encontrados, la solución en cualquier otro punto puede ser aproximada mediante métodos de interpolación. Con estos modelos se obtiene mucho detalle y precisión, siendo capaces de manejar condiciones de borde complejas, sin embargo requieren la solución simultánea de todos los nodos del dominio, lo que hace lento su desarrollo debido a la carga computacional (Vásquez 2003). Existen muchos modelos numéricos en el mercado, de los cuales se enuncian algunos en la Tabla 2.

**Tabla 3:** Lista de modelos hidráulicos, modificada de Vásquez (2003).

<b>NOMBRE MODELO</b>	<b>DIMENSIÓN</b>
HEC-RAS	1D
BRISTARS	CUASI 2D
MIKE	2D y 3D
FESWMS	2D
RIVER2D	2D
SSIMM	3D

### **Importancia del MDE en la simulación hidráulica**

El registro de la realidad física de una zona, específicamente la información referente a elevaciones, comúnmente se realizaba mediante modelos analógicos, como mapas o planos, sin embargo en los últimos años se ha presentado una variación debida a la inclusión de modelos de naturaleza digital como lo son los modelos digitales de terreno MDT. Debido a que el almacenamiento de la información es de tipo numérico, hace más detallado el análisis del relieve (Pérez et al. 2010).

Estos modelos se dividen en dos grupos: los vectoriales, que son apropiados para representar variables discretas que están limitadas por fronteras lineales claras, y los raster, que se adaptan mejor a la representación espacial de variables continuas, o de naturaleza estadística y probabilística (Pérez et al. 2010).

Sin embargo Pérez et al. (2010), mencionan que el uso de mallas regulares para la representación de un modelo del terreno no es adecuado para realizar análisis hidráulicos de conducciones naturales, debido a que no permiten definir con detalle las áreas con relieve complicado ya que no pueden variar su resolución.

En los modelos digitales de elevación de formato raster aplicados a las simulaciones hidráulicas, para representar cómo los flujos de agua discurren por la superficie terrestre, el cálculo es efectuado a partir de los descensos en el valor de la altitud (Munir y Triviño 2001).

Por lo que las depresiones o hundimientos de una superficie pueden definirse como aquellas celdas que no tienen otras adyacentes a una altitud inferior, es decir que desde ellas no es posible que discurra el agua hacia otro punto. Cuando no aparecen estas celdas marcadas con claridad, se asume que la causa de la concavidad es consecuencia de una estimación baja de los valores de altitud de las celdas que lo conforman (Munir y Triviño 2001).

Sin embargo la existencia de depresiones puede responder a una forma real del terreno, pero más frecuentemente, se debe al proceso de construcción del MDE. Estas características son atribuidas a los procesos de restitución fotogramétrica e indican que a menos que la zona haya sido afectada por procesos de glaciario, las depresiones pueden considerarse errores en los datos. La presencia de depresiones tiene importancia en el caso de los MDE destinados a la simulación de procesos hidrológicos ya que interrumpen las líneas de flujo (Felicísimo 2004).

Es por eso que los modelos hidráulicos utilizan datos vectoriales de red de triángulos irregulares (TIN) dado que están compuestos por una serie de puntos con valores x, y, z conocidos, y un conjunto de arcos que los unen para formar triángulos que permiten una mejor representación del río, al admitir el ajuste de la densidad de la red a la cantidad de variación de los datos. Sin embargo los errores de generación de MDE a partir de los cuales se puede construir el TIN, no se ven disminuidos, al contrario pueden incrementarse en la interpolación de los datos. Por lo que es importante tener información de gran precisión a partir de la cual se pueda construir el TIN (Pérez et al. 2010).

En éste sentido es que se manifiesta que la influencia de la topografía, tanto del cauce como de la llanura de inundación, constituye el factor limitante más importante en la modelación hidráulica y su representación como variable de entrada al modelo determina en gran medida la hidráulica de la crecida modelada y la extensión del área inundada. Debido a esto es que se reconoce que dependiendo de los datos topográficos de los que se parta se presentaran divergencias de elevación en un mismo punto del terreno, asignando a la precisión en la obtención de los datos de altitud, el mayor peso con respecto a la limitación en la aplicación de modelos de simulación hidráulica (Pérez et al. 2010).

### **Uso de HEC-RAS para el cálculo de peligro**

El programa HEC-RAS es un modelo hidrodinámico de simulación hidráulica de libre distribución, creado por el USACE (United States Army Corps of Engineers)

(GITS 2012). Éste software maneja un modelo para estudiar cauces fluviales mediante aproximación unidimensional y régimen gradualmente variado. Permite representar ríos con cambios de régimen, secciones compuestas irregulares, puentes, pasos bajo vías y uniones. Presenta una simplificación del fenómeno de propagación de una avenida, pero permite en ciertos casos predecir niveles de agua, por eso su uso es amplio en ingeniería. Utiliza un esquema de diferencias finitas implícitas de cuatro puntos (Bladé et al. 2009).

Ya que se basa en la ecuación de Saint Venant, suele ser complejo en casos como la formación de discontinuidades. Presenta en régimen variable una aplicación para simulaciones cuasi bidimensionales, mediante el uso de celdas de almacenamiento. Pero tiene limitaciones en el caso de simular grandes tramos de llanuras de inundación que presentan interacciones de flujo por resalto hidráulico (Bladé et al. 2009).

Si bien es un programa de aplicación común, es necesario tener en cuenta las ventajas y desventajas que provienen de su aplicación:

Ventajas: ya que es un modelo 1D permite el cálculo en dominios con escalas muy grandes, de modo que la simulación tiene una gran velocidad de cálculo, lo que le da una capacidad de repetición y corrección de cálculo alta. Facilita la creación, modificación y edición de geometrías, así como la introducción de rugosidad y estructuras transversales como puentes o aliviaderos (GITS 2012).

Desventajas: sólo se pueden modelar ríos y barrancos con pendiente menor de 0.18%, ya que no se tiene en cuenta la componente vertical del peso de la columna de agua. Debido a la condición de dimensión no es capaz de simular avenidas de flujo por llanuras de inundación en grandes extensiones de terreno. Y el resultado viene condicionado por las consideraciones geométricas adoptadas, por lo que puede ser sesgado por el criterio del calculista (GITS 2012).

### **Interfaz HEC-GeoRAS en SIG's**

Es una extensión del sistema HEC, que se inserta en SIG y sirve como interfaz entre software, permitiendo el proceso de grandes cartografías para generar la geometría del cauce (cauce, orillas, línea de flujo, secciones transversales, obstrucciones, flujo inefectivo, etc.) con gran precisión. Con ésta se generan los archivos de importación y exportación en conjunto con HEC-RAS, que son los que sirven de base para el cálculo de distribución de la lámina de agua que determina el comportamiento de la inundación(GITS 2012).

### **4 INUNDACIONES EN EL VALLE DEL GUADIANA**

En el Valle del Guadiana existen zonas susceptibles de inundaciones, provocadas por los desbordamientos de los ríos El Tunal, La Sauceda, Santiago Bayacora, arroyo La Vaca y arroyo Acequia Grande. Los ríos del municipio de Durango son considerados áreas de riesgo debido a que juegan un papel determinante en la ocurrencia de inundaciones (SEMARNAT 2009).

Además éstos ríos están precedidos por presas de almacenamiento, las cuales como parte de la infraestructura hidráulica conforman un potencial peligro para los sistemas existentes en su entorno, debido tanto a la capacidad limitada de almacenamiento ante la presencia de grandes avenidas de agua, como por las fallas estructurales, de diseño u operaciones (SEMARNAT 2009).

En el Valle del Guadiana se han presentado inundaciones de forma histórica en los años de: 1968, 1973, 1978, 1981, 1983, 1984, 1985, 1986, 1990, 1992, 1993, 1996, 2002, 2003, 2004 y 2008. La CONAGUA identifica a través de éstas un área de 34,128.04 ha susceptibles de inundación y en ella 27 puntos críticos y cerca de 30 localidades con riesgos de afectación (SEMARNAT 2009).

## JUSTIFICACIÓN

El Valle del Guadiana se localiza en la porción Centro-Oeste del municipio de Durango, por sus características morfológicas en éste confluyen los ríos: La Saucedá, Arroyo Seco, EL Tunal, Santiago Bayacora y Arroyo la Vaca que se originan en la Sierra Madre Occidental. La dinámica hidrológica de estos ríos que converge en el humedal de Málaga, propicia que se generen llanuras de inundación, para posteriormente generar el Río Durango, cuyo escurrimiento desemboca rumbo al municipio de Nombre de Dios. Ésta zona alberga uno de los mayores núcleos de población del estado, distribuido en una serie de localidades, que sumado a la red de caminos y carreteras, generan una estructura socio ambiental compleja a partir de la dinámica poblacional, y comportamiento hidrológico e hidráulico. Esta complejidad genera factores como la mala o deficiente administración de las aguas, falta de infraestructura para el control de avenidas, la incapacidad de los cauces para conducir el estrechamiento a su salida que impide un drenaje apropiado y la agradación, factores que han derivado en la recurrencia de desastres por inundaciones, a través del tiempo. Metodologías ampliamente distribuidas refieren el estudio de los desastres por inundación mediante el análisis de riesgo, que buscan distribuir cartográficamente la relación entre el peligro y la vulnerabilidad con el fin de determinar las consecuencias sociales, económicas y ambientales de un determinado evento. Ya que si se tiene la distribución espacial de los impactos es sencillo generar políticas de actuación ante la presencia de inundaciones y determinar además factores como costos de afectación a distintas unidades así como la capacidad de resiliencia de los sitios impactados. En este sentido el presente estudio plantea como objetivo principal llevar a cabo un análisis de riesgo de inundación mediante el uso de sistemas de información geográfica y modelación hidrodinámica, con lo que se persigue ubicar la distribución de la inundación e identificar las localidades que se encuentran en muy alta vulnerabilidad, con el fin de presentar resultados por nivel de peligro en mapas digitales.

### III OBJETIVOS

#### **Objetivo General**

Realizar un análisis de inundación en el Valle del Guadiana mediante simulación hidráulica con modelos hidrodinámicos y el uso de tecnología de Sistemas de Información Geográfica.

#### **Objetivos específicos**

1. Evaluar el peligro de inundaciones en el Valle del Guadiana.
2. Estimar la vulnerabilidad social y económica a las inundaciones.
3. Analizar y presentar resultados por nivel de riesgo, congregando el peligro y la vulnerabilidad en mapas digitales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio fue caracterizada con el uso de cartografía de INEGI a una escala de: 1:50,000 y 1:1,000,000, por ser la disponible del área de estudio, mediante el uso de ArcGIS, el método está basado en análisis temático tradicional descrito de forma general en (Sanz et al. 2003). Ésta permite extraer información útil sobre el medio, a través del uso de cartografía para sintetizar las cualidades del terreno. La forma general de la metodología se basa en: la generación de una máscara del polígono que delimitó el área de estudio, con la cual se hicieron cortes de las capas de información de interés, las que posteriormente fueron combinadas dependiendo de las características que se representaron sobre el terreno, con los que se generan mapas temáticos.

#### 1.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio se ubica en México, en el municipio de Durango, que pertenece a la ciudad de Victoria de Durango. La zona de estudio es una extracción de la zona de los Valles, delimitada por una cota de elevación con el fin de conformar el Valle del Guadiana. Ésta delimitación contiene los principales cauces con nacimiento a partir de las presas: Peña del Águila, Guadalupe Victoria y Santiago Bayacora. El mapa de ubicación se puede apreciar en la Figura 2.

#### 1.2 Ubicación geográfica

El Valle del Guadiana se ubica en la parte Centro-Sur del municipio de Durango, entre las coordenadas geográficas, Norte 24°37'51", Sur 23°75'05". Este 104°82'23" y Oeste 104°26'24". La superficie (224,460.52 ha) representa aproximadamente el 1.60% de la superficie estatal. Limita al Noreste con el municipio de Canatlán y al Noroeste con la parte Centro-Norte del municipio de Durango, al Sureste con el municipio de Nombre de Dios. En la Figura 3 se puede observar el área de estudio.

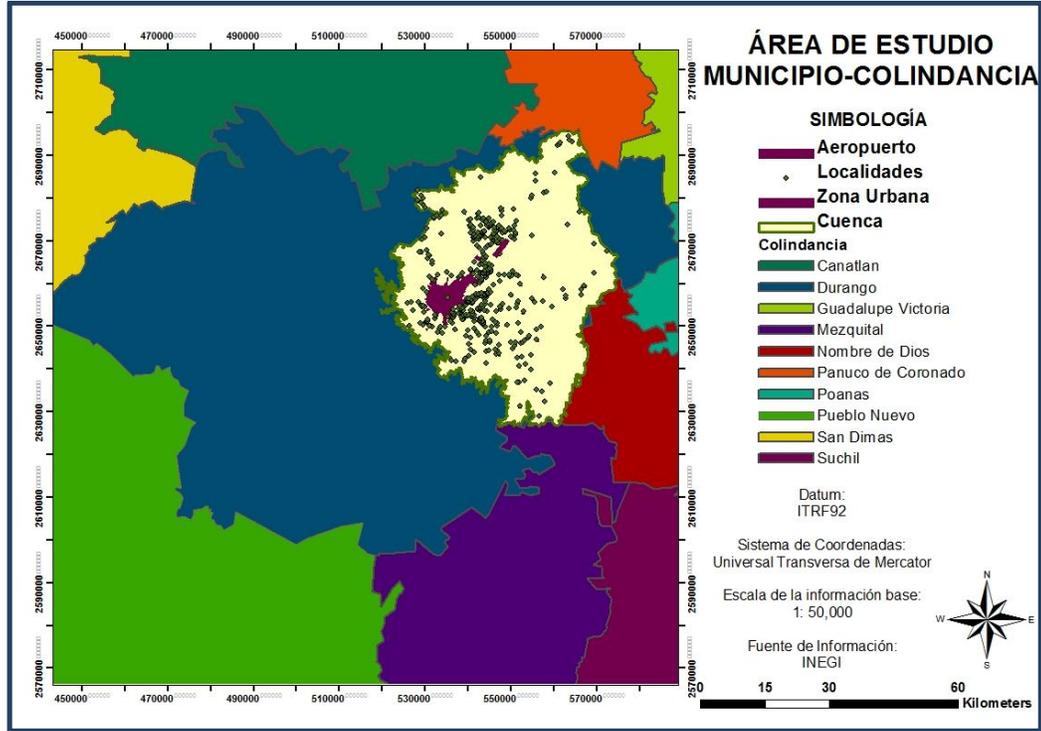


Figura 2

Ubicación del Valle del Guadiana en el municipio de Durango, con municipios de colindancia.

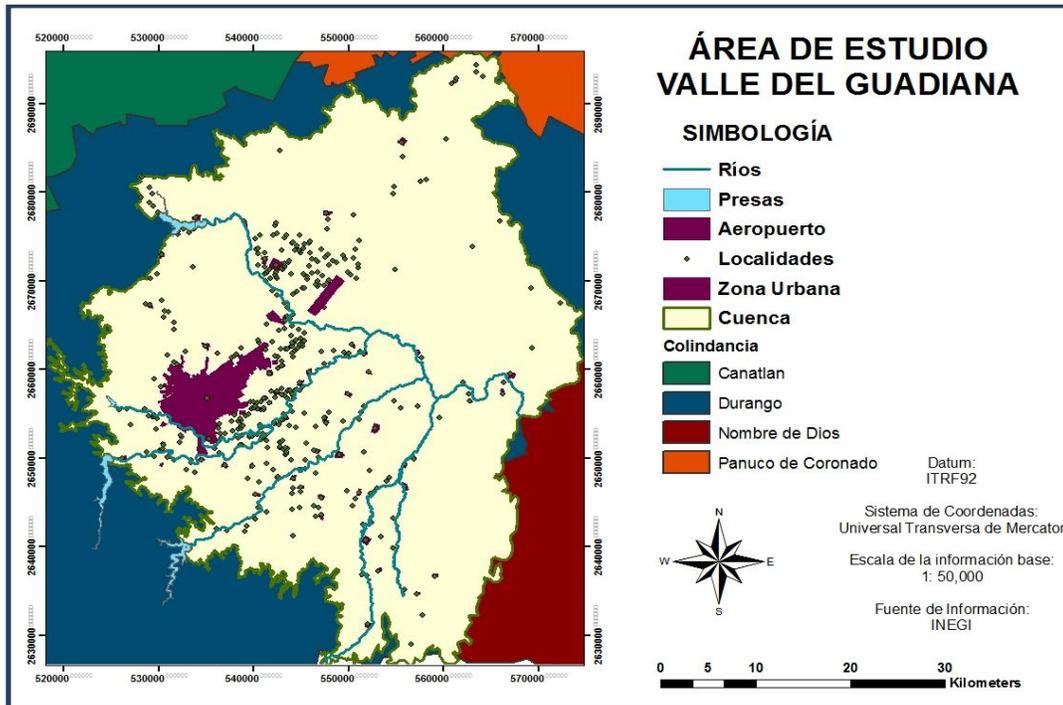


Figura 3

Área de estudio con atributos principales.

Dentro de esta zona se localiza la cabecera municipal y capital del Estado, lo que hace que su dinámica sociodemográfica tome importancia debido a que en ella se concentra la mayor parte de la infraestructura social y urbana del municipio. Según el II Censo de Población y Vivienda 2005 (se utilizó éste debido a que contiene un mayor número de atributos que el Censo de Población y Vivienda 2010), las localidades y el área urbana del Valle cuentan con una población de 514,711 habitantes.

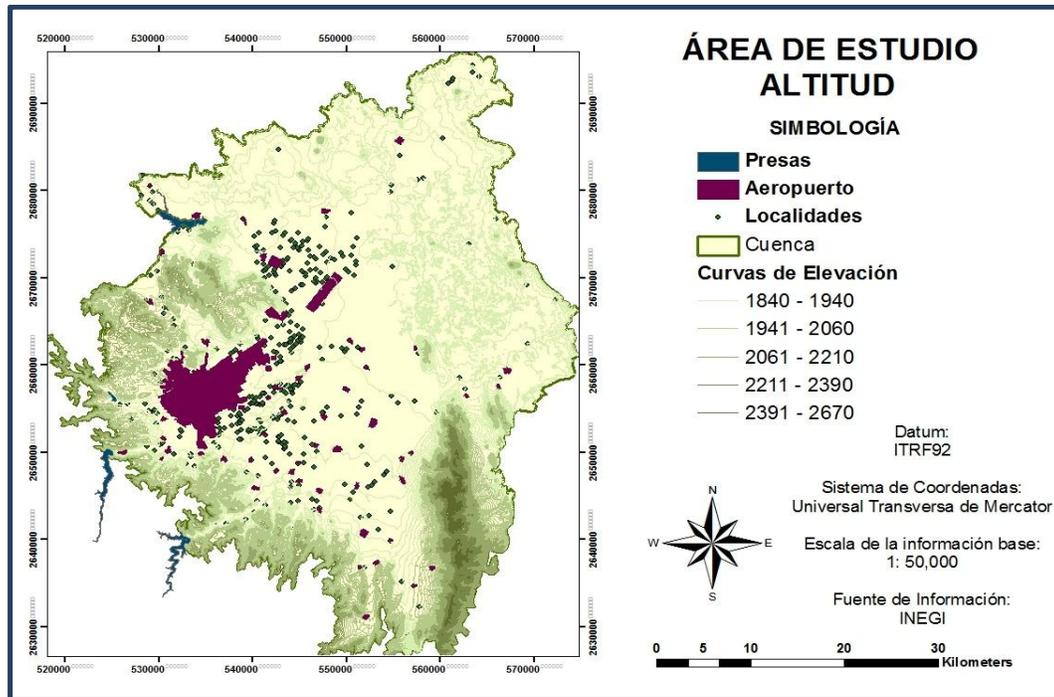
## **1.2 Topografía**

### **Altitud**

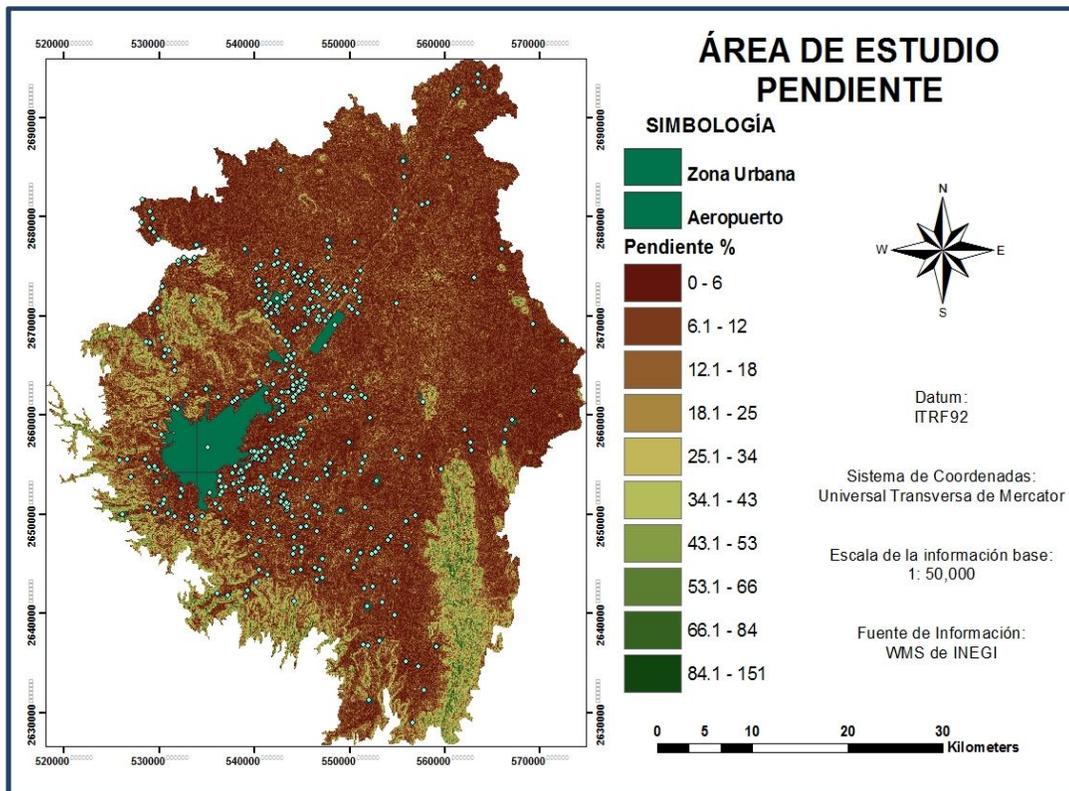
El Valle del Guadiana tiene elevaciones que van desde los 1840 hasta los 2670 msnm. Las mayores elevaciones delimitan una franja al Occidente, en la parte Norte-Este se distribuye otra franja de elevaciones de menor altitud, que condicionan a la parte central a presentar un zona de valles. Es ésta zona de Valles la que cubre la mayor parte del terreno condicionando al sitio a presentar características de forma y estructura uniformes, del tipo de las Llanuras del Norte. (INAFED 2005). En la Figura 4 se puede observar el comportamiento del continuo de curvas de elevación sobre la zona de estudio.

### **Pendiente**

Según se puede observar en la Figura 5 la pendiente de las zonas altas alcanza un 150%, pero ésta se presenta en las zonas de sierra y pie de monte presentes en la franja Occidente de El Valle. Sin embargo en el caso de la mayor parte del terreno se presentan pendientes menores al 10%. Lo que influencia el modelado del relieve, que se puede esperar delimita el comportamiento de la red hidrológica y el clima del lugar (INAFED 2005).



**Figura 4** Distribución de elevaciones representada por curvas de nivel.

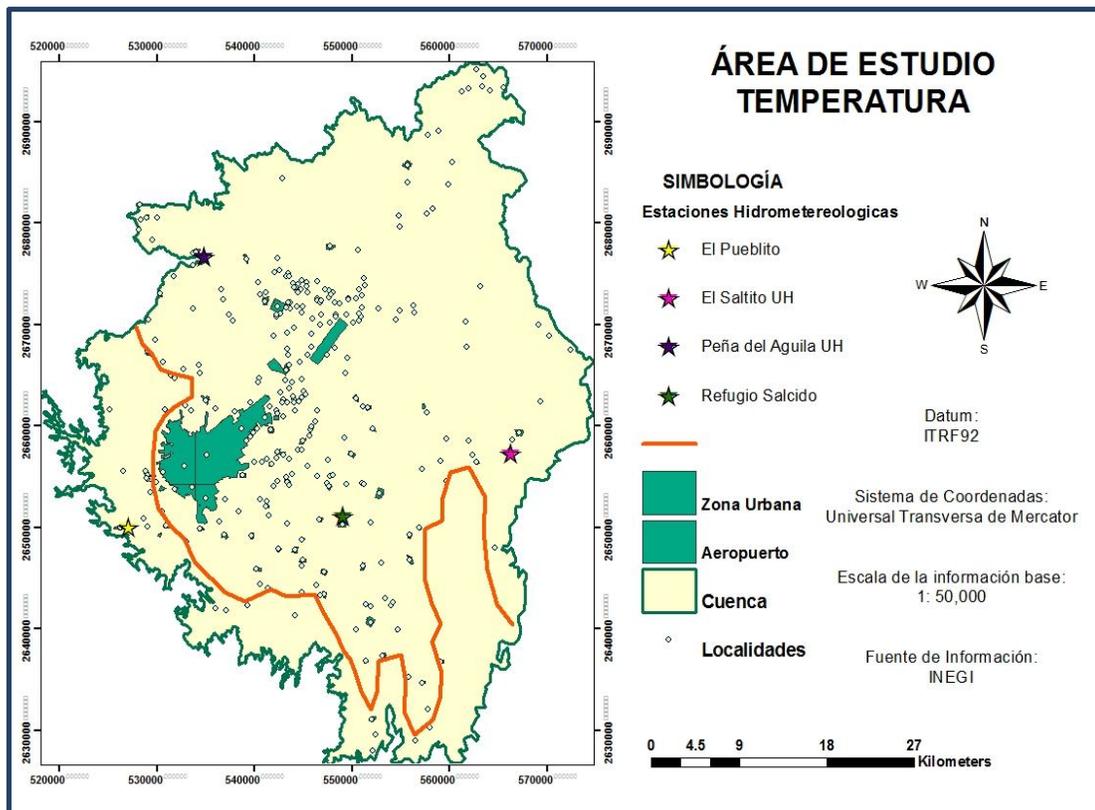


**Figura 5** Distribución de pendiente del terreno en porcentaje.

### 1.3 Clima

#### Temperatura

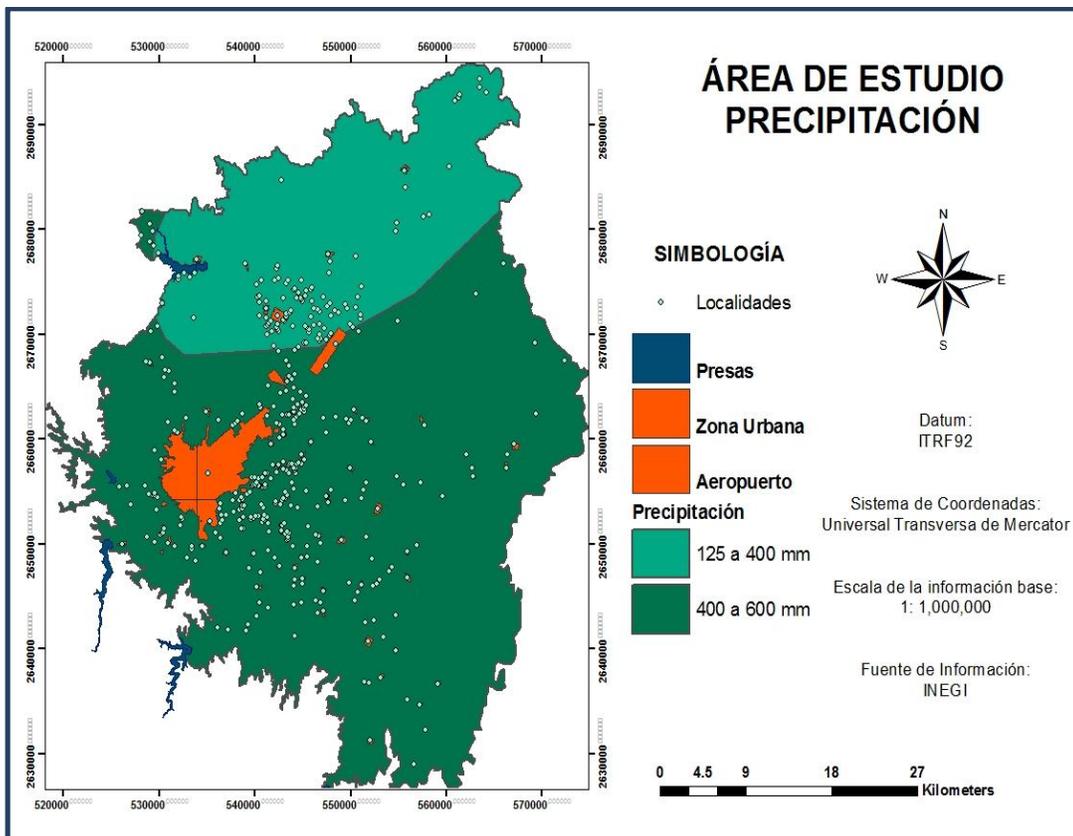
En este caso el clima se ve influenciando de forma marcada también por la presencia de los trazos de sierra de la franja Occidente, que condicionan a El Valle del Guadiana a presentar una temperatura media anual uniforme de 16° a partir de ésta. Por lo que se puede suponer que el comportamiento climático del área de estudio se ve directamente influenciado por la orografía uniforme a partir de los pies de monte (INAFED 2005). Debido a esto se puede considerar que las tres estaciones meteorológicas Peña del Águila, Refugio Salcido y El Saltito en función de su ubicación tienen las características idóneas para registrar el comportamiento general de la zona de estudio. La Figura 6 presenta la distribución de la temperatura media anual y las estaciones meteorológicas presentes en el Valle del Guadiana.



**Figura 6** Isotherma de temperatura media anual (16°) en el Valle del Guadiana.

### Precipitación

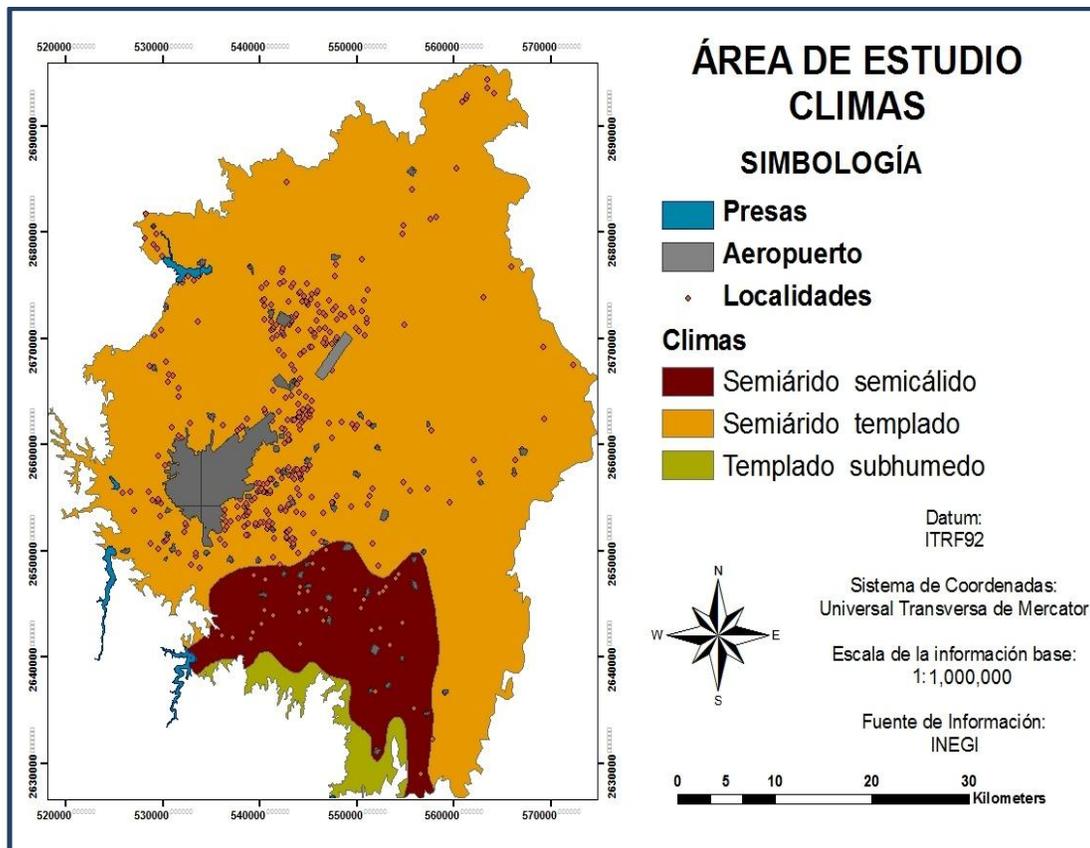
La Sierra Madre Occidental afecta a El Valle del Guadiana en la cantidad de precipitación que recibe, ya que se antepone entre este y el Océano Pacífico convirtiéndose en un obstáculo para las masas de aire húmedas que proceden de éste. Esto genera que sólo un bajo porcentaje de humedad logre rebasar la barrera y pueda llegar a precipitar gradualmente a medida que las masas de aire húmedo transitan por el Municipio, originando que las lluvias se presentan entre los meses de Mayo y Octubre, propiciando que conforme se avanza en el terreno sobre los valles se vaya disminuyendo la precipitación, (SEMARNAT 2009). Es por esto que en la Figura 7 observamos como en la mayor parte de la zona de estudio se presenta una media de entre 400 y 600 mm, sin embargo hacia la parte Norte se presentan precipitaciones de entre 125 y 400 mm.



**Figura7** Distribución de la precipitación media anual

## Tipo de clima

En la zona de estudio se presentan tres climas (clasificación de Koppen, modificado por García) Semiárido semicálido, Semiárido templado, Templado subhúmedo, que se distribuyen en función de la altitud. En la zona Sur-Oeste debido a la sierra el clima es del tipo Templado subhúmedo, al cual le sigue una franja de transición entre la sierra y los valles que condiciona la presencia de un clima Semiárido semicálido. Para finalmente como se observa en la Figura 8 en la mayor parte de la zona se presente clima Semiárido templado, con tendencia a comportamiento extremo (INAFED 2009).

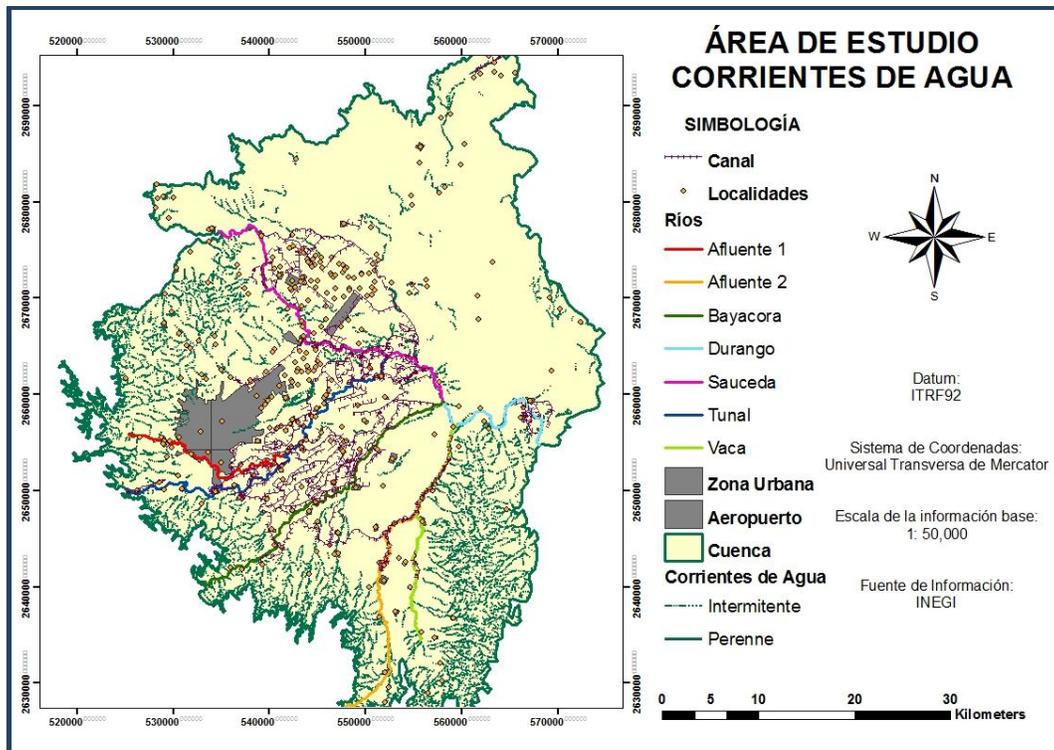
**Figura 8**

Distribución de climas en el Valle del Guadiana

## 1.4 Hidrografía

### Corrientes de agua

El agua superficial pertenece a la dinámica de la cuenca San Pedro. La hidrografía está representada por cinco corrientes principales: la Saucedá, el Tunal que tiene una entrada por el Arroyo Seco, el Santiago Bayacora, el Arroyo la Vaca, que tiene también una aportación del Arroyo la Estancia y finalmente el Río Durango, que es la confluencia de todos los anteriores (SEMARNAT 2009). Sin embargo ya que los escurrimientos se originan en la Sierra Madre Occidental y debido a que el Valle del Guadiana presenta en su conformación grandes extensiones de baja pendiente, es que se presentan como se puede apreciar en la Figura 9, una serie de escurrimientos intermitentes que se vuelven tributarios o aliviaderos de los principales ríos, o que en algunos casos han sido derivados hacia canales para su uso en riego. Mostrando con esto precedentes sobre el control de la distribución de los flujos en función de disminuir el impacto del curso de éstos sobre las localidades que se distribuyen a las márgenes de los ríos.

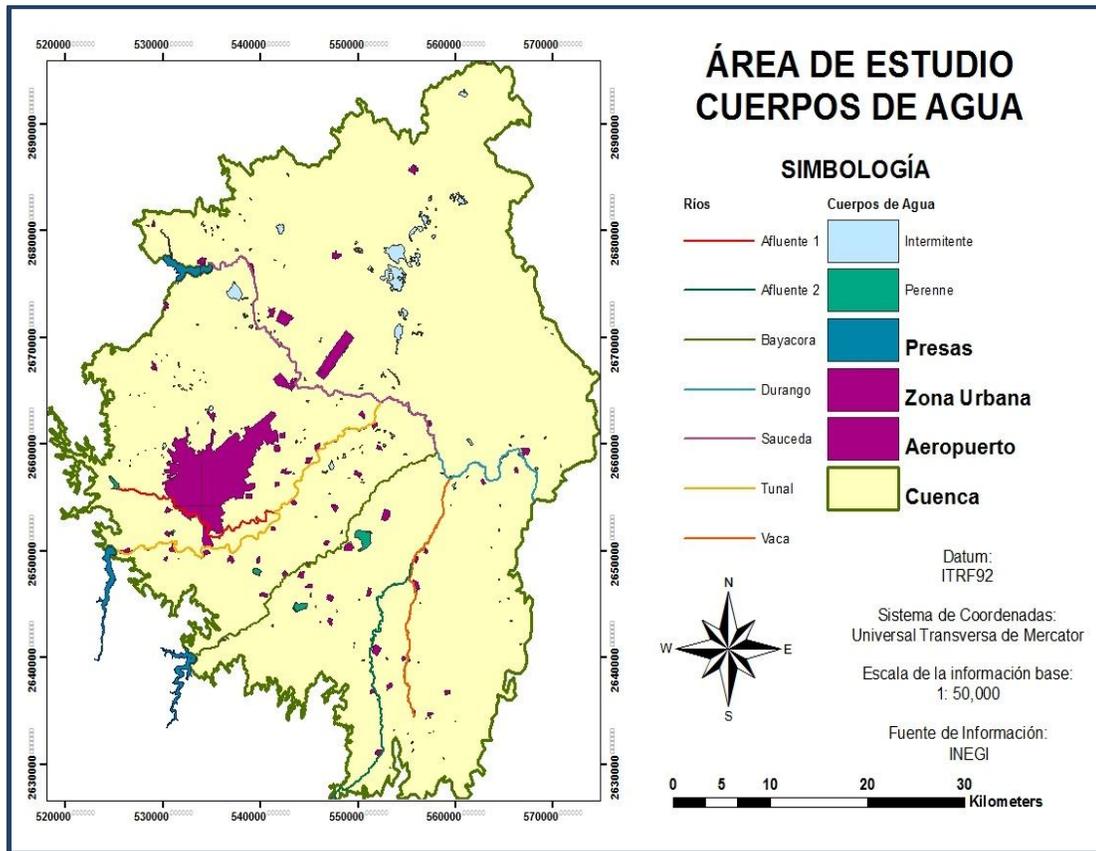


**Figura 9**

Hidrografía de datos topográficos vectoriales.

### Cuerpos de agua

Las aguas superficiales sujetas a aprovechamiento son las provenientes de la Cuenca San Pedro, las cuales están destinadas principalmente a la actividad agrícola a través de los módulos de riego del Distrito 052, que abarca a las presas Peña del Águila, Santiago Bayacora y Guadalupe Victoria (SEMARNAT 2009). La zona por su condición de baja pendiente presenta también una serie de cuerpos de agua de menor tamaño (presas y represas), los cuales son destinados también para riego, además para derivación de los ríos principales hacia los canales, o simplemente para contener el agua para tener disponibilidad de la misma en temporada de sequía. En la Figura 10 se presenta la distribución de los cuerpos de agua de El Valle del Guadiana.



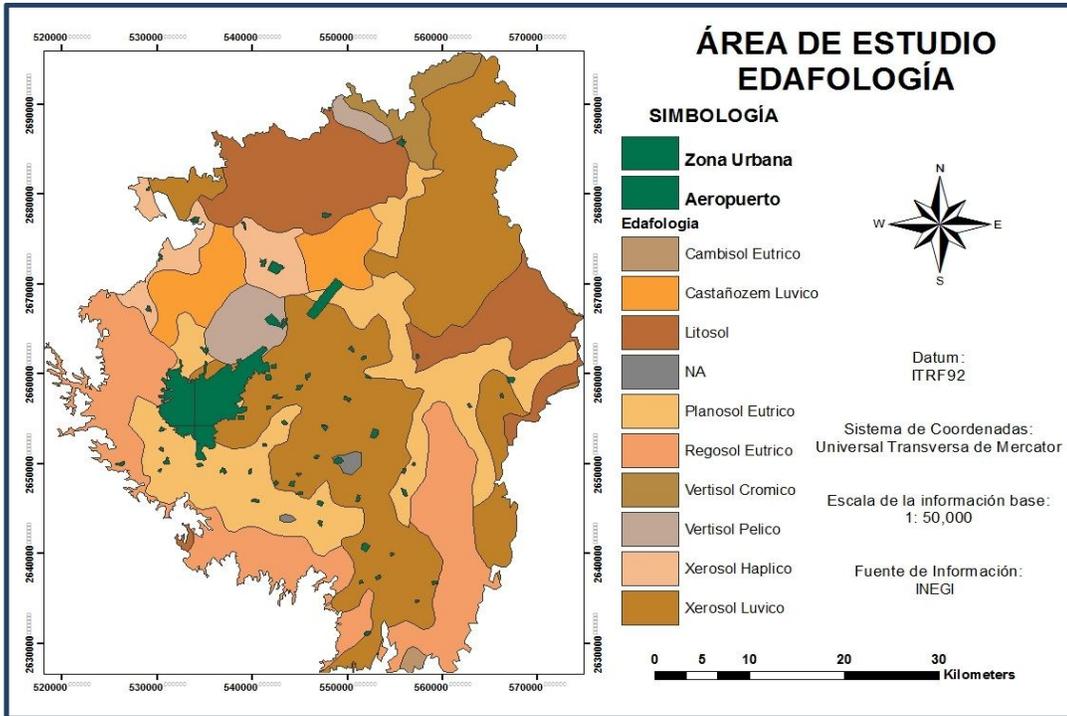
**Figura 10** Distribución de cuerpos de agua en el Valle del Guadiana.

#### **1.4 Suelos**

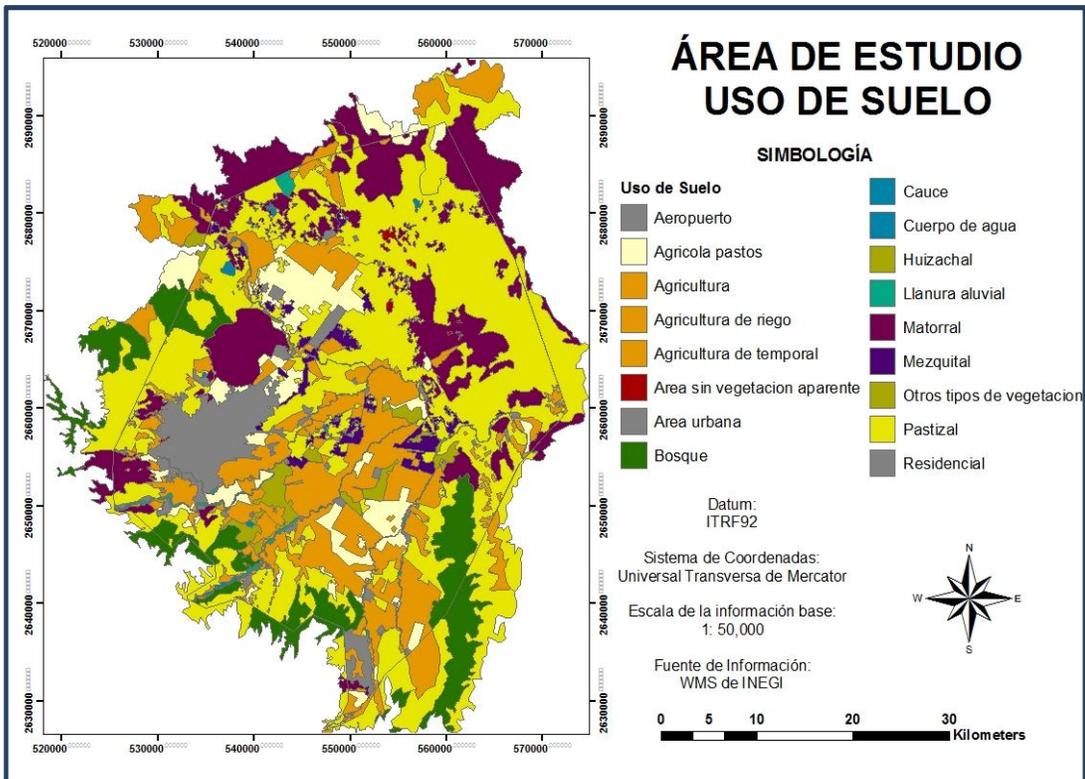
La mayor parte de la zona está cubierta por tres tipos de suelo: castañozem, planosol y regosol. Donde el castañozem se presenta como un suelo con acumulación de calcio, que tiene alta productividad agrícola aun que es susceptible a salinizarse o saturarse de sodio (INEGI 2004). El regosol es poco desarrollado, constituido por material suelto semejante a la roca (INEGI 2004), éste se distribuye en la franja Occidente, debido a que no retiene humedad contribuye a los escurrimientos de las corrientes de agua, generando llanuras de inundación en las zonas de baja pendiente. Finalmente el planosol que está constituido por depósitos aluviales (gravas y arenas) o coluviales (material arrastrado de las partes altas de la cuenca) arcillosos, se asocia a terrenos llanos estacional o periódicamente inundados, de regiones semiáridas o subhúmedas (INEGI 2004). Estos tipos de suelo tienen una secuencia de formación que se relaciona directamente con la topografía, los climas y la hidrografía presentes en la zona. En la Figura 11 se puede observar la distribución de los suelos en el Valle del Guadiana.

#### **1.5 Usos de suelo**

Aparecen a los márgenes de la franja Occidental algunos manchones de bosque, además de zonas con presencia de matorral; ya que estos tipos de vegetación permiten la captación del agua, contribuyen a la constitución del comportamiento hidrológico a través de El Valle del Guadiana. Son las características topográficas las que determinan que una porción representativa del valle este cubierta de tierras agrícolas (de temporal y riego), que se distribuyen en la franja Occidental, estas zonas son aprovechadas debido a su riqueza de nutrientes debidas a los depósitos aluviales, que quedan después de la temporada de lluvias. De las tierras agrícolas presentes existen parcelas abandonadas que se han cubierto de pastos por lo que algunas de éstas son utilizadas para pastizales extensivos, generando que sean los estos los de mayor distribución en la zona. En la Figura 12, se muestran los usos de suelo mencionados con su distribución por entidad.



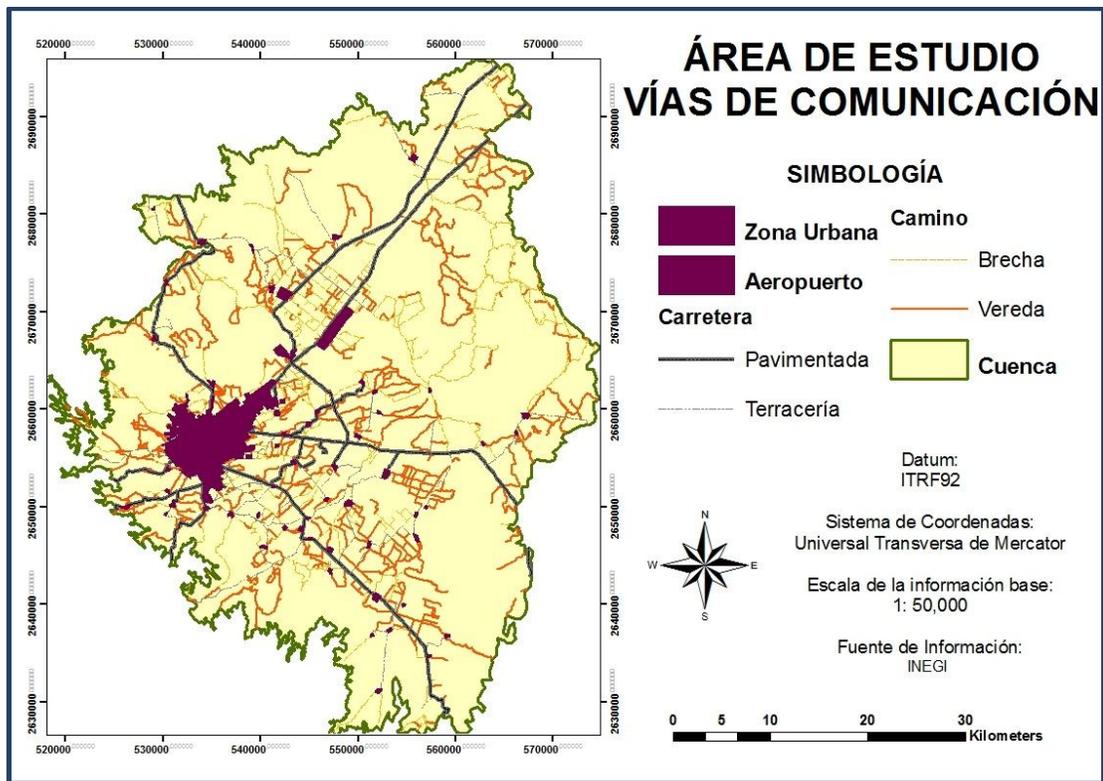
**Figura 11** Suelos presentes en la zona de estudio



**Figura 12** Uso de suelo en el Valle del Guadiana.

### 1.6 Vías de comunicación

Dentro de la infraestructura carretera, la zona se ve atravesada por tres carreteras federales la 23 (Guanaceví-Mezquital), la 40 (Interoceánica libre), la de cuota de dos cuerpos (Gómez Palacio-Durango-Sinaloa); y, la 45 (Panamericana) (SEMARNAT 2009). Sin embargo también existen carreteras pavimentadas, brechas y caminos de terracería que se han creado para intercomunicar a las localidades de la zona. Creando un complejo intrincado de vías de comunicación. En la Figura 13 se aprecia la distribución de vías de comunicación en el Valle del Guadiana.



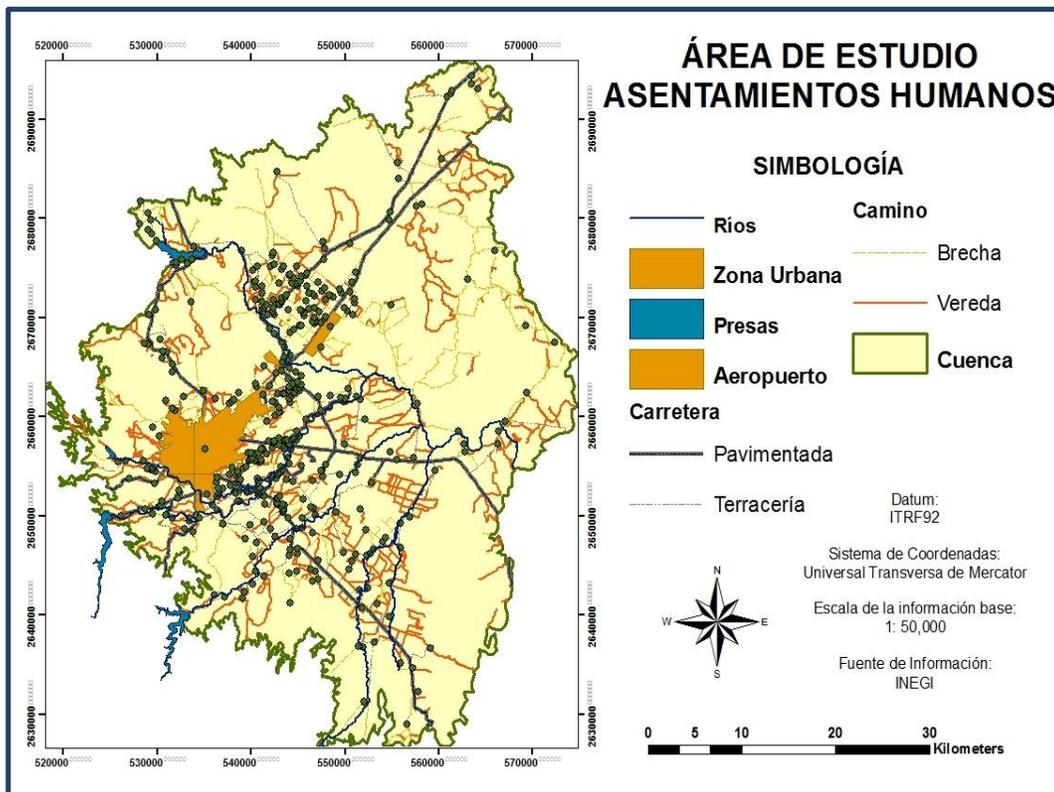
**Imagen 13** Vías de comunicación en la zona de estudio

### 1.7 Asentamientos humanos y aspectos socioeconómicos

Desde la fundación de la ciudad de Durango en 1563 y su posterior establecimiento ha tenido periodos con amplio y bajo crecimiento en su mancha urbana. Sin embargo las tendencias de crecimiento más fuertes han ocurrido hacia el oriente, y sur, marcadamente siguiendo el curso de los ríos o la cercanía

a las carreteras (SEMARNAT 2009). Lo que genera una estructura compleja en el comportamiento poblacional e hidráulico en la zona de estudio.

En la zona las actividades económicas son diversas, sin embargo predominan los oficios del sector primario, con agricultura y ganadería en su mayoría, en menor proporción pesca y minería, sin embargo hacia los centros de población además de ejercerse el comercio, se tiene también presencia de industria de construcción y manufactura (INAFED 2005). Se sabe que las actividades del sector primario por el tipo de ingresos que generan no le permiten a la población tener amplio poder adquisitivo por lo que se tiende a presentar carencias en las necesidades básicas de la población lo que la hace vulnerable ante fenómenos perturbadores (CEPAL 2003). En la Figura 14 se puede observar la distribución de los centros de población.



**Figura 14** Centros de población representados por áreas y puntos.

## **2 EVALUACIÓN DE LOS DATOS DE ELEVACIÓN DEL TERRENO**

La evaluación de los datos del terreno se hizo en base a la metodología de comparación de datos topográficos propuesta por Pérez et al.(2010), en conjunto con la técnica de muestreo de errores extraída de SIGMUR (2005). Ésta evaluación se realiza mediante el uso de sistemas de Información Geográfica y Google Earth (Elegido este como estimador debido a que para representar a México se usa información de INEGI). Con el fin de determinar las características de los conjuntos de datos disponibles y seleccionar el que mejor se ajuste a la realidad del terreno, ya que éste sustenta el cálculo del modelo hidrodinámico utilizado para la simulación hidráulica, lo que permite desarrollar el análisis de peligro de inundación.

### **2.1 Datos topográficos disponibles**

Se partió de cuatro conjuntos de datos disponibles:

- ❖ TIN creado a partir de curvas de nivel a escala 1:50,000 de INEGI.
- ❖ TIN creado a partir de una extracción de contorno 1:50,000 a partir del MDE de INEGI, en conjunto con datos tomados en campo de elevación a 1 y 0.25 metros, extraídos de archivos AUTOCAD del Proyecto Ejecutivo para la Construcción del Drenaje Pluvial del Valle del Guadiana.
- ❖ TIN creado a partir del MDE escala 1:50,000 creado por el INEGI.
- ❖ TIN creado a partir del MDE Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) a escala 1:50,000 generado por el Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan (METI) en conjunto con la National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Para representar en forma gráfica el comportamiento de los conjuntos de datos, se utilizó el software ArcGIS, seleccionando dos secciones transversales de la parte baja del Río Durango, las cuales se presentan de forma gráfica, con el fin de tener una aproximación de la influencia de la topografía del terreno en la generación de la geometría de cauces.

## 2.2 Cálculo de muestreo de errores

El análisis de los datos de topografía del terreno se realizó por medio de un ajuste a la metodología propuesta en el SIGMUR (2005). Ésta consiste en generar una serie de puntos de control (46 debido a que la zona de estudio es de baja pendiente y no tiene mucha diferencia de elevaciones) de cada uno de los conjuntos de datos y de un estimador, que en este caso son las imágenes de Google Earth, seleccionadas por que en éste para la zona de México se utiliza información de INEGI, que son la fuente de datos disponible de forma libre, que más se acerca a la realidad del terreno, sin embargo se debe evitar colocar los puntos en los cauces de los ríos debido a que en éstos la elevación en Google Earth aparece a partir del espejo de agua, con lo cual se incrementaría el error en los conjuntos de datos analizados.

A partir de los puntos de monitoreo se realizó el cálculo la muestra de error mediante la obtención del error cuadrático medio, que se define mediante la ecuación:

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_{x,y}^2}{N}}$$

Donde N es el tamaño de la muestra de errores y  $\epsilon_{x,y} = \hat{Z}_{x,y} - Z_{x,y}$ .

Las tablas a partir de las que se calculó el error cuadrático medio se encuentran en el Anexo I. Al obtener el error cuadrático medio para cada conjunto de datos se puede seleccionar a partir de cual de éstos se realizará la simulación hidráulica, buscando aplicar el que se ajuste más a la realidad de terreno, tomando en cuenta como menciona Pérez (2010) que la precisión es la base de la modelación hidrodinámica por medio de simulación hidráulica y requiere datos no menores a una escala 1:10,000.

### 3 EVALUACIÓN DEL PELIGRO

El Peligro se evaluó mediante una metodología hidrológico-hidráulica, por medio de una modelación hidrodinámica con en 1D utilizando HEC-RAS, que es un software creado por la Armada de los Estados Unidos, que se encuentra de libre distribución y uso. Se realizó un análisis de peligro con métodos de simulación hidráulica, a partir de hidrogramas previamente construidos, utilizando periodos de retorno de 5, 20 y 100 años, calculados a partir de una tormenta máxima de diseño, que ocurrió en 1968. Estos datos se han extraído del Proyecto Ejecutivo para la Construcción del Drenaje Pluvial del Valle del Guadiana, realizado por CONAGUA (2006).

#### 3.1 Cálculo de peligro de inundación

Según Ahmed (2008) ya que el peligro está en función de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno y de su intensidad, un análisis de una amenaza por inundación (en función del daño potencial) puede resumirse en la ecuación 5 (Ahmed 2008):

$$\text{Amenaza} = f(\text{intensidad} * \text{probabilidad de ocurrencia}) \quad [5]$$

Dónde:

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

Probabilidad = f (precipitaciones, eventos desencadenantes)

A partir de esta ecuación se pudo identificar una metodología que se basa en la aplicación de un modelo hidrodinámico de simulación hidráulica, que permitió ubicar la distribución de la lámina de agua. Calculándola en función del flujo de gastos extraordinarios obtenidos a partir de una tormenta de diseño de 1968, con diferentes periodos de retorno (5, 20 y 100 años), añadiendo con esta última variable la probabilidad de ocurrencia de la inundación. Logrando con su uso congregar las características que representen en peligro en la zona de estudio.

## **Metodología de evaluación en HEC-RAS**

La metodología y terminología utilizadas se obtuvieron de una adaptación del documento realizado por Nanía y Molero (2007). Las fases de trabajo se dividen en pre proceso, proceso y post proceso.

Pre proceso, mediante la extensión Hec-Geo RAS en ArcMap, con ayuda de las ortofotos de visualización virtual del sistema WMS de INEGI, el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas, la topografía, las corrientes, canales y cuerpos de agua a escala 1:50,000, se generó lo siguiente:

- ❖ Creación del modelo del terreno en formato TIN.
- ❖ Generación de las líneas de cauce (stream centerline) a escala 1:20,000, mediante el uso de las ortofotos (1:20,000), a las que se les asigna el nombre, la topología (que marca las relaciones entre tramos definiendo los que se encuentran aguas arriba y aguas abajo) y a partir de las cuales se creó una capa de cauce 3D.
- ❖ Construcción de las orillas (bank lines) a escala 1:20,000, las cuales ubican la delimitación a la derecha y la izquierda del cauce.
- ❖ Delineación de las líneas de flujo (flow path centerlines) a escala 1:20,000, que son las que permiten la distribución de la lámina de agua sobre el terreno, en la construcción de éstas se debe asignar su correspondencia a la derecha a la izquierda o a la línea de rasante (cauce).
- ❖ Creación de las secciones transversales (xs cut lines) a escala 1:20,000, a partir de las cuales se realiza el cálculo de la geometría del cauce y del terreno, y se generan las secciones 3D.
- ❖ Generación de las zonas de obstrucción (blocked obstructions) a escala 1:20,000, éstas se utilizan para identificar las zonas por las que el flujo no puede atravesar.
- ❖ Elaboración del mapa de usos de suelo (land use) a escala 1:50000 en base a las ortofotos del sistema WMS de INEGI y un mapa escaneado de la capa g13d82 de uso de suelo del INEGI; al cual se le asignan valores por polígono para incluir el coeficiente de rugosidad de Manning, que se

requiere para el cálculo de la velocidad de distribución de la lámina de agua.

Con estas capas se generó una base de datos de geometría del cauce de exportación a HEC-RAS, a partir de la cual se llevó a cabo el proceso de simulación.

Proceso, en HEC-RAS se creó un nuevo proyecto, se importaron los datos geométricos (de la base de datos generada en ArcMap), se agregaron los datos de caudales y condiciones de contorno (tipo de flujo, periodos de retorno y flujo en  $m^3/s$ ), se realizó el cálculo de simulación y se generó un archivo de exportación a ArcMap.

Post Proceso, presentación del resultado de HEC-RAS, a partir de las líneas de flujo de la geometría del cauce generada, en sobre posición sobre la ortofoto en ArcGIS, conjuntamente con los atributos de la zona.

### **3.2 Verificación de campo de los ríos de estudio**

Se realizaron dos salidas a campo en el mes de Agosto del 2012, en temporada de lluvias, para hacer una revisión de los ríos de estudio. Se buscó a partir de ésta el comprobar en el terreno, la asignación de las entradas de los flujos que se asignaron mediante ortofotos. Además de comprobar lo identificado sobre las características de la zona para realizar ajustes al coeficiente de Manning. Las imágenes de las fotografías tomadas se encuentran en el Anexo II.

## **4 ESTIMACIÓN DE VULNERABILIDAD**

La estimación de vulnerabilidad se hizo en base a los datos del conteo de población y vivienda del 2005 (debido a que éste cuenta con un número mayor de atributos que el Censo del 2010), realizado por INEGI. Se utilizaron también los datos de grado de marginalidad de la CONAPO.

#### 4.1 Cálculo de Vulnerabilidad

La metodología de cálculo de vulnerabilidad se aplicó a partir de una modificación de la propuesta por Salgado Montoya Ramón Antonio en 2005, con el concepto de vulnerabilidad global, a partir del cálculo de la vulnerabilidad social y la vulnerabilidad económica.

#### Selección de indicadores

Fue necesario hacer una selección de indicadores representativos de la cuenca, para cada tipo de amenaza a tratar, en la Tabla 4 se muestran las variables y sus indicadores.

**Tabla 4:** Tipo de vulnerabilidad (Modificado a partir de Salgado, 2005).

TIPO	VARIABLE DE RESPUESTA	INDICADOR
Social	Distribución de la población por edades	Menores de 15 años
		Entre 15 y 59 años
		Mayores de 59 años
	Servicios de salud	No. de habitantes con seguridad
	Distribución de la población	No. de habitantes por localidad
Económica	Marginación	% de marginación por localidad
	Acceso a servicios públicos	No. de habitantes con

#### Estandarización y Valorización

En una segunda etapa se estandarizaron y valoraron los indicadores, con motivo de lograr uniformidad en el análisis. Existen diversos métodos estadísticos de clasificación de grupos de valores para su representación gráfica o cartográfica. Para el caso se utilizara el método de quiebres naturales, ya que tiene la capacidad de reconocer semejanzas en los intervalos y diferencias entre ellos (DANE 2005). Este es un concepto creado por Jenks en 1967, y trata sobre minimizar la suma de la varianza dentro de cada una de las clases utilizando las fallas o depresiones en la distribución de la frecuencia para establecer las

fronteras entre los estratos o intervalos (DANE 2005). En la tabla 5 se muestra el valor otorgado a cada vulnerabilidad. Con una ponderación lineal con valores de 0-4. En el Anexo 2, se muestra además las tablas de ponderación para cada una de las variables propuestas.

**Estimación de vulnerabilidad**

Para obtener el grado de vulnerabilidad, en base al tipo de vulnerabilidad se sumaron los valores de los índices de cada variable. El valor resultante se dividió entre el número total de índices. El índice promedio obtenido se dividió entre el valor máximo posible de índices y se multiplicó por cien para obtener un porcentaje de vulnerabilidad. Para determinar la vulnerabilidad final el resultado obtenido se debe comparó con los valores mostrados en la tabla 6, que tiene la caracterización de los valores porcentuales.

**Tabla 5:** Valoración de indicadores (Salgado, 2005).

TIPO DE VULNERABILIDAD	CALIFICACIÓN
Muy alta	4
Alta	3
Media	2
Baja	1
Muy baja	0

**Tabla 6:** Caracterización de vulnerabilidad (Salgado, 2005).

VULNERABILIDAD (%)	CARACTERIZACIÓN
0-19.9	Muy baja
20-39.9	Baja
40-59.9	Media
60-79.9	Alta
80-100	Muy alta

## 5 ANÁLISIS DE RIESGO

La metodología de riesgo aplicada es un ajuste a la propuesta del COSUDE del 2012, donde el riesgo se conceptualiza como la relación de las amenazas y las vulnerabilidades con el fin de evaluar las consecuencias sociales, económicas. A través de esto se puede definir la ecuación 6:

$$R_i = p(m_i) * V(m_i) \quad [6]$$

Dónde:

R= riesgo

i = evento posible

m<sub>i</sub> = magnitud del evento

p = peligro

V = vulnerabilidad

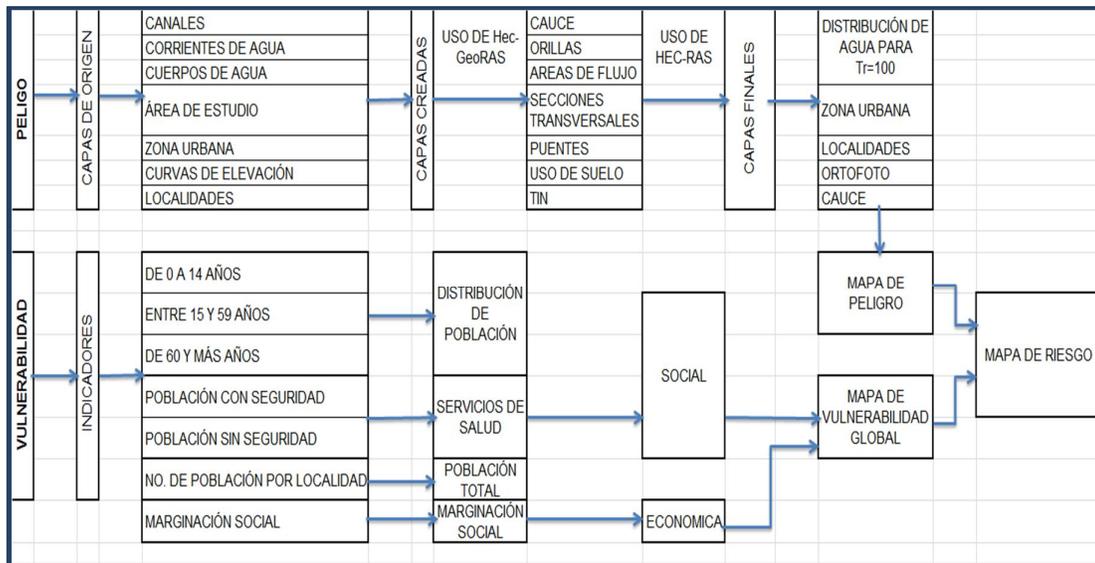
Ya que el cálculo de peligro se realizó mediante modelación, en este punto se plantea la sobre posición de mapas y determinar en función de los periodos de retorno y la distribución de los porcentajes de vulnerabilidad, en que zonas se presenta el mayor riesgo de inundación (COSUDE 2002).

### 5.1 Confluencia de Amenaza y Vulnerabilidades

Ahmed (2008), propone un rango de colores para otorgar significado a los niveles de riesgo, o de peligro de inundación, en función de la pérdida y daños previsible y las implicaciones para el ordenamiento del territorio. En la Figura 15 se presenta ésta propuesta de colores. En el caso de la zona de estudio para crear la confluencia de Amenaza y Vulnerabilidades se generó una sobre posición de mapas, cuyo desarrollo se puede observar de forma conceptual en la Figura 16.

MAPAS MULTIAMEN	MAPAS DE INUNDACION	PERDIDAS EN CASO DE USO DE ASENTAMIENTOS	IMPLICACIONES DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL
<b>ROJO</b>	<b>AMENAZA ALTA (Azul Oscuro)</b>	Las personas están en peligro dentro y fuera de los edificios. Alto Peligro de destrucción de edificios. Eventos de intensidad relativa débil, pero de fuerte intensidad.	Zona de prohibición, no apta para la instalación, expansión o densificación de asentamientos humanos. Áreas ya edificadas deben ser reubicadas a largo plazo, o protegidas, incluir sistemas de alerta y evacuación.
<b>NARANJA</b>	<b>AMENAZA MEDIA (Azul)</b>	Las personas están en peligro fuera de los edificios, pero dentro es poco el peligro. Se puede contar con daños en los edificios, pero sin destrucción repentina, siempre y cuando las condiciones de construcción se adapten a las condiciones del lugar.	Zonas de reglamentación, se puede permitir expansión y densificación siempre que existan reglas de ocupación de suelo y normas de construcción. Las construcciones existentes deberán ser reforzadas o de lo contrario desalojadas.
<b>AMARILLO</b>	<b>AMENAZA BAJA (Celeste)</b>	El peligro para las personas es débil o inexistente. Los edificios pueden sufrir daños leves, pero puede haber fuertes daños al interior de los mismos.	Zona de sensibilización, apta para asentamientos humanos, debe haber sensibilización de la población ante eventos poco probables para que se conozcan las reglas de comportamiento ante éstas.
<b>RAYAS AMARILLAS</b>	<b>AMENAZA RESIDUAL (Rayas Azules)</b>	Existen amenazas que tienen una probabilidad de ocurrencia débil y que se pueden manifestar con una fuerte intensidad.	Zona de sensibilización, apta para asentamientos humanos, en la cual los usuarios deben ser informados sobre eventos muy poco probables para que conozcan los procedimientos de actuación.
<b>VERDE CLARO</b>	<b>NINGUNA AMENAZA CONOCIDA</b>	Despreciable según el estado actual de conocimientos.	
<b>ZONA DE SUCEPTIBILIDAD</b>		Zonas en donde los análisis realizados son muy indicativos, por lo que no se pueden realizar estimaciones de frecuencias o alturas de agua o estos son muy imprecisos. Como zonas de afectación por eventos extremos.	

**Figura 15** Significado de los mapas de riesgo y amenaza de inundación, ajuste a partir de Ahmed del 2008.

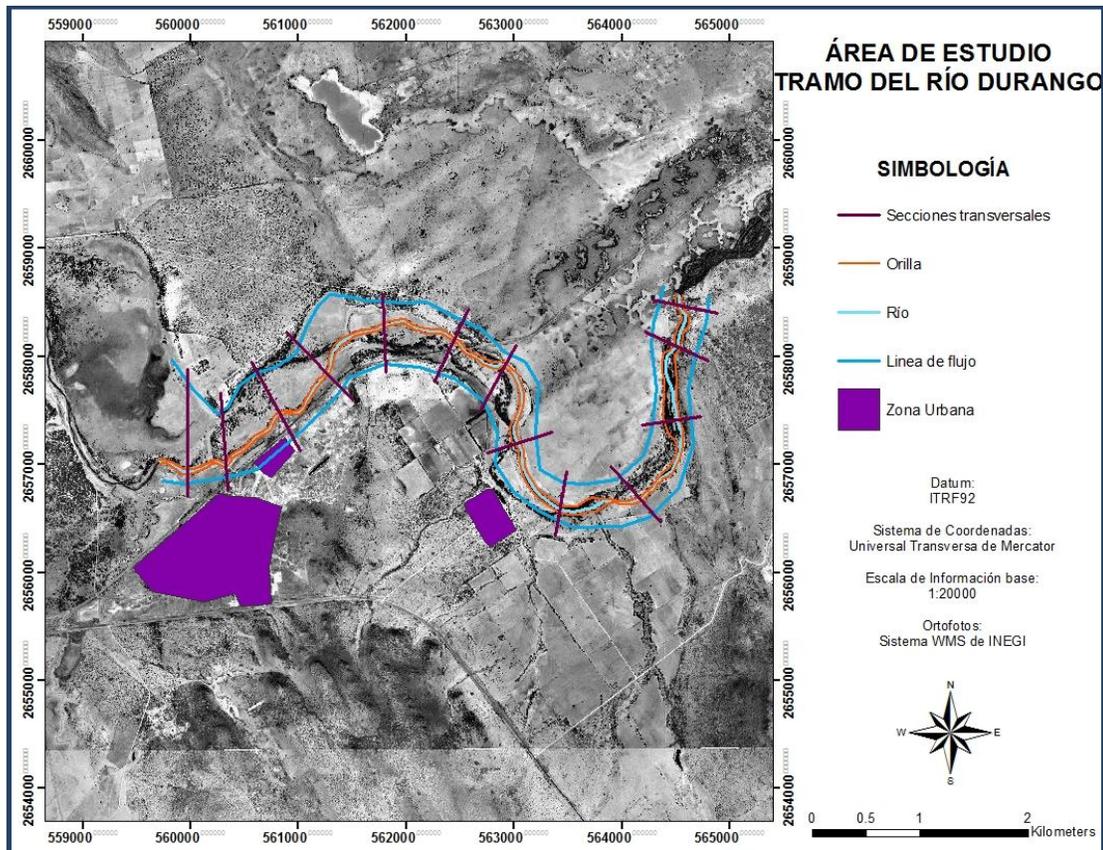


**Figura 16** Mapa conceptual de la construcción o evaluación de riesgo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1 DATOS DE ELEVACIÓN DEL TERRENO

En la Figura 17 se presenta el tramo de la parte baja del Río Durango, a partir de este se extrajeron dos secciones transversales, de las que se observan en el mapa, se seleccionaron la primera y la última, de Oeste a Este.



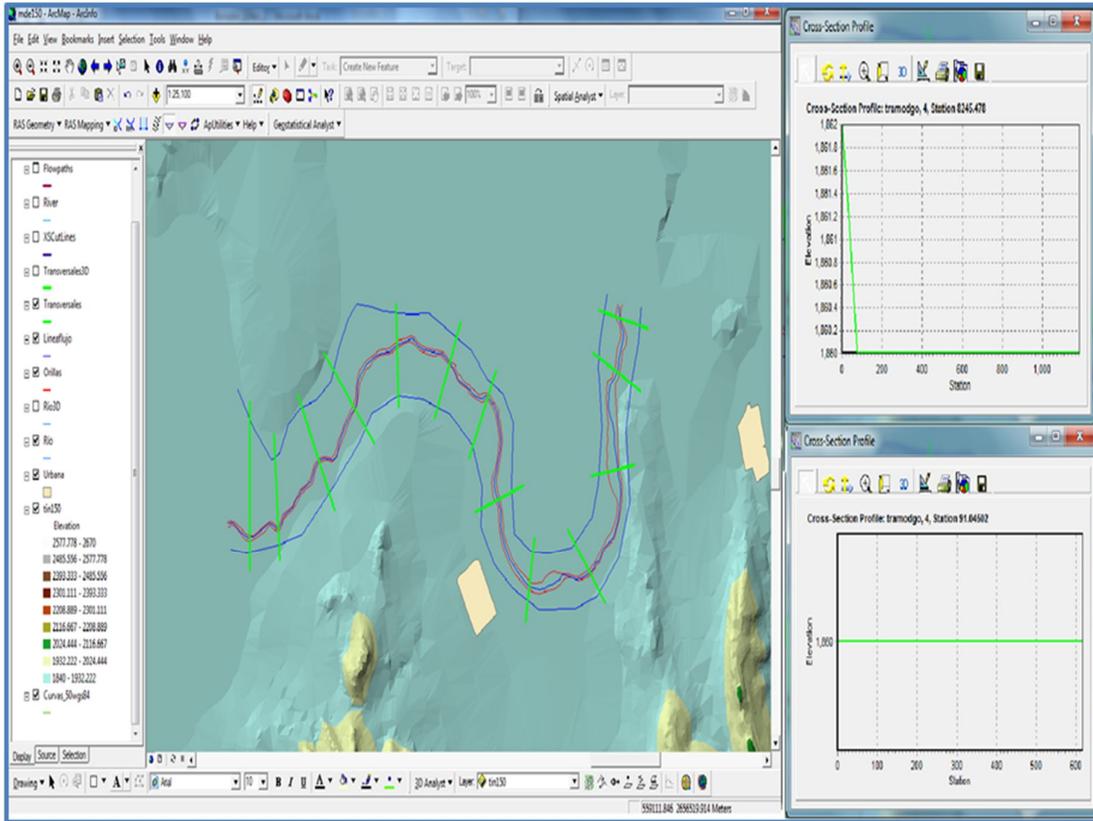
**Figura 17**

Tamo del Río Durango a partir del cual se extrajeron las secciones transversales para contrastar los datos topográficos.

#### 1.1 Datos topográficos disponibles

La primera topografía revisada fue la obtenida a partir de generar el TIN con las curvas de nivel 1:50,000, de ésta en particular sólo se obtuvo la representación gráfica de las secciones transversales ya que presentaba elevaciones constantes, de entre 1960 y 1980 msnm, a través de toda la zona de baja

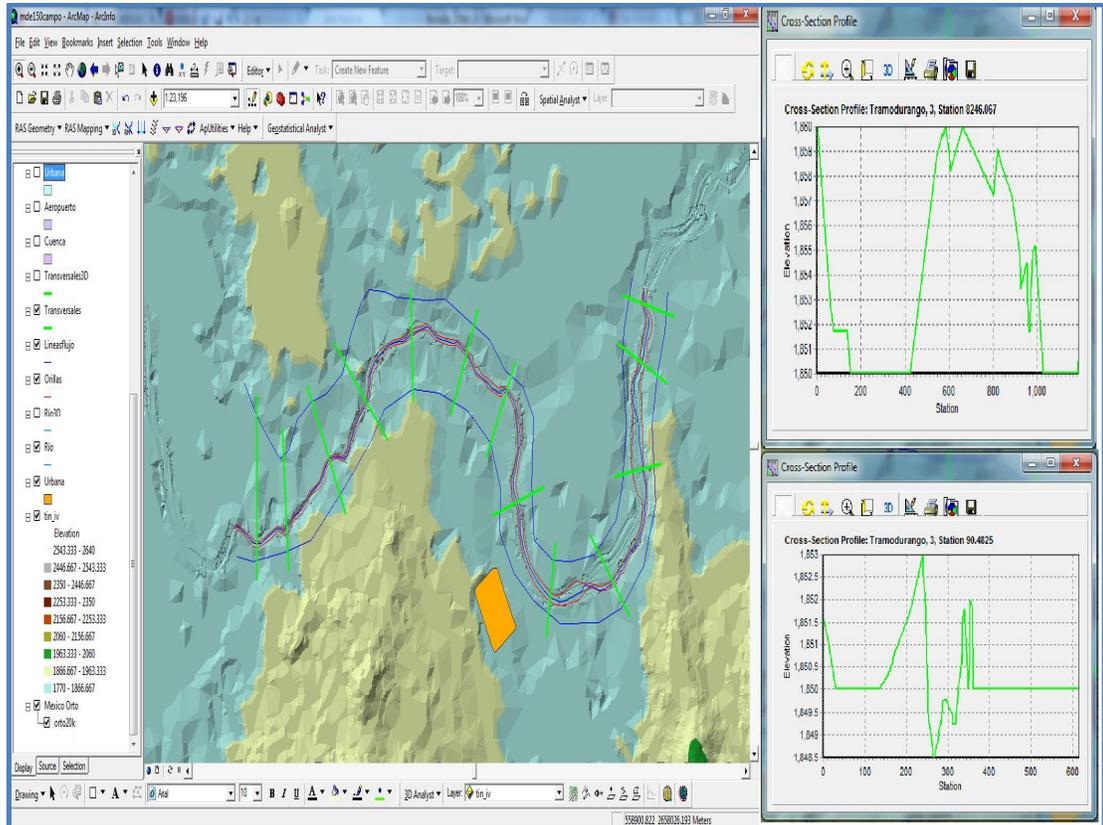
pendiente, razón por la cual no se contrasto con el estimador. Lo anterior se puede observar en la Figura 18.



**Figura 18** Izquierda: TIN construido a partir de curvas de nivel 1:50,000. Superior derecha: representación gráfica de la primera sección transversal. Inferior derecha: representación gráfica de la última sección transversal.

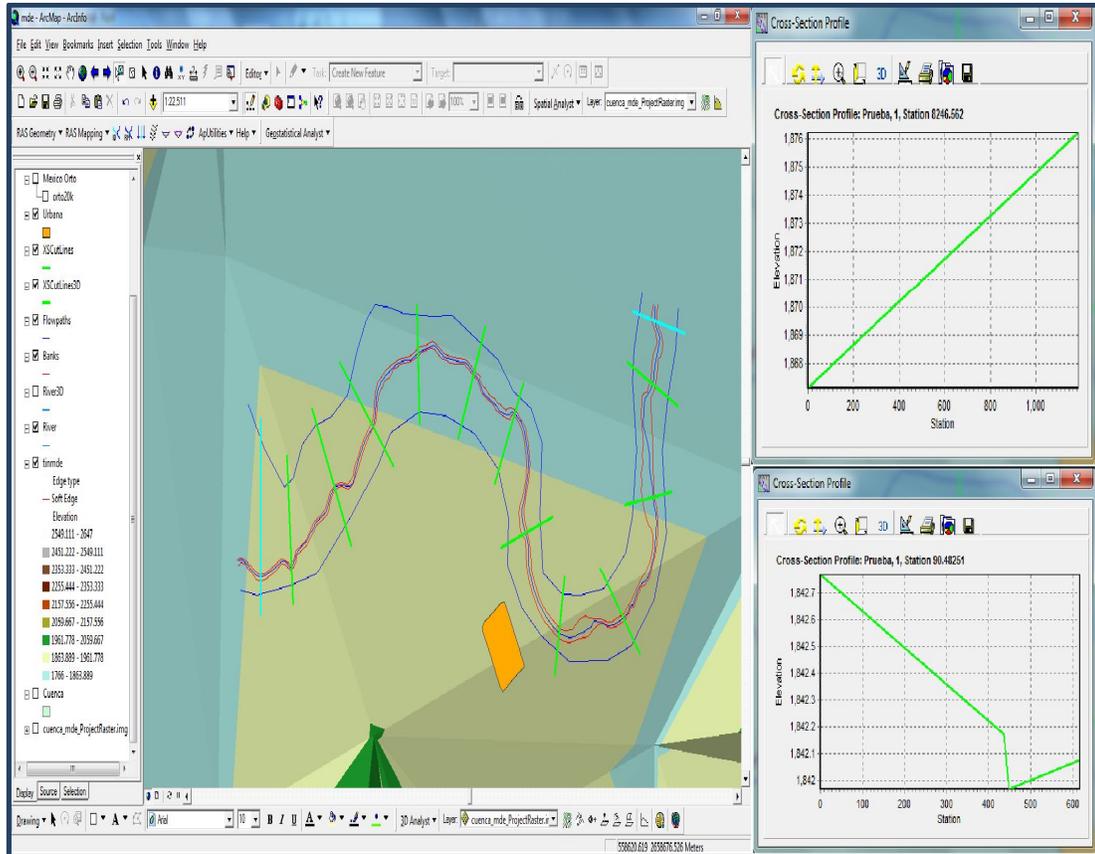
En segundo término se presenta la topografía de la construcción del TIN a partir de un a extracción de contorno del MDE (1:50,000) con una diferencia de elevación de 10 y elevaciones tomadas en campo. En éste de forma gráfica se puede observar un comportamiento menos uniforme en el terreno, donde se aprecia como el río aparece delineado, sin embargo las zonas adyacentes al cauce presentan depresiones que pueden justificarse debido a la construcción del TIN, ya que el contorno es una extracción a partir del MDE, lo que representa que las elevaciones se extraen a partir de una interpolación, lo que genera que la

línea de flujo del cauce en una simulación hidráulica presente un error implícito. Esto se puede observar en la Figura 19.



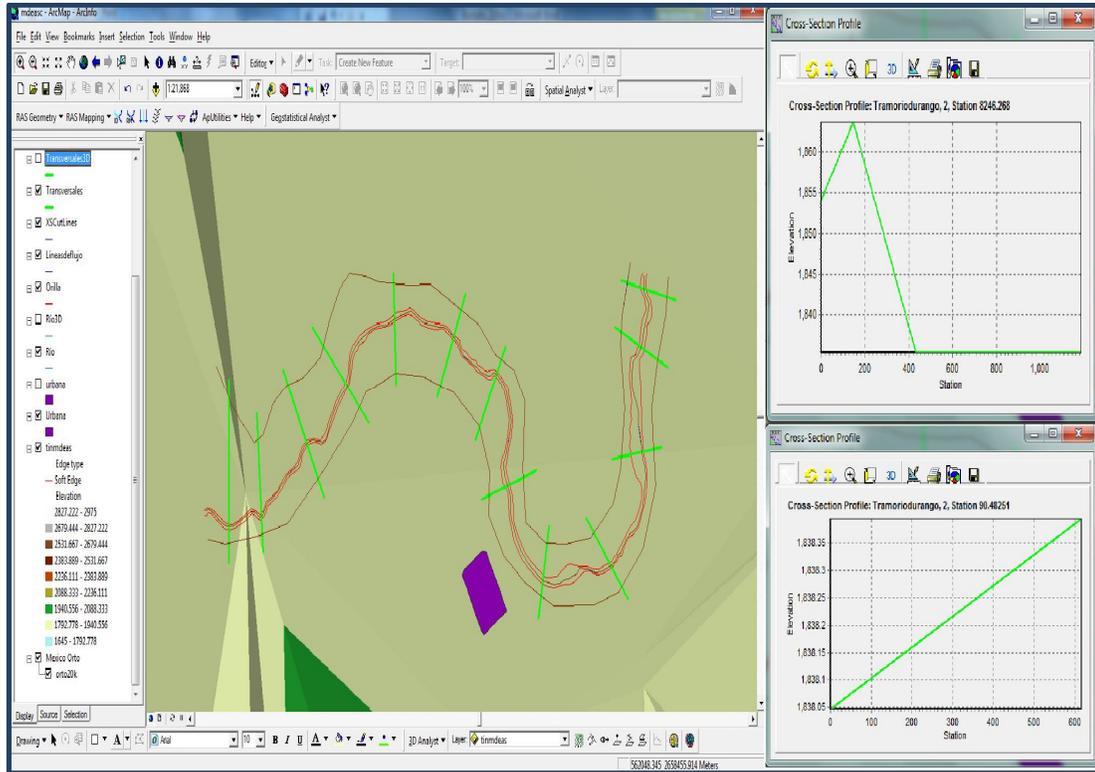
**Figura 19** Izquierda: TIN construido a partir de curvas de nivel 1:50,000 y elevaciones tomadas en campo. Superior derecha: representación gráfica de la primera sección transversal. Inferior derecha: representación gráfica de la última sección transversal.

La tercer topografía analizada es la del TIN generado a partir del MDE a escala 1:50,000 extraído de INEGI, que como muestra en la figura 20, de forma gráfica se puede considerar que no ajusta los valores de elevación a las condiciones del terreno, esto tomando en cuenta que éste se genera a partir de interpolaciones de los datos del modelo digital, lo que significa de igual manera que en caso anterior un error implícito derivado de la manipulación de los datos.

**Figura 20**

Izquierda: TIN construido a partir de MDE 1:50,000. Superior derecha: representación gráfica de la primera sección transversal. Inferior derecha: representación gráfica de la última sección transversal.

La cuarta topografía contrastada es la del TIN generado a partir del MDE de ASTER, que de forma gráfica tampoco puede decirse que se asemeje a las condiciones de distribución de elevaciones en el terreno. Por lo que no sería útil usarle en la generación e la geometría del cauce, ya que las secciones transversales se representarían de forma plana o con caídas muy bruscas de elevación. En la Figura 21 se presenta el TIN y las secciones transversales graficadas.

**Figura 21**

Izquierda: TIN construido a partir de MDE ASTER. Superior derecha: representación gráfica de la primera sección transversal. Inferior derecha: representación gráfica de la última sección transversal.

## 1.2 Muestreo de errores

El cálculo del error cuadrático medio de los datos topográficos contrastados con su correspondiente valor de elevaciones de Google Earth (estimador) concuerda con lo observado en los gráficos, con respecto al valor con menor error cuadrático medio asignado al TIN de la extracción de contorno y elevaciones en campo. Por lo que fueron estos valores de topografía los utilizados para aplicar en el modelo hidrodinámico de simulación hidráulica HEC-RAS. La tabla a partir de la que se calculó el error cuadrático medio se encuentra en el Anexo II. Estos valores se puede observar a continuación en la Tabla 7

**Tabla 7:** Error cuadrático medio

DIFERENCIAS GOOGLE EARTH CON	CONTORNO- CAMPO	ASTER	MDE
NÚMERO DE PUNTOS DE CONTROL	46	46	46
ERROR CUADRATICO MEDIO	3.366645	8.918975	4.329757

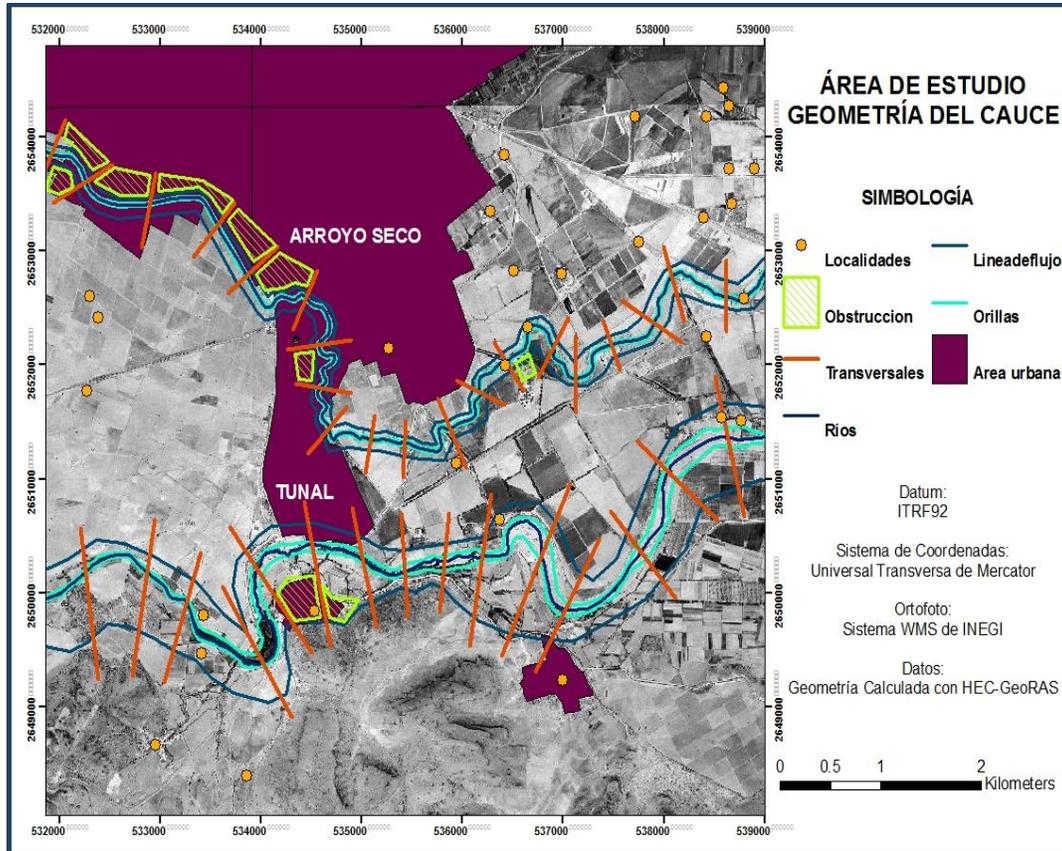
Mediante la metodología de comparación de topografía, con la técnica del error cuadrático medio se determinó la base en la que se soporta la creación de la geometría que sirve para desarrollar la simulación hidráulica con modelos hidrodinámicos. Que fue la del TIN creado a partir de datos de contorno y de campo. Ya que si bien el contar con datos de topografía tomados en campo para la zona del cauce es de ayuda, la línea de flujo extrae las elevaciones de la extracción del contorno, lo que evita que la inundación pueda distribuirse conforme a la realidad, debido a que no se puede asegurar que las depresiones formadas provienen de la realidad del terreno y no del error de interpolación de los datos al crear el TIN. Esto se justifica debido a que los puntos de monitoreo de elevaciones se tomaron de la zona que cubrían los datos tomados en campo, por lo que no se debe dejar de lado la importancia de complementarlos con un modelo del terreno que no sobrepase una escala de 1:10,000 para zonas de pendiente mayor al 10% o de 1:5,000 para zonas con pendiente menor al 10%, lo que aseguraría una mejor representación del comportamiento del terreno en las líneas de flujo.

## **2 PELIGRO**

### **2.1 Geometría de cauces**

En la Figura 22 se muestra un acercamiento a dos de los tramos estudiados, donde se pueden apreciar algunos de los elementos de la geometría construida. Un punto fundamental en esta etapa fue la creación del mapa de usos de suelo, a través del cual se insertó la distribución del coeficiente de rugosidad de Manning, que sirvió para determinar la influencia de la conformación del fondo en la

distribución de velocidades de flujo sobre terreno, tanto para el cauce, como para las orillas y las líneas de flujo.



**Figura 22** Acercamiento al Arroyo Seco y el Tunal, que muestra el cálculo de la geometría de los cauces.

## 2.2 Simulación en HEC-RAS

### Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno se determinaron a partir de hidrogramas construidos en el Proyecto Ejecutivo para la Construcción del Drenaje Pluvial del Valle del Guadiana (CONAGUA 2006), de las propuestas de periodos de retorno presentadas en el documento se eligieron cuatro escenarios, el de 5 años sirve para delinear la mínima línea de flujo que atraviesa la zona. En la tabla 8 se enlista el flujo de cada periodo de retorno para los ríos analizados.

**Tabla 8:** Escenarios de simulación.

Tiempo de retorno (años)		100	50	20	5	
		Flujo Q (m³/s)				
<b>Cauces</b>	Sauceda	Tramo Alto	53	46	25	5
		Tramo Bajo	56	48	26	5
	Durango	Tramo Alto	86	74	40	8
		Tramo Bajo	27	23	13	3
	Tunal	Tramo Alto	42	36	20	4
		Tramo Bajo	24	21	11	3
	Afluente 1	Arroyo Seco	56	48	26	5
	Bayacora	Tramo Único	251	214	174	24
	La Vaca	Tramo Alto	71	60	33	6.9
		Tramo Bajo	37	31	17	3.6
	Afluente 2	La Estancia	115	98	53	11

**Gráficos tridimensionales**

La simulación arrojó una serie de gráficos y tablas con información sobre el comportamiento de los flujos tratados. Sin embargo para representar el peligro se utilizó la avenida generada por un periodo de retorno de (Tr) de 100 años porque es el que representa el máximo peligro. En la Figura 18 se presentan todos los tramos de estudio.

En la Figura 23 se observan en rojo las líneas de las orillas de los ríos, las líneas transversales que atraviesan lo flujos son las secciones transversales y la mancha en azul representa las zonas que se inundan con un periodo de retorno de 100 años.

Se puede apreciar como el flujo en algunas zonas no sigue la línea de las orillas, esto se da debido a que el cauce sigue la mínima línea de elevación y esto está sujeto a las elevaciones en las que está basado el TIN, lo que puede generar desplazamientos, debido a las zonas que forman depresiones del contorno de curvas extraído del MDE.

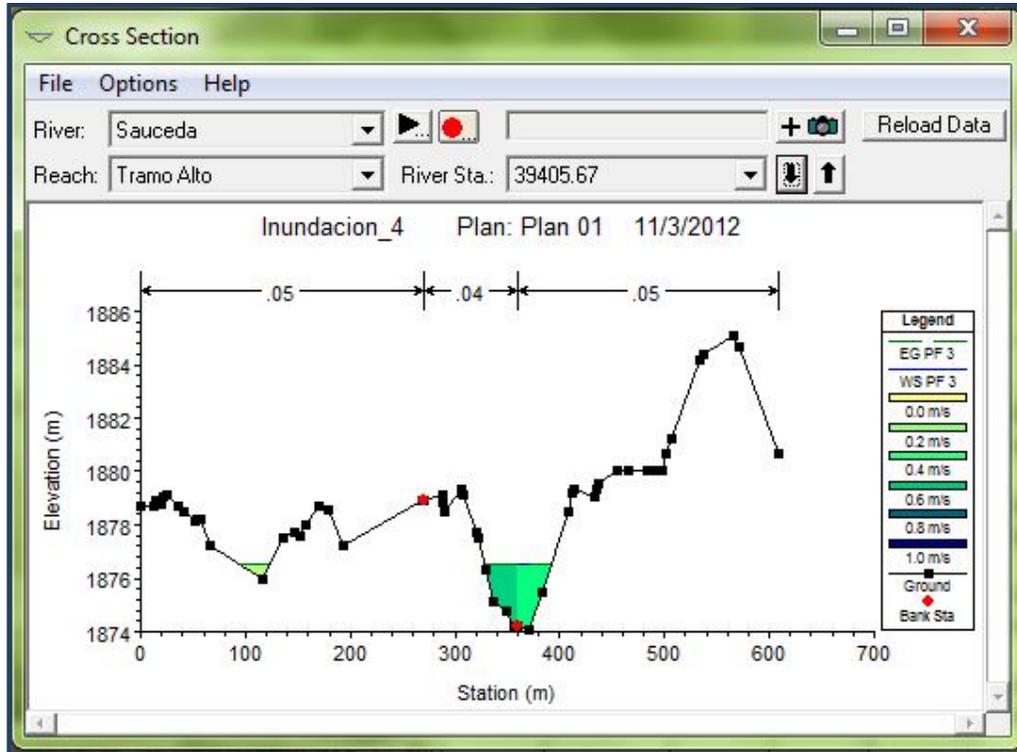


**Figura 23** Simulación para un periodo de retorno  $Tr= 100$  años. En todos los tramos.

### Secciones transversales

Una de las salidas de la simulación son las secciones transversales que incluyen el comportamiento de la distribución y velocidad de los flujos. Para visualizar de forma general el comportamiento de los ríos se han seleccionado algunas de

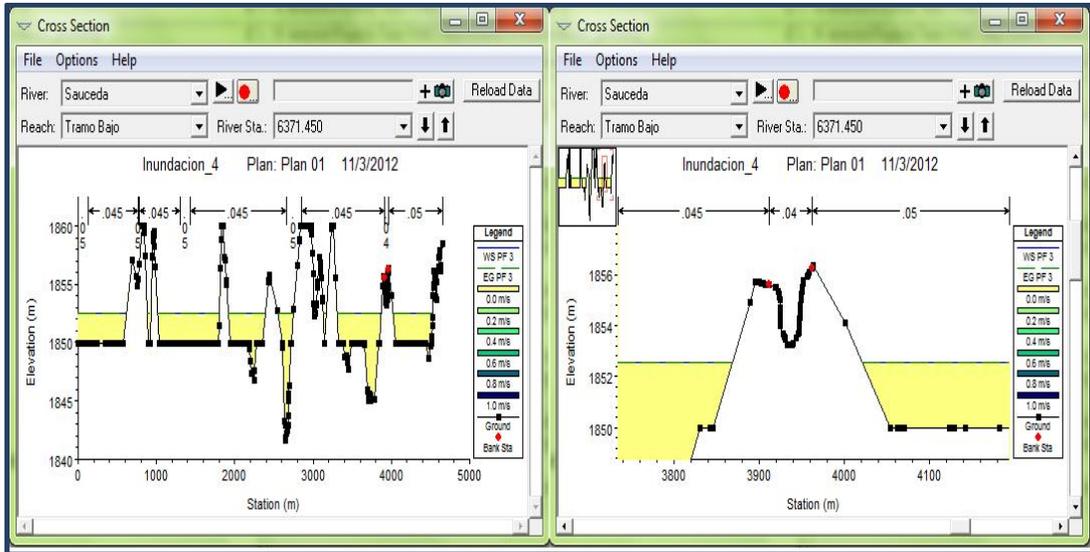
estás las cuales se presentan a continuación. En la Figura 24 se muestra un ejemplo de una sección de la parte alta de la Saucedá.



**Figura 24** Sección 39405.67 del Tramo Alto de la Saucedá.

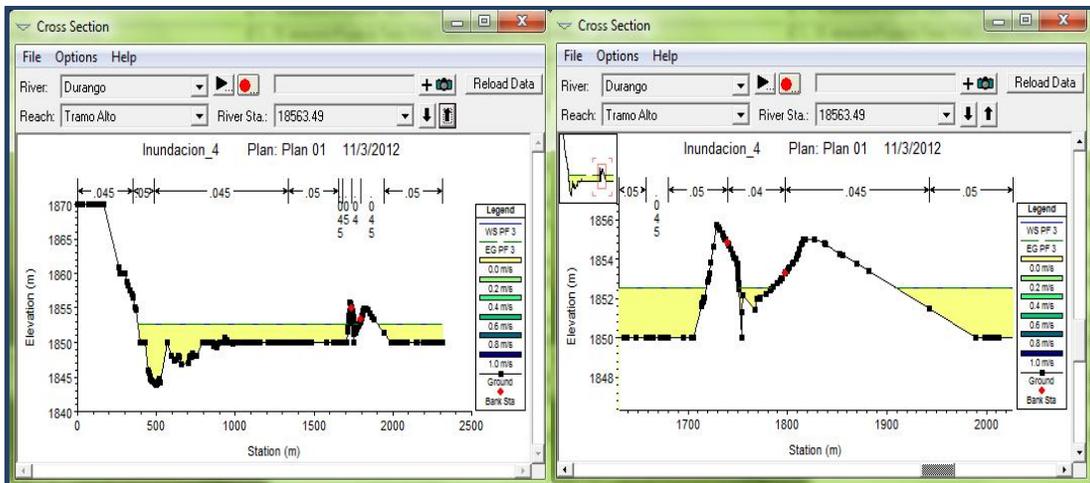
En la figura anterior se puede apreciar como la geometría en ese tramo, no tiene un comportamiento uniforme, se ven dos zonas más bajas que el cauce, ya que el flujo tiende a circular por el rasante es que se distribuye como se observa. Debido a que la velocidad presente oscila entre 0.2 y 0.4 m/s se puede suponer que la sección transversal anterior presentaba un comportamiento similar en el contorno del cauce, por lo que el flujo no perdió velocidad.

En la Figura 25 se muestra una sección de la parte baja de la Saucedá. En está se ve de manera marcada la formación de encharcamientos por las depresiones del terreno, aunque se puede observar con un acercamiento que aun que la geometría del cauce está bien delineada, ésta tiene una elevación mayor que las depresiones, por lo que el flujo se estanca en estas y se pierde velocidad en el mismo.



**Figura 25** Sección 6371.450. Izquierda: sección transversal completa del Tramo bajo de la Saucedá. Derecha: Acercamiento a la geometría del cauce.

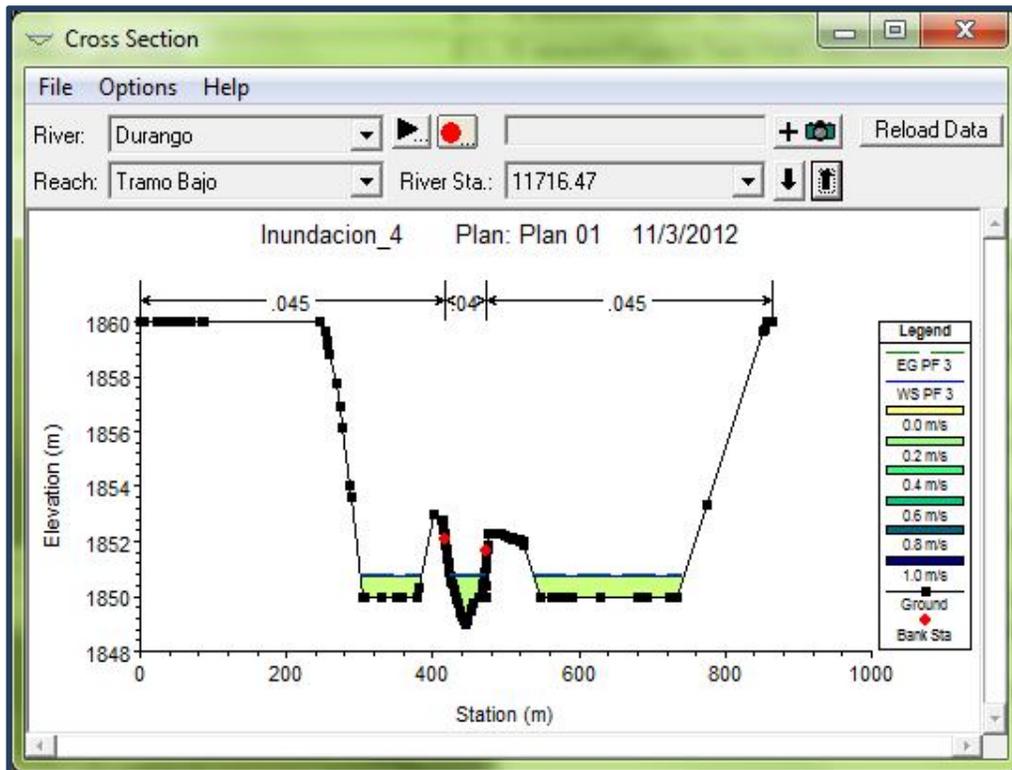
La Figura 26 muestra una sección de la parte alta del río Durango. En ésta se observa que la delineación del cauce no pasa por las zonas de menor elevación, por lo que el flujo se distribuye a los alrededores, lo cual según lo mencionado anteriormente, se puede atribuir a los datos con los que se generó el TIN.



**Figura 26** Sección 18563.49. Izquierda: sección transversal completa del tramo alto del río Durango. Derecha: acercamiento de geometría del cauce.

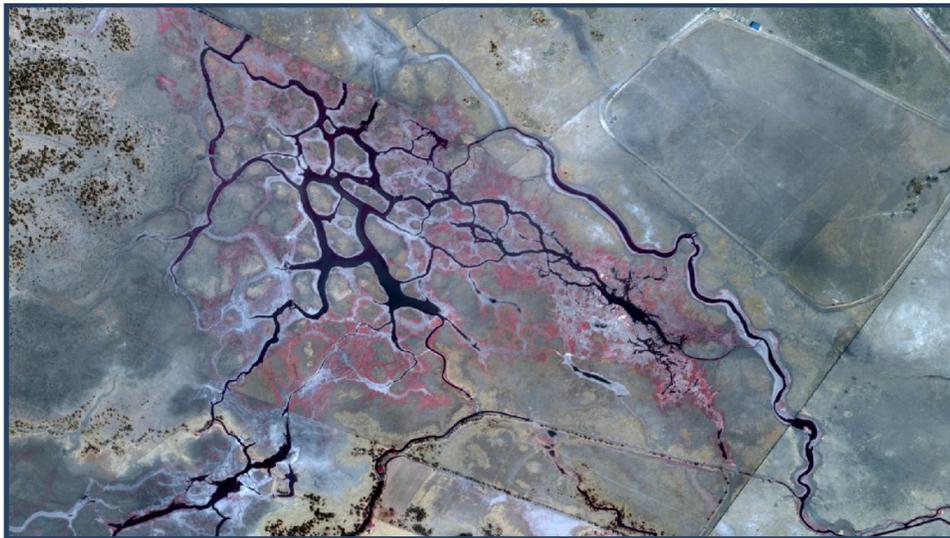
En la Figura 27, se presenta otra de las secciones representativas, ésta pertenece al tramo bajo del río Durango, en la cual se observa que la geometría del cauce esta bien delineada, sin embargo sobre las orillas las elevaciones generan dos picos que terminan en ambos lados con depresiones, las cuales son ocupadas por el flujo, sin embargo en este punto se nota un amento de velocidad, ya que a partir de está sección las depresiones son menos, por lo que el flujo circula más libremente.

El comportamiento de las secciones transversales sobre el terreno, puede ser atribuido a los meandros y trespasamientos que se presentan en las zonas de confluencia de varios flujos. Ya que HEC-RAS simula el comportamiento de forma longitudinal debido a su condición de dimensión 1D, es que las zonas con características como las mencionadas presentan la necesidad de establecer el comportamiento del cauce de forma transversal.

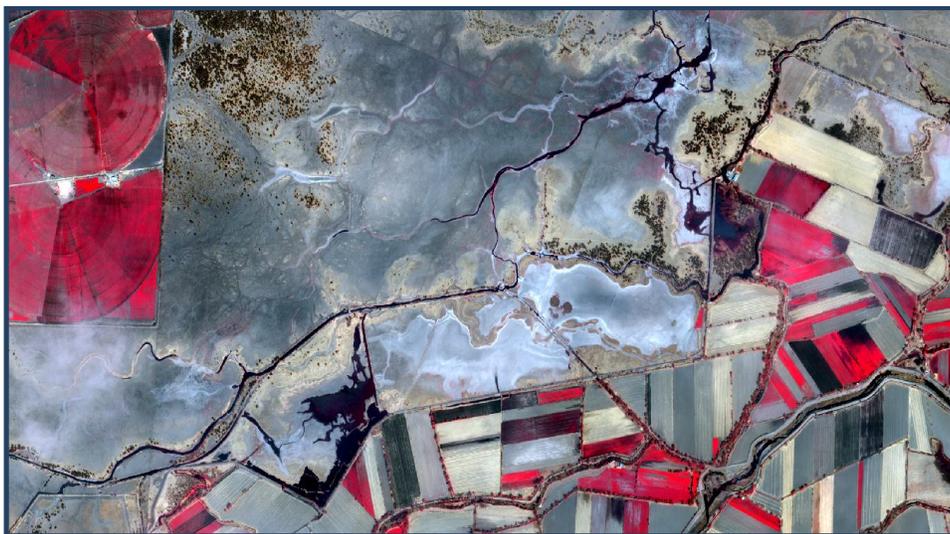


**Figura 27** Sección 11716.47. Sección transversal del tramo bajo del río Durango.

Lo anterior puede representarse de forma visual mediante el uso imágenes multi espectrales que permitan explicar el comportamiento del flujo en zonas que presentan dichas características. En las Figuras 28 y 29 se aprecian meandros y trespasamientos en el área de estudio.



<b>Figura 28</b>	Meandros en el Humedal de Málaga. Imagen multi espectral en falso color de GeoEye del 5 de febrero de 2012.
------------------	---

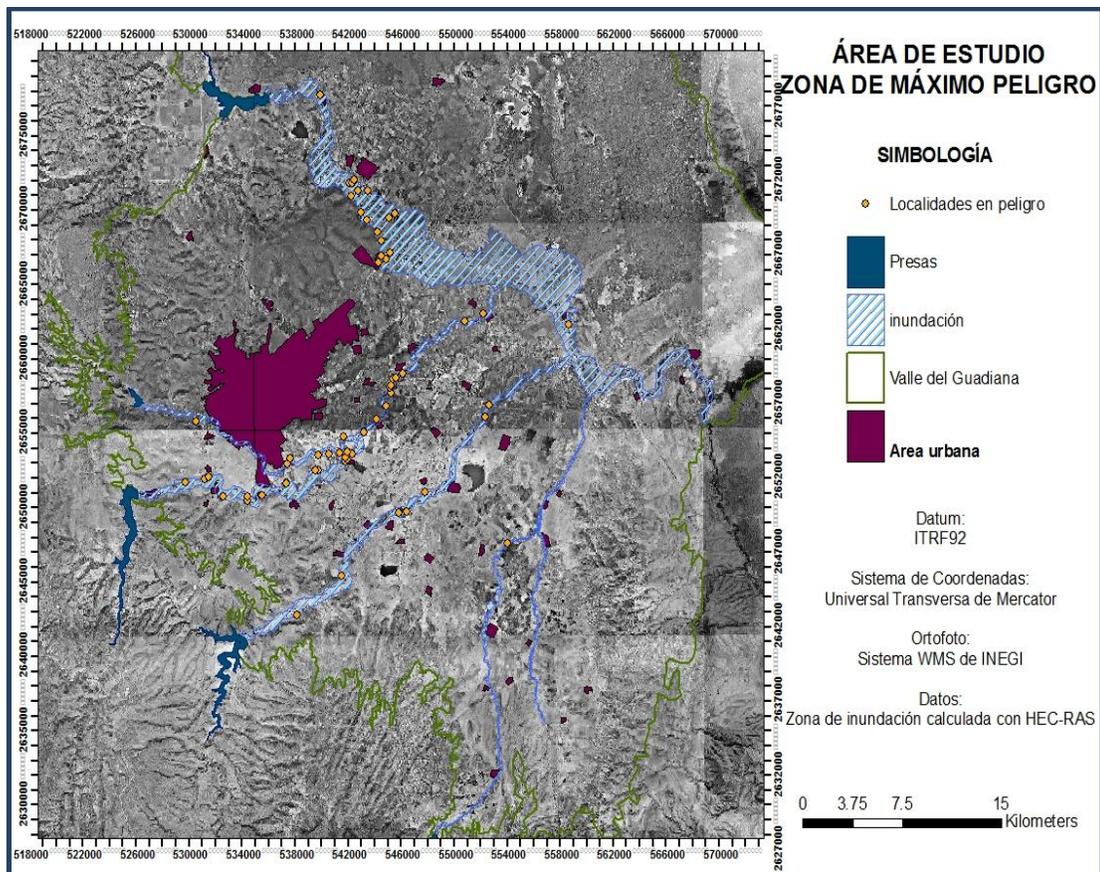


<b>Figura 29</b>	Zonas de depresiones topográficas e inundables a lo largo del río. Imagen multi espectral en falso color de GeoEye del 5 de febrero de 2012.
------------------	--

## 2.3 Mapa de peligro

La distribución de peligro se muestra en la Figura 30, en la cual se puede observar que la mayor extensión de zona inundable se presenta en el río la Saucedá, debido a la confluencia de los ríos en este, y porque este es el que ha tenido más modificaciones a través del tiempo, se puede esperar que su comportamiento incluya mayores complicaciones, además que es en esta zona donde se presentan las menores elevaciones del terreno.

Es importante resaltar que en la confluencia del Tunal y la Vaca ocurre un estrechamiento del caudal provocado por la súbita elevación del terreno, debida a un cerro tras el poblado El Arenal, incrementando profundidades y velocidad de escurrimiento.



**Figura 30**

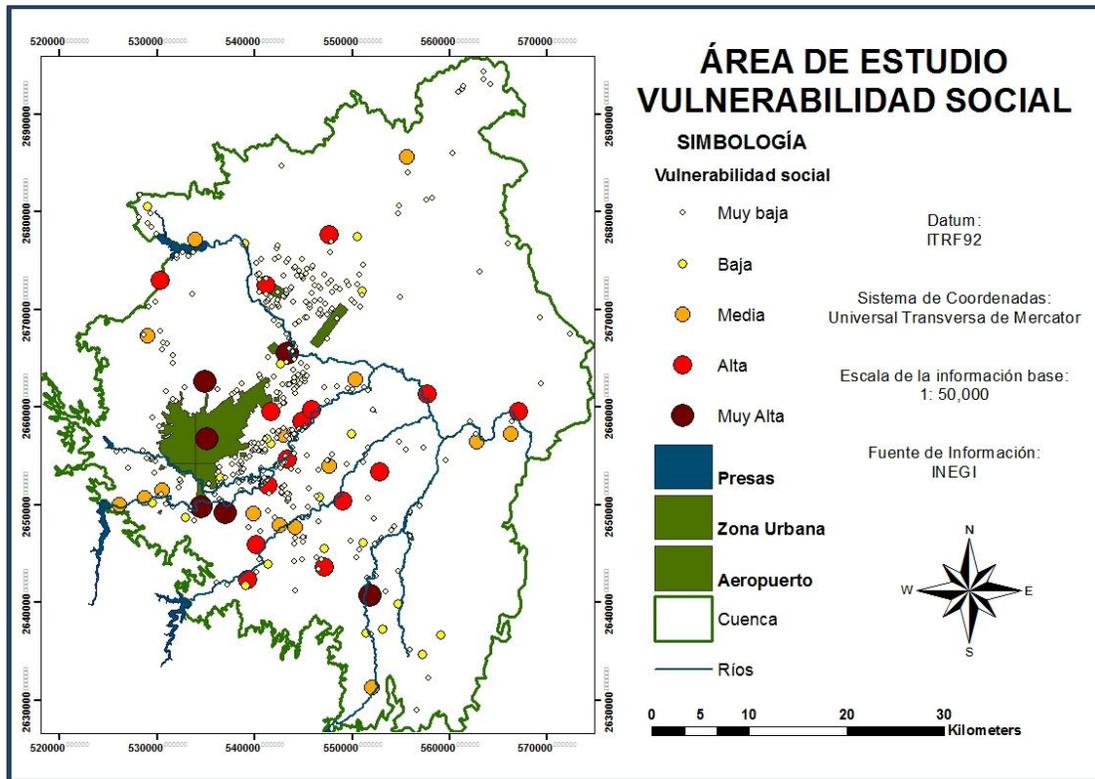
Distribución de peligro en el Valle del Guadiana.

## 2.4 VULNERABILIDAD

El cálculo de vulnerabilidad se hizo en base a los datos de las localidades, por lo tanto el resultado es puntual y está basado en la distribución de estas sobre el terreno.

### 3.1 Vulnerabilidad social

La vulnerabilidad social se determinó por localidad, tomando en cuenta el número total de habitantes, la distribución de la población por edades, y el número de habitantes con seguridad social. Cada uno de los indicadores estandarizado y valorizado y representado geográficamente finalmente se obtuvo el mapa que se muestra en la Figura 31.



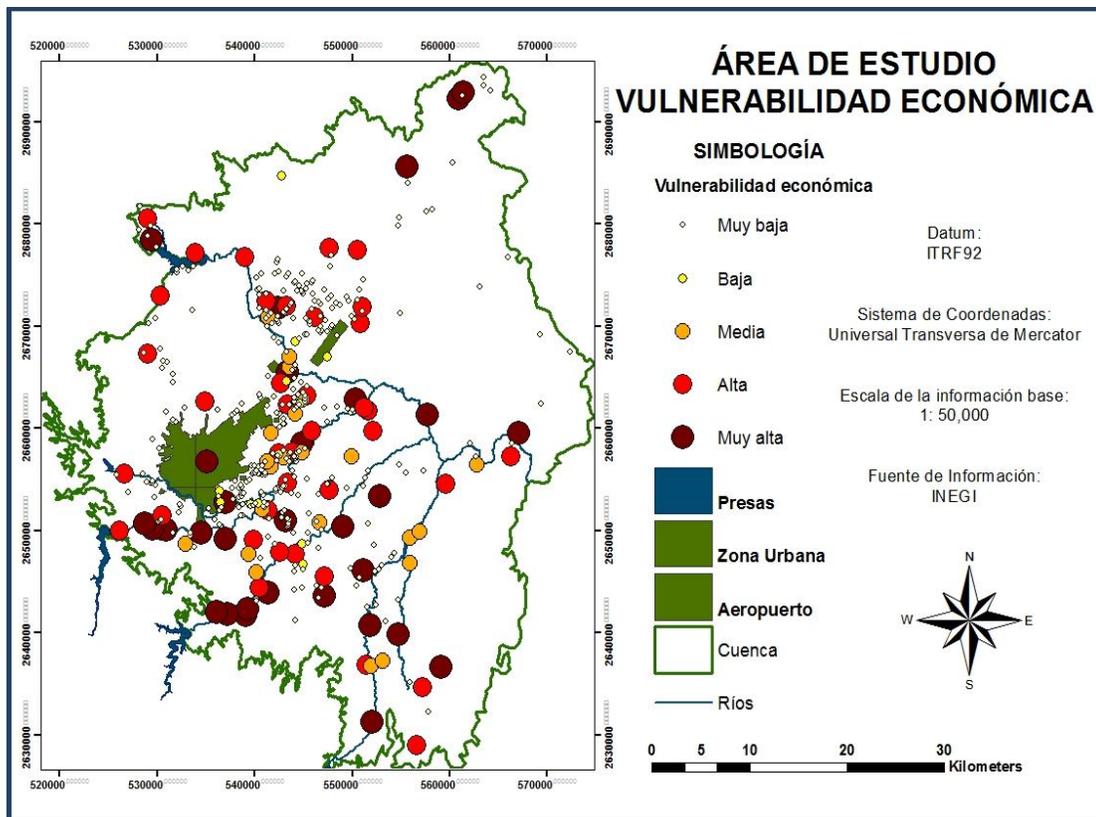
**Figura 31** Distribución de la vulnerabilidad social por localidad.

Como se puede ver la zona tiene un gran número de localidades, sin embargo muchas de estas cuentan con menos de cinco habitantes, por lo que si bien es importante tenerlas zonificadas e identificar el grado de vulnerabilidad que

poseen, son sólo 20 las que deben tener especial atención, en caso de que queden dentro de la mancha de inundación.

### 3.2 Vulnerabilidad económica

La vulnerabilidad económica está calculada en función del índice de marginación social (2005) del Consejo Nacional de Población (CONAPO 2010), que se basa en características de las comunidades como población analfabeta, número de habitantes por localidad, tipo de vivienda, servicios en la vivienda, en conjunto con la disponibilidad a medios de comunicación que condiciona el tiempo de actuación de la población y que esta en función de su capacidad adquisitiva. La distribución de las localidades según su vulnerabilidad económica se puede observar en la Figura 32.



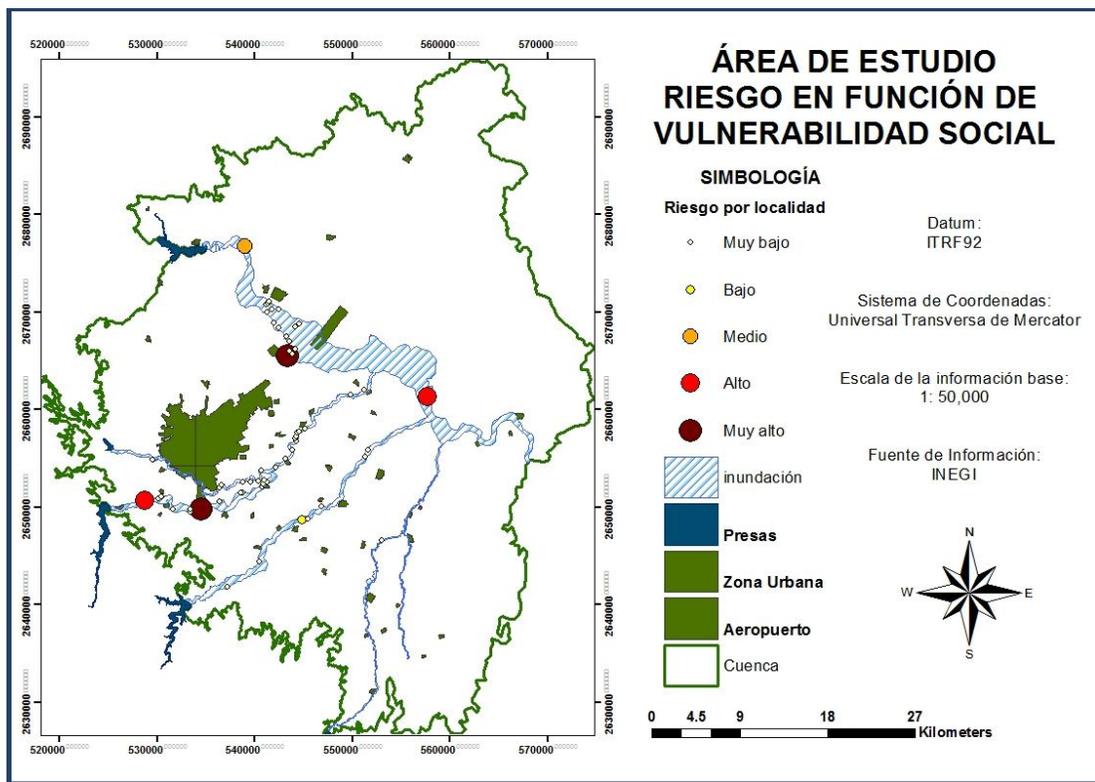
**Figura 32** Distribución de la vulnerabilidad económica por localidad.

## 4 RIESGO

El riesgo se cálculo en función de la confluencia de las vulnerabilidades y la mancha de peligro, con el fin de determinar cuales son las localidades en mayor riesgo. Esto con el fin de otorgar grados de importancia, y así poder tomar decisiones en cuanto a la actuación en caso de presentarse una inundación.

### 4.1 Peligro y vulnerabilidad social

En función de la mancha de peligro y en confluencia con la vulnerabilidad social se generó el mapa de la Figura 33, donde se aprecia el nivel de riesgo por localidad.



**Figura 33**

Localización de las localidades con nivel de riesgo en función de la vulnerabilidad social.

En base a esta distribución se puede generar una tabla, para determinar las características de la población con mayor riesgo, la cual se presenta en el Anexo

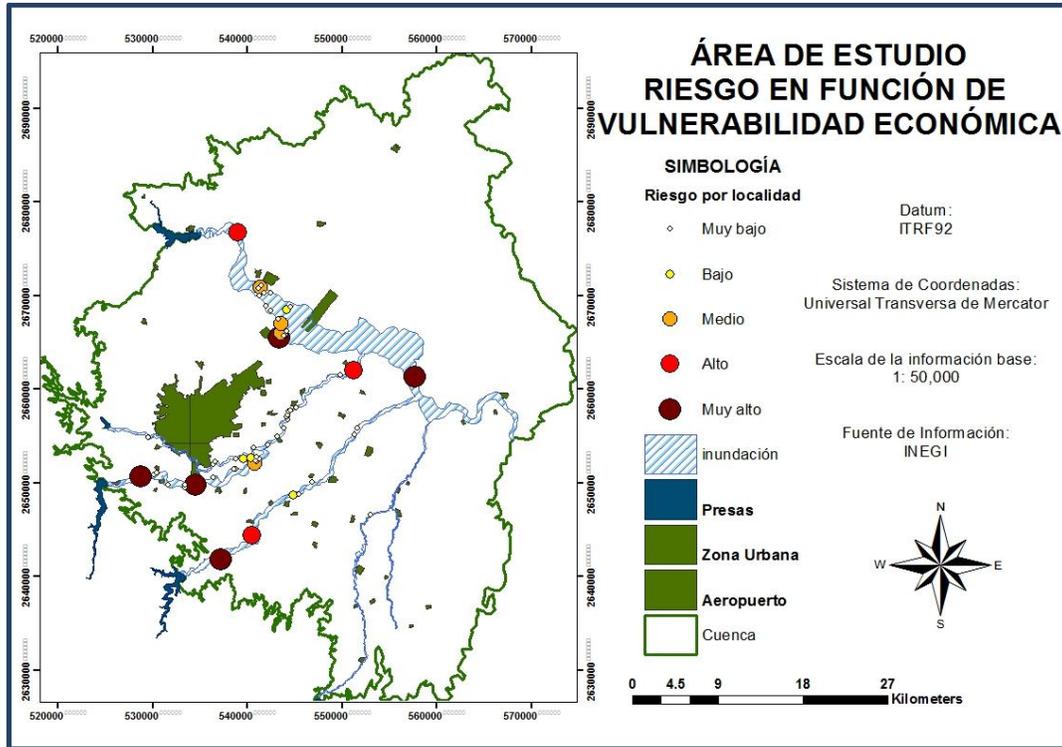
III, esto permitió hacerlo cuantitativo y determinar las poblaciones a las que se debe atender en caso de una inundación. En la tabla 9 se muestran las localidades con un mayor riesgo en función de la vulnerabilidad social.

**Tabla 9:** Localidades con Mayor riesgo social.

NIVEL	NOMBRE DE LOCALIDAD	NO. HAB.
<b>MUY ALTO</b>	Cinco de Mayo	2465
	La Ferrería (Cuatro de Octubre)	1945

### 3.2 Peligro y vulnerabilidad económica

En función del peligro y la vulnerabilidad económica se generó el mapa de la Figura 34, donde aparecen las localidades que presentan un mayor riesgo en relación a la vulnerabilidad económica. En función de este mapa de riesgo se puede generar igualmente una tabla para determinar la cantidad de población que esta sujeta a riesgo en función de su vulnerabilidad económica, la cual se encuentra en el Anexo III. El resultado de las localidades con Mayor riesgo económico se muestra en la Tabla 10.



**Figura 34** Distribución de las localidades con nivel de riesgo en función de la vulnerabilidad económica.

**Tabla 10:** Localidades con mayor riesgo económico

NIVEL	NOMBRE DE LOCALIDAD	NO. HAB.
<b>MUY ALTA</b>	Cinco de Mayo	2465
	El Arenal (San Jerónimo)	940
	El Pueblito	602
	La Ferrería (Cuatro de Octubre)	1945
	San Miguel de las Maravillas de Abajo	122

## VI CONCLUSIONES

A partir del presente trabajo se concluye que la información topográfica utilizada, no representa correctamente el territorio, debido a que la escala de ésta es muy pequeña para ser utilizada en zonas de baja pendiente, esto en función de las metodologías propuestas. Sin embargo debe considerarse que otro tipo de metodologías como el análisis geomorfológico también incluyen dentro de su desarrollo el uso de topografía, por lo que se puede decir, que la complicación de aplicación de metodologías no está en función de éstas, sino que está condicionada a la falta de información cartográfica detallada disponible para su aplicación.

En función de lo anterior se puede decir que los resultados de distribución de la lámina de agua que se obtuvieron de la modelación hidrodinámica mediante la simulación hidráulica de cauces, no se ajustan a la realidad del terreno, ya que la base de cálculo se cimenta en la geometría de los ríos calculada en la simulación, la cual está condicionada a las complicaciones que la precisión de la cartografía, ya mencionadas en el párrafo anterior, representan.

Es importante también mencionar que los estudios de análisis de inundación por medio de modelación hidrodinámica como HEC-RAS, presentan dificultades técnicas al desarrollarse en el complejo completo de los escurrimientos de los ríos.

Dentro de la distribución de la vulnerabilidad, en el aspecto social, se identificó que las comunidades con una vulnerabilidad muy alta se congregan cerca del mayor centro de población, que es la zona urbana. Sin embargo en el sentido de la distribución de vulnerabilidad económica, se encontró que las más vulnerables se ubican hacia la zona Sur Oeste del Valle del Guadiana.

En este sentido, a través de la distribución realizada se pudo observar que sólo las localidades de Cinco de Mayo y la Ferrería, presentaron muy alto riesgo socioeconómico, encontrando que localidades como El Arenal y San Miguel de

Las Maravillas de Abajo, ubicadas en estudio de la CONAGUA como unas de las de mayor riesgo, sólo presentan un riesgo muy alto en un sentido económico, derivado de la marginación social en función de las carencias en los servicios básicos de vivienda.

Finalmente y en general, se puede decir que se comprobó que los proyectos que buscan distribuir los desastres por inundación en función de la distribución del riesgo por medio de la identificación del peligro y las vulnerabilidades, pueden ser aplicado y pueden obtenerse resultados preliminares a partir de estos, en función de identificar las carencias de información disponible, a partir de las cuales se puede llegar a una conclusión de mayor precisión y que pueda ser utilizada en la actuación ante este tipo de fenómenos.

## VII RECOMENDACIONES

Las recomendaciones están en sentido de los datos base para los cálculos, es importante hacer hincapié en que existen formas de obtener los datos cuando estos no se encuentran en alguna institución pública. Una de las formas que se recomiendan es la selección de tramos de las partes altas de los cauces para tomar datos de elevación de secciones transversales en campo, con lo que se pueden hacer interpolaciones del comportamiento aguas debajo de los ríos y al unirse esta información con los datos de campo con los que cuenta la CONAGUA, se puede llegar a obtener una buena reproducción de la geometría real de los cauces.

Sin embargo ya que se identificó que la elevación para determinar la geometría de los cauces no es suficiente para distribuir la lámina de agua que permita ubicar el comportamiento e impacto de las inundaciones. Otra opción disponible está en el sentido de la disponibilidad de fondos suficientes para los proyectos de investigación, para comprar y usar imágenes de satélite o aéreas de última tecnología (como Lidar) que permitan desarrollar como parte del proyecto un modelo digital de elevación a una escala 1: 5,000 para asegurar que el comportamiento de los flujos no se vea influido por la calidad y detalle de los datos.

En el sentido del complejo del escurrimiento de los ríos se debe desarrollar análisis con modelos hidrodinámicos, seccionando por tramos los cauces, para asegurar que no habrá problemas técnicos en el proceso de simulación hidráulica.

En otro contexto, si bien el presente proyecto se llevó a cabo con hidrogramas construidos en un estudio hidrológico previo, también proporcionado por la CONAGUA, es importante plantear la realización de la modelación hidrológica, lo cual también asegura que los flujos utilizados han sido calculados en función de las condiciones del estudio que se desarrolle.

Sobre la construcción de la vulnerabilidad también es importante llevar a cabo mapeo a nivel comunitario o con participación social, que permita estar en contacto con los directamente afectados, ya que a través de las experiencias de estos participantes, se pueden delimitar mejor las características no sólo del comportamiento del fenómeno si no de la reacción de la población ante este, mediante valoración y confrontación de saberes, lo que resulta primordial en estudios donde se introduce el componente social como parte del proceso de investigación y gestión.

Finalmente y debido a que la zona sustenta al humedal de Málaga, es importante desarrollar estudios de inundaciones pero en función de este contexto, tomando en cuenta que deben asegurarse los regímenes de flujo en las zonas de éste tipo de ecosistemas, que permitan conocer el comportamiento del humedal, de forma que no se encarezca, para evitar que las inundaciones sean caracterizadas meramente como un conflicto, ya que en función de su ocurrencia existen una serie de beneficios ambientales que no se están tomando en cuenta en este sentido.

## BIBLIOGRAFÍA

Ahmed Hamad Khaled Mohamed (2008). Aplicaciones del Modelo HEC-RAS para el Análisis del Flujo no Permanente con Superficie Libre. Tesis de Licenciatura, Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Quito, Ecuador.

Bautista Capetillo Carlos Francisco et al. (2007). Deducción de la Ecuación Dinámica del Flujo Gradualmente Variado a Partir de las Ecuaciones de Saint Venant. Revista Digital de la Universidad Autónoma de Zacatecas. No.3.

Bladé Castellet Ernest et al. (2009). Modelación Numérica en Ríos en Régimen Permanente y Variable, Una visión a partir del modelo HEC-RAS. Ediciones de la Universidad Politécnica de Catalunya, SL.

CENAPRED (2012).

[http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=108&Itemid=201](http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=108&Itemid=201). Atlas Nacional de Riesgos. Glosario. México. Consulta Noviembre 2012.

CEPAL (2003). Manual para la Evaluación del Impacto Socioeconómico y Ambiental de los Desastres. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

CNA (2011). Manual para el Control de Inundaciones. Editor: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Tlalpan, México, D.F.

CONAGUA (2006). Proyecto Ejecutivo para la Construcción del Drenaje Pluvial del Valle del Guadiana. Durango, Dgo. México.

CONAPO (2010).

[http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indice\\_de\\_Marginacion\\_por\\_Local](http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indice_de_Marginacion_por_Local)

[idad 2010](#). Índice de Marginación por Localidad 2010. México. Consultado en Septiembre 2012.

COSUDE (2002). Instrumentos de apoyo para el Análisis y la Gestión de Riesgos Naturales, en el ámbito municipal de Nicaragua. Guía para el especialista. Programa de Prevención de Desastres Naturales en América Central. Managua, Nicaragua.

DANE (2005). [http://www.dane.gov.co/#twoj\\_fragment1-4](http://www.dane.gov.co/#twoj_fragment1-4). Manual de Usuario Modulo de Consulta del Censo General 2005. Departamento Nacional de Estadísticas. Bogotá, Colombia.

DHI (2010). Modelando el Mundo del Agua. Catálogo de Software 2011. Impreso por Vester Kopi. Dinamarca.

Erlingsson Ulf et al. (2001). Consideraciones sobre desastres naturales. Mapeo de Riesgos Naturales en Nicaragua. Volumen II.

Felicísimo Ángel Manuel (2004). [http://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema\\_pdf](http://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema_pdf). El Modelo Digital de Elevaciones. Capítulo 2. Consulta Noviembre 2012.

FOPAE (2012). Metodologías de Análisis de Riesgo. Documento Soporte. Guía para Elaborar Planes de Emergencia y Contingencias. Versión 1. Alcandía Mayor de Bogotá D.C.

García Marina et al. (2000). Modelación Hidrodinámica de Sistema Cauce-Planicie con Celdas Amorfas, de Tramo del Río Paraná Inferior. Rosario, Argentina, Departamento de Hidráulica y Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales.

GITS (2012). <http://www.gits.ws/index.php?seccion=inicio>. Curso de Hidráulica de Ríos, Aplicación HEC-RAS. Capitulo 3: Introducción al HEC-RAS.

Limitaciones del Modelo. Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos. Consulta Febrero 2012.

INAFED (2005). <http://www.e->

[local.gob.mx/work/templates/enciclo/durango/mpios/municipios.htm](http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/durango/mpios/municipios.htm).

Enciclopedia de los Municipios de México Durango, Los Municipios del Estado. Gobierno del Estado de Durango. Consultada Noviembre 2011.

INDECI (2003). Atlas de Peligros Naturales del Perú. Instituto Nacional de Defensa Civil. Lima, Perú.

INEGI (2004). Guías para la Interpretación de Cartografía, Edafología. Instituto de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

Mártir Mendoza Antonio (2006). Reseña del Manual para la Evaluación del Impacto Socioeconómico y Ambiental de los Desastres de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Ra-Ximhi 2: 5-7.

Morad Munir y Triviño Pérez Alejandro (2001). Sistemas de Información Geográfica y Modelizaciones Hidrológicas: Una Aproximación a las Ventajas y Dificultades de su Aplicación. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles. Número 31.

Nanía Leonardo y Molero Emilio (2007). Manual Básico de HEC-RAS 3.3 y HEC-GeoRAS 3.1.1. Área de Ingeniería Hidráulica, Área de Urbanismo y Ordenación del Territorio. Universidad de Granada. Granada, España.

OEA (1993). Incorporación del manejo de peligros naturales al proceso de planificación para el desarrollo. Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado. Washington, D.C., Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales

Organización de Estados Americanos. Con el Apoyo de la Oficina de Asistencia para Desastres en el Extranjero Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional.

Pérez Brugal Anders et al. (2010). Importancia de los Modelos Digitales del Terreno en la Simulación Hidráulica de Inundaciones. Revista Cubana de Ingeniería. 1 (3).

Pérez Morales Alfredo (2012). <http://www.boletinage.com/>. Estado Actual de la Cartografía de los Riesgos de Inundación y su Aplicación en la Ordenación del Territorio. El Caso de la Región de Murcia. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles. Vol. 58. Consulta Agosto 2012.

Ribera Masgrau Lluís (2003). Los mapas de riesgo de inundaciones: representación de la vulnerabilidad y aportación de las innovaciones tecnológicas. Doc. Anàl. Geogr. 43, 2004 153-171.

Rodríguez Esteves Juan Manuel (2007). La Conformación de los Desastres Naturales. Construcción Social del Riesgo y Variabilidad Climática en Tijuana, B.C. Colegio de la Frontera del Norte. Vol. 19(Desastre): 5-6.

Salgado Montoya Ramón Antonio (2005). Análisis Integral de Riesgo a Deslizamientos e Inundaciones en la Microcuenca del Río Gila, Copán, Honduras. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza Tropical Agricultura. Turrialba, Costarrica.

Sanz J: M: et al. (2003). Diseño Metodológico para la Elaboración de Mapas de Paisaje: Aplicación al Espacio Natural Protegido de El Rebollar. Geogaceta, Vol. 33.

SEMARNAT (2009). Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial Municipal de Durango. CIIDIR POLITECNICO UNIDAD DURANGO. Durango, Dgo. México.

SIGMUR (2005). <http://www.um.es/geograf/sigmur/>. Sistemas de Información Geográfica de la Licenciatura de Ciencias Ambientales e Introducción a los Sistemas de Información Geográfica de la Licenciatura de Geografía. Tema 7. Murcia, España. Consulta Noviembre 2012.

Silva Medina Gustavo Adolfo. (2010). <http://www.geocities.com/gsilvam/>. Notas de Ingeniería Hidráulica. Consulta Febrero 2012.

Stephenson R. S. (1991). [http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc196/doc196\\_1.pdf](http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc196/doc196_1.pdf). Evaluación de Desastres. Programa de Entrenamiento para el Manejo de Desastres. Primera edición. Consulta Noviembre 2012.

Triviño Pérez Alejandro y Ortiz Rojas Sergio (2004.). Metodología para la Modelación Distribuida de la Escorrentía Superficial y la Delimitación de Zonas Inundables en Ramblas y Ríos-Rambla Mediterráneos. Tesis de maestría. Geografía, Lenguaje y Sistemas Informáticos. Alicante España., Universidad de Alicante.

Triviño Pérez Alejandro y Ortiz Rojas Sergio (2005). "Metodología para el Análisis de Riesgo de Inundación en Ramblas y Ríos-Rambla Mediterráneos." Instituto Universitario de Geografía, Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos. Artículo sin datos de publicación.

Vásquez Ojeda José Alfredo (2003). Modelación Numérica en Hidráulica. Piura, Perú, Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, Programa Académico de Ingeniería Civil.

**ANEXO I:** Tabla de elevaciones y estimador utilizados en el cálculo del error cuadrático medio.

Puntos de revisión de elevación

ID	TIN	ASTER	CALCULADOS	EARTH	CAUCE
1	1880	1883	1879.489891	1890.064	<b>Sauceda</b>
2	1885.374	1881	1882.179431	1887.626	
3	1880	1872	1881.067095	1882.444	
4	1880	1879	1876.939346	1885.797	
5	1880	1879	1879.118777	1880.616	
6	1880	1864	1877.496331	1879.092	
7	1880	1872	1873.878691	1876.958	
8	1878.444	1855	1875.455895	1875.739	
9	1877.057	1860	1871.328146	1872.081	
10	1875.111	1868	1873.507577	1872.386	
11	1870	1857	1872.90535	1870.557	
12	1870	1854	1868.7776	1870.252	
13	1870	1857	1871.46714	1868.424	
14	1870	1860	1871.375022	1867.814	
15	1870	1855	1867.757382	1869.338	
16	1870	1861	1869.936813	1870.557	
17	1868.849	1856	1869.334586	1864.766	
18	1867.533	1857	1865.206837	1865.376	
19	1866.261	1859	1867.896377	1861.718	
20	1863.782	1870	1862.84548	1867.509	
21	1860	1882	1857.44375	1867.204	
22	1860	1847	1862.15372	1864.156	
23	1860	1858	1862.09923	1865.071	
24	1859.991	1860	1856.54825	1864.461	
25	1859.738	1867	1861.40747	1864.156	

(Continuación) Puntos de revisión de elevación

ID	TIN	ASTER	CALCULADOS	EARTH	CAUCE
----	-----	-------	------------	-------	-------

26	1859.579	1866	1856.1005	1862.632	<b>Tunal</b>
27	1860	1857	1860.90523	1861.108	
28	1860	1849	1855.5035	1861.108	
29	1859.48	1848	1860.36272	1861.718	
30	1869.769	1866	1868.87017	1872.996	
31	18870	1871	1865.98932	1871.167	<b>Vaca</b>
32	1870	1872	1868.98975	1871.472	
33	1870.537	1868	1866.49145	1869.338	
34	1870	1859	1863.6106	1869.033	
35	1870	1868	1866.61103	1868.728	
36	1870	1862	1861.23188	1865.985	
37	1870	1860	1863.63763	1867.204	
38	1868.832	1864	1861.73401	1863.852	
39	1868.442	1857	1858.85316	1864.461	
40	1868.311	1861	1861.25891	1865.68	
41	1864.842	1858	1859.35529	1863.852	
42	1864.962	1860	1856.47444	1862.632	
43	1863.12	1864	1859.47487	1862.328	
44	1860	1850	1856.97657	1858.975	
45	1859.918	1855	1853.50104	1858.06	
46	1859.349	1851	1856.50147	1859.28	

**ANEXO II: Imágenes de los ríos de estudio.**

**La Saucedá**



Arroyo Seco



## El Tunal



Santiago Bayacora



### Arroyo la Vaca



## Río Durango



**Anexo III:** Tabla de distribución del riesgo en función de la vulnerabilidad social y económica.

Localidades con población en riesgo social.

<b>NIVEL</b>	<b>NOMBRE DE LOCALIDAD</b>	<b>NO. HAB.</b>	<b>NIVEL</b>	<b>NOMBRE DE LOCALIDAD</b>	<b>NO. HAB.</b>
<b>MUY BAJO</b>	Calera	125	<b>MUY BAJO</b>	Los Corrales	107
	El Guajolote	4		María Dolores	2
	El Milagro	4		Nicho Ecológico Cedros	8
	El Mortero	8		Pókar de Ases	6
	El Nuevo Vergel	27		Predio San Vicente	23
	Escuela Bíblica (Instituto Betel)	11		Puente Gavilanes	4
	Ex-hacienda Dolores	3		Rancho Dalila	1
	Granja Betania	21		Rancho el Mezquite	2
	Granja Delicias	3		Rancho el Paraíso	1
	Granja Familia Martínez	10		Rancho la Cruz de Orozco	4
	Granja Laura	6		Rancho la Presa de Navacoyán	6
	Granja San Luis	4		Rancho la Soledad (El Capi)	4
	Granjas del Río	3		Rancho los Cuevas	4
	La Casita	6		Rancho los Pelícanos	9
	La Cruz (Sayula)	1		Rancho Revueltas	17
	La Granjita	2		Rancho Tarahumara (Las Fresas)	4
	La Joya (Alcalde)	34		San Felipe	6
La Nogalera	7	San Francisco de Calleros	32		

(Continuación) Localidades con población en riesgo social.

NIVEL	NOMBRE DE LOCALIDAD	NO. HAB.	NIVEL	NOMBRE DE LOCALIDAD	NO. HAB.
<b>MUY BAJO</b>	La Puerta de Santiago Bayacora (Puerta Chica)	122	<b>MUY BAJO</b>	San Isidro	18
	La San Martina	4		San Isidro	2
	La Soledad	6		San Juan de Olea	2
	Las Palmas (Santiesteban)	6		San Miguel de las Maravillas de Abajo	122
	Lienzo Charro la San Martina	1		Santa Cruz del Río	58
	Localidad sin Nombre (Adrián Núñez Huerta)	4	<b>BAJO</b>	Praxedis G. Guerrero Viejo	160
	Localidad sin Nombre (Antonio Puente)	7	<b>MEDIO</b>	San José del Molino	424
	Localidad sin Nombre (Bodega Blanca)	5	<b>ALTO</b>	El Arenal (San Jerónimo)	940
	Localidad sin Nombre (Esteban Tejeda)	4		El Pueblito	602
	Localidad sin Nombre (José Deras Río)	5	<b>MUY ALTO</b>	Cinco de Mayo	2465
	Localidad sin Nombre (Luis Viera Gámiz)	3		La Ferrería (Cuatro de Octubre)	1945
	Localidad sin Nombre (Primitivo Ochoa)	1	<b>POBLACIÓN EN RIESGO SOCIAL</b>		6977

Localidades con población en riesgo económico.

NIVEL	NOMBRE DE LOCALIDAD	NO. HAB.	NIVEL	NOMBRE DE LOCALIDAD	NO. HAB.
<b>MUY BAJO</b>	El Guajolote	4	<b>BAJO</b>	El Mortero	8
	El Milagro	4		Escuela Bíblica (Instituto Betel)	11
	Ex-hacienda Dolores	3		Granja Familia Martínez	10
	Granja Betania	21		Granjas del Río	3
	Granja Delicias	3		La Cruz (Sayula)	1
	Granja Laura	6		La Granjita	2
	Granja San Luis	4		Las Palmas (Santiesteban)	6
	La Casita	6		Localidad sin Nombre (Esteban Tejeda)	4
	La San Martina	4		Localidad sin Nombre (José Deras Ríos)	5
	La Soledad	6		Localidad sin Nombre (Primitivo Ochoa)	1
	Lienzo Charro la San Martina	1		Los Corrales	107
	Localidad sin Nombre (Adrián Núñez Huerta)	4		María Dolores	2
	Localidad sin Nombre (Antonio Puente)	7		Pókar de Ases	6

(Continuación) Localidades con población en riesgo económico.

NIVEL	NOMBRE DE LOCALIDAD	NO. HAB.	NIVEL	NOMBRE DE LOCALIDAD	NO. HAB.
<b>MUY BAJO</b>	Localidad sin Nombre (Bodega Blanca)	5	<b>BAJO</b>	Praxedis G. Guerrero Viejo	160
	Localidad sin Nombre (Luis Viera Gámiz)	3		San Francisco de Calleros	32
	Nicho Ecológico Cedros	8		San Isidro	2
	Predio San Vicente	23		San Juan de Olea	2
	Puente Gavilanes	4	<b>MEDIO</b>	Calera	125
	Rancho Dalila	1		El Nuevo Vergel	27
	Rancho el Mezquite	2		La Nogalera	7
	Rancho el Paraíso	1		Santa Cruz del Río	58
	Rancho la Cruz de Orozco	4	<b>ALTO</b>	La Joya (Alcalde)	34
	Rancho la Presa de Navacoyán	6		La Puerta de Santiago Bayacora (Puerta Chica)	122
	Rancho la Soledad (El Capi)	4		San José del Molino	424
	Rancho los Cuevas	4		Cinco de Mayo	2465
	Rancho los Pelícanos	9	<b>MUY ALTO</b>	El Arenal (San Jerónimo)	940

(Continuación) Localidades con población en riesgo económico.

NIVEL	NOMBRE DE LOCALIDAD	NO. HAB.	NIVEL	NOMBRE DE LOCALIDAD	NO. HAB.
MUY BAJO	Rancho Revueltas	17	<b>MUY BAJO</b>	El Pueblito	602
	Rancho Tarahumara (Las Fresas)	4		La Ferrería (Cuatro de Octubre)	1945
	San Felipe	6		San Miguel de las Maravillas de Abajo	122
	San Isidro	18	<b>POBLACIÓN EN RIESGO ECONÓMICO</b>	7239	