



**UNIVERSIDAD VERACRUZANA**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**REGIÓN VERACRUZ**

**POSGRADO**

**PROYECTO DE INTERVENCIÓN PROFESIONAL**

**ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE INUNDACIÓN EN  
LA CIUDAD DE MISANTLA, VER**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA APLICADA**

**PRESENTA:**

**Raúl Efrén Ibáñez Reguera**

**DIRECTOR DE PROYECTO:**

**DR. SERGIO AURELIO ZAMORA CASTRO**

**BOCA DEL RÍO, VERACRUZ.**

**ENERO 2016.**

## Agradecimientos

A mis padres y hermano, que sin dudarlos me han brindado su apoyo incondicional, no solo en mis estudios sino en todo el trayecto de mi vida.

Al Dr. Sergio Zamora, quien me apoyó desde antes de comenzar mis estudios de posgrado y fungió como una guía académica a seguir.

A mis amigos de la Facultad de Ingeniería, del Posgrado, del Laboratorio y profesores, porque son ellos quienes están siempre presentes en los momentos difíciles y me muestran el lado bueno de la vida.

Al CONACyT, por el apoyo económico, que sin duda, es parte fundamental para un proceso educativo.

## Resumen

Los eventos de inundación son considerados dentro de las amenazas naturales de mayor recurrencia en el mundo.

La importancia que tienen las obras de protección contra inundaciones se basa en el hecho de que durante muchos años los fenómenos meteorológicos que han atacado territorio nacional han provocado grandes desastres a las poblaciones establecidas cerca de los ríos, lo cual, como ya se mencionó, han dejado cifras alarmantes no solo en daños materiales sino que también han cobrado un gran número de vidas. Estas zonas al ser atacadas frecuentemente por estos fenómenos meteorológicos se ven afectadas en sus actividades agrícolas y pequeñas industrias lo que ocasiona que difícilmente sean zonas capaces de tener un desarrollo económico.

La cartografía de las zonas con peligro de inundaciones, es una tarea de suma importancia para preservar la vida y las propiedades en muchas partes del planeta, debido a que este tipo de peligro natural afecta a regiones muy diferentes en casi todo el mundo.

En este proyecto el programa ArcGis permitirá trabajar sobre las curvas de nivel dadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) a fin de conocer la topografía que presenta el río Misantla a la altura de la ciudad de igual nombre. Una vez teniendo las secciones transversales del río, se utilizarán los datos necesarios en el programa Hec-Ras a fin de conocer el área de inundación, el mapa de velocidades y el mapa de riesgo que presentará la zona de Misantla bajo condiciones dadas de un gasto máximo además de incluir una propuesta de protección de los márgenes del río a la altura de la ciudad de Misantla

## Abstract

Flood events are considered within the natural hazards most often mentioned in the world.

The importance of the works of flood protection is based on the fact that for many years the meteorological phenomena that have attacked the country have caused major disasters to the populations established near rivers, which, as already mentioned, have left alarming figures, not only property damage but have also claimed many lives. These areas, often attacked by these weather events, are affected in their agricultural activities and small industries which causes this areas to be hardly able to have economic development.

The mapping of flood hazard zones is a task of utmost importance to preserve the life and property in many parts of the world, because this type of natural hazard affects many different regions in almost all the world.

In this project the ArcGIS program will work on the grid given by the National Institute of Statistics and Geography (INEGI) in order to know the topography that presents the Misantla river at the city of the same name. After taking the cross sections of the river, the necessary data will be used in the Hec-Ras program to calculate the floodplain, the velocity map and the map of risk that will present the city of Misantla under given conditions of an maximum flow and includes a proposal to protect the banks of the river up to the city of Misantla

## Índice

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>1</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>2</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>Índice</b> .....	<b>4</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>6</b>
<b>Lista de Tablas</b> .....	<b>8</b>
<b>1. Generalidades</b> .....	<b>9</b>
1.1. Introducción .....	9
1.2. Objetivos .....	12
1.3. Justificación .....	13
1.4. Antecedentes .....	14
1.4.1. Antecedentes hidrográficos del río Misantla .....	14
1.4.2. Antecedentes históricos de inundaciones en el río Misantla .....	15
1.5. Factibilidad del proyecto .....	16
<b>2. Revisión literaria</b> .....	<b>18</b>
2.1. Ríos.....	18
2.1.1. Curso.....	18
2.1.2. Cauce .....	19
2.1.3. Caudal.....	21
2.2. Inundación .....	21
2.2.1. Determinación del riesgo por inundación .....	23
2.3. Análisis de Datos .....	26
2.3.1. Aforo de corrientes .....	27
2.3.2. Estimación del gasto en estado permanente.....	28
2.3.3. Distribución de la velocidad en una corriente en perfil y sección .....	29
2.3.4. Coeficiente de rugosidad de Manning .....	30
2.4. Modelos hidrológicos .....	30

2.5.	SIG.....	31
2.5.1.	Evaluación de desastres usando herramientas SIG.....	32
2.5.2.	Antecedentes uso del SIG en Inundaciones.....	33
2.6.	Hec-GeoRas .....	35
2.7.	Modelo de simulación Hec-Ras.....	36
2.7.1.	Aplicación del modelo.....	39
2.8.	Resumen de los pasos a seguir .....	40
2.9.	Estudios geotécnicos seguir .....	41
2.9.1.	Estratigrafía .....	43
<b>3.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>46</b>
3.1.	Trabajos previos en ArcGis.....	46
3.1.1.	Cartografía .....	46
3.2.	Trabajo en Hec-Ras .....	51
3.3.	Post-procesamiento en ArcGis.....	54
3.4.	Estructuras de protección .....	58
3.4.1.	Profundidad de desplante.....	58
3.5.	Bordo como propuesta de protección del margen del rio.....	59
<b>4.</b>	<b>Discusión y Conclusiones .....</b>	<b>66</b>
4.1.	Discusión .....	66
4.2.	Conclusiones.....	67
4.3.	Trabajo Futuro.....	67
	<b>Referencias .....</b>	<b>69</b>
	<b>Anexo A.....</b>	<b>72</b>
	<b>Anexo B .....</b>	<b>74</b>

## Índice de Figuras

4.4.	Figura 2.1.- Representación del cauce. (Enciclopedia.us.es) .....	20
4.5.	Figura 2.2.- Zonas límites de intensidad. (Choquehuanca 2012).....	24
4.6.	Figura 2.3.- Esquema conceptual de la modelización. (Torres y González 2009).....	39
4.7.	Figura 2.4.- Localización de los sondeos .....	41
4.8.	Figura 2.5.- Boleos en el lecho del rio.....	42
4.9.	Figura 3.1.-Curvas de nivel otorgadas por el INEGI.....	46
4.10.	Figura 3.2.- Mapa de pendientes .....	47
4.11.	Figura 3.3.- Formato TIN y localización de la zona de estudio .....	48
4.12.	Figura 3.4.- Caracterización de la zona de estudio .....	50
4.13.	Figura 3.5.- Secciones importadas.....	51
4.14.	Figura 3.6.- características de una sección transversal .....	52
4.15.	Figura 3.7.-Perfil longitudinal de las secciones. ....	52
4.16.	Figura 3.8.- Superficie total abarcada sobre el terreno .....	53
4.17.	Figura 3.9.- Mapa de inundación.....	54
4.18.	Figura 3.10.- Mapa de velocidades.....	55
4.19.	Figura 3.11.- Mapa de riesgo. ....	56
4.20.	Figura 3.12.- Zonas de riesgo en la ciudad de Misantla.....	57
4.21.	Figura 3.13.- Imagen topográfica de la zona de estudio .....	60
4.22.	Figura 3.14.- Sección en km 0+060. ....	60
4.23.	Figura 3.15.- Sección en km 0+120. ....	61
4.24.	Figura 3.16.- Sección en km 0+180. ....	61
4.25.	Figura 3.17.- Sección en km 0+280. ....	61
4.26.	Figura 3.18.- Sección en km 0+340. ....	62
4.27.	Figura 3.19.- Sección en km 0+580. ....	62
4.28.	Figura 3.20.- Sección en km 0+800. ....	62

4.29.	Figura 3.21.- Sección en km 0+1040 .....	63
4.30.	Figura A.1.- Perfil de velocidades .....	72
4.31.	Figura A.2.- Perfil de flujo.....	72
4.32.	Figura A.3.- Perfil de área .....	73
4.33.	Figura A.4.- Perfil de profundidad hidráulica .....	73
4.34.	Figura B.1.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-1, 0-0.60m .....	74
4.35.	Figura B.2.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-1, 0.60- 2.30m .....	75
4.36.	Figura B.3.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-1, 2.30- 3.50m .....	75
4.37.	Figura B.4.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-2, 0.00- 0.80m .....	76
4.38.	Figura B.5.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-2, 0.80- 1.50m .....	76
4.39.	Figura B.6.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-2, 1.50- 2.30m .....	77
4.40.	Figura B.7.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-2, 2.30- 3.50m .....	77
4.41.	Figura B.8.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-3, 0.00- 0.80m .....	78
4.42.	Figura B.9.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-3, 0.80- 1.50m .....	78
4.43.	Figura B.10.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-3, 1.50- 2.30m .....	79
4.44.	Figura B.11.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-3, 2.30- 3.50m .....	79
4.45.	Figura B.12.- Perfil estratigráfico PCA-1 .....	80
4.46.	Figura B.13.- Perfil estratigráfico PCA-2 .....	81
4.47.	Figura B.14.- Perfil estratigráfico PCA-3 .....	82



## Índice de Tablas

4.48.	Tabla 2.1.- Criterios para determinación de intensidad de inundación (INETER/COSUDE, 2005) .....	24
4.49.	Tabla 2.2.- Ecuaciones semi-empíricas .....	30
4.50.	Tabla 2.3.- Ubicación de los sondeos .....	41
4.51.	Tabla 3.1.- Rangos de pendiente Lugo Hupp .....	47
4.52.	Tabla 3.2.- Recomendaciones de profundidad de desplante .....	58
4.53.	Tabla 3.3.- Capacidad carga admisible para diferentes profundidades de desplante (Df). .....	59
4.54.	Tabla 3.4.- Variables de entrada del software GEO5 .....	64
4.55.	Tabla 3.5. Resultados del análisis de la propuesta geométrica. ....	65
4.56.	Tabla B.1.- Distribución de boleos .....	83

## Capítulo 1

### Generalidades

#### 1.1. Introducción

Los recursos naturales deben de mantenerse y desarrollarse, pero hay que tener siempre presente que la falta de control de esos recursos puede ser causa de desastres o contribuir a que se produzcan.

Hoy en día, los desastres naturales tienen más cobertura mediática. Sin embargo, estos eventos no son nada nuevo. En efecto, los desastres naturales han influido en el curso de la historia a través del tiempo, generando hambre, pérdida de vidas y, en casos extremos, la destrucción de civilizaciones enteras. Bajo la definición de desastre como “un evento concentrado en tiempo y espacio, en el cual la población, o parte de ella, sufre un daño severo e incurre en pérdidas para sus miembros, de manera que la estructura social se desajusta y se impide el cumplimiento de las actividades esenciales de la sociedad afectando, el funcionamiento vital de la misma” (CENAPRED, 2009), estos eventos pueden clasificarse por su tipo y magnitud en desastre:

- Por actividad volcánica.
- Por actividad de un ciclón.
- Por sismo.
- Por incendio.
- Por helada.
- Por tsunami.
- Por lluvias e inundaciones, entre otros.

Por la necesidad que constituye un recurso tan vital como lo es el agua, muchos poblados se han establecido en zonas de temporal y cerca de cauces de ríos donde es fácil obtener este recurso con el único fin de producir lo que para ellos es una industria importante como lo es la agricultura, la cual es capaz de crear una próspera forma de vida para sus habitantes y ha hecho de estos poblados ciudades importantes productoras de una gran parte de los alimentos de cultivo que se comercializan en ciudades más grandes.

Debido a su situación geográfica y a sus inmensos litorales, la República Mexicana se ve afectada a menudo por fenómenos meteorológicos que se proyectan desde diferentes áreas ciclogénicas o generadoras de huracanes.

Todos los años, durante la temporada de lluvias y especialmente entre los meses de Julio y Septiembre, nuestro país recibe una fuerte influencia de las perturbaciones ciclónicas que se originan en el Caribe o en el Pacífico meridional. Estos fenómenos meteorológicos originan abundantes lluvias en gran parte del territorio nacional, provocando avenidas extraordinarias en algunos de los ríos que ocasionan desbordamientos y consecuentemente inundaciones. Los daños a centros de población, áreas de cultivos y obras de infraestructura, son a veces cuantiosos, llegando a registrarse en ciertos casos pérdidas de vidas.

Los eventos de inundación son considerados dentro de las amenazas naturales de mayor recurrencia en el mundo. La forma de realizar estudios de este tipo de eventos dependerá no solo de las características específicas de cada inundación sino también de la disponibilidad de recursos técnico-económicos para efectuarlo (García y López, 1999)

El hombre ha tratado siempre por uno u otro método, evitar los daños de las inundaciones, pero el aumento de la población y de los valores de la propiedad en los terrenos amenazados ha atraído, en años recientes, una mayor atención al

problema, por lo que se ha tenido que pensar en una solución para la seguridad de estas poblaciones.

La importancia que tienen las obras de protección contra inundaciones se basa en el hecho de que durante muchos años los fenómenos meteorológicos que han atacado territorio nacional han provocado grandes desastres a las poblaciones establecidas cerca de los ríos, lo cual, como ya se mencionó, han dejado cifras alarmantes no solo en daños materiales sino que también han cobrado un gran número de vidas. Estas zonas al ser atacadas frecuentemente por estos fenómenos meteorológicos se ven afectadas en sus actividades agrícolas y pequeñas industrias lo que ocasiona que difícilmente sean zonas capaces de tener un desarrollo económico.

Normalmente el comportamiento de los ríos al rebasar la capacidad de conducción del cauce principal consiste en que las aguas desbordadas corren por la planicie de inundación siguiendo la dirección general del río y regresan a él en cuanto sus aguas empiezan a descender; o pueden quedar detenidas permanentemente en zonas bajas hasta que se evaporan o infiltran; o bien, pueden llegar a reconocer otros cauces.

Al ocurrir un desbordamiento, junto con el agua sale del cauce una gran cantidad de sedimentos. Las partículas más grandes se depositan rápidamente en cuanto disminuye la velocidad del agua que las transporta y por ello las orillas de los ríos tienen una elevación mayor que la planicie adyacente.

## 1.2. Objetivos

### Objetivo general

Realizar un análisis de llanura de inundación y evaluación de riesgos de un tramo de río usando el modelo dimensional hidráulico Hec-Ras, ArcGis y Hec-GeoRas que es una interface entre el Hec-Ras y ArcGis.

### Objetivos particulares

En base a la información proporcionada por la Gerencia Regional Golfo Centro de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) se analizará y procesará la información con el fin de realizar los siguientes estudios

- Estudio de geotecnia en la zona del proyecto.
- Estudio Hidrológico a fin de conocer los niveles de inundación que se puedan tener en la localidad y los gastos de escurrimiento del río Misantla.
- Análisis de la llanura de inundación mediante el uso de una modelo unidimensional de flujo constante.
- Elaboración de mapas riesgo por efecto de inundaciones
- Emitir resultados geotécnicos para la colocación de cimentación de diferentes obras de infraestructura de protección en función de los resultados de los estudios de geotecnia.

### 1.3. Justificación

Las inundaciones son un desastre natural importante con un impacto a menudo inconmensurable, afectando anualmente 170 millones de personas en el mundo (Kowalzig, 2008). Por lo tanto, el manejo del riesgo de las inundaciones necesita superar las fronteras nacionales, la ubicación geográfica y las limitaciones socioeconómicas (Degiorgis et al., 2012). La gestión del riesgo de inundación por lo general se divide en la evaluación del riesgo de inundaciones y en la mitigación de las inundaciones (Schanze et al., 2006). Esta distinción toma en cuenta aparte del peligro el impacto que pueda causar, ya que la eliminación total del riesgo no es posible ni eficiente. Indiscutiblemente, las estrategias contra el impacto de las inundaciones a escala regional requiere de la identificación de las zonas expuestas a esta (Tehrany et al., 2013) para proporcionar advertencia oportuna, facilitar una respuesta rápida y disminuir el impacto de posibles eventos de inundación (Kia et al., 2011).

La zona de la cuenca del río Misantla, y en especial la ciudad de Misantla, sufre de una alta susceptibilidad a inundaciones, la cual se agravado en los últimos años debido a las altas precipitaciones causadas por el cambio climático actual. Es de gran importancia la realización de una investigación debido a que se busca analizar y determinar las zonas que presentan riesgos con el fin de prever futuras afectaciones a la población.

En la temporada de lluvias durante el mes de octubre de 1999, se presentaron precipitaciones extraordinarias en la zona norte del estado de Veracruz dentro de la región hidrológica 27 que se localiza en la parte central de la vertiente del Golfo de México y particularmente en las cuencas de los ríos Tuxpan, Cazones, Tecolutla, Bobos (Nautla), Misantla y Colipa. Estas precipitaciones generaron importantes escurrimientos que produjeron graves inundaciones, en zonas agrícolas y centros de población, así como deslizamientos de tierras y rompimiento de cauces.

Los sitios que mayor afectación tuvieron en 1999 ya sea por los niveles de inundación alcanzados por las aguas del río o bien por la acción erosiva de los escurrimientos en las márgenes del cauce y sobre la llanura de inundación fueron entre otras, las siguientes poblaciones: Javier Rojo Gómez, Martínez de la Torre, San Rafael, La Defensa, La Constancia, La Reforma, Misantla, Jicaltepec y Nautla.

La resolución de esta problemática actual podrá ayudar a desarrollar los sectores productivos de la región, evitando pérdidas ocasionadas por las constantes inundaciones, además de proporcionar un grado de seguridad a la población en general, la cual se encuentra afectada por los constantes fenómenos meteorológicos que desencadenan una posible inundaciones en sus hogares.

Buscar solucionar esta problemática ayudará al desarrollo económico de la zona, que a su vez, en forma de escalafón, impulsará de igual manera la economía del Estado de Veracruz.

Por estos motivos es considerada la obra de protección de alta viabilidad y la investigación como aportación al estado de Veracruz y miles de familias Veracruzanos.

### **1.4. Antecedentes**

#### **1.4.1. Antecedentes hidrográficos del río Misantla**

El río Misantla nace en la Sierra de la Magdalena en el Estado de Veracruz, corre en dirección Suroeste -Noreste hasta desembocar en el Golfo de México en la Bahía de las Palmas, después de un recorrido aproximado de 65 Km.

La utilización de sus aguas superficiales están en su mayoría destinadas a actividades como Fuerza Motriz, Industrial, Agropecuario y Domestico. Cuenta con una estación hidrométrica con el número 30-26, de nombre “El Raudal” el cual cuenta con aparatos como escalas, limnógrafos y molinete y el cual un volumen medio anual de 479.3 millones de m<sup>3</sup> (INEGI, 1984).

#### 1.4.2. Antecedentes históricos de inundaciones en el río Misantla

A través de los años la región de Misantla en el estado de Veracruz ha presentado serios problemas de inundaciones ocasionadas por fuertes precipitaciones producidas por tormentas tropicales, bajas presiones atmosféricas y huracanes. El 20 de octubre de 1995 las costas de Veracruz fueron atacadas por el huracán "Roxanne" de una magnitud tal que a su paso dejó grandes desastres afectando en mayor proporción a la ciudad de Misantla debido al desbordamiento del río del mismo nombre. Cuando esta se disipó y como resultado de la interacción de los remanentes de humedad y la incidencia de un frente frío en la región centro-norte del estado de Veracruz, provocó una precipitación pluvial extraordinaria alcanzando su intensidad máxima el día 20, fecha en que se registraron 296.9mm en la estación climatológica "Martínez de la Torre", estimándose una duración de la tormenta de 10 horas en la Cuenca del río Misantla (CONAGUA, 2011). Esta lluvia representa la máxima histórica registrada en dicha estación.

El evento descrito provocó crecientes súbitas principalmente en los ríos Nautla y Misantla. En éste último se registró un gasto máximo de 2,927 m<sup>3</sup>/s en la estación el "Raudal" ubicada un kilómetro aguas arriba de la desembocadura al Golfo de México; estimándose un gasto de 2,250 m<sup>3</sup>/s (Rodríguez, 1997) a la altura de la ciudad de Misantla.

A unos tres kilómetros aguas arriba del puente de Misantla, el bordo de protección existente, fue destrozado por su margen izquierda por la corriente, en una longitud de 300 m, originando con ello que parte de la avenida fuese conducida por el arroyo "Pailte". Este arrollo tiene una capacidad hidráulica reducida, razón por la cual al cruzar la población ocurrieron graves inundaciones en casas-habitación, comercios, etc.

Los daños ocasionados a la población fueron cuantiosos, perjudicando a las beneficiadoras de café, destruyendo 25 casas habitación y dañando otras 48 distribuidas en 13 colonias afectando una población estimada de 8,000 habitantes.



La ocurrencia de crecientes en el verano, producto de los fenómenos meteorológicos que afectan la región, es frecuente y al ingresar a la vertiente costera provocan inundaciones, esto causado en parte por la orografía de la zona, que permite que las precipitaciones generen avenidas con tiempos de concentración muy reducidos, que en promedio son de 4 horas. En los últimos 110 años se tiene el registro de que han afectado la zona de Martínez de la Torre 6 ciclones tropicales en forma directa.

El gasto máximo registrado en un periodo de 32 años en la desembocadura del río Misantla ha sido de 2,988 m<sup>3</sup>/seg., ocurrido en Septiembre de 1986 producto de la interacción de un frente frío con una onda tropical; durante Octubre de 1995 se presentó una avenida similar que alcanzó 2,927m<sup>3</sup>/seg., ocasionada por los remanentes de humedad del huracán Roxanne al interactuar con un frente frío, como se mencionó anteriormente.

Se tiene conocimiento de que en 1955 se presentó una creciente de gran magnitud que provocó daños considerables producto de la incidencia de los huracanes Gladys (6 de septiembre), Hilda (18 de septiembre) y Janett (29 de septiembre).

### **1.5. Factibilidad del proyecto**

En este proyecto el programa ArcGis permitirá trabajar sobre las curvas de nivel dadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) a fin de conocer la topografía que presenta el río Misantla a la altura de la ciudad de igual nombre.

Una vez teniendo las secciones transversales del río, se utilizarán los datos necesarios en el programa Hec-Ras a fin de conocer el área de inundación que presentará la zona de Misantla bajo condiciones dadas de un gasto máximo.

El modelo de simulación hidráulica en Hec-Ras se basa en ecuaciones diferenciales determinísticas, que al ser solucionadas permiten pronosticar la dinámica de los niveles de agua en los eventos hidrometeorológicos extremos de inundación, definiendo las cotas de inundación a través de perfiles transversales, simulando de manera aproximada el comportamiento de la dinámica del recurso hídrico y del cauce con características de: Secciones mojadas variables con cualquier geometría a lo largo del cauce, diferentes tipos de rugosidad para ciertas partes del perfil mojado, distintas profundidades del agua y con caudal variable a lo largo del cauce en condiciones de régimen de flujo sub-crítico o súper-crítico con efectos hidráulicos debido a obstáculos transversales naturales o artificiales en el cauce.

## Capítulo 2

### Revisión Literaria

#### 2.1. Ríos

Un río es una corriente natural de agua que fluye con continuidad. Posee un caudal determinado, rara vez es constante a lo largo del año, y desemboca en el mar, en un lago o en otro río, en cuyo caso se denomina afluente. La parte final de un río es su desembocadura. A la hora de estudiar un río concreto se pensará en tres fenómenos: el curso, el cauce y el caudal.

##### 2.1.1. Curso

El curso de un río es el recorrido desde su nacimiento hasta su desembocadura. Los cursos fluviales tienen longitudes muy diferentes. Se distinguen tres tramos en el curso de un río: curso alto, curso medio y curso bajo.

*Curso alto.*- Incluye la cabecera y primeros kilómetros de recorrido del río, predominan las grandes pendientes y las aguas discurren rápidamente. El cauce es estrecho y poco profundo. Las aguas tienen tanta fuerza que excavan profundos desfiladeros o gargantas. En las zonas con desniveles pronunciados se forman cascadas o cataratas.

*Curso medio.*- Se encuentran las pendientes más suaves con valles más abiertos y planos. Las aguas bajan más lentas por lo que se forman ondulaciones llamadas meandros.

*Curso bajo.*- Disminuye la velocidad de las aguas porque el desnivel es pequeño y el río deposita los materiales que arrastra en suspensión y forma, a veces, llanuras aluviales, que son terrenos muy fértiles.

La dirección de un río se determina mirando desde la cabecera hasta su desembocadura. Así se distingue la margen izquierda y la margen derecha.

### 2.1.2. Cauce

El cauce de un río es el lugar concreto por el que transcurre. Normalmente es sinónimo de lecho del río y en él se distinguen cuatro elementos, tal como se representa en la Figura 2.1: el canal, el lecho menor, el lecho mayor y el lecho mayor esporádico.

*Canal.*- Es la incisión más profunda del río, la última en ser abandonada por las aguas cuando el río se seca. Tiene forma de arqueta y es la zona donde las aguas corren con mayor velocidad, por lo que suele tener elementos más grandes que las orillas.

*Lecho menor.*- Es el que cubren las aguas entre las épocas de caudal intermedio. Sus márgenes están claramente definidas. En él puede existir una alternancia de fondos hundidos y elevados. Los fondos hundidos pueden formar pozas, si están cerrados, o surcos si se extienden longitudinalmente. Los fondos altos forman umbrales, y llegan a hacer una ruptura de pendiente en el que se forma un rápido. Algunos fondos altos están emergidos y forma islas fluviales.

*Lecho mayor.*- Es el que cubren las aguas durante las épocas de máximo caudal anual. Esta zona se inunda todos los años, pero durante unas pocas semanas. Aquí predominan los procesos de acumulación, y los de erosión. Esta acumulación se hace, mayoritariamente, cerca de los márgenes del lecho menor, hasta el punto de que en algunos sitios puede presentar un perfil alomado, y tener cierta contrapendiente con relación al resto del lecho del río. Estas contrapendientes

pueden aislar pequeñas depresiones longitudinales que se inundan durante las crecidas, antes que por la arroyada del agua, por infiltración. Sus márgenes son conocidos e identificables, pero están mucho más desdibujados que los del lecho menor.

*Lecho mayor esporádico.*- Es aquella zona que se inunda en las grandes crecidas, las cuales se dan recurrentemente, pero con ciclos de varios años entre una y otra, y en son ocasiones seculares. Esta zona está colonizada por la vegetación, incluso suele estar cultivada, ya que sus limos son muy feraces. En muchos países, imprudentemente, se están construyendo viviendas dentro de los márgenes de estos lechos, por lo que suelen sobrevenir inundaciones y catástrofes que afectan a las personas, las vías de comunicación y la economía. Sus márgenes están muy difuminados, aunque en condiciones naturales es posible determinarlos. Cuando los ciclos de inundación son muy largos no tienen competencia suficiente para marcar el lecho, y, además, otros procesos morfogenéticos borran sus huellas. En ciudades que sufren inundaciones esporádicas, pero recurrentes, se pueden ver marcadas, la altura a la que llegó tal inundación con indicación del año, y es que ese punto se encuentra dentro del lecho mayor esporádico del río.

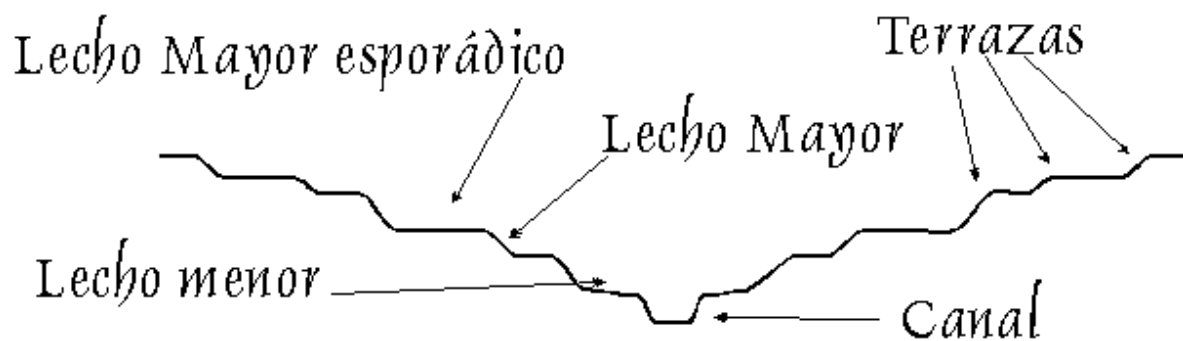


Figura 2.1.- Representación del cauce. (Enciclopedia.us.es)

### 2.1.3. Caudal

El caudal de un río es la cantidad de agua que pasa por un punto determinado en un tiempo concreto. Este dato se toma en las estaciones de aforo, y se expresa en litros o en metros cúbicos por segundo (l/seg o m<sup>3</sup>/seg). En condiciones regulares los ríos ganan caudal a medida que descienden. Pero además, a lo largo del año tienen crecidas, o avenidas, y estiajes, es decir épocas en las que el caudal es mínimo. Cuándo y porqué se producen las crecidas y los estiajes dependen del régimen de alimentación fluvial. Básicamente existen tres tipos de alimentación fluvial: glaciár, pluvial y nival, pero también existen regímenes mixtos: nival de transición, nivopluvial, pluvionival y los pluviales con más de una estación lluviosa. Salvo los muy cortos lo normal es que los ríos tengan, a lo largo de su curso, diversos tipos de alimentación.

## 2.2. Inundación

Las inundaciones frecuentemente se producen en zonas llanas, donde suelen existir importantes asentamientos humanos en los cuales existe toda una actividad económica, ya sea de tipo industrial, agropecuaria o de servicios y, por lo tanto, cuando se produce un evento de esta naturaleza, las pérdidas humanas, socioeconómicas e incluso ambientales suelen ser muy elevadas.

Las inundaciones extremas se caracterizan por la liberación de un gran volumen de agua sobre el paisaje en un corto período de tiempo (Baynes, et al., 2015).

En el análisis de daños producidos por inundación, un primer paso es clasificar los tipos de perjuicios ocasionados. Para ello existen varias clasificaciones, pero una de las más usuales es la presentada por Nascimento et al (2007) y Jonkman et al (2008). En dichos trabajos, se definen dos tipos de daños: los tangibles y los intangibles. Los primeros son los que se miden con base en un

valor monetario, mientras que los segundos no pueden ser medidos en tales términos, al menos de manera sencilla.

Los daños tangibles se dividen en dos subtipos: los directos, producidos por contacto con el agua o por sumersión, y los indirectos, que son causados por la interrupción de las interrelaciones físicas y económicas. Éstos incluyen, por ejemplo, costos por el desalojo del agua, la interrupción del transporte carretero y de servicios públicos, pérdidas en salarios y en beneficios de los negocios, entre otros.

La cartografía de las zonas con peligro de inundaciones, es una tarea de suma importancia para preservar la vida y las propiedades en muchas partes del planeta, debido a que este tipo de peligro natural afecta a regiones muy diferentes en casi todo el mundo.

### Razones del incremento anual de pérdidas debido a inundaciones

- Incremento de la población en áreas marginales con altos niveles de amenaza: urbanización informal; muchos sitios “inundables” presentan “ventajas” para la localización de industrias, comercio y construcción de vivienda; (accesibilidad, costos menores)
- Trabajos de ingeniería “recuperan” áreas inundable o modifican geometría de las llanuras de inundación; falsa sensación de seguridad relacionada con medidas de mitigación estructural.

La extensión área de una inundación y la profundidad de la capa de agua están controladas por la magnitud de la descarga y la configuración de la topografía local.

Aspectos críticos para el monitoreo de inundaciones.

- Profundidad del agua.
- Duración de la inundación.
- Área inundada.
- Velocidad de la inundación.
- Frecuencia de la inundación.
- Descarga y flujo máximo.
- Tasa de elevación.
- Tiempo del flujo máximo.

### 2.2.1. Determinación del riesgo por inundación

Riesgo es la probabilidad de que se produzcan pérdidas socio-económicas en un determinado momento y en un área del territorio determinada, a causa de una amenaza.

La base para aplicar las medidas de apoyo que minimizan los riesgos, es conocer las zonas afectadas y la magnitud del evento hidrometeorológico durante una inundación, con el mayor detalle posible.

Respecto a la determinación de la zona afectada, actualmente la herramienta principal son los mapas de riesgo.

#### Tipos de mapas

**Mapas de áreas inundables:** estos definen el área potencialmente afectada por las inundaciones. Mediante la modelación se determina si un punto de la cuenca se verá o no afectado.

**Mapas de peligrosidad (riesgo) por inundación:** dentro de esta categoría se encuentran los mapas que muestran alguna característica como velocidad o



tirante, los cuales están directamente relacionados con el efecto en la población e infraestructura.

Los umbrales entre los niveles de intensidad alta, media y baja, han sido definidos considerando la peligrosidad que una determinada columna de agua puede significar para la infraestructura o las viviendas y la vida de los pobladores (Gilard, 1996). En la Tabla 2.1 se presentan los rangos definidos para cada nivel de intensidad para inundaciones y en la Figura 2.2 se muestra la representación gráfica del criterio de inundación dinámico.

Tabla 2.1.- Criterios para determinación de intensidad de inundación (INETER/COSUDE, 2005)

Niveles de intensidad	Profundidad del flujo (H) (m) (inundaciones estáticas)	Profundidad x vol. de flujo (m <sup>2</sup> /s) (inundaciones dinámicas)
Alto	$H \geq 1.0$	$H*V \geq 2$
Medio	$0.5 \leq H < 1.0$	$0.5 \leq H*V < 2$
Bajo	$0.25 \leq H < 0.5$	$H*V < 0.5$ y $H \geq 0.25m$

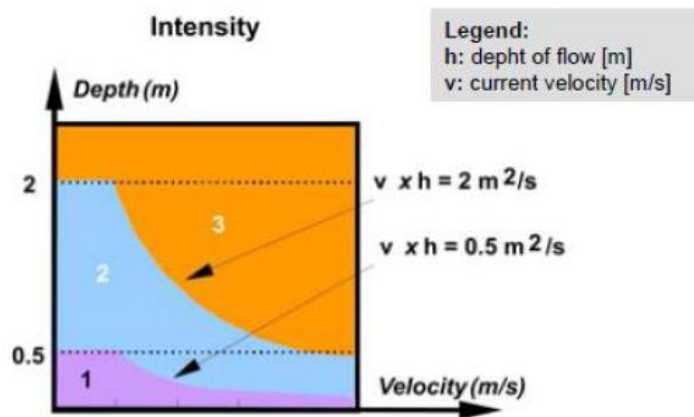


Figura 2.2.- Zonas límites de intensidad. (Choquehuanca 2012)

Las *inundaciones de alta intensidad* corresponden a aquellas que presentan profundidades de flujo mayores a 1m o el producto resultante de la velocidad por altura ( $V*H$ ) es mayor a 2 m<sup>2</sup>/s. Los daños causados por una inundación de alta intensidad generalmente son altos para la economía.

Las *inundaciones de media intensidad* son aquellas con altura (H) de agua entre 0.5 y 1m o el producto resultante de la velocidad por altura ( $V \cdot H$ ) entre 0.5 y 2  $m^2/s$ . Los daños económicos y a la población son menores que en el caso de la inundación intensa, pero no despreciables.

Las inundaciones de baja intensidad corresponden a aquellas con profundidad del flujo superiores a 0.25m pero inferiores a los 0.5m, o  $V \cdot H$  menor a 0.5  $m^2/s$ . Los daños asociados son generalmente leves, no se esperan pérdidas en vidas humanas, aunque sí pueden darse pérdidas en áreas de cultivo y animales.

El conocimiento de las zonas con diferentes niveles de amenaza es utilizado en los procesos de ordenamiento y planificación territorial, por lo que estos deben representar el uso que se le puede dar y los daños potenciales a que este uso estaría expuesto.

Por su posible influencia en la generación de daños a personas, edificaciones o infraestructuras, el análisis deberá completarse con la catalogación de puntos conflictivos y la localización de las áreas potencialmente afectadas por fenómenos geológicos asociados a precipitaciones o crecidas.

Se considerarán puntos conflictivos aquellos en los que, a consecuencia de las modificaciones ejercidas por el hombre en el medio natural o debido a la propia geomorfología del terreno, pueden producirse situaciones que agraven de forma substancial los riesgos o los efectos de la inundación. Se tendrán especialmente en cuenta los puntos de los cauces por los que, en caso de avenida, han de discurrir caudales desproporcionados a su capacidad, y aquellos tramos de las vías de comunicación que puedan verse afectados por las aguas.

### 2.3. Análisis de los Datos

*Gasto máximo ordinario:* Es el mayor gasto de los ordinarios de la muestra y que por su magnitud delimitan los datos de gastos máximos registrados de las avenidas de la corriente, generalmente valores anuales. Existen dos tendencias o comportamientos, una que obedece a condiciones de precipitaciones importantes, que son las más frecuentes y que dan origen a las avenidas ordinarias y la otra, a condiciones de precipitaciones extremas generadoras de avenidas extraordinarias menos frecuentes. Este gasto máximo ordinario, frontera entre una y otra tendencia, generalmente incide con el periodo de retorno de 5 años de acuerdo al artículo 3° de la Ley de Aguas Nacionales.

En la determinación del gasto máximo ordinario, se presentan dos posibles condiciones; la primera que se disponga de información hidrométrica en un periodo no menor a 10 años, o que se carezca de ella. Por lo que será necesario utilizar métodos indirectos y con ayuda de datos de lluvias máximas anuales con una duración de 24 horas y algún modelo de lluvia-escorrentamiento

- Cuando se tienen datos hidrométricos de gastos máximos anuales, se aceptará el análisis de la muestra por métodos estadísticos y probabilísticos los cuales proporcionan elementos de juicio satisfactorios para definir el gasto máximo ordinario de la corriente.
- Cuando no se cuenta con datos hidrométricos, el análisis se hará con métodos indirectos, lo que implica el uso de modelos de lluvia-escorrentamiento en base a teorías hidrológicas convencionales establecidas.

*Periodo de Retorno (Tr):* También es llamado intervalo de recurrencia o frecuencia y se define como el número promedio de años dentro del cual un evento dado es igualado o excedido. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$T_r = \frac{n + 1}{m} \dots \dots \dots (2.1)$$

Donde:

- $m$  = Número de orden de una lista de mayor a menor de los años.
- $n$  = Número de años.

*Longitud del cauce principal (L)*: Es la distancia desde donde la corriente dentro de la cuenca está bien definida, hasta la salida de la misma.

*Pendiente del cauce (S)*: Es uno de los indicadores más importantes del grado de respuesta de una cuenca, dado que esta pendiente varía a lo largo del cauce, es necesario definir una pendiente media.

En general la aplicación de la Hidrología Superficial en el diseño, construcción y operación de una obra hidráulica, se puede resumir en encontrar la solución a las tres siguientes cuestiones.

- a) De qué cantidad de agua se dispone en la corriente y cuáles son sus propiedades físicas, químicas y bacteriológicas.
- b) Cuanto volumen de material transporta la corriente.
- c)Cuál es la magnitud de las avenidas o crecidas en la corriente y cuando se presentan.

### 2.3.1. Aforo de corrientes

La medición de la velocidad en una corriente, la información geométrica de la sección donde se mide y el registro de los valores de nivel del agua, proporcionan la base para determinar el volumen que pasa por el cauce en la unidad de tiempo; a este proceso de cuantificación se le da el nombre de aforo y se puede aplicar tanto en ríos como en canales.

Para evitar confusiones, es conveniente en este punto definir las referencias de uso común asociadas con la dirección del flujo en una corriente: aguas arriba se refiere a todo lo que se localiza en una dirección contraria a la de la corriente, tomando como referencia alguna sección de control o cualquier tramo de interés; aguas abajo, es todo lo que se encuentra más allá de la sección en dirección coincidente con la corriente.

Los límites laterales serán referenciados como margen izquierda y margen derecha, si nos colocamos con la espalda apuntando hacia la dirección aguas arriba y nuestra visual hacia aguas abajo.

### 2.3.2. Estimación del gasto en estado permanente

Si se considera el estado permanente como condición del flujo en un tramo de río o canal, la expresión del gasto, es decir, el volumen por unidad de tiempo, se define con el apoyo de la expresión:

$$Q = V \cdot A \dots\dots\dots (2.2)$$

Donde:

- Q= es el gasto, en m<sup>3</sup>/s
- V= es la velocidad representativa del flujo, en m/s
- A= el valor de área de la sección del río o canal que es perpendicular a la dirección de la velocidad del flujo, en m<sup>2</sup>.

El valor de área de la sección de un río o canal se obtiene tanto de sus características geométricas, como del nivel del agua en diferentes tiempos. Las características geométricas se pueden determinar por nivelación diferencial en la sección seleccionada para llevar a cabo el aforo. Esta nivelación se tendrá que

hacer cada vez que se presente un evento de escurrimiento de importancia (también se les conoce como avenidas, y no necesariamente implica desborde e inundación), ya que la sección podrá cambiar considerablemente.

### 2.3.3. Distribución de la velocidad en una corriente en perfil y sección

La velocidad en una corriente varía tanto en perfil como en sección. En el perfil, la velocidad cambia rápidamente desde el valor cero en las fronteras rígidas como son las paredes y la plantilla, hasta valores de velocidad máxima, que se encuentra entre el 90 y 95 % del tirante.

Según la teoría de la capa límite, la distribución de la velocidad tiende a ser logarítmica en un conducto a superficie libre; de modo que serán de interés para la medición de la velocidad los siguientes valores porcentuales del tirante o de profundidad (Dingman, 1994):

- Si el tirante es mayor a 0.80 m, entonces se medirá la velocidad en el 20% y en el 80% del tirante, obteniendo la velocidad media por la relación:

$$\bar{v} = \frac{(V_{0.2} + V_{0.8})}{2} \dots \dots \dots (2.3)$$

- Si el tirante es menor que 0.80 m, entonces se considera el 40% del tirante como el punto donde se debe medir la velocidad media.
- El valor de velocidad máxima se ubica por arriba del 85% del tirante.

Al respecto es oportuno describir las diferencias entre tirante y profundidad. El tirante es la distancia que se mide desde el fondo de una sección o canal hasta la superficie libre del agua, mientras que la profundidad es la distancia que hay entre la superficie libre del agua y los porcentajes del tirante establecidos para definir la velocidad media

### 2.3.4. Coeficiente de rugosidad de Manning

La rugosidad de la superficie se representa por el tamaño y la forma de los granos del material que forma el perímetro mojado y que producen un efecto retardante sobre el flujo. En general, los granos finos resultan en un valor relativamente bajo de  $n$  y los granos gruesos dan lugar a un valor alto de  $n$ .

Se pueden encontrar numerosas fórmulas para expresar el coeficiente de rugosidad de Manning en función del diámetro de las partículas, las cuales tienen la forma  $n = m D^{1/6}$ , donde  $m$  es un factor de escala y  $D$  es un diámetro característico del material del lecho ( $D_{50}$ ,  $D_{75}$ ,  $D_{84}$ ,  $D_{90}$ ) que son, respectivamente, los diámetros correspondientes al 50, 75, 84 y 90% de la curva granulométrica del material del lecho, la Tabla 2.2 muestra las formulas semi-empíricas.

Tabla 2.2.- Ecuaciones semi-empíricas

Autor	Ecuación
Meyer – Peter & Muller, 1948	$n = 0.038 * D_{90}^{1/6}$
Raudkivi, 1976	$n = 0.0411 * D_{65}^{1/6}$
Simons y Senturk, 1976	$n = 0.0389 * D_{50}^{1/6}$
Garde & Raju, 1978; Subramanya, 1982	$n = 0.047 * D_{50}^{1/6}$
Bray, 1979	$n = 0.0593 * D_{50}^{0.179}$

Gutiérrez (2009) demostró en su estudio que las fórmulas semi-empíricas que más se acercan a la realidad en el campo son las de Raudkivi, Simons y Senturk.

### 2.4. Modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos, entendidos como una aproximación al funcionamiento real del ciclo del agua en una cuenca vertiente, se pueden clasificar en físicos y abstractos (Triviño y Ortiz, 2004).

En la modelación, cada elemento de la malla constituye tanto un área de aportación como un tramo de canal, lo que se traduce en una enorme red de tramos o segmentos integrantes (Mobayed, 2001).

Basándose en principios físicos elementales, el criterio de escalado aprovecha la información de los modelos digitales de elevación en formato reticular (raster) para identificar la red de drenaje y parteaguas de sus áreas de aportación.

En un enfoque tradicional la simulación en ríos es realizada mediante el uso de modelos hidrodinámicos en una dimensión (1D). En los casos donde la velocidad y la localización de las fuerzas de acción sobre estructuras deben ser conocidas, un análisis más completo y de mayor complejidad debe efectuarse empleando modelos hidrodinámicos bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D) (Merwade y Cook, 2008). En estos casos la principal limitación se encuentra en la disponibilidad de los datos de ingreso en términos de calidad y cantidad.

Los procesos de recopilación de la información existente y del post-procesamiento de los resultados pueden ser mejor efectuados a través del uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Experiencias en previas investigaciones muestran que un análisis de inundación basado en SIG permite completar la escasez de información y la asistencia durante la validación de los resultados modelados (Peters, 2008).

### **2.5. SIG**

La tecnología del Sistema de Información Geográfica (SIG) es un sistema que por medio de computadoras y datos geográficos ayuda a un mejor entendimiento del medio en que vivimos y nos permite resolver los problemas que diariamente afrontamos.

Hoy en día los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas poderosas y útiles como medios para la representación de información, la visualización y la investigación; o bien en aplicaciones para la toma de decisiones.



La aplicación SIG está compuesta por una base de datos geográfica o espacial, la cual ha sido diseñada e implementada a través de Geodatabase. Este contenedor es un mecanismo de almacenamiento provisto por ArcGIS, el cual está enfocado en generar repositorios geográficos independientes.

Es muy común que el análisis espacial involucre una gran cantidad de fuentes de datos. Estas fuentes de datos son localizadas en diferentes sitios, que pertenecen tal vez a diversas organizaciones. Por ejemplo, en el caso de las áreas de inundación, el análisis involucra datos como volumen de agua superficial, geología e infraestructura, entre otros. Todos estos recursos son localizados en una base de datos de una organización única.

El SIG es usado para diagnosticar sitios de posible desborde y planificar acciones para mitigar la ocurrencia de inundaciones, integrando modelos hidráulicos e hidrológicos así como fotografías aéreas e imágenes por satélite.

### **2.5.1. Evaluación de desastres usando herramientas SIG**

La evaluación en desastres se enfoca en la magnitud del evento de inundación.

Una vez identificada la magnitud de los desastres, el análisis de visualización se usa para estimar la severidad y cuantificar los daños. La magnitud de las pérdidas debidas a la inundación y su distribución en el mapa inundado dependen de factores hidrológicos de uso de la tierra y humanos. Los factores hidrológicos incluyen características de la inundación como la profundidad del agua, propagación de la ola de inundación, duración de la inundación, carga de sedimentos y tiempo. Los modelos de computadora comunes son usados para ayudar en la estimación de las características de estos procesos físicos. Los factores de uso de la tierra incluyen el tipo y valor de la propiedad afectada. Los factores humanos son medidas preventivas tomadas por la población que habita las áreas de desastres.

Tradicionalmente la tecnología del SIG ha sido usada de ayuda en el modelamiento de agua superficial y presentando mapas de inundaciones. Las aplicaciones del SIG están relacionadas a modelos hidrológicos y proveen de funciones para el almacenamiento de datos, el cálculo de los parámetros de ingreso requeridos, manipulación de datos y procesamiento de resultados. Estas aplicaciones, más que mejorar la funcionalidad del modelo, intentan integrar el procedimiento de análisis con el marco de trabajo SIG.

La evaluación de inundaciones ha sido facilitada con SIG mediante la aplicación de modelos espaciales coexistentes.

### **2.5.2. Antecedentes uso del SIG en inundaciones**

La aplicación del análisis multicriterio basado en SIG en el contexto de evaluación de los riesgos de inundación era raro hasta el año 2000.

Un primer intento de utilizar herramientas SIG sobre los riesgos relacionados con el agua se ha presentado en Meja-Navarro et al. (1994). El riesgo se ha estimado para diferentes tipos de desastres (escombros, inundaciones) en varias zonas de Glenwood Springs (Colorado), con el objetivo de definir los usos del suelo idóneos.

En Correia et al. (1999) SIG es reconocido como un poderoso medio para integrar y analizar datos de diferentes fuentes y los mapas de riesgos de inundación fueron provistos para diferentes escenarios de crecimiento urbano, simulando las consecuencias de los casos alternativos.

Black y Burns (2002) presentaron una visión general de los cambios en la estimación del riesgo de inundación en ríos escoceses respecto al tiempo a través del reanálisis de los registros de inundación.

En Zerger (2002) importancia relativa fue introducida en los parámetros de entrada, subrayando la necesidad de conectar el análisis espacial con la toma de decisiones en el mundo real, dirigiendo así los esfuerzos hacia resultados concretos en lugar de limitarse a resolver cuestiones técnicas.

En Schumann et al. (2000) se desarrolló una metodología basada en SIG para el modelado lluvia-escorrentía, mientras que los autores de Liu et al. (2003) incorporaron varios parámetros en su modelo lluvia-escorrentía (pendiente, uso del suelo, tipo de suelo, etc.) con el fin para estimar la distribución espacial de la escorrentía y el tiempo de flujo promedio en las cuencas hidrográficas. Su objetivo era dar una idea sobre los procesos hidrológicos en los ríos de las cuencas y soporte en la gestión del riesgo de inundación.

En Van Der Veen y Logtmeijer (2005) la vulnerabilidad de inundaciones fue vinculada con importantes actividades económicas en las áreas específicas. El análisis combinó información económica de 28 sectores dentro de las fronteras de los eventos de inundación simulados.

En Forte et al. (2005) los autores ampliaron un trabajo previo (Liu et al., 2003) y dividieron una península en el sur de Italia en zonas propensas de diferentes riesgo de inundación. Impusieron capas SIG, tanto geológicas como de información hidrológica. Ellos combinaron información sobre la ubicación de sumideros e información de las inundaciones históricas. Mapas temáticos visualizando esta información han sido apoyados por la geología, mapas de permeabilidad y lluvia, produciendo mapas de riesgo de inundación.

Del mismo modo, los autores de Dewan et al. (2007) desarrollaron mapas del peligro de inundaciones de las cuencas fluviales de Dhaka en Bangladesh, mediante el procesamiento de datos históricos de una inundación importante de 1998 y teniendo en cuenta el efecto interactivo de la cubierta vegetal, la elevación y la geomorfología.

Los eventos de inundación severos acontecidos en el año 2000, 2005 y 2006 en Rumania instaron a la generación de mapas de riesgo de inundación (Aldescu, 2008) para apoyar a los expertos en la gestión de los recursos agua y en la mitigación de inundaciones.

Zonas de riesgo de inundación se han delineado para la Provincia de Tucumán (Argentina), usando el análisis de decisión multicriterio de Fernández y Lutz (2010). Un trabajo detallado sobre el uso del análisis multicriterio para la estimación de la vulnerabilidad de inundaciones también fue presentado en Wang et al. (2011), mientras que en Kourgialas y Karatzas (2011) áreas peligrosas de inundación fueron estimadas mediante la superposición de capas GIS que visualizan la información espacial y del clima. Ecosistemas sensibles y regiones de alto riesgo de peligrosidad en el mundo han sido identificados en De Sherbinin et al. (2012), teniendo en cuenta (entre otros) el impacto de las inundaciones mediante el desarrollo de un modelo de migración neta.

### **2.6. Hec-GeoRas**

Hec-GeoRas es una extensión para ArcGis desarrollada conjuntamente por el Hydrologic Engineering Center (HEC) del United States Army Corps of Engineers y el Environmental System Research Institute (ESRI). Básicamente es un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades especialmente diseñadas para procesar datos georreferenciados que permiten bajo el entorno de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), facilitar y complementar el trabajo con HEC-RAS.

HEC-GeoRas crea un archivo para importar a HEC-RAS datos de geometría del terreno incluyendo cauce del río, secciones transversales. Posteriormente los resultados obtenidos de calados y velocidades se exportan desde HEC-RAS a ArcGis y pueden ser procesados para obtener mapas de inundación y riesgo.

**2.7. Modelo de simulación Hec-Ras**

Respecto al modelo utilizado en la investigación éste corresponde al modelo matemático unidimensional Hec-Ras 4.1.0., software gratuito de origen Estadounidense desarrollado por parte del Cuerpo de Ingenieros de la Armada (US Army Corps of Engineering), donde posee varios programas de computación para la administración de recursos de agua; y en razón al área de estudio de aplicación del modelo.

En el modelo unidimensional Hec Ras (US Army Corps of Engineers, 2010) las ecuaciones de conservación de masa y momento son resueltas por un sistema de ecuaciones linear empleando el esquema de segundo orden de Preissman (Dyhouse y Benn, 2003). El software está fundamentado en la solución de la ecuación de la energía

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \dots \dots \dots (2.4)$$

$$h_e = LS_f + C \left( \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) \dots \dots \dots (2.5)$$

Las pérdidas por fricción son evaluadas mediante la ecuación de Manning

$$I = \frac{n^2 Q^2}{A^{10/3} P^{4/3}} \dots \dots \dots (2.6)$$

Ecuación de transporte promedio

$$S_f = \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \dots \dots \dots (2.7)$$

Las pérdidas por contracción y/o expansión son proporcionales al cambio en las cabezas de velocidad.

$$h_{ce} = C \left( \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right) \dots \dots \dots (2.8)$$

Los valores de C son:

- C = 0.1 en estrechamiento
- C = 0.3 en ensanchamiento

El proceso por el cual se realizan todos los cálculos es el siguiente:

- 1) Suponer  $Y_2$  (Tirantes aguas arriba)
- 2) Determinar  $V_2$  y  $K_2$
- 3) Determinar  $S_f$  y  $h_e$
- 4) Determinar  $Y_2$  y compararlo con el valor supuesto en el paso 1. Repetir el cálculo hasta que el error sea menor que una determinada tolerancia (0.003m)

Calculo de tirante crítico

$$H = WS + \frac{aV^2}{2g} \dots \dots \dots (2.9)$$

Para situaciones de flujo rápidamente variado, como en la entrada a obras hidráulicas o resaltos hidráulicos, Hec-Ras usa también la ecuación de momentum para encontrar la solución.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \dots \dots \dots (2.10)$$

Para flujo no permanente, Hec-Ras resuelve las ecuaciones de conservación de masa y momentum mediante un esquema implícito de diferencias finitas desarrollado por Preissmann y Chen (1973).

El módulo de sedimentos del Hec-Ras permite calcular el transporte de sedimentos mediante diferentes métodos, y para condiciones de concentración,

distribución granulométrica y velocidad de caída de las partículas definidas por el usuario.

Las ecuaciones de transporte incluidas en el modelo son:

- Método de Ackers & White (1973).
- Método de Engelund & Hansen (1972).
- Método de Laursen modificado por Copeland (1989).
- Método de Meyer-Peter & Muller (1948).
- Método de Toffaleti (1968).
- Método de Yang (arenas 1973 y gravas 1984).

Los cambios en el lecho son calculados mediante la solución de la ecuación de continuidad de sedimento (también conocida como ecuación de Exner), bajo tres restricciones: limitantes temporales de depósito y de erosión, y acorazamiento del lecho.

La información mínima necesaria para desarrollar la simulación hidráulica con el software Hec-Ras en un ambiente SIG son las curvas de nivel de la faja del río al menor espaciamiento posible y demás curvas de nivel que pueden estar a mayor espaciamiento para una mejor visualización de la topografía del ámbito del área en estudio,

Otra información necesaria para la aplicación del modelo es la geometría del canal, condiciones de borde, información de cursos tributarios y características de rugosidad del canal. El modelo ofrece dentro de los resultados el nivel de agua para cada sección transversal modelada. Esto permite realizar un análisis de eventos de inundación (Brussel, 2008). A pesar de que el modelo no dispone de herramientas de análisis espacial, los resultados que brinda pueden exportarse a través de una interface con herramientas de SIG (Knebl y Yang, 2005).

Finalmente, el esquema de la modelación del comportamiento de los Perfiles Hidráulicos, así como la obtención de Parámetros Hidráulicos esta dado a la

importancia de dicho sitio y dado también, a la posible ocurrencia de eventos hidrometeorológicos que pueden impactar catastróficamente la región, que a su vez, se relaciona con la necesidad de contar con pronósticos de inundaciones en tiempo real de la dinámica de los niveles de agua del río Misantla, centrando la necesidad en la predicción del riesgo, asociada a la amenaza hidrológica (nivel del agua).

### 2.7.1. Aplicación del modelo

La aplicación del modelo Hec-Ras, para efectos de la investigación constituye tres pasos fundamentales:

1. Crear por medio de herramientas de SIG como ArcGis y la extensión Hec-GeoRas, los modelos digitales de terreno (MDT) con un archivo de importación para Hec-Ras, que contenga información geométrica de las secciones transversales, del cauce y las llanuras de inundación del sistema hídrico del río Misantla.
2. Aplicar la modelización del flujo permanente con el modelo Hec-Ras 4.1.0, el cual genera un archivo de exportación para ArcGis.
3. Generar los resultados de la mancha de agua: superficies de inundación y grids de profundidad.

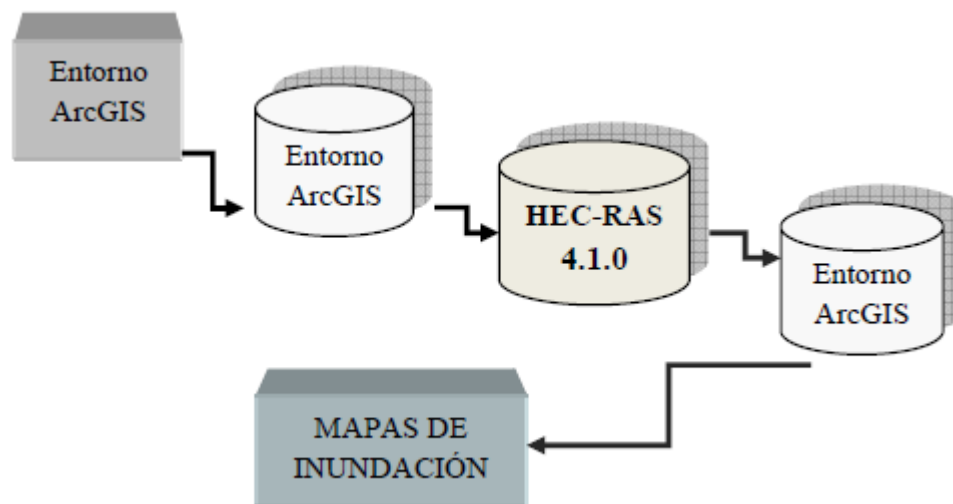


Figura 2.3.- Esquema conceptual de la modelización. (Torres y González 2009)



## 2.8. Resumen de los pasos a realizar

Se detallan a continuación a modo de resumen los pasos a seguir para realizar una simulación de inundación. A lo largo del presente trabajo se desarrollan todos los puntos que aparecen en el siguiente listado:

Pre-proceso:

1. Crear archivo ArcGis.
2. Añadir un Modelo Digital del Terreno en formato TIN (Triangulated Irregular Network).
3. Dibujo del cauce.
4. Dibujo de “banks”: delimitación del cauce principal.
5. Dibujo de “flowpaths”: zonas por donde prevemos que le circulará preferentemente tanto por el cauce principal como por las llanuras de inundación.
6. Creación de secciones transversales.
7. Creación de cauce 3D a partir del cauce que hemos creado en planta con la TIN.
8. Creación de secciones transversales 3D (de forma análoga).
9. Crear archivo para exportar a Hec-Ras.

Cálculo con Hec-Ras:

1. Importar geometría desde Hec-Ras.
2. Editar los datos necesarios para el cálculo en régimen variable (condiciones de contorno, caudal de entrada, duración de la simulación, etc.).
3. Realizar simulación con Hec-Ras.
4. Exportar resultados de Hec-Ras a ArcGis.

Post-Proceso:

1. Abrir el fichero de resultados desde ArcGis.
2. Crear mapas de inundación y de velocidades.
3. Combinar datos de calado y velocidad para obtener mapas de riesgo.

## 2.9. Estudios geotécnicos

Se realizó un estudio de Geotecnia de la zona urbana de Misantla. Se excavaron tres pozos a cielo abierto con retroexcavadora hasta 3.5 m de profundidad (PCA-1 al PCA-3), las coordenadas de los PCA se muestran en la Tabla 2.3 y en la Figura 2.4.

Tabla 2.3.- Ubicación de los sondeos

PCA	Coordenadas UTM
1	724953.62 m E, 2203683.41 m N
2	725436.80 m E, 2204754.52 m N
3	725638.31 m E, 2205827.26 m N

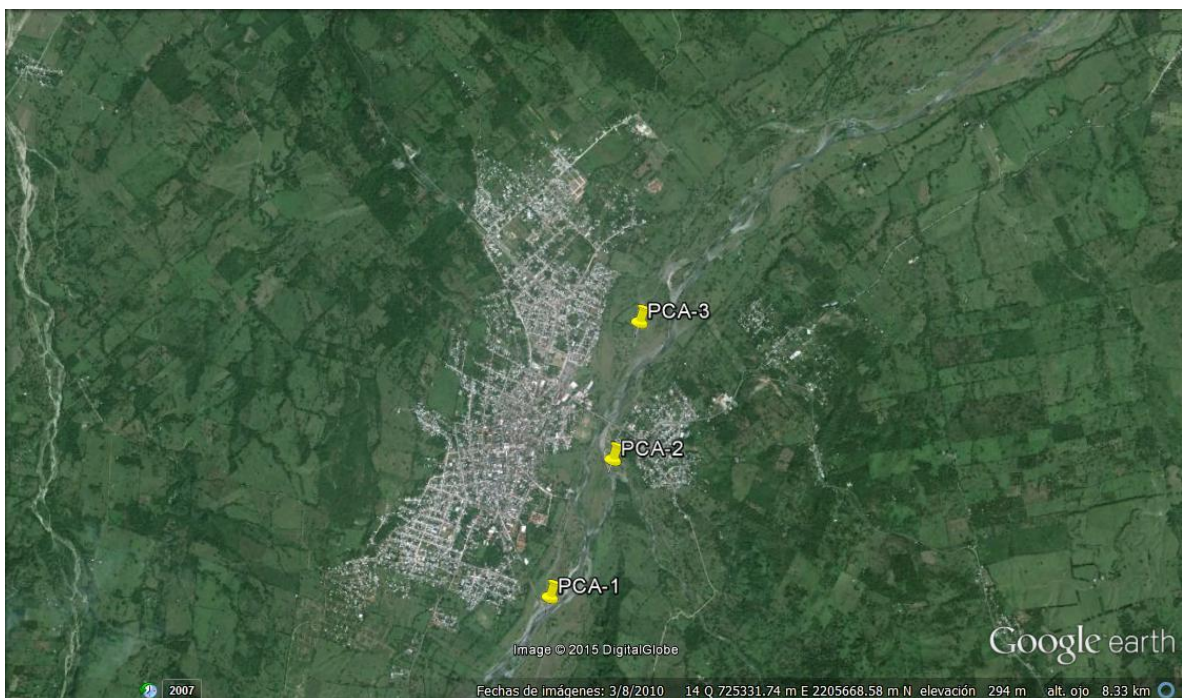


Figura 2.4.- Localización de los sondeos

Los porcentajes de gravas varían entre 1.4 al 25.1% en los PCA's debido a que se encuentran de forma de arrastre por flujos siendo parte complementa de los materiales de azolves. Los mayores porcentajes de gravas se encuentran en los estratos de boleos con gravas y arenas de compacidad suelta a media (GP) y los boleos densos (GP) partiendo desde la superficie. Los menores porcentajes se encuentran en la capa de boleo denso (GP) oscilando entre 0.4 a 0.7%. La mayoría de las gravas encontradas se encuentran de textura fina a media según lo establecido por el criterio por la American Geophysical Union.

En la Anexo B se muestran los resultados con los porcentajes retenidos por tamaño de tamiz, así como el porcentaje de gravas, también se muestra la textura de las gravas (muy fina, fina, medio y gruesa) y en la Figura 2.5 se muestra el estado actual del lecho del rio y la zona aledaña.



**Figura 2.5.- Boleos en el lecho del rio**

En los estratos de boleos de compacidad densa y en los boleos producto de azolves contempla un mayor porcentaje respecto a las porciones de los otros materiales. Los boleos densos se encuentran a partir de una profundidad promedio

de 1.0 m. Se tiene un promedio de porcentaje de boleos del 82.2% en general; un promedio de boleos de 70.13% en el estrato de boleos de arrastre (GP), debido a que se encuentra mezclado con los otros materiales (gravas, arenas, arcillas y limos), y del 94.4% en el estrato de boleos densos (GP). La textura que se presenta son boleos medios a gruesos según el criterio de la American Geophysical Union.

### 2.9.1. Estratigrafía

#### PCA-1

*Material de azolve.*- Como primer estrato, hasta una profundidad máxima explorada de 1.0 m, se tiene material de azolve producto del arrastre de los flujos de agua compuesto por boleos de hasta 40 cm, con gravas y arenas mezclados con limos no plásticos de compacidad suelta a media, clasificado según el SUCS como GP y presenta los siguientes valores de sus características físicas: humedad natural 6.5%, límite líquido de 8.2%, límite plástico 6.8%, índice plástico 1.4%, contracción lineal 0.2%, boleos de 66.7%, gravas 22.4%, arenas 11.0% y finos 0.2%, clasificado para fines de corte constructivos según la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) como tipo A.

*Boleos densos.*- Como segundo estrato, hasta una profundidad máxima explorada de 3.5 m, se tienen boleos grandes y medianos de hasta 60 cm de diámetro de compacidad densa, clasificado según el SUCS como GP y presenta los siguientes valores de sus características físicas: humedad natural 5.3%, límite líquido de 8.1%, límite plástico 6.4%, índice plástico 1.8%, contracción lineal 0.2%, boleos de 93.6%, gravas 4.45%, arenas 1.5% y finos 0.4%, clasificado para fines de corte constructivos según la SCT como tipo C. En este sondeo de exploración se encontró el Nivel de Aguas Freáticas a 0.6 m de profundidad.

### **PCA-2**

*Material de azolve.-* Como primer estrato, hasta una profundidad máxima explorada de 0.6 m, se tiene material de azolve producto del arrastre de los flujos de agua compuesto por boleos de hasta 40 cm, con gravas y arenas mezclados con limos no plásticos de compacidad suelta a media, clasificado según el SUCS como GP y presenta los siguientes valores de sus características físicas: humedad natural 7.8%, límite líquido de 8.8%, límite plástico 6.9%, índice plástico 1.9%, contracción lineal 0.2%, boleos de 90.1%, gravas 4.1%, arenas 4.8% y finos 1.0%, clasificado para fines de corte constructivos según la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) como tipo A.

*Boleos densos.-* Como segundo estrato, hasta una profundidad máxima explorada de 3.5 m, se tienen boleos grandes y medianos de hasta 60 cm de diámetro de compacidad densa, clasificado según el SUCS como GP y presenta los siguientes valores de sus características físicas: humedad natural 5.5%, límite líquido de 8.1%, límite plástico 6.4%, índice plástico 1.7%, contracción lineal 0.2%, boleos de 97.6%, gravas 1.43%, arenas 0.8% y finos 0.1%, clasificado para fines de corte constructivos según la SCT como tipo C. En este sondeo de exploración el Nivel de Aguas Freáticas se encontró a 1.0m.

### **PCA-3**

*Material de azolve.-* Como primer estrato hasta una profundidad máxima explorada de 1.50 m, se tiene material azolve producto del arrastre de los flujos de agua, compuesto por boleos de hasta 40 cm de diámetro, con gravas y arenas mezclados con limos no plásticos, de compacidad suelta a media y presenta los siguientes valores de sus características físicas: humedad natural 8.1%, límite líquido de 9.0%, límite plástico 7.2%, índice plástico 1.8%, contracción lineal 0.1%, boleos de 53.9%, gravas 25.1%, arenas 18.2% y finos 2.9%, clasificado para fines de corte constructivos según la SCT como tipo A.

*Boleos densos.*- Como segundo estrato, hasta una profundidad máxima explorada de 3.5 m, se tienen boleos grandes y medianos de hasta 60 cm de diámetro de compacidad densa, clasificado según el SUCS como GP y presenta los siguientes valores de sus características físicas: humedad natural 6.0%, límite líquido de 9.0%, límite plástico 7.1%, índice plástico 1.8%, contracción lineal 0.2%, boleos de 92.05%, gravas 5.4%, arenas 1.1% y finos 1.1%, clasificado para fines de corte constructivos según la SCT como tipo C. En este sondeo de exploración el Nivel de Aguas Freáticas se encontró a 0.5 m.

En el anexo B se presentan los perfiles estratigráficos de los 3 PCA.



## Capítulo 3

### Resultados

#### 3.1. Trabajo previo en ArcGis

##### 3.1.1. Cartografía

Para la realización de trabajos en Hec-GeoRas es necesario un MDT en formato vectorial TIN lo más detallado posible. Este modelo puede generarse con la extensión 3d Analyst a partir de un fichero .shp (shape) de curvas de nivel, Figura 3.1, suministrado por el INEGI. De este TIN se extraerán los datos geométricos de las secciones transversales.

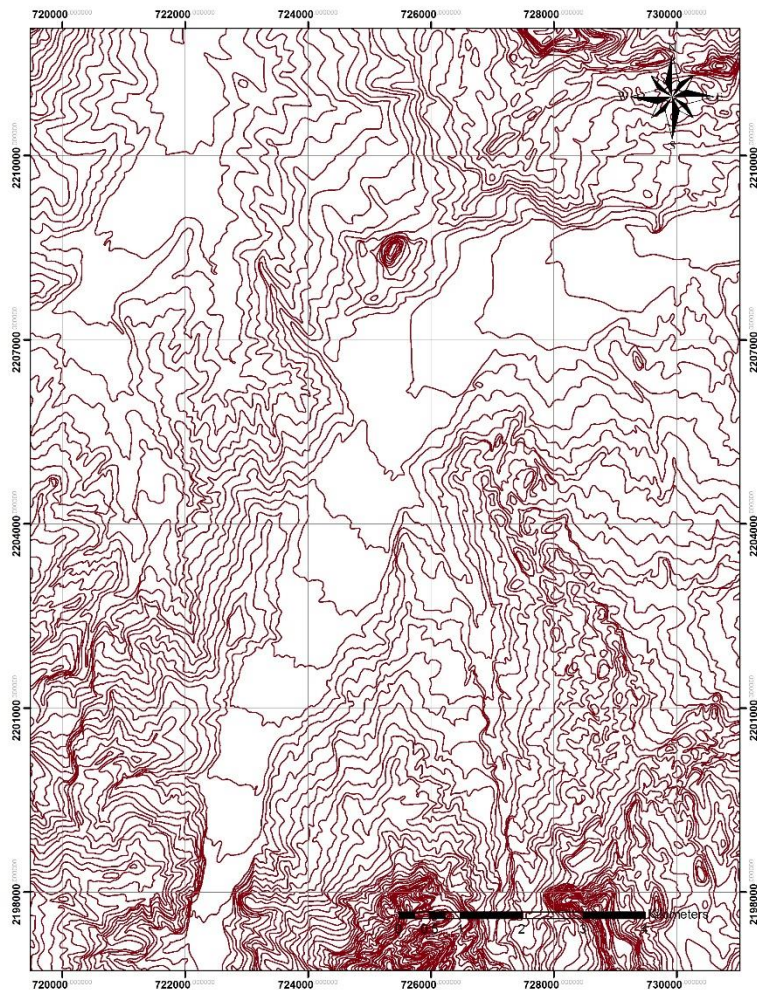


Figura 3.1.-Curvas de nivel otorgadas por el INEGI

Del formato TIN podemos generar un mapa de pendientes, Figura 3.2, para visualizar las condiciones del terreno natural donde está asentada la ciudad de Misantla. Usamos la clasificación de pendientes en porcentaje de Lugo Hupp en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1.- Rangos de pendiente Lugo Hupp

Rango	Lugo Hupp	Clasificación
1	0 - 3	Plano (Planicie)
2	3 - 12	Ligeramente inclinado
3	12 - 30	Deslizamiento
4	30 - 45	Deslizamiento
5	> 45	Caída libre

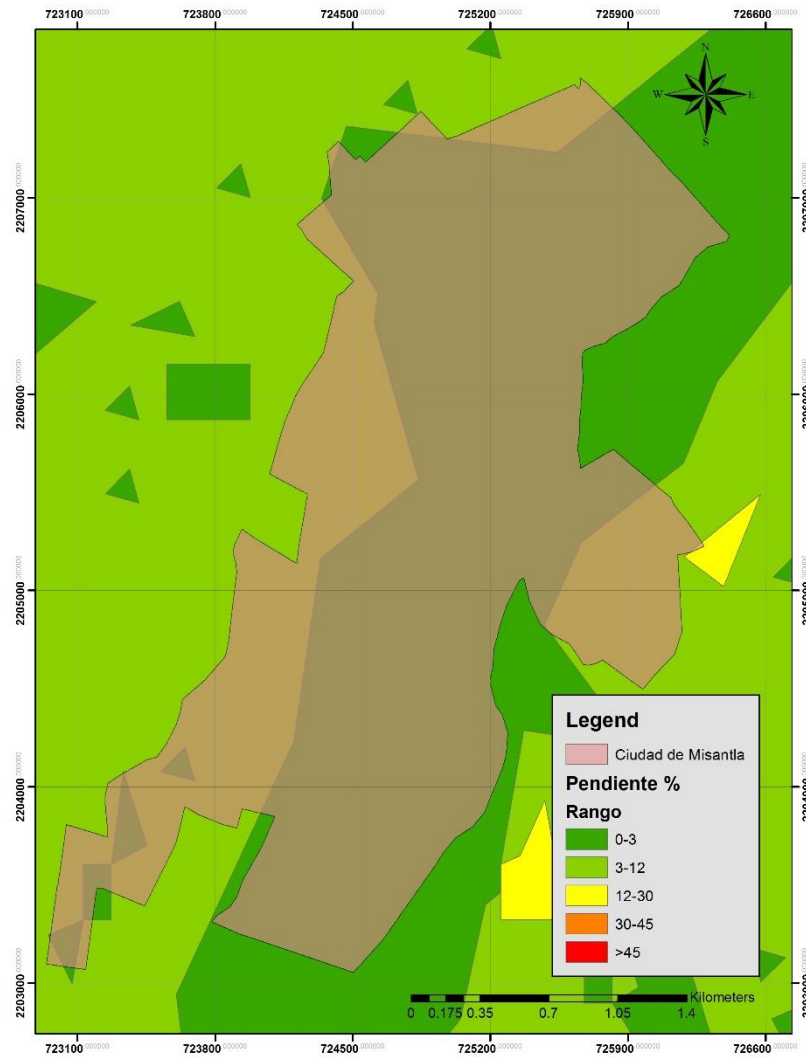


Figura 3.2.- Mapa de pendientes



Del mapa anterior se puede observar que la mayoría de zona de la ciudad se encuentra en una zona de planicie.

El INEGI también proporciona otros archivos en formato shape, tales como las localidades y las corrientes de agua, que se usaran para delimitar la zona de estudio. Al combinar el formato TIN con los shapes de corrientes de agua y localidades, Figura 3.3, se podrá delimitar la zona de estudio y proceder a la generación de las secciones transversales del río Misantla.

Es de señalar que todo el trabajo realizado en ArcGis es georreferenciado en unidades de posicionamiento UTM (Universal Transversal de Mercator).

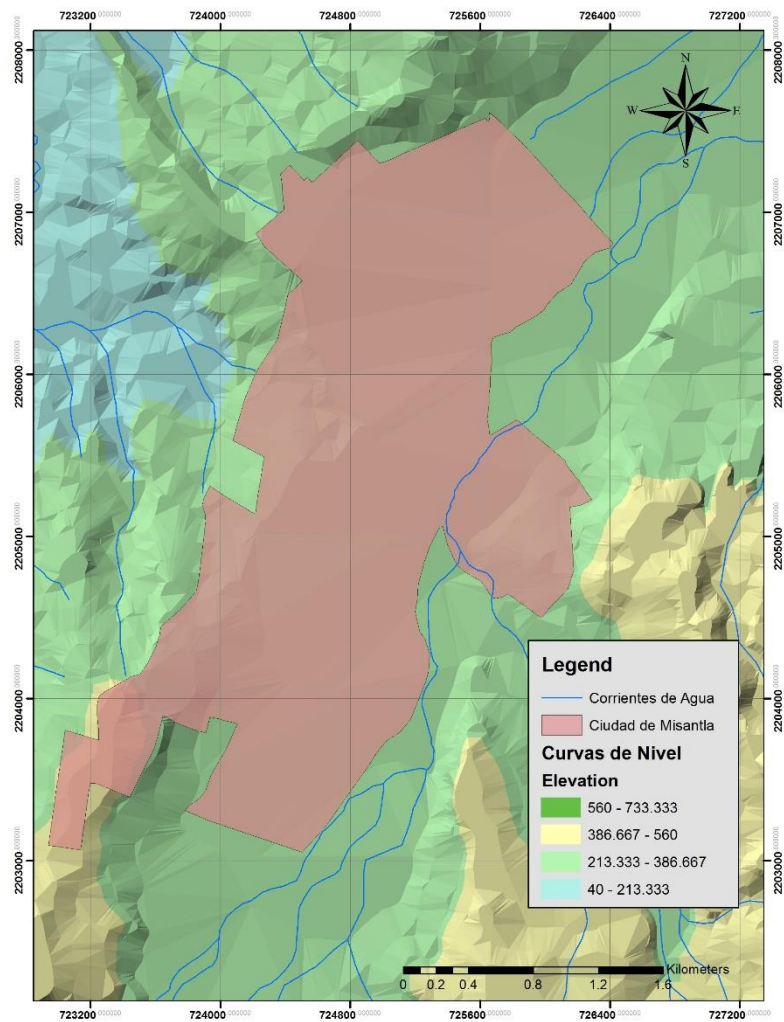


Figura 3.3.- Formato TIN y localización de la zona de estudio

Los pasos posteriores a la generación del MDT son:

1. Dibujar el cauce, se digitaliza de aguas arriba a aguas abajo y se tomara como base el tramo de la corriente a la altura de la ciudad de Misantla.
2. Dibujar las líneas que definen los márgenes “Banks”, se digitalizará de la misma forma que previamente se realizó con el eje del río, aguas arriba a aguas abajo y de preferencia comenzando con el margen izquierdo.
3. Dibujar los “flowpaths” o centroides de las zonas por donde preveamos que circulará el flujo de agua, el corte de estas líneas con las secciones transversales definen los puntos entre los que se medirá automáticamente, siguiendo esa línea, la distancia entre secciones por las márgenes.
  - Se deben digitalizar (de aguas arriba a aguas abajo) una línea por cada lado del río, incluyendo el eje del cauce principal (stream centerline)
  - Es necesario definir, para cada segmento, su situación: izquierdo (left), derecho (right) o cauce (channel).
4. Dibujar las secciones transversales:
  - No se pueden cortar dos secciones.
  - Las secciones cortan perpendicularmente al flujo, se digitaliza desde el margen izquierdo al derecho y deben cortar solo una vez tanto al eje como a los banks y a las líneas flowpaths.
5. Una vez teniendo todos los puntos anteriores, Figura 3.4, se procede a añadir la topología y elevación al cauce el cual añade información automáticamente a cada elemento, generando capas en 3 dimensiones.
6. De igual forma se añade topología y elevación a las secciones transversales:
7. Comprobar las capas antes de llevarlas a Hec-Ras.
8. Crear el fichero de importación que posteriormente será leído por Hec-Ras.

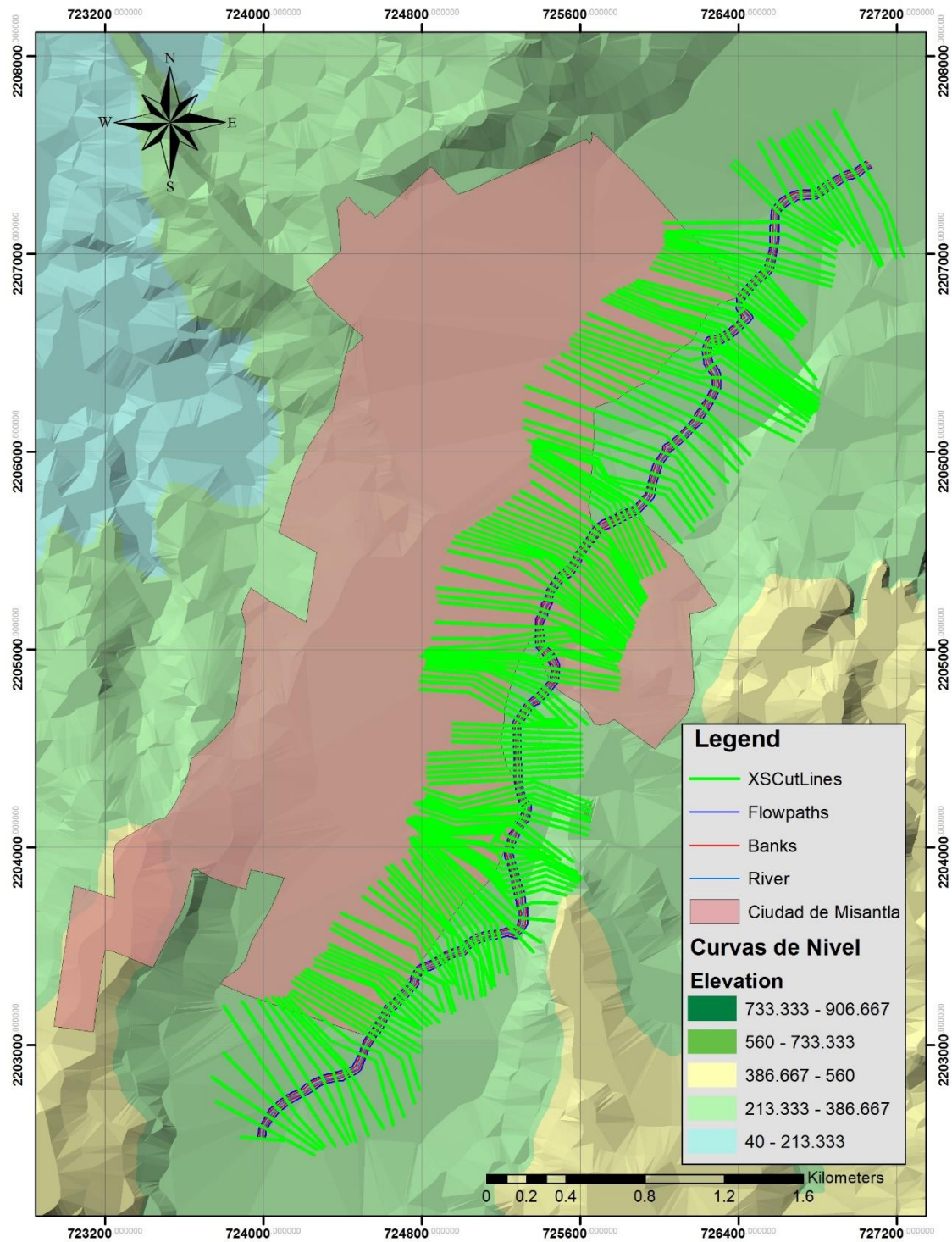


Figura 3.4.- Caracterización de la zona de estudio

### 3.2. Trabajo en Hec-Ras

Editaremos la geometría necesaria para la realización de los cálculos hidrológicos a partir del archivo importar del Hec-GeoRas

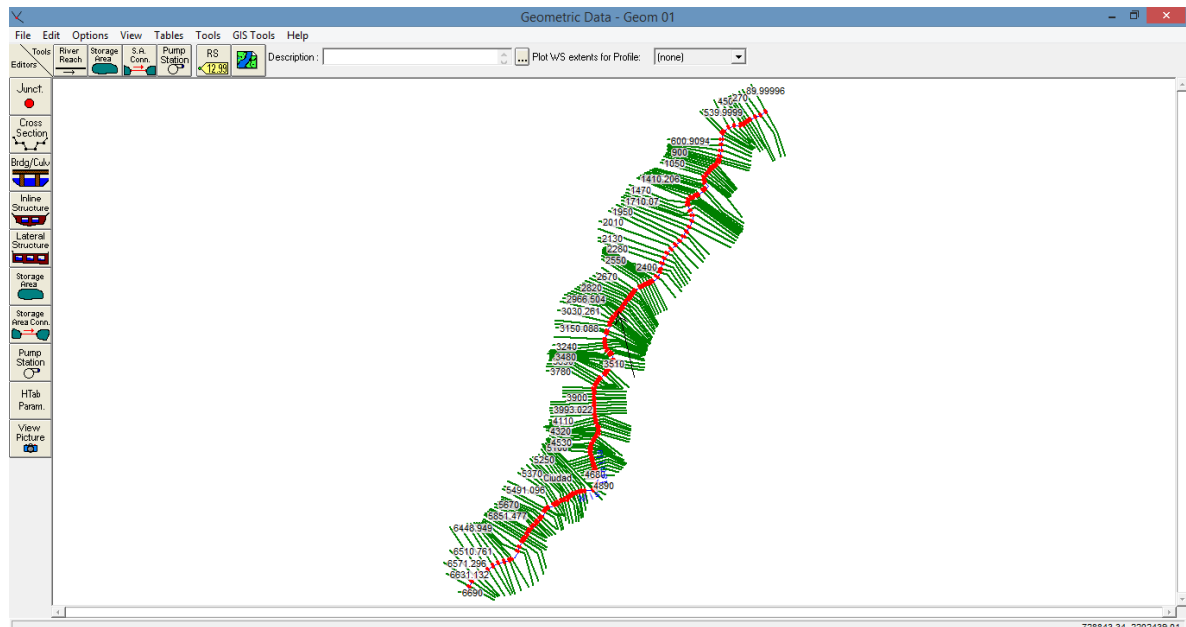


Figura 3.5.- Secciones importadas

Una vez teniendo todas las secciones transversales se procede al ingreso de los datos de flujo, que en este caso se utiliza el gasto máximo registrado en la estación hidrométrica de “El Raudal” el cual se calcula que es de  $2250 \text{ m}^3/\text{s}$  a la altura de la ciudad de Misantla y para las condiciones de frontera de flujo se utiliza el cálculo de profundidad crítica tanto para aguas arriba y para aguas abajo.

Hec-Ras calcula la profundidad que alcanza el agua, así como su velocidad en cada una de las secciones transversales como se muestra en la Figura 3.6.

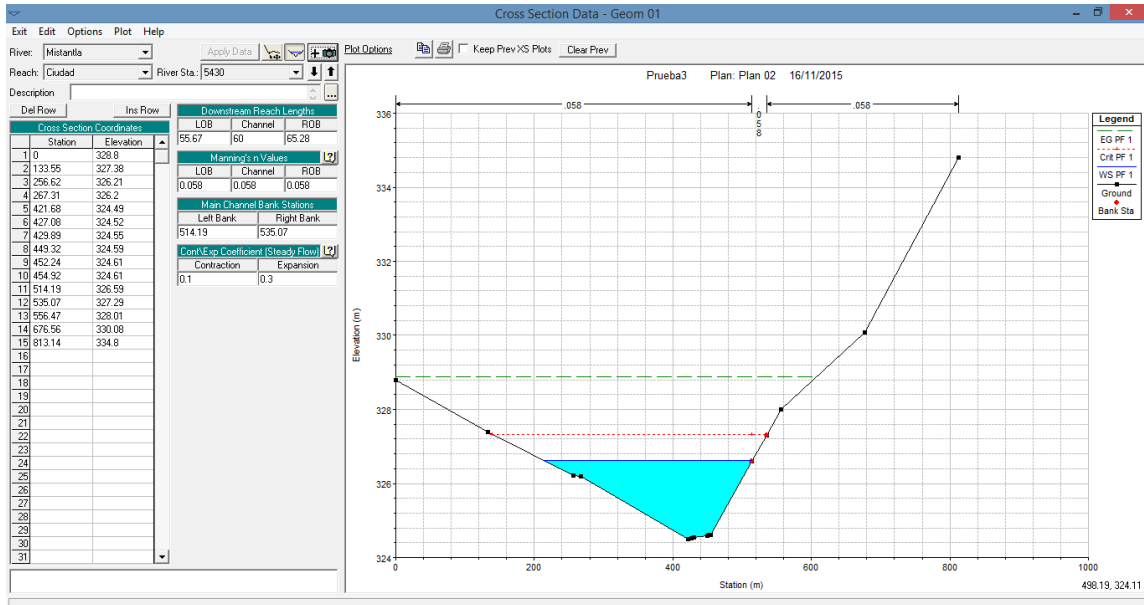


Figura 3.6.- características de una sección transversal

La superficie de agua generada sobre las secciones transversales se muestra en la Figura 3.7 y en la Figura 3.8 en un gráfico en 3D.

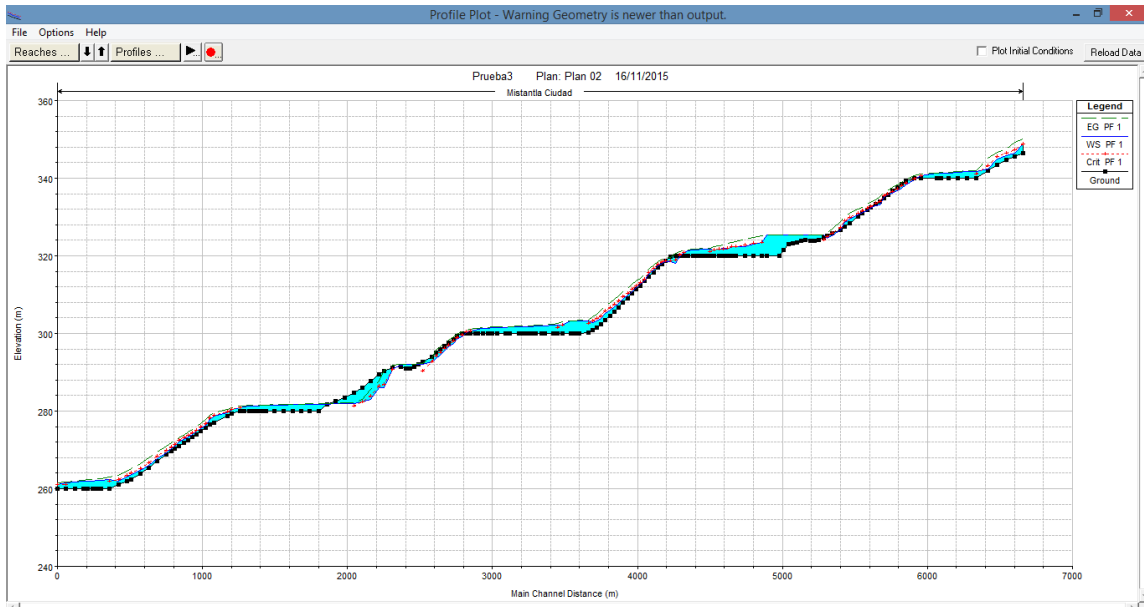
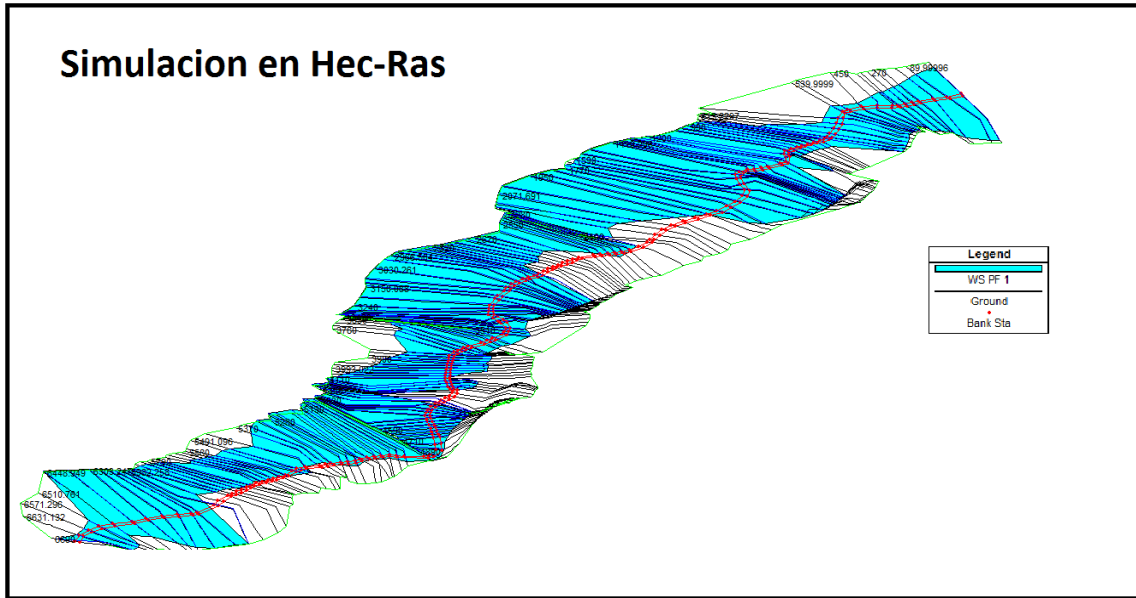


Figura 3.7.-Perfil longitudinal de las secciones.



**Figura 3.8.- Superficie total abarcada sobre el terreno**

Una vez acabada la simulación en He-Ras, se procede a exportar los datos de la inundación generada así como el de las velocidades en cada punto de las secciones transversales



### 3.3. Post-procesamiento en ArcGis

En ArcGis se puede visualizar mejor los datos obtenidos de la capa de agua para determinar gráficamente el área de la población afectada como se muestra en la Figura 3.9.

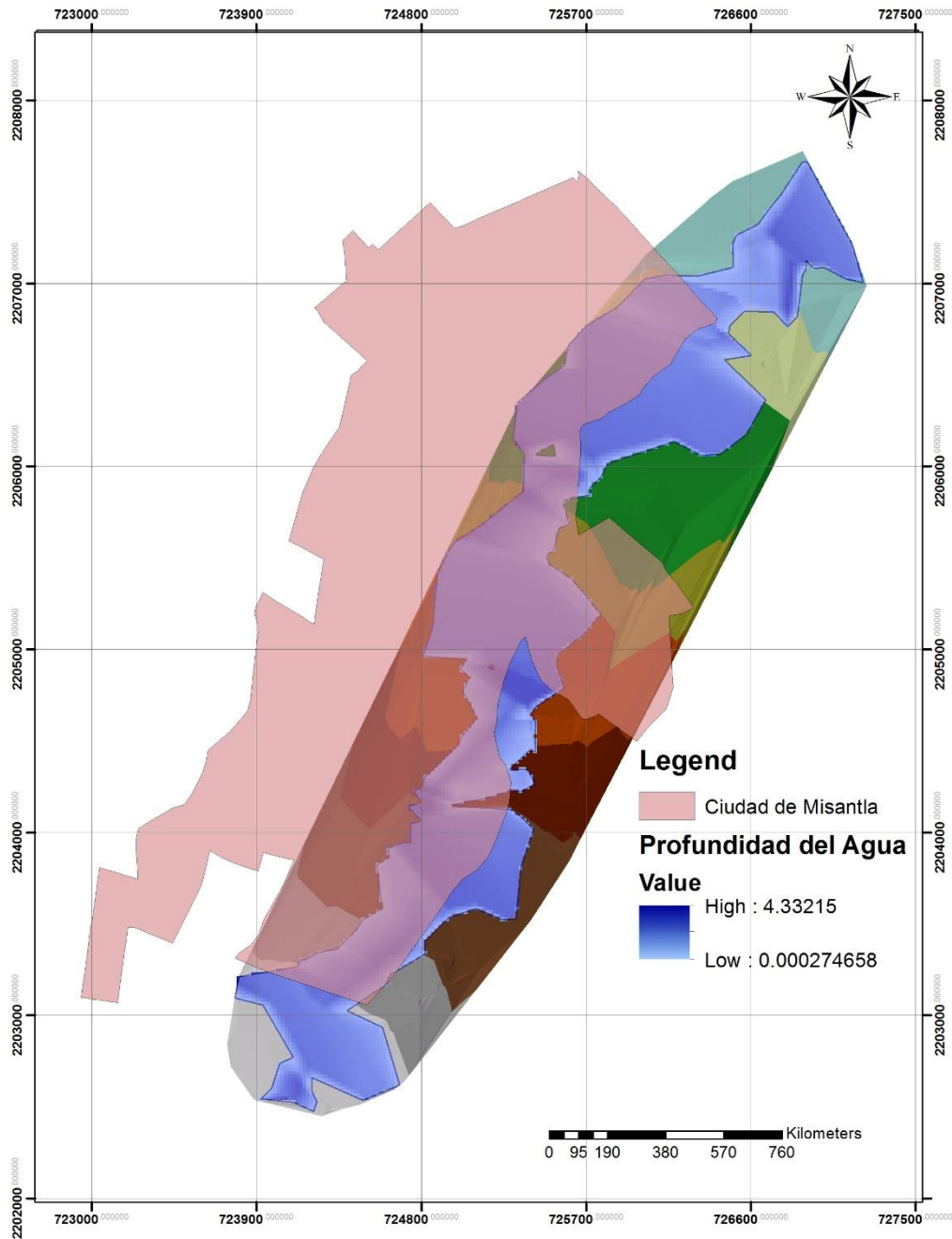


Figura 3.9.- Mapa de inundación.

A su vez también podemos determinar el mapa de velocidades, Figura 3.10, a partir de la información generada en Hec-Ras.

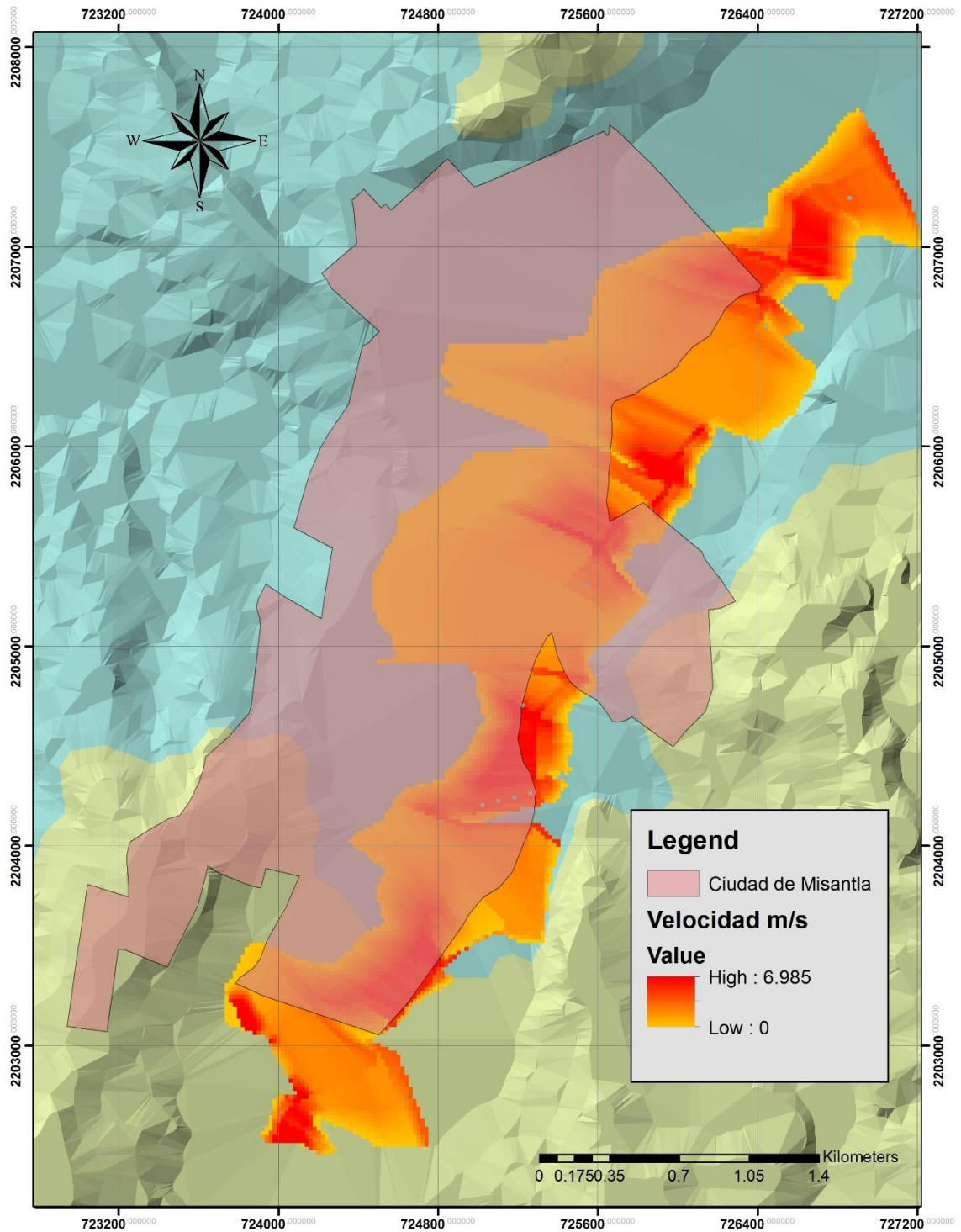


Figura 3.10.- Mapa de velocidades



Al tener las dos capas anteriores, profundidad del agua y velocidad de la corriente, podemos generar el mapa de riesgo, este mapa mostrará las inundaciones en relación con los impactos potenciales que éstas pueden llegar a producir en personas, bienes y actividades, Figura 3.11.

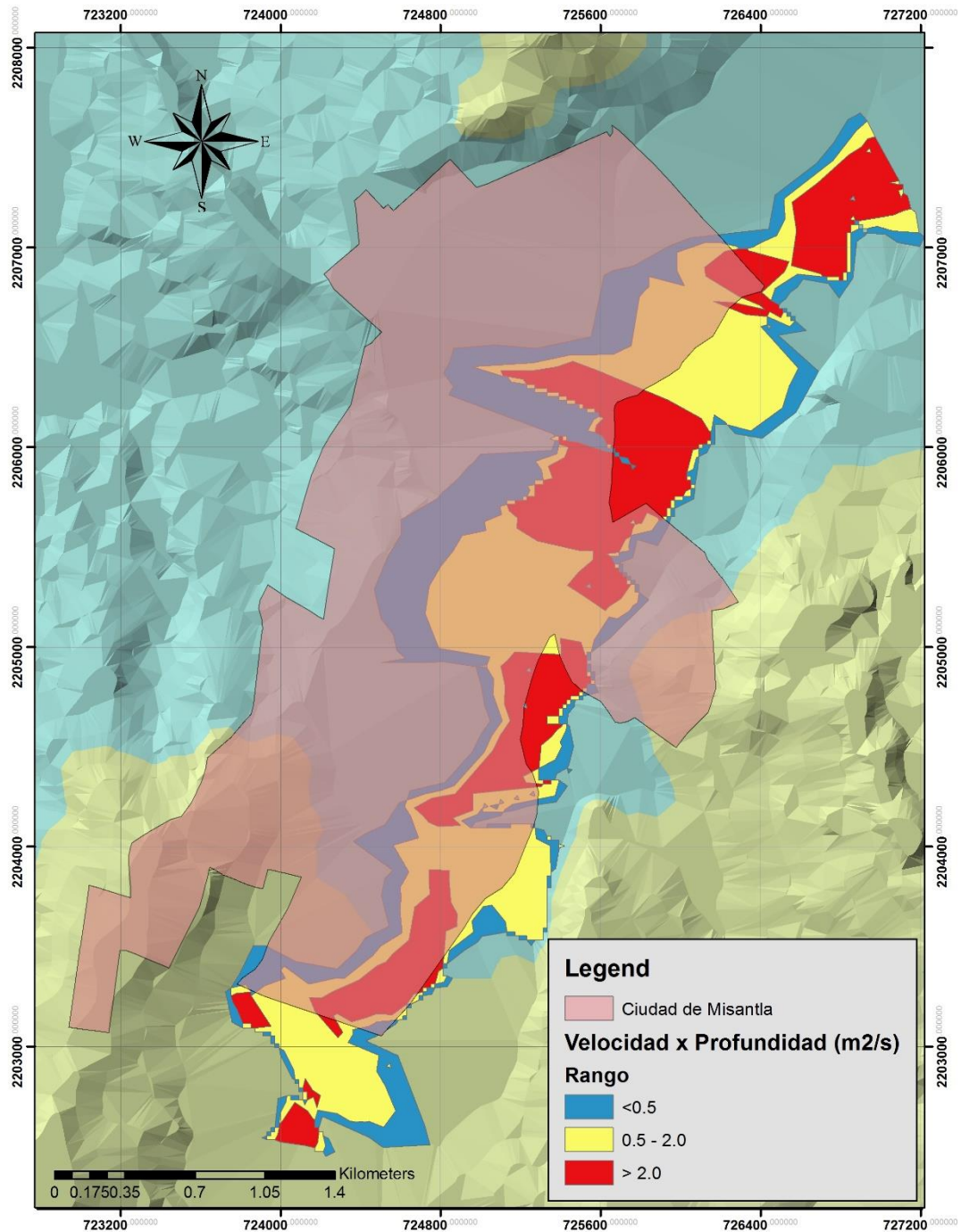


Figura 3.11.- Mapa de riesgo.

Podemos visualizar mejor agregando una imagen satelital de la zona como capa para determinar mejor las zonas de riesgo dentro de la ciudad, Figura 3.12.

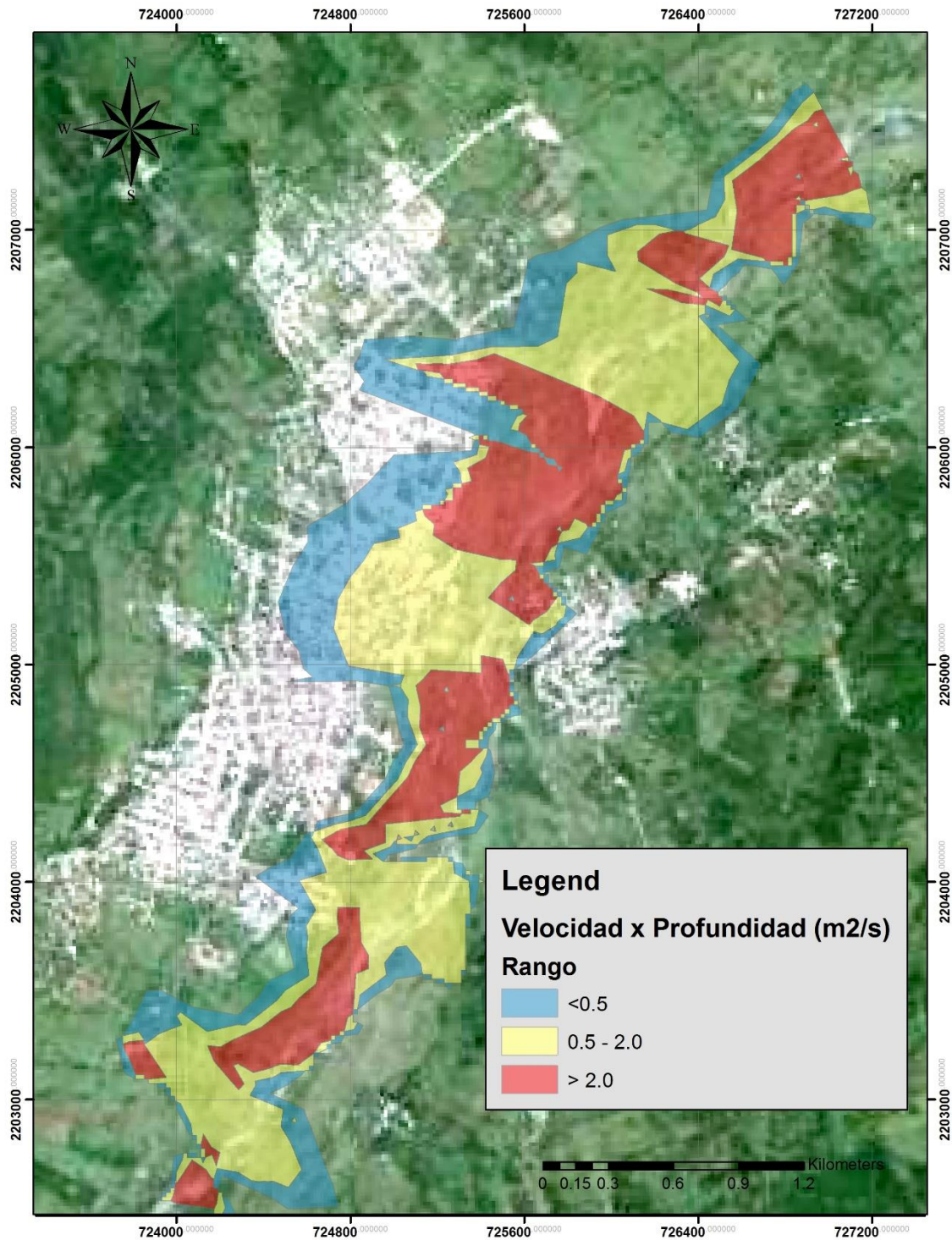


Figura 3.12.- Zonas de riesgo en la ciudad de Misantla

### 3.4. Estructuras de protección

#### 3.4.1. Profundidad de desplante

La profundidad de desplante recomendada para la colocación de la cimentación de las estructuras de protección será variable, dependiendo de la zona de los sondeos de exploración realizados. En la Tabla 3.2 se muestran las profundidades de desplante recomendadas.

**Tabla 3.2.- Recomendaciones de profundidad de desplante**

Zona de sondeo	Profundidad de desplante (m)	Estrato
PCA-1	1.2	BOLEOS DE COMPACIDAD DENSA
PCA-2	1.2	BOLEOS DE COMPACIDAD DENSA
PCA-3	1.2	BOLEOS DE COMPACIDAD DENSA

#### 3.4.2. Capacidad de carga del terreno de desplante

Para determinar la capacidad de carga del se tomó la ecuación que recomienda el reglamento de construcción del Distrito Federal, para ello se consideró el suelo como comportamiento friccionante y se determinó un ángulo de fricción interna en función de los resultados de resistencia al esfuerzo cortante realizadas a muestras remoldeadas y tomando la parte más crítica (arenas con finos), lo cuales arrojaron resultados en condiciones críticas de cálculo para los estratos de los PCA-1 al PCA-3. Empleando mediante la siguiente expresión:

$$q_{adm} = \left( \gamma D_f (N_q - 1) + (0.50)(\gamma B N_\gamma) \right) F_R + \gamma D_f \dots \dots \dots (3.1)$$

$$N_q = e^{(\pi \tan \phi)} \left( \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \right) \left( 1 + \frac{B}{L} \tan \phi \right) \dots \dots \dots (3.2)$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi \left( 1 - 0.40 \frac{B}{L} \right) \dots \dots \dots (3.3)$$

Sustituyendo valores, se tiene una capacidad de carga admisible en la Tabla 3.3. La capacidad de carga varía con la profundidad de desplante.

Tabla 3.3.- Capacidad carga admisible para diferentes profundidades de desplante (Df).

Zona de sondeo	Profundidad de análisis (m)	Capacidad de carga admisible ( $Q_{adm}$ ), t/m <sup>2</sup>	Estrato
PCA-1	1.2	27.68	Boleos de compacidad densa
PCA-2	1.2	27.44	Boleos de compacidad densa
PCA-3	1.2	39.93	Boleos de compacidad densa

### 3.5. Bordo como propuesta de protección del margen del río

Se da como propuesta a la problemática la construcción de un bordo de protección construido con material producto de excavación con recubrimiento marginal y tapete anti socavación a base de cimbra textil rellenas de mortero

Para el análisis de estabilidad de taludes se utilizó el software GEO5 que está diseñado para resolver distintos problemas geotécnicos. El programa analiza la estabilidad de taludes de suelo con estratificación generalizada. Se utiliza principalmente para la comprobación de la estabilidad de diques, desmontes y de estructuras de refuerzo ancladas. En el análisis de estabilidad de taludes se busca el radio más desfavorable mediante un proceso iterativo de dimensiones de radio, extrayendo un factor de seguridad confiable (F.S.). El software trabaja de manera manual introduciendo la línea o círculo de falla.

Se realizó un estudio topográfico de la zona a proteger, que comprende del cadenamamiento del 0+00 al 1+110. En la Figura 3.13 se muestra una imagen de la topografía proporcionada.



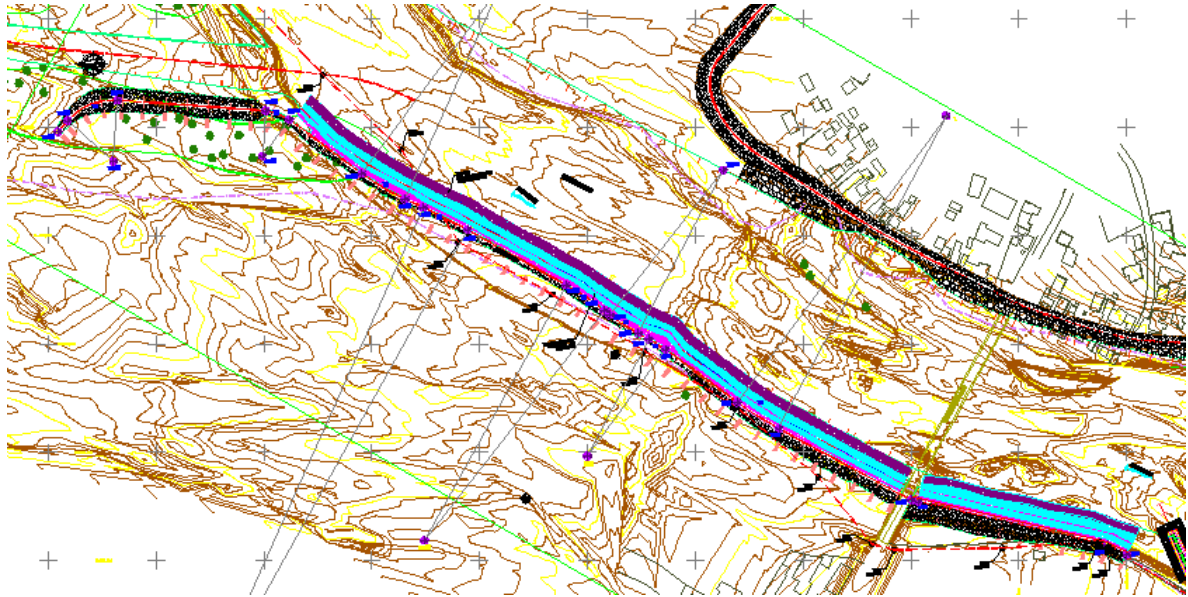


Figura 3.13.- Imagen topográfica de la zona de estudio.

De la topografía proporcionada se seleccionó cortes transversales para el análisis: se tomaron los cadenamientos 0+060, 0+120, 0+180, 0+280, 0+340, 0+580, 0+800 y 1+040, siendo las más críticas para el análisis. En las Figuras 3.14 a la 21 se muestran los perfiles topográficos con la propuesta de obra de protección.

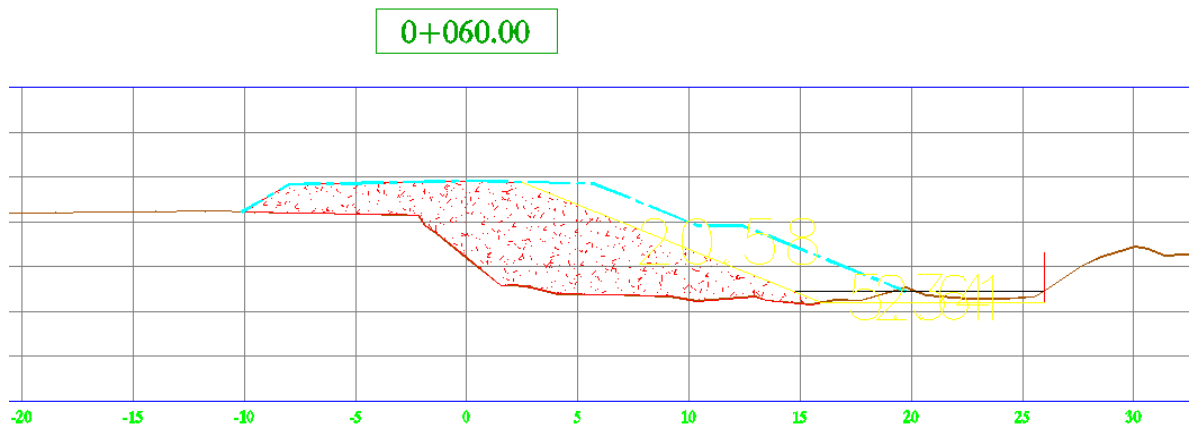


Figura 3.14.- Sección en km 0+060.

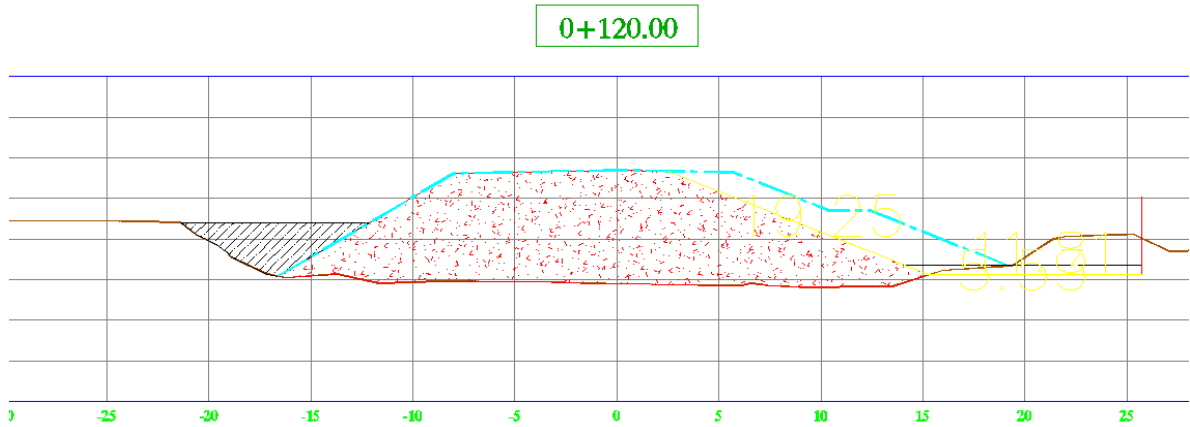


Figura 3.15.- Sección en km 0+120.

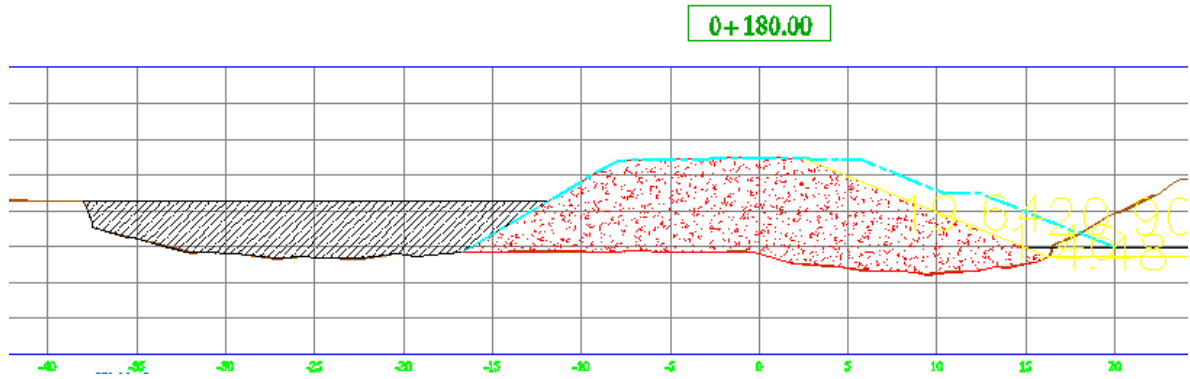


Figura 3.16.- Sección en km 0+180.

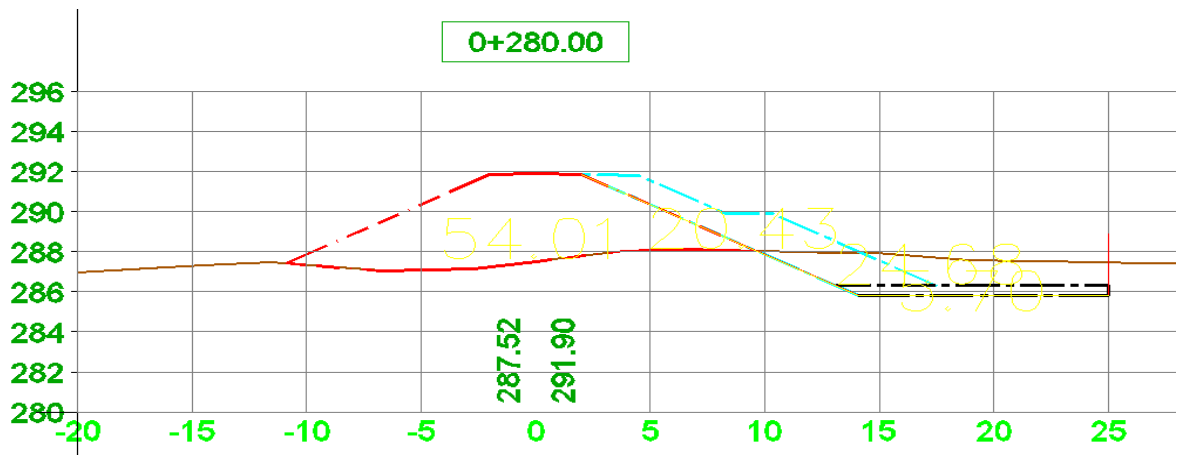


Figura 3.17.- Sección en km 0+280.

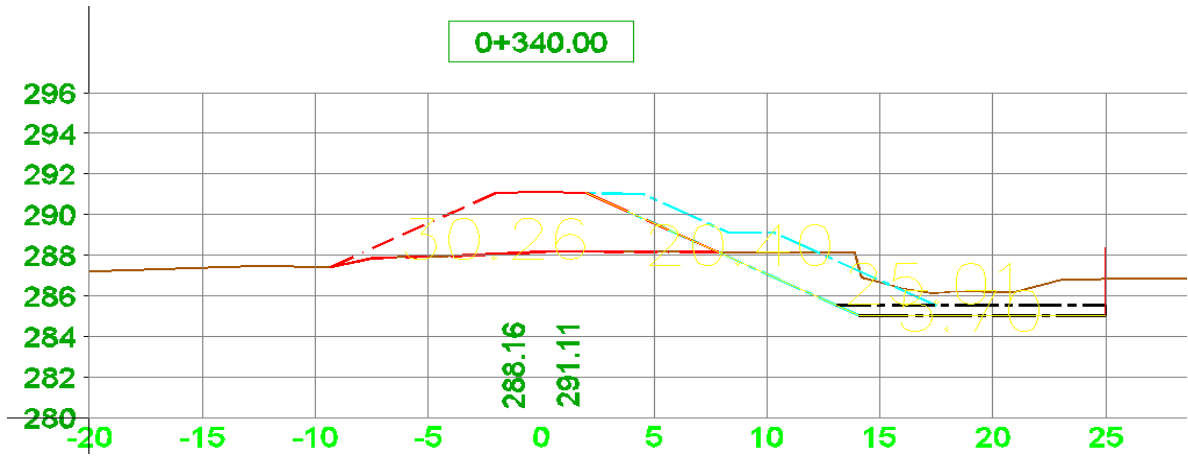


Figura 3.18.- Sección en km 0+340.

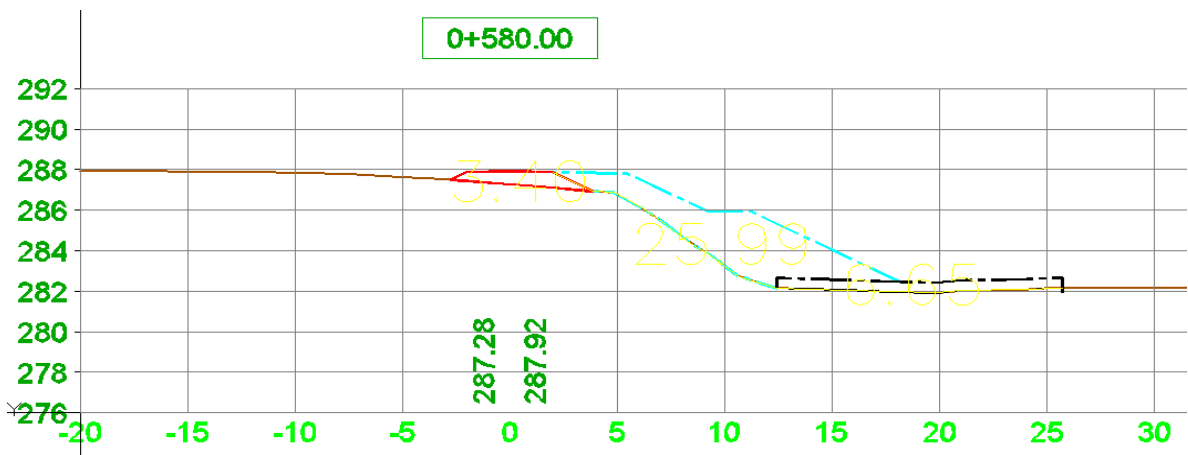


Figura 3.19.- Sección en km 0+580.

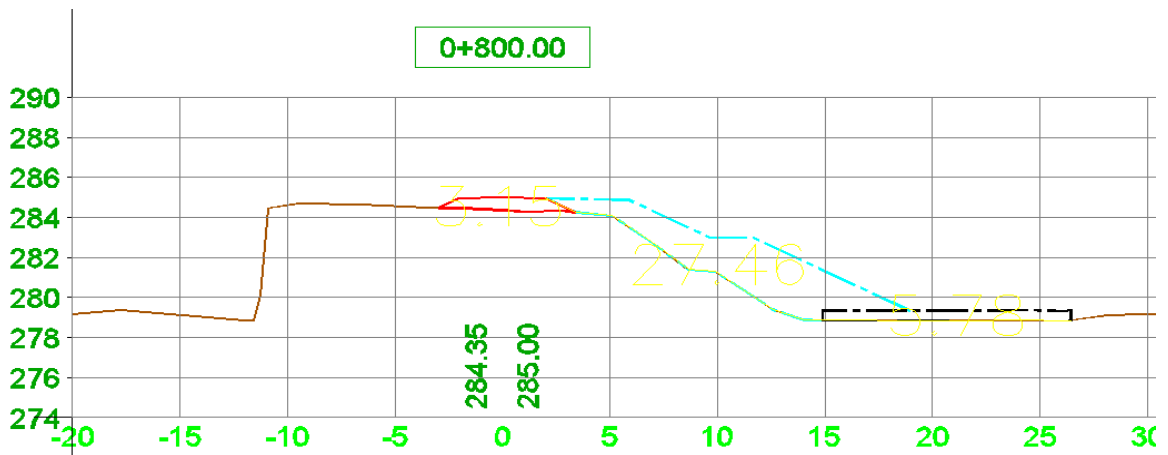


Figura 3.20.- Sección en km 0+800.

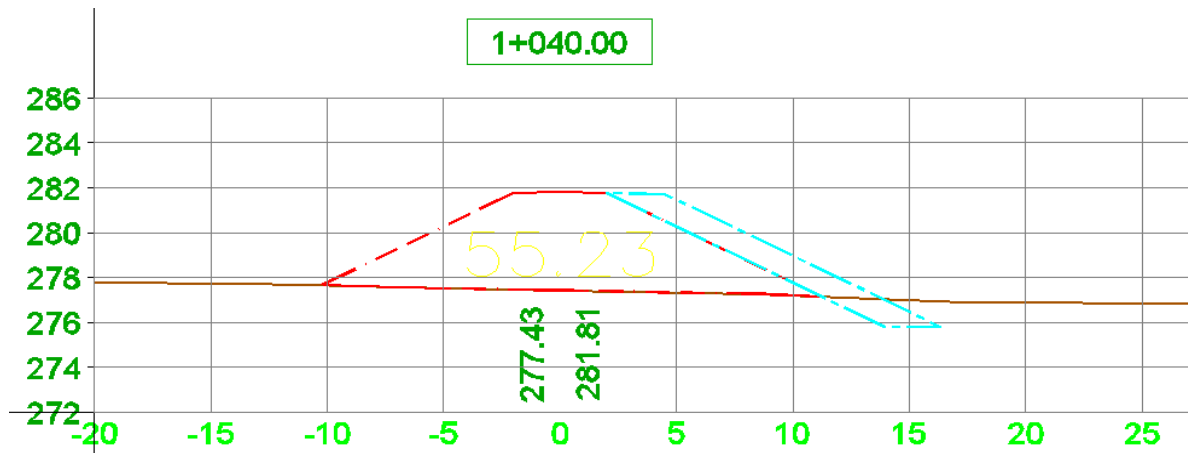


Figura 3.21.- Sección en km 0+1040.

Para las corridas del software GEO5 se necesitaron las propiedades mecánicas medidas en los diferentes ensayos en el laboratorio, entre esas variables de entrada fueron: peso volumétrico ( $\gamma_m$ ), Cohesión ( $c$ ) y el Ángulo de Fricción Interna ( $\phi$ ) fueron tomados de las pruebas Triaxiales. Se tomó en consideración los siguientes materiales: Cimbra textil rellena de mortero, relleno (considerando los boleos del predio), suelo de apoyo o soporte, trinchera y roca sedimentaria tipo conglomerado en los taludes. En la Tabla 3.4 se muestran los valores de las propiedades que se introducen al software.



Tabla 3.4.- Variables de entrada del software GEO5

Cadenamiento	Material	$\gamma_m$ (kg/m <sup>3</sup> )	c (kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (grados)
0+060	apoyo (T.N.)	1800.000	0.000	34.000
	relleno (fragmentos de roca)	1800.000	0.000	34.000
	Cimbra textil de mortero	2200.00	0.000	0.000
0+120	apoyo (T.N.)	1800.000	0.000	34.000
	relleno (fragmentos de roca)	1800.000	0.000	34.000
	Cimbra textil de mortero	2200.00	0.000	0.000
	Trinchera	1750.00	0.000	34.000
0+180	apoyo (T.N.)	1800.000	0.000	34.000
	relleno (fragmentos de roca)	1800.000	0.000	34.000
	Cimbra textil de mortero	2200.00	0.000	0.000
	Trinchera	1750.00	0.000	34.000
0+280	apoyo (T.N.)	1800.000	0.000	34.000
	relleno (fragmentos de roca)	1800.000	0.000	34.000
	Cimbra textil de mortero	2200.00	0.000	0.000
0+340	apoyo (T.N.)	1800.000	0.000	34.000
	relleno (fragmentos de roca)	1800.000	0.000	34.000
	Cimbra textil de mortero	2200.00	0.000	0.000
0+580	apoyo (T.N.)	1800.000	0.000	34.000
	relleno (fragmentos de roca)	1800.000	0.000	34.000
	Cimbra textil de mortero	2200.00	0.000	0.000
0+800	apoyo (T.N.)	1800.000	0.000	34.000
	relleno (fragmentos de roca)	1800.000	0.000	34.000
	Cimbra textil de mortero	2200.00	0.000	0.000
1+040	apoyo (T.N.)	1800.000	0.000	34.000
	relleno (fragmentos de roca)	1800.000	0.000	34.000
	Cimbra textil de mortero	2200.00	0.000	0.000

De los análisis efectuados, se tomaron los criterios de análisis de Fellenius Petterson y Bishop, extrayendo los valores del factor de seguridad de la propuesta de la estructuras de protección. El valor recomendado es de 1.5, donde se tienen valores superiores a este, en un rango de 1.59 a 2.12. En la Tabla 3.5 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 3.5. Resultados del análisis de la propuesta geométrica.**

<b>Cadenamiento</b>	<b>Método</b>	<b>F.S. Extraído</b>	<b>F.S. (recomendable)</b>	<b>Observaciones</b>
0+060	Bishop	1.83	1.5	ACEPTABLE
0+120	Bishop	1.59	1.5	ACEPTABLE
0+180	Bishop	2.12	1.5	ACEPTABLE
0+280	Bishop	1.84	1.5	ACEPTABLE
0+340	Bishop	1.85	1.5	ACEPTABLE
0+580	Bishop	1.61	1.5	ACEPTABLE
0+800	Bishop	1.68	1.5	ACEPTABLE
1+040	Bishop	1.62	1.5	ACEPTABLE

## Capítulo 4

### Discusión y Conclusiones

#### 4.1. Discusión

Existe la dificultad al momento de aplicar los modelos, debido al tipo de información que requieren, sobre todo en la resolución de la topografía.

Para la integración del modelo Hec-Ras con el ArcGis se requiere trabajar desde el inicio con información de detalle tanto a nivel hidrológico y geométrico como el caso del espaciamiento entre curvas de nivel de 0.5 a 1 m.

Según el estudio se recomienda trazar secciones transversales los más amplios posible, para tener un mejor resultado sobre las áreas inundables ya que el cálculo realizado esta limitado por las secciones transversales que se metan al programa, además usar topografía con alta resolución que dará mayor precisión a los resultados

La utilización del SIG permitirá a los profesionales mejorar su visión en un contexto espacial, ya que el SIG asiste al profesional en la toma de decisiones.

Cabe mencionar que la aplicación de la metodología propuesta se ha centrado en el rio Misantla a la altura de la ciudad del mismo nombre. Este proceso se efectuó con datos de gastos previamente obtenidos, en estudios específicos.

## 4.2. Conclusiones

La metodología empleada para estimar el daño por inundación puede ser extrapolada a cualquier SIG que use sus estructuras de datos tradicionales, sin tener que recurrir necesariamente a software comerciales.

La representación espacial del riesgo de inundación representa un aporte muy valioso, ya que ello permite mostrar la variación de dicho riesgo en cada zona, y por lo tanto, no todos requieren el mismo nivel de protección; esto permite optimizar la gestión del riesgo de inundación en la zona y representa una de las tendencias bien definidas de la comunidad científica actual en el tema en cuestión, por lo que es pertinente la construcción de mapas de inundación y riesgo en áreas pobladas.

Se puede constatar que el riesgo de inundación, producto del desbordamiento del río Misantla es capaz de provocar importantes pérdidas materiales, e inclusive, existe una alta posibilidad de que en algunas zonas debido a profundidades de inundación y a la velocidad de flujo alcanzada, la vida de las personas que habitan en dicha zona sea puesta en peligro.

### **Respecto a la aplicación del SIG a modelos hidráulicos:**

- La aplicación del SIG como herramienta de análisis hidráulico para el modelamiento de zonas con riesgo de inundación ahorran tiempo y recursos contra un trazado manual de inundación.
- La integración del modelo hidráulico Hec-Ras con el SIG ArcGis es una manera dinámica e interactiva de trabajar los parámetros hidrológicos e hidráulicos en un ambiente SIG generando como resultado un mapa de inundación espacialmente georeferenciado.
- La delineación o despliegue del mapa de inundación que se obtiene del Hec-Ras está limitado por el ancho de las secciones transversales.
- Se concluye que el SIG provee la habilidad de integrar los resultados de modelos con otras capas de información.

### **Respecto al análisis de impacto de los recursos en condiciones de inundación**

- La profundidad de la inundación varía de 0 a 4m en algunas zonas bajas, por debajo del nivel de la ciudad
- La mayor área inundada comprende la zona centro y el este de la ciudad
- Es pertinente la construcción de mapas de inundación y riesgo en áreas pobladas.
- Con el apoyo de la tecnología, los modelos de simulación son una herramienta útil para atender la problemática abordada.

### **Respecto a la alternativa de protección**

- Los resultados arrojados según los análisis con las propiedades físicas y mecánicas introducidas extraídas en el estudio de mecánica de suelos, estos son aceptables, ya que los factores de seguridad son superiores tomando en referencia el mínimo recomendado de 1.50.

## **4.3. Trabajo Futuro**

Con una finalidad de mejora en la interpretación del comportamiento del río se pueden aumentar la cantidad de secciones transversales, aumentando el número de simulaciones sobre ellas y realizando los análisis respectivos a cada uno de ellos.

Considerar los cambios en el flujo del río con los elementos de protección laterales a los márgenes y generar las nuevas áreas de riesgo de inundación.

Evaluar el comportamiento del río e inundación con otro tipo de software u cualquier otra técnica a modo de confirmar los resultados adquiridos.

## Referencias

- Baro, J.E., Diaz-Delgado, C., Esteller, M.V. y Calderon, G. (2007a): "Curvas de daños provocados por inundaciones en zonas habitacionales y agrícolas de México, Parte I. Propuesta metodológica", Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XXII, núm. 1, pp. 91-103.
- Baro, J.E., Diaz-Delgado, C., Esteller, M.V., Calderon, G. y Cadena Vargas, E. (2011): "Costo más probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México". Revista Tecnología y Ciencias del Agua antes Ingeniería Hidráulica en México. Vol. II, núm. 3, (en prensa).
- Brussel, G. (2008). Hec-Ras, River Analysis System Hydraulic Reference Manual, US Army Corps of Engineers.
- CENAPRED Centro Nacional de Prevención de Desastres, (2009a): "Características e impactos socioeconómicos de los principales desastres en la República Mexicana en el año 2007". Serie: Impacto socioeconómico de los desastres en México SEGOB-CENAPRED, México, D.F., Editorial SEGOB-CENAPRED.
- CONAGUA. Datos históricos. México. Disponible en: <ftp://ftp.conagua.gob.mx/ocgc/Publicacion/ESTADISTICAS/Climatologia/historico/martinez%20de%20la%20torre.pdf>. (Consulta: 15 de junio del 2015).
- Correia, Francisco Nunes, Saraiva, Maria Da Graça, Da Silva, Fernando Nunes, Ramos, Isabel, 1999. Floodplainmanagement in urban developing areas. Part I. Urban Growth Scenarios and land-use controls. Water Resour. Manag.
- De Sherbinin, Alex, Levy, Marc, Adamo, Susana, MacManus, Kytt, Yetman, Greg, Mara, Valentina, Razafindrazay, Liana, Goodrich, Benjamin, Srebotnjak, Tanja, Aichele, Cody, et al., 2012. Migration and risk: net migration in marginal ecosystems and hazardous areas.
- Degiorgis, Massimiliano, Gnecco, Giorgio, Gorni, Silvia, Roth, Giorgio, Sanguineti, Marcello, Celeste Taramasso, Angela, 2012. Classifiers for the detection of floodprone areas using remote sensed elevation data.
- Dewan, Ashraf M., Monirul Islam, M., Kumamoto, T., Nishigaki, M., 2007. Evaluating flood hazard for land-use planning in greater Dhaka of Bangladesh using remote sensing and GIS techniques.
- Dingman, S. L. (1994). Physical Hydrology. Editorial Prentice-Hall; Estados Unidos de América
- Domínguez, R., O. Fuentes y F. García (1999), Inundaciones, Serie Fascículos No. 3, CENAPRED, México.

- Dyhouse, G., J. Benn (2003). Floodplain modeling using Hec-Ras: Haestad methods. Waterbury, Haestad.
- Edwin R.C. Baynes \*, Mikaël Attal, Andrew J. Dugmore, Linda A. Kirstein, Kathryn A. Whaler; Catastrophic impact of extreme flood events on the morphology and evolution of the lower Jökulsá á Fjöllum (northeast Iceland) during the Holocene (2015).
- Fernández, D.S., Lutz, M.A., 2010. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis.
- Forte, F., Pennetta, L., Strobl, R.O., 2005. Historic records and GIS applications for flood risk analysis in the Salento peninsula (southern Italy).
- García, R., J. L. López (1999). Hazard mapping for debris flow events in the alluvial fans of northern Venezuela.
- Gutiérrez, Juan (2009) Calculo del coeficiente de rugosidad de Manning utilizando gravilla, arena, piedra pegada y tierra como fondo mediante un canal a escala como modelo físico, Tesis de Licenciatura, Bogotá D.C., Universidad de La Salle.
- INEGI. Características hidrográficas. México. 1984.
- Jonkman, S.N., Bockarjova, M., Kok, M. y Bernardini, P. (2008), "Integrated hydrodynamic and economic modeling of flood damage in The Netherlands". Ecological Economics Vol. 66, pp. 77- 90.
- Kia, Masoud Bakhtyari, Pirasteh, Saied, Pradhan, Biswajeet, Mahmud, Ahmad Rodzi, Sulaiman, Wan Nor Azmin, Moradi, Abbas, 2011. An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia.
- Knebl, M.r., Z.L. Yang (2005). "Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and Hec-Hms/Ras: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. "Journal of Environmental Management 75 (4): 325-336.
- Kourgialas, Nektarios N., Karatzas, George P., 2011. Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas: a case study.
- Kowalzig, Jan, 2008. Climate, poverty, and justice: What the Poznań UN climate conference needs to deliver for a fair and effective global deal. Oxfam Policy and Practice
- Liu, Y.B., Gebremeskel, S., De Smedt, F., Hoffmann, L., Pfister, L., 2003. A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling.
- Meja-Navarro, Mario, Wohl, Ellen E., Oaks, Sherry D., 1994. Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado.
- Merwade, V., A. Cook (2008). "GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping." Environmental Modelling & Software 23 (10-11): 1300-1311.

- Mobayed K. N. 2001, Modelo distribuido de lluvia-escorrentía basado en el manejo de variables geo-referenciadas y el escalamiento fisiográfico de cuencas, tesis doctoral, UNAM, México.
- Nascimento, N., Machado, M.L., Baptista, M. y De Paula e Silva, A. (2007): "The assessment of damage caused by floods in the Brazilian context". Urban Water Journal, Vol. 483, pp. 195-210.
- Rodríguez Martínez Luis E. (1997) Construcción del bordo "Tramo La Purísima" (est. 4+400 a la 5+020) y 3 espigones para proteger contra inundaciones a la ciudad de Misantla, Veracruz, Tesis de Licenciatura, Distrito Federal, ITC.
- Schanze, Jochen, Zeman, Evzen, Marsalek, Jiri, 2006. Flood riskmanagement: hazards, vulnerability and mitigation measures.
- Schumann, A.H., Funke, R., Schultz, G.A., 2000. Application of a geographic information system for conceptual rainfall-runoff modeling.
- Tehrany, Mahyat Shafapour, Pradhan, Biswajeet, Jebur, Mustafa Neamah, 2013. Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS.
- Triviño, P.A. y R.S. Ortiz 2004, Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en Ramblas y Ríos-Rambla Mediterráneos, Investigaciones Geográficas #35, Universidad de Alicante, España.
- US Army Corps of Engineers (2010). Hec-Ras River Analysis System. User's Manual. Davis, CA., U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.
- Van Der Veen, Anne, Logtmeijer, Christiaan, 2005. Economic hotspots: visualizing vulnerability to flooding.
- Wang, Yamei, Li, Zhongwu, Tang, Zhenghong, Zeng, Guangming, 2011. A GIS-based spatial multi-criteria approach for flood risk assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China.
- Zerger, A., 2002. Examining GIS decision utility for natural hazard risk modelling.



# Anexo A

## Resultados Hec-Ras

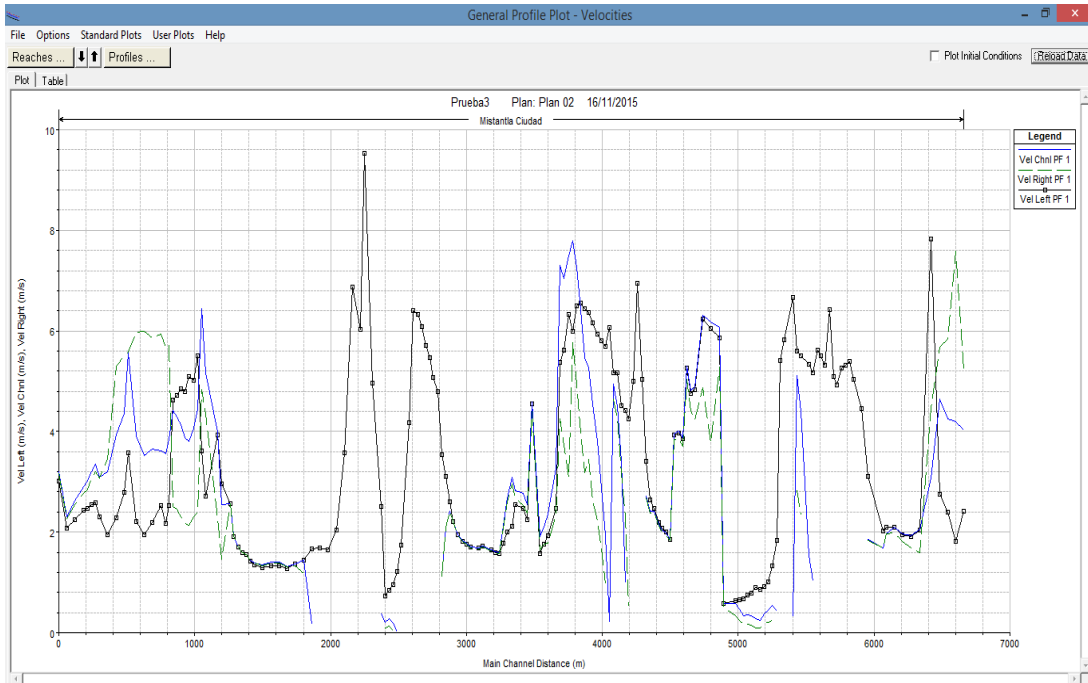


Figura A.1.- Perfil de velocidades

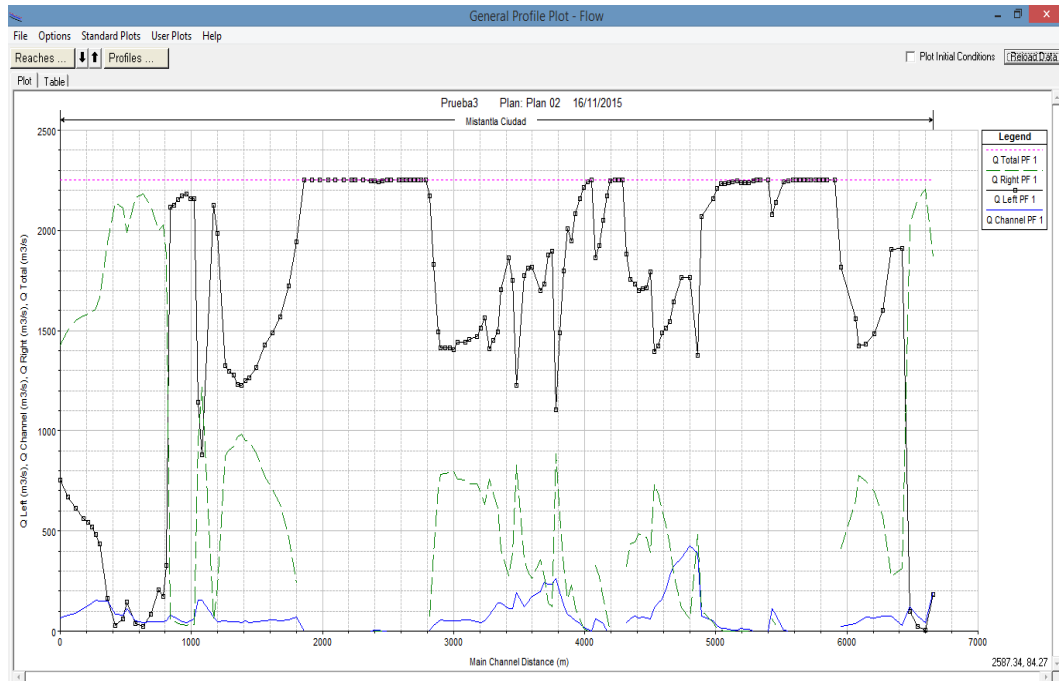


Figura A.2.- Perfil de flujo

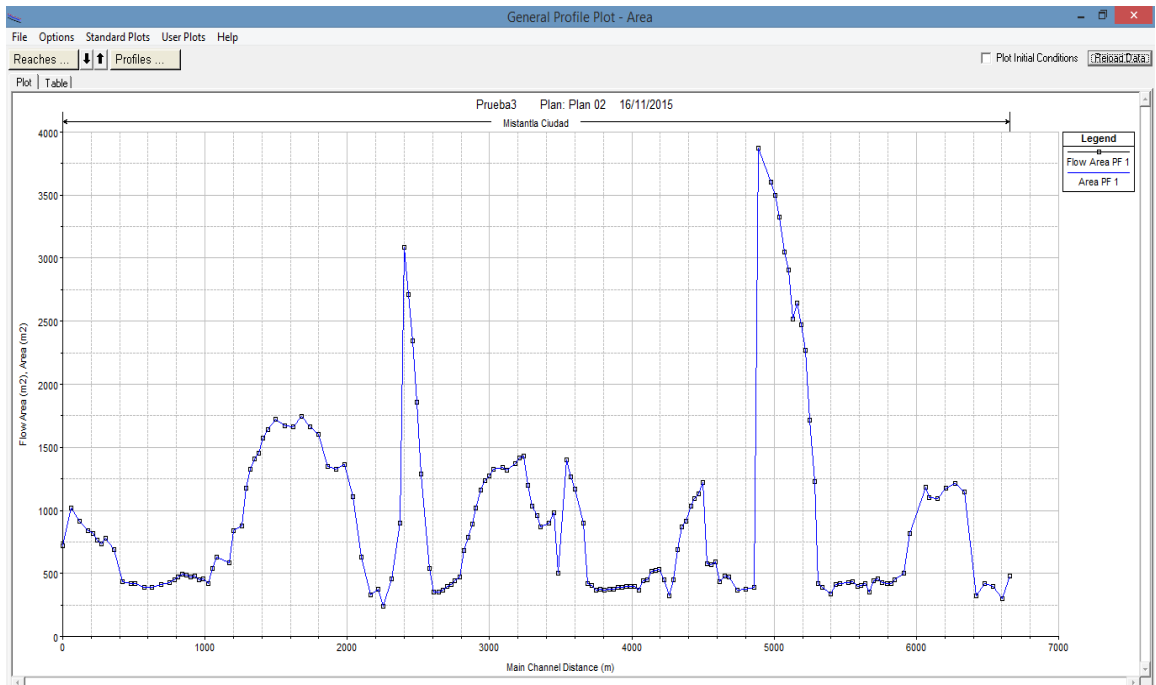


Figura A.3.- Perfil de área

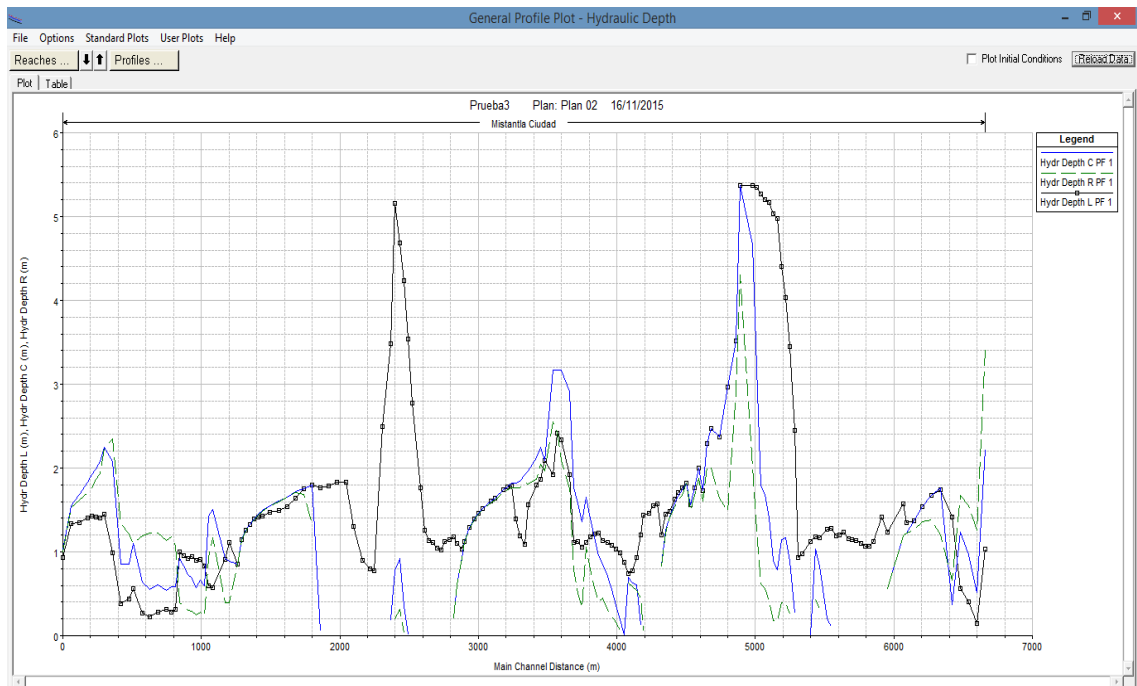


Figura A.4.- Perfil de profundidad hidráulica

## Anexo B

### Estudio Geotécnico

UBICACIÓN: RÍO MISANTLA (CAB. MUNICIPAL MISANTLA)

SONDEO: PCA-1

PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS: 0.00 A 0.60m.

Tamiz (mm)	% que pasa
304.80	100.00
252.00	100.00
177.80	82.82
152.40	70.81
127.00	66.11
101.60	58.26
76.12	49.53
50.80	42.02
25.40	33.04
19.05	25.70
12.70	22.85
9.52	21.30
6.35	19.31
4.76	17.65
2.00	11.44
0.84	4.94
0.42	1.43
0.25	0.82
0.15	0.46
0.08	0.20

	BOLEOS	GRAVAS	ARENAS	FINOS
%	50.47	31.88	17.44	0.20
Peso (gr)	75200.00	47507.39	25991.34	301.27

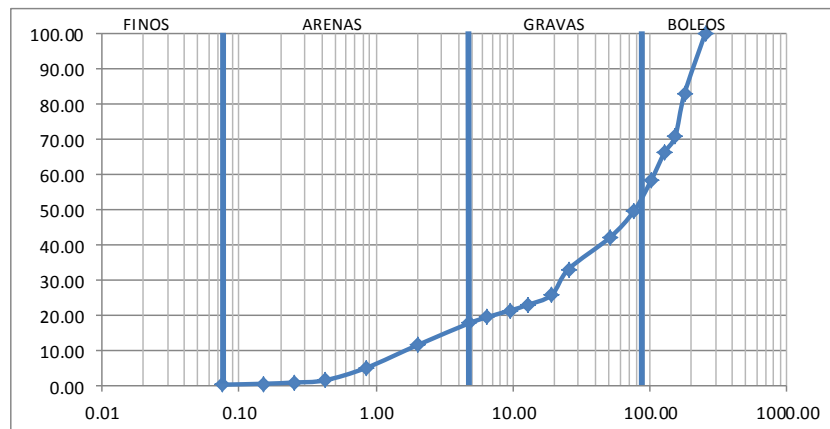


Figura B.1.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-1, 0-0.60m

UBICACIÓN: RÍO MISANTLA (CAB. MUNICIPAL MISANTLA)

SONDEO: PCA-1

PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS: 1.00 A 2.30m.

Tamiz (mm)	% que pasa
600.00	100.00
304.80	87.38
252.00	65.81
177.80	35.59
152.40	24.10
127.00	16.14
101.60	11.59
76.12	8.41
50.80	7.98
25.40	5.09
19.05	4.64
12.70	4.24
9.52	3.85
6.35	3.51
4.76	3.23
2.00	2.46
0.84	1.46
0.42	0.88
0.25	0.60
0.15	0.56
0.08	0.53

	BOLEOS	GRAVAS	ARENAS	FINOS
%	91.59	5.17	2.70	0.53
Peso (kg)	209750.00	11849.66	6176.71	1223.63

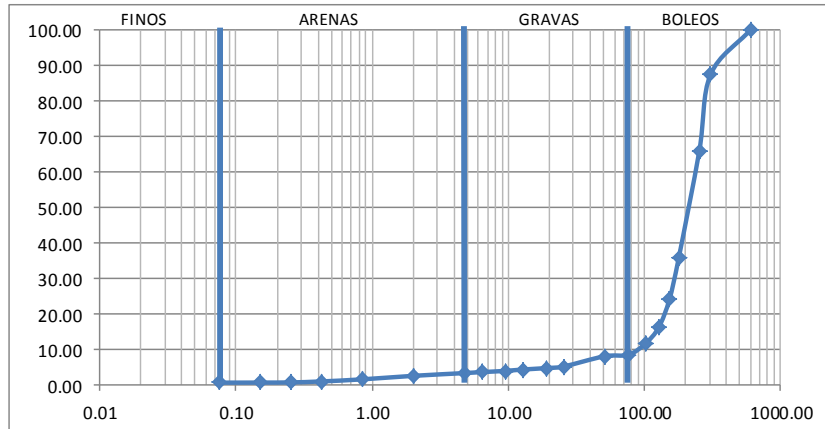


Figura B.2.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-1, 1.00-2.30m

SONDEO: PCA-1

PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS: 2.30 A 3.50m.

Tamiz (mm)	% que pasa
600.00	100.00
304.80	47.84
252.00	34.32
177.80	21.13
152.40	15.85
127.00	12.17
101.60	8.71
76.12	4.37
50.80	3.47
25.40	2.07
19.05	1.89
12.70	0.98
9.52	0.89
6.35	0.75
4.76	0.69
2.00	0.52
0.84	0.38
0.42	0.32
0.25	0.29
0.15	0.29
0.08	0.29

	BOLEOS	GRAVAS	ARENAS	FINOS
%	95.63	3.68	0.40	0.29
Peso (kg)	287860.00	11071.19	1203.85	864.96

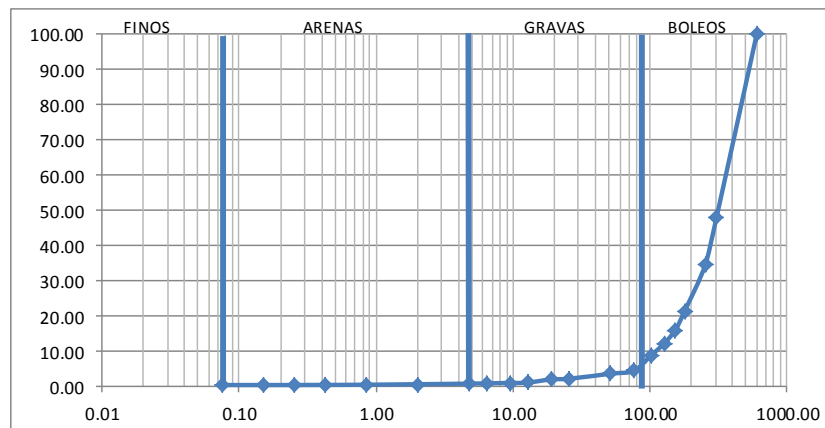


Figura B.3.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-1, 2.30-3.50m

UBICACIÓN: RÍO MISANTLA (CAB. MUNICIPAL MISANTLA)

SONDEO: PCA-2

PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS: 0.00 A 0.80m.

Tamiz (mm)	% que pasa
600.00	100.00
304.80	45.70
252.00	20.33
177.80	18.74
152.40	17.48
127.00	14.07
101.60	11.73
76.12	9.93
50.80	8.98
25.40	8.28
19.05	7.22
12.70	6.84
9.52	6.77
6.35	6.55
4.76	5.82
2.00	4.44
0.84	2.44
0.42	1.76
0.25	1.20
0.15	1.06
0.08	1.01

	BOLEOS	GRAVAS	ARENAS	FINOS
%	90.07	4.12	4.80	1.01
Peso (kg)	192740.00	8810.91	10277.90	2171.19

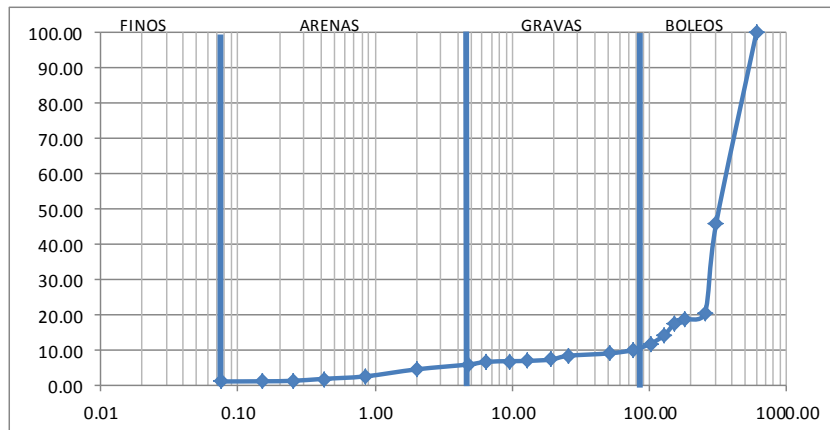


Figura B.4.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-2, 0.00-0.80m

UBICACIÓN: RÍO MISANTLA (CAB. MUNICIPAL MISANTLA)

SONDEO: PCA-2

PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS: 0.80 A 1.50m.

Tamiz (mm)	% que pasa
600.00	100.00
304.80	27.42
252.00	15.12
177.80	13.71
152.40	13.71
127.00	11.69
101.60	9.68
76.12	3.83
50.80	2.26
25.40	2.02
19.05	1.85
12.70	1.66
9.52	1.56
6.35	1.39
4.76	1.25
2.00	0.90
0.84	0.49
0.42	0.23
0.25	0.12
0.15	0.09
0.08	0.08

	BOLEOS	GRAVAS	ARENAS	FINOS
%	96.17	2.58	1.18	0.08
Peso (kg)	238500.00	6389.86	2914.95	195.19

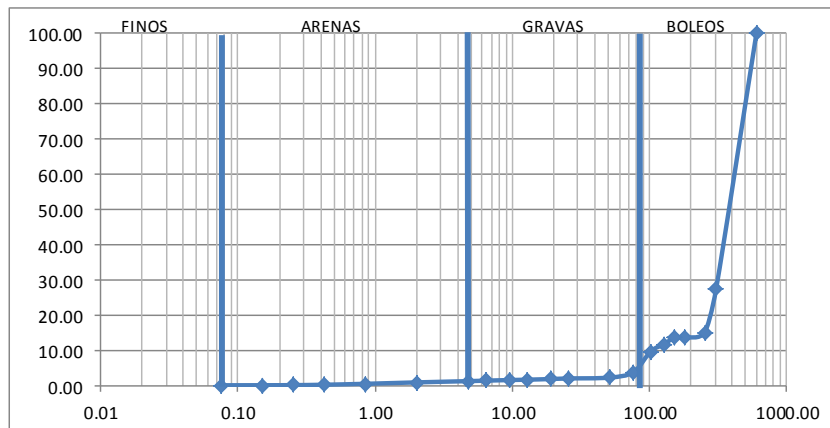


Figura B.5.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-2, 0.80-1.50m

UBICACIÓN: RÍO MISANTLA (CAB. MUNICIPAL MISANTLA)

SONDEO: PCA-2

PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS: 1.50 A 2.30m.

Tamiz (mm)	% que pasa
600.00	100.00
304.80	42.91
252.00	32.73
177.80	19.27
152.40	9.09
127.00	6.98
101.60	4.44
76.12	2.11
50.80	1.84
25.40	1.54
19.05	1.35
12.70	1.27
9.52	1.22
6.35	1.16
4.76	1.07
2.00	0.69
0.84	0.41
0.42	0.17
0.25	0.10
0.15	0.07
0.08	0.05

	BOLEOS	GRAVAS	ARENAS	FINOS
%	97.89	1.04	1.02	0.05
Peso (kg)	269200.00	2863.92	2802.72	133.36

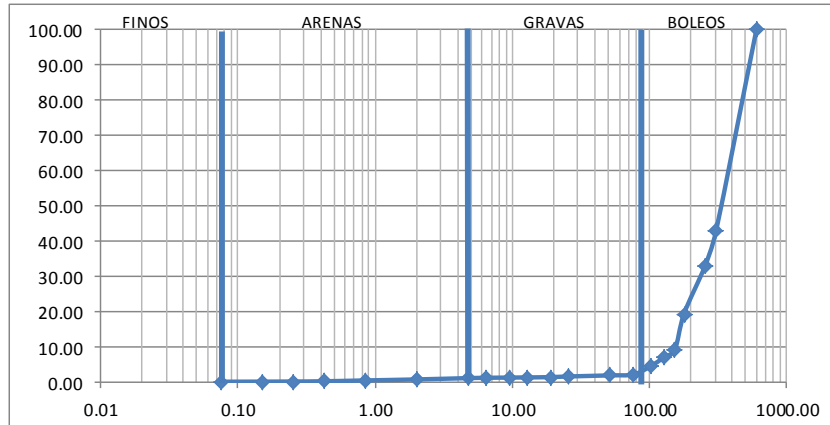


Figura B.6.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-2, 1.50-2.30m

UBICACIÓN: RÍO MISANTLA (CAB. MUNICIPAL MISANTLA)

SONDEO: PCA-2

PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS: 2.30 A 3.50m.

Tamiz (mm)	% que pasa
600.00	100.00
304.80	57.26
252.00	43.59
177.80	23.08
152.40	12.44
127.00	9.27
101.60	4.83
76.12	1.13
50.80	0.88
25.40	0.76
19.05	0.60
12.70	0.49
9.52	0.44
6.35	0.42
4.76	0.41
2.00	0.32
0.84	0.24
0.42	0.10
0.25	0.06
0.15	0.05
0.08	0.05

	BOLEOS	GRAVAS	ARENAS	FINOS
%	98.87	0.72	0.36	0.05
Peso (kg)	231350.00	1686.57	843.10	120.33

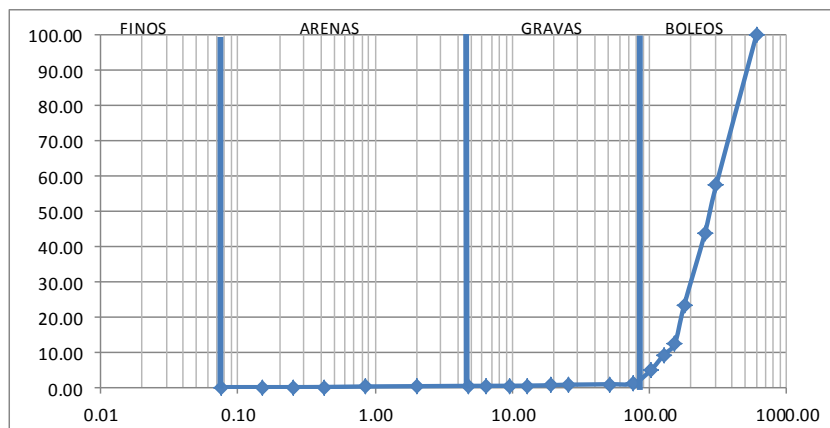


Figura B.7.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-2, 2.30-3.50m

UBICACIÓN: RÍO MISANTLA (CAB. MUNICIPAL MISANTLA)

SONDEO: PCA-3

PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS: 0.00 A 0.80m.

Tamiz (mm)	% que pasa
600.00	100.00
304.80	88.68
252.00	72.76
177.80	65.63
152.40	61.74
127.00	59.64
101.60	59.54
76.12	58.20
50.80	49.11
25.40	36.91
19.05	35.54
12.70	34.26
9.52	31.30
6.35	30.37
4.76	28.59
2.00	20.38
0.84	12.33
0.42	7.38
0.25	5.25
0.15	4.42
0.08	4.22

	BOLEOS	GRAVAS	ARENAS	FINOS
%	41.80	29.61	24.37	4.22
Peso (kg)	99738.00	70657.05	58135.83	10069.12

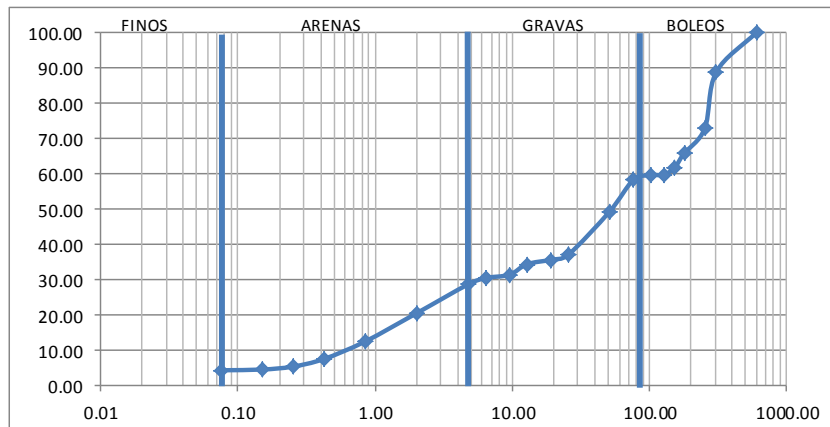


Figura B.8.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-3, 0.00-0.80m

UBICACIÓN: RÍO MISANTLA (CAB. MUNICIPAL MISANTLA)

SONDEO: PCA-3

PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS: 0.80 A 1.50m.

Tamiz (mm)	% que pasa
600.00	100.00
304.80	95.96
252.00	79.80
177.80	54.34
152.40	45.25
127.00	40.71
101.60	40.71
76.12	34.14
50.80	28.46
25.40	19.29
19.05	17.47
12.70	16.52
9.52	16.15
6.35	14.76
4.76	13.49
2.00	11.28
0.84	7.77
0.42	3.79
0.25	2.26
0.15	1.83
0.08	1.58

	BOLEOS	GRAVAS	ARENAS	FINOS
%	65.86	20.65	11.92	1.58
Peso (kg)	130400.00	40880.83	23595.37	3123.80

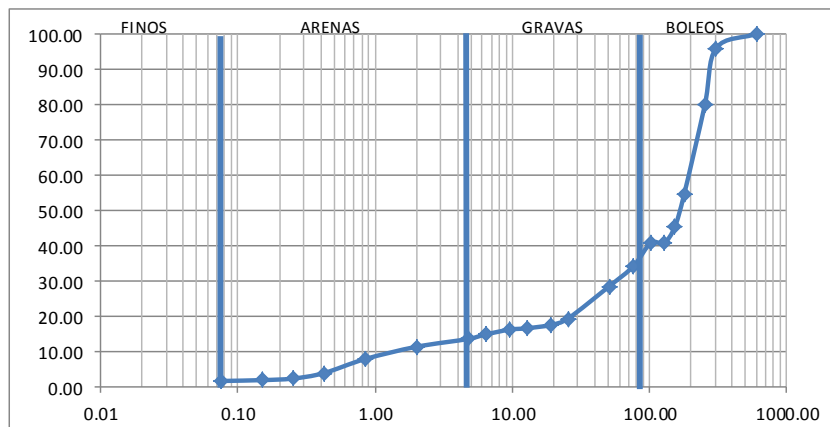


Figura B.9.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-3, 0.80-1.50m

UBICACIÓN: RÍO MISANTLA (CAB. MUNICIPAL MISANTLA)

SONDEO: PCA-3

PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS: 1.50 A 2.30m.

Tamiz (mm)	% que pasa
600.00	100.00
304.80	50.19
252.00	40.38
177.80	24.15
152.40	14.34
127.00	12.83
101.60	11.36
76.12	10.45
50.80	8.12
25.40	6.58
19.05	6.18
12.70	5.29
9.52	4.61
6.35	4.11
4.76	3.12
2.00	2.58
0.84	2.07
0.42	1.29
0.25	1.08
0.15	1.05
0.08	1.01

	BOLEOS	GRAVAS	ARENAS	FINOS
%	89.55	7.34	2.11	1.01
Peso (kg)	237300.00	19437.98	5593.33	2668.69

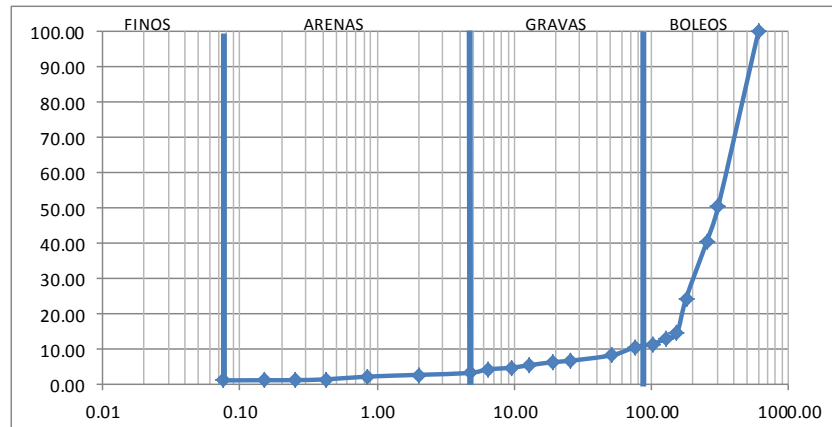


Figura B.10.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-3, 1.50-2.30m

UBICACIÓN: RÍO MISANTLA (CAB. MUNICIPAL MISANTLA)

SONDEO: PCA-3

PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS: 2.30 A 3.5m.

Tamiz (mm)	% que pasa
600.00	100.00
304.80	27.83
252.00	12.74
177.80	8.96
152.40	7.08
127.00	6.23
101.60	5.66
76.12	5.42
50.80	4.71
25.40	3.76
19.05	3.42
12.70	3.21
9.52	3.05
6.35	2.39
4.76	1.97
2.00	1.78
0.84	1.61
0.42	1.40
0.25	1.24
0.15	1.20
0.08	1.19

	BOLEOS	GRAVAS	ARENAS	FINOS
%	94.58	3.45	0.78	1.19
Peso (kg)	200500.00	7321.16	1645.75	2533.09

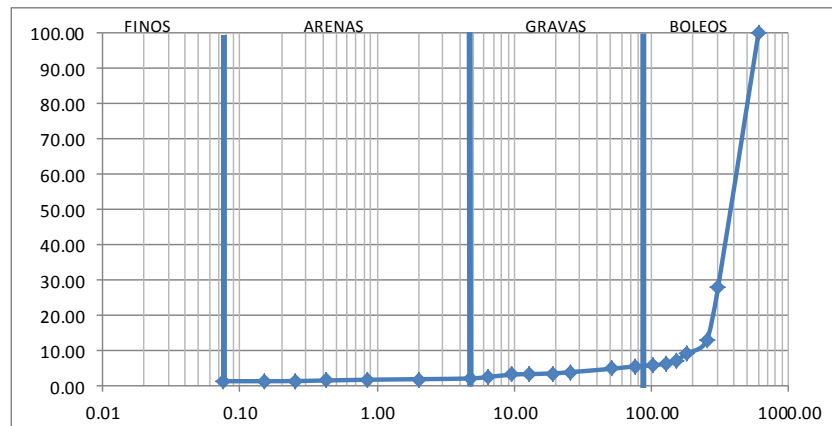


Figura B.11.- Curva general de boleos, gravas y arenas PCA-3, 2.30-3.50m



## PERFIL ESTRATIGRÁFICO

UBICACIÓN: RÍO MISANTLA (CAB. MUNICIPAL MISANTLA)

SONDEO: PCA-1

PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS: 0.00 A 3.50m.

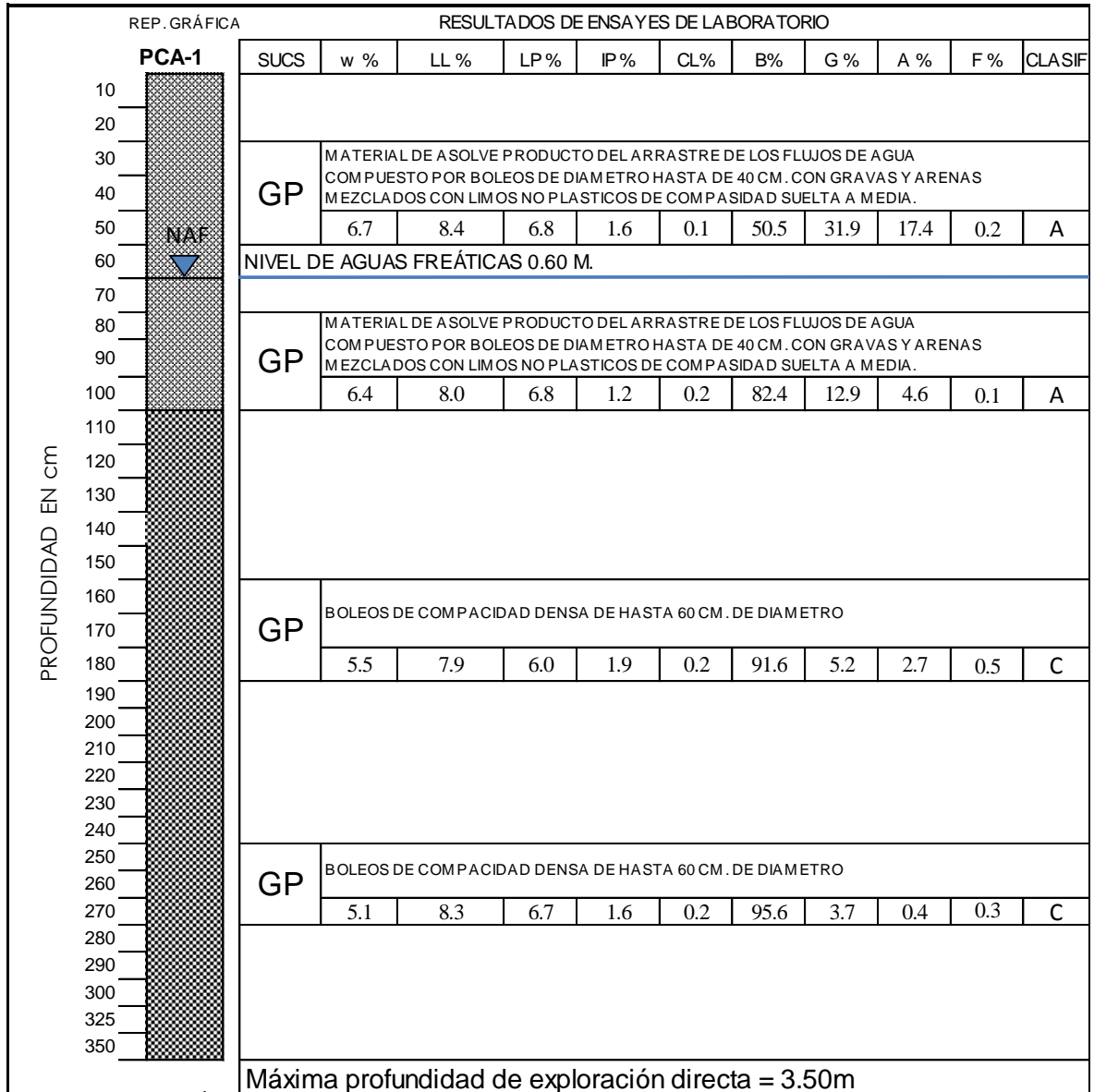


Figura B.12.- Perfil estratigráfico PCA-1

## PERFIL ESTRATIGRÁFICO

UBICACIÓN: RÍO MISANTLA (CAB. MUNICIPAL MISANTLA)

SONDEO: PCA-2

PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS: 0.00 A 3.50m.

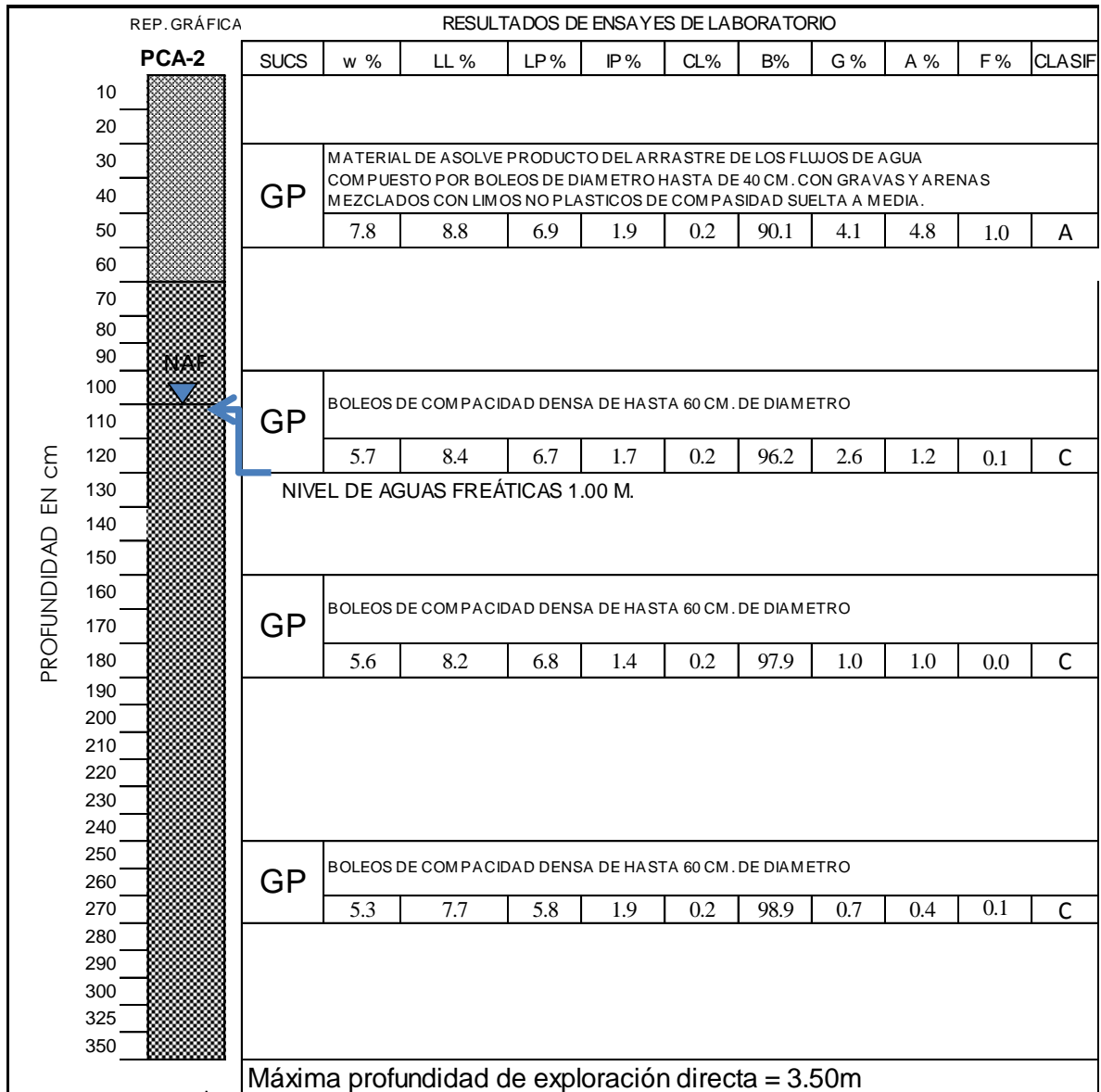


Figura B.13.- Perfil estratigráfico PCA-2

## PERFIL ESTRATIGRÁFICO

UBICACIÓN: RÍO MISANTLA (CAB. MUNICIPAL MISANTLA)

SONDEO: PCA-3

PROFUNDIDAD DE ANÁLISIS: 0.00 A 3.50m.

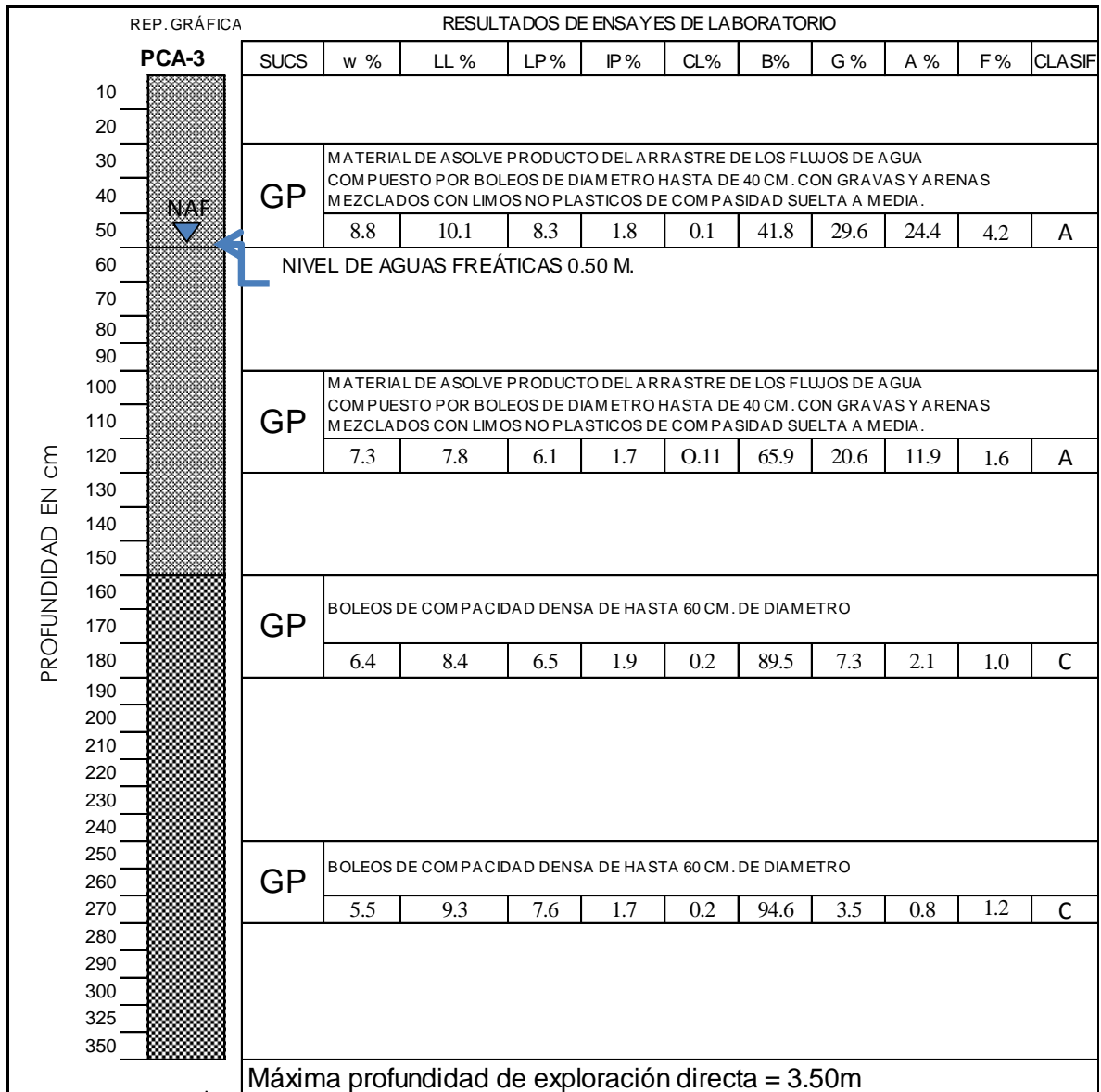


Figura B.14.- Perfil estratigráfico PCA-3

PCA	Profundidad (m)	Tamiz, % retenido						% Gravas	Tipo de Gravas, % según American Geophysical Union				SUCS	Descripción
		50.8	25.4	19.05	9.52	6.35	4.76		Muy fina	Fina	Medio	Gruesa		
1	0.00 - 1.00	6.4	7	4	4	1.2	1	22.4	2.2	2.8	11	6.4	GP	Boleos con gravas y arenas, compacidad suelta a media
	1.00 - 3.50	0.7	2.1	0.3	0.3	0.2	0.2	4.5	0.4	1	2.5	0.7	GP	Boleos de compacidad densa
2	0.00 - 0.60	1	0.7	1.1	1.1	0.2	0.7	4.1	1	0.4	1.8	1	GP	Boleos con gravas y arenas, compacidad suelta a media
	0.60 - 3.50	0.7	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	1.4	0.1	0.2	0.4	0.7	GP	Boleos de compacidad densa
3	0.00 - 1.50	7.4	10.7	1.6	1.6	1.2	1.5	25.1	2.7	2.8	12.3	7.4	GP	Boleos con gravas y arenas, compacidad suelta a media
	1.50 - 3.50	1.5	1.2	0.4	0.4	0.6	0.7	5.4	1.3	1	1.6	1.5	GP	Boleos de compacidad densa

Tabla B.1.- Distribución de boleos