

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO  
AMBIENTE



ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO  
SENSUNAPÁN, COMO ALTERNATIVA PARA EL  
FORTALECIMIENTO DE LA GESTIÓN DE RIESGOS Y  
REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD, EN EL  
DEPARTAMENTO DE SONSONATE, EL SALVADOR.

POR:

JOSÉ HERIBERTO RAMOS PEÑATE

REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERO AGRÓNOMO

SAN SALVADOR, MAYO DE 2016

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR INTERINO:

LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN

SECRETARIA GENERAL:

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

DECANO:

ING. M.Sc. JUAN ROSA QUINTANILLA QUINTANILLA

SECRETARIO:

ING. M.Sc. LUIS FERNANDO CASTANEDA ROMERO

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

---

ING. AGR. M.Sc. JOSÉ MAURICIO TEJADA ASENSIO

DOCENTES DIRECTORES:

---

ING. M.Sc. CARLOS ARMANDO VILLALTA RODRÍGUEZ

---

ING. M.Sc. MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

COORDINADOR GENERAL DE PROCESOS DE GRADUACIÓN:

---

ING. AGR. SABAS ALBERTO ARGUETA PALACIOS

## Resumen

El estudio se desarrolló en marzo de 2014 a febrero de 2016, tuvo objetivo analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Sensunapán, en el departamento de Sonsonate, utilizando herramientas del Sistema de Información Geográfica.

El proceso metodológico inició con la delimitación de la cuenca y microcuencas hidrográficas pertenecientes al río Sensunapán, a partir de mapas a una escala 1:25,000 del Centro Nacional de Registros (CNR), que permitió determinar los límites de la cuenca con mayor precisión. Determinándose además las características morfométricas correspondientes.

Para el cálculo de caudales máximos de la cuenca, se estableció la intensidad de lluvia media de la cuenca a través del registro histórico de las estaciones hidrométricas de Chalchuapa, Juayua, Apaneca, Izalco y Acajutla; las cuales poseen datos de Intensidad, Duración y Frecuencia (I – D – F); tomándose como referencia un periodo de retorno de 02, 05, 10, 15 y 25 años, y una duración de 360 minutos para toda la cuenca y de 150 minutos para la parte alta de la Cuenca del Río Sensunapán.

Las condiciones para la estimación del coeficiente de escorrentía (suelo, vegetación y condición hidrológica) de las microcuencas se determinaron a partir de muestreos y recorridos in-situ. La escorrentía superficial se estimó a través del método del Número de Curva (CN); para lo que fue necesario establecer la Condición Hidrológica y Grupo Hidrológico de suelos de toda el área de la cuenca.

Con los datos de intensidad y el coeficiente de escorrentía, se calculó el caudal máximo para los diferentes periodos de retorno antes mencionados.

La modelación hidráulica se realizó con el software HEC – RAS 4.1.0, permitió calcular para las diferentes configuraciones de caudales en cada una de las secciones transversales a lo largo de los dos tramos ubicados en las comunidades Vega del Río y El Palmar, estudiados del cauce del río Sensunapán; valores simulados de los niveles de agua, las profundidades de flujo y las velocidades, entre otras variables. La simulación se realizó considerando el “tramoalto” desde la comunidad El Palmar (Cód.: 1269.804), hasta el “tramobajo” ubicada en la comunidad Vega del Río (Cód.: 10.30199).

A medida que los caudales máximos aumentan de acuerdo a cada uno de sus periodos de retorno, indica al mismo tiempo una proporción creciente en los mapas o zonas de inundación, desbordamientos y manchas de agua, como consecuencia del aumento



progresivo de los caudales en la comunidad El Palmar (situada aguas arriba) y Vega del Río (aguas abajo), del río Sensunapán.

El régimen del flujo en la sección transversal de la comunidad El Palmar, es de carácter sub crítico, con una tendencia creciente del número de Froude con valores de 0.32, 0.43, 0.48, 0.51 y 0.55, para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15 y 25 años (respectivamente); estableciendo que las velocidades del flujo son menores, pero su tirante es mayor; es decir, que el flujo viaja en el cauce por su propio peso. Ante esta situación, se determina que la capacidad de erosión por parte del flujo en los diferentes periodos de retorno, es moderada.

El régimen del flujo en la sección transversal correspondiente a la comunidad Vega del Río, es de carácter crítico, con un número de Froude de 1.13, el cual es constante para todos los periodos de retorno considerados; determinando de esta manera, que se está ante una situación en donde se generan las condiciones para que se produzca la turbulencia del flujo y con ello, un aumento de la velocidad del caudal provocando mayor erosión del cauce y socavación de las zonas habitadas.

## Agradecimientos

A Dios, por permitirme y darme fortaleza en todo momento

Al ingeniero Luis Alonso Alas Romero, administrador del Centro Tecnológico para la Agricultura y Ganadería (CETAG) de la Estación Experimental y de Prácticas, Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, por su apoyo técnico.

Al ingeniero Abel Alexei Argueta Platero, especialista en sistemas de información geográfica de la Unidad de Posgrados y Educación Continua de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, por su colaboración.

Al ingeniero Héctor Eduardo González Bonilla, técnico especialista en drenajes primarios y obras hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas (MOP), por su asesoría técnica en la modelación hidráulica.

Al ingeniero Roberto Cerón, especialista en hidrología del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), por su colaboración en la parte hidrológica.

Al licenciado Salvador Armando Recinos Pérez, técnico de proyectos de África 70, por su ayuda y coordinación con los habitantes de las comunidades del municipio de Sonsonate.

A la arquitecta Ilaria Picilli, representante en El Salvador de África 70, por la oportunidad de poder desarrollar la investigación durante su gestión.

Al ingeniero Juan Carlos Fuentes Montepeque, por compartir sus conocimientos técnicos en la elaboración y procesamientos hidrológicos.

## Dedicatoria

A Dios todo poderoso, quien me permitió iniciar, desarrollar y finalizar con una meta más en mi vida.

A mi familia, quienes me apoyaron y siempre confiaron en mí a pesar de las adversidades.

A mi novia y futura esposa, Sonia Esperanza García, quien estuvo presente en todo momento y tuvo paciencia para animarme en las etapas más difíciles de la vida.

A mis amigos, quienes estuvieron presentes cuando más se les necesitaba.

La universidad de El Salvador

Mi patria, El Salvador

## ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PÁGINA
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1. Cuencas hidrográficas.....	3
2.2. Características de una cuenca hidrográfica.....	4
2.2.1. Medio natural geográficamente bien definido .....	4
2.2.2. Medio biofísico complejo .....	4
2.2.3. Medio natural morfodinámico .....	4
2.2.4. Medio humano en transformación .....	4
2.3. Caracterización de una cuenca .....	4
2.4. Problemática de las cuencas hidrográficas en Centroamérica. ....	5
2.5. Degradación de cuencas hidrográficas .....	6
2.6. Los sistemas de información geográfica, aplicaciones y modelación hidrológica .....	6
2.7. Hidrología.....	7
2.7.1. Precipitación.....	7
2.7.2. Medición de la precipitación .....	8
2.7.3. Cálculo de la precipitación media sobre una zona.....	8
2.7.3.1. Promedio aritmético.....	8
2.7.3.2. Polígono de Thiessen.....	8
2.7.4. Escurrimiento .....	9
2.7.4.1. Escurrimiento superficial.....	10
2.7.4.2. Escurrimiento subsuperficial.....	10
2.7.4.3. Escurrimiento subterráneo.....	10
2.7.5. Medición del escurrimiento.....	11
2.7.6. Determinación del coeficiente de escorrentía (C) .....	11
2.7.7. Caudales máximos.....	12
2.7.7.1. Caudal específico, $q$ .....	12
2.7.7.2. Caudales máximos, medios y mínimos.....	12
2.7.8. Métodos para el cálculo del caudal máximo .....	13
2.7.8.1. Método directo.....	13
2.7.8.2. Método del número de curva .....	13

2.7.8.3.	Métodos empíricos .....	13
2.7.8.4.	Método del Servicio de Conservación de Suelos (S.C.S.) .....	14
2.7.9.	Características fisiográficas.....	14
2.7.10.	Características físicas de los suelos.....	14
2.7.10.1.	Perfil.....	14
2.7.10.2.	Horizonte .....	15
2.7.10.3.	Límites.....	15
2.7.10.4.	Estructura.....	15
2.7.10.5.	Textura .....	15
2.7.11.	Condición hidrológica .....	16
2.7.12.	Grupos hidrológicos de suelos .....	16
2.7.12.1.	Aluviales .....	16
2.7.12.2.	Andisoles.....	17
2.7.12.3.	Grumosoles .....	17
2.7.12.4.	Latosoles arcillo rojizos.....	17
2.7.12.5.	Litosoles .....	17
2.7.12.6.	Regosoles .....	18
2.7.12.7.	Halomórficos .....	18
2.7.13.	Clasificación de los grupos hidrológicos de suelos .....	18
2.7.14.	Condición de humedad antecedente (CHA) .....	19
2.7.15.	Periodo de retorno.....	19
2.7.16.	Riesgo (R).....	19
2.7.17.	Tiempo de concentración .....	20
2.8.	Conceptos de riesgo, amenaza y vulnerabilidad .....	21
2.8.1.	Riesgo.....	21
2.8.2.	Amenaza .....	23
2.8.3.	Vulnerabilidad .....	23
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
3.1.	Ubicación de la zona en estudio.....	24
3.2.	Delimitación de la Cuenca del Río Sensunapán.....	24
3.3.	Determinación de unidades homogéneas .....	26
3.3.1.	Unidades de unidades homogéneas .....	26
3.4.	Grupo hidrológico del suelo.....	30

3.5.	Condición hidrológica del suelo.....	31
3.6.	Cálculo del número de curva.....	31
3.7.	Cálculo del coeficiente de escorrentía ponderado (C).....	32
3.8.	Determinación de las características morfométricas a través de ArcSWAT.....	33
3.9.	Periodo de retorno (T).....	33
3.10.	Tiempo de concentración.....	34
3.11.	Intensidades medias.....	34
3.12.	Precipitación media.....	38
3.13.	Cálculo de caudales máximos.....	38
3.13.1.	Georreferenciación de las comunidades.....	39
3.14.	Modelización hidráulica.....	40
3.14.1.	Pre proceso.....	41
3.14.1.1.	Digitalización del cauce del río.....	41
3.14.1.2.	Digitalización de las líneas que definen los márgenes “Banks”.....	43
3.14.1.3.	Digitalización de “Flowpaths” de las zonas por donde circula el flujo del agua.....	43
3.14.1.4.	Digitalización de las secciones transversales.....	44
3.14.1.5.	Introducción de topología y elevación al cauce.....	45
3.14.2.	Modelación.....	45
3.14.2.1.	Inicio de un nuevo proyecto.....	45
3.14.2.2.	Introducción de la geometría.....	46
3.14.2.3.	Importación de los datos geométricos.....	47
3.14.2.4.	Ingreso de los datos de caudales máximos.....	48
3.14.2.5.	Condiciones de contorno.....	49
3.14.2.6.	Cálculos hidráulicos.....	49
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
4.1.	Determinación del número de curva para la cuenca del río Sensunapán.....	51
4.1.1.	Condición hidrológica.....	51
4.1.2.	Grupo hidrológico de suelo.....	53
4.1.2.1.	Aluviales.....	53
4.1.2.2.	Andisoles.....	54
4.1.2.3.	Grumsoles.....	54
4.1.2.4.	Latosoles arcillo rojizos.....	54

4.1.2.5.	Litsoles.....	54
4.1.2.6.	Regosoles y halomórficos.....	54
4.1.3.	Determinación del coeficiente de escurrimiento .....	58
4.1.4.	Periodo de retorno.....	59
4.1.5.	Tiempo de concentración .....	59
4.1.6.	Intensidad – Duración – Frecuencia y caudales máximos .....	60
4.2.	Determinación del número de curva en la parte alta de la cuenca del río Sensunapán.....	63
4.2.1.	Condición hidrológica .....	63
4.2.2.	Grupo hidrológico de suelo.....	65
4.2.3.	Determinación del coeficiente de escurrimiento .....	66
4.2.4.	Periodo de retorno.....	67
4.2.5.	Tiempo de concentración .....	67
4.2.6.	Intensidad – Duración – Frecuencia (I – D – F) y caudales máximos. ....	68
4.3.	Georreferenciación de las comunidades de la cuenca del río Sensunapán.....	71
4.3.1.	Bendición de Dios .....	71
4.3.2.	Peña Alta .....	71
4.3.3.	Río Julupe .....	71
4.3.4.	San Juan de Dios .....	71
4.3.5.	Las Palmeras .....	72
4.3.6.	Oseas Perlas.....	72
4.3.7.	Río Bonito .....	72
4.3.8.	Brisas del Río.....	72
4.3.9.	Luces del Río .....	73
4.3.10.	El Palmar.....	73
4.3.11.	Veracruz.....	73
4.3.12.	Vega del Río .....	73
4.3.13.	Santa Marta.....	74
4.3.14.	Bosques del Río.....	74
4.4.	Modelación hidráulica .....	74
4.4.1.	Análisis de resultados para un periodo de retorno de dos años.....	75
4.4.1.1.	Sección transversal: El Palmar .....	75
4.4.1.2.	Sección transversal: Vega del Río.....	75

4.4.1.3.	Perfil longitudinal del flujo .....	77
4.4.1.4.	Zonas de inundación .....	77
4.4.2.	Análisis de resultados para un periodo de cinco años .....	81
4.4.2.1.	Sección transversal: El Palmar .....	81
4.4.2.2.	Sección transversal: Vega del Río .....	81
4.4.2.3.	Perfil longitudinal del flujo .....	82
4.4.2.4.	Zonas de inundación .....	83
4.4.3.	Análisis de resultados para un periodo de 10 años .....	86
4.4.3.1.	Sección transversal: El Palmar .....	86
4.4.3.2.	Sección transversal: Vega del Río .....	87
4.4.3.3.	Perfil longitudinal del flujo .....	88
4.4.3.4.	Zonas de inundación .....	88
4.4.4.	Análisis de resultados para un periodo de 15 años .....	92
4.4.4.1.	Sección transversal: El Palmar .....	92
4.4.4.2.	Sección transversal: Vega del Río .....	92
4.4.4.3.	Perfil longitudinal del flujo .....	93
4.4.4.4.	Zonas de inundación para un periodo de retorno de 15 años .....	94
4.4.5.	Análisis de resultados para un periodo de 25 años .....	97
4.4.5.1.	Sección transversal: El Palmar .....	97
4.4.5.2.	Sección transversal: Vega del Río .....	98
4.4.5.3.	Perfil longitudinal del flujo .....	99
4.4.5.4.	Zonas de inundación .....	99
5.	CONCLUSIONES .....	106
6.	RECOMENDACIONES .....	107
7.	BIBLIOGRAFIA .....	108
8.	ANEXOS .....	112



## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación hidrológica de los suelos .....	30
Cuadro 2. Escurrimiento directo en función de la cobertura vegetal de la cuenca.....	31
Cuadro 3. Número de curva para diferentes prácticas agrícolas, diferentes condiciones hidrológicas y grupo hidrológico de suelos.....	32
Cuadro 4. Periodo de retorno de diseño recomendado para estructuras menores.....	33
Cuadro 5. Condición hidrológica del suelo en la cuenca del río Sensunapán. ....	51
Cuadro 6. Uso y área del suelo de la cuenca del río Sensunapán. ....	52
Cuadro 7. Distribución de la cobertura vegetal presente en la Cuenca del Río Sensunapán.	52
Cuadro 8. Distribución del área, porcentaje y uso del suelo de la Cuenca del Río Sensunapán, sin tejido urbano.....	52
Cuadro 9. Grupo hidrológico de suelos presentados en la cuenca del río Sensunapán. ....	56
Cuadro 10. Clasificación y tratamiento del uso del suelo de la cuenca del río Sensunapán..	56
Cuadro 11. Número de curva para diferentes prácticas agrícolas, condiciones hidrológicas y grupos hidrológicos de suelos.....	57
Cuadro 12. Coeficiente de escorrentía ponderado de la cuenca del río Sensunapán. ....	58
Cuadro 13. Intensidades medias, precipitaciones promedios y caudales máximos determinados en la Cuenca del Río Sensunapán, con periodo de retorno de 02, 05, 10, 15 y 25 años, y una duración de 360 minutos.....	60
Cuadro 14. Condición hidrológica de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán. ....	63
Cuadro 15. Uso y área del suelo de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán.....	63
Cuadro 16. Distribución porcentual de la cobertura vegetal presente en la parte alta de la Cuenca del Río Sensunapán. ....	64
Cuadro 17. Clasificación y tratamiento del uso del suelo de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán. ....	64
Cuadro 18. Número de curva para diferentes prácticas agrícolas, condiciones hidrológicas y grupos hidrológicos de suelos.....	65

Cuadro 19. Coeficiente de escorrentía ponderado de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán. ....	66
Cuadro 20. Intensidades medias, precipitaciones promedios y caudales máximos determinados en la parte alta del río Sensunapán, para periodos de retorno de 02, 05, 10, 15 y 25 años, y una duración de 150 minutos.....	68
Cuadro 21. Representación de las secciones transversales para periodo de retorno de dos años.....	76
Cuadro 22. Criterios de clasificación del régimen de flujo en canales abiertos.....	76
Cuadro 23. Representación de las secciones transversales para periodo de retorno de cinco años.....	82
Cuadro 24. Criterios de clasificación del régimen de flujo en canales abiertos.....	82
Cuadro 25. Representación de las secciones transversales para periodo de retorno para diez años.....	87
Cuadro 26. Criterios de clasificación del régimen de flujo en canales abiertos.....	87
Cuadro 27. Representación de las secciones transversales para un periodo de retorno de 15 años.....	93
Cuadro 28. Criterios de clasificación del régimen de flujo en canales abiertos.....	93
Cuadro 29. Representación de las secciones transversales para periodo de retorno de 25 años.....	98
Cuadro 30. Criterios de clasificación del régimen de flujo en canales abiertos.....	98
Cuadro 31. Régimen del flujo y número de Froude para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15 y 25 años.....	103
Cuadro 32. Velocidades medias del flujo para para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15 y 25 años.....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Sensunapán en el departamento de Sonsonate y en El Salvador. ....	24
Figura 2. Determinación y selección de micro cuencas pertenecientes a la cuenca del río Sensunapán .....	25
Figura 3. Modelo de Elevación Digitalizado (D.E.M.), de la cuenca del río Sensunapán.....	25
Figura 4. HillShade de la cuenca del río Sensunapán.....	26
Figura 5. Mapa de texturas de suelos de la cuenca del río Sensunapán .....	27
Figura 6. Mapa de cobertura y uso del suelo de la cuenca del río Sensunapán.....	28
Figura 7. Mapa de unidades homogéneas de la cuenca del río Sensunapán .....	29
Figura 8. Estaciones climatológicas de El Salvador. ....	35
Figura 9. Mapa de estaciones hidrométricas de la cuenca del río Sensunapán .....	36
Figura 10. Mapa de polígonos de Thiessen de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán .....	37
Figura 11. Mapa de las comunidades pertenecientes a la parte alta de la cuenca del río Sensunapán. ....	39
Figura 12. Capas CAD utilizadas para la generación del modelo TIN. ....	41
Figura 13. Capas para la generación del TIN.....	42
Figura 14. Digitalización del tramo del río Sensunapán .....	42
Figura 15. Edición de los límites del cauce o “Banks.shp”. ....	43
Figura 16. Digitalización de los “flowpaths.shp”. ....	44
Figura 17. Edición de las Secciones Transversales o “XScutlines.shp”. ....	44
Figura 18. Digitalización del tramo del río, Banks, Flowpaths y XScutlines. ....	45
Figura 19. Cauce del río Sensunapán y secciones transversales. ....	46
Figura 20. Creación de la carpeta “Save Geometry Data”.....	47
Figura 21. Pantalla para editar secciones (“Cross Section Data”). ....	48
Figura 22. Entrada de datos de caudal, pantalla “Steady Flow Data”.....	48
Figura 23. Editor de condiciones de contorno “Steady Flow Boundary Conditions”.....	49
Figura 24. Pantalla “Steady Flow Analysis”.....	50
Figura 25. Grupo hidrológico de suelos de la cuenca del río Sensunapán.....	55
Figura 26. Intensidades medias, precipitación promedio y caudales máximos de la cuenca del río Sensunapán, para una duración de 360 minutos y periodos de retorno de 02, 05, 10, 15, y 25 años. ....	61
Figura 27. Intensidad media de la cuenca del río Sensunapán, para una duración de 360 minutos y periodos de retorno de 02, 05, 10, 15, y 25 años. ....	61

Figura 28. Precipitación promedio de la cuenca del Río Sensunapán, para una duración de 360 minutos y periodos de retorno de 02, 05, 10, 15, y 25 años.....	62
Figura 29. Caudales máximos determinados de la cuenca del río Sensunapán, para una duración de 360 minutos y periodos de retorno de 02, 05, 10, 15, y 25 años.....	62
Figura 30. Intensidades medias, precipitación promedio y caudales máximos de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán, para una duración de 150 minutos y periodos de retorno de 02, 05, 10, 15, y 25 años.....	69
Figura 31. Intensidades medias de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán, para una duración de 150 minutos y periodos de retorno de 02, 05, 10, 15, y 25 años.....	69
Figura 32. Precipitación promedio de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán, para una duración de 150 minutos y periodos de retorno de 02, 05, 10, 15, y 25 años.....	70
Figura 33. Caudales máximos determinados en la parte alta de la cuenca del río Sensunapán, para una duración de 150 minutos y periodos de retorno de 02, 05, 10, 15, y 25 años.....	70
Figura 34. Sección transversal de la Comunidad El Palmar.....	75
Figura 35. Sección transversal de la Comunidad Vega del Río.....	76
Figura 36. Perfil longitudinal del flujo, para un periodo de retorno de 2 años. ....	77
Figura 37. Límite de inundación de las secciones en estudio.....	78
Figura 38. Zonas de inundacion.....	78
Figura 39. Límite de inundación de la comunidad El Palmar.....	79
Figura 40. Áreas de inundación de la comunidad El Palmar .....	79
Figura 41. Límite de inundaciones de la comunidad Vega del Río.....	80
Figura 42. Áreas inundadas en la comunidad Vega del Río.....	80
Figura 43. Sección transversal de la comunidad El Palmar.....	81
Figura 44. Sección transversal de la comunidad Vega del Río .....	81
Figura 45. Perfil del flujo para un periodo de cinco años.....	82
Figura 46. Límite de inundación de las secciones en estudio.....	83
Figura 47. Zonas de inundación.....	84
Figura 48. Límite de inundación de la comunidad El Palmar.....	84
Figura 49. Áreas de inundación de la comunidad El Palmar .....	85
Figura 50. Límite de inundaciones de la comunidad Vega del Río.....	85
Figura 51. Áreas inundadas en la comunidad Vega del Río.....	86
Figura 52. Sección transversal de la comunidad El Palmar.....	86
Figura 53. Sección transversal de la comunidad Vega del Río .....	87
Figura 54. Perfil longitudinal del flujo para un periodo de retorno de diez años.....	88

Figura 55. Límite de inundación de las secciones en estudio.....	89
Figura 56. Zonas de inundación.....	89
Figura 57. Límite de inundación de la comunidad El Palmar.....	90
Figura 58. Áreas de inundación de la comunidad El Palmar .....	90
Figura 59. Límite de inundaciones de la comunidad Vega del Río.....	91
Figura 60. Áreas inundadas en la comunidad Vega del Río.....	91
Figura 61. Sección transversal de la comunidad El Palmar.....	92
Figura 62. Sección transversal de la comunidad Vega del Río .....	92
Figura 63. Perfil longitudinal del flujo para un periodo de 15 años .....	93
Figura 64. Límite de inundación de las secciones en estudio.....	94
Figura 65. Zonas de inundación.....	95
Figura 66. Límite de inundación de la comunidad El Palmar.....	95
Figura 67. Áreas de inundación de la comunidad El Palmar .....	96
Figura 68. Límite de inundaciones de la comunidad Vega del Río.....	96
Figura 69. Áreas inundadas en la comunidad Vega del Río.....	97
Figura 70. Sección transversal de la comunidad El Palmar.....	97
Figura 71. Sección transversal de la comunidad Vega del Río .....	98
Figura 72. Perfil longitudinal del flujo para un periodo de retorno de 15 años .....	99
Figura 73. Límite de inundación de las secciones en estudio.....	100
Figura 74. Zonas de inundación de la comunidad El Palmar y Vega del Río .....	100
Figura 75. Límite de inundación de la comunidad El Palmar.....	101
Figura 76. Áreas de inundación de la comunidad El Palmar .....	101
Figura 77. Límite de inundaciones de la comunidad Vega del Río.....	102
Figura 78. Áreas inundadas en la comunidad Vega del Río.....	102
Figura 79. Velocidades medias (m/s) del flujo para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15 y 25 años.....	103

## ÍNDICE DE ANEXOS

Cuadro A – 1. Intensidades máximas de las estaciones climatológicas de Chalchuapa, Juayua, Apaneca, Izalco y Acajutla; para un periodo de retorno de 02, 05, 10, 15 y 25 años, y una duración de 360 minutos.....	112
Cuadro A – 2. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca, Izalco y Acajutla; con un periodo de retorno de 02 años y una duración de 360 minutos.....	112
Cuadro A – 3. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca, Sonzacate - Izalco y Acajutla; con un periodo de retorno de 05 años y una duración de 360 minutos.....	112
Cuadro A – 4. Intensidades medias y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca, Izalco y Acajutla; con un periodo de retorno de 10 años y una duración de 360 minutos.....	113
Cuadro A – 5. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca, Izalco y Acajutla; con un periodo de retorno de 15 años y una duración de 360 minutos.....	113
Cuadro A – 6. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca, Izalco y Acajutla; con un periodo de retorno de 25 años y una duración de 360 minutos.....	114
Cuadro A – 7. Intensidades máximas de las estaciones climatológicas de Chalchuapa, Juayua, Apaneca e Izalco ; para un periodo de retorno de 02, 05, 10, 15 y 25 años, y una duración de 150 minutos.....	114
Cuadro A – 8. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca, Izalco y Acajutla; con un periodo de retorno de 02 años y una duración de 150 minutos.....	114
Cuadro A – 9. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca e Izalco; con un periodo de retorno de 05 años y una duración de 150 minutos. ....	115
Cuadro A – 10. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca e Izalco; con un periodo de retorno de 10 años y una duración de 150 minutos. ....	115

Cuadro A – 11. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca e Izalco; con un periodo de retorno de 15 años y una duración de 150 minutos. ....	116
Cuadro A – 12. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca e Izalco; con un periodo de retorno de 25 años y una duración de 150 minutos. ....	116
Cuadro A – 13. Valores del coeficiente de escorrentía.....	116
Cuadro A – 14. Gasto unitario.....	117
Cuadro A – 15. Valores de R, en función de T y n .....	117
Cuadro A – 16. Velocidades medias de escurrimiento por laderas (m/min) .....	118

## 1. INTRODUCCIÓN

Los países de la región Centroamericana, sufren frecuentes inundaciones que afectan principalmente las pocas zonas planas, constituyéndose en el problema natural más perjudicial, que afecta las economías nacionales. Además, el crecimiento demográfico, comercial e industrial de las poblaciones (usualmente no planificado), ejerce una seria presión sobre los recursos naturales y proveedores de diversos servicios ambientales (agua, oxígeno, belleza escénica, entre otros).

La situación anterior, se ha agravado debido al manejo inadecuado de las cuencas (deforestación, impermeabilización, uso agropecuario inapropiado); esto hace que los caudales máximos aumenten, y el tiempo de concentración disminuya, aumentando el riesgo para las poblaciones que se encuentran en cuencas vulnerables. Esta situación se magnifica cuando no se establecen estrategias de corto, mediano y largo plazo para el ordenamiento territorial de las actividades en las cuencas hidrográficas. Debido a que se generan conflictos desencadenadores de procesos degradantes, cuando el uso de la tierra excede la capacidad de uso, principalmente en las zonas media y alta de las cuencas hidrográficas; mismas que son las principales áreas de recarga.

En el departamento de Sonsonate, se presenta la mayor cantidad de precipitaciones en la zona de la cordillera del bálsamo y en la zona noroccidental de dicho departamento, el resto del departamento presenta precipitaciones moderadas de acuerdo a información del Sistema Nacional de Estudios Territoriales (SNET, citado por Geólogos del mundo, 2005). La zona sur del departamento presenta alta susceptibilidad a inundaciones específicamente municipios como Santa Isabel Ishuatán y Acajutla. El municipio de Sonsonate es de susceptibilidad moderada y el resto de baja susceptibilidad en cuanto a inundaciones.

Uno de los factores que inciden de forma indirecta, es que las medidas que permitan garantizar o salvaguardar las vidas de los habitantes por los efectos de la precipitación - inundación, son pocas o nulas y las que existen no son lo suficientemente ejecutadas en todas las zonas específicas; esto debido a los pocos estudios hidrológicos realizados que permitan profundizar más en relación al impacto generado por las constantes precipitaciones.

Con lo anterior, se tuvo como objetivo analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Sensunapán, como alternativa para el fortalecimiento de la gestión de riesgos y



reducción de la vulnerabilidad. Se realizó el análisis biofísico, así como las variaciones hidrológicas de la cuenca, como consecuencia de las altas precipitaciones, lo que permitió modelar el comportamiento hidráulico para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15 y 25 años; los cuales establecieron los límites, zonas de inundación y la vulnerabilidad que presentan los habitantes; así como la capacidad de erosión del cauce del río provocada por su mismo flujo.

Los objetivos de esta investigación fueron evaluar las características biofísicas de la cuenca del río Sensunapán, del departamento de Sonsonate, para la determinación de las propiedades específicas que se presentan en la zona, cuantificar las variaciones hidrológicas de la cuenca del Río Sensunapán, que impactan en relación con la inundación en las zonas habitadas, como consecuencia de las altas precipitaciones y para el fortalecimiento de la gestión de riesgos y reducción de vulnerabilidad y simular el comportamiento hidráulico de las estructuras diseñadas para la Cuenca del Río Sensunapán, en las zonas de riesgo para la reducción de vulnerabilidad por las inundaciones ocasionadas por las precipitaciones.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Cuencas hidrográficas

La cuenca hidrográfica es un área natural en la que el agua proveniente de la precipitación y forma un curso principal de agua. La conforman componentes biofísico (agua, suelo), biológicos (flora, fauna) y antrópicos (socioeconómicos, culturales e institucionales) que están relacionados y en equilibrio entre sí, de tal manera que al afectarse uno de ellos, se produce un desbalance que pone en peligro todo el sistema (Ramakrishna, citado por Luque, 2005).

La cuenca es la entidad hidrológica de producción y de concentración de los escurrimientos, por lo tanto es la unidad para estudiar la generación de los flujos de agua en la naturaleza (Rojas, citado por Fuentes, 2013).

El CATIE, citado por Morales Mendoza (2003), define el término cuenca hidrográfica como una unidad territorial que está delimitada por la influencia de un sistema de drenaje superficial, que tiene como límites físicos la divisoria de las aguas, hasta la confluencia del río principal a otro río mayor, lago o mar y en la que se interrelacionan sistemáticamente procesos biofísicos, socioeconómicos y ambientales. Es un sistema integrado por elementos biológicos, físicos, sociales y económicos, que se caracteriza por su dinámica, por la interacción e interrelación de sus componentes o elementos.

La cuenca hidrográfica se define como el territorio que está limitado por cerros, partes elevadas y montaña, de los cuales se configura una red de drenaje superficial, que en presencia de precipitación de lluvias, forma el escurrimiento de un río para conducir sus aguas a un río más grande o a otro río principal, lago o mar (Faustino et al. 2001, citado por Luque, 2005). El mismo autor también señala que es en la cuenca es donde se ubican todos los recursos naturales y actividades que realiza el hombre, en donde interactúa el sistema biofísico con el socioeconómico y están en una dinámica integral constituyendo una unidad de análisis para valorar el nivel de intervención del hombre, los problemas generados en forma natural y antrópica.

En la cuenca hidrográfica se encuentran los recursos naturales, la infraestructura que el hombre ha creado, donde desarrolla sus actividades económicas y sociales, generando diferentes efectos favorables y no favorables para el bienestar humano. No existe ningún

punto de la tierra que no pertenezca a una cuenca hidrográfica. (World Vision, citado por Torres Guerra, 2008).

## **2.2. Características de una cuenca hidrográfica**

Según el MAG-FOR, (citado por Morales Mendoza, 2003) una cuenca hidrográfica posee las siguientes características:

### **2.2.1. Medio natural geográficamente bien definido**

Es el área de alimentación de una red natural de drenaje cuyas aguas son recogidas por un colector común.

### **2.2.2. Medio biofísico complejo**

Es un medio natural compuesto por diferentes elementos: suelo, agua, vegetación, flora, fauna, subsuelo y clima; es complejo por las interrelaciones e interacciones que dichos elementos mantienen en el dinámico equilibrio de la naturaleza.

### **2.2.3. Medio natural morfodinámico**

La génesis de la morfología de una cuenca es un proceso dinámico porque según el clima que prevalece en una cuenca, las formaciones superficiales y el tipo de relieve se operan constantes modificaciones en la morfología de la cuenca, como decir, cambios en el patrón de drenaje, eliminación de meandros, formación de brazos, creación de áreas de abrupción, de transporte y de acumulación de los sedimentos, etc.

### **2.2.4. Medio humano en transformación**

Se refiere a la demografía, la tenencia de la tierra, la estructura social de los sistemas de producción, las condiciones de mercado y de crédito, etc.

## **2.3. Caracterización de una cuenca**

Faustino, citado por Romero y Ponce (2009), establece que la caracterización está dirigida a cuantificar las variables que tipifican a la cuenca con el fin de establecer las posibilidades y limitaciones de sus recursos naturales y las condiciones socioeconómicas de las comunidades humanas que la habitan. Es conocida como la fase de inventarios, evaluación

e interpretación de los aspectos biofísicos, sociales, económicos y administrativos de todos los recursos de la cuenca. La caracterización permite definir:

Las condiciones físicas, climáticas y topográficas del área.

El inventario y condiciones de los recursos naturales renovables.

El uso y la tecnología aplicada en el aprovechamiento de los recursos naturales de la cuenca y sus efectos sobre los mismos.

Localización, dotación, operación y mantenimiento de los servicios públicos.

Las condiciones socioeconómicas y culturales de la población.

El CATIE, citado por Morales Mendoza (2003), enfatiza que la caracterización básica de una cuenca se inicia con la determinación de los parámetros geomorfológicos, que describen la estructura física del ámbito territorial. Entre los más importantes figuran: la forma, tamaño o área, longitud máxima, ancho máximo, pendiente del cauce principal, pendiente media, red de drenaje (forma, tipo, grado de bifurcación), altura máxima, etc. Algunos de estos parámetros sirven de base para considerar peligros a desastres naturales: forma de drenaje, pendiente media, etc. Luego se procede a la caracterización biofísica, que está referida a la descripción de los elementos físicos y biológicos, como son el relieve o topografía, suelo, geología, clima, vegetación, uso de la tierra, hidrología, fauna, ecología, entre otros. Con esta información es posible identificar la vulnerabilidad natural.

#### **2.4. Problemática de las cuencas hidrográficas en Centroamérica.**

La mayoría de las cuencas hidrográficas de Centro América, se caracterizan por un estado actual de deterioro y degradación. Sus causas son las prácticas inadecuadas de manejo y uso de la tierra, consideradas en su mayoría como críticas (Leonard, citado por Medina Banegas, 1995); donde, una deficiente planificación y manejo del uso de la tierra, genera una serie de impactos negativo en obras y actividades implementadas en dichas cuencas (Faustino, citado por Medina Banegas, 1995).

La opción de reducir la fuerte presión sobre las tierras de ladera, es optimizando la productividad de las zonas planas, menos propensas a la degradación erosiva (Solís, *et al.*, citado por Medina Banegas, 1995) sin embargo, estas zonas sufren, frecuentemente, de periódicas inundaciones, provocando pérdidas económicas importantes.

## **2.5. Degradación de cuencas hidrográficas**

La degradación ambiental de una cuenca hidrográfica se explica por la acción del agua en su expresión hidrocínética al modificar el paisaje, aparecen diversos fenómenos erosivos que provocan una degradación intensa de la tierra y producen una modificación sustancial del régimen hidrológico; estos efectos notables los percibe la población rural por medio de sequías e inundaciones (FAO, citado por Morales Mendoza, 2003).

En la degradación de las cuencas hidrográficas ha jugado un papel importante la deforestación, la que a su vez ha sido causa principal de la erosión. La deforestación y la erosión hídrica ocasionan alteraciones al régimen hidrológico de las cuencas y en sus patrones de drenaje.

En términos generales la mayoría de las cuencas están siendo sometidas a una fuerte disminución de la cobertura vegetal y a un incremento de la erosión, lo que se refleja en un aporte grande de sedimentos a los ríos y corrientes de agua. Esta degradación de las cuencas las tiene desprotegidas contra los efectos e impactos de fenómenos como el huracán Mitch (MARENA, citado por Morales Mendoza, 2003).

## **2.6. Los sistemas de información geográfica, aplicaciones y modelación hidrológica**

Fedra, citado por Hernández Cáceres (2003), define los Sistemas de Información Geográficas (SIG) como “herramientas basadas en sistemas de cómputo para capturar, manipular, procesar y desplegar datos espaciales o georreferenciados, conteniendo datos geométricos (coordenadas e información topológica) y datos de atributos o información que describe las propiedades de objetos geométricos como puntos, líneas y áreas”.

Por lo tanto, los SIG son una herramienta útil, en el manejo de cuencas, para procesar datos complejos de mapeo e inventario, determinar áreas de riesgo a inundaciones, tasa de deforestación y áreas con mayor potencial para determinado uso. También facilitan la simulación o modelación sobre espacio y tiempo. Esto permite a los decisores elegir alternativas que ocasionen el menor daño posible a los recursos naturales (Sánchez, citado por Medina Banegas 1995).

Sin embargo, su utilidad es limitada debido a la escasez y disponibilidad de información requerida, capacidad de los programas y equipos y; a la habilidad y experiencia de quienes lo manejan. Según Hernández, citado por Medina Banegas (1995), la ventaja del SIG es que una vez creada la base de datos, es un sistema eficiente y rápido para obtener resultados, con posibilidades de manejar volúmenes grandes de información.

## **2.7. Hidrología**

Hidrología es la ciencia geográfica que se dedica al estudio de la distribución, espacial y temporal, y las propiedades del agua presente en la atmósfera y en la corteza terrestre. Esto incluye las precipitaciones, la escorrentía, la humedad del suelo, la evapotranspiración y el equilibrio de las masas glaciares (Aparicio, 1996).

Kazmann (1969), establece que La hidrología puede definirse como la disciplina que trata de las propiedades, existencia, distribución y movimiento del agua sobre y bajo de la superficie de la tierra.

Meinzer, citado por Kazmann (1969), definió a la hidrología como la ciencia interesada en la existencia del agua en la tierra. Sus reacciones físicas y químicas con el resto de ésta y su relación con la vida sobre la misma.

### **2.7.1. Precipitación**

La precipitación es toda forma de humedad que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie del suelo; de acuerdo con esta definición, la precipitación puede ser en forma de: lluvias, granizadas, nevadas, entre otras.

Desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre; sus mediciones y análisis forman el punto de partida de los estudios concernientes al uso y control del agua (Villón Béjar, M. 2004).

La formación de precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Los tres mecanismos principales para la elevación de masas de aire son la elevación frontal, donde el aire caliente es elevado sobre aire frío por un pasaje frontal; la elevación orográfica, mediante la cual una masa de aire se eleva para pasar encima de una cadena montañosa; y la elevación convectiva, donde el aire se arrastra hacia arriba por una acción convectiva, como ocurre en el centro de una celda de una tormenta eléctrica. Las celdas convectivas se originan por el

calor superficial, el cual causa una estabilidad vertical de aire húmedo, y se sostienen por el calor latente de vaporización liberado a medida que el vapor del agua sube y se condensa (Ven Te Chow, *et al.* 1994).

### **2.7.2. Medición de la precipitación**

El método de la media aritmética es el más simple para determinar la lluvia promedio sobre un área. Se promedian las profundidades de flujo que se registran en un número dado de pluviómetros. Este método es satisfactorio si los pluviómetros se distribuyen uniformemente sobre el área y sus mediciones individuales no varían de manera considerable de la media (Ven Te Chow, *et al.* 1994).

La precipitación se mide en términos de la altura de lámina de agua (*hp*) y se expresa comúnmente en milímetros. Esta altura de lámina de agua indica la altura del agua que se acumularía en una superficie horizontal, si la precipitación permaneciera donde cayó. Los aparatos de medición se basan en la exposición a la intemperie de un recipiente cilíndrico abierto en su parte superior, en el cual se recoge el agua producto de la lluvia u otro tipo de precipitación, y se registra su altura. Los aparatos de medición se clasifican, de acuerdo con el registro de las precipitaciones, en pluviómetros y pluviógrafos (Villón Béjar, M. 2004).

### **2.7.3. Cálculo de la precipitación media sobre una zona**

Los pluviómetros registran la lluvia puntual, es decir, la que se produce en el punto en la que está instalada el aparato. Para muchos problemas hidrológicos, se requiere conocer la altura de precipitación media de una zona, la cual puede estar referida a la altura de precipitación diaria, mensual, anual, media mensual, media anual (Villón Béjar, M. 2004).

Para calcular la precipitación media de una tormenta o la precipitación media anual, existen tres métodos que contribuyen a su determinación:

#### **2.7.3.1. Promedio aritmético**

Consiste en obtener el promedio aritmético, de las alturas de precipitaciones registradas, de las estaciones localizadas dentro de la zona.

#### **2.7.3.2. Polígono de Thiessen**

El método de los polígonos de Thiessen, establece que en cualquier punto de la cuenca la lluvia es igual a la que se registra en el pluviómetro más cercano; luego la profundidad se

registra en un pluviómetro dado que se aplica hasta la mitad de la distancia a la siguiente estación pluviométrica en cualquier dirección. Los pesos relativos de cada pluviómetro se determinan de las correspondientes áreas de aplicación en una red de polígonos de Thiessen, cuyas fronteras están formadas por los bisectores perpendiculares a las líneas que unen pluviómetros adyacentes (Ven Te Chow, *et al.* 1994).

El método de Thiessen generalmente, es más exacto que el método de la media aritmética; pero es inflexible, debido a que se tiene que construir una nueva red de Thiessen cada vez que haya un cambio en la red de pluviómetros, tal como ocurre cuando falta información en alguno de ellos. Además, el método de Thiessen no tiene en cuenta en forma directa las influencias de la orografía en la lluvia (Ven Te Chow, *et al.* 1994).

Para este método, es necesario conocer la localización de las estaciones en la zona bajo estudio, ya que para su aplicación se requiere delimitar la zona de influencia de cada estación

#### **2.7.4. Escurrimiento**

El escurrimiento es otra componente del ciclo hidrológico; se define como el agua proveniente de la precipitación, que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca (estación de aforo) (Villón Béjar, M. 2004).

Si se analiza un corte esquemático de la superficie terrestre, se comprueba que la precipitación cuando llega a la superficie, se comporta de la siguiente manera:

Una parte de la precipitación se infiltra:

Una parte de ésta, satisface la humedad del suelo, de las capas que se encuentran sobre el nivel freático del agua; una vez que estas capas se han saturado, el agua subterránea es recargada, por la parte restante del agua que se infiltra.

Otra parte de la precipitación tiende a escurrir sobre la superficie terrestre; a la precipitación que ocasiona este escurrimiento, se le llama altura de precipitación en exceso (*hp*). Una pequeña porción se pierde (Villón Béjar, M. 2004).

Con base a lo anterior el escurrimiento se clasifica en tres tipos:

Escurrimiento superficial (Q)



Escorrimento subsuperficial ( $Q_s$ )

Escorrimento subterráneo ( $Q_g$ ) (Villón Béjar, 2004).

#### **2.7.4.1. Escorrimento superficial**

Goudie *et al.*, citado por Monserrat (2002), establece que según las características físicas y climáticas de una cuenca, las diversas variables que intervienen en la infiltración tendrán una importancia u otra, dando lugar a distintos mecanismos de formación de escorrentía superficial.

Mientras que Villón (2004), define la escorrentía superficial como aquella que proviene de la precipitación no infiltrada y que escurre sobre la superficie del suelo. El efecto sobre el escorrimento total es inmediato, y existirá durante la tormenta e inmediatamente después de que ésta termine.

La parte de la precipitación total que da lugar a este escorrimento, se denomina precipitación en exceso (*hp*).

#### **2.7.4.2. Escorrimento subsuperficial**

Es aquel que proviene de una parte de la precipitación infiltrada. El efecto sobre el escorrimento total puede ser inmediato o retardado. Si es inmediato se le da el mismo tratamiento que al escorrimento superficial; en caso contrario, se trata como escorrimento subterráneo.

#### **2.7.4.3. Escorrimento subterráneo**

Es aquel que proviene del agua subterránea, la cual es recargada por la parte de la precipitación que se infiltra, una vez que el suelo se ha saturado.

Con base en la forma en que contribuyen al escorrimento total, el escorrimento se clasifica en escorrimento directo, cuando su efecto es inmediato, y escorrimento base si su efecto es retardado.

El hecho de presentarse una precipitación, no implica necesariamente que haya escorrimento superficial, y en algunos casos tampoco escorrimento subterráneo; esto depende de una serie de factores; lo anterior, se puede observar en la figura 1. (Villón Béjar, 2004).

### **2.7.5. Medición del escurrimiento**

La hidrometría es la rama de la hidrología que estudia la medición del escurrimiento. Para este mismo fin, es usual emplear otro término denominado aforo. Aforar una corriente significa determinar, con mediciones, el caudal que pasa por una sección dada y en un momento determinado (Villón Béjar, 2004).

Existen diversos métodos para determinar el caudal de una corriente de agua, cada uno aplicable a diversas condiciones, según el tamaño de la corriente o la precisión con que se requieren los valores obtenidos. Los métodos más utilizados son: aforos con flotadores, aforos volumétricos, aforos químicos, aforos con vertederos aforos con correntómetro o molinete, aforos con medidas de la sección y la pendiente (Villón Béjar, 2004).

### **2.7.6. Determinación del coeficiente de escorrentía (C)**

Sáenz (1999), define el coeficiente de escorrentía como la relación entre el volumen de agua de escorrentía superficial total y el volumen total de agua precipitado, en un intervalo de tiempo determinado.

Este coeficiente se puede definir como relativo a una lluvia aislada o a un intervalo de tiempo en donde ocurren varias lluvias. Se debe aclarar que conociendo el coeficiente de escorrentía para una determinada lluvia con cierta intensidad y cierta duración en un área dada, se pueda determinar la escorrentía superficial de otras precipitaciones de intensidades diferentes, desde que la duración de la lluvia sea la misma (Sáenz, 1999).

Villón Béjar (2004), la define como el agua que llega al cauce de evacuación, representa una fracción de la precipitación total. A esa fracción se le denomina coeficiente de escorrentía, que no tiene dimensiones y se representa por la letra C (Villón Béjar, 2004).

El valor de C depende de factores topográficos, edafológicos, cobertura vegetal, etc.

$$C = \frac{V \text{ escorrentía superficial total}}{V \text{ precipitado total}}$$

La definición más común de un coeficiente de escorrentía es que es la relación entre la tasa pico de escorrentía directa y la intensidad promedio de precipitación de una tormenta. Debido a la alta variabilidad de la intensidad de precipitación, este valor es difícil de determinar utilizando la información observada. Un coeficiente de escorrentía también puede

definirse como la relación entre la escorrentía y la precipitación sobre un periodo de tiempo dado. Estos coeficientes se aplican comúnmente a precipitación y escorrentía de una tormenta, pero también pueden utilizarse para información de precipitación y caudales mensuales o anuales (Ven Te Chow, *et al.* 1994).

Cuando la cuenca se compone de superficies de distintas características, el valor de  $C$  se obtiene como una media ponderada.

### **2.7.7. Caudales máximos**

El caudal, es definido como el volumen de escorrentía superficial por unidad de tiempo ( $Q = v/t$ ), es la principal variable que caracteriza la escorrentía superficial. Se expresa en  $m^3/s$  o  $l/s$ .

#### **2.7.7.1. Caudal específico, $q$**

Se define como el caudal  $Q$  dividido por el área de drenaje  $A$  de la cuenca. Se expresa en  $m^3/s/km^2$ . Sirve como elemento comparativo entre hoyas ( $q = Q/A$ ).

#### **2.7.7.2. Caudales máximos, medios y mínimos.**

Es común tener datos que caracterizan a una cuenca los caudales máximos, medios y mínimos en intervalos de tiempo determinados, como hora, día, mes y año, para diseñar: las dimensiones de un cauce, sistemas de drenaje, muros de encauzamiento para proteger ciudades y plantaciones, alcantarillas, vertederos, luz en puentes. Para todos los casos, se debe calcular o estimar el caudal de diseño que, son los caudales máximos (Sáenz, 1999).

La magnitud del caudal de diseño es función directa del periodo de retorno que se le asigne, que a su vez depende de la importancia de la obra y de la vida útil de ésta (Villón Béjar, 2004).

El caudal no se registra directamente, a pesar de que esta variable es tal vez la más importante en los estudios hidrológicos. En lugar de esto, se registra el nivel del agua y el caudal se deduce por medio de una curva de calibración (Riggs, citado por Ven te Chow *et al.*, 1994). La curva de calibración se desarrolla utilizando un conjunto de mediciones de caudal y de altura de estación en la corriente, medidas que deben hacerse a lo largo de un periodo de meses o de años de tal manera que se tenga una relación precisa entre el flujo

volumétrico o caudal, y la altura de estación en un sitio de medición (Ven Te Chow, *et al.* 1994).

## **2.7.8. Métodos para el cálculo del caudal máximo**

### **2.7.8.1. Método directo**

Este es un método hidráulico, llamado de *Sección y Pendiente*, en el cuál el caudal máximo se estima después del paso de una avenida, con base en datos específicos obtenidos en el campo.

### **2.7.8.2. Método del número de curva**

Este método fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS), de los Estados Unidos; tiene ventajas sobre el método racional, pues se aplica a cuencas medianas y también a cuencas pequeñas. El parámetro de mayor importancia de la lluvia generadora es la altura de ésta, su intensidad pasa a un segundo plano. Su principal aplicación es la estimación de las cantidades de escurrimiento tanto en el estudio de avenidas máximas como en el caso del cálculo de aportaciones líquidas.

El nombre del método deriva de una serie de curvas, cada una de las cuales lleva el número  $N$ , que varía de 1 a 100. Un número de curva  $N = 100$ , indica que toda la lluvia escurre, y un número  $N = 1$ , indica que toda la lluvia se infiltra; por tal razón los números de curvas, representan coeficientes de escorrentía (Villón Béjar, 2004).

Este método es utilizado para estimar la escorrentía total a partir de datos de precipitación y otros parámetros de las cuencas de drenaje. El método fue desarrollado utilizando un gran número de cuencas experimentales

### **2.7.8.3. Métodos empíricos**

Existe una gran variedad de métodos empíricos; en general todos se derivan del método racional.

Debido a su sencillez, los métodos empíricos tienen gran difusión, pero pueden involucrar grandes errores, ya que el proceso de escurrimiento es muy complejo como para resumirlo en una fórmula de tipo directo, en la que solo intervienen el área de la cuenca y un coeficiente de escurrimiento.

#### **2.7.8.4. Método del Servicio de Conservación de Suelos (S.C.S.)**

La parte medular del método es el resultado de una serie de estudios llevados a cabo por el SCS sobre las intensidades, duraciones y cantidades de lluvia que deben ser empleadas al calcular el gasto de pico de una avenida de determinado periodo de retorno. Los análisis fueron derivados para una duración de tormenta de 6 horas y relaciona el tiempo de concentración en horas, con el llamado Gasto Unitario (q) cuyas unidades son:  $m^3/seg/mm/km^2$ .

#### **2.7.9. Características fisiográficas**

En estudios hidrológicos en los cuales a veces no se tiene disponible información medida, por ejemplo en un análisis de lluvia – escorrentía, las características de la escorrentía se estiman utilizando las características fisiográficas. La información fisiográfica de una cuenca puede obtenerse a partir de mapas de descripción de uso de suelo, mapas de suelo, mapas geológicos, mapas topográficos y fotografías aéreas (Ven Te Chow, *et al.* 1994).

#### **2.7.10. Características físicas de los suelos**

Antes de entrar en detalle en la clasificación de los grupos hidrológicos de suelos, es necesario partir de algunas definiciones y algunas características de estos.

##### **2.7.10.1. Perfil**

«Exposición vertical bidimensional de horizontes en un suelo individual, cuyas disposiciones y combinaciones son únicas en una zona geográfica» (Juárez Sanz *et al.* 2006).

El perfil es el elemento básico para el estudio y clasificación de suelos, ya que cada uno de sus horizontes (y por tanto el perfil) poseen las características propias del proceso de constitución del suelo. Los horizontes en un perfil se designan con letras mayúsculas, con las que se quiere indicar unas propiedades características determinadas. (Juárez Sanz, *et al.* 2006).

En la observación del perfil del suelo no siempre podemos encontrar un límite claro entre dos horizontes bien diferenciados, a veces el límite no es neto y vemos como el horizonte superior va cambiando poco a poco sus características hasta llegar un momento en que nos adentramos en el horizonte siguiente (Juárez Sanz *et al.* 2006).

### **2.7.10.2. Horizonte**

Una característica común a todos los suelos es que al observar un corte vertical de los mismos, van apareciendo unas capas más o menos paralelas desde la superficie del terreno hacia abajo, a «cada una de estas capas, que se distinguen por el aspecto y coloración distinto de su material y poseen una relación genética y evolutiva se les llama, horizonte».

### **2.7.10.3. Límites**

Se considera el espesor del horizonte y la topografía de la superficie del límite.

### **2.7.10.4. Estructura**

Se refiere a la forma de agregarse las partículas individuales del suelo (granular, prismática, etc.

La estructura del suelo condiciona en gran medida los procesos de erosión y arrastre superficial de partículas en los suelos, y desde un punto de vista edafológico permite diferenciar un suelo de un material geológico (Juárez Sanz *et al.* 2006).

### **2.7.10.5. Textura**

La textura del suelo determina la superficie específica del mismo y por tanto está directamente relacionada con todas las reacciones de superficie de los suelos, especialmente con la capacidad de intercambio iónico.

Porta *et al.*, citado por Juárez Sanz *et al.* (2006), menciona que la textura de un suelo está determinada por la proporción en peso en que en él se encuentran las fracciones arena, limo y arcilla, expresada como porcentaje de la fracción mineral. Se ha de tener en cuenta que la textura del suelo es una de las propiedades más estables de los suelos, por lo que una vez que se conoce para un suelo, no será necesario repetir el análisis al cabo del tiempo.

El mismo autor establece que la separación entre cada una de estas fracciones requiere del establecimiento de ciertos límites, los criterios empleados para establecer dichos límites son arbitrarios y dependen de los objetivos que se persigan, de ahí que se utilicen distintos valores. Los más comunes son los propuestos por la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (Sistema Internacional) y por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), junto con el europeo. En todos los casos se considera grava, a aquellas partículas cuyo diámetro es mayor de 2 mm.

Textura y estructura son dos características del suelo de gran relevancia para los mismos, ya que de ellas dependen un buen número de los procesos y propiedades relacionadas con la fertilidad y la capacidad depuradora de los suelos.

Por otro lado, textura y estructura son las responsables de la porosidad del suelo, lo que condiciona la aireación del mismo, capacidad de intercambio gaseoso entre el suelo y la atmósfera externa, capacidad de retención de agua del suelo, etc., aspectos todos ellos de vital importancia para la vida tanto de organismos superiores como inferiores en los suelos (Juárez Sanz *et al.* 2006).

En síntesis, de acuerdo con Juárez Sanz *et al.* (2006), podemos considerar al suelo como un “cuerpo natural” por: presencia de animales y plantas vivas, existir una organización estructural que refleja la acción de los procesos pedogenéticos, su capacidad para responder a cambios ambientales. El suelo se puede considerar como un ser vivo puesto que nace (a partir de la roca madre), crece y muere.

#### **2.7.11. Condición hidrológica**

La condición hidrológica se refiere a la capacidad de la superficie de la cuenca para favorecer o dificultar el escurrimiento directo; esto se encuentra en función de la cobertura vegetal.

#### **2.7.12. Grupos hidrológicos de suelos**

A continuación se detallan las características de cada uno de los grupos hidrológicos de suelos:

##### **2.7.12.1. Aluviales**

Son suelos poco evolucionados de aporte que se han desarrollado sobre materiales muy jóvenes transportados por los cursos de agua y depositados en las planicies costeras y en los valles interiores.

Tienen esencialmente la composición y las propiedades de los materiales originarios porque los procesos de alteración son todavía muy limitados. Sin embargo, sus características son muy variables espacialmente como consecuencia del origen variable de los materiales depositados y de las circunstancias de aluviamiento (régimen hídrico) (Cordero Alberto, MR; *et al.* 2005).

#### **2.7.12.2. Andisoles**

Suelos poco evolucionados o jóvenes que se desarrollan típicamente sobre afloramientos más o menos recientes de cenizas volcánicas y otras rocas eruptivas consolidadas siempre con materiales vítreos.

Entre las propiedades más características de estos suelos destaca su densidad aparente baja, su permeabilidad y porosidad muy elevada, y su estructura típica en agregados finos de tamaño limo. El suelo es pegajoso al tacto cuando está húmedo y pulverulento en seco.

Por último, son suelos fácilmente erosionables por lo que son necesarias prácticas continuas de conservación para el mantenimiento de su capacidad productiva (Cordero Alberto, MR; *et al.* 2005).

#### **2.7.12.3. Grumosoles**

Estos son suelos arcillosos muy pesados, muy plásticos y muy pegajosos cuando están mojados y muy duros cuando están secos. Tienen gran poder de expansión cuando se humedecen y de gran contracción cuando se secan, condición que provoca la rajadura de los mismos. Son de color negro en la superficie y grises en el subsuelo. A pesar de su color oscuro son de moderado contenido de materia orgánica que se supondría alta, debido a su color, pero esto es debido a una interacción de arcilla humus o una formación orgánico mineral (Coreas Gaytán, VM; *et al.* 2012).

#### **2.7.12.4. Latosoles arcillo rojizos**

Se caracterizan por su color rojo aunque algunas veces tendiendo a amarillo o color café dependiendo del grado de oxidación de los minerales del hierro, su textura es franco arcillosa en superficie y arcillosa en profundidades; estos suelos son muy vulnerables a la erosión cuando se elimina su cobertura vegetal, cuando presenta abundante materia orgánica es suelo muy fértil presentando tonalidades más oscuras (Reyes, 2005).

#### **2.7.12.5. Litosoles**

se caracterizan por extenderse sobre sustratos duros con profundidad muy limitada, este tipo de suelo presenta elevada pedregocidad asociada al afloramiento rocoso, este tipo de suelo es el que más requiere de medidas de conservación y los cultivos se adecuan en áreas de menor pendiente siempre que se adopten medidas de conservación, en las zonas de mayor



pendiente se adecuan los forestales y pastizales, dentro de estos se encuentran los suelos de tierra blanca; se considera un suelo estable pero pobre en nutrientes, pero que mejora mucho con la incorporación de materia orgánica, nitrógeno y humus a los cultivos (Reyes, 2005).

#### **2.7.12.6. Regosoles**

Suelos profundos, jóvenes de material suelto o no consolidado. El horizonte superficial, es único evidente a la vista, suele ser de unos 10 a 20 centímetros de espesor, con alto contenido de materia orgánica (MAG, 2012).

#### **2.7.12.7. Halomórficos**

Suelos salinos de los manglares de colores grises debido a las condiciones anaeróbicas existentes durante su formación por permanecer inundados frecuentemente. Su textura es variable, es decir, de texturas limosas, arenosas y arcillosas de estratos en diferente posición. El uso potencial de estos suelos es muy pobre para la producción de cultivos agrícolas, sin embargo, existen en la transición de los manglares con los depósitos aluviales tierra adentro la producción de palmeras cuyas hojas son usadas para los ranchos y sombreros que usa los campesinos (MAG, 2012).

#### **2.7.13. Clasificación de los grupos hidrológicos de suelos**

Grupo A. Tiene bajo potencial de escorrentía

Grupo B. Tiene un moderado bajo potencial de escorrentía

Grupo C. Tiene un moderado alto potencial de escorrentía

Grupo D. Tiene un alto potencial de escorrentía

Una descripción detallada para definir el grupo de suelo se puede ver en el cuadro 1. Para aclarar conceptos y entender la descripción de la tabla, se indican las siguientes definiciones:

**Porcentaje o tasa de infiltración:** es el porcentaje de agua que penetra en el suelo superficial y es controlado por condiciones de superficie.

**Porcentaje o tasa de transmisión:** es el porcentaje de agua que se mueve en el suelo y es controlado por los horizontes (Villón Béjar, 2004).

#### **2.7.14. Condición de humedad antecedente (CHA)**

La condición o estado de humedad tiene en cuenta los antecedentes previos de humedad de la cuenca; determinado por la lluvia total en el periodo de 5 días anterior a la tormenta.

El SCS usa tres intervalos de CHA:

CHA – I es el límite inferior de humedad o el límite superior de S; hay un mínimo potencial de escurrimiento. Los suelos de la cuenca están lo suficientemente secos para permitir el arado o cultivos.

CHA – II es el promedio.

CHA – III es el límite superior de humedad o el límite inferior de S; hay máximo potencial de escurrimiento. La cuenca está prácticamente saturada por lluvias anteriores (Villón Béjar, 2004).

#### **2.7.15. Periodo de retorno.**

Según Sáenz (1999), es el periodo de tiempo promedio, en años, en que un determinado evento (en este caso caudal), es igualado o superado por lo menos una vez.

Villón Béjar (2006), define periodo de retorno  $T$ , como el intervalo promedio de tiempo en años, dentro del cual un evento de magnitud  $x$  puede ser igualado o excedido, por lo menos una vez en promedio. Así, si un evento igual o mayor a  $X$ , ocurre una vez en  $T$  años, su probabilidad de ocurrencia  $P$  es igual a  $1/T$  casos.

#### **2.7.16. Riesgo (R)**

Si un evento de diseño, por ejemplo un caudal de diseño  $Q$ , tiene un periodo de retorno de  $T$  años, y una probabilidad de excedencia  $P$ , de acuerdo con el apartado anterior, se cumple:

$$P = 1/T$$

Dónde:

$P$  = probabilidad de ocurrencia de un caudal  $\geq Q$

$T$  = periodo de retorno

La probabilidad de que  $Q$  no ocurra en cualquier año; es decir, la probabilidad de ocurrencia de un caudal  $< Q$ , es:

$$\overline{P} = 1 - P$$

$$\overline{P} = 1 - 1/T$$

La probabilidad de que el evento ocurra al menos una vez en  $n$  años sucesivos, es conocida como riesgo o falla  $\overline{R}$ ,

Con el parámetro riesgo, es posible determinar cuáles son las implicaciones de seleccionar un periodo de retorno de una obra que tiene una vida útil de  $n$  años (Villón Béjar, 2006).

La probabilidad de que se presente al menos un evento de probabilidad  $1/T$  en  $T$  años es:  $1 - (1 - 1/T)^T$ , que para un periodo largo tiende a ser 0,6321.

En consecuencia, si la vida útil de una estructura y el periodo de retorno de diseño son iguales, la probabilidad de que la capacidad de la estructura sea excedida durante la vida útil es muy alta. Por lo tanto, el periodo de retorno debe ser mucho mayor que la vida útil de la estructura para estar razonablemente seguros de que ningún valor exceda su capacidad. Sin embargo, para cualquier periodo de retorno de diseño que se seleccione, siempre hay una probabilidad de que el valor sea excedido; por su puesto, si se selecciona un periodo de retorno de diseño muy alto en comparación con la vida útil de la estructura, la probabilidad de que su capacidad sea excedida podrá ser muy baja, pero siempre existe (Villón Béjar, 2006).

### **2.7.17. Tiempo de concentración**

De acuerdo con Sáenz (1999), es el tiempo que la lluvia cae en el punto más distante de la corriente de agua de una hoya para llegar a una sección determinada de dicha corriente. El tiempo de concentración mide el tiempo que se necesita para que toda la hoya contribuya con escorrentía superficial en una sección considerada. Se mide en minutos u horas.

Mientras que Villón Béjar (2004), denomina tiempo de concentración al tiempo transcurrido desde que una gota de agua cae, en el punto más alejado de la cuenca, hasta que llega a la salida de ésta (estación de aforo). Este tiempo es función de ciertas características geográficas y tipográficas de la cuenca.

El tiempo de concentración debe incluir los escurrimientos sobre terrenos, canales, cunetas y los recorridos sobre la misma estructura que se diseña.

Todas aquellas características de la cuenca tributaria, tales como dimensiones, pendientes, vegetación y otras, en menor grado, hacen variar el tiempo de concentración (Villón Béjar, 2004).

Existen varias formas de hallar el tiempo de concentración ( $t_c$ ) de una cuenca:

Medida directa usando trazadores

Usando características hidráulicas de la cuenca

Estimando velocidades

Fórmulas empíricas (SCS y Kirpich)

## **2.8. Conceptos de riesgo, amenaza y vulnerabilidad**

La temática de gestión de riesgos involucra los conceptos de amenaza y vulnerabilidad y viene adquiriendo una importancia cada vez mayor. Varios organismos nacionales e internacionales están desarrollando metodologías de validación y financiando estudios de investigación en muchos países, estimulando los gobiernos para organizarse, estructurarse y fomentar acciones de reducción de riesgos y especialmente para disminuir las vulnerabilidades de las poblaciones más precarias. El concepto de vulnerabilidad se encuentra directamente relacionado con los grupos socialmente vulnerables y propensos a sufrir los impactos de amenazas naturales, antrópicas y socio-naturales. (DUTRA, citado por Villalta Gonzales, JL; *et al.* 2012).

### **2.8.1. Riesgo**

Según la Estrategia Internacional de Reducción de Desastres (EIRD), citado por Villalta Gonzales, JL; *et al.* (2012), el riesgo es la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas (muertes, lesiones, propiedad, medios de subsistencia, interrupción de actividad económica o deterioro ambiental), resultado de interacciones entre amenazas naturales o antropogénicas y condiciones de vulnerabilidad.

Una de las características del crecimiento económico y el aumento de la población es la acumulación de riesgos, estos riesgos se agravan cuando el crecimiento es desigual, excluyente o empobrecedor (Villalta Gonzales, JL; *et al.* 2012).

Los actuales patrones de desarrollo de América Latina se caracterizan, entre otros aspectos, por la acumulación de riesgos de desastre, de tal modo que la frecuencia y la intensidad de los desastres están aumentando vertiginosamente.

Algunos factores son determinantes para la acumulación de los riesgos:

El crecimiento de las ciudades aumenta su vulnerabilidad a desastres socio-naturales, especialmente cuando es desordenado e incluye áreas marginales.

El aumento de los daños por desastres en Latinoamérica y el Caribe se debe a una degradación ambiental severa experimentada en los últimos 50 años, que ha hecho más vulnerables los ecosistemas de la región.

La creciente ocupación de tierras, generalmente hace que éstas sean más propensas a la erosión, la degradación y la desertificación, especialmente cuando no existen políticas de acceso a la propiedad y a los recursos productivos para los pequeños productores campesinos.

El uso de energéticos implica riesgos crecientes de desastre por agotamiento de fuentes y por mal manejo; de todos estos riesgos el más severo es la deforestación que realizan quienes no tienen acceso a otras fuentes de energía.

Los desbalances comerciales y financieros internacionales han forzado a muchos países en vías de desarrollo a extraer más recursos naturales y a venderlos más rápido para poder competir en el mercado internacional, pagar su deuda externa o compensar los shocks externos.

En general, el crecimiento demográfico suele implicar abusos del territorio por desconocimiento de las limitaciones del medio natural, de modo que se aumenta la vulnerabilidad ante los desastres. Además, en muchos países, el crecimiento no ha estado acompañado de acciones deliberadas para garantizar la distribución de sus beneficios en toda la sociedad y lograr la reducción de la pobreza, de manera que se han incrementado aún más los riesgos de desastre (Villalta Gonzales, JL; *et al.* 2012).

El riesgo de desastre es proporcional a las condiciones socio-económicas: la pobreza es causa y consecuencia de los desastres. La pobreza es una de las principales razones por las cuales hay personas que se ven obligadas a vivir en zonas altamente propensas a las amenazas y con una infraestructura social y productiva frágil e insegura (Villalta Gonzales, JL; *et al.* 2012).

La prevención de riesgos es un requisito del desarrollo, e incluye dos facetas: prevenir los riesgos de desastre inherentes al crecimiento, especialmente las prácticas ambientalmente destructivas y superar las condiciones de pobreza, exclusión y las prácticas humanas y socialmente destructivas que incrementan la vulnerabilidad ante las amenazas naturales y socio-naturales (Villalta Gonzales, JL; *et al.* 2012).

### **2.8.2. Amenaza**

Una amenaza según la EIRD, citado por Villalta Gonzales, JL; *et al.* (2012), es un fenómeno, sustancia, actividad humana, o condición peligrosa que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales.

### **2.8.3. Vulnerabilidad**

Según EIRD, citado por Villalta Gonzales, JL; *et al.* (2012), vulnerabilidad es: las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien, que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza. Esta definición identifica la vulnerabilidad como una característica de los elementos de interés (comunidad, sistema o bien), que es independiente de su exposición.

El concepto de vulnerabilidad ayuda a entender la exposición desigual a los factores que amenazan a determinados grupos sociales considerados vulnerables. Un grupo vulnerable es aquel que está expuesto a un factor de amenaza o peligro, siendo planteada la vulnerabilidad como la incapacidad de las personas, instituciones, organizaciones y comunidad de no poder anticipar, enfrentar, resistir y recuperarse de los impactos derivados de las amenazas o desastres Villalta Gonzales, JL; *et al.* (2012).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Se establecieron dos procesos metodológicos, el primero considerando el área total de la cuenca y el segundo se definió como el área aguas arriba de las zonas poblacionales que se encuentran en riesgo de sufrir daños por inundaciones.

#### 3.1. Ubicación de la zona en estudio

En la figura 1 se muestra la cuenca del río Grande o Sensunapán, del departamento de Sonsonate, el cual se encuentra entre las coordenadas 13° 43' 0" Norte y 89° 43' 0" Oeste posee un área de 218.8715 km<sup>2</sup>, con una elevación máxima de 2090 metros sobre el nivel del mar, una elevación media de 1,045.00 msnm y la mínima elevación que está al nivel del mar, por desembocar el río en el Océano Pacífico. En la cuenca, la precipitación media anual es aproximadamente de 2200 mm/año (355 m<sup>3</sup>/año) (Geólogos del Mundo, 2005).

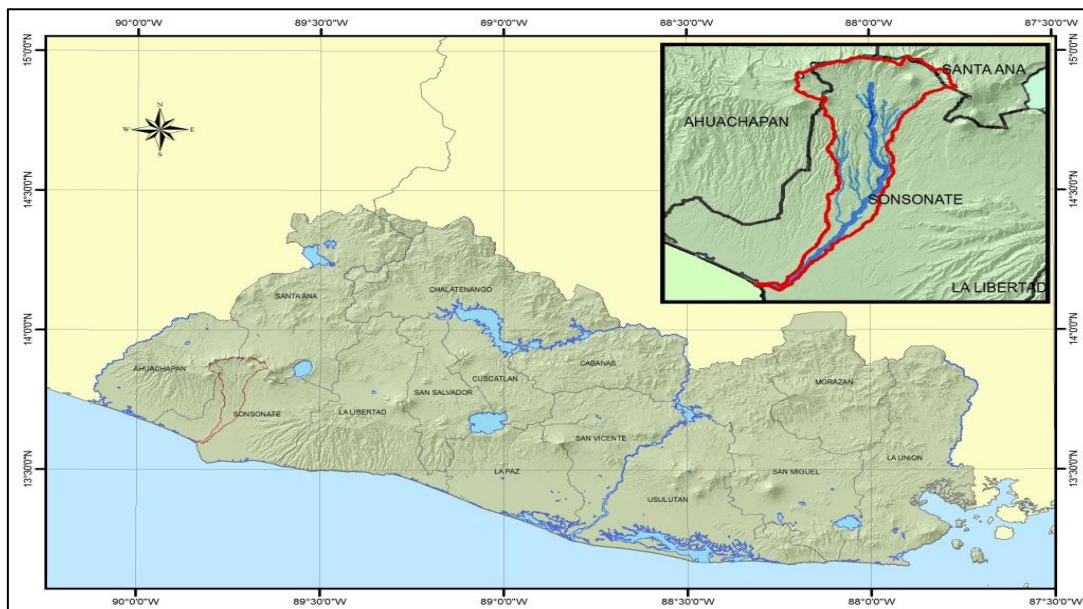


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Sensunapán en el departamento de Sonsonate y en El Salvador.

#### 3.2. Delimitación de la Cuenca del Río Sensunapán

La figura 2, muestra la edición del mapa de cuencas hidrográficas de El Salvador, generado por el Centro Nacional de Registros (CNR) y el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y haciendo uso del mapa de curvas a nivel, se fue seleccionando y determinando cada una de las microcuencas, que conforman la Cuenca del Río

Sensunapán; todo este proceso se llevó a cabo a través del “Software ArcGIS 10.2”, a escala absoluta de 1:150,000.

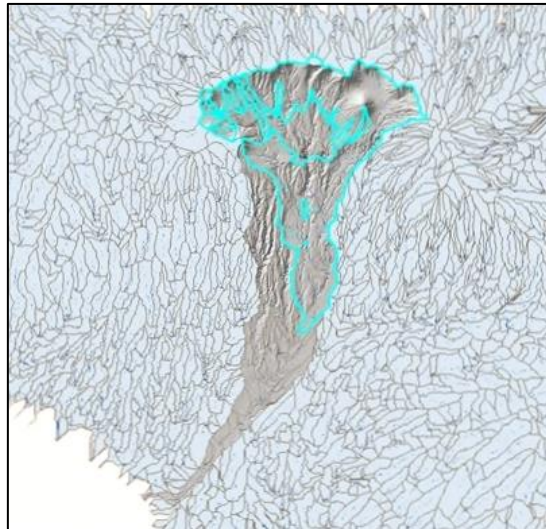


Figura 2. Determinación y selección de micro cuencas pertenecientes a la cuenca del río Sensunapán

Con la delimitación de la cuenca del río Sensunapán, siempre haciendo uso del software, se determinó el Modelo de Elevación Digital, tal como se muestra en la figura 3, conocido por sus siglas en inglés como “D.E.M.”; además, se obtuvo el “HillShade”, tal como se muestra en la figura el cual permitió tener el relieve de toda la cuenca, y así establecer algunas características morfométricas, que son necesarias para determinar los drenajes principales y secundarios de toda la Cuenca.

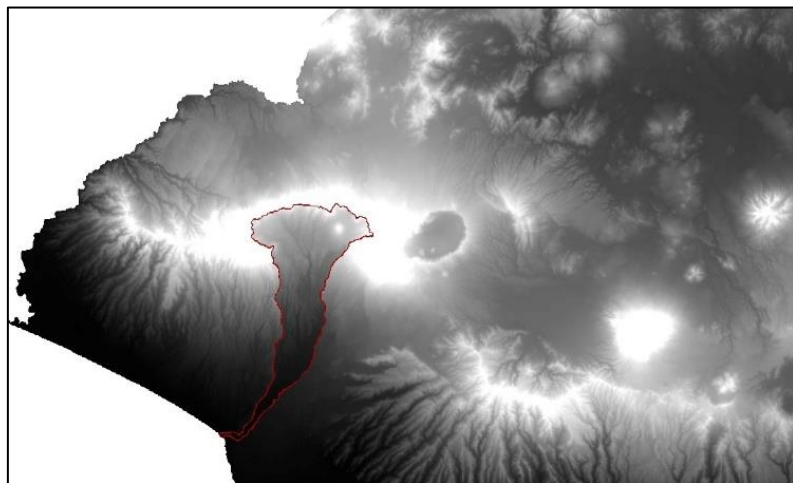


Figura 3. Modelo de Elevación Digitalizado (D.E.M.), de la cuenca del río Sensunapán



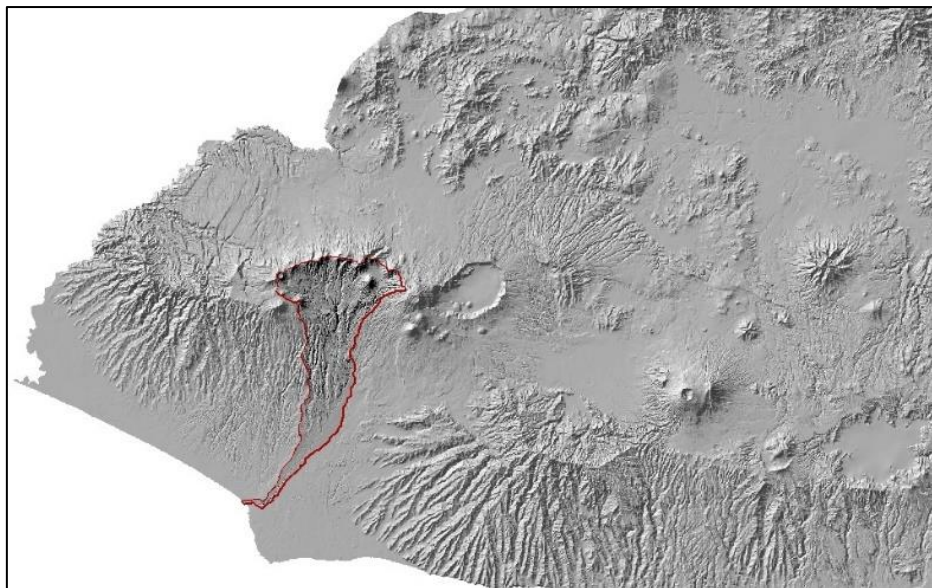


Figura 4. HillShade de la cuenca del río Sensunapán.

### **3.3. Determinación de unidades homogéneas**

#### **3.3.1. Unidades de unidades homogéneas**

Utilizando los mapas de uso actual del suelo del año 2010 y el mapa de texturas de suelos de El Salvador y definidas el DEM, el HillShade y algunas características físicas importantes de la cuenca, se realizó una intersección o traslape entre estos dos mapas, generando un único mapa conocido como mapa de unidades homogéneas (ver figura 8).

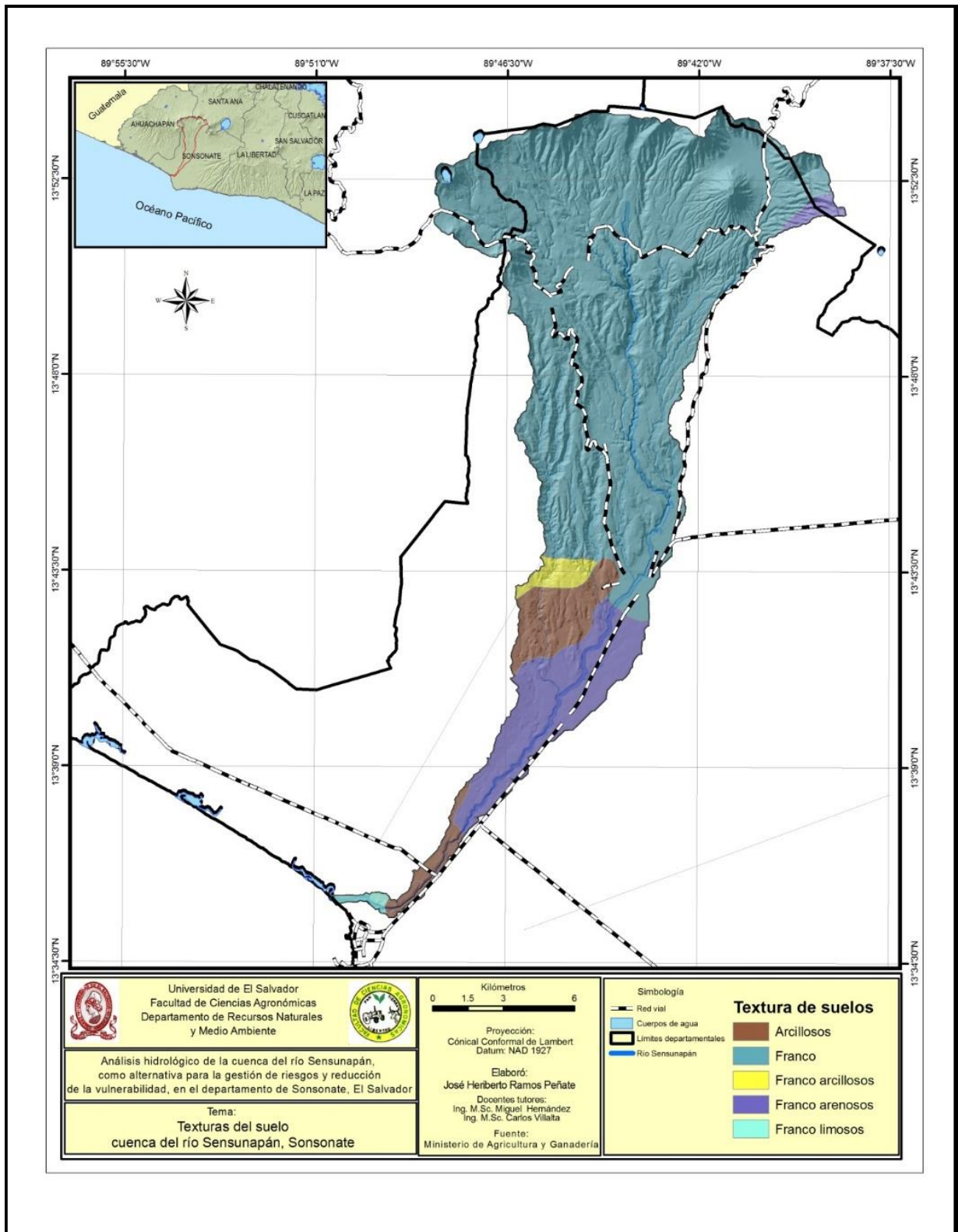


Figura 5. Mapa de texturas de suelos de la cuenca del río Sensunapán

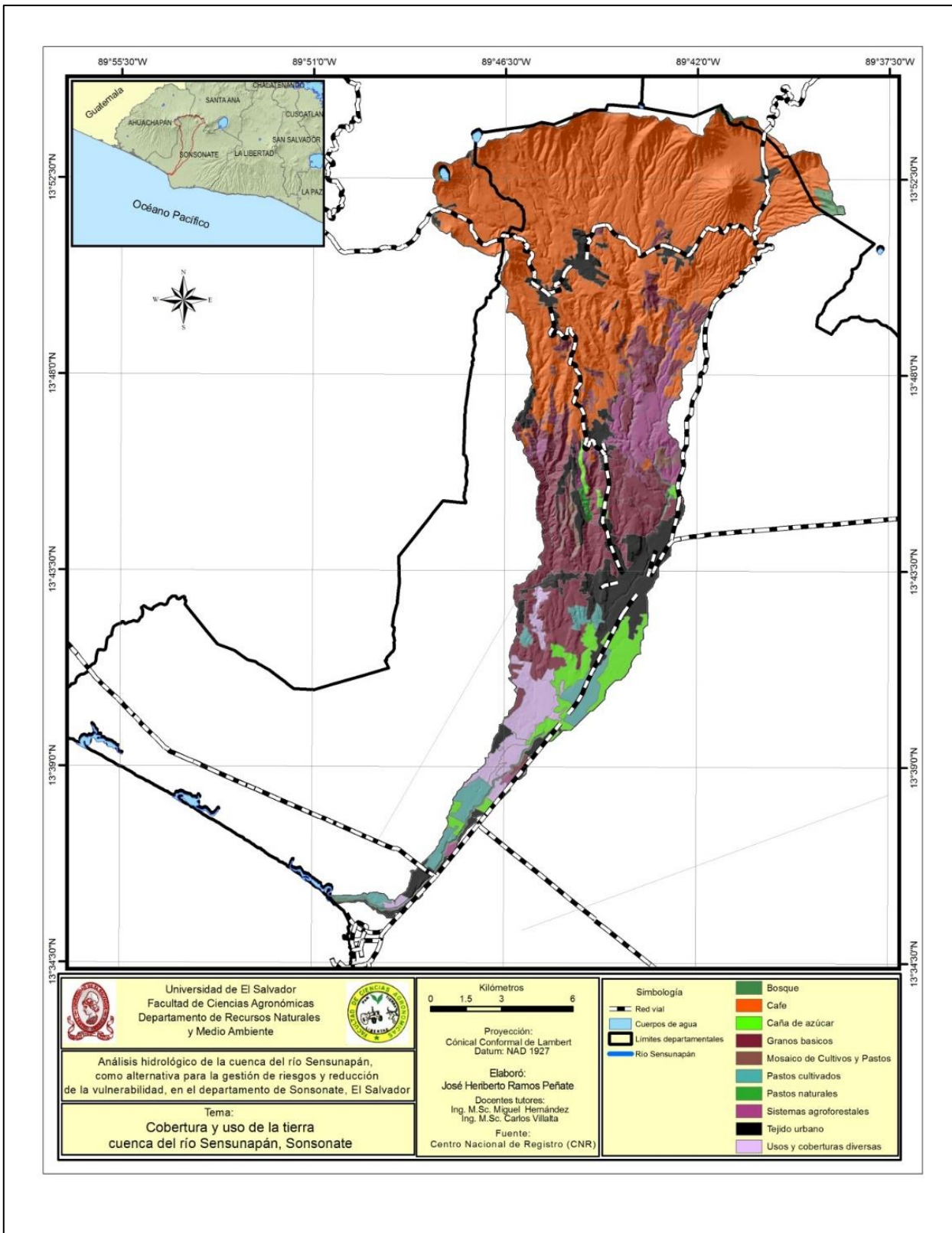


Figura 6. Mapa de cobertura y uso del suelo de la cuenca del río Sensunapán

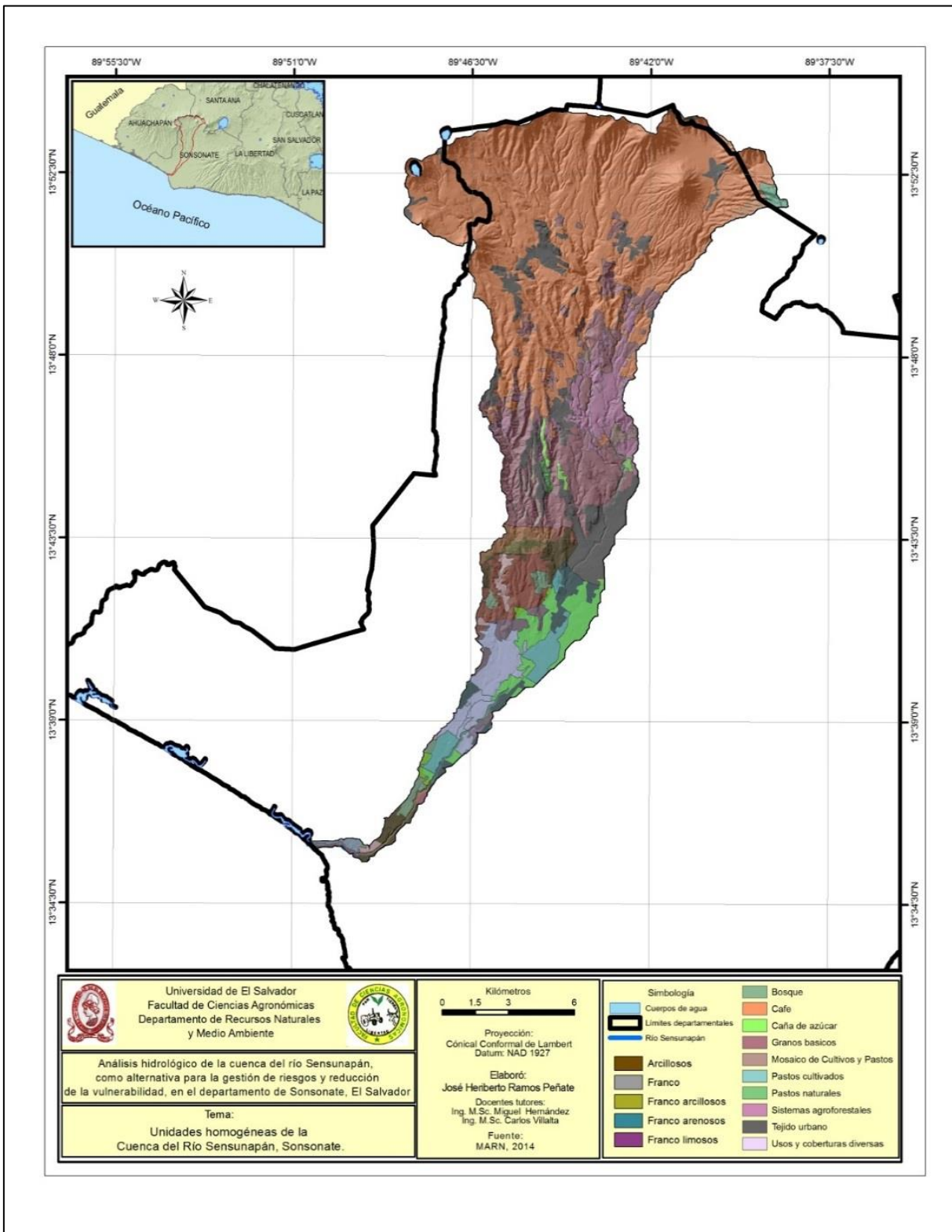


Figura 7. Mapa de unidades homogéneas de la cuenca del río Sensunapán



En el mapa de unidades homogéneas, en su tabla de atributos, se obtuvieron un total de seis tipos o texturas de suelos, las cuales se detallan a continuación: franco arenoso, francos, arcillosos, franco arcillosos, franco arenoso y franco limosos; y diez usos del suelo: bosque, café, caña de azúcar, granos básicos, mosaico de cultivos y pastos, pastos cultivados, pastos naturales, sistemas agroforestales, usos y coberturas diversas, y tejido urbano; cada uno de ellos distribuidos en diferentes zonas y áreas de la cuenca.

### 3.4. Grupo hidrológico del suelo

Con base a la tabla de propiedades o atributos del mapa de unidades homogéneas de la figura 7, se determinó el área que representa cada una de las texturas de suelos y su respectivo uso o tipo de cobertura vegetal existente.

Según el cuadro 1, en el caso de las texturas del suelo, estas se clasificaron de acuerdo a los Grupos Hidrológicos de Suelos establecidos por Villón Béjar (2004). Cada uno de los tipos de suelos presentados en la cuenca, fueron clasificados de acuerdo a su potencial de escurrimiento directo, de esta manera, aquel tipo de suelo con un bajo potencial de escurrimiento, se le determinó conformar en el grupo hidrológico “A”, por ser suelos que se caracterizan en poseer altas tasas de infiltración. De igual manera, aquel suelo que contiene un alto potencial de escorrentía y baja tasa de infiltración, se determinó en el grupo hidrológico “D”, que es la máxima categoría existente en cuanto a escurrimiento superficial.

Cuadro 1. Clasificación hidrológica de los suelos

Grupo de suelos	Descripción
A	Son suelos que tiene altas tasas de infiltración (bajo potencial de escurrimiento) aunque están enteramente mojados y constituidos mayormente por arenas o gravas profundas, bien y hasta excesivamente drenadas. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.
B	Son suelos que tienen tasas de infiltración moderadas cuando están cuidadosamente mojados y están constituidos mayormente por suelos profundos de texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisión de agua.
C	Son suelos que tienen bajas tasas de infiltración cuando están completamente mojados y están constituidos mayormente por suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo, o suelos con una textura que va de moderadamente fina a fina. Estos suelos tienen una baja tasa de transmisión del agua.

D	<p>Son suelos de alto potencial de escurrimiento, de tasas de infiltración muy bajas cuando están completamente mojados y están conformados mayormente por suelos arcillosos con un alto potencial de esponjamiento, suelos con índice de agua permanentemente alto, suelos con arcilla o capa de arcilla en la superficie o cerca de ella y suelos superficiales sobre material casi impermeable.</p> <p>Estos suelos tienen una tasa muy baja de transmisión del agua.</p>
---	--

Fuente: Villón Béjar, M. 2004.

### 3.5. Condición hidrológica del suelo

Para el uso del suelo, se utilizó el método de la condición hidrológica, mostrada en el cuadro 2 y también propuesta por Villón Béjar (2004), la cual se caracteriza por clasificar el porcentaje de cobertura vegetal presente en una cuenca; presentándose tres tipos de categorías: buena, regular y pobre.

Cuadro 2. Escurrimiento directo en función de la cobertura vegetal de la cuenca.

Cobertura vegetal	Condición hidrológica
> 75% del área	Buena
Entre 50 % y 75% del área	Regular
< 50% del área	Pobre

Fuente: Villón Béjar, M. 2004

### 3.6. Cálculo del número de curva

El cuadro 3 muestra el número de curva, el cual contiene una serie de factores que varía de 1 a 100, de esta manera, el primer factor indica que toda la lluvia infiltra, mientras que el segundo, indica que toda la lluvia escurre Villón Béjar (2004).

El número de curva (*CM*), es la representación gráfica estandarizada de la información de la precipitación total y la precipitación efectiva para muchas cuencas. Para la obtención de este valor, se fueron designando factores previamente establecidos, según la tabla del Servicio de Conservación de Suelos (1986), presentada por Villón Béjar (2006); de acuerdo al uso del suelo, tratamiento del suelo, condición hidrológica del suelo y grupo hidrológico del suelo.

Cuadro 3. Número de curva para diferentes prácticas agrícolas, diferentes condiciones hidrológicas y grupo hidrológico de suelos.

Número de curva <i>N</i> para complejos hidrológicos de suelo cobertura (para condición de humedad antecedente <i>I</i> e <i>I</i> a = 0.2 <i>S</i> )						
Cobertura		Número de curva				
Uso de la tierra	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	Grupo hidrológico			
			A	B	C	D
Descuidado, en descanso sin cultivos	Surcos rectos	----	77	86	91	94
Cultivos	Surcos rectos	Pobre	72	81	88	91
	Surcos rectos	Buena	67	78	85	89
	Curvas de nivel	Pobre	70	79	84	88
	Curvas de nivel	Buena	65	75	82	86
	Curvas de nivel y en terrazas	Pobre	66	74	80	82
	Curvas de nivel y en terrazas	Buena	62	71	78	81
Pequeños granos	Surcos rectos	Pobre	65	76	84	88
	Surcos rectos	Buena	63	75	83	87
	Curvas de nivel	Pobre	63	74	82	85
	Curvas de nivel	Buena	61	73	81	84
	Curvas de nivel y en terrazas	Pobre	61	72	79	82
	Curvas de nivel y en terrazas	Buena	59	70	78	81
Sembríos cerrados, legumbres o sembríos en rotación	Surcos rectos	Pobre	66	77	85	89
	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85
	Curvas de nivel	Pobre	64	75	83	85
	Curvas de nivel	Buena	55	69	78	83
	Curvas de nivel y en terrazas	Pobre	63	73	80	83
	Curvas de nivel y en terrazas	Buena	51	67	76	80
Pastizales o similares		Pobre	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
	Curvas de nivel	Pobre	47	67	81	88
	Curvas de nivel	Regular	25	59	75	83
	Curvas de nivel	Buena	6	35	70	79
Patios		----	59	74	82	86
Caminos, incluyendo derecho de vía.	Cieno	----	72	82	87	89
	Superficie firme	----	74	84	90	92

Fuente: Villón Béjar, M. 2004

Después de designar y obtener cada uno de estos valores, se sumó y el resultante, es el número de curva, que es el valor ponderado que representa a toda la cuenca, en cuanto a sus características morfométricas y físicas que en ella se encuentran presentes.

### 3.7. Cálculo del coeficiente de escorrentía ponderado (C)

Los valores de C se determinó, producto de multiplicar el número de curva (CN) por cada área, variando según la condición hidrológica, tratamiento agrícola y grupo hidrológico del suelo presente en la cuenca; se sumaron los valores de C, dividiéndose entre el área total

de la cuenca, que representa el drenaje principal obteniéndose el valor de C ponderado (Ven Te Chow, citado por Carías, 2004)

### 3.8. Determinación de las características morfométricas a través de ArcSWAT

Utilizando el software ArcSWAT (Soil and Water Assessment Tools, extensión especializada en análisis de cuencas hidrográficas de ArcGIS) (Winchell, *et al*, 2007). Se consideraron aquellas microcuencas que según su drenaje, tienen influencia directa con el drenaje principal del río Sensunapán y cuyo caudal se ve afectado; en ese sentido, se realizaron uniones (“Merge”) de aquellas microcuencas para conformar únicamente la cuenca del río Sensunapán, de igual manera como se hizo con la delimitación de la misma.

Para la obtención de estas variables, fue necesario utilizar las capas de “HillShade” y del modelo de elevación digitalizado, los cuales determinaron los límites de la cuenca, estableciendo todos los drenajes, ríos, área, perímetro, elevación máxima, elevación mínima y la longitud máxima del cauce principal.

### 3.9. Periodo de retorno (T)

Para definir el periodo de retorno, se utilizó la tabla 4, propuesta por Villón Béjar (2006), la cual hace referencia a los diferentes tipos de estructuras a diseñar en función del tiempo de duración de la misma. En ese sentido, el periodo de retorno de mayor importancia y motivo por el cual fue seleccionado, fue el de 25 años; por tratarse de un puente sobre una carretera importante.

Cuadro 4. Periodo de retorno de diseño recomendado para estructuras menores

Tipo de estructura	Periodo de retorno
Puente sobre carretera importante	50 – 100
Puente sobre carretera menos importante o alcantarillas sobre carretera importante	25
Alcantarillas sobre camino secundario	5 – 10
Drenaje lateral de los pavimentos, donde pueden tolerarse encharcamiento con lluvia de corta duración	1 – 2
Drenaje de aeropuertos	5
Drenaje urbano	2 – 10



Drenaje agrícola	5 – 10
Muros de encauzamiento	2 – 50
Alcantarillas para carreteras	1,1 – 5

Fuente: Villón Béjar, M. 2006

### 3.10. Tiempo de concentración

Para determinar esta variable, se utilizó la fórmula empírica de “Kirpich”, presentada por Villón Béjar, (2006). Se definió a partir de las características físicas de la cuenca: pendientes, longitud, elevación máxima, elevación mínima y área de la cuenca.

Se obtuvieron la elevación máxima y mínima, además de la longitud máxima del recorrido o cauce principal, de acuerdo a la metodología propuesta por Villón Béjar (2004).

Este tiempo de concentración, fue necesario para determinar la duración (D) de las tormentas máximas, presentadas en los diferentes períodos de retorno seleccionados.

### 3.11. Intensidades medias

Al ver la figura 8, se hizo uso del mapa de las estaciones climatológicas de El Salvador y el mapa de la cuenca del río Sensunapán, para identificar las estaciones climatológicas que tienen influencia en el escurrimiento directo superficial; en ese sentido, se usó la herramienta de los polígonos de Thiessen del software Arc GIS 10.2; por medio del cual, se delimitó el área total de toda la cuenca en cinco sub unidades, las que también representan a las estaciones hidrométricas. En este caso, se tomaron en consideración las estaciones que se encuentran dentro de la cuenca del río Sensunapán, así como aquellas que se ubicaban en la periferia de la misma y que son relevantes por la información que representaban en su historial registros.

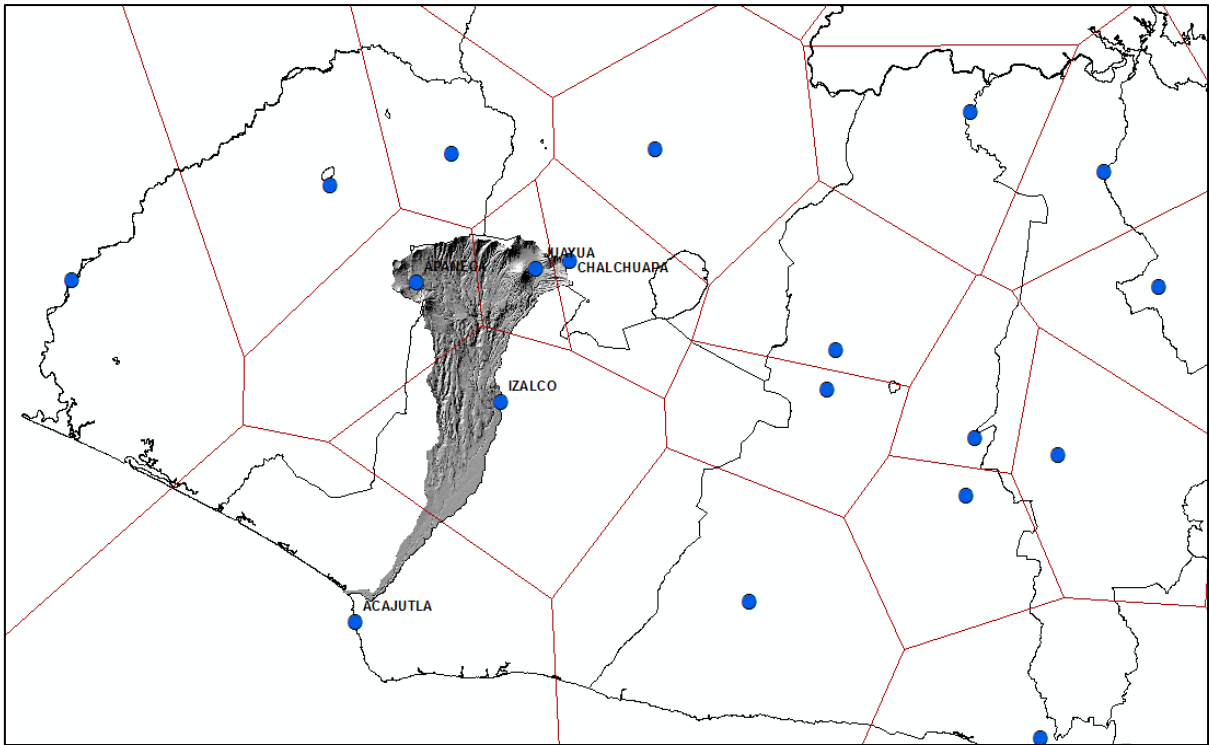


Figura 8. Estaciones climatológicas de El Salvador.

Para determinar las intensidades promedio de cada una de las tormentas, presentadas en la cuenca del río Sensunapán, se utilizó el historial de intensidades máximas de las estaciones climatológicas de Chalchuapa, Juayua, Apaneca, Izalco y Acajutla, para un periodo de retorno de 02, 05, 10, 15 y 25 años y para una duración de 360 minutos; estos datos fueron proporcionadas por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), de El Salvador.

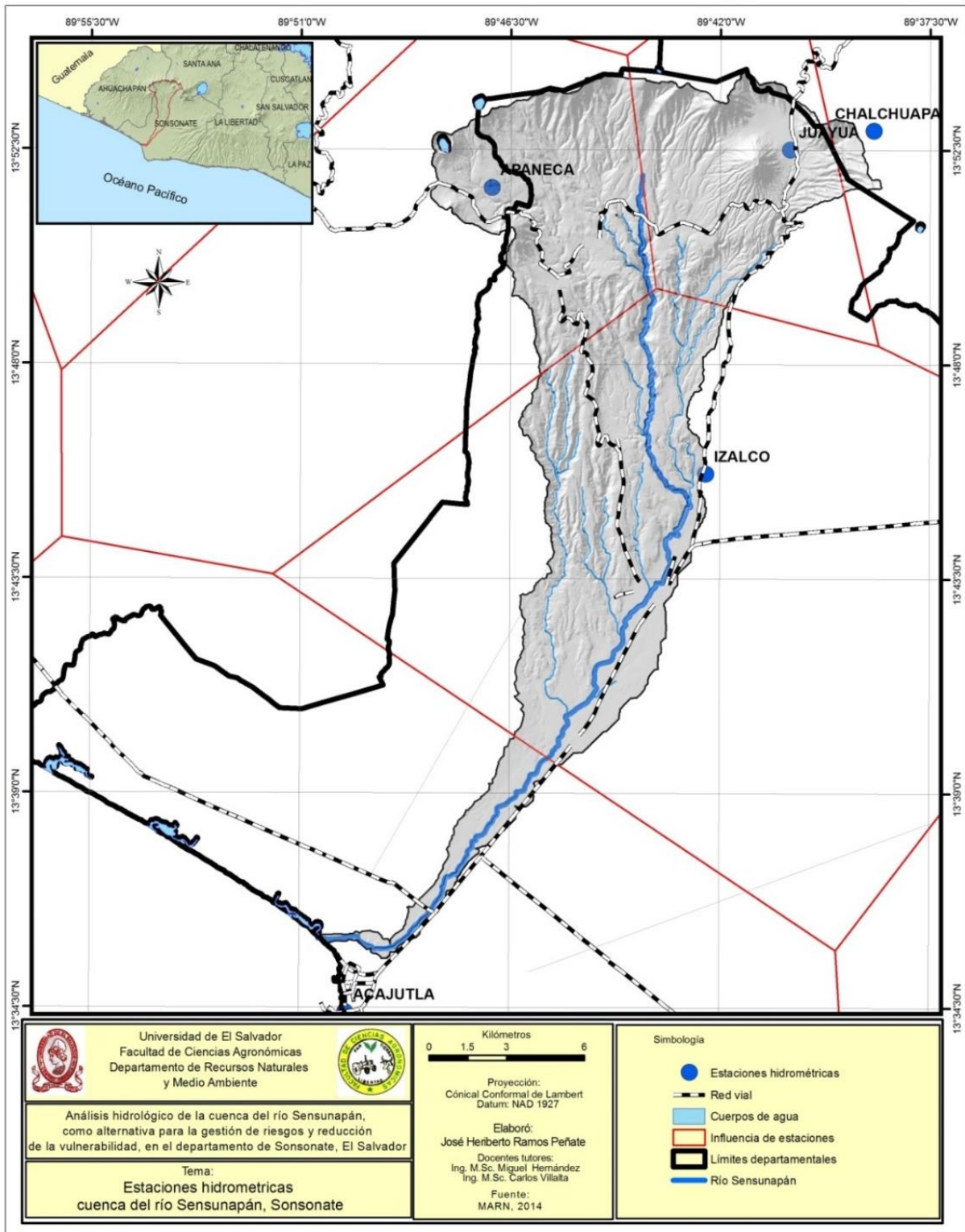


Figura 9. Mapa de estaciones hidrométricas de la cuenca del río Sensunapán

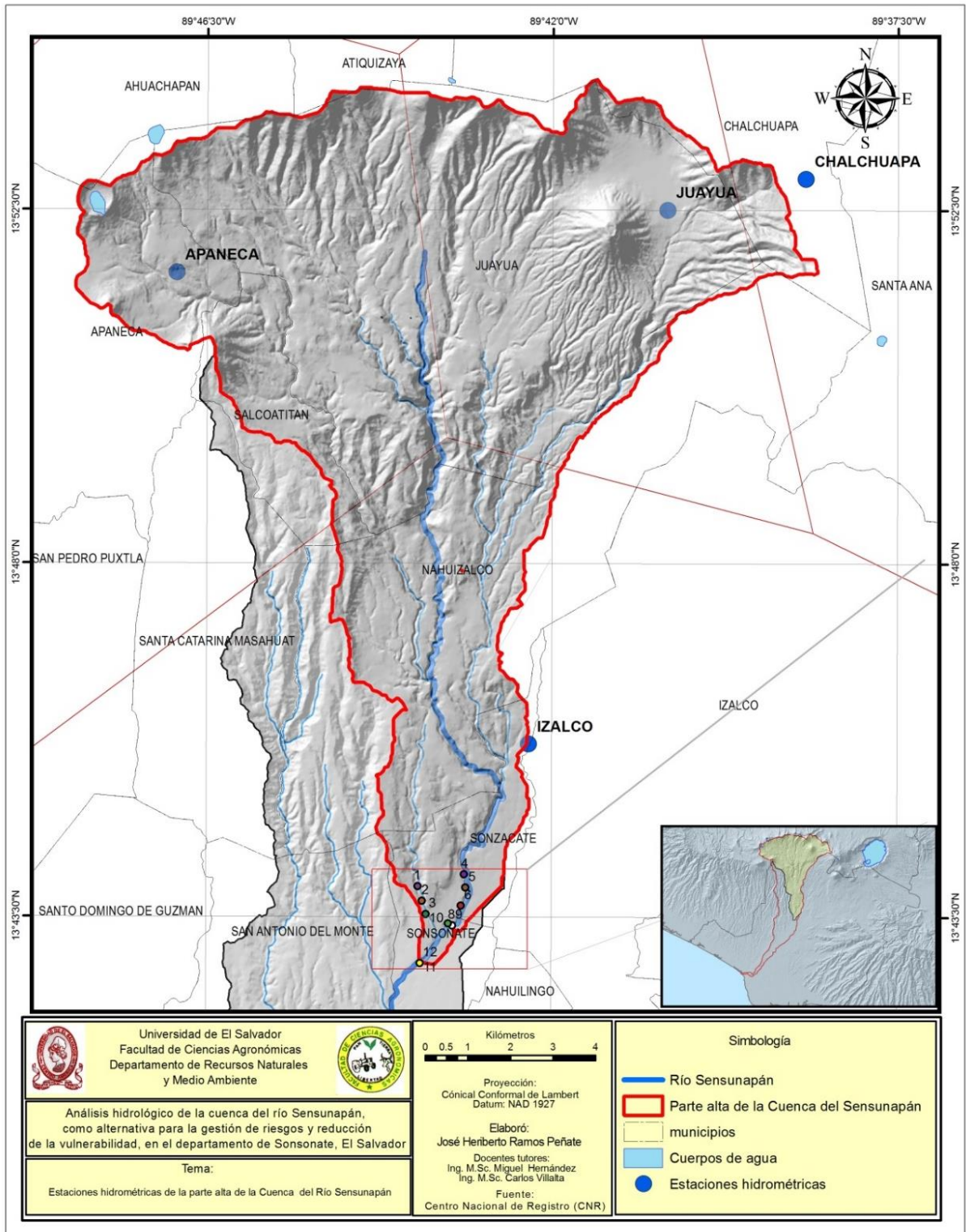


Figura 10. Mapa de polígonos de Thiessen de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán

### 3.12. Precipitación media.

La precipitación media, fue determinada haciendo uso de las precipitaciones máximas, mostrado en el cuadro A – 7, las cuales se obtuvieron de la base de datos proporcionadas por el MARN, a través de las tablas y los gráficos de Intensidad – Duración – Frecuencia.

### 3.13. Cálculo de caudales máximos.

El proceso para el cálculo del caudal máximo utilizando la metodología del SCS, fue el siguiente:

Se determinaron las siguientes características fisiográficas de la cuenca:

A = área de la cuenca, en km<sup>2</sup>

tc = tiempo de concentración, en horas.

NC = número de curva de escurrimiento para la condición *media* de humedad en la cuenca, adimensional.

Se calcularon las lluvias con cinco horas de duración y periodos de retorno 02, 05, 10, 15 y 25 años.

Con base en el número de curva CN de la cuenca, se calculó la escorrentía para cada una de las lluvias determinadas en el paso anterior.

$$Q = \frac{[N(P + 50.8) - 5080]^2}{N[N(P - 203.2) + 20320]}$$

Dónde: Q = escorrentía, en mm.

P = lluvia de duración cinco horas y periodos de retorno, en mm.

Mediante el cuadro A – 14, en función de la magnitud del tiempo de concentración, se determinó el valor del gasto unitario (q).

Por último, se multiplicó el gasto unitario (q), la escorrentía (Q), y el área de la cuenca (A), para obtener el gasto máximo (Q<sub>max</sub>) en m<sup>3</sup>/seg.



### 3.13.1. Georreferenciación de las comunidades

Se ubicaron espacialmente todas las comunidades que se encuentran dentro de la cuenca del río Sensunapán, mostradas en la figura 11; dentro de las cuales, se hizo énfasis en aquellas que están más vulnerables a inundaciones, y por lo tanto, se definió cuáles de todas sería la más afectada por precipitaciones máximas ocasionada por una tormenta. Durante el recorrido, se utilizó un GPS con el cual se georreferenciaron 14 comunidades dentro de la cuenca.

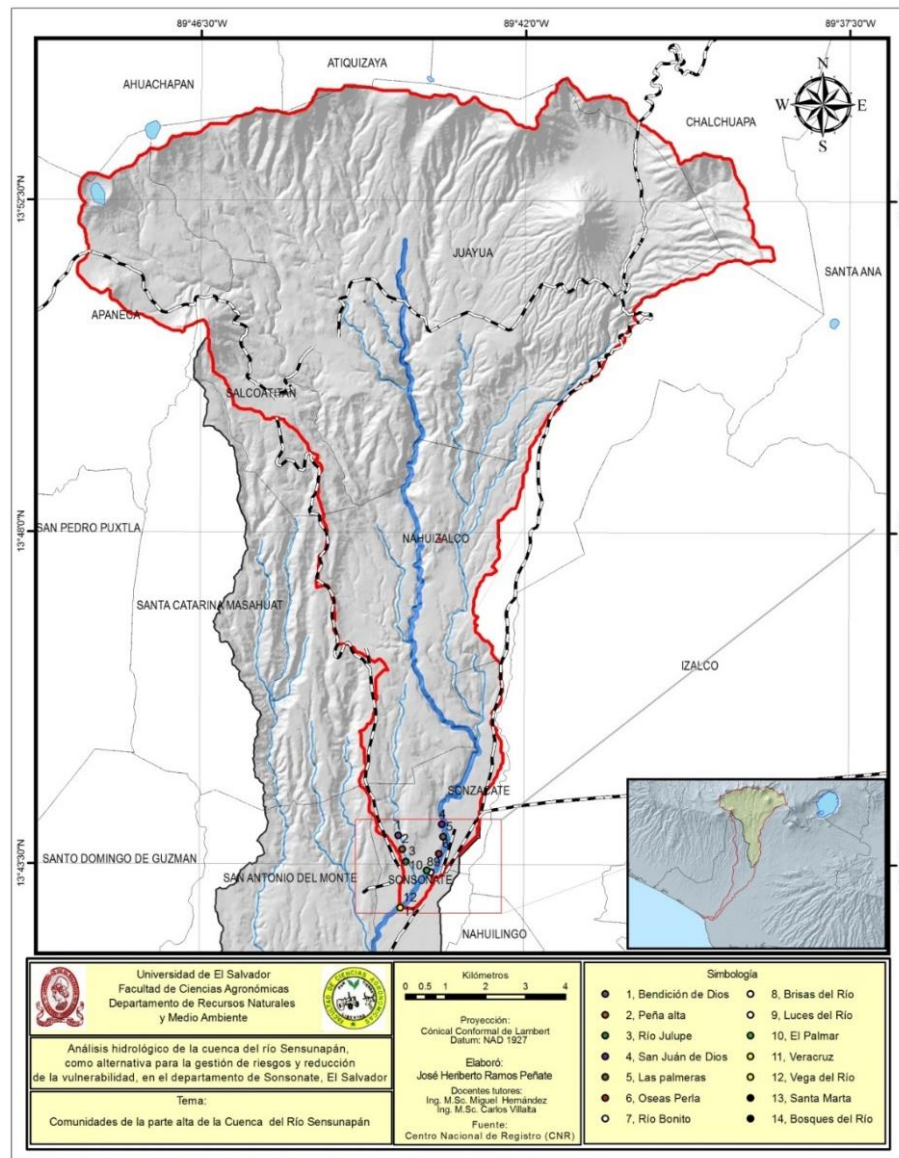


Figura 11. Mapa de las comunidades pertenecientes a la parte alta de la cuenca del río Sensunapán.

### 3.14. Modelización hidráulica

La investigación desarrollada se caracteriza por ser de tipo técnico científico y nivel descriptivo y tiene como fundamento la mitigación de los problemas ocasionados por las fuertes lluvias y al ordenamiento territorial de la zona.

Durante el proceso metodológico hidráulico, se hizo uso de antecedentes históricos de los eventos hidrometeorológicos que ha provocado inundaciones en el río Sensunapán, mediante consultas a entidades públicas como la Alcaldía Municipal de Sonsonate, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales y organizaciones no gubernamentales (ONG) como África'70; las cuales se encuentran directamente involucradas en el área que comprende este estudio. Además, se hizo uso de material cartográfico, los cuales sirvieron desde un inicio en el análisis hidrológico. También se realizaron entrevistas a los habitantes de las comunidades.

Una de las herramientas utilizadas en este proceso fue "Arc Brutilé", la cual permitió identificar los límites del cauce del río, así como el punto de afectación de las comunidades. Posteriormente, fue necesario elaborar un modelo digital del terreno (MDT) en formato vectorial (Trianguled Irregular Network, conocido como TIN), lo más detallado posible; de este TIN se extienden los datos geométricos de las secciones transversales.

El proceso consistió en tres procedimientos fundamentales:

#### Pre proceso

Fue un trabajo previo realizado con ArcGis y HEC-GeoRAS 10.2, (Nania, *et al*, 2007) para generar un archivo de importación para HEC-RAS 4.1.0, que contiene la información geométrica de las secciones transversales que se necesitan modelar para los periodos de retorno establecidos.

#### Modelización

Del flujo base con HEC – RAS 4.1.0 y generación del archivo de exportación para ArcGis.

#### Post proceso

Donde nuevamente con ArcGis y HEC – GeoRAS 10.2, se generaron los resultados finales: superficies de inundación para cada periodo de retorno, grids de profundidad, visualización 3D, entre otros (ver modelación hidráulica, en los resultados)

### 3.14.1. Pre proceso

La figura 12 muestra el trabajo que se realizó con ArcGis 10.2 (RasGeometry) para la creación de un nuevo proyecto y generar el Modelo Digital de Elevación (DEM), a partir de cartografía base 3D y generando un archivo “mdt” vectorial o TIN. Los archivos que se obtuvieron, fueron a partir de puntos y de curvas de nivel, los cuales se convirtieron posteriormente a formato “ShapeFile” (shp.) con la herramienta de exportar datos. Una vez obtenidas las nuevas curvas de nivel y los puntos acotados, se procedió a generar el TIN, como se puede ver en la figura 13.

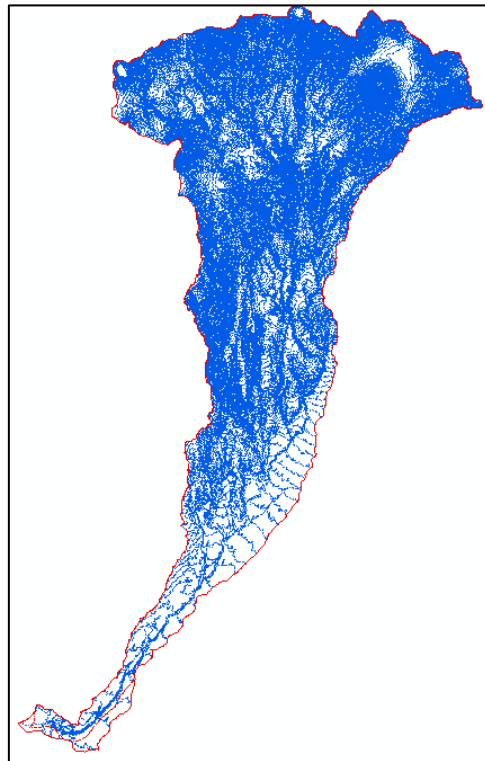


Figura 12. Capas CAD utilizadas para la generación del modelo TIN.

Los pasos posteriores a la generación del mdt fueron:

#### 3.14.1.1. Digitalización del cauce del río

En la figura 14 se puede observar cómo se fueron editando las capas de la cuenca y el TIN para poder digitalizar el cauce principal del río, desde la parte alta de la cuenta (aguas arriba), hasta la baja (aguas abajo) o zona de interés que afectan a las comunidades.



En la figura 15, cuando se finalizó de digitalizar los tramos del río, se indicó el nombre del mismo y del tramo con la herramienta "ID" (ver figura 15).

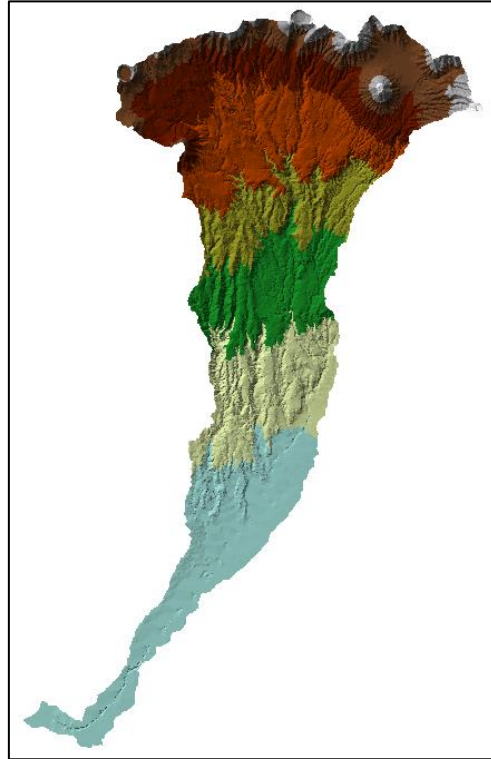


Figura 13. Capas para la generación del TIN

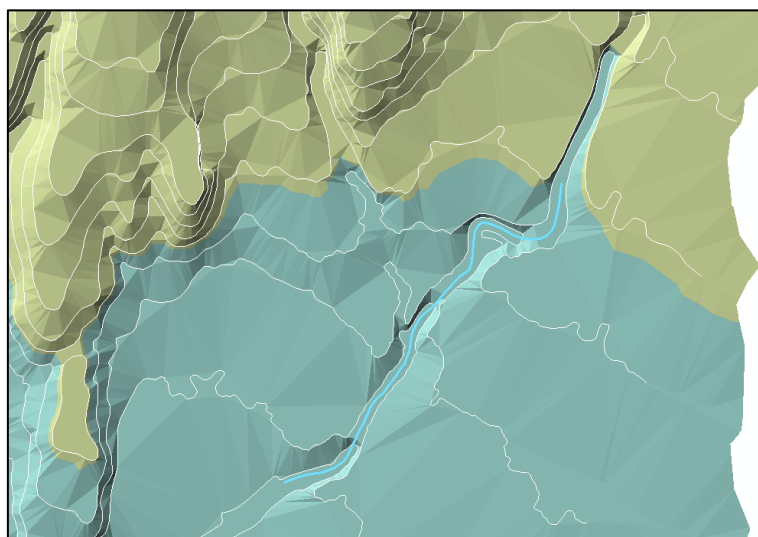


Figura 14. Digitalización del tramo del río Sensunapán

### 3.14.1.2. Digitalización de las líneas que definen los márgenes “Banks”

Como se puede observar en la figura 15, se generó una capa vacía, la cual se procedió a digitalizarla de la misma forma que se hizo previamente con el tramo de interés del río.

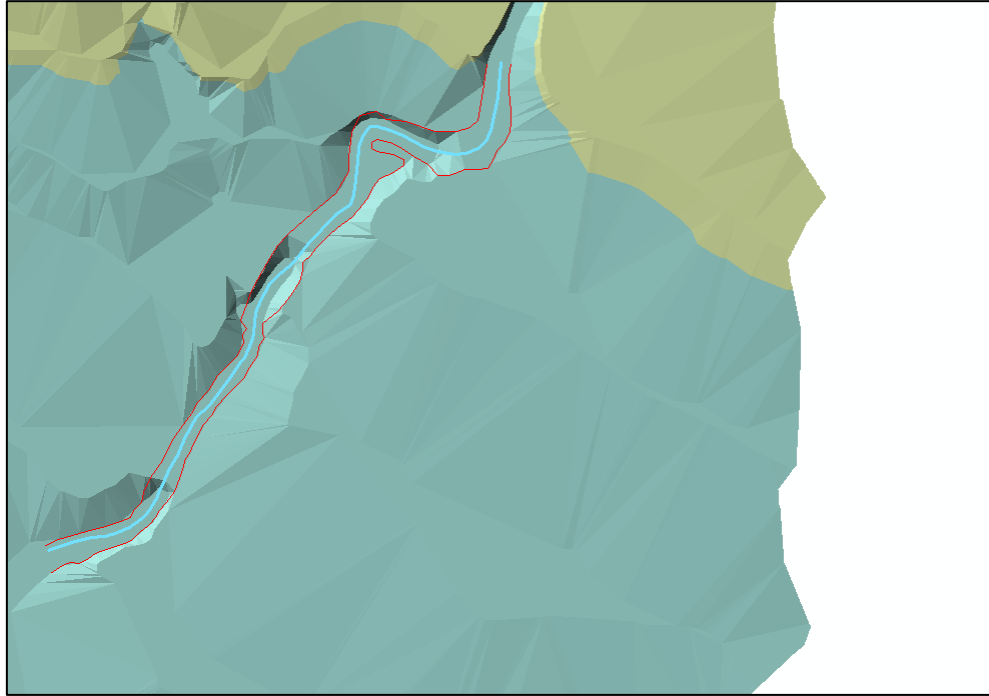


Figura 15. Edición de los límites del cauce o “Banks.shp”.

### 3.14.1.3. Digitalización de “Flowpaths” de las zonas por donde circula el flujo del agua

La figura 17 muestra el proceso de como llevo a cabo la digitalizaron aguas arriba y aguas abajo, una línea por cada lado del río, iniciando en el lado izquierdo y posteriormente en el lado derecho. Posterior a la edición, se definió cada segmento digitalizado (izquierdo y derecho), así como el cauce el río.

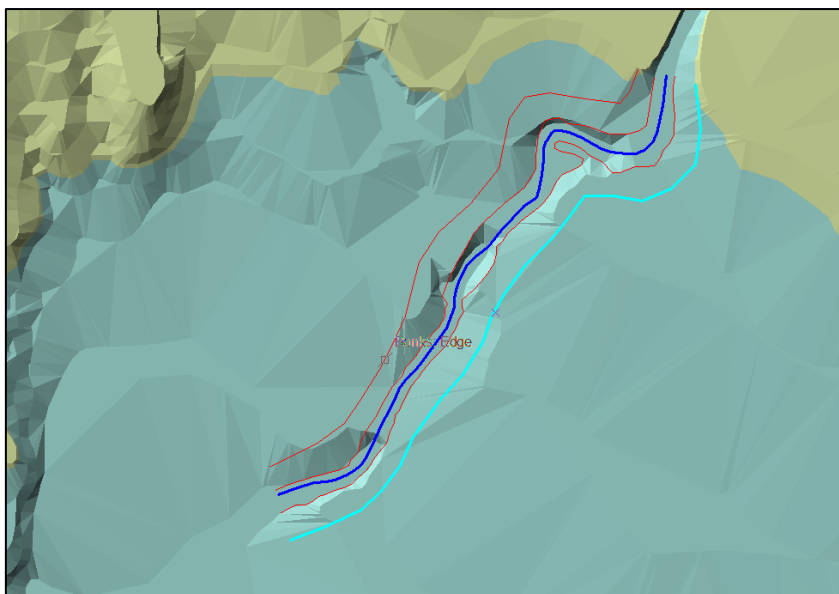


Figura 16. Digitalización de los “flowpaths.shp”.

#### 3.14.1.4. Digitalización de las secciones transversales

La figura 17 muestra el proceso de creación de un nuevo archivo vacío (al igual que los Banks y Flowpaths), que se editó y se fueron digitalizando cada una de las secciones que cortan perpendicularmente al flujo; este proceso se hizo desde el margen izquierdo al derecho, donde cortaba solo una vez al eje como a los Banks y a las líneas de Flowpaths, como se puede observar en la figura 18. Se tuvo el cuidado que ninguna línea perpendicular o secciones que cortan al río, se cruzara una con otra, esto para evitar sesgo en los resultados.

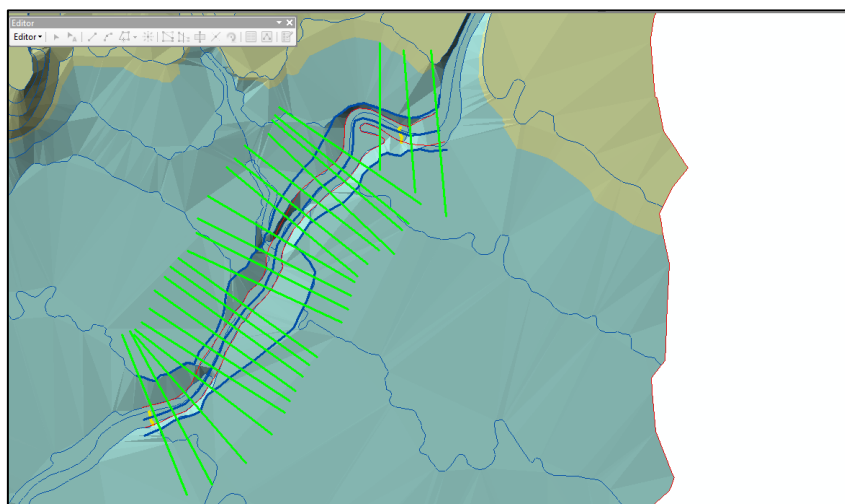


Figura 17. Edición de las Secciones Transversales o “XScutlines.shp”.

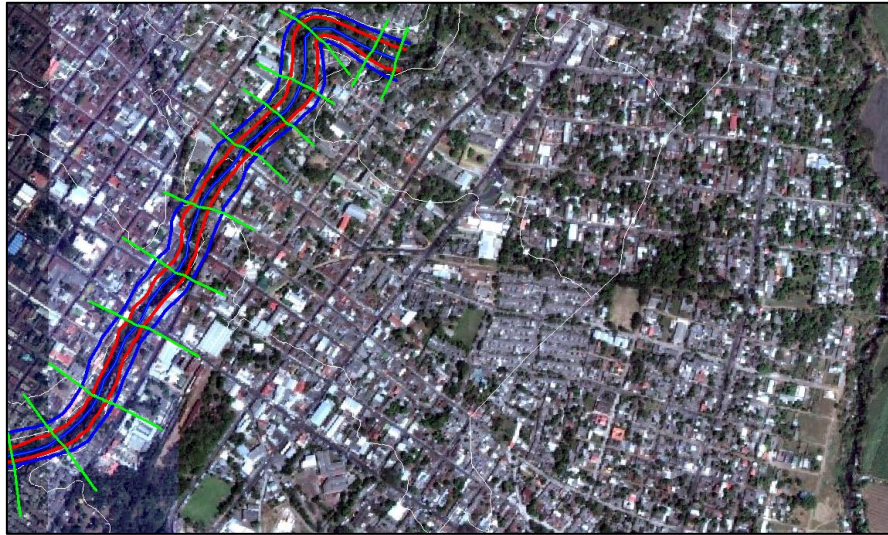


Figura 18. Digitalización del tramo del río, Banks, Flowpaths y XScutlines.

#### **3.14.1.5. Introducción de topología y elevación al cauce**

Donde se incluyó información automáticamente a cada elemento generando capas de 3 dimensiones. De igual forma, se añadió la topología y elevación a las secciones transversales, antes creadas. Por último, se comprobó las capas antes de llevarlas a HEC-RAS, la cual nos permite visualizar los ficheros a incluir en el archivo de importación. Una vez creado el fichero de importación, este será leído por Hec – Ras.

#### **3.14.2. Modelación**

Se realizó con HEC-Ras 4.1.0, a través del cual se importaron los datos obtenidos por medio de GeoRAS de ArcGis.

El proceso posterior a la importación consistió fueron los siguientes:

##### **3.14.2.1. Inicio de un nuevo proyecto**

Se creó un nuevo proyecto donde se guardaron todos los ficheros creados por Hec-Ras.

En “File Name” se introdujo el nombre del fichero que se abre y en ese momento, la extensión debe garantizarse que sea “.prj”. Todos los archivos de Hec-Ras quedan automáticamente vinculados a este proyecto y tendrán el mismo nombre.

### 3.14.2.2. Introducción de la geometría

En la figura 19, se puede ver que haciendo uso de la barra de herramientas del software, se procedió a dar clic en la opción “Edit/Enter geometry Data”, donde aparece la opción del menú: “Save Geometry Data As”, llamándola: Geometría, la cual contiene la base de datos producidos y exportados desde Hec GeoRAS. Dentro de esta nueva carpeta elaborada, se originó el nuevo proyecto geométrico; se creó un nuevo folder en la opción

Una vez creada la geometría, se siguió con la importación de los datos (ubicados en el disco local “C”), a través de la opción “File”, “Import Geometry Data”, “Gis Format” para finalmente definir el sistema de unidades con el cual se trabajara (Sistema métrico) y establecerlo por defecto como predeterminado.

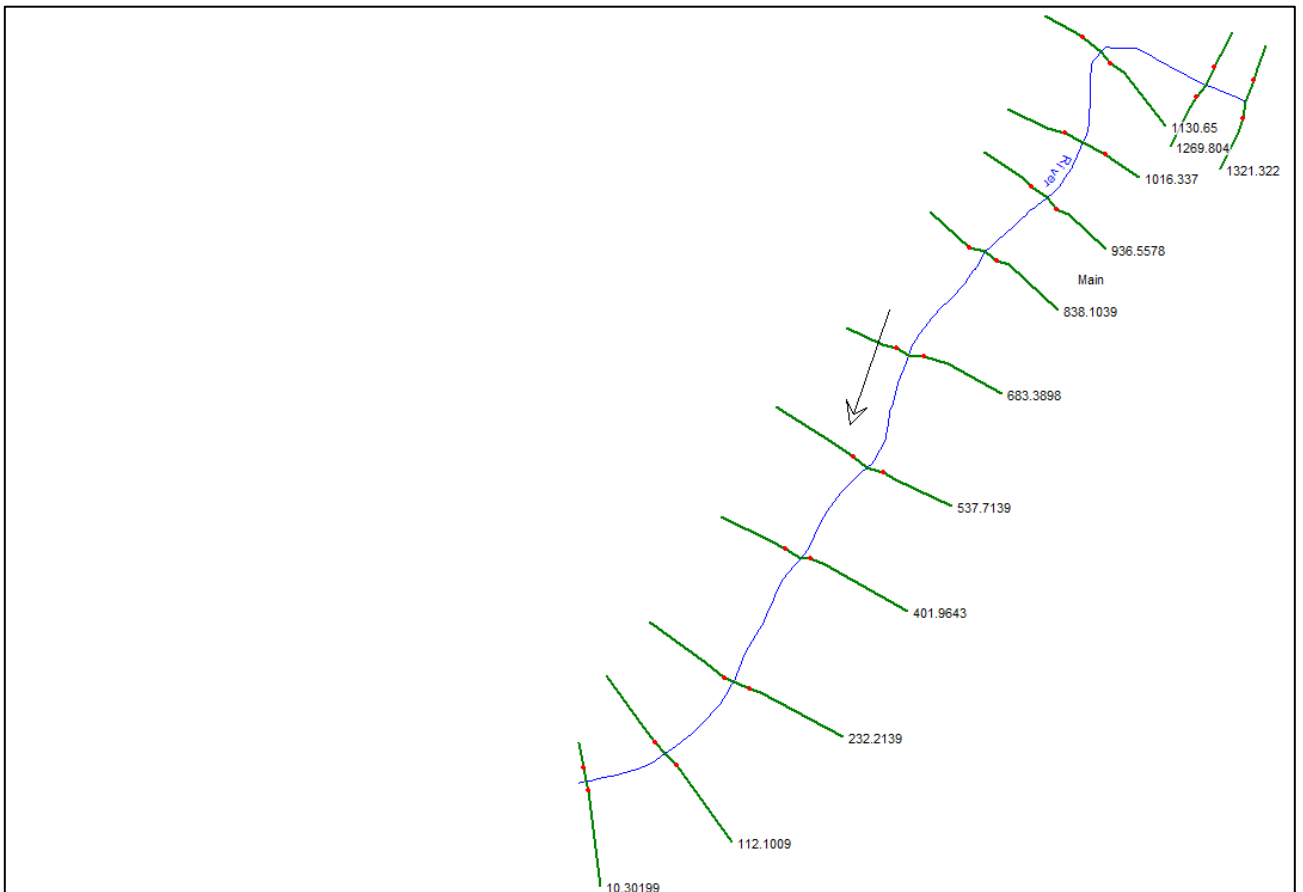


Figura 19. Cauce del río Sensunapán y secciones transversales.

### 3.14.2.3. Importación de los datos geométricos

La figura 20 muestra el proceso llevado a cabo una vez definidas las secciones de la geometría importadas, se guardó el fichero con los datos geométricos, en la opción del menú “Geometric Data”, “File”, “Save Geometric Data As...”. Desde donde aparece una pantalla que permite nombrar el fichero.

En la figura 21 se muestran los datos geométricos importados, los cuales se encuentran cada una de las secciones transversales con las cotas determinadas por el TIN de la micro cuenca.

Se usaron los valores del número de Manning de 0.04 para el lado izquierdo y lado derecho de las secciones transversales; así como el valor de 0.03 para el canal del río. Para cada una de las secciones fue necesario ir dándole en la opción del menú “Apply Data” para que cada una tuviese las mismas condiciones propias de la zona de estudio en cuanto a cobertura vegetal y otras características morfométricas de la cuenca.

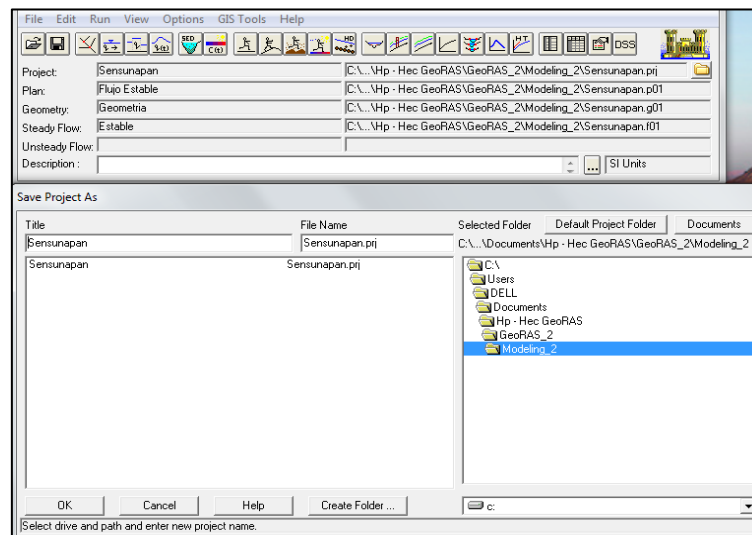


Figura 20. Creación de la carpeta “Save Geometry Data”.

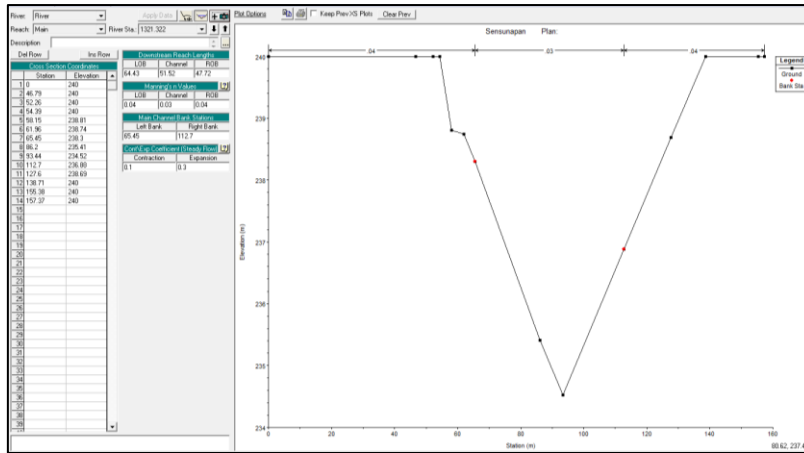


Figura 21. Pantalla para editar secciones (“Cross Section Data”).

### 3.14.2.4. Ingreso de los datos de caudales máximos

Según la figura 22, una vez que se han introducido todos los datos referentes a las secciones, el siguiente paso consistió en definir las condiciones del flujo: caudal y condiciones de contorno.

El programa, para este caso particular, presupone que el caudal se mantiene constante debido a que se establecieron solamente cinco periodos de retorno (02, 05, 10, 15 y 25 años). Se ingresó en la opción del menú: “Steady Flow Data”, luego en “Enter/Edit Number of Profiles”; posteriormente, el programa permite la edición para ingresar los valores de los caudales determinados con anterioridad en cada periodo de retorno.

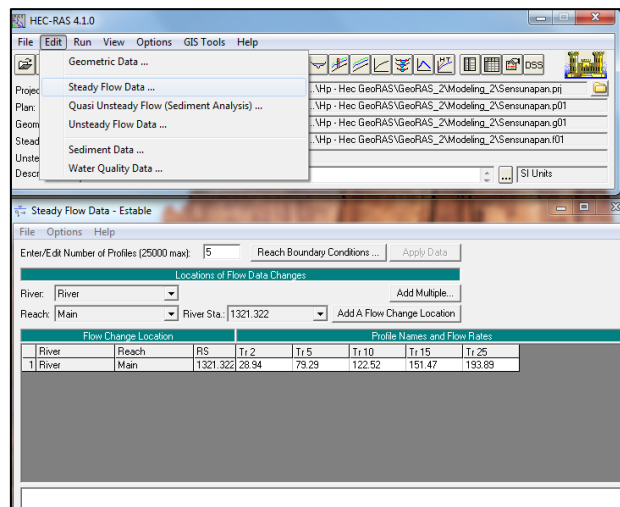


Figura 22. Entrada de datos de caudal, pantalla “Steady Flow Data”.

### 3.14.2.5. Condiciones de contorno

En la figura 23 se muestran las condiciones de contorno que son necesarias para definir los niveles de partida aguas arriba y/o aguas abajo.

En la opción “Edit/Enter Steady Flow data” del menú, en “Reach Boundary Conditions”, se seleccionó “Critical Depth” para cada una de las condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo (Upstream y Downstream). Esto debido a que en este caso en particular, no hay que determinar ningún valor, porque el programa calcula el canal de la sección elegida.

Finalmente, cuando todas las condiciones están definidas, se dio “OK” al botón y seguidamente “Apply Data” de la pantalla “Steady Flow Data”, para que los datos fueran aceptados.

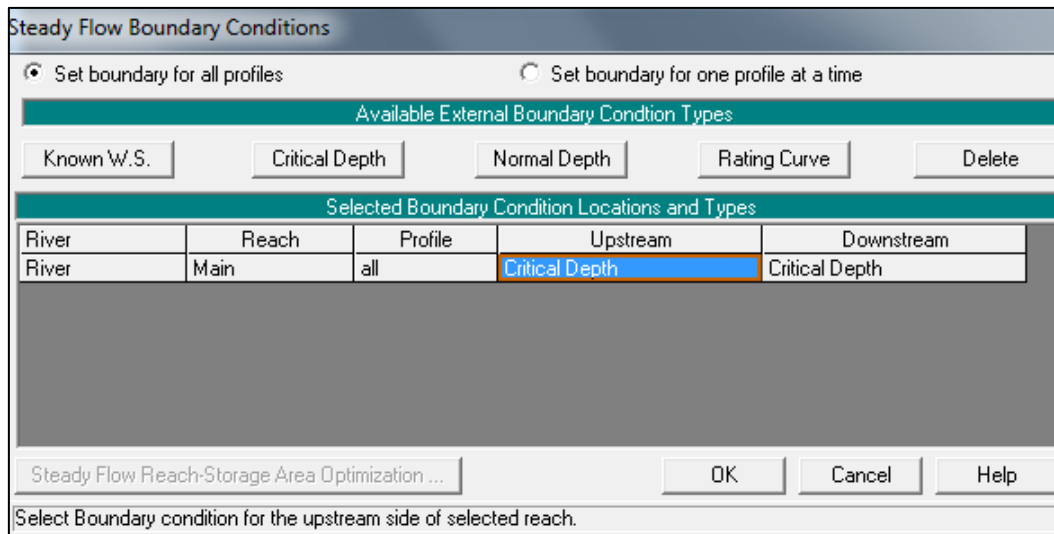


Figura 23. Editor de condiciones de contorno “Steady Flow Boundary Conditions”

### 3.14.2.6. Cálculos hidráulicos

En la figura 24 se puede ver el proceso desarrollado cuando todos los datos ya se han definido, como es el caso de la geometría de las secciones, caudales y condiciones de contorno; se procedió a calcular el perfil de la lámina de agua; para ello se entró en la opción “Steady Flow Analysis” del menú “Run” y en la pantalla principal de Hec-Ras se eligió el régimen de flujo “Subcritical” y por ultimo “Compute”, donde se realiza la modelación en el programa.



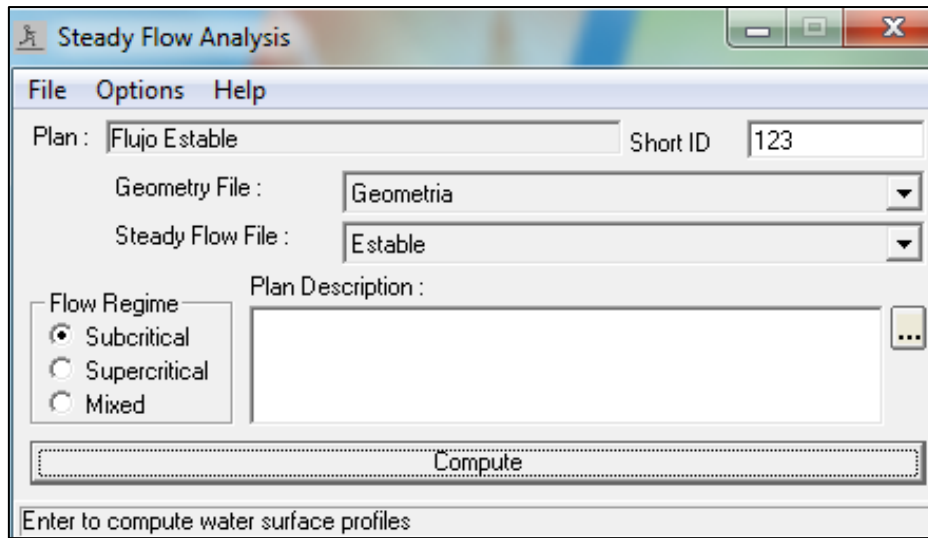


Figura 24. Pantalla "Steady Flow Analysis".

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron dos tipos de resultados; uno de ellos basado en toda la cuenca hidrográfica y el segundo, con énfasis en la parte alta o aguas arriba de la misma con énfasis en las comunidades Vega del Río y El Palmar.

### 4.1. Determinación del número de curva para la cuenca del río Sensunapán.

#### 4.1.1. Condición hidrológica

La condición hidrológica se refiere a la capacidad de la superficie de la cuenca para favorecer o dificultar el escurrimiento directo; esto se encuentra en función de la cobertura vegetal. En el siguiente cuadro se muestra, las diferentes condiciones hidrológicas presentadas en la cuenca:

Cuadro 5. Condición hidrológica del suelo en la cuenca del río Sensunapán.

Uso del suelo	Condición hidrológica
Bosque	Buena
Café	Buena
Caña de azúcar	Regular
Granos básicos	Pobre
Mosaico de cultivos y pastos	Pobre
Pastos cultivados	Buena
Pastos naturales	Buena
Sistemas agroforestales	Regular
Usos y coberturas diversas	Regular

Fuente: elaboración propia, 2014

La cuenca del río Sensunapán, posee un área total de 218.5896 Km<sup>2</sup> y un perímetro de 106.16 Km<sup>2</sup>, distribuidos según el mapa de uso de suelos de El Salvador.

En el cuadro 6, se muestra el uso del suelo presentado dentro de la cuenca y su distribución superficial correspondiente.

Cuadro 6. Uso y área del suelo de la cuenca del río Sensunapán.

Uso del suelo	Área		
	Hectáreas	Km <sup>2</sup>	%
Bosque	219.61	2.1961	1.00
Café	11,786.10	117.861	53.92
Caña de azúcar	858.48	8.5848	3.93
Granos básicos	3,640.12	36.4012	16.65
Mosaico de cultivos y pastos	182.41	1.8241	0.83
Pastos cultivados	611.79	6.1179	2.80
Pastos naturales	56.18	0.5618	0.26
Sistemas agroforestales	1,134.11	11.3411	5.19
Tejido urbano	2,460.62	24.6062	11.26
Usos y coberturas diversas	909.54	9.0954	4.16
<b>Área total</b>	<b>21,858.96</b>	<b>218.5896</b>	<b>100.00</b>

Fuente: elaboración propia, 2014

El cuadro 7 hace referencia al porcentaje de cobertura vegetal de la cuenca, la cual incluye todos los usos del suelo anteriormente mencionados; a excepción del tejido urbano; el cual, no representa influencia directa alguna y por tal motivo es representado como área sin vegetación.

Cuadro 7. Distribución de la cobertura vegetal presente en la Cuenca del Río Sensunapán.

Uso del suelo	Área de la Cuenca	Porcentaje de cobertura
Sin vegetación	2,460.62 Ha	11.26 %
Con vegetación	19,398.34 Ha	88.74 %
<b>TOTAL</b>	<b>21,858.96</b>	<b>100.00 %</b>

Fuente: elaboración propia, 2014

El cuadro 8 toma a consideración los datos antes descritos; los que hacen referencia al uso del suelo (áreas con vegetación y sin vegetación); en ese sentido, el cuadro muestra el uso del suelo de toda la cuenca; pero, sin tomar en cuenta aquellas áreas que son usadas como colonias, residencias o viviendas.

Cuadro 8. Distribución del área, porcentaje y uso del suelo de la Cuenca del Río Sensunapán, sin tejido urbano.

Uso del suelo	Nueva área (Km <sup>2</sup> )	Nuevo %	Ajuste (%)	% Ajustado
Bosque	2.20	1.13	0.13	1.13
Café	117.86	60.76	6.84	60.76
Caña de azúcar	8.58	4.43	0.50	4.43

Granos básicos	36.40	18.77	2.11	18.77
Mosaico de cultivos y pastos	1.82	0.94	0.11	0.94
Pastos cultivados	6.12	3.15	0.36	3.15
Pastos naturales	0.56	0.29	0.03	0.29
Sistemas agroforestales	11.34	5.85	0.66	5.85
Tejido urbano	N/A	N/A	N/A	N/A
Usos y coberturas diversas	9.10	4.69	0.53	4.69
<b>TOTAL</b>	<b>193.98</b>	<b>100.00</b>	<b>11.26</b>	<b>100.00</b>

Fuente: elaboración propia, 2014

#### 4.1.2. Grupo hidrológico de suelo.

De acuerdo con Reyes (2005), la mayor parte de los suelos de El Salvador se desarrollan directamente sobre sustratos volcánicos o sobre materiales procedentes de estos sustratos. Como principal consecuencia de este hecho destaca su riqueza en potasio y a veces en fósforo, riqueza que se debe a los constituyentes propios de la litosfera, cuya descomposición asegura su fertilidad.

Por otro lado, la mayoría de los suelos en El Salvador presenta textura arcillosa (andisoles, latosoles y grumosoles) que condicionan su facilidad de manejo con fines productivos. Cuando están húmedos son pesados y difíciles de trabajar debido a sus propiedades plásticas, mientras que cuando se secan se vuelven duros y compactos reduciéndose la efectividad de las labores (Reyes, 2005).

El MARN (2012), define las características de los seis Grupos Hidrológicos de suelos presentados en la Cuenca del Río Sensunapán de la siguiente manera:

##### 4.1.2.1. Aluviales

Se presentan en llanuras de desbordamiento de los ríos y en la planicie costera de la cuenca. Su textura es franca a franca arenosa por lo que su condición de drenaje es buena, a excepción de las zonas de planicie y depresiones susceptibles a inundaciones de permeabilidad prolongada.

#### **4.1.2.2. Andisoles.**

Se ubican en faldas de volcanes y laderas de montañas en el sector noroeste y centro oeste, desde el cerro Los Naranjos hasta el límite con la ciudad de Apaneca y hacia el sur hasta el cantón El Carrizal y Huiscoyolate aunque también se presentan en relieve colinoso. Su condición de drenaje es muy buena, siendo que su textura es franca a franca arenosa fina, por lo que casi no presentan disección causada por los efectos erosivos de las lluvias. Los suelos son muy profundos, permeables con poca diferencia en el perfil a excepción de la acumulación de materia orgánica.

#### **4.1.2.3. Grumosoles.**

Se halla en los municipios de San Antonio del Monte, Sonsonate y Acajutla; se caracterizan por ser valles casi a nivel, sin disección sobre estratos profundos de materiales finos no consolidados de origen reciente. El drenaje natural por lo general es pobre siendo necesaria la construcción de canales de drenaje para habilitarlos en agricultura. Estos suelos son de colores oscuros, arcillosos, duros y muy lenta permeabilidad. En la época seca se agrietan y en la época humedad se contraen cerrando las grietas. Son de muy difícil laboreo. La capacidad de formación de escorrentía es alta, siendo anegados con mucha facilidad.

#### **4.1.2.4. Latosoles arcillo rojizos.**

Se encuentran en faldas de montañas y colinas y frecuentemente en relieve de piedemonte en los cerros al oriente de la región en los cantones Peña Blanca y Tierra Colorada. Su condición de drenaje es regular ya que aunque su textura es arcillosa plástica, el desarrollo del horizonte subyacente permite cierto grado de permeabilidad entre las grietas de su estructura columnar (forma de individualización de los agregados del suelo).

#### **4.1.2.5. Litosoles.**

Se encuentran en los cantones El cacao y La Ensenada, todos del municipio de Sonsonate; en tierras diseccionadas de laderas montañosas aunque el drenaje es generalmente bueno. Los suelos pedregosos y con frecuencia se presentan afloramientos rocosos.

#### **4.1.2.6. Regosoles y halomórficos.**

Estos se ubican en las planicies de los manglares, pantanos, playas y planicie costera mal drenada su textura es arenosa de variable salinidad y un drenaje muy pobre.

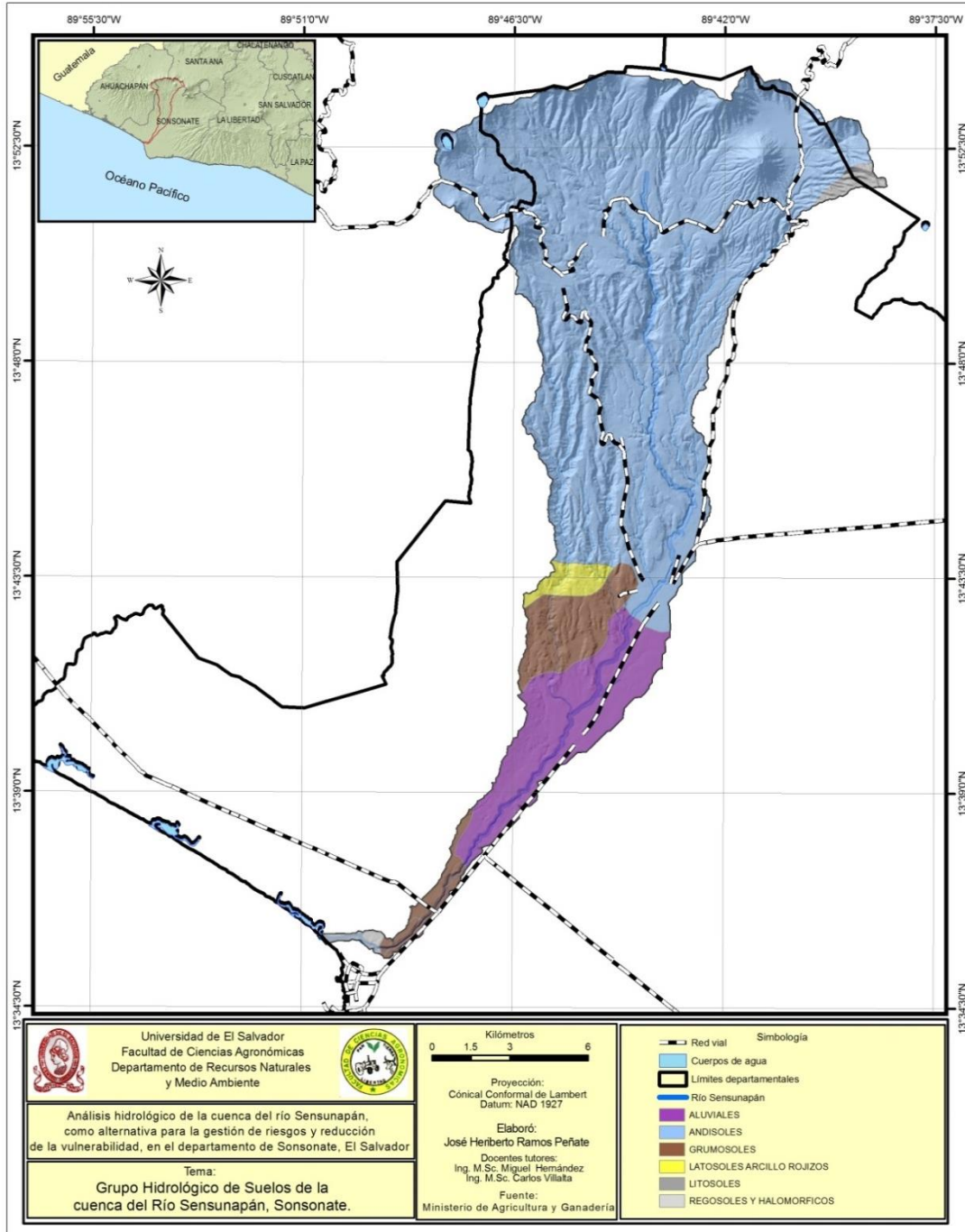


Figura 25. Grupo hidrológico de suelos de la cuenca del río Sensunapán.

El grupo hidrológico define los grupos de suelos, los cuales son:

- Grupo A. Tiene bajo potencial de escorrentía
- Grupo B. Tiene un moderado bajo potencial de escorrentía
- Grupo C. Tiene un moderado alto potencial de escorrentía
- Grupo D. Tiene un alto potencial de escorrentía

En el cuadro 9 se muestran los diferentes tipos de suelos presentes en la cuenca del río Sensunapán, estos se han clasificado de acuerdo a su textura para finalizar con la designación del grupo hidrológico perteneciente.

Cuadro 9. Grupo hidrológico de suelos presentados en la cuenca del río Sensunapán.

Grupos de suelos	Textura	Grupo hidrológico
Aluviales	Franco arenoso	C
Andisoles	Francos	B
Grumosoles	Arcillosos	D
Latosoles arcillo rojizos	Franco arcillosos	D
Litosoles	Franco arenoso	B
Regosoles y Halomórficos	Franco limosos	C

Fuente: Elaboración propia, 2014.

El cuadro 10 muestra los diferentes usos del suelo de la cuenca del río Sensunapán, estos se han clasificado según la metodología de Villón Béjar (2006); así mismo, se le ha asignado un tratamiento que depende del uso que actualmente posee.

Cuadro 10. Clasificación y tratamiento del uso del suelo de la cuenca del río Sensunapán.

Cuenca Sensunapán		Tratamiento	Condición hidrológica
Uso del suelo	Clasificación		
Bosque	Bosques	N/A	Buena
Café	Bosques	N/A	Buena
Caña de azúcar	Cultivos	Surcos rectos	Regular
Granos básicos	Pequeños granos	Surcos rectos	Pobre
Mosaico de cultivos y pastos	Sembríos cerrados	Surcos rectos	Pobre
Pastos cultivados	Pastizales	N/A	Buena
Pastos naturales	Pastizales	N/A	Buena
Sistemas agroforestales	Cultivos	Curvas nivel	Regular
Usos y coberturas diversas	Sembríos cerrados	Surcos rectos	Regular
Tejido urbano	Caminos, incluyendo derecho de vía	Superficie firme	N/A

Fuente: elaboración propia, 2014.

El cuadro 11, muestra el número de curva determinado para los diferentes usos y clasificación de suelos; a través del cual, se tomó como base la condición hidrológica de suelos del cuadro anterior.

Cuadro 11. Número de curva para diferentes prácticas agrícolas, condiciones hidrológicas y grupos hidrológicos de suelos.

Clasificación	Tratamiento	Condición hidrológica	Grupo hidrológico	CN
Caminos y ciudades	Superficie firme	N/A	C	90
Pastizales	N/a	Buena		74
Cultivos	Surcos rectos	Regular		86
Pequeños granos	Surcos rectos	Pobre		84
Sembríos cerrados	Surcos rectos	Regular		83
Bosque	N/a	Buena		70
Cultivos	Curvas de nivel	Regular		83
Bosque	N/a	Buena		55
Caminos y ciudades	Superficie firme	N/A	B	84
Pastizales	N/a	Buena		61
Pequeños granos	Surcos rectos	Pobre		76
Bosque	N/a	Buena		55
Sembríos cerrados	Surcos rectos	Pobre		77
Cultivos	Surcos rectos	Regular		80
Cultivos	Curvas de nivel	Regular		77
Caminos y ciudades	Superficie firme	Buena		D
Pequeños granos	Surcos rectos	Pobre	88	
Sembríos cerrados	Surcos rectos	Regular	87	
Pastizales	N/a	Buena	80	
Cultivos	Surcos rectos	Regular	90	
Cultivos	Curvas de nivel	Regular	87	
Bosque	N/a	Buena	77	
Pequeños granos	Surcos rectos	Pobre	88	
Caminos y ciudades	Superficie firme	N/A	D	92
Bosque	N/a	Buena		55
Bosque	N/a	Buena	B	55
Bosque	N/a	Buena		70
Sembríos cerrados	Surcos rectos	Regular	C	83
Caminos y ciudades	Superficie firme	N/A		90

Fuente: Elaboración propia, 2014.



#### 4.1.3. Determinación del coeficiente de escurrimiento

Los datos mostrados en el cuadro 12, presentan los diferentes valores del coeficiente de escurrimiento, los cuales fueron obtenidos a partir del número de curva del cuadro anterior; estos valores, se multiplicaron por su área, dando como producto el coeficiente de escurrimiento, el cual es adimensional.

Cuadro 12. Coeficiente de escurrimiento ponderado de la cuenca del río Sensunapán.

Clasificación	Área (Ha)	CN	C
Caminos y ciudades	347.20	90	31248
Pastizales	413.02	74	30563.48
Cultivos	722.77	86	62158.22
Pequeños granos	209.88	84	17629.92
Sembríos cerrados	716.23	83	59447.09
Bosque	40.28	70	2819.6
Cultivos	22.05	83	1830.15
Bosque	11,670.44	55	641874.2
Caminos y ciudades	1,677.70	84	140926.8
Pastizales	56.18	61	3426.98
Pequeños granos	2,596.37	76	197324.12
Bosque	64.18	55	3529.9
Sembríos cerrados	182.41	77	14045.57
Cultivos	87.86	80	7028.8
Cultivos	1091.32	77	84031.64
Caminos y ciudades	353.99	92	32567.08
Pequeños granos	603.17	88	53078.96
Sembríos cerrados	192.35	87	16734.45
Pastizales	198.78	80	15902.4
Cultivos	47.84	90	4305.6
Cultivos	20.74	87	1804.38
Bosque	25.77	77	1984.29
Pequeños granos	230.68	88	20299.84
Caminos y ciudades	75.23	92	6921.16
Bosque	115.66	55	6361.3
Bosque	68.03	55	3741.65
Bosque	21.34	70	1493.8
Sembríos cerrados	0.97	83	80.51
Caminos y ciudades	6.50	90	585
<b>TOTAL</b>	<b>21,858.94</b>		<b>1463744.90</b>

Fuente: Elaboración propia, 2014.

El procedimiento para calcular el valor de C ponderado se muestra a continuación:

$$C = 1463744.90 / 21,858.94$$

$$C = 66.96321459$$

#### 4.1.4. Periodo de retorno

El periodo de retorno definido fue de dos, cinco, diez, 15 y 25 años; tomando en consideración el periodo de retorno recomendado por Villón Béjar (2006), para estructuras menores.

#### 4.1.5. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración se determinó haciendo uso de las características físicas de la cuenca, como la longitud del drenaje principal y la elevación más alta y más baja de la misma.

Usando la fórmula de Kirpich, como fórmula empírica propuesta por Villón Béjar (2004), se tiene:

$$L = 50,965.5496 \text{ m}$$

$$H = 2,090.00 \text{ m} - 0.00 \text{ m} = 2,090.00 \text{ m}$$

$$T_c = 0.0195 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$$

$$T_c = 0.0195 \left( \frac{(50,965.5496 \text{ m})^3}{(2,090 \text{ m} - 0.0 \text{ m})} \right)^{0.385}$$

$$T_c = 0.0195 \left( 14,409.4791 \right)$$

$$T_c = 280.9848 \text{ minutos}$$

$$T_c = 280.9848 \text{ min.} \cdot \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min.}} = 4.6831 \text{ horas}$$

$$\mathbf{T_c = 4.6831 \text{ horas}}$$

#### 4.1.6. Intensidad – Duración – Frecuencia y caudales máximos

La información de intensidad – duración – frecuencia para los diferentes periodos de retorno, así como la estimación de los diferentes caudales máximos, se muestran en anexos.

El historial de intensidades máximas registradas en las estaciones climatológicas de Chalchuapa, Juayua, Apaneca, Izalco y Acajutla, fueron proporcionados por el Ministerio de Recursos Naturales y Medio Ambiente (Anexo 1).

La determinación de las áreas de influencia que le corresponde a cada estación y los periodos de retorno señalados; así como la intensidad máxima para poder calcular la intensidad media y la precipitación promedio que es lo que se necesita para encontrar el caudal máximo de la cuenca se muestra en anexos 2 – 6.

El cuadro 13 muestra los resultados de precipitación promedio y el caudal máximo determinados en la cuenca del río Sensunapán, haciendo uso de periodos de retorno de 02, 05, 10, 15, y 25 años; así como de una duración de 360 minutos, establecido por el tiempo concentración.

Cuadro 13. Intensidades medias, precipitaciones promedios y caudales máximos determinados en la Cuenca del Río Sensunapán, con periodo de retorno de 02, 05, 10, 15 y 25 años, y una duración de 360 minutos.

<b>Periodo de retorno</b>	<b>Intensidad media</b>		<b>Precipitación promedio</b>	<b>Caudal máximo</b>
02 años	0.17344 mm/min.	10.4067 mm/hora	62.4403 mm	99.7435 m <sup>3</sup> /seg
05 años	0.24545 mm/min	14.7272 mm/hora	88.3633 mm	250.7652 m <sup>3</sup> /seg
10 años	0.29481 mm/min	17.6890 mm/hora	103.1346 mm	353.7489 m <sup>3</sup> /seg
15 años	0.31831 mm/min	19.0987 mm/hora	114.5927 mm	440.3925 m <sup>3</sup> /seg
25 años	0.35034 mm/min	21.0204 mm/hora	126.1227 mm	532.5473 m <sup>3</sup> /seg

Fuente: elaboración propia, 2014

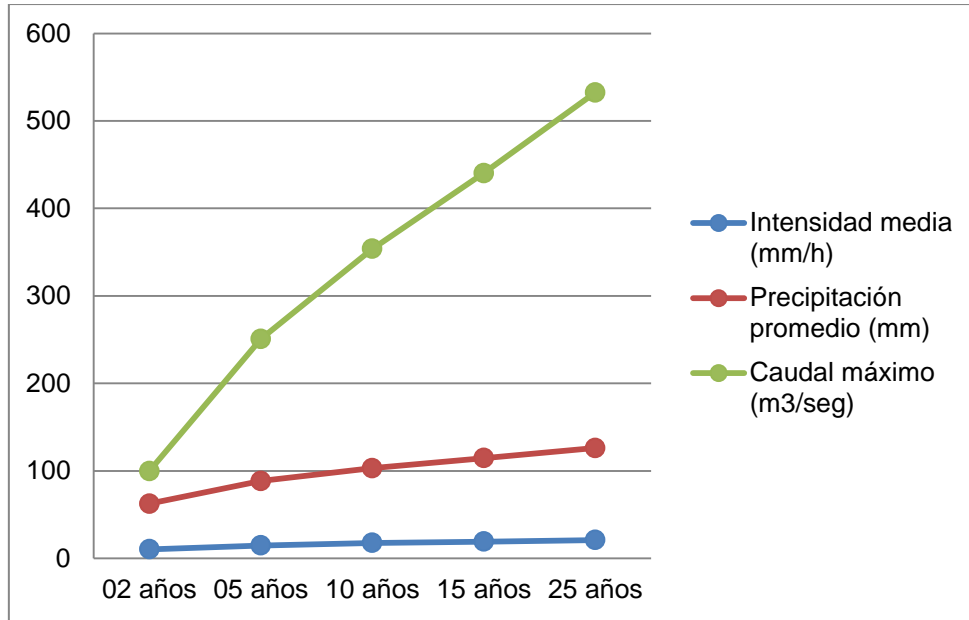


Figura 26. Intensidades medias, precipitación promedio y caudales máximos de la cuenca del río Sensunapán, para una duración de 360 minutos y periodos de retorno de 02, 05, 10, 15, y 25 años.

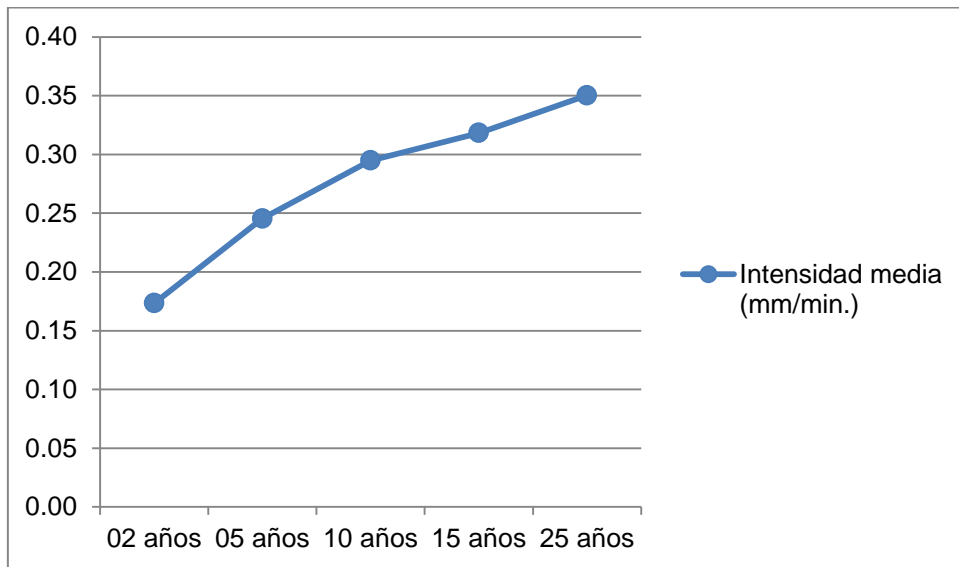


Figura 27. Intensidad media de la cuenca del río Sensunapán, para una duración de 360 minutos y periodos de retorno de 02, 05, 10, 15, y 25 años.

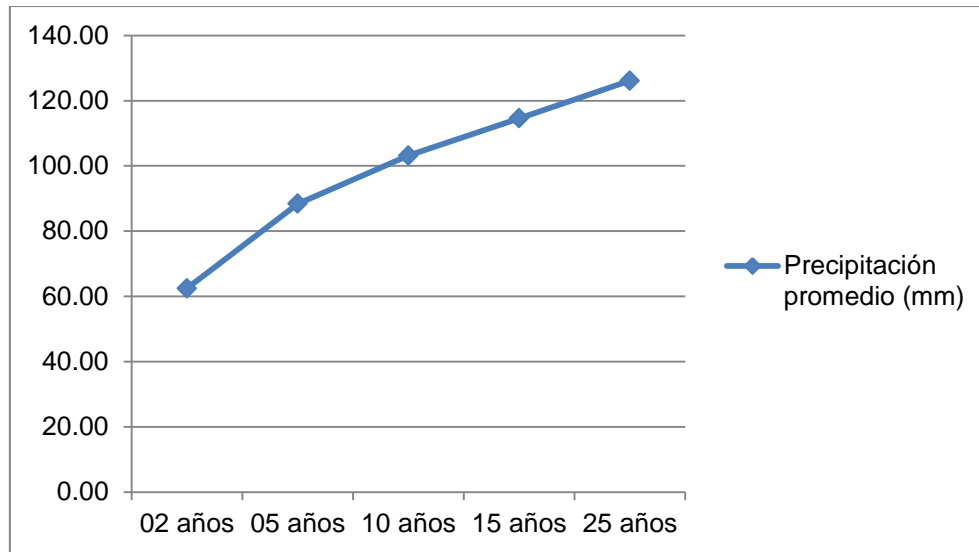


Figura 28. Precipitación promedio de la cuenca del Río Sensunapán, para una duración de 360 minutos y periodos de retorno de 02, 05, 10, 15, y 25 años.

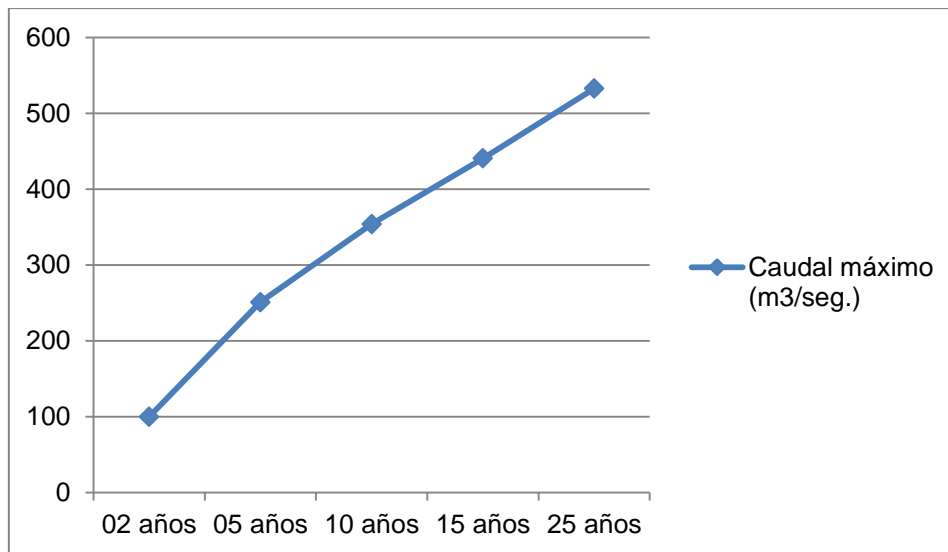


Figura 29. Caudales máximos determinados de la cuenca del río Sensunapán, para una duración de 360 minutos y periodos de retorno de 02, 05, 10, 15, y 25 años.

#### 4.2. Determinación del número de curva en la parte alta de la cuenca del río Sensunapán.

Se realizó un nuevo proceso al igual que el anterior, basado para toda la cuenca, debido a que según la georreferenciación realizada en la zona de estudio, las comunidades Vega del Río y El Palmar, son las que poseen mayor vulnerabilidad a inundación provocada por altas precipitaciones, al encontrarse cercanas al cauce principal. Por tal motivo, se tomó la ubicación geográfica y como referencia de estas comunidades, las cuales se encuentran expuestas a riesgo y se consideró establecer un nuevo punto de control como base para realizar un nuevo proceso hidrológico.

##### 4.2.1. Condición hidrológica

El cuadro 14 muestra la condición hidrológica establecida para los diferentes usos del suelo en la parte alta de la cuenca.

Cuadro 14. Condición hidrológica de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán.

Uso del suelo	Condición hidrológica
Bosque	Buena
Café	Buena
Caña de azúcar	Regular
Granos básicos	Pobre
Mosaico de cultivos y pastos	Pobre
Pastos naturales	Buena
Sistemas agroforestales	Regular

Fuente: elaboración propia, 2014

El cuadro 15 muestra la parte alta de la cuenca del río Sensunapán, la cual posee un área total de 145.5588 Km<sup>2</sup>, distribuidos según el mapa de uso de suelos de El Salvador, establecidos de la siguiente manera:

Cuadro 15. Uso y área del suelo de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán

Uso actual del suelo	Clasificación	Área (Ha)	Km <sup>2</sup>
Bosque	Bosques	132.2085	1.3221
Café	Bosques	10,763.5394	107.6354

Caña de azúcar	Cultivos	30.1723	0.3017
Granos básicos	Pequeños granos	1,447.4139	14.4741
Mosaico de cultivos y pastos	Sembríos cerrados	81.3547	0.8135
Pastos naturales	Pastizales	15.9200	0.1592
Sistemas agroforestales	Cultivos	951.7268	9.5173
Tejido urbano	Caminos, incluyendo derecho de vía	1,133.5486	11.3355
<b>Total</b>		<b>14,555.8842</b>	<b>145.5588</b>

Fuente: elaboración propia, 2014

En el cuadro 16 se muestra la representación en hectáreas y el porcentaje del uso actual del suelo en la parte alta de la cuenca. Se puede apreciar una mayor representación de cobertura vegetal debido a los bosques cafetaleros en la parte alta del municipio de Juayua.

Cuadro 16. Distribución porcentual de la cobertura vegetal presente en la parte alta de la Cuenca del Río Sensunapán.

Uso del suelo	Área de la Cuenca	Cobertura vegetal
Sin vegetación	1,133.5486 Ha	7.79 %
Con vegetación	13, 422.3356 Ha	92.21 %
<b>TOTAL</b>	<b>14, 555.8842 Ha</b>	<b>100.00 %</b>

Fuente: elaboración propia, 2014

El cuadro 17 muestra el proceso de clasificación del uso del suelo de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán, en él se puede observar además, el tratamiento dado al suelo; así como la condición hidrológica que posee.

Cuadro 17. Clasificación y tratamiento del uso del suelo de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán.

Cuenca Sensunapán		Tratamiento	Condición hidrológica
Uso del suelo	Clasificación		
Bosque	Bosques	N/A	Buena
Café	Bosques	N/A	Buena
Caña de azúcar	Cultivos	Surcos rectos	Regular
Granos básicos	Pequeños granos	Surcos rectos	Pobre
Mosaico de cultivos y pastos	Sembríos cerrados	Surcos rectos	Pobre

Pastos naturales	Pastizales	N/A	Buena
Sistemas agroforestales	Cultivos	Curvas nivel	Regular
Tejido urbano	Caminos, incluyendo derecho de vía	Superficie firme	N/A

Fuente: elaboración propia, 2014

#### 4.2.2. Grupo hidrológico de suelo.

El cuadro 18 muestra los resultados obtenidos para determinar el número de curva en la parte alta de la cuenca, que fue la misma metodología realizada para toda la cuenca, siguiendo el mismo proceso y tomando como base la clasificación del uso actual del suelo y el tratamiento que este posee; así como también las características de cobertura vegetal (condición hidrológica) y texturas del suelo (grupo hidrológico de suelos).

Cuadro 18. Número de curva para diferentes prácticas agrícolas, condiciones hidrológicas y grupos hidrológicos de suelos.

Uso actual del suelo	Clasificación	Tratamiento	Condición hidrológica	Grupo hidrológico	CN
Bosque	Bosques	N/A	Buena	B	55
Café	Bosques	N/A	Buena		55
Caña de azúcar	Cultivos	Surcos rectos	Regular		80
Granos básicos	Pequeños granos	Surcos rectos	Pobre		76
Mosaico de cultivos y pastos	Sembríos cerrados	Surcos rectos	Pobre		77
Pastos naturales	Pastizales	N/A	Buena		61
Sistemas agroforestales	Cultivos	Curvas nivel	Regular		83
Tejido urbano	Caminos, incluyendo derecho de vía	Superficie firme	N/A		84
Bosque	Bosques	N/A	Buena	B	55
Café	Bosques	N/A	Buena		55
<b>TOTAL</b>					<b>681</b>

Fuente: elaboración propia, 2014



#### 4.2.3. Determinación del coeficiente de escurrimiento

Al igual que la metodología usada para toda la cuenca, los datos presentados en el cuadro 19, muestran los diferentes valores del coeficiente de escurrimiento de la parte alta; estos valores, fueron obtenidos a partir de la clasificación de los suelos, a los cuales se les determinó el área; posteriormente, cada área se multiplicó por el número de curva correspondiente y el producto resultante es el coeficiente de escurrimiento, tal como se muestra a continuación:

Cuadro 19. Coeficiente de escurrimiento ponderado de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán.

Uso actual del suelo	Clasificación	Área (Ha)	CN	C
Bosque	Bosques	64.1821	55	3530.0155
Café	Bosques	10,647.8829	55	585633.5595
Caña de azúcar	Cultivos	30.1723	80	2413.784
Granos básicos	Pequeños granos	1,447.4139	76	110003.4564
Mosaico de cultivos y pastos	Sembríos cerrados	81.3547	77	6264.3119
Pastos naturales	Pastizales	15.9200	61	971.12
Sistemas agroforestales	Cultivos	951.7268	83	78993.3244
Tejido urbano	Caminos, incluyendo derecho de vía	1,133.5486	84	95218.0824
Bosque	Bosques	68.0264	55	3741.452
Café	Bosques	115.6565	55	6361.1075
<b>TOTAL</b>		<b>14,555.8842</b>	<b>681</b>	<b>893130.2136</b>

Fuente: elaboración propia, 2014

El coeficiente de escurrimiento ponderado se determinó haciendo uso del número de curva de cada uno de los usos del suelo, multiplicados por su respectiva área, dando como producto diferentes valores, que al ser sumados en su totalidad y posteriormente divididos entre el área de la cuenca, dio como producto el coeficiente de escurrimiento ponderado de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán.

El proceso se muestra a continuación:

$$C = 893130.2136/14555.8842$$

$$C = 61.35870562$$

$$C = 61.35870562$$

#### 4.2.4. Periodo de retorno

El periodo de retorno definido fue de dos, cinco, diez, 15 y 25 años; tomando en consideración el proceso recomendado por Villón Béjar (2006), para estructuras menores.

#### 4.2.5. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración se determinó haciendo uso de la longitud del drenaje principal y la elevación máxima de la cuenca; así como la elevación mínima, la cual corresponde a las comunidades más cercanas al río y que además se consideran vulnerables por inundaciones, según la georreferenciación realizada.

Usando la fórmula de Kirpich, como fórmula empírica propuesta por Villón Béjar (2004), se tiene:

$$L = 28,303.6074 \text{ m}$$

$$H = 2,090.00 \text{ m} - 210.00 \text{ m}$$

$$H = 1,880.00 \text{ m}$$

$$T_c = 0.0195 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$$

$$T_c = 0.0195 \left( \frac{(28,303.6074 \text{ m})^3}{(2,090.00 \text{ m} - 210.00 \text{ m})} \right)^{0.385}$$

$$T_c = 0.0195 \left( 7,608.9809 \right)$$

Tc = 148.3751276 minutos

Tc = 148.3751276 min.  $\frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min.}} = 2.472918793 \text{ horas}$

**Tc = 2.4729 horas**

#### **4.2.6. Intensidad – Duración – Frecuencia (I – D – F) y caudales máximos.**

Se puede mencionar que al igual que el procedimiento utilizado para toda la cuenca, la información de intensidad – duración – frecuencia, se muestran en anexos.

Se puede observar en el anexo 7, el cual contiene el historial de intensidades máximas registradas en las estaciones climatológicas de Chalchuapa, Juayua, Apaneca e Izalco, que a diferencia del proceso anterior realizado para toda la cuenca, éste se enfocó solo en la parte alta de la cuenca; por tal motivo no se consideran las cinco estaciones climatológicas, sino que solo cuatro, dejando a un lado la del municipio de Acajutla.

Estas cuatro estaciones climatológicas, fue el resultado de usar la herramienta de los polígonos de Thiessen, enfocados en las comunidades El Palmar y Vega del Río, por caracterizarse en una zona de influencia directa por vulnerabilidad a inundación.

Posteriormente, en los siguientes cuadros (anexos 8 – 12), se detalla el área de influencia que le corresponde a cada estación; así como la intensidad máxima, intensidad media y la precipitación promedio, el cual es necesario para determinar el caudal máximo de la parte alta de la cuenca.

Cuadro 20. Intensidades medias, precipitaciones promedios y caudales máximos determinados en la parte alta del río Sensunapán, para periodos de retorno de 02, 05, 10, 15 y 25 años, y una duración de 150 minutos.

<b>Periodo de retorno</b>	<b>Intensidad media</b>		<b>Precipitación promedio</b>	<b>Caudal máximo</b>
02 años	0.38755 mm/min.	23.2534 mm/hora	58.1954 mm	46.1052 m <sup>3</sup> /seg
05 años	0.51680 mm/min	31.0080 mm/hora	77.5202 mm	126.2859 m <sup>3</sup> /seg
10 años	0.60216 mm/min	36.1297 mm/hora	90.3244 mm	195.1277 m <sup>3</sup> /seg

15 años	0.65319 mm/min	39.1914 mm/hora	97.9787 mm	241.2379 m <sup>3</sup> /seg
25 años	0.71099 mm/min	42.6596 mm/hora	106.6492 mm	308.7991 m <sup>3</sup> /seg

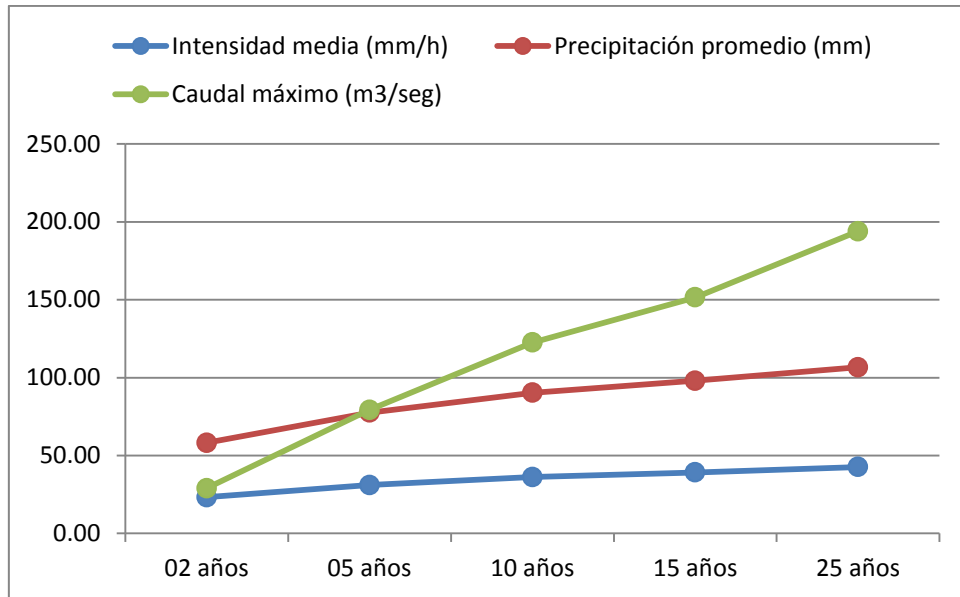


Figura 30. Intensidades medias, precipitación promedio y caudales máximos de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán, para una duración de 150 minutos y periodos de retorno de 02, 05, 10, 15, y 25 años.

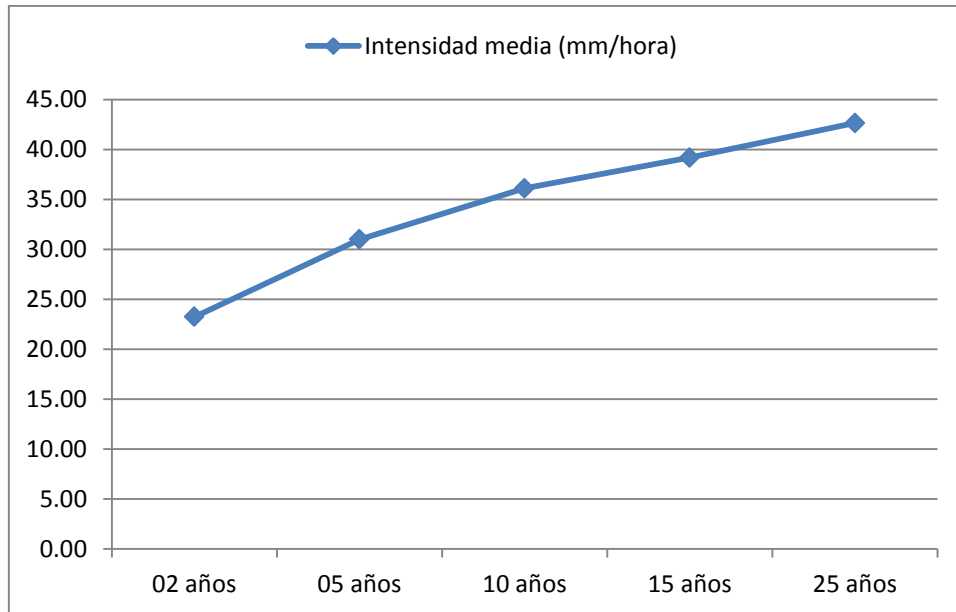


Figura 31. Intensidades medias de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán, para una duración de 150 minutos y periodos de retorno de 02, 05, 10, 15, y 25 años.

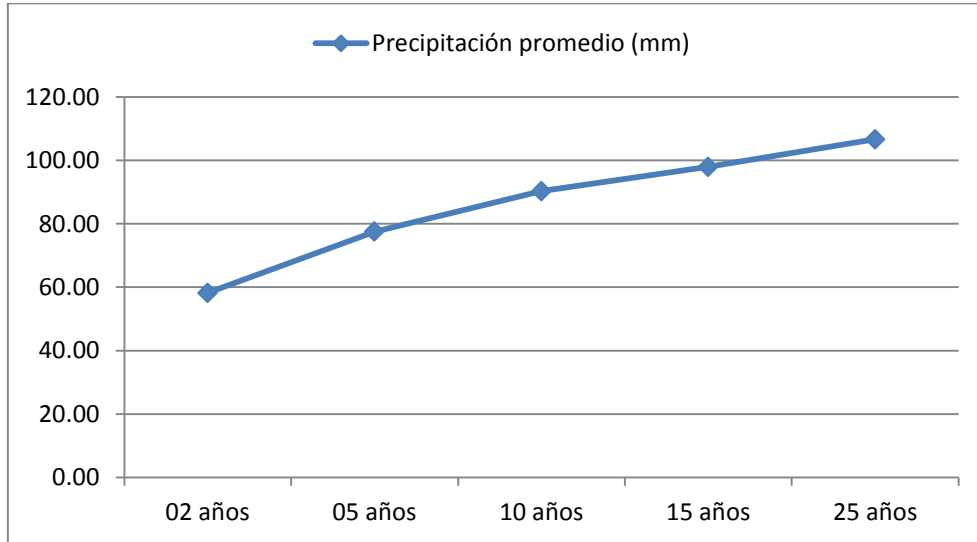


Figura 32. Precipitación promedio de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán, para una duración de 150 minutos y periodos de retorno de 02, 05, 10, 15, y 25 años.

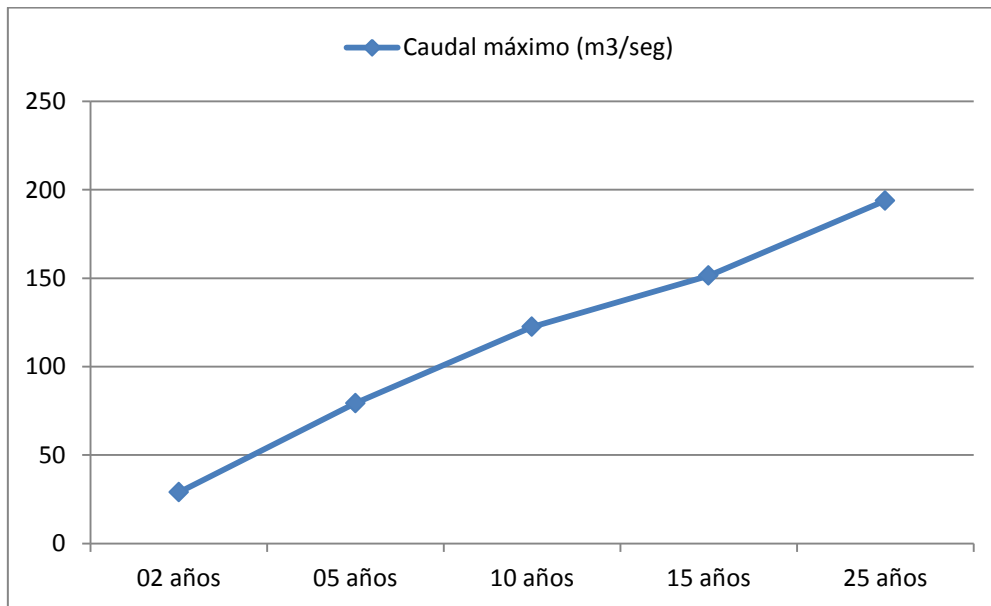


Figura 33. Caudales máximos determinados en la parte alta de la cuenca del río Sensunapán, para una duración de 150 minutos y periodos de retorno de 02, 05, 10, 15, y 25 años.

### **4.3. Georreferenciación de las comunidades de la cuenca del río Sensunapán**

En la cuenca del río Sensunapán, se encuentran ubicadas 510 familias y 16 comunidades urbanomarginales; todas las comunidades están situadas en el municipio de Sonsonate, departamento de Sonsonate. Asentamientos a las orillas de los tres ríos que cruzan el área urbana de Sonsonate (Sensunapán, Julupe, y Ceniza), tal como se muestra en la figura 11.

Las comunidades de mayor interés y que se lograron georreferenciar son las siguientes:

#### **4.3.1. Bendición de Dios**

La comunidad Bendición de Dios se encuentra entre las coordenadas: N 13° 43' 56.8"; W 89° 43' 44.3", con una elevación media de 275 msnm, está ubicada al final de la 4ª calle de la colonia San Genaro. Bendición de Dios limita al Norte con algunos terrenos utilizados para el cultivo de maíz, al Oriente con destacamento militar N° 6, al Poniente y al Sur con la colonia San Genaro. Está ubicada en la orilla poniente del cauce del Río Julupe.

#### **4.3.2. Peña Alta**

La comunidad Peña Alta se encuentra entre las Coordenadas: N 13° 43' 45.6"; W 89° 43' 41.1", con una elevación media de 258 msnm. Está ubicada en el Barrio Mejicanos, limita al Norte con el Destacamento Militar N° 6, al Sur con Río Julupe, al Oriente con la Colonia Atonal, al Poniente con Colonia San Genaro; Está ubicada a la orilla del Río Julupe.

#### **4.3.3. Río Julupe**

La comunidad río Julupe se encuentra entre las Coordenadas: N 13° 43' 35.6"; W 89° 43' 38.1", con una elevación media de 234 msnm. Está ubicada entre el Barrio Mejicanos y la Colonia El Pilar. Limita al Norte con Colonia Atonal, al Sur con Barrio El Pilar, al Oriente con Barrio Mejicanos y al Poniente con Comunidad Peña Alta.

La comunidad Río Julupe está ubicada en las riberas del río Julupe; de lo cual recibe su nombre; al norponiente de la Alcaldía Municipal de Sonsonate.

#### **4.3.4. San Juan de Dios**

La comunidad San Juan de Dios se encuentra entre las Coordenadas: N 13° 44' 5.9" W 89° 43' 8.1", con una elevación media de 260 msnm. Se encuentra inmediato al puente que

divide el municipio de Sonsonate con el municipio de Sonzacate, cercana a la colonia Altos del Río. Se ubica en la orilla del río Sensunapán.

#### **4.3.5. Las Palmeras**

La comunidad Palmeras se encuentra entre las Coordenadas: N 13° 43' 55.8"; W 89° 43' 7.1", con una elevación media de 263 msnm. Está ubicada en Urbanización Las Palmeras, limita al Norte con Colonia Altos del Río, al Sur con Universidad de Sonsonate, al Oriente con el río Sensunapán, al Poniente con Comunidad Santa María; esta comunidad está ubicada a las riberas del río Sensunapán.

#### **4.3.6. Oseas Perlas**

La comunidad Oseas Perla se encuentra entre las Coordenadas: N 13° 43' 41.9"; W 89° 43' 10.5", con una elevación media de 256 msnm. Se ubicada en el extremo oriente de la Colonia 14 de diciembre, limita al Norte con la colonia 14 de Diciembre y el río Sensunapán, al Oriente con el río Sensunapán, al Sur con el mismo río Sensunapán y con el Barrio Mejjicanos. Esta comunidad está ubicada en las orillas del cauce del Río Sensunapán.

#### **4.3.7. Río Bonito**

La comunidad Río Bonito se encuentra entre las Coordenadas: N13°43'26.90"; W89°43'17.40", con una elevación media de 229 msnm. Forma parte de la Comisión Comunal de Protección Civil del agrupamiento "Los Tres Ríos", la cual está conformada además por las comunidades Luces del Río y Brisas del Río." Estas están ubicadas entre la Colonia 14 de diciembre y la Colonia Monterío. Esta comunidad se ubica en las orillas del río Sensunapán; limita al Norte con la comunidad Oseas perla y la colonia 14 de Diciembre, al poniente con la colonia 14 de Diciembre, al Sur con la colonia 14 de Diciembre y el río Sensunapán y al Oriente con el río Sensunapán.

#### **4.3.8. Brisas del Río**

La comunidad Brisas del Río se encuentra entre las Coordenadas: N 13°43'26.90"; W 89°43'17.40", con una elevación media de 229 msnm. Forma parte del agrupamiento los "3 Ríos" está ubicada entre la colonia 14 de Diciembre y colonia Monterío; limita al Norte con Sonzacate, al Sur con la colonia Aida y Comunidad El Palmar, al Oriente con la colonia Monterío, y al Poniente con la colonia 14 de Diciembre. Esta comunidad mide 130 metros. Brisas del río está ubicada en la orilla oriente del río Sensunapán.

#### **4.3.9. Luces del Río**

La comunidad Luces del Río se encuentra entre las Coordenadas: N 13°43'26.90"; W 89°43'17.40", con una elevación media de 229 msnm. Forma parte de la Comisión Comunal de Protección Civil del agrupamiento "Los Tres Ríos", la cual está conformada además por las Comunidades Río Bonito y Brisas del Río. Estas están ubicadas entre la Colonia 14 de diciembre y la Colonia Monterío. Esta comunidad se ubica en las orillas del Río Sensunapán; limita al Norte con la comunidad Brisas del Río, al poniente con el Río Sensunapán y la comunidad Río Bonito, al Sur con la comunidad El Palmar.

#### **4.3.10. El Palmar**

La comunidad El Palmar se encuentra entre las Coordenadas: N 13°43'28.50"; W 89°43'20.70", con una elevación media de 280 msnm. Está ubicada al final de la Colonia Aida, limita al Norte, al Oriente y al Poniente con el Río Sensunapán, limita por el Sur con la Colonia Aida y la comunidad Luces del Río.

#### **4.3.11. Veracruz**

La comunidad Veracruz se encuentra entre las Coordenadas: N 13° 42' 58.10"; W 89° 43' 42.60", con una elevación media de 220 msnm. Forma parte de la Comisión Comunal de Protección Civil "Vega del río – Veracruz", limita al Norte con Barrio Veracruz, al Oriente y al Sur con el río Sensunapán, al Poniente con Mega Plaza.

#### **4.3.12. Vega del Río**

La comunidad Vega del Río se encuentra entre las Coordenadas: N 13° 42' 58.10"; W 89° 43' 42.60", con una elevación media de 220 msnm. Forma parte de la Comisión Comunal de Protección Civil "Vega del Río/Veracruz", la cual representa un agrupamiento más, debido a la escasa cantidad de viviendas en el caso de la comunidad Veracruz y la cercanía entre ambas.

Vega del río está ubicada en la orilla oriente del cauce del río Sensunapán; limita al Norte con la Colonia Providencia y el río mismo, al Sur con la Colonia Sensunapán II, al Oriente con la colonia La Providencia y al poniente con el río Sensunapán, en el municipio de Sonsonate, departamento de Sonsonate.



#### **4.3.13. Santa Marta**

Esta comunidad se encuentra entre las Coordenadas: N 13°42'17.00"; W 89°45'45.54", con una elevación media de 245 msnm; esta se caracteriza por ser un pequeño grupo de viviendas que están ubicadas al final de la tercera calle de la colonia Santa Marta, al oriente del municipio de Sonsonate, por su reducida población y la identificación de sus habitantes con la comunidad Bosques del Río, ha sido incorporada a la Comisión Comunal de Protección Civil de la comunidad Bosques del Río. Esta comunidad está ubicada en las riveras del Río Ceniza.

#### **4.3.14. Bosques del Río**

La comunidad Bosques del Río se encuentra entre las Coordenadas: N 13°42'17.00"; W 89°45'45.54", con una elevación media de 245 msnm. Forma parte de la Comisión Comunal de Protección Civil denominada con el mismo nombre y en la que también se ha incorporado el caserío ubicado al final de la tercera calle de la colonia Santa Marta. Bosques del Río ésta ubicada al final de la primer y segunda calle de la Colonia Santa Marta, que limita al Norte con la comunidad del final de la Tercera de la Santa Marta y la central de Izalco, al Sur con la Comunidad San José, al Oriente con Cantón Guisoyolate y al Poniente con Colonia Santa Marta. Está ubicada en ambas orillas del río Ceniza.

#### **4.4. Modelación hidráulica**

La modelización con el software HEC – RAS 4.1.0, permitió calcular para las diferentes configuraciones de caudales en cada una de las secciones transversales a lo largo de los dos tramos ubicados en las comunidades Vega del Río y El Palmar, estudiados del cauce del río Sensunapán; valores simulados de los niveles de agua, las profundidades de flujo y las velocidades, entre otras variables. La simulación se realizó considerando el “tramoalto” desde la comunidad El Palmar (Cód.: 1269.804) (figura 35), hasta el “tramobajo” ubicada en la comunidad Vega del Río (Cód.: 10.30199) (figura 36). Se trabajó todo el tramo en uno solo, sin división alguna, con el objeto de una mejor manipulación y facilidad en la computación a través de la ejecución del modelo. Por las características de la cuenca hidrográfica del río Sensunapán en cuanto a Geología, Geomorfología y su cobertura vegetal, se seleccionaron coeficientes de rugosidad de Manning que varían entre 0.04 para los costados y 0.03 para el cauce del río (ver imagen 22).

#### 4.4.1. Análisis de resultados para un periodo de retorno de dos años

##### 4.4.1.1. Sección transversal: El Palmar

La sección transversal mostrada en la figura 34, corresponde a la comunidad El Palmar, donde se puede apreciar que el tirante del flujo está por debajo de la línea de energía; además, el número de Froude es de 0.37, lo que nos indica que el régimen del flujo es sub crítico, determinando que el comportamiento del flujo está sometido solamente por la inercia de su propio peso.

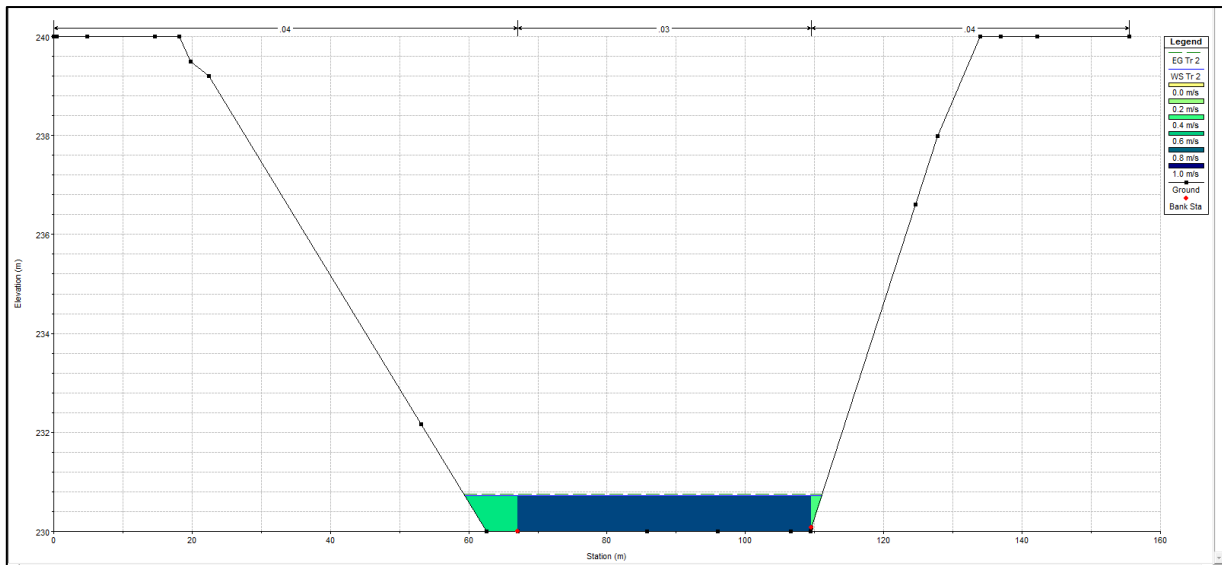


Figura 34. Sección transversal de la Comunidad El Palmar

##### 4.4.1.2. Sección transversal: Vega del Río

La sección mostrada en la figura 35, corresponde a la comunidad Vega del Río y se logra observar que el tirante del flujo se encuentra a la misma elevación del tirante crítico, caracterizando el flujo del agua en esta sección como flujo crítico; lo que nos indica que se está ante una situación en donde se generan las condiciones para que se produzca la turbulencia; sin embargo, el número de Froude establece que el régimen del flujo es súper crítico, al ser este un valor superior a la unidad (1.13). Tomando a consideración la sección anterior, el flujo ha venido bajando en su nivel, de tal manera que se generan las condiciones para que exista socavación por la velocidad que va adquiriendo y pueda ocurrir la existencia de socavación en el cauce.

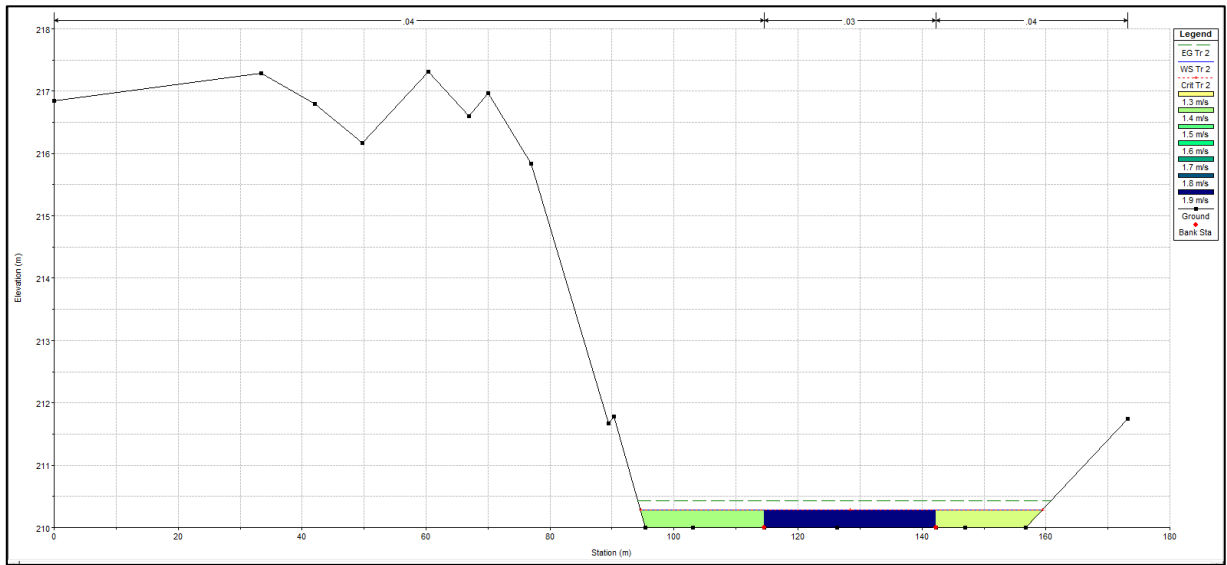


Figura 35. Sección transversal de la Comunidad Vega del Río

Cuadro 21. Representación de las secciones transversales para periodo de retorno de dos años

Station	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
1269.804	46.10	230.90		230.95	1.10	0.37
10.30199	46.10	210.39	210.39	210.58	2.21	1.13

Fuente: elaboración propia, 2014

Cuadro 22. Criterios de clasificación del régimen de flujo en canales abiertos.

Sección	Numero de Froude (adimensional)		
	Régimen: Súper Crítico (F > 1)	Régimen: Crítico (F = 1)	Régimen: Sub Crítico (F < 1)
1269.804			0.37
10.30199	1.13		

Fuente: elaboración propia, 2014

#### 4.4.1.3. Perfil longitudinal del flujo

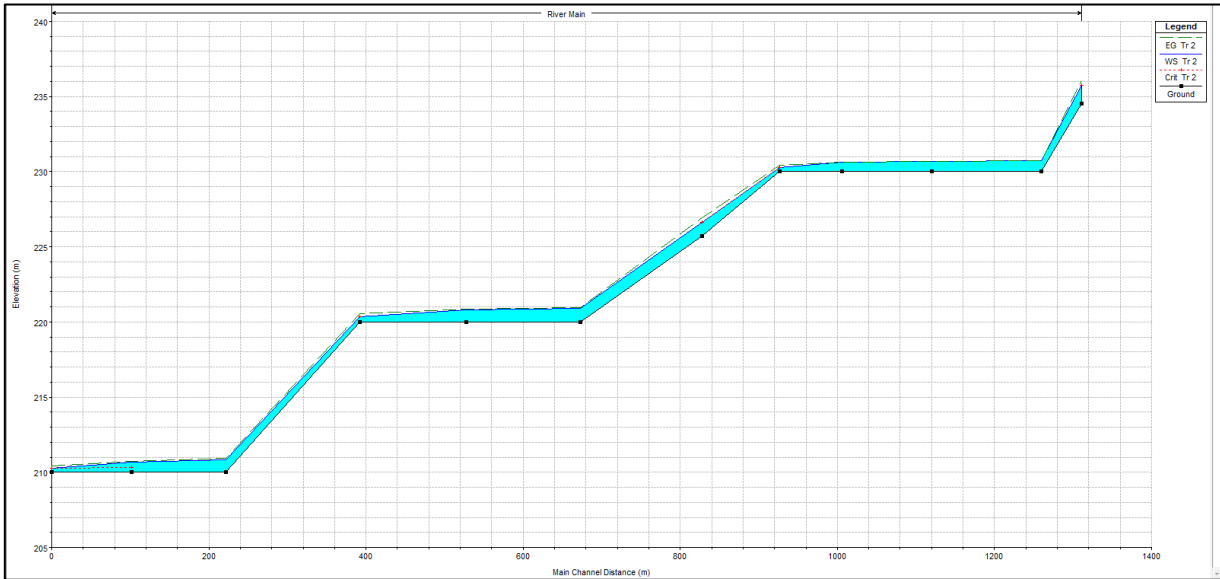


Figura 36. Perfil longitudinal del flujo, para un periodo de retorno de 2 años.

El perfil longitudinal del cauce mostrada en la figura 36, nos indica que en la sección transversal 1269.804 donde se encuentra ubicada la comunidad El Palmar, no representa mayor riesgo a socavaciones en su cauce en un periodo de retorno de 2 años; esto debido a que la línea de energía, así como el tirante del flujo no se encuentran distantes uno respecto al otro.

En la comunidad Vega del Río, situada en la sección transversal 10.30199, se presenta un mayor riesgo a socavaciones del cauce en un periodo de retorno de 2 años, debido a que el flujo en la sección 112.1009 (aguas arriba), hasta la comunidad, tiene un régimen de flujo de sub crítico a crítico, con la posibilidad de que exista algún resalto hidráulico.

#### 4.4.1.4. Zonas de inundación

Las imágenes 37 y 38, representan el nivel de alcance en cuanto a precipitaciones o lluvias de diseño para un periodo de retorno de dos años.

Tanto las comunidades El Palmar, situada aguas arriba, como la comunidad Vega del Río, ubicada aguas abajo, presentan vulnerabilidad a inundaciones para un periodo de retorno de dos años y un caudal máximo de 46.10 m<sup>3</sup>/s.





Figura 37. Límite de inundación de las secciones en estudio



Figura 38. Zonas de inundacion





Figura 39. Límite de inundación de la comunidad El Palmar

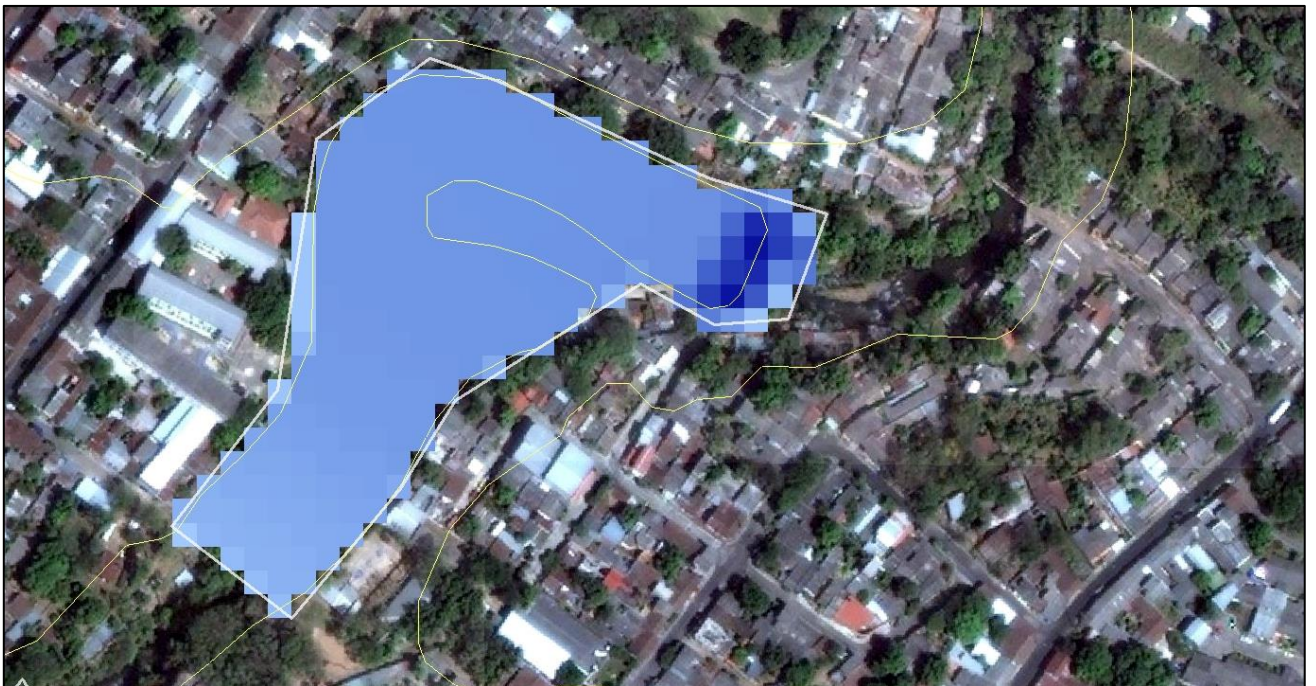


Figura 40. Áreas de inundación de la comunidad El Palmar





Figura 41. Límite de inundaciones de la comunidad Vega del Río

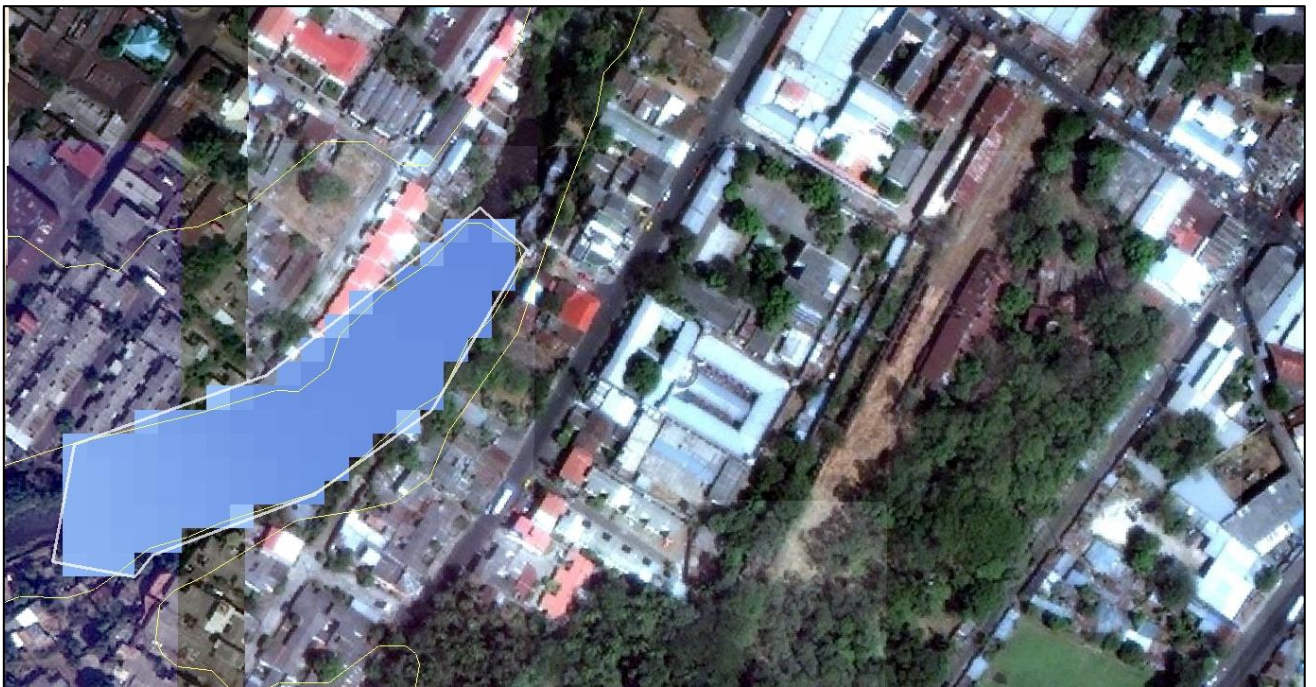


Figura 42. Áreas inundadas en la comunidad Vega del Río

## 4.4.2. Análisis de resultados para un periodo de cinco años

### 4.4.2.1. Sección transversal: El Palmar

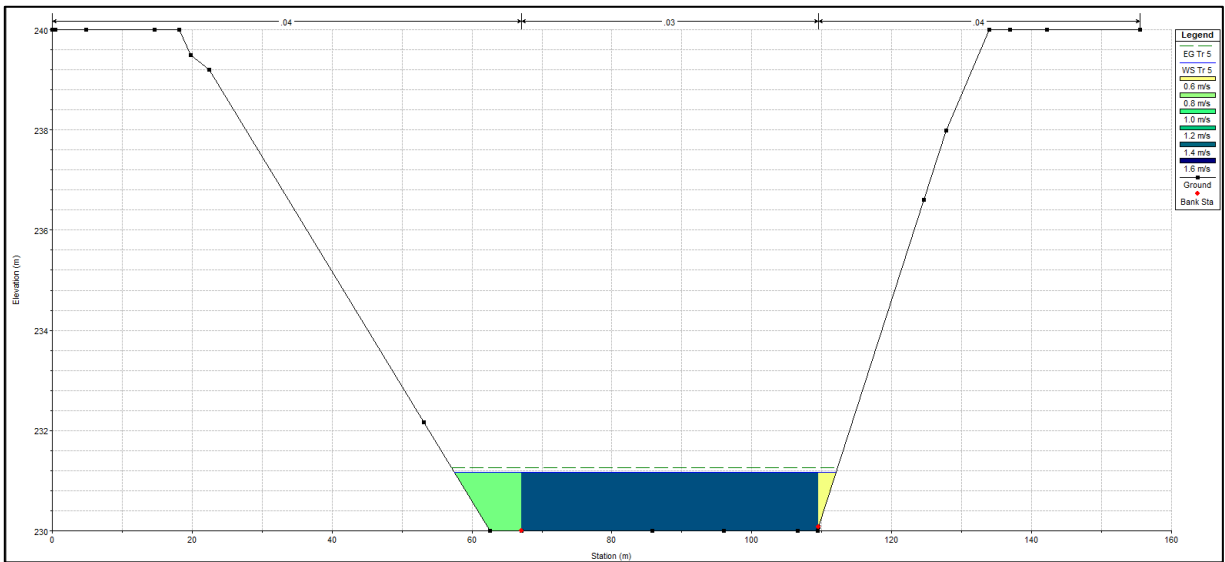


Figura 43. Sección transversal de la comunidad El Palmar

La figura 43 corresponde a la sección transversal de la comunidad El Palmar, nos indica que se está ante un régimen del flujo sub crítico, con un número de Froude de 0.49; en este caso, el movimiento del flujo se rige solamente bajo su propio peso y por lo tanto, las velocidades del flujo estables.

### 4.4.2.2. Sección transversal: Vega del Río

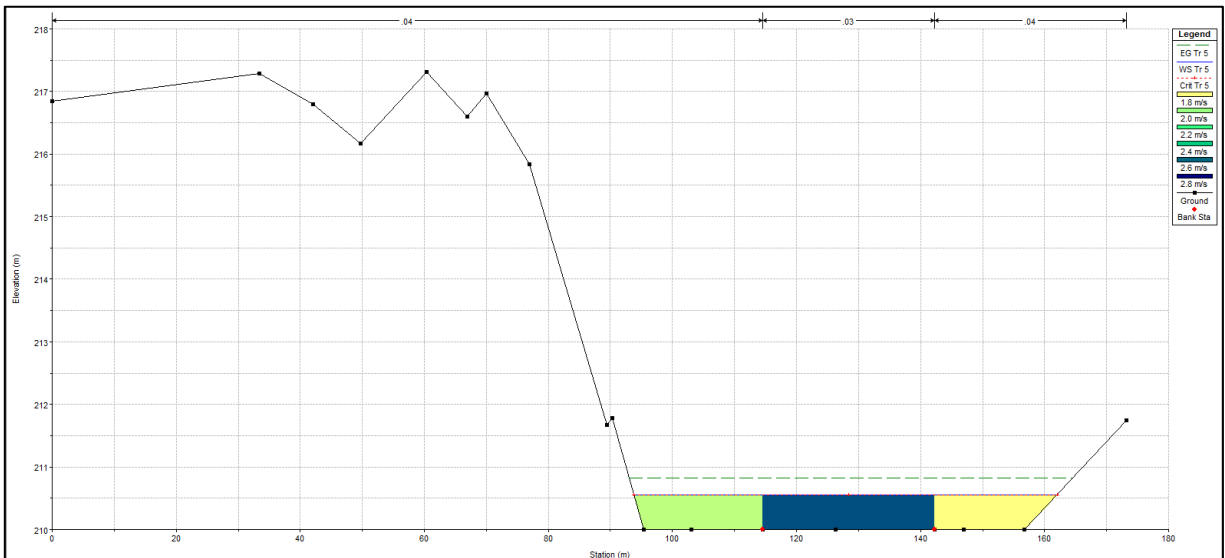


Figura 44. Sección transversal de la comunidad Vega del Río



En la figura 44 se muestra el resultado obtenido de la comunidad Vega del Río, donde se presencia un régimen del flujo súper crítico,; el número de Froude es de 1.13 y por tal razón, la velocidad es mayor debido a la condiciones aguas arriba donde se genera una fuerza de empuje. Acá se dan las condiciones necesarias para que exista socavación en el cauce del río, lo que se traduce en un impacto negativo para la comunidad.

Cuadro 23. Representación de las secciones transversales para periodo de retorno de cinco años

Station	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
1269.804	126.28	231.45		231.61	1.83	0.49
10.30199	126.28	210.75	210.75	211.12	3.08	1.13

Fuente: elaboración propia, 2014

Cuadro 24. Criterios de clasificación del régimen de flujo en canales abiertos.

Sección	Numero de Froude (adimensional)		
	Régimen: Súper Crítico (F > 1)	Régimen: Crítico (F = 1)	Régimen: Sub Crítico (F < 1)
1269.804			0.49
10.30199	1.13		

Fuente: elaboración propia, 2014

#### 4.4.2.3. Perfil longitudinal del flujo

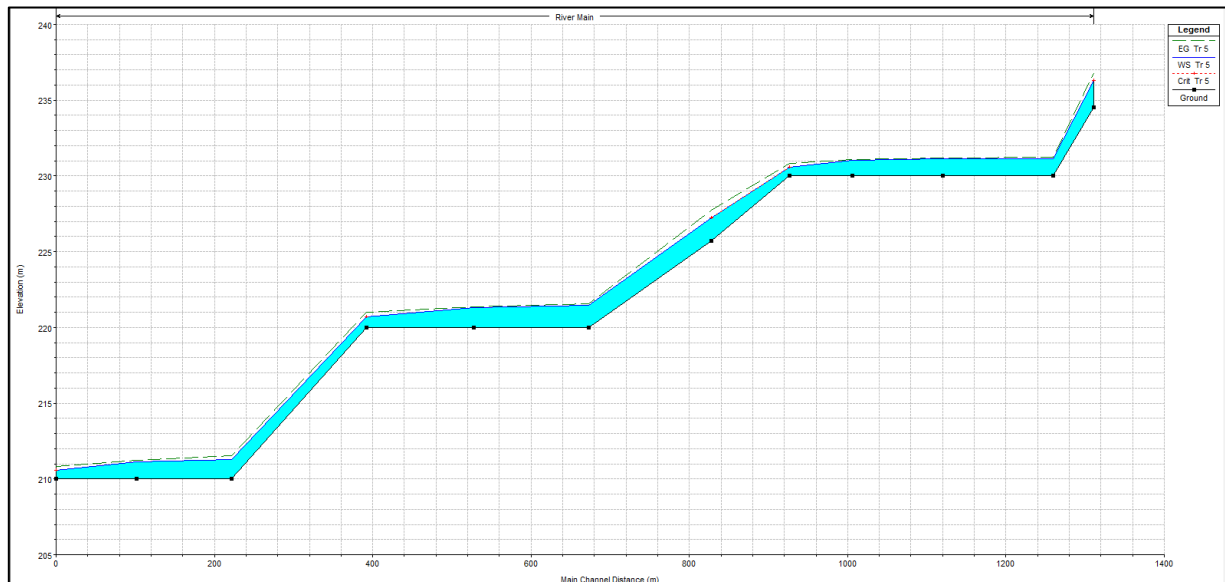


Figura 45. Perfil del flujo para un periodo de cinco años

El perfil longitudinal del flujo mostrado en la figura 45, indica que existe una tendencia de socavación en la comunidad Vega del Río, a medida aumenta el caudal del flujo, así como su velocidad para un periodo de retorno de 5 años, tomando en cuenta que el régimen del flujo es súper crítico con velocidad media de 3.08 m/s.

#### 4.4.2.4. Zonas de inundación

Las imágenes 46 y 47, muestran que la vulnerabilidad de las comunidades El Palmar y Vega del Río, es alta para un periodo de retorno de años y un caudal máximo de diseño de 126.28 m<sup>3</sup>/s.

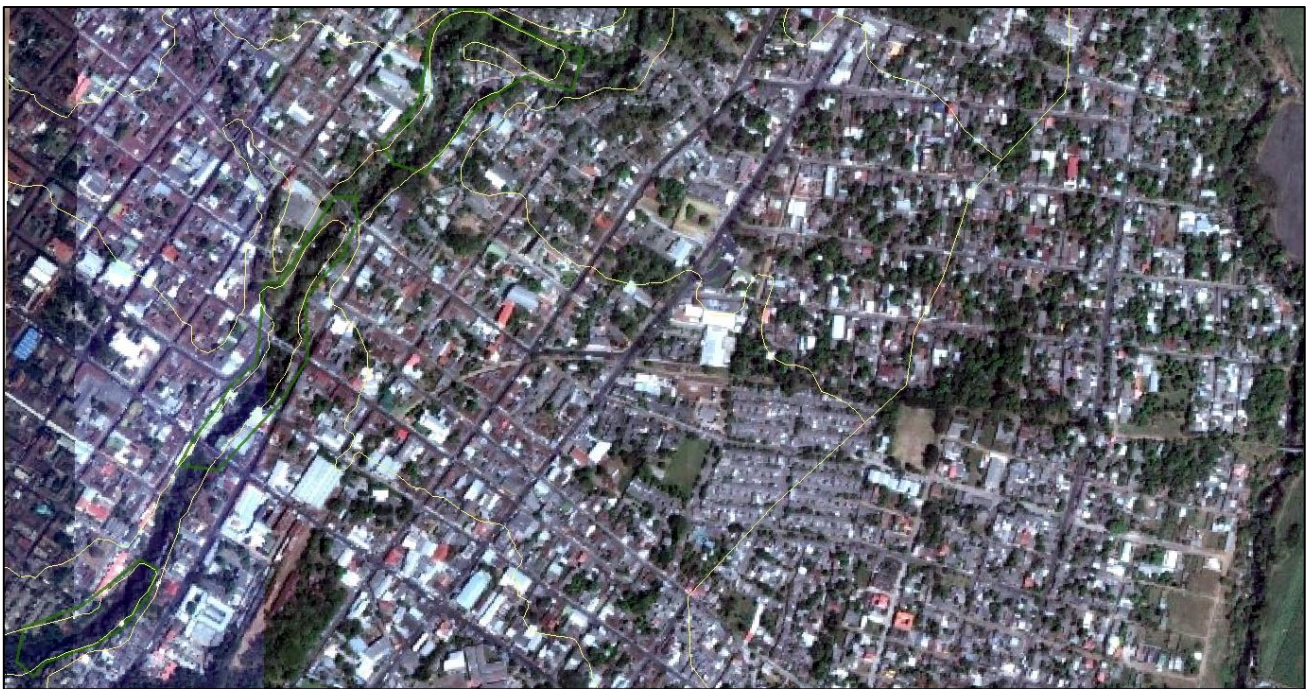


Figura 46. Límite de inundación de las secciones en estudio



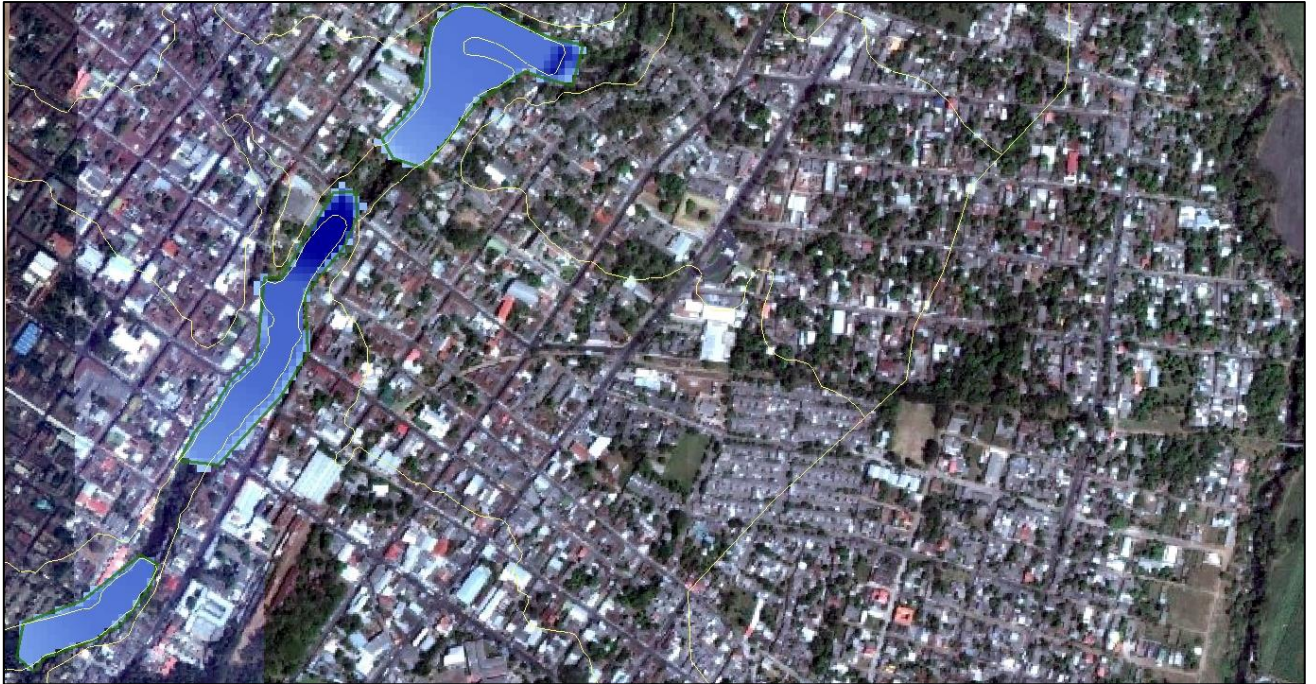


Figura 47. Zonas de inundación



Figura 48. Límite de inundación de la comunidad El Palmar





Figura 49. Áreas de inundación de la comunidad El Palmar



Figura 50. Límite de inundaciones de la comunidad Vega del Río





Figura 51. Áreas inundadas en la comunidad Vega del Río

#### 4.4.3. Análisis de resultados para un periodo de 10 años

##### 4.4.3.1. Sección transversal: El Palmar

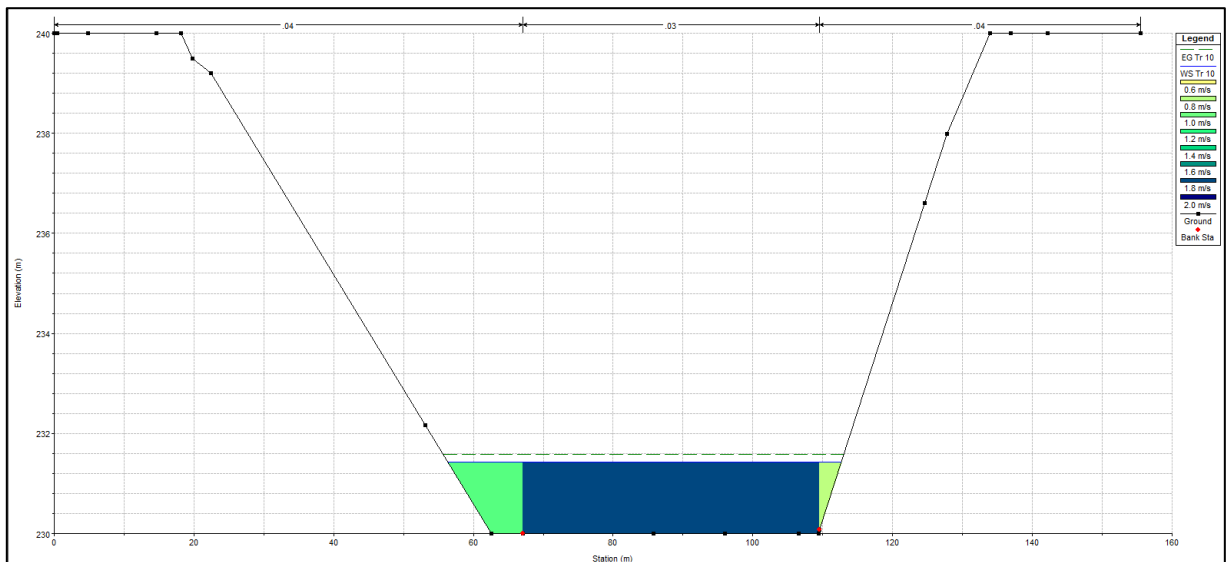


Figura 52. Sección transversal de la comunidad El Palmar

La figura 52 muestra la sección 1269.804, la cual se encuentra ubicada en la comunidad El Palmar, cuyo régimen de flujo es sub crítico, con un número de Froude de 0.49; ante este caso, se establece que las velocidades del flujo son menores, pero el tirante es mayor; es decir, el flujo va por su propio peso.

#### 4.4.3.2. Sección transversal: Vega del Río

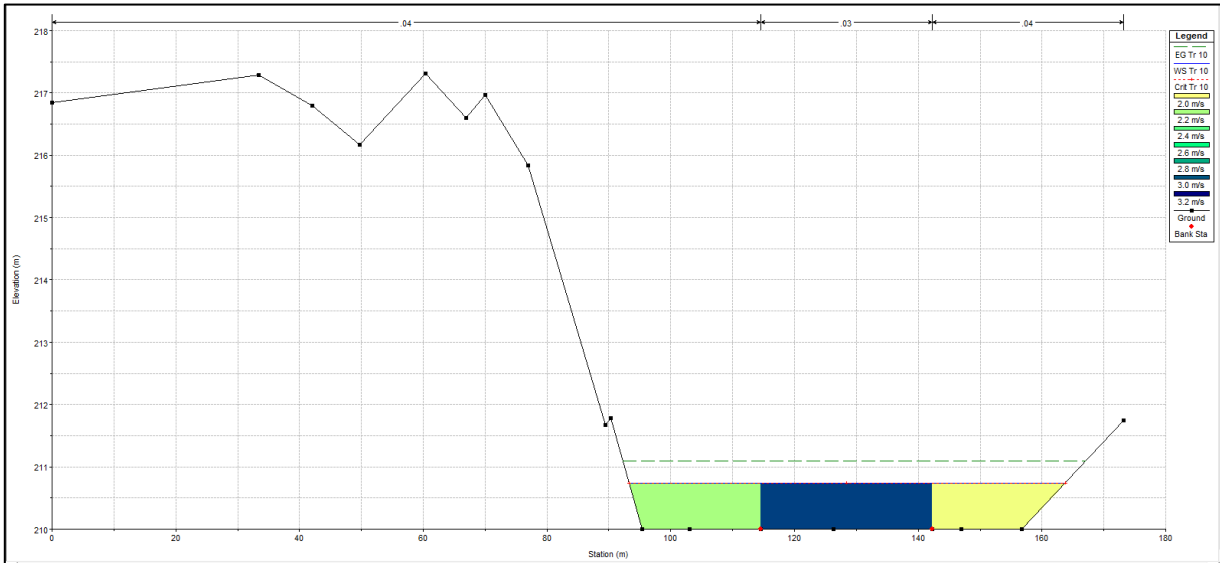


Figura 53. Sección transversal de la comunidad Vega del Río

La figura 53 hace referencia a la sección 10.30199 de la comunidad Vega del Río, la cual determina que existe un flujo que posee la misma cota del tirante crítico y un número de Froude de 1.13; el régimen del flujo se caracteriza por ser crítico, con una velocidad media de 3.55 m/s, lo que establece la existencia de socavación en el cauce.

Cuadro 25. Representación de las secciones transversales para periodo de retorno para diez años.

Station	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
1269.804	195.12	231.78		232.02	2.28	0.55
10.30199	195.12	211.00	211.00	211.09	3.55	1.13

Fuente: elaboración propia, 2014

Cuadro 26. Criterios de clasificación del régimen de flujo en canales abiertos.

Sección	Numero de Froude (adimensional)		
	Régimen: Súper Crítico (F > 1)	Régimen: Crítico (F = 1)	Régimen: Sub Crítico (F < 1)

1269.804			0.55
10.30199	1.13		

Fuente: elaboración propia, 2014

#### 4.4.3.3. Perfil longitudinal del flujo

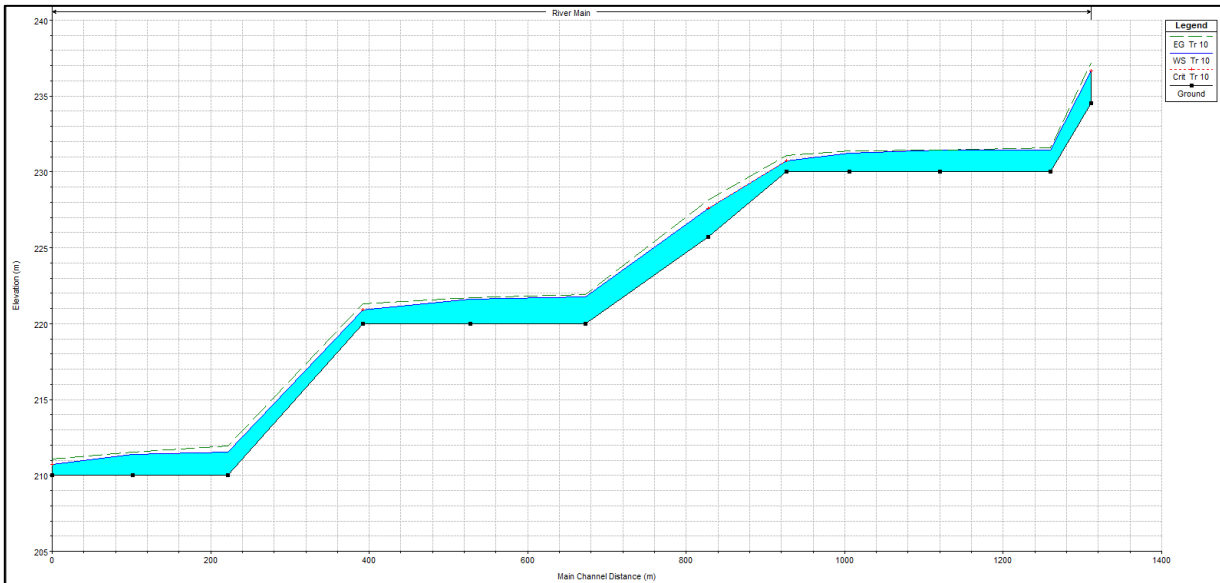


Figura 54. Perfil longitudinal del flujo para un periodo de retorno de diez años

La figura 54 muestra el perfil longitudinal del flujo, el cual indica que una sección antes de la comunidad Vega del Río, existe un régimen del flujo sub crítico, y este pasa a ser un flujo crítico en la zona de los habitantes; generándose una mayor velocidad del flujo, siendo esta de 3.55 m/s y que a su vez disminuye su tirante; pero, sin la presencia de algún resalto hidráulico; solo la existencia de una mayor socavación por parte del caudal; sin embargo, en la comunidad El Palmar, en su sección transversal 1269.804, se puede apreciar que el régimen del flujo es sub crítico; es decir, las velocidades del flujo son menores; pero, el tirante es mayor.

#### 4.4.3.4. Zonas de inundación

Las imágenes 55 y 56 demuestran que la vulnerabilidad de los habitantes de la comunidad El Palmar y Vega del Río, ante una inundación para un periodo de retorno de 10 años y un caudal máximo de 195.12 m<sup>3</sup>/s, es alta.



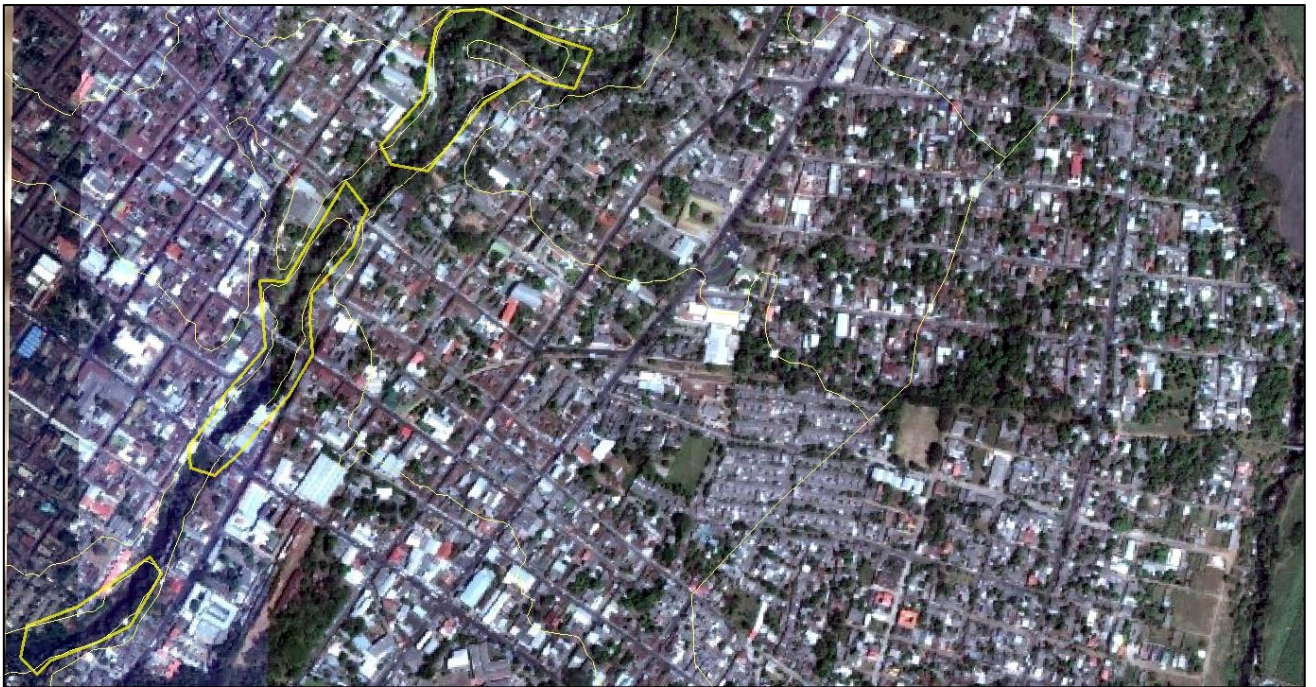


Figura 55. Límite de inundación de las secciones en estudio



Figura 56. Zonas de inundación





Figura 57. Límite de inundación de la comunidad El Palmar

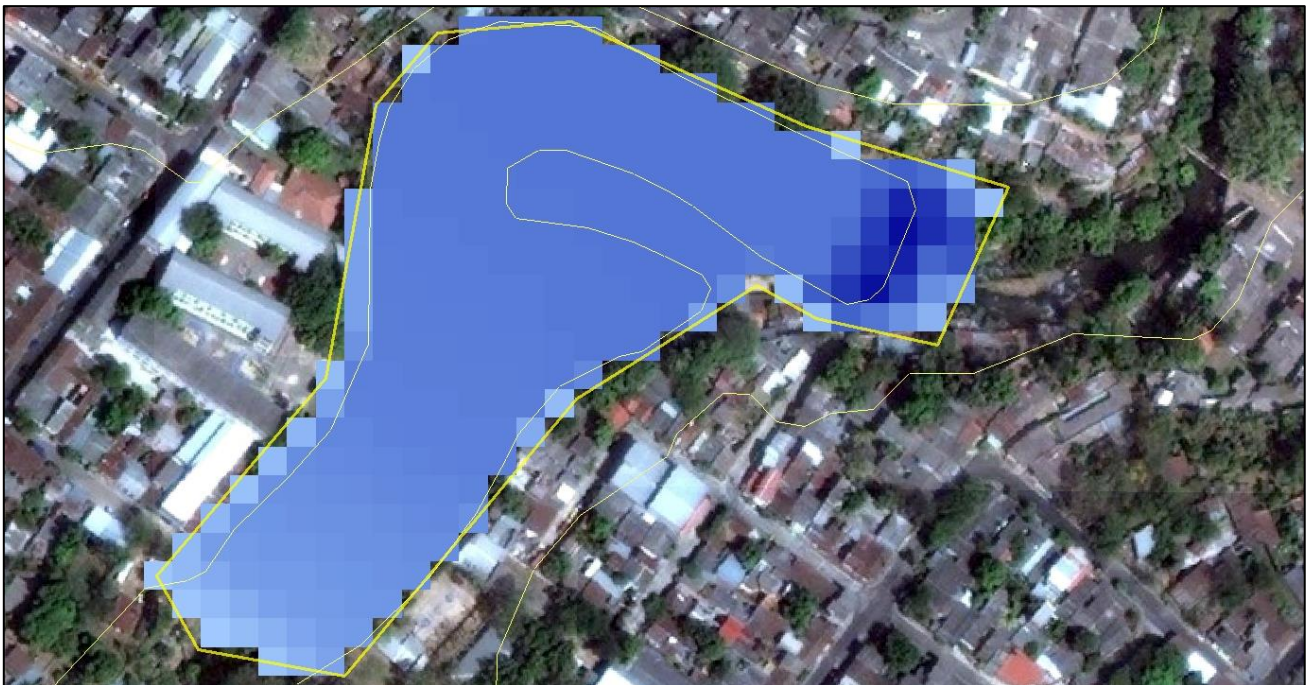


Figura 58. Áreas de inundación de la comunidad El Palmar





Figura 59. Límite de inundaciones de la comunidad Vega del Río



Figura 60. Áreas inundadas en la comunidad Vega del Río

#### 4.4.4. Análisis de resultados para un periodo de 15 años

##### 4.4.4.1. Sección transversal: El Palmar

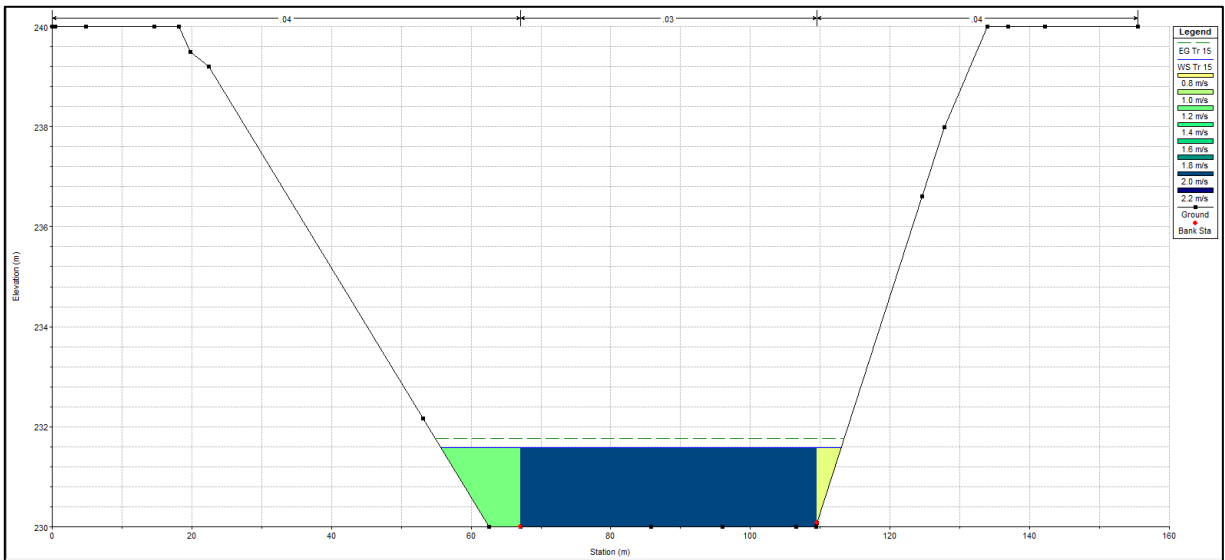


Figura 61. Sección transversal de la comunidad El Palmar

La figura 61 corresponde a la sección transversal 1269.804, donde se haya ubicada la comunidad El Palmar y se observa que el régimen del flujo es sub crítico, con un numero de Froude de 0.58; es decir, el tirante es mayor y el flujo viaja por su propio peso. En base a lo anterior, la presencia de socavación del cauce es muy reducida.

##### 4.4.4.2. Sección transversal: Vega del Río

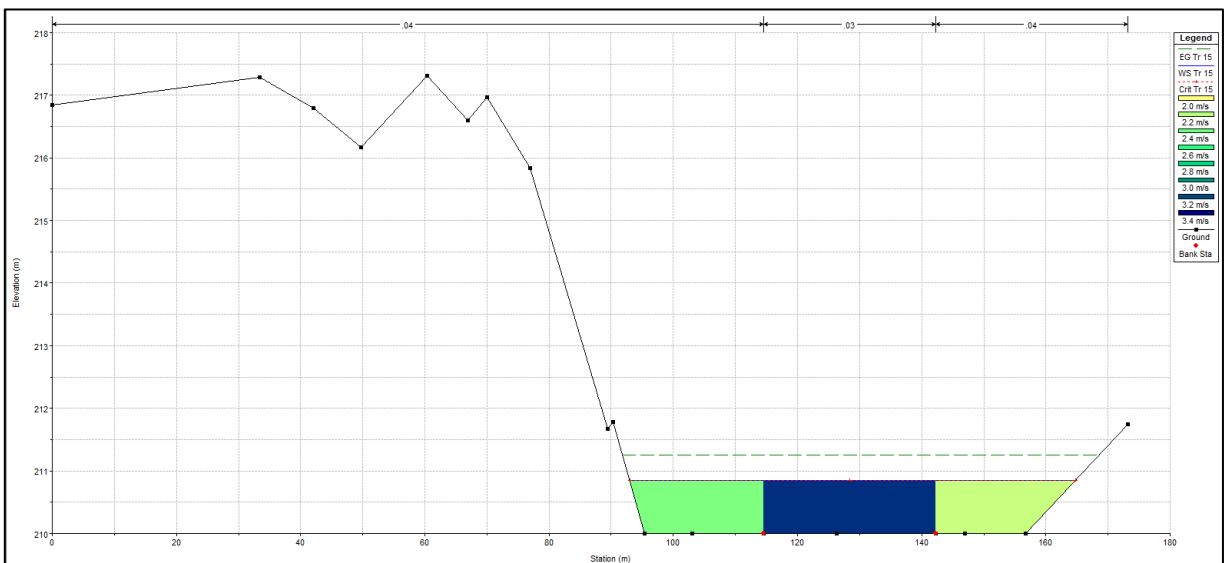


Figura 62. Sección transversal de la comunidad Vega del Río

La figura 62 muestra la sección transversal correspondiente a la comunidad Vega del Río, la cual presenta en base a los datos de modelación, un régimen del flujo crítico; debido a que el tirante del flujo y el tirante crítico poseen la misma cota. Por otra parte, el número de Froude es de 1.13, lo que determina que la velocidad del flujo es demasiado alta, generando socavación en el cauce donde se encuentra ubicada la comunidad.

Cuadro 27. Representación de las secciones transversales para un periodo de retorno de 15 años

Station	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
1269.804	241.23	231.96		232.26	2.54	0.58
10.30199	241.23	211.15	211.15	211.69	3.80	1.13

Fuente: elaboración propia, 2014

Cuadro 28. Criterios de clasificación del régimen de flujo en canales abiertos.

Sección	Numero de Froude (adimensional)		
	Régimen: Súper Crítico (F > 1)	Régimen: Crítico (F = 1)	Régimen: Sub Crítico (F < 1)
1269.804			0.58
10.30199	1.13		

Fuente: elaboración propia, 2014

#### 4.4.4.3. Perfil longitudinal del flujo

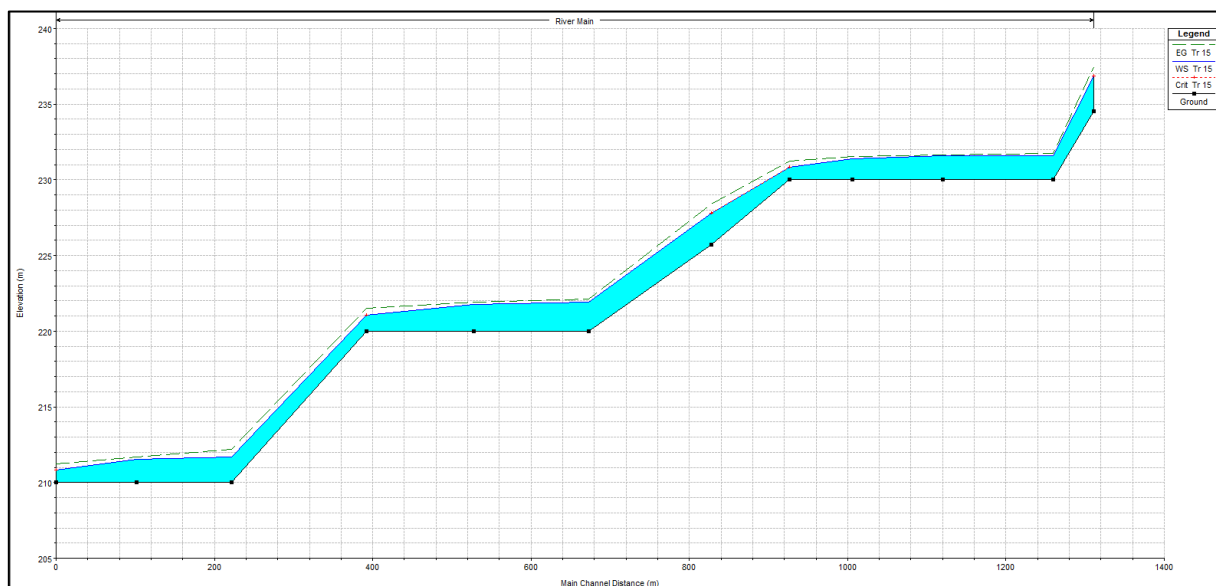


Figura 63. Perfil longitudinal del flujo para un periodo de 15 años



La figura 63 muestra el perfil del flujo, el cual indica que en la comunidad El Palmar no se haya mayor riesgo a socavación del cauce; esto determina que el tirante del flujo es mayor y por lo tanto, también las fuerzas inerciales.

En la comunidad Vega del Río, se establece que existe una elevada vulnerabilidad en cuanto a socavación del cauce del río, lo cual puede generar problemas a los habitantes de la zona, tomando en cuenta que la velocidad media del flujo es de 3.80 m/s con un régimen del flujo crítico.

#### **4.4.4.4. Zonas de inundación para un periodo de retorno de 15 años**

Las imágenes 64 y 65 corresponden a las comunidades El Palmar y Vega del Río, las cuales según la modelación hidráulica, establece que para un periodo de retorno de 15 años y un caudal máximo de 241.23 m<sup>3</sup>/s, tiene una elevada vulnerabilidad a inundaciones.

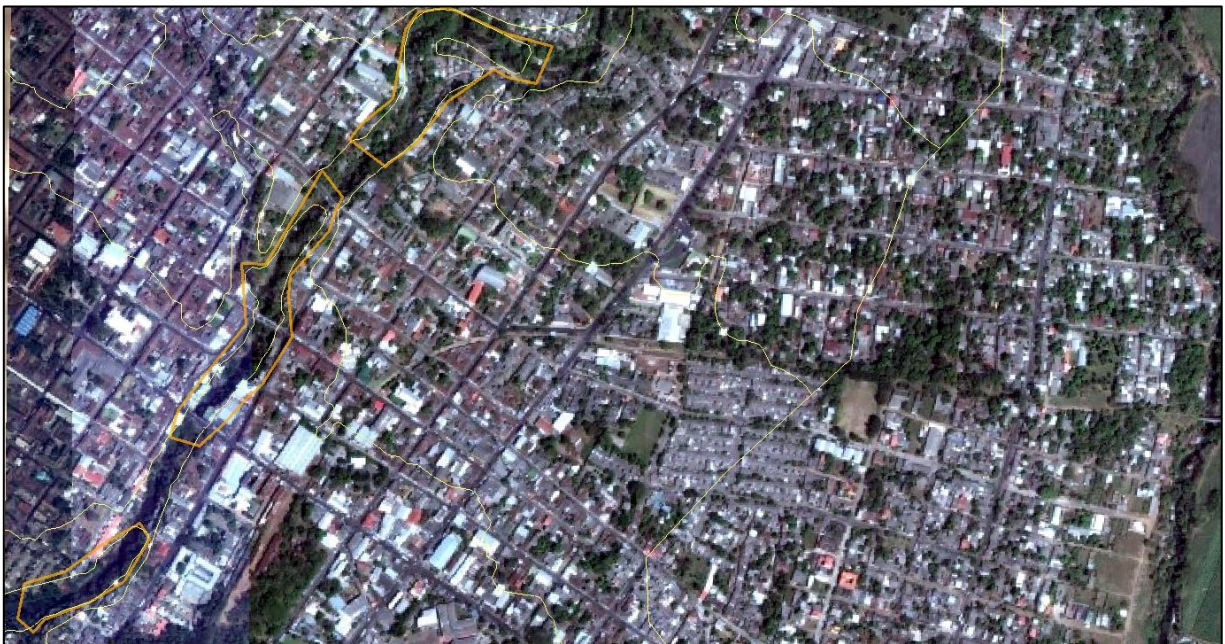


Figura 64. Límite de inundación de las secciones en estudio



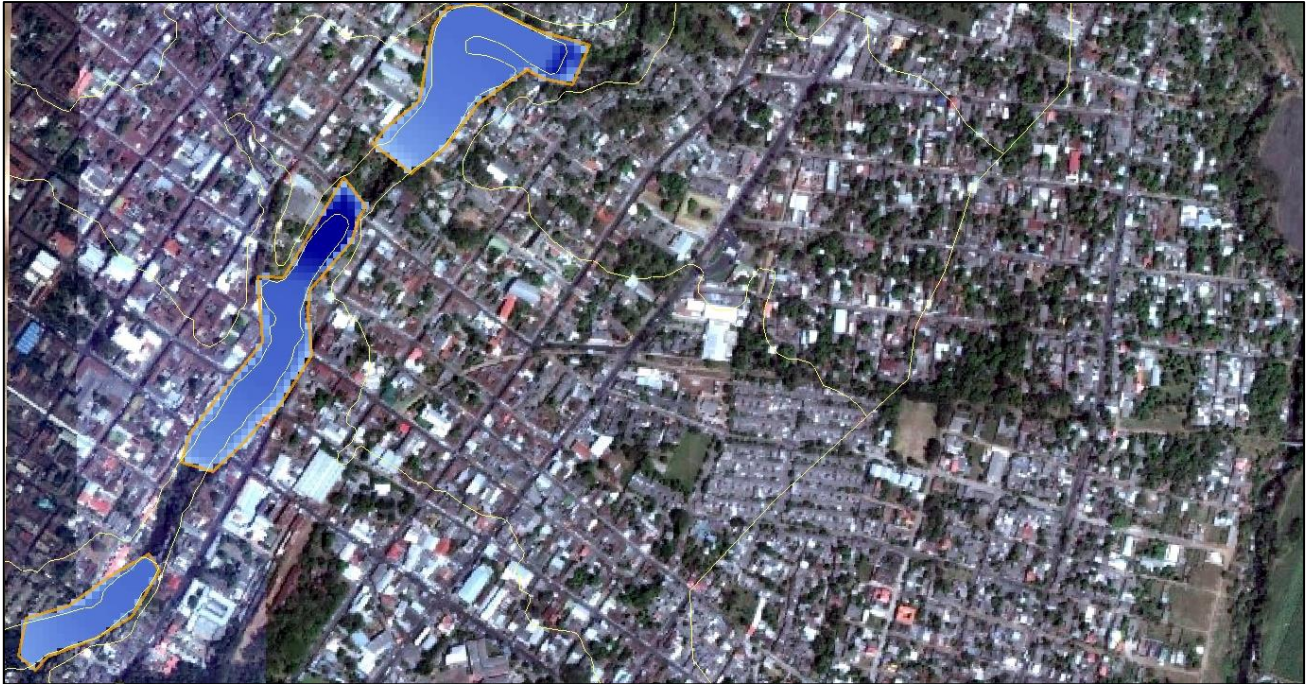


Figura 65. Zonas de inundación



Figura 66. Límite de inundación de la comunidad El Palmar



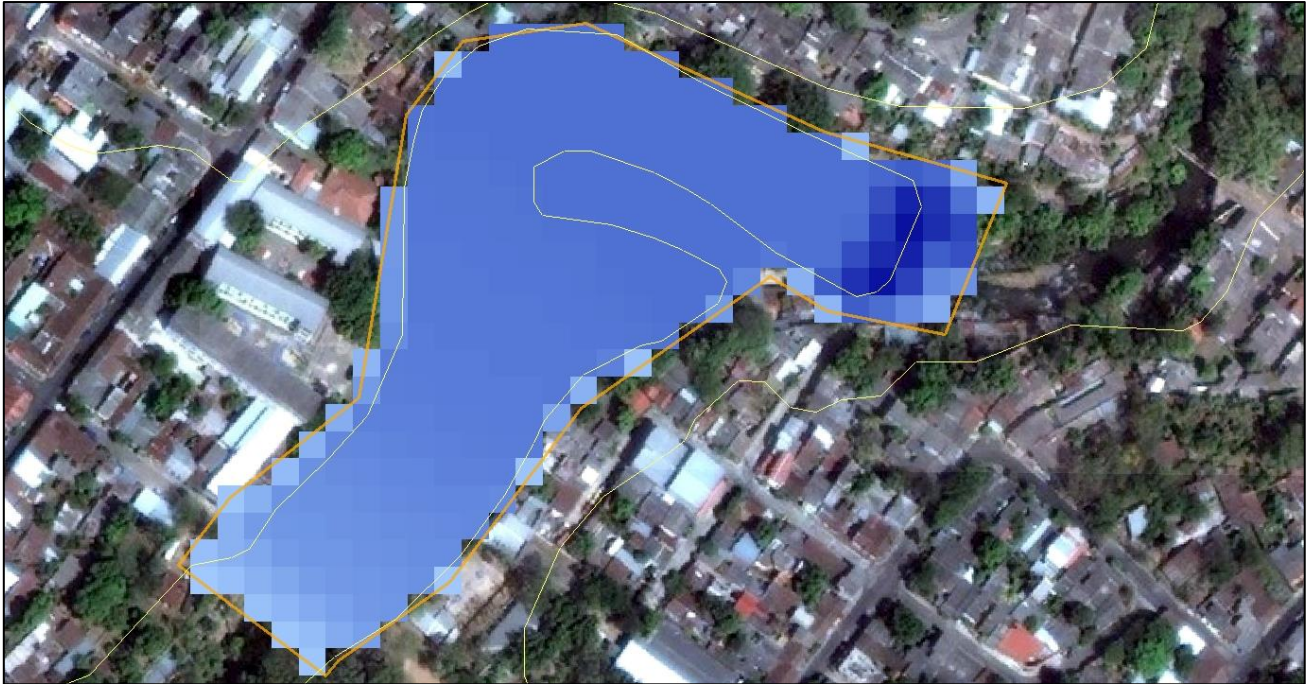


Figura 67. Áreas de inundación de la comunidad El Palmar



Figura 68. Límite de inundaciones de la comunidad Vega del Río



Figura 69. Áreas inundadas en la comunidad Vega del Río

#### 4.4.5. Análisis de resultados para un periodo de 25 años

##### 4.4.5.1. Sección transversal: El Palmar

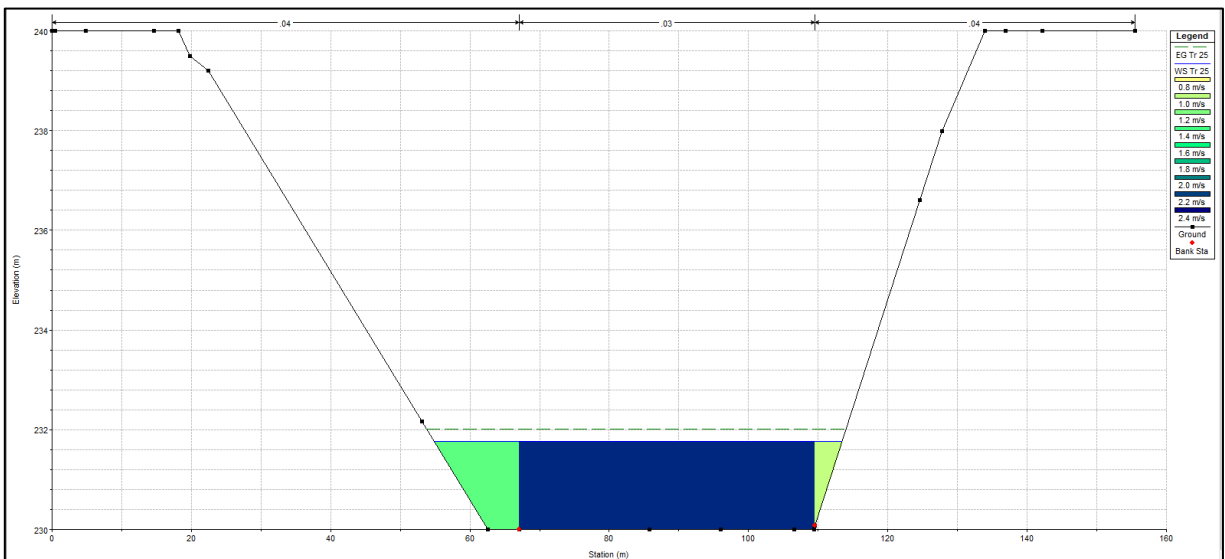


Figura 70. Sección transversal de la comunidad El Palmar

La figura 70 corresponde a la sección transversal de la comunidad El Palmar, la cual presenta un régimen de flujo sub crítico, con un número de Froude de 0.62 y una velocidad media del flujo de 2.89 m/s; estableciendo de esta manera que las velocidades del flujo son



menos y que el tirante es mayor; es decir, que el flujo viaja por su propio peso. Las posibilidades de socavación están a expensas de aguas arriba con la existencia de algún resalto hidráulico.

#### 4.4.5.2. Sección transversal: Vega del Río

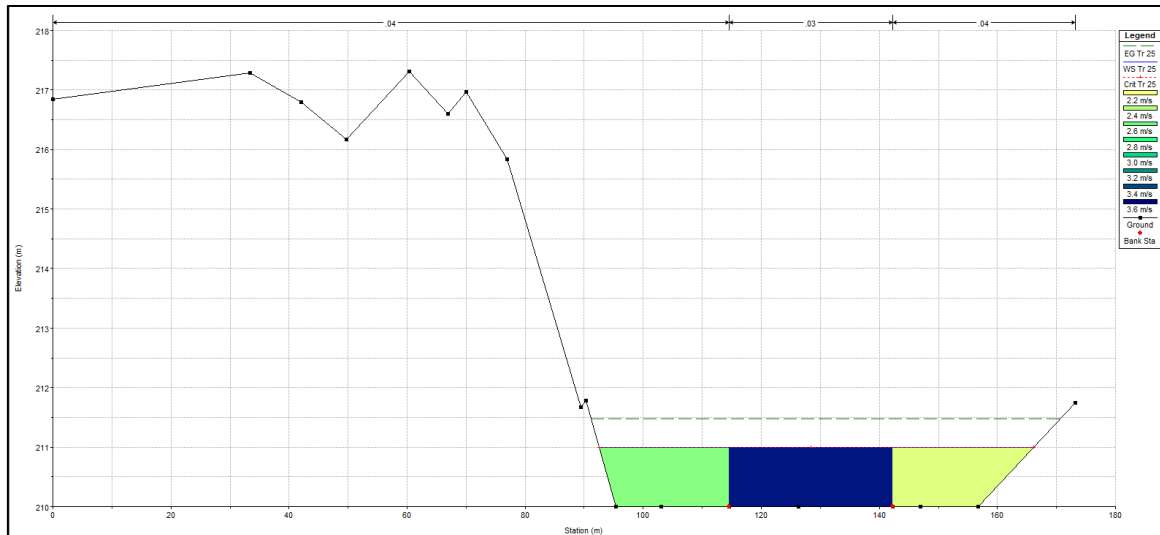


Figura 71. Sección transversal de la comunidad Vega del Río

La figura 71 muestra a la sección transversal establecida en la comunidad Vega del Río, la cual presenta un régimen de flujo crítico; es decir, se están dando las condiciones para que exista una turbulencia en el flujo. Además, se puede notar que el número de Froude es de 1.13, lo cual lo caracteriza con una tendencia en la que la velocidad del caudal es mayor, siendo esta de 4.11 m/s, con mayores posibilidades de socavación del cauce.

Cuadro 29. Representación de las secciones transversales para periodo de retorno de 25 años

Station	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
1269.804	308.79	232.20		232.58	2.89	0.62
10.30199	308.79	211.35	211.35	211.97	4.11	1.13

Fuente: elaboración propia, 2014

Cuadro 30. Criterios de clasificación del régimen de flujo en canales abiertos.

Sección	Numero de Froude (adimensional)		
	Régimen: Súper Crítico (F > 1)	Régimen: Critico (F = 1)	Régimen: Sub Crítico (F < 1)
1269.804			0.62

10.30199	1.13		
----------	------	--	--

Fuente: elaboración propia, 2014

**4.4.5.3. Perfil longitudinal del flujo**

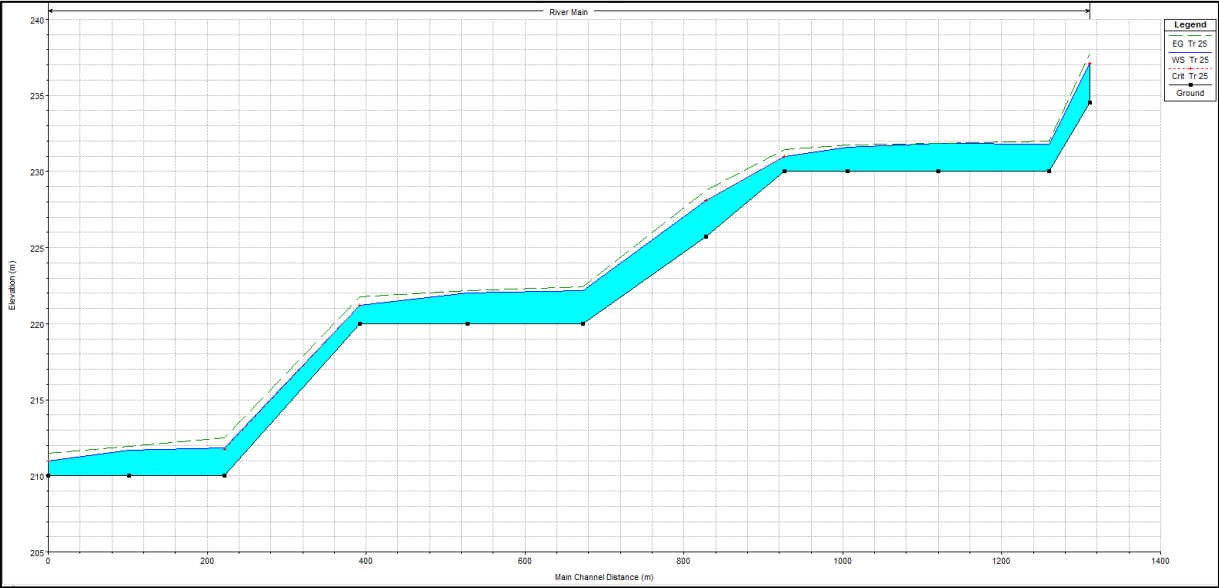


Figura 72. Perfil longitudinal del flujo para un periodo de retorno de 15 años

La figura 72 muestra el perfil longitudinal del flujo, el cual indica que en la comunidad El Palmar presenta una variación en la cota del flujo; es decir, hay ciertas posibilidades de que exista un resalto hidráulico; no obstante, en la sección transversal donde está ubicada la comunidad Vega del Río, se presenta un flujo con mayor velocidad, provocando socavación en el cauce.

**4.4.5.4. Zonas de inundación**

Las imágenes presentadas a continuación, establecen los límites de vulnerabilidad e inundación para la comunidad El Palmar y Vega del Río, para un periodo de retorno de 25 años y un caudal máximo de 308.79 m<sup>3</sup>/s.



Figura 73. Límite de inundación de las secciones en estudio



Figura 74. Zonas de inundación de la comunidad El Palmar y Vega del Río





Figura 75. Límite de inundación de la comunidad El Palmar

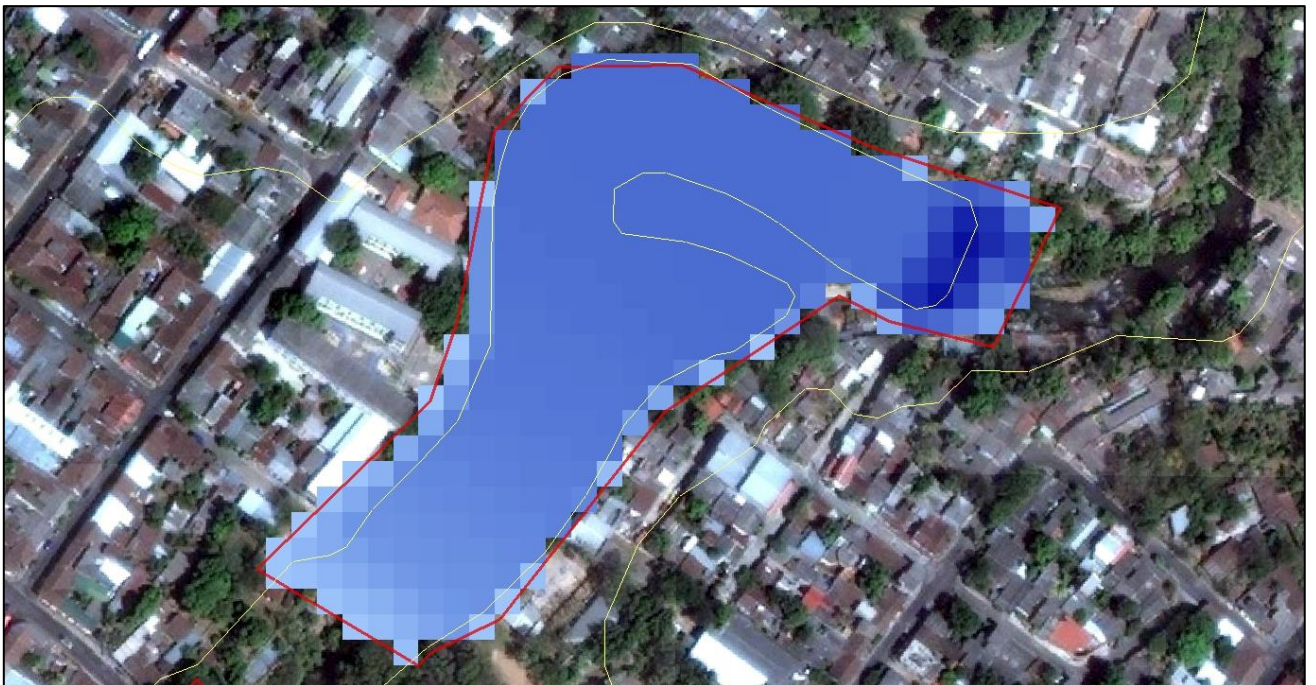


Figura 76. Áreas de inundación de la comunidad El Palmar





Figura 77. Límite de inundaciones de la comunidad Vega del Río



Figura 78. Áreas inundadas en la comunidad Vega del Río

Cuadro 31. Régimen del flujo y número de Froude para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15 y 25 años.

Estación	Periodo de retorno														
	2 años			5 años			10 años			15 años			25 años		
	F>1	F=1	F<1	F>1	F=1	F<1	F>1	F=1	F<1	F>1	F=1	F<1	F>1	F=1	F<1
1269.804			0.37			0.49			0.55			0.58			0.62
10.30199	1.13			1.13			1.13			1.13			1.13		

Fuente: elaboración propia, 2014

Cuadro 32. Velocidades medias del flujo para para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15 y 25 años.

Estación	Periodos de retorno				
	2 años	5 años	10 años	15 años	25 años
	Velocidad media (m/s)	Velocidad media (m/s)	Velocidad media (m/s)	Velocidad media (m/s)	Velocidad media (m/s)
1269.804	1.10	1.83	2.28	2.54	2.89
10.30199	2.21	3.08	3.55	3.80	4.11

Fuente: elaboración propia, 2014

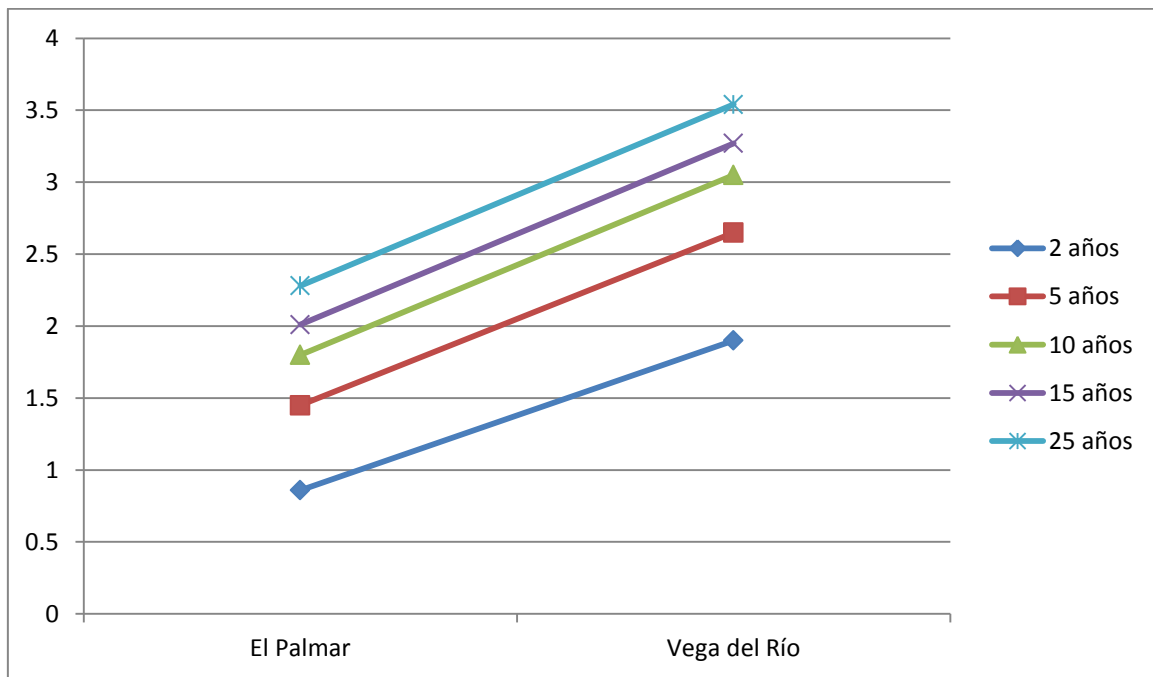


Figura 79. Velocidades medias (m/s) del flujo para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15 y 25 años.

La cobertura vegetal de la cuenca alta del río Sensunapán, analizada mediante los mapas de uso de la tierra del año 2010, consiste principalmente de zonas cafetaleras hasta los 1,600 msnm y bosques primarios en las partes altas de la sierra Apaneca – Ilimatepec, las que contribuyen a disminuir los efectos ocasionados por tormentas extremas, principalmente porque tienen el efecto de retener la lluvia a través de la infiltración y retardando de la escorrentía; sin embargo, desde el punto de vista hidrológico y la forma de la cuenca, los caudales de diseño para periodos de retorno cortos (2, 5, 10 y 15 años), indican un alto riesgo para las comunidades localizadas en los márgenes del río, principalmente en El Palmar y Vega del Río, también señalado como sitios críticos en el Plan de Mitigación de Riesgos del municipio de Sonsonate, sin contarse a esta fecha con un sistema de alerta temprana (Corena Sánchez, 2012) y es confirmado por los hechos sucedidos en agosto del 2010, donde una lluvia de 30 minutos causo destrozos en la comunidad Vega del Río, haciendo colapsar los muros de contención y evacuar a varias familias del lugar (Salguero, 2010), coincidiendo también con lo expresado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2014), en relación a la parte baja de la cuenca durante la última década, la cual se ha visto frecuentemente afectada por inundaciones que han incrementado las pérdidas y daños en las comunidades asentadas en esta zona, en especial durante eventos extremos, situación confirmada en octubre de 2015 donde una precipitación acumulada de 112 milímetros en la estación Sensunapán de este departamento, provocó incrementos del nivel del flujo del agua en 1.4 metros en el río Sensunapán, las que ocasionaron inundaciones en la cuenca baja, generando situaciones de emergencia (El País, 2015).

La situación anterior, amerita el fortalecimiento de la gestión de riesgos de desastres involucrando a todas las instituciones pertinentes desde la creación de los pronósticos meteorológicos por el MARN, donde se monitorea la lluvia y se prevén las probabilidades de desbordamiento del río, incluyendo la integración del gobierno local y la población organizada de las comunidades a lo largo del cauce del río Sensunapán; siendo que en el plan municipal de gestión de riesgos se detalla la población afectada por este problema.

La información generada en esta investigación, puede mejorar un sistema de alerta temprana, principalmente con el conocimiento de la precipitación de la parte alta de la cuenca, cuyo tiempo de concentración calculado permite un tiempo estimado de 2.42 horas para poder evacuar si fuese necesario a la población más expuesta a crecientes repentinas del río (los habitantes que viven dentro del cauce), aplicables para lluvias con un periodo de retorno a partir de 2 años.

La aplicación de los modelos predictivos HEC - RAS y GeoRAS, con énfasis en los sitios considerados críticos, indican una afectación directa a una superficie inundable que abarca zonas de las comunidades Vega del Río y El Palmar, como lo confirmado por las visitas de campo y lo detallado por Corena Sánchez (2012), sin tomar en cuenta el efecto que podría tener un periodo de retorno de 50 años, esto ayuda a percibir o establecer planes de gestión de riesgos más fundamentados en los antecedentes históricos y en los resultados de los modelos hidráulicos.

Lógicamente la situación de alta vulnerabilidad de los habitantes, heredada por la ausencia de planes de ordenamiento territorial municipal que regulen y ordenen las zonas habitables con respecto a las zonas de alto peligro, a la falta de planes financiados de construcción de viviendas en sitios seguros y a los altos índices de pobreza en la zona (COSUDE, s.f.), bajo estas condiciones precarias de vida, sobre todo en Vega del Río y El Palmar, no se puede mitigar la vulnerabilidad a no ser por la reubicación de las familias a sitios más seguros, como lo desarrollado por el gobierno municipal de Sonsonate juntamente con la organización no gubernamental italiana, ÁFRICA 70, en el mismo río (Lima, I. 2014) y las recomendaciones a largo plazo establecidas por COSUDE (sf).



## 5. CONCLUSIONES

1. Desde el punto de vista hidrológico, la parte alta de la cuenca posee una condición hidrológica buena, conformada por áreas de cultivos de café y bosques, y un tipo de suelo cuyas propiedades físicas con tasas moderadas de infiltración y transmisión de agua, definen una condición de moderado potencial de escorrentía; sin embargo, los caudales de diseño bajo estas características biofísicas, indican una amenaza, debido a las características de los asentamientos humanos en la parte baja de la cuenca.
2. Los caudales para periodos de retorno cortos (2, 5, 10 y 15 años), representan una amenaza para todas las comunidades localizadas en los márgenes del río Sensunapán, principalmente El Palmar y Vega del Río, por estar localizadas muy cercanas al cauce, condición confirmada por medio de los escenarios de riesgo calculados para estos periodos de retorno, indicando la necesidad de incluir esta información en los planes de municipales de gestión de riesgos.
3. Las características morfométricas del cauce del río Sensunapán, específicamente en las comunidades Vega del Río y El Palmar, indican su baja capacidad hidráulica en relación a los caudales de diseño, para periodos de retorno corto, indicando la permanente susceptibilidad a inundaciones durante toda la época lluviosa.
4. Evidentemente la ubicación de las comunidades Vega del Río y El Palmar, muy cercanas al cauce aumenta la vulnerabilidad a sufrir los efectos de las lluvias caídas en la parte alta de la cuenca; sin embargo, el tiempo de concentración de 2.47 horas indica la posibilidad de crear y/o fortalecer un Sistema de Alerta Temprana, que disminuya el riesgo.
5. Las características del flujo del cauce del río Sensunapán a la altura de la comunidad Vega del Río, presenta un alto grado de capacidad erosiva, significando susceptibilidad a socavaciones debido a la velocidad que el flujo posee en ese sitio, representado esto en un incremento de la vulnerabilidad de la comunidad.

## 6. RECOMENDACIONES

1. Mantener y mejorar las condiciones biofísicas de la cuenca, a través de un fortalecimiento de las zonas cafetaleras y conservación de las áreas de boscosas en la parte alta de la cuenca promoviendo la conservación de la cobertura vegetal, reduciendo de esta manera la deforestación, degradación de los suelos y disminución de la escorrentía superficial.
2. Reubicar a los habitantes de las comunidades que se encuentran más vulnerables a inundaciones, en sitios más seguros.
3. Incluir a toda la comunidad en los planes de gestión de riesgos e incorporar medidas de mitigación en las zonas más vulnerables.
4. Fortalecer el sistema de alerta temprana de las comunidades, tomando en cuenta que el tiempo de concentración de una precipitación máxima es de 2.42 horas para lluvias que se producen en la parte alta de la cuenca del río Sensunapán, hasta la comunidad Vega del Río.
5. Crear una articulación intermunicipal, entre las comunidades y representantes de protección civil comunal.
6. Realizar un censo de la población que podría ser afectada por una inundación máxima, tomando como base las cotas de inundación definidas para todos los períodos de retorno.
7. Proporcionar viviendas en lugares más seguros a los habitantes que se encuentran en las zonas de inundación y declarar las zonas actualmente habitadas de alto riesgo.
8. Establecer un albergue para los habitantes de las comunidades, en un lugar apropiado y sin riesgos a inundaciones; debido a que en ambas comunidades no se encuentran condiciones o espacios físicos que no sean susceptibles a inundaciones, tomando como referencia la modelación hidráulica.

## 7. BIBLIOGRAFIA

**Aparicio F. J. 1996.** Fundamentos de Hidrología de Superficie. Lima, Perú. Editorial Limusa. Pág. 7

**Cordero Alberto, MR; et al. 2005.** Diagnóstico de la calidad de agua en época seca en el canal principal del río Jiboa y propuesta de mitigación de fuentes contaminantes, en una zona crítica. Tesis Ing. Quim. San Salvador, El Salvador, UES. P. 16.

**Coreas Gaytán, VM; et al. 2012.** Evaluación hidráulica para la propuesta de obras de limpieza en un tramo del río Grande de San Miguel, 2,351m aguas arriba y 5,606m aguas abajo del puente don Luis de Moscoso. Tesis Ing. Civil. San Miguel, El Salvador, UES. P. 34, 125

**Corena Sánchez, CJ. 2012.** Plan de Mitigación de Riesgos del municipio de Sonsonate. Alcaldía Municipal de Sonsonate. Pág. 20.

**COSUDE (Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, SV). Sf.** Evaluación de amenazas naturales y propuestas de plan municipal de reducción de riesgo en el municipio de Salcoatitán, microrregión de Juayua, Sonsonate. Consultado 18 de abr. 2016. En línea. Disponible en <http://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00037/doc00037-contenido.pdf>

**El País. 2015.** Alta probabilidad a desbordamientos en ríos que drenan a la zona costera. Periódico digital. Consultado 18 de abr. 2016. En línea. Disponible en <http://elpais.com.sv/elsalvador/alta-probabilidad-a-desbordamientos-en-rios-que-drenan-a-la-zona-costera/>

**Fuentes Montepeque, JC. 2013.** Impacto hidrológico asociado al proceso de urbanización en la subcuenca del río Villalobos, Guatemala. Tesis Mag. Sc. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, CR. P. 26

**Guzmán, AP. 1986.** Diccionario Geográfico de El Salvador: Tomo II L – Z. San Salvador, ES. P. 1351.

**Geólogos del mundo. 2005.** Caracterización Hidrogeológica de Nacimiento de Agua para el Abastecimiento de San Antonio del Monte. ACASTAM (Asociación Comunal Administradora del Sistema de Abastecimiento de Agua Alcantarillado y Saneamiento Ambiental de las

Comunidades del Municipio de San Antonio del Monte). Ayuntamiento de Asturias, España. 19 p.

**Hernández Cáceres, AJ. 2003.** Dinámica del uso de la tierra y de la oferta hídrica en la Cuenca del río Guacerique, Tegucigalpa, honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. P. 4 – 5.

**Juárez Sanz, M. et al 2006.** Química del suelo y medio ambiente. (En línea). San Vicente del Raspeig, Alicante, ESP. Editorial Guada Impresores S.L. Consultado 20 abr. 2015. Disponible en <http://biblioteca.ues.edu.sv/portal/>

**Kazmann, RG. 1969.** Hidrología Moderna. Trad. GA Fernández. Distrito Federal, Mex. Continental. P. 19.

**Lima, I. 2014.** Habitantes de zonas de riesgo serán reubicados en dos colonias. Diario digital El Salvador.com. Consultado 18 de abr. 2016. En línea. Disponible en <http://www.elsalvador.com/articulo/comunidades/habitantes-zonas-riesgo-seran-reubicados-dos-colonias-65003>

**Luque Luque, N. 2005.** Análisis de la intervención del plan de mejoramiento ambiental de la parte alta de la cuenca del río Virilla, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. P. 4 – 8.

**MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, SV). 2012.** Clasificación de suelos por división política de El Salvador, C.A. Ed. Rev. Soyapango, San Salvador, El Salvador. P. 3

**MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, SV). 2013.** Uso actual de suelo de la República de El Salvador, C.A. Ed. Rev. Soyapango, San Salvador, El Salvador. P. 2

**MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SV). 2012.** Escenarios de riesgo: Amenaza por inundación. Ed. Rev. Santa Tecla, SV. Talleres gráficos, UCA. P. 24

**MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SV), 2014.** Presentan mapa de riesgo por inundaciones de dos ríos. Consultado en 18 de abr. 2016. En línea. Disponible en: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache%3As06gOlyrE-4J%3Awww.periodicoequilibrium.com%2Fpresentan-mapa-de-riesgo-por-inundaciones-de-dos-rios%2F%20&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=sv>

**Madrigal Obando, LN. 1995.** Análisis de las inundaciones en la cuenca del río Tuis mediante la modelación hidrológica e hidráulica de eventos máximos. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. P. 4 – 10, 17,19 – 22.

**Medina Banegas, JM. 1995.** Identificación de áreas críticas y plan de reforestación mediante sistemas de información geográfica, en la cuenca del río Purires, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. P. 4 – 9.

**Montserrat Ferrer, IJ. 2002.** Análisis de nuevas fuentes de datos para la estimación del parámetro número de curva del modelo hidrológico del S.C.S.: datos de perfiles de suelos y teledetección. Tesis Dr. Salamanca, España. P. 34

**Morales Mendoza, JJ. 2003.** Metodología de planificación ambiental participativa para formular el plan rector de producción y conservación (PRPC) de la subcuenca del río Jucuapa Matagalpa – Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. P. 23 – 39.

**Nania, S. et al 2007.** Manual Básico de HEC-RAS 3.1. 3 y HEC-GeoRAS 3.1. 1. Granada, ESP. Editorial Guada Impresores S.L.

**Reyes, ER. 2005.** Análisis de riesgo en las subcuencas de Shushula, Jupula y Nunuapa en los municipios de Citalá, San Ignacio y La Palma en el Departamento de Chalatenango. Tesis Ing. Agr. San Salvador, El Salvador, UES. P. 7 – 9.

**Romero Paz, BN; Ponce Meléndez, NU. 2009.** Formulación de un plan de manejo de la microcuenca del río Jupula, San Ignacio, Chalatenango, El Salvador. Tesis Ing. Agr. San Salvador, El Salvador, UES. P. 12

**Sáenz, GM. 1999.** Hidrología en la Ingeniería. 2 ed. Santafé de Bogotá, Co. Alfaomega. P. 193, 194.

**Salguero, M. 2010.** Ríos Sensunapán y Julupe causan destrozos en Sonsonate. La Prensa Gráfica. Consultado el 18 de abr. En línea. Disponible en: <http://www.laprensagrafica.com/el-salvador/departamentos/135396-rios-sensunapan-y-julupe-causan-destrozos-en-sonsonate>

**Torres Guerra, K. 2008.** Análisis participativo de las condiciones actuales para la implementación del plan de ordenamiento territorial de la microcuenca del río Sesesmiles, Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. P. 4

**Ven Te Chow, et al. 1994.** Hidrología aplicada. Ed. ME Suárez. Trad. JG Saldarriaga. 1 ed. Santafé de Bogotá, CO. Imprenta Panamericana. P. 66, 80, 81, 142, 194, 204.

**Villalta Gonzales, JL; et al. 2012.** Estudio de vulnerabilidad en el municipio de Verapaz, del departamento de San Vicente en el periodo de marzo a septiembre de 2012. Tesis Lic. CC SS. San Vicente, El Salvador, UES. P. 4, 5, 6, 7

**Villón Béjar, M. 2004.** Hidrología. Cartago, CR. Editorial Tecnológica de Costa Rica. P. 77, 81, 82, 84, 85, 86, 149, 150, 151, 155, 179, 261, 262, 263, 264, 265, 271, 272, 274, 276, 277, 284 – 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297,

\_\_\_\_\_ **2006.** Hidrología Estadística. Cartago, CR. Editorial Tecnológica de Costa Rica. P. 25, 26, 27, 28, 29, 30.

**Winchell, M. 2007.** ArcSWAT interface for SWAT2005 User's guide. Texas Agricultural Experiment Station and United States Department of Agriculture, Temple, TX. Consultado 20 abr. 2015. Disponible en <http://swat.tamu.edu/software/arcswat/>

## 8. ANEXOS

Cuadro A – 1. Intensidades máximas de las estaciones climatológicas de Chalchuapa, Juayua, Apaneca, Izalco y Acajutla; para un periodo de retorno de 02, 05, 10, 15 y 25 años, y una duración de 360 minutos.

Estación climatológica	Periodo de retorno				
	02 años	05 años	10 años	15 años	25 años
Chalchuapa	0.15 mm/min.	0.21 mm/min.	0.25 mm/min.	0.28 mm/min.	0.30 mm/min.
Juayua	0.20 mm/min.	0.25 mm/min.	0.29 mm/min.	0.31 mm/min.	0.33 mm/min.
Apaneca	0.18 mm/min.	0.30 mm/min.	0.39 mm/min.	0.43 mm/min.	0.49 mm/min.
Izalco	0.15 mm/min.	0.20 mm/min.	0.23 mm/min.	0.24 mm/min.	0.26 mm/min.
Acajutla	0.22 mm/min.	0.32 mm/min.	0.36 mm/min.	0.42 mm/min.	0.46 mm/min.

Cuadro A – 2. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca, Izalco y Acajutla; con un periodo de retorno de 02 años y una duración de 360 minutos.

Estación	Área de influencia	Intensidad máxima	Precipitación máxima	Área (Intensidad)	Área (precipitación)
Chalchuapa	299.4471 Ha	0.15 mm/min.	54.00 mm	44.9170 mm/min/Ha	16170.1434 mm/Ha
Juayua	4,994.2073 Ha	0.20 mm/min.	72.00 mm	998.8416 mm/min/Ha	359582.9256 mm/Ha
Apaneca	5,981.4173 Ha	0.18 mm/min.	64.80 mm	1076.6551 mm/min/Ha	387595.8410 mm/Ha
Izalco	9,412.0338 Ha	0.15 mm/min.	54.00 mm	1411.8050 mm/min/Ha	508249.8252 mm/Ha
Acajutla	1,200.0528 Ha	0.22 mm/min.	79.20 mm	264.0116 mm/min/Ha	95044.18176 mm/Ha
<b>Total</b>	21,887.1585 Ha		324.00 mm	3796.2303 mm/min/Ha	1366642.917 mm/Ha
<b>Intensidad media</b>				<b>10.4067 mm/hora</b>	
<b>Precipitación medio</b>					<b>62.4403 mm</b>

Cuadro A – 3. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca, Sonzacate - Izalco y Acajutla; con un periodo de retorno de 05 años y una duración de 360 minutos.

Estación	Área de influencia	Intensidad máxima	Precipitación máxima	Área (Intensidad)	Área (Precipitación)
Chalchuapa	299.4471 Ha	0.21 mm/min.	75.60 mm	62.88389247 mm/min/Ha	22638.2007 mm/Ha
Juayua	4,994.2073 Ha	0.25 mm/min.	90.00 mm	1248.551825 mm/min/Ha	449478.657 mm/Ha

Apaneca	5,981.4173 Ha	0.30 mm/min.	108.00 mm	1794.425199 mm/min/Ha	645993.0684 mm/Ha
Izalco	9,412.0338 Ha	0.20 mm/min.	72.00 mm	1882.406778 mm/min/Ha	677666.4336 mm/Ha
Acajutla	1,200.0528 Ha	0.32 mm/min.	115.20 mm	384.0169152 mm/min/Ha	138246.0800 mm/Ha
<b>Total</b>	<b>21,887.1585 Ha</b>		460.80 mm	5372.284610 mm/min/Ha	1934022.442 mm/Ha
<b>Intensidad media</b>				<b>14.7272 mm/hora</b>	
<b>Precipitación medio</b>					<b>88.3633 mm</b>

Cuadro A – 4. Intensidades medias y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca, Izalco y Acajutla; con un periodo de retorno de 10 años y una duración de 360 minutos.

Estación	Área de influencia	Intensidad máxima	Precipitación máxima	Área (Intensidad)	Área (Precipitación)
Chalchuapa	299.4471 Ha	0.25 mm/min.	90.00 mm	74.86177675 mm/min/Ha	26950.2390 mm/Ha
Juayua	4,994.2073 Ha	0.29 mm/min.	104.40 mm	1448.320117 mm/min/Ha	521395.2421 mm/Ha
Apaneca	5,981.4173 Ha	0.39 mm/min.	140.40 mm	2332.752759 mm/min/Ha	839790.9889 mm/Ha
Izalco	9,412.0338 Ha	0.23 mm/min.	82.80 mm	2164.767795 mm/min/Ha	779316.3986 mm/Ha
Acajutla	1,200.0528 Ha	0.36 mm/min.	129.60 mm	432.0190296 mm/min/Ha	155526.8429 mm/Ha
<b>Total</b>	<b>21,887.1585 Ha</b>		547.20 mm	6452.721477 mm/min/Ha	2322979.712 mm/Ha
<b>Intensidad media</b>				<b>17.68906131 mm/hora</b>	
<b>Precipitación medio</b>					<b>103.1346 mm</b>

Cuadro A – 5. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca, Izalco y Acajutla; con un periodo de retorno de 15 años y una duración de 360 minutos.

Estación	Área de influencia	Intensidad máxima	Precipitación máxima	Área (Intensidad)	Área (Precipitación)
Chalchuapa	299.4471 Ha	0.28 mm/min.	100.80 mm	83.8451 mm/min/Ha	30184.2676 mm/Ha
Juayua	4,994.2073 Ha	0.31 mm/min.	111.60 mm	1548.2042 mm/min/Ha	557353.5347 mm/Ha
Apaneca	5,981.4173 Ha	0.43 mm/min.	154.80 mm	2572.0094 mm/min/Ha	925923.3980 mm/Ha
Izalco	9,412.0338 Ha	0.24 mm/min.	86.40 mm	2258.8881 mm/min/Ha	813199.7203 mm/Ha
Acajutla	1,200.0528 Ha	0.42 mm/min.	151.20 mm	504.0222 mm/min/Ha	181447.9834 mm/Ha
<b>Total</b>	<b>21,887.1585 Ha</b>		604.80 mm	6966.9692 mm/min/Ha	2508108.9040 mm/Ha
<b>Intensidad media</b>				<b>19.09878591 mm/hora</b>	
<b>Precipitación promedio</b>					<b>114.5927 mm</b>



Cuadro A – 6. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca, Izalco y Acajutla; con un periodo de retorno de 25 años y una duración de 360 minutos.

Estación	Área de influencia	Intensidad máxima	Precipitación máxima	Área (Intensidad)	Área (Precipitación)
Chalchuapa	299.4471 Ha	0.30 mm/min.	108.00 mm	89.8341321 mm/min/Ha	32340.2868 mm/Ha
Juayua	4,994.2073 Ha	0.33 mm/min.	118.80 mm	1648.088409 mm/min/Ha	593311.8272 mm/Ha
Apaneca	5,981.4173 Ha	0.49 mm/min.	176.40 mm	2930.894492 mm/min/Ha	1055122.012 mm/Ha
Izalco	9,412.0338 Ha	0.26 mm/min.	93.60 mm	2447.128811 mm/min/Ha	880966.3637 mm/Ha
Acajutla	1,200.0528 Ha	0.46 mm/min.	165.60 mm	552.0243156 mm/min/Ha	198728.7437 mm/Ha
<b>Total</b>	<b>21,887.1585 Ha</b>		<b>662.40 mm</b>	<b>7667.97016 mm/min/Ha</b>	<b>2760469.233 mm/Ha</b>
<b>Intensidad media</b>				<b>21.02046319 mm/hora</b>	
<b>Precipitación promedio</b>					<b>126.1227</b>

Cuadro A – 7. Intensidades máximas de las estaciones climatológicas de Chalchuapa, Juayua, Apaneca e Izalco ; para un periodo de retorno de 02, 05, 10, 15 y 25 años, y una duración de 150 minutos.

Estación	Periodo de retorno				
	02 años	05 años	10 años	15 años	25 años
Chalchuapa	0.35 mm/min.	0.47 mm/min.	0.56 mm/min.	0.60 mm/min.	0.66 mm/min.
Juayua	0.37 mm/min.	0.47 mm/min.	0.53 mm/min.	0.57 mm/min.	0.61 mm/min.
Apaneca	0.42 mm/min.	0.59 mm/min.	0.71 mm/min.	0.78 mm/min.	0.86 mm/min.
Izalco	0.37 mm/min.	0.48 mm/min.	0.55 mm/min.	0.59 mm/min.	0.64 mm/min.

Cuadro A – 8. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca, Izalco y Acajutla; con un periodo de retorno de 02 años y una duración de 150 minutos.

Estación	Área de influencia	Intensidad máxima	Precipitación máxima	Área (Intensidad)	Área (precipitación)
Chalchuapa	299.4471 Ha	0.35 mm/min.	52.50 mm	104.8064 mm/min/Ha	15,720.9727 mm/Ha
Juayua	4, 994.2030 Ha	0.37 mm/min.	55.50 mm	1,847.8551 mm/min/Ha	277,178.2665 mm/Ha
Apaneca	5, 351.0542 Ha	0.42 mm/min.	63.00 mm	2,241.4427 mm/min/Ha	337,116.4146 mm/Ha
Izalco	3, 911.1797 Ha	0.37 mm/min.	55.50 mm	1,447.1364 mm/min/Ha	217,070.4734 mm/Ha
<b>Total</b>	<b>14,555.8842 Ha</b>		<b>226.50 mm</b>	<b>5,641.2402 mm/min/Ha</b>	<b>847,086.1272 mm/Ha</b>
<b>Intensidad media</b>				<b>23.2534 mm/hora</b>	

Precipitación media				58.1954 mm
---------------------	--	--	--	------------

Cuadro A – 9. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca e Izalco; con un periodo de retorno de 05 años y una duración de 150 minutos.

Estación	Área de influencia	Intensidad máxima	Precipitación máxima	Área (Intensidad)	Área (precipitación)
Chalchuapa	299.4471 Ha	0.47 mm/min.	70.5 mm	140.7401 mm/min/Ha	21,111.0205 mm/Ha
Juayua	4, 994.2030 Ha	0.47 mm/min.	70.5 mm	2,347.2754 mm/min/Ha	352,091.3115 mm/Ha
Apaneca	5, 351.0542 Ha	0.59 mm/min.	88.5 mm	3,157.1219 mm/min/Ha	473,568.2967 mm/Ha
Izalco	3, 911.1797 Ha	0.48 mm/min.	72.00 mm	1,877.3662 mm/min/Ha	281,604.9384 mm/Ha
<b>Total</b>	14,555.8842 Ha		301.50 mm	7,522.5036 mm/min/Ha	1128375.567 mm/Ha
<b>Intensidad media</b>				<b>31.0080 mm/hora</b>	
<b>Precipitación media</b>					<b>77.5202 mm</b>

Cuadro A – 10. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca e Izalco; con un periodo de retorno de 10 años y una duración de 150 minutos.

Estación	Área de influencia	Intensidad máxima	Precipitación máxima	Área (Intensidad)	Área (precipitación)
Chalchuapa	299.4471 Ha	0.56 mm/min.	84.00 mm	167.6903 mm/min/Ha	25,153.5564 mm/Ha
Juayua	4, 994.2030 Ha	0.53 mm/min.	79.5 mm	2,646.9227 mm/min/Ha	397,039.1385 mm/Ha
Apaneca	5, 351.0542 Ha	0.71 mm/min.	106.5 mm	3,799.2484 mm/min/Ha	569,887.2723 mm/Ha
Izalco	3, 911.1797 Ha	0.55 mm/min.	82.50 mm	2,151.1488 mm/min/Ha	322,672.3253 mm/Ha
<b>Total</b>	14,555.8842 Ha		352.50 mm	8,765.0102 mm/min/Ha	1314752.293 mm/Ha
<b>Intensidad media</b>				<b>36.1297 mm/hora</b>	
<b>Precipitación media</b>					<b>90.3244 mm</b>

Cuadro A – 11. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca e Izalco; con un periodo de retorno de 15 años y una duración de 150 minutos.

Estación	Área de influencia	Intensidad máxima	Precipitación máxima	Área (Intensidad)	Área (precipitación)
Chalchuapa	299.4471 Ha	0.60 mm/min.	90.00 mm	179.6682 mm/min/Ha	26,950.239 mm/Ha
Juayua	4, 994.2030 Ha	0.57 mm/min.	85.50 mm	2,846.6957 mm/min/Ha	427,004.3565 mm/Ha
Apaneca	5, 351.0542 Ha	0.78 mm/min.	117.00 mm	4,173.8222 mm/min/Ha	626,073.3414 mm/Ha
Izalco	3, 911.1797 Ha	0.59 mm/min.	88.50 mm	2,307.5960 mm/min/Ha	346,139.4035 mm/Ha
<b>Total</b>	14,555.8842 Ha		381.00 mm	9, 507.7821 mm/min/Ha	1426167.34 mm/Ha
<b>Intensidad media</b>				<b>39.1914 mm/hora</b>	
<b>Precipitación media</b>					<b>97.9787 mm</b>

Cuadro A – 12. Intensidad media y precipitación media de las estaciones climatológicas de los municipios de Chalchuapa, Juayua, Apaneca e Izalco; con un periodo de retorno de 25 años y una duración de 150 minutos.

Estación	Área de influencia	Intensidad máxima	Precipitación máxima	Área (Intensidad)	Área (precipitación)
Chalchuapa	299.4471 Ha	0.66 mm/min.	99.00 mm	197.6350 mm/min/Ha	29,645.2629 mm/Ha
Juayua	4, 994.2030 Ha	0.61 mm/min.	91.50 mm	3,046.4638 mm/min/Ha	456,969.5745 mm/Ha
Apaneca	5, 351.0542 Ha	0.86 mm/min.	129.00 mm	4,601.9066 mm/min/Ha	690,285.9918 mm/Ha
Izalco	3, 911.1797 Ha	0.64 mm/min.	96.00 mm	2,503.1550 mm/min/Ha	375,473.2512 mm/Ha
<b>Total</b>	14,555.8842 Ha		415.00 mm	10,349.1604 mm/min/Ha	1552374.08 mm/Ha
<b>Intensidad media</b>				<b>42.6596 mm/hora</b>	
<b>Precipitación media</b>					<b>106.6492 mm</b>

Cuadro A – 13. Valores del coeficiente de escorrentía

Tipo de vegetación	Pendiente (%)	Textura		
		Franco arenosa	Franco limosa	Arcillosa
Forestal	0 – 5	0.10	0.30	0.40
	5 – 10	0.25	0.35	0.50

	10 – 30	0.30	0.50	0.60
Praderas	0 – 5	0.10	0.30	0.40
	5 – 10	0.15	0.35	0.55
	10 – 30	0.20	0.40	0.60
Terrenos cultivados	0 – 5	0.30	0.50	0.60
	5 – 10	0.40	0.60	0.70
	10 – 30	0.50	0.70	0.80

Cuadro A – 14. Gasto unitario

<b>Gasto unitario <math>q</math> (<math>m^3/s/mm/km^2</math>), en función del tiempo de concentración <math>T_c</math>; (horas)</b>					
$T_c$	$q$	$T_c$	$q$	$T_c$	$q$
< 0.1	0.337	1.0	0.158	8.0	0.039
0.2	0.300	1.5	0.120	10.0	0.034
0.3	0.271	2.0	0.100	12.0	0.030
0.4	0.246	2.5	0.086	14.0	0.027
0.5	0.226	3.0	0.076	16.0	0.025
0.6	0.208	4.0	0.063	18.0	0.023
0.7	0.195	5.0	0.054	20.0	0.021
0.8	0.190	6.0	0.048	22.0	0.020
0.9	0.168	7.0	0.043	24.0	0.019

Fuente: Villón Béjar, M. 2004

Cuadro A – 15. Valores de R, en función de T y n

$T$	<b>Riesgo (R)</b>		
	$n = 50$	$n = 100$	$n = 150$
10	0,99485	0,99997	0,99999
20	0,92306	0,99408	0,99954
50	0,63586	0,86738	0,95170
100	0,39499	0,63397	0,77855

500	0,09525	0,18143	0,25940
1000	0,04879	0,09521	0,13936
5000	0,00995	0,01980	0,02956
10000	0,00499	0,00995	0,01489

Fuente: Villón Béjar, M. 2006.

Cuadro A – 16. Velocidades medias de escurrimiento por laderas (m/min)

<b>Pendiente (%)</b>	<b>Vegetación densa o cultivos</b>	<b>Pastos o vegetación ligera</b>	<b>Sin vegetación</b>
0 – 5	25	40	70
5 – 10	50	70	120
10 – 15	60	90	150
15 – 20	70	110	180

Fuente: Villón Béjar, M. 2004.