

# Perfil de Riesgo de Desastre por Inundaciones para El Salvador

Informe Nacional

Banco Interamericano de Desarrollo

División de Medio  
Ambiente, Desarrollo Rural  
y Gestión del Riesgo por  
Desastres

NOTA TÉCNICA N°  
IDB-TN-877

# Perfil de Riesgo de Desastre por Inundaciones para El Salvador

Informe Nacional

Banco Interamericano de Desarrollo

Marzo 2016

Catalogación en la fuente proporcionada por la  
Biblioteca Felipe Herrera del  
Banco Interamericano de Desarrollo

Banco Interamericano de Desarrollo  
Perfil de riesgo de desastre por inundaciones para El Salvador / Banco Interamericano  
de Desarrollo.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 877)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Flood damage prevention—El Salvador. 2. Natural disasters—El Salvador. 3.  
Emergency management—El Salvador. 4. Disaster relief—El Salvador. I. Banco  
Interamericano de Desarrollo. División de Medio Ambiente, Desarrollo Rural y  
Administración de Riesgos por Desastres. II. Título. III. Serie.  
IDB-TN-877

JEL code: Q54

Palabras claves: Inundación, Precipitación, Cuencas, Cambio Climático, Gestión de  
Riesgo de Desastres, Evaluación del Riesgo, Sistemas de Monitoreo, Planes de  
Contingencia, Protección Financiera, El Salvador.

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2016 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Contacto: Tsuneki Hori ([tsunekih@iadb.org](mailto:tsunekih@iadb.org)); Ginés Suárez ([giness@iadb.org](mailto:giness@iadb.org))

Este documento fue preparado por:

Los consultores de la empresa Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE): Luis E. Yamín, Omar Cardona, Alex Barbat, Mario Diaz Granados y Natalia León.

Los especialistas del BID en Gestión del Riesgo: Tsuneki Hori, Ginés Suárez, Sergio Lacambra e Ivelisse Justiniano.

También se contó con valiosos aportes del Gobierno de El Salvador a través del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

El desarrollo y publicación de este documento fue financiado por medio de la Cooperación Técnica Regional RG-T2165, financiada por el Fondo Multidonante de Prevención de Desastres con contribuciones de Canadá, España, Japón y Korea.

## Índice de Contenido

1.	Introducción y objetivos .....	1
2.	Metodología general para la evaluación del riesgo.....	5
2.1	Introducción.....	5
2.2	Evaluación probabilista del riesgo.....	6
2.3	Módulos de análisis para la evaluación del riesgo.....	7
3.	Contexto general del país en relación al riesgo de inundación .....	11
3.1	Generalidades .....	11
3.2	Información general de cuencas a nivel país .....	16
3.3	Selección de cuencas y tramos críticos para el análisis .....	18
3.3.1	Sectores de análisis en las cuencas críticas .....	23
4.	Evaluación de la amenaza por inundación en tramos críticos .....	27
4.1	Introducción.....	27
4.2	Metodología para el análisis de amenaza .....	28
4.2.1	Software utilizado en el análisis de amenaza de inundación.....	28
4.2.2	Amenaza de lluvia .....	31
4.2.3	Amenaza de inundación.....	32
4.2.4	Datos requeridos para el análisis.....	34
4.3	Amenaza de lluvia en cuencas seleccionadas .....	35
4.3.1	Información de precipitación .....	35
4.3.2	Curvas PADF representativas en las cuencas .....	37
4.3.3	Escenarios estocásticos que representan la amenaza de lluvia.....	39
4.4	Amenaza por inundación .....	46
4.4.1	Información para el análisis de amenaza por inundación.....	46
4.4.2	Información complementaria para la cuenca Sensunapán .....	47
4.4.3	Información complementaria para la cuenca Arenal Monserrat .....	50
4.4.4	Información detallada de secciones transversales en tramos críticos.....	52
4.5	Calibración y validación de modelos hidrológicos e hidráulicos.....	53
4.5.1	Proceso general de calibración.....	53

4.5.2	Evento hidrometeorológico: Depresión Tropical 12E .....	55
4.5.3	Descripción de los tipos de calibración utilizados .....	57
4.5.4	Resultados del proceso de calibración .....	59
4.6	Resultados de la amenaza por inundación en los tramos críticos .....	66
4.6.1	Archivos .AME de inundación .....	66
4.6.2	Mapas de amenaza probabilistas de inundación .....	67
4.7	Validación de resultados.....	76
5.	Inventario de componentes expuestos en zonas susceptibles .....	83
5.1	Generalidades .....	83
5.1.1	Introducción .....	83
5.1.2	Información básica requerida.....	83
5.1.3	Información integral en centros poblados .....	84
5.2	Información de componentes expuestos en zonas urbanas.....	85
5.2.1	Levantamiento de información para conformar la base de datos.....	85
5.2.2	Criterios de clasificación de los tipos de viviendas.....	86
5.2.3	Conformación de bases de datos de exposición.....	87
5.2.4	Usos principales.....	92
5.2.5	Criterios para valoración de tipos constructivos principales.....	93
5.2.6	Ocupación .....	94
5.2.7	Base de datos de información de exposición .....	95
5.3	Información de zona de cultivos expuestos a inundaciones .....	98
6.	Vulnerabilidad física y humana.....	101
6.1	Aspectos generales .....	101
6.2	Funciones de vulnerabilidad para construcciones y zonas de cultivos .....	102
6.3	Información de vulnerabilidad de edificaciones .....	103
6.4	Información de vulnerabilidad de tipos de cultivos.....	105
7.	Análisis de riesgo por inundación en cuencas priorizadas.....	107
7.1	Generalidades .....	107
7.2	Metodología de evaluación probabilista de riesgo.....	107
7.2.1	Procedimiento general .....	107

7.2.2	Cálculo numérico básico.....	108
7.2.3	Incertidumbres .....	109
7.2.4	Estimadores puntuales del riesgo.....	110
7.2.5	Probabilidad de excedencia de valores de pérdida.....	110
7.2.6	Análisis para un solo escenario.....	111
7.3	Resultados del análisis de riesgo .....	111
7.3.1	Parámetros para la interpretación de los resultados del riesgo.....	111
7.3.2	Resultados del análisis de riesgo para cuenca Sensunapán.....	112
7.3.3	Resultados del análisis de riesgo para cuenca Arenal Monserrat.....	122
7.3.4	Resumen e integración de resultados del análisis de riesgo.....	125
8.	Curva de excedencia de pérdidas para inundaciones frecuentes.....	126
8.1	Marco general y propósito.....	126
8.2	Información para el análisis.....	128
8.3	Metodología de análisis .....	132
8.3.1	Agrupación temporal y espacial.....	132
8.3.2	Modelo de costos .....	133
8.3.3	Suposiciones básicas para el análisis .....	133
8.4	Curva de excedencia de pérdidas por inundaciones .....	136
9.	Interpretación de resultados, conclusiones, recomendaciones.....	138
9.1	Interpretación de resultados y conclusiones .....	138
9.2	Limitaciones en las evaluaciones analíticas.....	140
9.3	Recomendaciones para la gestión del riesgo por inundación .....	140
9.3.1	Identificación del riesgo.....	141
9.3.2	Zonificación de riesgos por inundación .....	142
9.3.3	Prevención y mitigación del riesgo por inundación.....	142
9.3.4	Sistemas de monitoreo y alarma en El Salvador .....	143
9.3.5	Protección financiera .....	143
9.3.6	Planes de contingencia y atención de emergencias .....	143
10.	Referencias .....	145

## Índice de Gráficos

Gráfico 1. Esquema general del análisis de riesgo probabilista .....	7
Gráfico 2. Mapa de departamentos de El Salvador .....	12
Gráfico 3. Mapa de regiones hidrográficas y ríos principales.....	12
Gráfico 4. Mapas de usos de suelo.....	12
Gráfico 5. Mapa de zonas cultivadas .....	13
Gráfico 6. Mapa de susceptibilidad a inundación en El Salvador.....	14
Gráfico 7. Modelo de elevación digital de El Salvador, resolución 30mx30m.....	14
Gráfico 8. Principales regiones hidrográficas del país .....	16
Gráfico 9. Cuencas seleccionadas para el análisis .....	19
Gráfico 10. Zona susceptible de inundación en Sensunapán - Zona Alta .....	20
Gráfico 11. Zona susceptible de inundación en Sensunapán – Zona Media .....	20
Gráfico 12. Zona susceptible de inundación en Sensunapán – Zona Baja.....	21
Gráfico 13. Zona susceptible de inundación en la cuenca Arenal Monserrat .....	21
Gráfico 14. Localización y entorno de la cuenca Sensunapán .....	22
Gráfico 15. Localización y entorno de la cuenca Arenal Monserrat .....	23
Gráfico 16. Zonas críticas susceptibles a inundación en la cuenca de Sensunapán .....	25
Gráfico 17. Zonas críticas susceptibles a inundación en la cuenca de Arenal Monserrat .....	26
Gráfico 18. Programa HEC-HMS desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica.....	29
Gráfico 19. Programa HEC-RAS desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica.....	30
Gráfico 20. Funcionamiento del software ERN-Inundación-V2.2.....	33
Gráfico 21. Precipitación media mensual multianual en estaciones representativas.....	37
Gráfico 22. Curvas PADF para diferentes duraciones - cuenca Sensunapán .....	37
Gráfico 23. Curvas PADF para diferentes duraciones - cuenca Arenal Monserrat.....	38
Gráfico 24. Escenarios de lluvia no-huracanada para diferentes periodos de retorno - cuenca Sensunapán. Profundidad de precipitación en [mm].....	39
Gráfico 25. Escenarios de lluvia no-huracanada para diferentes periodos de retorno - cuenca Arenal Monserrat. Profundidad de precipitación en [mm].....	41
Gráfico 26. Mapas probabilistas de amenaza de lluvias – Duración: 1 día - Cuenca Sensunapán. Profundidad de precipitación en [mm] .....	42
Gráfico 27. Mapas probabilistas de amenaza de lluvia – Duración: 3 días - Cuenca Sensunapán. Profundidad de precipitación en [mm] .....	42
Gráfico 28. Mapas probabilistas de amenaza de lluvia – Duración: 5 días - Cuenca Sensunapán. Profundidad de precipitación en [mm] .....	43
Gráfico 29. Mapas probabilistas de amenaza de lluvia – Duración: 1 día - Cuenca Arenal Monserrat. Profundidad de precipitación en [mm] .....	44
Gráfico 30. Mapas probabilistas de amenaza de lluvia – Duración: 3 días - Cuenca Arenal Monserrat. Profundidad de precipitación en [mm] .....	44
Gráfico 31. Mapas probabilistas de amenaza de lluvias – Duración: 5 días - Cuenca Arenal Monserrat. Profundidad de precipitación en [mm] .....	45
Gráfico 32. Mapa de Número de Curva - Sensunapán.....	47
Gráfico 33. Topografía - Sensunapán .....	47
Gráfico 34. Modelos hidrológicos correspondientes a cada una de las zonas críticas – Sensunapán .....	48
Gráfico 35. Cuenca y cauce de drenaje para cada uno de las 5 zonas críticas – Sensunapán .....	49
Gráfico 36. Mapa de Número de Curva – Arenal Monserrat.....	50
Gráfico 37. Topografía – Arenal Monserrat.....	50
Gráfico 38. Modelos hidrológicos correspondientes a cada una de las zonas críticas – Arenal Monserrat .....	50
Gráfico 39. Cuenca y cauce de drenaje para cada uno de las 3 zonas críticas – Arenal Monserrat .....	51
Gráfico 40. Información ilustrativa disponible para el análisis de inundación- cuenca Sensunapán .....	52
Gráfico 41. Información ilustrativa disponible para el análisis de inundación- cuenca Arenal Monserrat.....	53
Gráfico 42. Proceso de calibración utilizado en los modelos hidrológicos e hidráulicos .....	54
Gráfico 43. Trayectoria de la Depresión Tropical 12E y los sistemas de baja presión estacionarios.....	55
Gráfico 44. Mapa de lluvia acumulada en milímetros de precipitación entre el 10 y 19 de octubre de 2011 .....	56
Gráfico 45. Altura de inundación alcanzada en el Puente Río Julupe, cercano a comunidad del mismo nombre .....	59



Gráfico 46. Extensión de inundación brindada por el modelo HEC-RAS en donde se valida la información de inundación por el desbordamiento del río Julupe durante el paso de la DT12E (2011) en la Zona 1 .....	59
Gráfico 47. Extensión de inundación dada por el modelo HEC-RAS en donde se valida la información de inundación por el desbordamiento del río Sensunapán durante el paso de la DT12E (2011) en la Zona 2.....	60
Gráfico 48. Extensión de inundación brindada por el modelo HEC-RAS en donde se valida la información de inundación por el desbordamiento del río Sensunapán durante el paso de la DT12E (2011) en la Zona 3.....	61
Gráfico 49. Extensión de inundación brindada por el modelo HEC-RAS en donde se valida la información de inundación por el desbordamiento del río Sensunapán durante el paso de la DT12E (2011) en la Zona 4.....	62
Gráfico 50. Perfil longitudinal del modelo Sensunapán – Zona 5.....	63
Gráfico 51. Perfil longitudinal del modelo Arenal Monserrat – Zona 1 .....	64
Gráfico 52. Perfil longitudinal del modelo Arenal Monserrat – Zona 2. ....	65
Gráfico 53. Perfil longitudinal del modelo Arenal Monserrat – Zona 3 .....	66
Gráfico 54. Mapas probabilistas de inundación en la cuenca Sensunapán - Zona 1. ....	68
Gráfico 55. Mapas probabilistas de inundación en la cuenca Sensunapán - Zona 2 .....	69
Gráfico 56. Mapas probabilistas de inundación en la cuenca Sensunapán - Zona 3 .....	70
Gráfico 57. Mapas probabilistas de inundación en la cuenca Sensunapán - Zona 4 .....	71
Gráfico 58. Mapas probabilistas de inundación en la cuenca Sensunapán - Zona 5 .....	72
Gráfico 59. Mapas probabilistas de inundación en la cuenca Arenal Monserrat - Zona 1 .....	73
Gráfico 60. Mapas probabilistas de inundación en la cuenca Arenal Monserrat - Zona 2 .....	74
Gráfico 61. Mapas probabilistas de inundación en la cuenca Arenal Monserrat - Zona 3 .....	75
Gráfico 62. Tramo 1 río Sensunapán período de retorno 50 años y duración 5 días y afectaciones registradas durante la Depresión Tropical 12E en la comunidad Bendición de Dios.....	77
Gráfico 63. Tramo 1 río Sensunapán período de retorno 5 años y duración 1 día y vista de la ubicación de las casas en la comunidad Río Julupe, margen izquierdo .....	78
Gráfico 64. Tramo 5: desembocadura río Sensunapán para período de retorno 250 años y duración 5 días .....	78
Gráfico 65. Tramo 1 río Arenal Monserrat período de retorno 5 años y duración 3 días .....	80
Gráfico 66. Tramo 1 río Arenal Monserrat período de retorno 250 años y duración 5 días.....	80
Gráfico 67. Tramo 2 río Arenal Monserrat período de retorno 250 años y duración 5 días.....	81
Gráfico 68. Tramo 2 río Arenal Monserrat período de retorno 250 años y duración 5 días.....	81
Gráfico 69. Tramo 3 río Arenal Monserrat período de retorno 250 años y duración 5 días.....	82
Gráfico 70. Fotografías representativas de los diferentes tipos constructivos identificados .....	87
Gráfico 71. Levantamiento de edificaciones expuestas en la cuenca Sensunapán - Zona Alta.....	88
Gráfico 72. Levantamiento de edificaciones expuestas en la cuenca Sensunapán - Zona Media .....	89
Gráfico 73. Levantamiento de edificaciones expuestas en la cuenca Sensunapán - Zona Baja .....	89
Gráfico 74. Levantamiento de edificaciones expuestas en la cuenca Arenal Monserrat - Zona 1 .....	90
Gráfico 75. Levantamiento de edificaciones expuestas en la cuenca Arenal Monserrat - Zona 2 .....	90
Gráfico 76. Levantamiento de edificaciones expuestas en la cuenca Arenal Monserrat - Zona 3 .....	91
Gráfico 77. Ocupantes promedio por m <sup>2</sup> en diferentes tipos constructivos – Sensunapán.....	95
Gráfico 78. Ocupantes promedio por m <sup>2</sup> en diferentes tipos constructivos - Arenal Monserrat .....	95
Gráfico 79. Gráfico de barras de área según tipo constructivo – Sensunapán .....	97
Gráfico 80. Gráfico de barras de área según tipo constructivo – Arenal Monserrat .....	97
Gráfico 81. Levantamiento de cultivos expuestos en la cuenca Sensunapán - Zona Media (Zona 4).....	99
Gráfico 82. Levantamiento de cultivos expuestos en la cuenca Sensunapán - Zona Baja (Zona 5).....	99
Gráfico 83. Función de vulnerabilidad típica en la plataforma CAPRA.....	103
Gráfico 84. Funciones de vulnerabilidad para edificaciones.....	105
Gráfico 85. Funciones de vulnerabilidad para cultivos .....	106
Gráfico 86. Número de registros por año para eventos de inundación en El Salvador .....	131
Gráfico 87. Curva empírica de excedencia de pérdidas por eventos frecuentes de inundación en El Salvador.....	137

## Índice de Cuadros

Cuadro 1. Principales eventos extremos que han afectado el país .....	3
Cuadro 2. Distribución de la población en ciudades susceptibles a inundación.....	15
Cuadro 3. Características generales de las Regiones Hidrográficas de El Salvador .....	17
Cuadro 4. Población en riesgo de inundación en las Regiones Hidrográficas de El Salvador.....	18
Cuadro 5. Características de las estaciones y periodos de tiempo con información disponible.....	36
Cuadro 6. Algunas comunidades afectadas por el desbordamiento de los ríos Sensunapán y Arenal Monserrat .....	57
Cuadro 7. Criterio de calibración usada en las cuencas de los ríos Sensunapán y Arenal Monserrat.....	58
Cuadro 8. Diferencia relativa entre la altura de calibración (observada) versus la altura computada por el modelo hidráulico HEC-RAS – Sensunapán Zona 5 .....	63
Cuadro 9. Diferencia relativa entre la altura de calibración (observada) versus la altura computada por el modelo hidráulico HEC-RAS – Arenal Monserrat Zona 1 .....	64
Cuadro 10. Diferencia relativa entre la altura de calibración (observada) versus la altura computada por el modelo hidráulico HEC-RAS – Arenal Monserrat Zona 2 .....	65
Cuadro 11. Diferencia relativa entre la altura de calibración (observada) versus la altura computada por el modelo hidráulico HEC-RAS – Arenal Monserrat Zona 3. ....	66
Cuadro 12. Archivos de amenaza de inundación generados para cada una de las cuencas analizadas .....	67
Cuadro 13. Tipos constructivos principales para edificaciones .....	86
Cuadro 14. Resumen de la información contenida en los archivos de exposición.....	92
Cuadro 15. Categorías de uso en Sensunapán.....	92
Cuadro 16. Categorías de uso en Arenal Monserrat.....	93
Cuadro 17. Resumen de información de valoración económica disponible para las dos cuencas de estudio .....	93
Cuadro 18. Base de datos de exposición de edificaciones para el análisis (información indicativa).....	96
Cuadro 19. Resumen de la información de edificaciones según tipo constructivo - Sensunapán .....	96
Cuadro 20. Resumen de la información de edificaciones según tipo constructivo - Arenal Monserrat.....	97
Cuadro 21. Cultivos más relevantes identificados en la zona de estudio .....	98
Cuadro 22. Resumen de la información de cultivos según tipo de cultivo – Sensunapán Zonas 4 y 5 .....	100
Cuadro 23. Discriminación de daños por inundación en sistemas constructivos .....	104
Cuadro 24. Asignación de funciones por tipo de cultivo y estacionalidad.....	106
Cuadro 25. Resumen e integración de resultados para las 5 zonas de Sensunapán.....	125
Cuadro 26. Resumen y unificación de resultados para las 3 zonas de Arenal Monserrat .....	125
Cuadro 27. Resumen y unificación de resultados para las zonas de cultivos en la cuenca Sensunapán .....	125
Cuadro 28. Características de los tipos de eventos más relevantes registrados en DesInventar El Salvador .....	127
Cuadro 29. Características de los eventos de inundación reportados en DesInventar El Salvador .....	128
Cuadro 30. Principales campos en la base de datos DesInventar .....	128
Cuadro 31. Categorías de eventos y causas asociadas .....	130
Cuadro 32. Eventos de inundación de mayor impacto registrados entre 1970 y 2012 en DesInventar El Salvador ..	131
Cuadro 33. Criterios de agrupación temporal .....	132
Cuadro 34. Modelo de costos.....	136

## **ANEXOS**

**ANEXO 1** - PROCEDIMIENTO ANALÍTICO DETALLADO PARA AMENAZA POR LLUVIAS

**ANEXO 2** - PROCEDIMIENTO ANALÍTICO DETALLADO PARA AMENAZA POR INUNDACIONES

**ANEXO 3** - INFORMES FINALES DE CAMPO DE LOS CONSULTORES NACIONALES. LEVANTAMIENTO DE ELEMENTOS EXPUESTOS

**ANEXO 4** - FICHAS CON LA INFORMACIÓN ESPECÍFICA DE CADA UNO DE LOS TIPOS CONSTRUCTIVOS IDENTIFICADOS

**ANEXO 5** - FICHAS CON LA INFORMACIÓN ESPECÍFICA DE CADA UNO DE LOS TIPOS DE CULTIVOS

## 1. Introducción y objetivos

El Salvador se encuentra ubicado en una zona de alta pluviosidad con incidencia de eventos de origen meteorológico incluyendo huracanes en todas sus categorías. La base de datos histórica indica que en el país se han registrado más de 2,100 eventos de inundación a lo largo de un siglo (DesInventar, 2013). De los eventos de inundación registrados entre 1900 y 2012 se encuentra que las causas más comunes son las lluvias (61% de los eventos históricos), las depresiones tropicales (19%), los huracanes (10%) y tormentas tropicales (6%) (DesInventar, 2013). Las pérdidas económicas y humanas reportadas varía de un evento a otro pero la información indica que varios eventos individuales generaron pérdidas económicas de varios millones de dólares, especialmente por el impacto en zonas cultivadas.

Los eventos más catastróficos de la década de 1990 corresponden al Huracán Mitch, que inició como una depresión tropical y posteriormente se intensificó para convertirse en un huracán que se formó la noche del miércoles 21 de octubre de 1998 en el Sudoeste del mar Caribe, al Nordeste de Colombia. Siguió con rumbo al Norte, hacia Jamaica donde se intensificó rápidamente. El domingo 25 se convirtió en un huracán violento, su fuerza aumentó hasta alcanzar la Categoría 5, la máxima de la escala. El lunes 26, el Mitch produjo vientos de 290 km/h, convirtiéndose en el cuarto huracán más intenso jamás registrado en la cuenca del Atlántico a la fecha. El impacto del huracán Mitch en el Salvador, según estimaciones de la CEPAL, alcanzó un monto de USD\$ 388.1 millones

En el 2005 también hubo gran afectación por inundaciones generadas por fuertes lluvias que cayeron en el territorio como consecuencia del paso del Huracán Stan, que fue la decimoctava tormenta tropical y el décimo huracán de la temporada de huracanes del océano Atlántico en 2005. Fue una tormenta relativamente fuerte que, mientras se estableció como huracán de Categoría 1, durante un corto período, causó inundaciones y deslizamientos en los países centroamericanos, además del sur de México durante los días 3, 4 y 5 de octubre de 2005. Simultáneamente al Huracán Stan, en El Salvador se presentó la Erupción del Volcán Ilamatepec. Según estimaciones de la CEPAL, las pérdidas y daños de ambos eventos ascendieron a USD\$ 355.6 Millones.

En 2009 el Huracán IDA provocó grandes inundaciones dejando a su paso varios damnificados y daños en infraestructura, dejando del orden de USD\$239.19 millones en pérdidas y daños según datos de la CEPAL.

A finales del mes de mayo del año 2010, la Tormenta Tropical Agatha ocasionó varios eventos de inundación que produjeron daños en viviendas y cultivos, así como la necesidad de evacuar gran cantidad de personas. Este fue el primer fenómeno ciclónico del Océano Pacífico. Las mayores precipitaciones se registraron entre el día 29 y 30 de mayo, con un registro máximo acumulado de 483 mm en 24 horas. Según la CEPAL el monto de pérdidas y daños para este

evento alcanzó la suma de USD\$112.1 millones. En este mismo año se generaron grandes eventos de inundación a causa de la Depresión Tropical Alex la cual se convirtió en Tormenta Tropical luego de hacer contacto en el Golfo de México, específicamente desde la península de Yucatán hacia las costas nororientales de México permitiendo el ingresando humedad desde el Océano Pacífico hacia El Salvador. Adicionalmente, el paso de La Depresión Tropical Matthew dejó grandes pérdidas económicas a su paso. Ésta se ubicó al Noroeste de Guatemala a 135 kilómetros al Sureste de Villahermosa México, con movimiento hacia el Noroeste con 17 Kilómetros por hora, y vientos sostenidos de 45 Kilómetros por hora, con presión central de 1003 milibares. La Zona de Convergencia Intertropical se posicionó frente a las costas de Centroamérica, desplazando abundante humedad desde el Pacífico y Mar Caribe, generando lluvias en todo el territorio centroamericano.

En 2011 se produjo la Depresión Tropical 12E, la cual inicio el día 9 de octubre como una baja presión al suroeste de Guatemala favoreciendo el ingreso de humedad y las primeras lluvias en el territorio nacional de El Salvador y en los días posteriores activó la llamada Zona de Convergencia Intertropical, consolidando un cinturón de nubes que normalmente está alejado de la zona costera lo cual se mantuvo sobre la región descargando lluvias. En El Salvador, la DT 12E y Sistema Depresionario afectó durante el período del 10 al 20 de Octubre y es considerado el evento meteorológico más severo registrado en el país con un máximo de lluvia acumulada de 1513 mm, equivalente al 42% de la lluvia anual promedio del período 1971- 2000, y un promedio (areal) acumulado en todo el territorio de 762 mm. Según la CEPAL el monto de pérdidas y daños de este evento alcanzó la suma de USD\$902.3 millones.

Estos eventos son ejemplo del tipo de situaciones a las cuales se puede ver sometido el país indicando con esto el alto nivel de riesgo de la infraestructura, zonas productivas y las poblaciones a eventos como las inundaciones. A continuación se presenta un cuadro consolidado de algunos de los principales eventos extremos que han afectado el país.

**Cuadro 1. Principales eventos extremos que han afectado el país**

<b>PERDIDAS Y DAÑOS</b>	<b>HURACAN MITCH 1998</b>	<b>TORMENTA IDA 2009</b>	<b>TORMENTA AGATHA 2010</b>	<b>DEPRESION TROPICAL 12E 2011</b>
<i>Fallecidos</i>	240	198	12	34
<i>Afectados</i>	84,000	122,000	120,000	500,000
<i>Albergados</i>	55,000	4,200	14,800	56,000
<i>Lluvia máxima acumulada</i>	861 mm	483 mm	672 mm	1,513 mm
<i>Lluvia promedio Nacional</i>	472 mm	248 mm	274 mm	747 mm
<i>Daños y pérdidas estimadas</i>	USD\$388.1 millones 3.26% del PIB	USD\$239.19 millones 1.1 % del PIB	USD\$112.1 millones 0.5% del PIB	USD\$902.3 millones 4.25% del PIB
<i>Agricultura</i>	Pérdidas de granos básicos, café, caña de azúcar por USD\$112 millones	Daños en cosecha de granos básicos y cultivo de café USD\$27.5 millones	Daños en cultivos de granos básicos y otros por USD\$11.4 millones	Daños en cultivos de granos básicos y otros por USD\$105.3 millones
<i>Territorio Afectado</i>	Zona oriental del país y Sonsonate (aproximadamente 40% del territorio)	Zona central: San Vicente y La Paz	Zona oriental y costera	181 municipios afectados, 70% del país
<i>Puentes</i>	10 destruidos 68 dañados	24 colapsados 55 dañados	25 dañados	8 colapsados 26 dañados
<i>Viviendas dañadas y en riesgo</i>	10,372	2,350	8,272	8,118
<i>Daños en carreteras</i>	Daños en 60% de la red vial	132 carreteras	61 carreteras	40% de la red vial
<i>Escuelas dañadas</i>	405	111	378	947
<i>Establecimientos de salud</i>	20	28	20	19 hospitales 238 U. de salud

Fuente: MARN y CEPAL.

De acuerdo con la situación general de riesgo en la que se encuentra el país, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) conjuntamente con el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales del Salvador (MARN) han planteado la realización del presente proyecto en el cual se pretende llevar a cabo una evaluación del riesgo de desastres por inundación para El Salvador mediante la aplicación de la metodología de análisis de riesgo probabilista CAPRA (*Central American Probabilistic Risk Assessment*) y construir capacidad local para realizar este tipo de estudios a través del trabajo conjunto con el MARN. El presente informe corresponde al informe final del proyecto en el cual se presenta el perfil de riesgo por inundaciones para El Salvador y los análisis de riesgo por inundación en cuencas seleccionadas.

El presente informe resume las actividades y resultados de las actividades realizadas en el marco del proyecto en forma conjunta entre el MARN y el grupo consultor liderado por el CIMNE, con la coordinación y soporte del BID. El Capítulo 2 presenta un resumen de la metodología general de evaluación del riesgo adoptada en el presente caso. El Capítulo 3 presenta el contexto general del país en relación al riesgo por inundación. Posteriormente, el Capítulo 4 hace referencia al proceso de evaluación de la amenaza de lluvias y de inundación en los tramos críticos seleccionados para el análisis. El Capítulo 5 presenta lo relacionado al inventario de componentes expuestos mientras que el Capítulo 6 resume los resultados del análisis de vulnerabilidad de los principales tipos de componentes identificados. Los resultados del análisis de riesgo se presentan en el Capítulo 7. El análisis de la curva empírica de pérdidas basada en los datos de las pérdidas históricas recopilados a nivel nacional se incluye en el Capítulo 8. Finalmente, el Capítulo 9 presenta la interpretación de los resultados del análisis de riesgo en las cuencas seleccionadas, el análisis de la concentración del riesgo y la interpretación final de los resultados del análisis para efectos de toma de decisiones.

## **2. Metodología general para la evaluación del riesgo**

### **2.1 Introducción**

Una de las actividades fundamentales de la gestión del riesgo de desastres a nivel de país es la evaluación del riesgo de catástrofe, o de eventos extremos, para lo cual es necesario aplicar metodologías confiables que permitan una adecuada estimación y cuantificación del potencial de pérdidas en un tiempo de exposición determinado. No obstante, aunque se han desarrollado a nivel internacional diversas metodologías para la evaluación detallada del riesgo para diferentes tipos de amenazas naturales, pocas metodologías permiten realizar un análisis a nivel país por dos razones principales: primero, la falta de información detallada que impide la conformación de bases de datos robustas para describir la exposición y, segundo, la falta de metodologías que permitan modelar de manera integrada las amenazas, la vulnerabilidad de los elementos expuestos y el riesgo que se deriva de su respectiva integración y convolución.

Para alcanzar, entonces, el objetivo general de identificar y cuantificar el riesgo de catástrofe de un país, es necesario desarrollar un método que permita tener en cuenta las amenazas naturales en forma integral, que incluya de la manera más completa posible la exposición de los bienes de infraestructura –teniendo en cuenta sus principales características–, que considere la vulnerabilidad específica de cada componente de dicha infraestructura y que finalmente permita la evaluación del riesgo mediante un proceso de cálculo probabilista apropiado teniendo en cuenta las incertidumbres propias de un proceso de este tipo, las inevitables limitaciones en la información y la capacidad de cómputo electrónico.

En la mayoría de los casos es necesario utilizar ciertos enfoques o criterios de simplificación y agregación de información, debido a la ausencia de datos o a la inherente baja resolución de la información. Esta circunstancia en ocasiones significa sacrificar algunas características técnico-científicas o econométricas, como la exactitud y la completitud, consideradas en general como deseables e incluso como ineludibles cuando de riesgo se trata.

Este informe presenta la evaluación del riesgo catastrófico por inundación para dos cuencas prioritarias en El Salvador. La metodología probabilista utilizada es considerada la más robusta para este tipo de modelación e identifica los aspectos más importantes del riesgo de catástrofe con fines de orientación de prioridades del país en materia de gestión del riesgo de desastres en general.



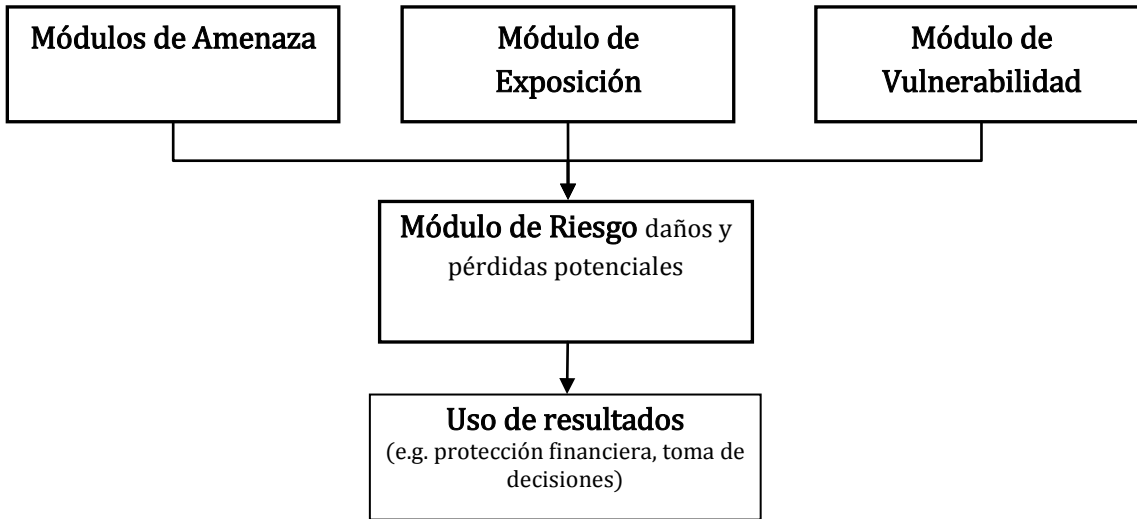
## 2.2 Evaluación probabilista del riesgo

La frecuencia de eventos catastróficos es particularmente baja por lo cual la información histórica, es en general muy limitada. Considerando las posibilidades de eventos de alta capacidad destructiva en el futuro, la estimación del riesgo debe enfocarse en modelos probabilistas los cuales pueden utilizar la limitada información histórica disponible para pronosticar, de la mejor manera posible, las consecuencias de futuros eventos considerando en forma simultánea las inevitables altas incertidumbres involucradas en los análisis.

Un país puede sufrir las consecuencias de diferentes tipos de eventos naturales. En particular, El Salvador por encontrarse en una zona crítica de Centro-América está sometido a diferentes tipos de eventos incluyendo sismos, huracanes, volcanes con todas sus posibles consecuencias que incluyen inundaciones, deslizamientos, avalanchas, mareas de tormenta, vientos fuertes y otros. El presente estudio incluye únicamente los eventos de inundación sean estos generados por lluvias que hacen parte del régimen normal de precipitaciones y sus variaciones anuales y por lluvias producidas por huracanes.

La estimación del riesgo debe ser prospectiva, anticipando eventos científicamente posibles que pueden ocurrir en el futuro. Para el caso de eventos de precipitaciones y de lluvias huracanadas se utiliza la información meteorológica disponible, tanto por registros pluviográficos o pluviométricos disponibles como el registro histórico de los huracanes que han afectado la zona de estudio. Debido a las altas incertidumbres inherentes a los modelos de análisis con respecto a la severidad y a la frecuencia de ocurrencia de los eventos, el modelo de riesgo se basa en formulaciones probabilistas que incorporan dicha incertidumbre en la evaluación del riesgo. El modelo de riesgo probabilista, construido a partir de una secuencia de módulos, cuantifica las pérdidas potenciales tal como se esquematiza en el Gráfico 1. Los resultados del análisis de riesgo permiten realizar una serie de actividades relacionadas con la gestión del riesgo entre las cuales se incluyen la reducción y mitigación del riesgo, la protección financiera y la preparación de planes de emergencia y de reconstrucción en caso de desastre.

**Gráfico 1. Esquema general del análisis de riesgo probabilista**



### 2.3 Módulos de análisis para la evaluación del riesgo

Los módulos de análisis de amenazas, de exposición, de vulnerabilidad y de riesgo tienen las siguientes funciones específicas:

- a) **Módulo de amenazas:** este módulo permite calcular la amenaza asociada a todos los eventos factibles que podrían ocurrir, a un grupo de eventos seleccionados, o incluso, a un solo evento relevante. Para cada tipo de fenómeno natural, usando este módulo, es posible calcular el valor máximo probable de la intensidad que lo caracteriza para diferentes tasas de ocurrencia o períodos de retorno. En este módulo se produce, para cada tipo de amenaza, un archivo tipo AME (.ame de amenaza), en el cual se incluyen múltiples mallas, sobre el territorio estudiado, de los diferentes parámetros de intensidad de los fenómenos considerados. Cada malla es un escenario del nivel de intensidad alcanzado por eventos históricos o eventos generados en forma estocástica, con sus respectivas frecuencias de ocurrencia. Para este caso el parámetro de intensidad de inundaciones seleccionado corresponde al tirante máximo de inundación o profundidad máxima de inundación en cada ubicación geográfica.
  
- b) **Módulo de exposición:** este módulo da cuenta de la descripción de los elementos o activos expuestos que pueden ser afectados. Se basa en archivos en formato tipo shape que corresponden a la infraestructura expuesta que va a ser incluida en el análisis de riesgo. La información requerida para estos archivos es la siguiente:

- Identificación del tipo de elementos expuestos
- Localización
- Valor expuesto
- Tipificación del elemento para posteriormente asociarle una función de vulnerabilidad

En este caso el módulo de exposición son las bases de datos de elementos expuestos que incluyen vivienda, edificaciones y zonas cultivadas.

- c) Módulo de vulnerabilidad: este módulo permite la generación de funciones de vulnerabilidad con base en la modificación o utilización directa de funciones ya existentes que se seleccionan a partir de una librería de funciones, o mediante la generación de nuevas funciones a partir de información específica de la clase de estructura, activo o elemento expuesto considerado incluyendo para el presente caso las zonas de cultivos. La asignación de la función de vulnerabilidad a cada uno de los componentes de la base de datos de exposición se realiza sobre el archivo en el formato shape procesado en el módulo de exposición.
- d) Módulo de riesgo: este módulo realiza la integración-convolución de la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de evaluar el riesgo o las consecuencias o efectos potenciales. El riesgo puede expresarse en términos de daño e impactos físicos, pérdida económica absoluta o relativa y/o efectos sobre la población.

Una vez estimado el daño físico esperado (valor potencial promedio y su dispersión) en porcentaje o en valor absoluto para cada uno de los activos o componentes expuestos incluidos en el análisis, es posible realizar estimativos de diferentes parámetros o métricas útiles para el análisis propuesto, resultado de obtener la curva de probabilidad de excedencia de pérdidas (LEC o Loss Exceedance Curve en inglés). Este estudio se concentra, en la evaluación del riesgo por inundaciones en cuencas seleccionadas y valoraciones aproximadas a nivel país utilizando como medida de riesgo principal la Pérdida Máxima Probable (PML o Probable Maximum Loss en inglés) para diferentes periodos de retorno y la Pérdida Anual Esperada (AAL o Average Annual Loss en inglés) también conocida como prima técnica de riesgo. Con base en estos resultados, se estima la concentración del riesgo y se realizan análisis e interpretaciones adicionales útiles en la gestión del riesgo de desastre. Los valores de PML y AAL son los principales resultados de este informe. Estas medidas o métricas son de especial importancia para establecer una estrategia integral de gestión del riesgo por inundaciones que incluyan actividades de prevención, mitigación, estrategias de manejo y protección financiera para cubrir la responsabilidad fiscal del Estado y atención de emergencias principalmente.

La metodología para la evaluación del riesgo en las cuencas críticas seleccionadas incluye los siguientes aspectos:

- a) Evaluación de la amenaza por lluvias no huracanadas mediante métodos probabilistas: con base en los registros de intensidad de lluvias disponibles se generan una serie de tormentas estocásticas que simulan la intensidad y frecuencia de los eventos críticos.
- b) Evaluación de la amenaza por lluvias huracanadas: con base en las trayectorias de los principales huracanes históricos registrados y las intensidades de precipitaciones se generan una serie de tormentas estocásticas de lluvia huracanadas asociadas a las familias de huracanes.
- c) Evaluación de la amenaza por inundaciones mediante métodos probabilistas simplificados: los eventos estocásticos de lluvia permiten generar la distribución de intensidades de inundación mediante modelos de tránsito de crecientes en 1, 2 o 3 dimensiones.
- d) Inventario de bienes expuestos: se realiza mediante el levantamiento de información a través de imágenes de satélite y fotografías aéreas y mediante trabajos de levantamiento de información en campo. El nivel de resolución es predio a predio en algunos casos y zonas uniformemente pobladas en los casos en que se dificulta el levantamiento de la información por problemas de accesibilidad.
- e) Funciones de vulnerabilidad: los diferentes tipos constructivos identificados en las zonas críticas de estudio se caracterizan mediante una función de vulnerabilidad que da cuenta de la capacidad de las edificaciones para resistir la acción de los diferentes eventos considerados. Estas funciones de vulnerabilidad representan el comportamiento esperado de las edificaciones de cada tipo estructural particular, por lo que su uso es adecuado en términos estadísticos cuando existe un inventario amplio de activos expuestos. También se desarrollan funciones de vulnerabilidad para los diferentes tipos de cultivos en las zonas expuestas a inundación.
- f) Evaluación del riesgo: la evaluación del riesgo se lleva a cabo mediante la asociación de las amenazas consideradas sobre el inventario de activos expuestos con las funciones de vulnerabilidad relacionadas. Para el efecto se emplea la herramienta de evaluación de riesgo CAPRA-GIS. Se evalúa, entonces, el porcentaje de daños esperado en cada una de las edificaciones y zonas de cultivo expuestas para cada uno de los escenarios planteados y para el análisis probabilista integral. La valoración del riesgo se presenta en términos de:

- Porcentaje de afectación física de las construcciones.
- Pérdidas anuales esperadas aproximadas por predio.
- Pérdidas económicas máximas probables para el portafolio de construcciones.
- Pérdidas y porcentaje de daño esperado para escenarios específicos.
- Pérdidas económicas esperadas y máximas probables en zonas de cultivos.

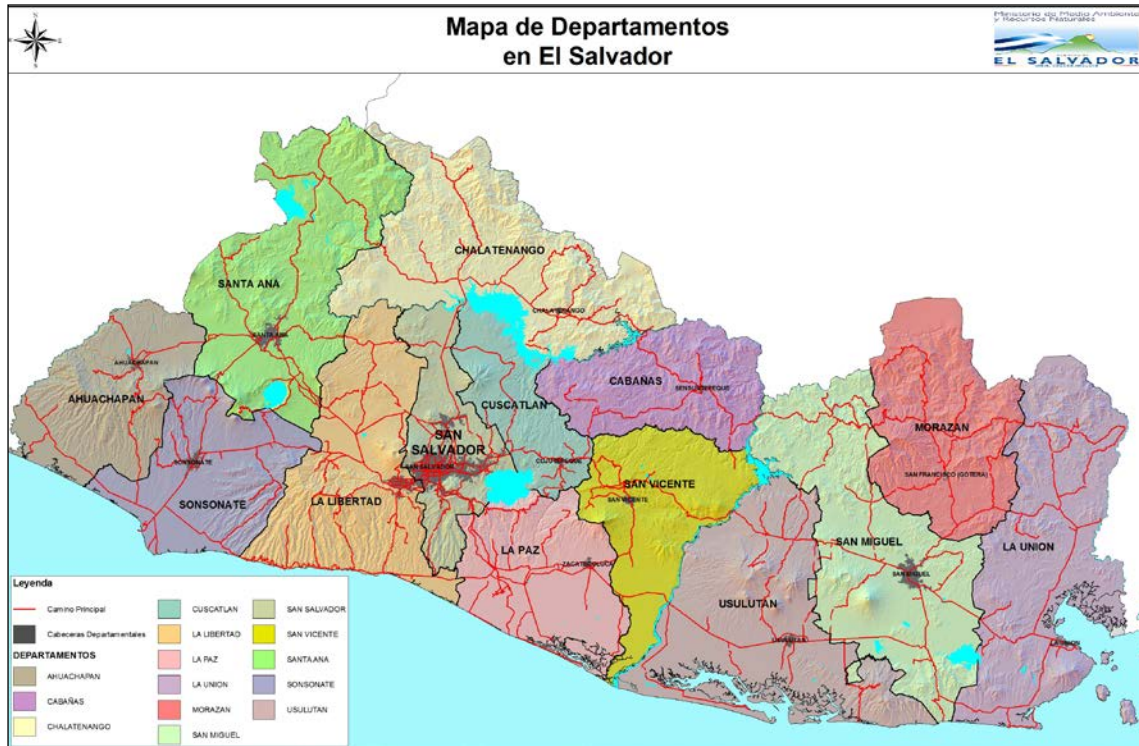
### **3. Contexto general del país en relación al riesgo de inundación**

#### **3.1 Generalidades**

El Salvador se encuentra en una región de Centroamérica caracterizada por un alto nivel de pluviosidad y por la eventual afectación de huracanes y tormentas tropicales provenientes de las cuencas del Atlántico y del Pacífico. Simultáneamente el país se caracteriza por tener un terreno montañoso con zonas planas en la zona del litoral Pacífico. Las altas precipitaciones en zonas de montaña generan caudales importantes de agua que deben transitar por los cauces de los ríos generando en ocasiones desbordamientos de los cauces principales y con esto eventos de inundaciones con impactos importantes en la población y zonas productivas del país. Simultáneamente el difícil control urbanístico en zonas de alta densidad de población y los bajo niveles socioeconómicos de amplios sectores de la población llevan a la ocupación ilegal y sin control de las zonas cercanas a los cauces que usualmente corresponden a las áreas de reservas para inundación en los ríos que atraviesan las ciudades. Esta situación genera condiciones especiales para la ocurrencia de desastres causados por la salida del cauce del flujo normal ante eventos extraordinarios o ante la obstrucción del flujo normal en eventos con alta frecuencia de ocurrencia.

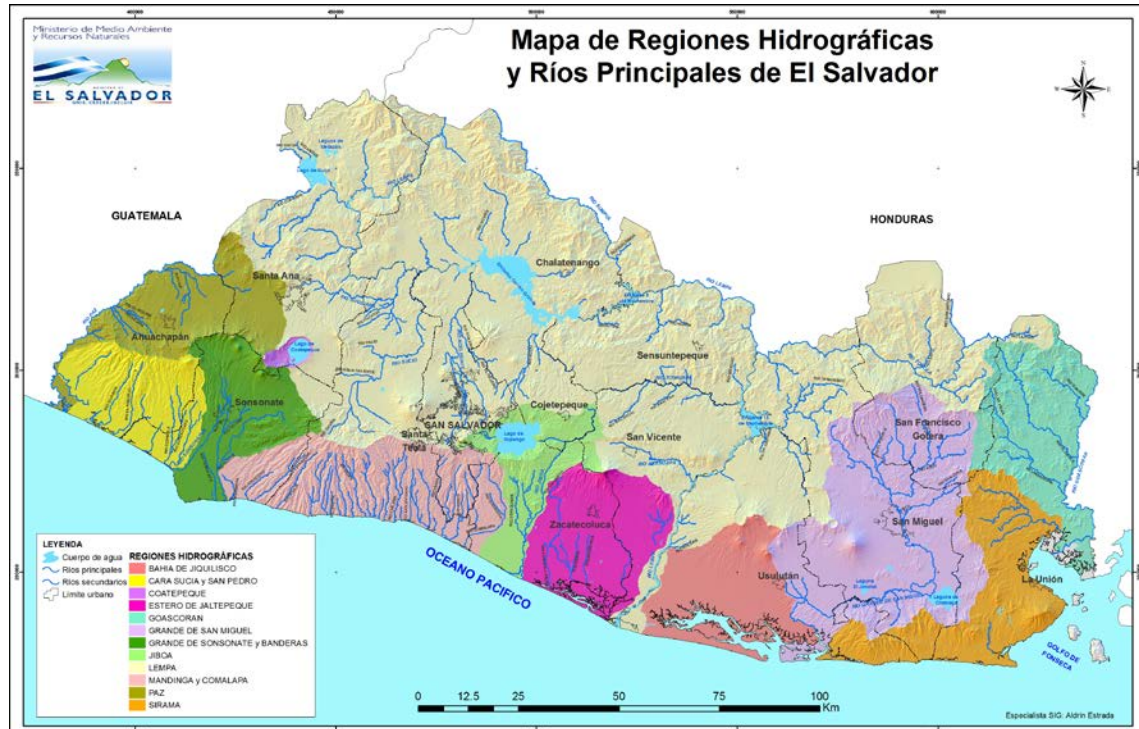
En los Gráficos 2 al Gráfico 7 se presentan una serie de mapas de información fundamentales para el análisis del perfil de riesgo por inundación en el país.

**Gráfico 2. Mapa de departamentos de El Salvador**



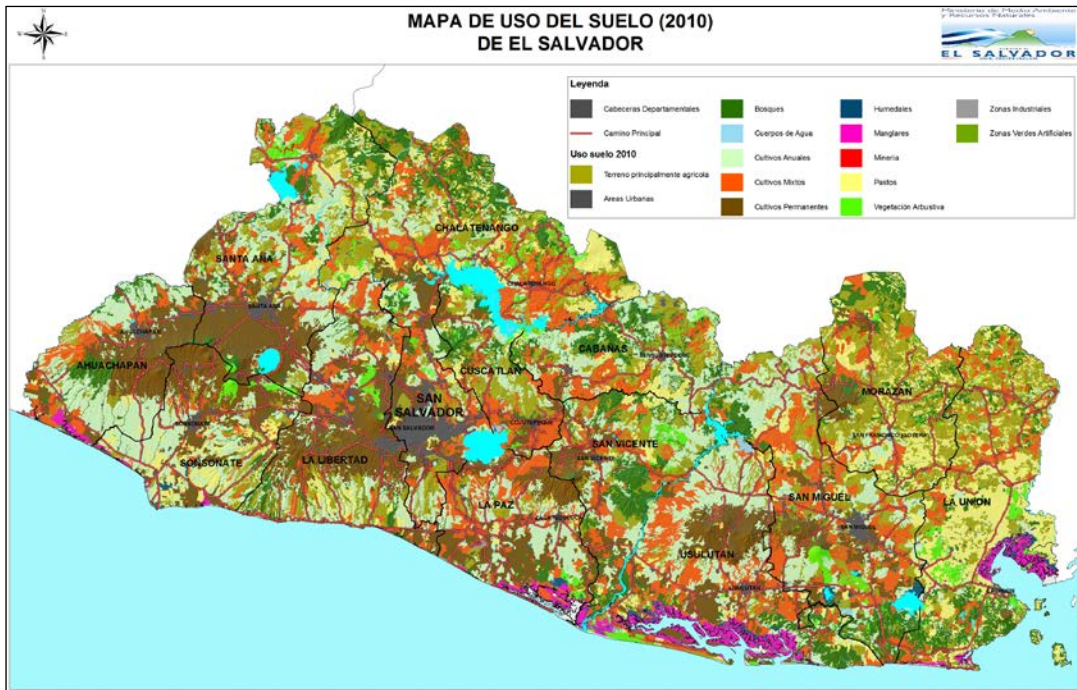
Fuente: MARN

**Gráfico 3. Mapa de regiones hidrográficas y ríos principales**



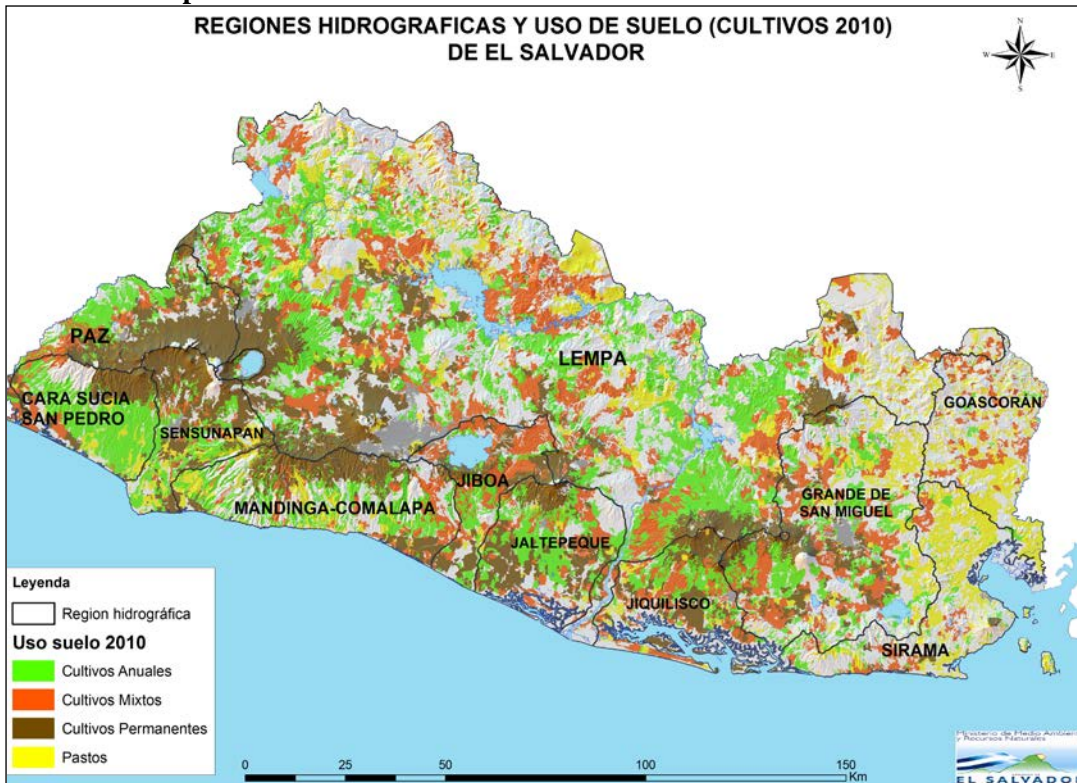
Fuente: MARN

**Gráfico 4. Mapas de usos de suelo**



Fuente: MARN

**Gráfico 5. Mapa de zonas cultivadas**



Fuente: MARN

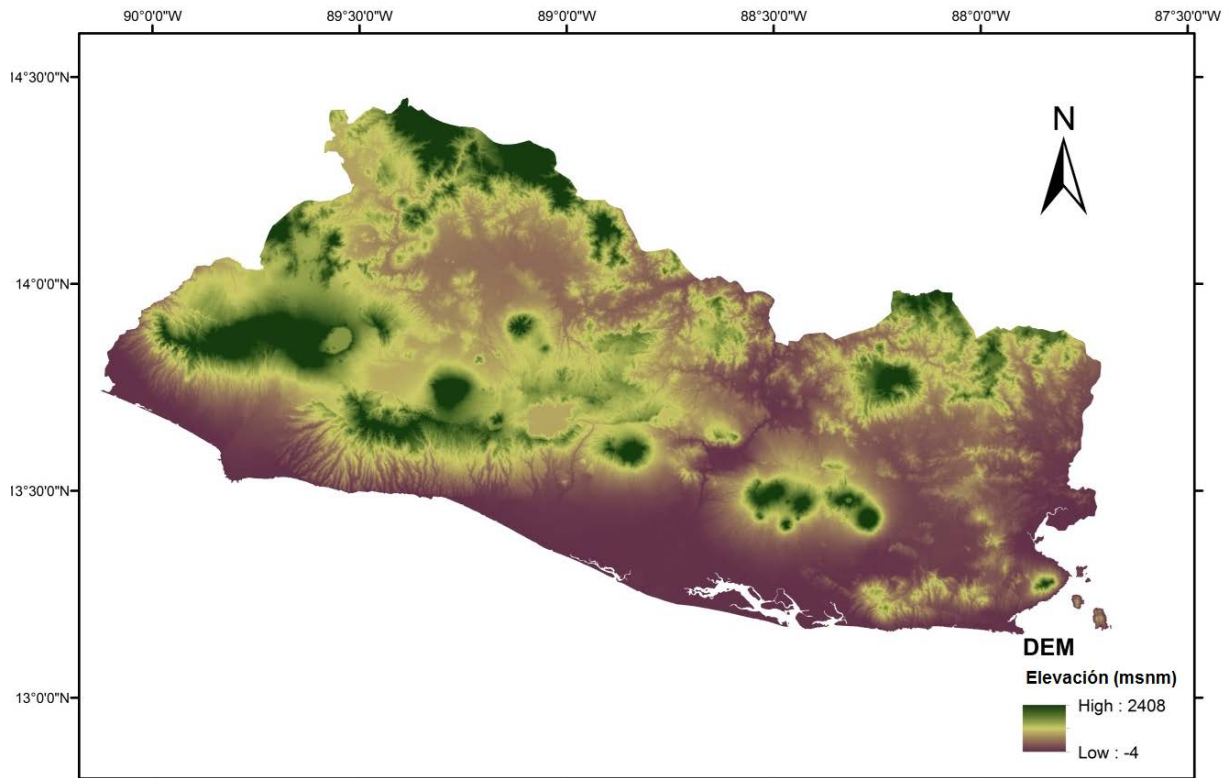


**Gráfico 6. Mapa de susceptibilidad a inundación en El Salvador**



Fuente: MARN

**Gráfico 7. Modelo de elevación digital de El Salvador, resolución 30mx30m**



Fuente: ASTER GDEM, 2013.

Adicionalmente el Cuadro 2 presenta el listado de las principales poblaciones ubicadas en zonas susceptibles a inundación clasificadas por Departamento.

**Cuadro 2. Distribución de la población en ciudades susceptibles a inundación**

<b>Departamento</b>	<b>Municipio</b>	<b>Hombres</b>	<b>Mujeres</b>	<b>Total</b>
Ahuachapán	Jujutla	5,444	11,422	16,866
Ahuachapán	San Francisco Menéndez	11,543	24,200	35,743
La Libertad	Chiltiupán	2,333	4,646	6,979
La Libertad	Huizucar	1,418	3,010	4,428
La Libertad	Jicalapa	2,330	4,732	7,062
La Libertad	La Libertad	14,167	30,442	44,609
La Libertad	Tamanique	3,230	6,482	9,712
La Libertad	Teotepeque	2,701	5,528	8,229
La Paz	El Rosario	2,968	6,176	9,144
La Paz	San Antonio Masahuat	140	298	438
La Paz	San Juan Nonualco	741	1,502	2,243
La Paz	San Juan Talpa	864	2,012	2,876
La Paz	San Juan Tepezontes	243	420	663
La Paz	San Luis La Herradura	9,992	20,826	30,818
La Paz	San Luis Talpa	6,646	14,304	20,950
La Paz	San Pedro Masahuat	9,097	19,320	28,417
La Paz	San Pedro Nonualco	138	328	466
La Paz	Santiago Nonualco	4,850	9,980	14,830
La Paz	Zacatecoluca	4,211	8,450	12,661
La Unión	Conchagua	12,318	25,864	38,182
La Unión	El Carmen	3,781	8,166	11,947
La Unión	El Sauce	338	742	1,080
La Unión	Intipuca	1,541	3,120	4,661
La Unión	La Unión	10,797	23,936	34,733
La Unión	Pasaquina	3,493	7,850	11,343
La Unión	San Alejo	2,768	6,252	9,020
San Miguel	Chirilagua	3,746	8,306	12,052
San Miguel	El Transito	1,089	2,310	3,399
San Miguel	San Miguel	1,987	4,604	6,591
San Salvador	Panchimalco	1,010	2,032	3,042
San Salvador	Rosario De Mora	558	1,116	1,674
San Vicente	San Vicente	230	422	652
San Vicente	Tecoluca	5,339	10,778	16,117
Sonsonate	Acajutla	16,627	34,358	50,985
Sonsonate	Cuisnahuat	1,544	3,008	4,552
Sonsonate	Santa Isabel Ishuatán	2,526	5,124	7,650

Departamento	Municipio	Hombres	Mujeres	Total
Sonsonate	Sonsonate	4,192	8,348	12,540
Usulután	Concepción Batres	2,583	5,650	8,233
Usulután	Ereguayquin	415	960	1,375
Usulután	Jiquilisco	11,591	23,848	35,439
Usulután	Jucuarán	4,591	9,322	13,913
Usulután	Puerto El Triunfo	7,480	16,026	23,506
Usulután	San Agustín	159	318	477
Usulután	San Dionisio	2,361	5,168	7,529
Usulután	Usulután	3,958	8,390	12,348
<b>Total</b>		<b>190,078</b>	<b>400,096</b>	<b>590,174</b>

Fuente: MARN.

### 3.2 Información general de cuencas a nivel país

En el Gráfico 8 se presenta un mapa general del país en el cual se identifican las diferentes regiones hidrográficas.

**Gráfico 8. Principales regiones hidrográficas del país**



Fuente: MARN.

A partir de la información anterior y con base en el análisis de datos hidrológicos oficiales reportados por el MARN y en los datos disponibles en la Dirección General de Estadística y Censos (2008), es posible establecer los parámetros y características principales de las cuencas

más importantes a nivel del país y en las cuales existe clara susceptibilidad a que se presenten eventos de inundación con afectación a la población, a la infraestructura expuesta o a las áreas productivas. El Cuadro 3 presenta las características y parámetros principales asociados a cada una de éstas y el Cuadro 4 presenta las poblaciones principales con riesgo de inundación en cada región hidrográfica.

**Cuadro 3. Características generales de las Regiones Hidrográficas de El Salvador**

<b>Región Hidrográfica</b>	<b>Área total (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Población total</b>	<b>Área cultivada (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área plana* (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área montañosa* (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Ríos Principales</b>
<b>Bahía de Jiquilisco</b>	828	275,355	564	691	70	Grande de San Miguel
<b>Cara Sucia San Pedro</b>	767	230,522	617	414	347	Sensunapán, Sucio
<b>Coatepeque</b>	65	21,144	32	-	-	-
<b>Estero de Jaltepeque</b>	963	312,451	689	821	115	Jiboa
<b>Goascorán</b>	1,044	194,802	475	430	541	Goascorán
<b>Grande de San Miguel</b>	2,336	828,084	1,417	1,577	722	-
<b>Grande de Sonsonate Banderas</b>	774	548,585	632	522	250	-
<b>Jiboa</b>	680	556,529	490	300	291	-
<b>Lempa</b>	10,102	5,006,989	5,753	3,852	5,539	El Obraje, Acahuapa, Arenal Monserrat, Lempa, Sumpul, Suquiapa, Titihuapa, Torola
<b>Mandinga Comalapa</b>	1,294	528,638	950	314	979	Brazo Río Tihuapa
<b>Paz</b>	919	576,861	758	538	354	Paz
<b>Sirama</b>	1,083	220,948	520	649	413	-

Fuente: MARN.

\* Área plana corresponde a zonas con pendiente menor al 15%, y área montañosa a zonas con pendiente mayor al 15%.

**Cuadro 4. Población en riesgo de inundación en las Regiones Hidrográficas de El Salvador**

<b>Región Hidrográfica</b>	<b>Principales poblaciones con riesgo de inundación</b>	<b>Habitantes de poblaciones principales en zonas de alto riesgo</b>
<b>Bahía de Jiquilisco</b>	Tecoluca, Jiquilisco, Puerto El Triunfo, San Agustín, San Dionisio, Usulután	79,117
<b>Cara Sucia San Pedro</b>	Jujutla, San Francisco Menéndez, Acajutla	78,102
<b>Estero de Jaltepeque</b>	Rosario, San Juan Nonualco, San Luis La Herradura, San Pedro Masahuat, San Pedro Nonualco, Santiago Nonualco, Zacatecoluca, San Vicente, Tecoluca	84,664
<b>Goascoran</b>	El Sauce, Pasaquina	12,423
<b>Grande de San Miguel</b>	El Carmen, Chirilagua, El Transito, San Miguel, Concepción Batres, Ereaguayquin, Jucuaran, Usulután	39,592
<b>Grande de Sonsonate Banderas</b>	Acajutla, Sonsonate	31,763
<b>Jiboa</b>	Rosario, San Antonio Masahuat, San Juan Tepezontes, San Luis Talpa, San Pedro Masahuat, San Pedro Nonualco	45,479
<b>Lempa</b>	San Vicente, Jiquilisco, San Agustín	4,108
<b>Mandinga Comalapa</b>	San Juan Talpa, San Luis Talpa, Panchimalco, Rosario De Mora, Cuisnahuat, Santa Isabel Ishuatan, Sonsonate	109,178
<b>Sirama</b>	Conchagua, El Carmen, Intipuca, La Unión, San Alejo, Chirilagua, Jucuaran	105,749

Fuente: MARN.

### 3.3 Selección de cuencas y tramos críticos para el análisis

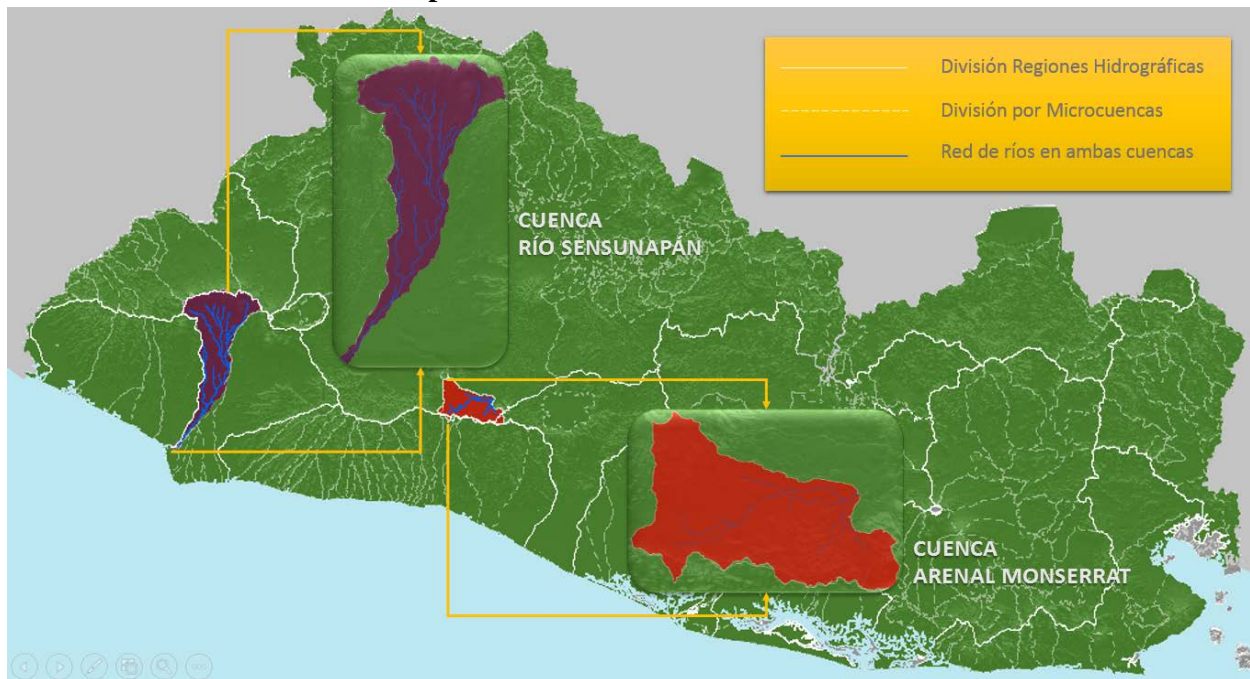
Para efectos de cuantificar las eventuales pérdidas económicas esperadas por eventos de inundación se identificaron inicialmente las principales cuencas susceptibles a este tipo de eventos. De la información disponible se identifican inicialmente cinco (5) cuencas principales en las cuales se pueden presentar situaciones potencialmente críticas y que corresponden a las cuencas de los ríos Sensunapán, Arenal Monserrat o Acelhuate, Amayo, Huisa y Jiboa.

Utilizando como criterios principales la relevancia en el contexto socio-económico del país y la disponibilidad de información, se seleccionan dos cuencas específicas que corresponden a las

cuencas Sensunapán y Arenal Monserrat como las más propicias para ser objeto de una evaluación de detalle en relación con la amenaza, exposición, vulnerabilidad y riesgo por inundación.

El Gráfico 9 destaca la ubicación de las cuencas seleccionadas para el análisis detallado.

**Gráfico 9. Cuencas seleccionadas para el análisis**



Fuente: MARN.

La cuenca del río Sensunapán abarca cerca del 8% del área total del país e incluye gran cantidad de tierras fértiles y zonas cultivadas expuestas a lo largo de toda la cuenca. Por su parte la cuenca del río Arenal Monserrat constituye cerca del 5.1% del área del país y en esta se ubica más del 24 % de la población total del país, atravesando una parte importante de la ciudad de San Salvador, la capital del país y su ciudad más poblada.

Una vez identificadas las cuencas para el análisis probabilista del riesgo por inundación, se procedió a identificar en cada una de ellas los tramos críticos, es decir los sectores de las cuencas en que pudiesen llegar a presentarse eventos de inundación y la potencialidad de cada tramo a generar pérdidas económicas o impactos sociales representativos. Con base en el análisis de cotas de elevación, los conceptos de los especialistas locales y en los reportes de inundaciones históricas en el país, se definen las zonas susceptibles de inundación en cada una de las zonas críticas de las cuencas Sensunapán y Arenal Monserrat. Dichas zonas se presentan de los Gráficos 10 al 13.

Posteriormente, en cada uno de los tramos críticos identificados se procede a realizar el levantamiento y recopilación de la información requerida para realizar los análisis de riesgo. Para la recopilación de la información fue necesaria la participación de diferentes entidades públicas en cada una de las regiones y de un grupo de consultores de apoyo para efectos de realizar las actividades de campo requeridas.

**Gráfico 10. Zona susceptible de inundación en Sensunapán - Zona Alta**



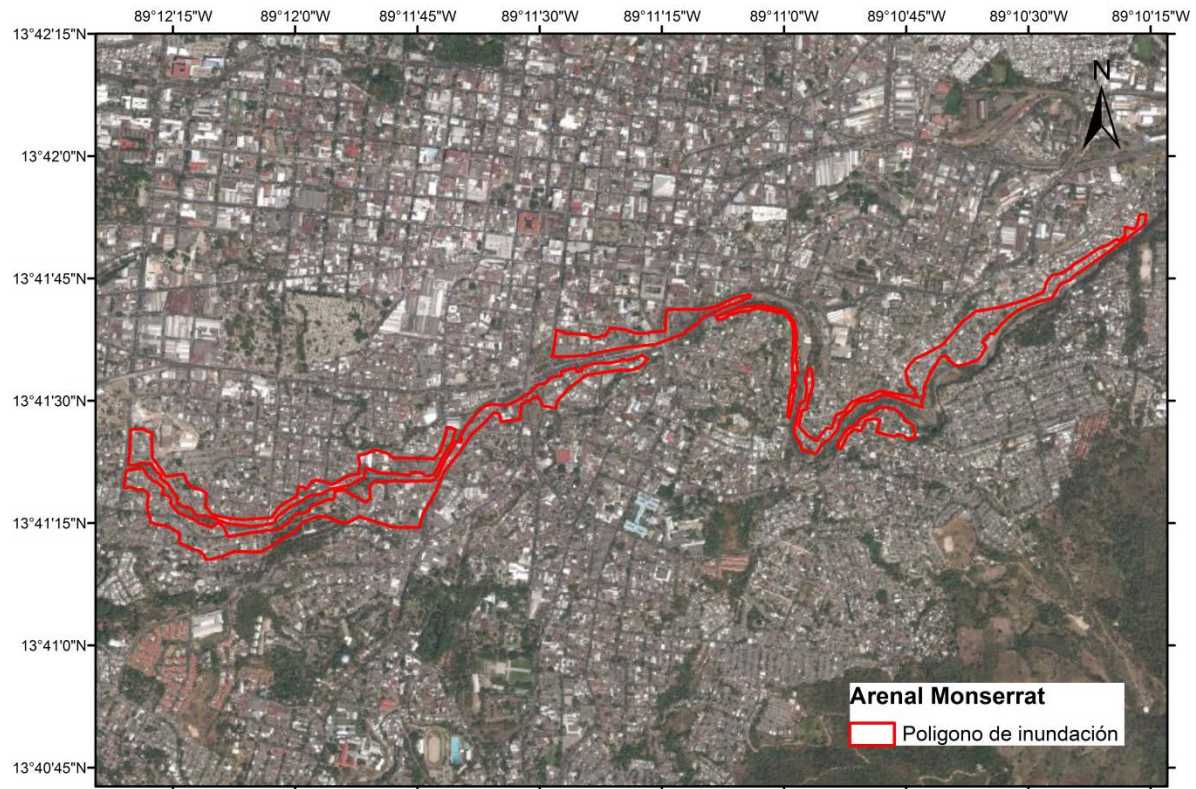
**Gráfico 11. Zona susceptible de inundación en Sensunapán – Zona Media**



**Gráfico 12. Zona susceptible de inundación en Sensunapán – Zona Baja**



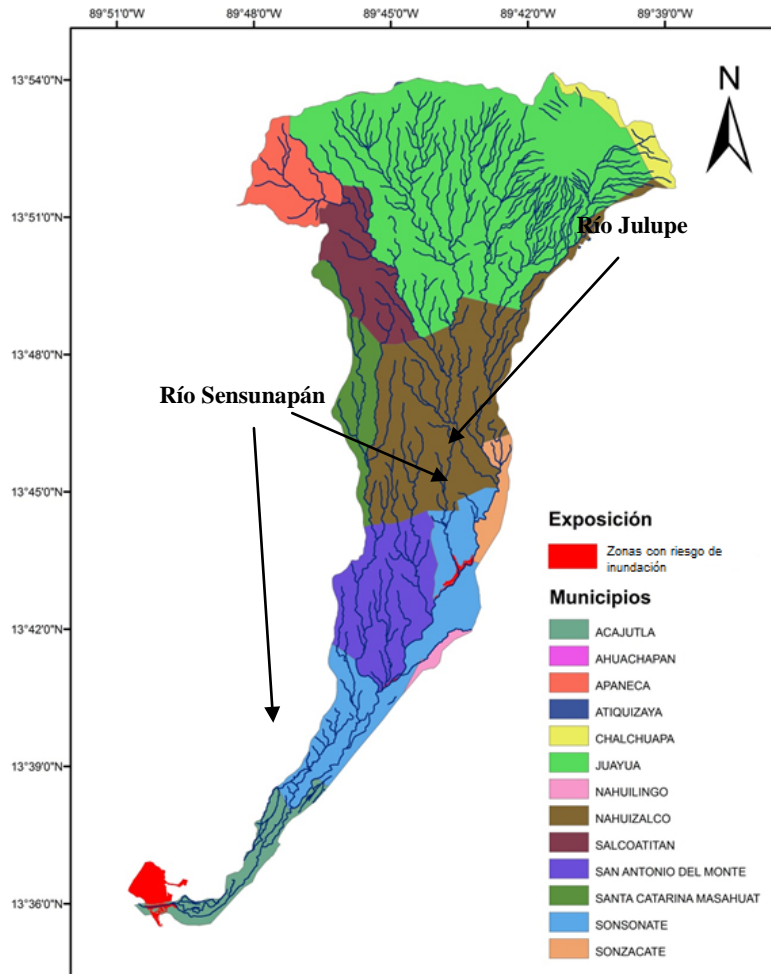
**Gráfico 13. Zona susceptible de inundación en la cuenca Arenal Monserrat**



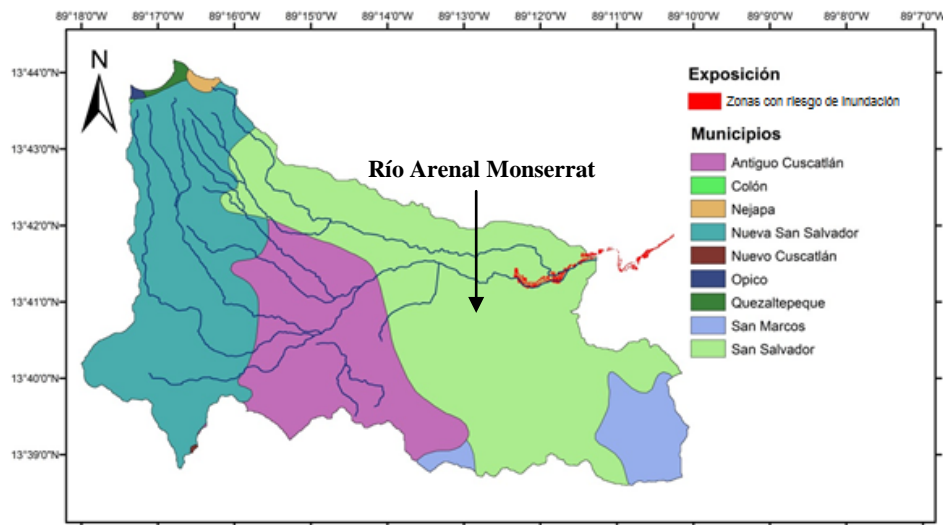


En el Gráfico 14 y Gráfico 15 se presentan mapas ilustrativos de cada una de las cuencas analizadas indicando los ríos principales, los municipios a lo largo de los cauces y las zonas susceptibles de inundación de acuerdo con lo explicado anteriormente.

**Gráfico 14. Localización y entorno de la cuenca Sensunapán**



**Gráfico 15. Localización y entorno de la cuenca Arenal Monserrat**



### 3.3.1 Sectores de análisis en las cuencas críticas

Para cada una de las cuencas de análisis se seleccionan las áreas y sectores críticos potencialmente inundables para efectos de levantar y refinar la información requerida para el análisis. En el Gráfico 16 y Gráfico 17 se presentan las zonas críticas seleccionadas para el análisis en cada una de las cuencas Sensunapán y Arenal Monserrat. Para la cuenca de Sensunapán se han seleccionado un total de cinco (5) zonas críticas potencialmente inundables (3 en la zona alta, 1 en la zona media y 1 en la zona baja), y para la cuenca de Arenal Monserrat un total de tres (3) zonas críticas. La selección de estas zonas críticas tienen en cuenta los siguientes criterios:

- Zonas que históricamente han generado eventos de inundación.
- Zonas especialmente expuestas en la cual se ubican componentes importantes y susceptibles.
- Zonas delimitadas por tramos de ríos entre confluencias con otros ríos o afluentes, considerando que las condiciones de entrada al modelo hidrodinámico pueden ser diferentes en la zona agua abajo a la afluencia.
- Experiencia y conocimiento de la región por parte de los especialistas del MARN.

## **Cuenca Sensunapán**

**Zona 1:** Abarca el tramo del río Julupe, desde la calle 1 en la comunidad Bendición de Dios, hasta la confluencia de este río con el cauce principal del Sensunapán, puente tercera calle oriente de Sonsonte, en la comunidad Río Julupe.

**Zona 2:** Corresponde al tramo del río Sensunapán justo aguas arriba de la desembocadura del río Julupe con este río.

**Zona 3:** Corresponde al tramo inmediatamente aguas debajo de la confluencia del río Julupe con el río Sensunapán.

**Zona 4:** Corresponde a un tramo del río Sensunapán ubicado en la cuenca media, el cual se encuentra rodeado por cultivos y edificaciones expuestas a inundación.

**Zona 5:** Corresponde al tramo final del río Sensunapán o Grande de Sonsonate, en la ciudad de Acajutla. Esta zona abarca la planicie aluvial o desembocadura del río.

## **Cuenca Arenal Monserrat**

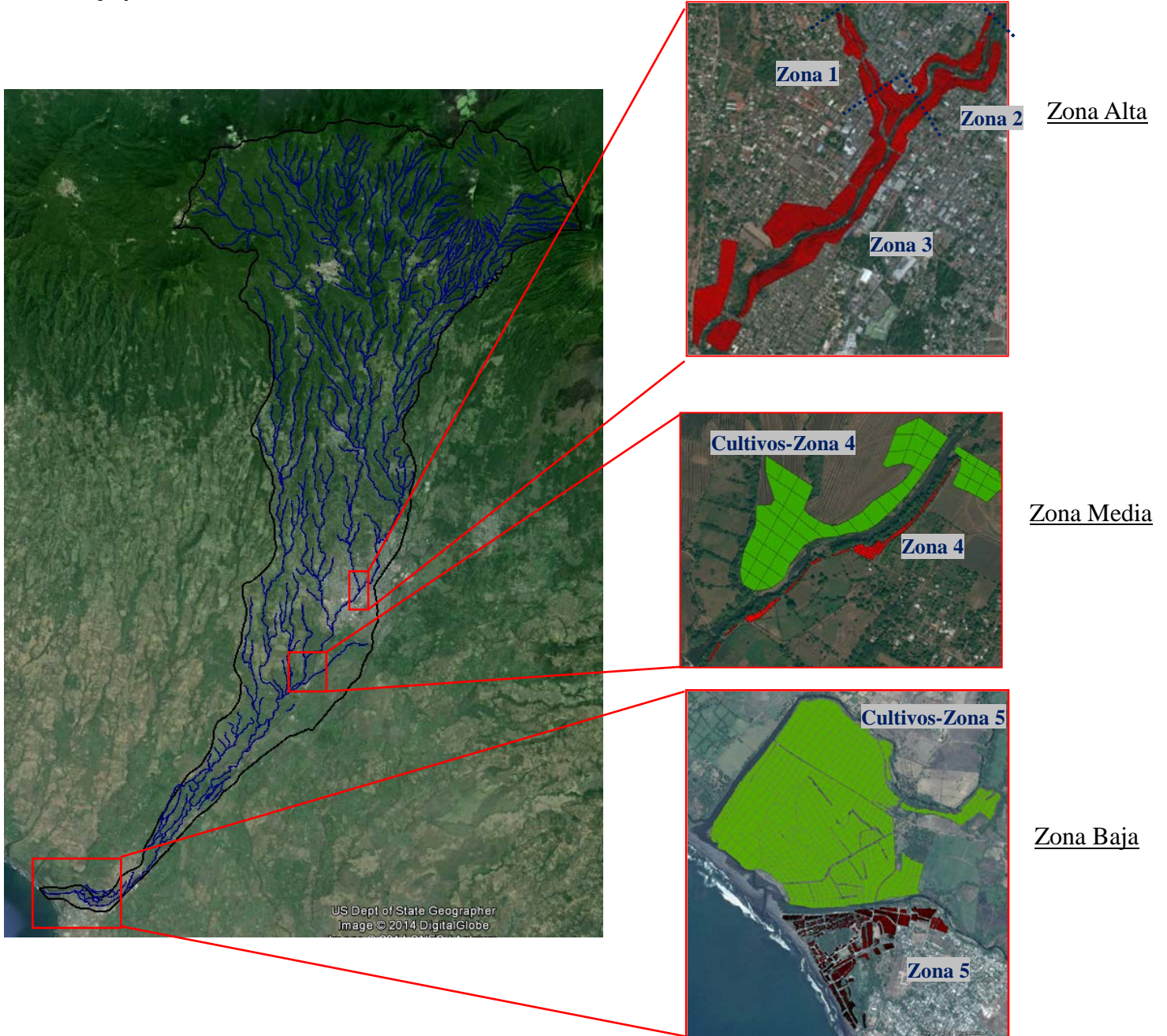
**Zona 1:** Comprende desde la 25 avenida sur (comunidad Don Bosco), hasta la calle Modelo del barrio Modelo. En la parte media de este tramo se encuentra la colonia La Málaga, que frecuentemente se ha visto afectada por inundaciones.

**Zona 2:** Comprende desde el barrio Modelo, hasta la bóveda de la 10ª avenida sur, en el barrio La Vega.

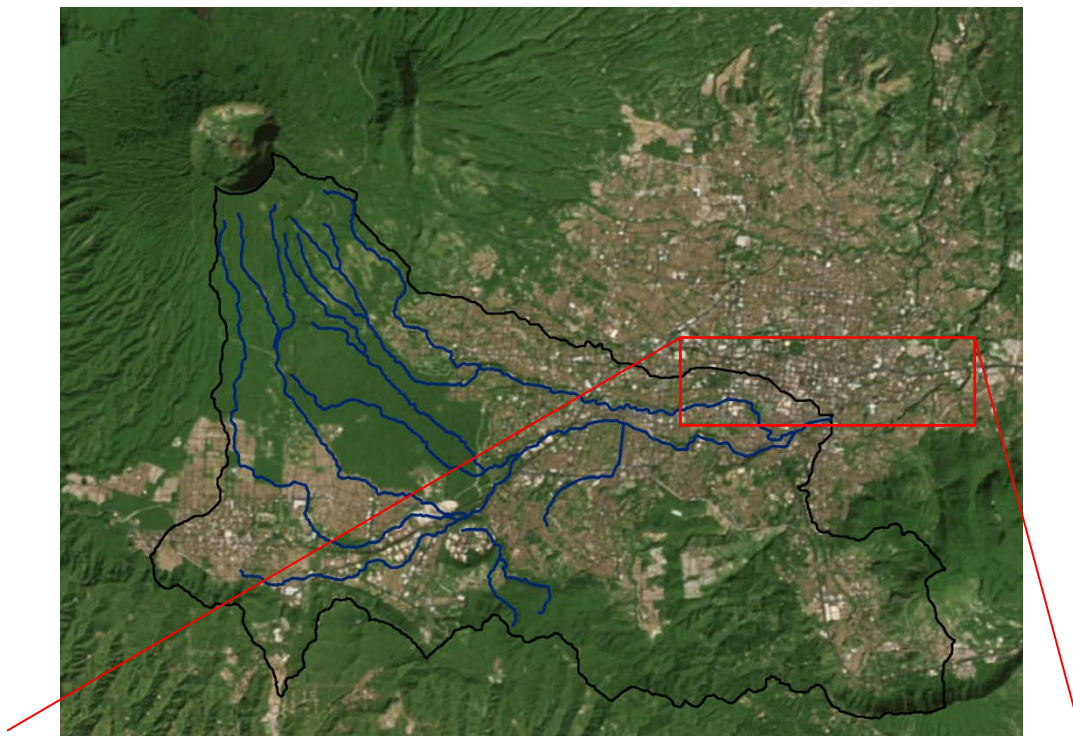
**Zona 3:** Comprende desde la bóveda de la 10ª avenida sur, en el barrio La Vega, hasta el sitio conocido como “Puente Eureka” en el boulevard del Ejército.

En el Gráfico 16 y Gráfico 17 se presenta la ubicación geográfica de cada una de estas zonas, para la cuenca Sensunapán y Arenal Monserrat respectivamente.

**Gráfico 16. Zonas críticas susceptibles a inundación en la cuenca de Sensunapán (edificaciones en rojo y cultivos en verde)**



**Gráfico 17. Zonas críticas susceptibles a inundación en la cuenca de Arenal Monserrat (edificaciones en rojo)**



## **4. Evaluación de la amenaza por inundación en tramos críticos**

### **4.1 Introducción**

El clima del Salvador es por lo general caliente y húmedo con períodos de verano secos desde la mitad de noviembre hasta la mitad de mayo aproximadamente y con periodos de invierno caracterizado principalmente por lluvias desde mitad de mayo hasta mitad de noviembre. Las inundaciones históricas en el país han ocurrido en tiempos diversos durante el periodo invernal. Estas inundaciones están asociadas en algunos casos a Huracanes que se aproximan por la cuenca del Atlántico. Tal como quedó demostrado con el Huracán Mitch de 1998, en estos casos las lluvias intensas pueden resultar en el territorio bajo estudio a partir de la circulación regional de huracanes, aún si la trayectoria principal del evento no cruza exactamente por el territorio bajo análisis.

Este capítulo presenta la metodología y los resultados de los análisis de amenaza de inundación. Considerando la situación específica del Salvador, la información histórica disponible y la consideración básica que ninguna de las trayectorias de los huracanes o tormentas tropicales registrados históricamente ha pasado directamente por el país, se decide realizar un análisis único de frecuencias e intensidades de lluvias considerando tanto la ocurrencia de lluvias convectivas como las de origen en eventos huracanados.

La evaluación de la amenaza por inundación con métodos probabilistas incluyen los siguientes componentes principales:

- Amenaza de lluvias la cual se representa mediante un conjunto estocástico de eventos de precipitación en el cual un evento se define como la distribución espacial de intensidad y duración de lluvias.
- Modelación hidrológica para transformar la intensidad de lluvias a caudales en el cauce de los ríos.
- Modelo de inundación que define la extensión espacial de las zonas inundables para diferentes niveles de intensidad de lluvias.

El resultado principal de un modelo de amenaza por inundaciones es la delimitación de las áreas sometidas a inundación para un determinado periodo de retorno o frecuencia de ocurrencia. La determinación de las áreas susceptibles a inundación requiere conocimiento de los eventos históricos que permitan la calibración de los modelos hidrológicos e hidráulicos. La delimitación de las áreas inundadas y la distribución de las intensidades de los eventos para cada uno de los eventos estocásticos definidos, conjuntamente con la información de exposición y vulnerabilidad, permiten la evaluación probabilista del riesgo en las zonas de análisis.

## 4.2 Metodología para el análisis de amenaza

En este numeral se presenta un resumen de la metodología general para el análisis de la amenaza de lluvias y de inundación. El procedimiento analítico detallado se presenta en la referencia (ERN América Latina, 2009b) y en los Anexos 1 y 2, para lluvias e inundaciones respectivamente.

### 4.2.1 Software utilizado en el análisis de amenaza de inundación

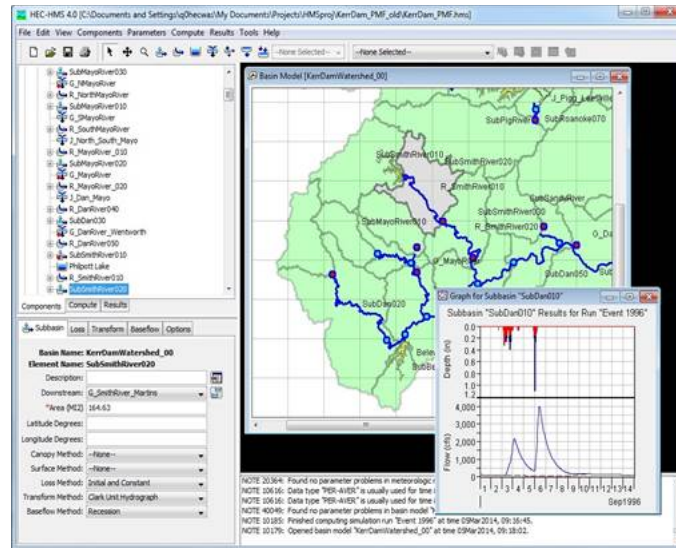
#### 4.2.1.1 *Análisis hidrológico*

Para la evaluación de la amenaza por inundación la estimación de los caudales puede realizarse de dos maneras: mediante la utilización de un modelo lluvia - escorrentía, que se basa en el método del Soil Conservation Service basado en un hidrograma unitario triangular; y mediante el ingreso de una curva de caudal vs periodo de retorno. El primer enfoque tiene la capacidad de tener en cuenta tormentas estocásticas contenidas en el archivo “.AME” de precipitación y el segundo enfoque corresponde a la evaluación convencional de amenaza sin tener en cuenta fuentes de incertidumbre.

La descripción detallada de cada uno de estos métodos de análisis se presenta en la referencia (ERN Evaluación de Riesgos Naturales, 2011).

Por otra parte y con el fin de llevar a cabo el proceso de calibración tanto de los números de curva utilizados como de los modelos hidráulicos, se hizo uso del modelo hidrológico HEC-HMS, proceso que se explica en detalle en el Numeral 4.5. El programa HEC-HMS fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers). Este modelo es empleado para la simulación procesos de lluvia-escorrentía en cuencas de drenaje dendríticas. Permite la modelación de un amplio rango de áreas geográficas para la solución de diferentes problemas. El programa incluye gran variedad de modelos matemáticos para la representación de cada uno de los diferentes procesos hidrológicos involucrados.

**Gráfico 18. Programa HEC-HMS desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers)**



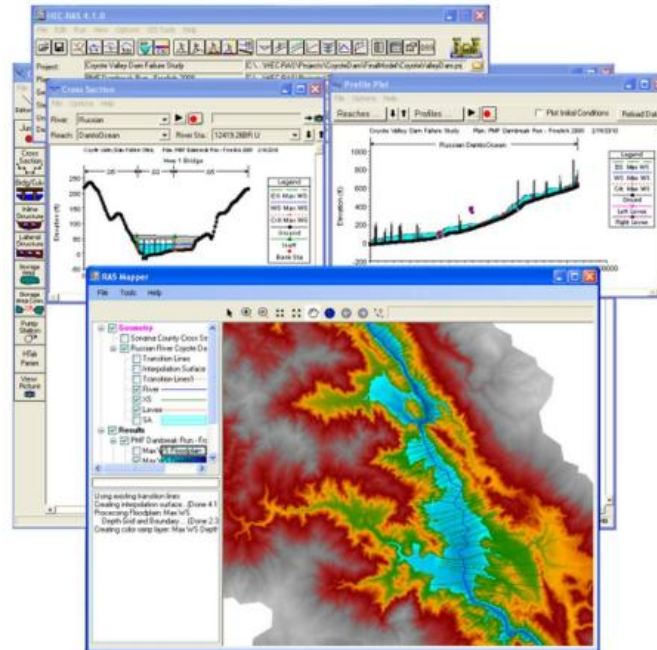
#### 4.2.1.2 Análisis hidrodinámico - Programa HEC-RAS

Para realizar la simulación de las huellas de inundación asociadas al tránsito de avenidas por cauces, canales o ríos se utiliza el modelo hidráulico del programa HEC-RAS desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers). Este modelo numérico permite realizar el análisis del flujo permanente unidimensional gradualmente variado en lámina libre.

La primera versión del HEC-RAS (Versión 1.0) fue liberada en julio de 1995. Desde ese entonces han existido una serie de mejoras en el programa, lo que se ha traducido en diferentes versiones, hasta llegar a la actual (versión 4.1, ver Gráfico 19) liberada en enero de 2010 y que es la que se utiliza en el software *ERN-Inundación-V2.2*, el cual corresponde a una versión modificada del software *ERN-Inundación-V2.1*, disponible en [www.ecapra.org](http://www.ecapra.org). El modelo hidráulico del tramo inundable realizado en HEC-RAS es usado como un parámetro de entrada por el programa *ERN-Inundación*, de tal manera que para cada escenario de lluvia contenido en AME de lluvia, el programa ejecuta una corrida del HEC-RAS a fin de realizar el tránsito hidráulico del caudal pico asociado a cada escenario de precipitación y así obtener los niveles y velocidades a lo largo del tramo estudiado.



**Gráfico 19. Programa HEC-RAS desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers)**



Dentro del software *ERN-Inundación-V2.2* el modelo hidráulico HEC-RAS se utiliza con las siguientes limitaciones (ERN Evaluación de Riesgos Naturales, 2011):

- El flujo a considerar es permanente.
- El flujo se supone gradualmente variado y en lugares donde sea flujo rápidamente variado se usa la ecuación de momentum u otras ecuaciones empíricas.
- El flujo se considera unidimensional.
- El cauce debe tener una pendiente pequeña menor de 1:10.
- El modelo construido debe corresponder a un tramo del río con una sola entrada de caudal y sin ningún tipo de estructura.
- El uso de estructuras tales como "levees" o jarillones/diques no es considerado en ERN-Inundación. Esto tiene como resultado que las interpolaciones que ERN-Inundación realiza sobre la superficie de agua en cada sección transversal considera la superficie del agua sobre toda la sección sin importar si existen estructuras naturales o artificiales de protección.

Para mayor información sobre el programa HEC-RAS se sugiere que el usuario revise y descargue la información relacionada con el programa incluyendo el Manual del Usuario, el Manual de Referencia y las Aplicaciones, la cual se puede encontrar en <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx>.

#### 4.2.2 Amenaza de lluvia

En el presente análisis se realiza inicialmente el análisis de amenaza de lluvias con toda la información disponible en las estaciones hidrometeorológicas que cuentan con registros.

Los pasos principales para el desarrollo del modelo de amenaza de lluvia son los siguientes:

1. Se realiza el análisis e interpretación de toda la información de lluvias en las estaciones ubicadas en la zona de influencia de la cuenca a estudiar.
2. Se realiza el análisis puntual estación por estación de las precipitaciones máximas.
3. Se realiza el análisis espacial de las precipitaciones máximas en las áreas de interés.
4. Se generan las curvas Profundidad – Área – Duración- Frecuencia (PADF) características para cada una de las cuencas de análisis.
5. Se genera un conjunto de eventos estocásticos basados en la información histórica que se resume en las PADF con ubicaciones, formas y distribución de intensidades aleatorias.
6. A cada uno de los eventos estocásticos que representan la amenaza se genera un hietograma característico que permite modelar la distribución de la intensidad en el tiempo.
7. El resultado de este proceso resulta en un conjunto de eventos estocásticos de precipitación que en su conjunto representan la amenaza de lluvia de la zona bajo estudio.

El análisis descrito se realiza con la ayuda de los siguientes programas de computador:

- Análisis de información pluviométrica para obtener las curvas PADF: Software *IT-Precipitación*.
- Generación de eventos estocásticos a partir de curvas PADF: Software *ERN-LluviaNH-V2.1*, disponible en [www.ecapra.org](http://www.ecapra.org).

### 4.2.3 Amenaza de inundación

En general, la magnitud de una inundación provocada por procesos de origen meteorológico depende de la intensidad de las lluvias, de su distribución en el espacio y tiempo, del tamaño de las cuencas hidrológicas afectadas, de las características del suelo y del drenaje natural o artificial de las cuencas.

En el presente análisis se utiliza la metodología establecida en el software *ERN-Inundación-V2.2* para el análisis de inundaciones fluviales o por desbordamiento, utilizando una metodología de evaluación de amenazas tanto probabilista como determinista. En el enfoque probabilista, *ERN-Inundación-V2.2* considera la variabilidad de la precipitación para generar escenarios múltiples de caudales para el mismo periodo de retorno de análisis de la precipitación. En el enfoque determinista, *ERN-Inundación* utiliza caudales asociados a periodos de retorno extraídos de una curva Caudales vs Periodo de retorno. Los caudales determinados por cualquiera de los dos métodos son utilizados como datos de entrada para el software HEC-RAS para realizar el análisis hidrodinámico que permite la estimación de las profundidades de inundación.

El método detallado de análisis probabilístico de amenaza planteado en *ERN-Inundación-V2.2* se basa en el uso de un modelo hidrológico y uno hidrodinámico. El modelo hidrológico estima la esorrentía aplicando el método del número de curva y los caudales pico son calculados mediante el uso de un hidrograma unitario triangular. Posteriormente, los caudales pico son utilizados en el software HEC-RAS que está integrado en la aplicación, con el fin de realizar un análisis de flujo permanente y obtener los parámetros hidráulicos para cada evento considerado.

La variabilidad de los campos de precipitación en la cuenca de análisis se considera mediante el uso de un archivo “.AME” que puede ser obtenido del software *ERN-LluviaNH-V2.1* o *ERN-Huracán-VI.0* o de cualquier otro análisis que permita la generación estocástica de tormentas o escenarios probabilísticos de precipitación. Para cada evento de precipitación descrito en el archivo “.AME”, se lleva a cabo la aplicación de los modelos hidrológico e hidrodinámico, generando un archivo “.AME” que contiene los escenarios de inundación correspondientes (ver Gráfico 20)

**Gráfico 20. Funcionamiento del software ERN-Inundación-V2.2**



El modelo hidráulico desarrollado en el software HEC-RAS que se vincula al software *ERN-Inundación-V2.2* se construye de la manera convencional, es decir, debe llevarse a cabo un procedimiento de modelamiento de inundación estándar incluyendo calibración y validación del modelo.

Una vez que se cuenta con las características geométricas e hidráulicas correctamente modeladas en el software HEC-RAS, se ejecuta el análisis hidráulico a través de la interfaz del software. Posteriormente y de manera automática se extraen las elevaciones del espejo de agua resultantes y se calculan las profundidades de agua en cada uno de los puntos que definen las secciones transversales.

Finalmente, el programa realiza la interpolación de las profundidades obtenidas y crea una malla regular con el número de celdas definidas por el usuario en formato AME normal que contiene la huella de inundación para cada uno de los escenarios analizados. Para esto será necesario que el usuario ingrese el Datum que define el sistema de coordenadas geográficas al que se desean convertir las coordenadas UTM, de manera que la malla quede georreferenciada adecuadamente.

Las principales fuentes de incertidumbre en el análisis de inundación son: la incertidumbre proveniente de los datos u observaciones, que corresponde a la aproximación en las variables hidrológicas medidas y que son usadas como datos de entrada o datos de calibración (precipitación, temperatura, caudales etc.); incertidumbre paramétrica que se produce por la calibración imperfecta del modelo; incertidumbre estructural de modelo que es el resultado de la inhabilidad del modelo para esquematizar de manera precisa los procesos físicos (Michele et al. 2011).

El programa *ERN-Inundación-V2.2* considera la incertidumbre asociada a la variabilidad de los campos de precipitación que constituyen los datos de entrada al modelo lluvia-escorrentía del software. Como resultado, para cada periodo de retorno asociado se consideran como datos de entrada las tormentas estocásticas generadas previamente por el usuario, a partir de las cuales se estiman los caudales correspondientes para generar los escenarios de inundación.

#### 4.2.4 Datos requeridos para el análisis

Para el análisis de la amenaza de lluvia mediante los programas *IT- Precipitación* y para el programa *ERN-LluviaNH* se requiere la siguiente información mínima para cada uno de los casos de análisis:

1. Localización geográfica de estaciones pluviométricas y pluviográficas.
2. Ubicación de estaciones pluviométricas y pluviográficas en mapas a escala adecuada con red de drenaje y cuencas y subcuencas.
3. Períodos de registro de las estaciones.
4. Información diaria para el período de registro en cada estación pluviométrica.
5. Información de profundidad de precipitación para el período de registro y para intervalos de tiempo menores a 1 día en cada estación pluviográfica. En su defecto, información correspondiente a lluvias máximas históricas para diferentes duraciones. A su vez, en su defecto de esto último, información de series anuales de precipitaciones máximas para diferentes duraciones. Si no está disponible nada de lo anterior, información directa de curvas Profundidad – Duración – Frecuencia (PDF) o de curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) obtenidas de información secundaria. Si estas últimas tampoco están disponibles es posible estimarlas de manera aproximada a partir de información pluviométrica diaria.

Por otro lado para el análisis de la amenaza por inundación mediante el software *ERN-Inundación V2.2* se requiere tanto información específica como la ruta de archivos especiales pre-procesados con otro software.

Como datos generales se debe ingresar un mapa de referencia, la ruta del archivo “\*.PRJ” del modelo desarrollado en HEC-RAS, y la ruta del “.AME” de resultados que será generado con el análisis. Si el análisis hidrológico se va a desarrollar con el método del hidrograma triangular unitario se debe ingresar la siguiente información:

- La ruta del AME de precipitación construido previamente
- La malla de los factores de escorrentía en formato “\*.GRD”

- El archivo “\*.DAT” de la topografía
- El archivo “\*.SHP” con el tramo de cauce que será considerado para el cálculo del tiempo de concentración
- El archivo “\*.SHP” con la divisoria de la cuenca específica que será considerada para el cálculo del tiempo de concentración

Con el fin de ejecutar el análisis, se requieren datos generales y datos específicos dependiendo de si el análisis hidrológico se desarrolla con el hidrograma triangular unitario o mediante el ingreso de una curva de Caudal vs Periodo de retorno. Todos los archivos de información geográfica que se ingresen deben estar en coordenadas geográficas y el modelo en el software HEC-RAS debe estar en coordenadas UTM. Para el caso del método hidrométrico se requiere un archivo de texto con extensión “\*.QTR” con la descripción de la curva.

### 4.3 Amenaza de lluvia en cuencas seleccionadas

#### 4.3.1 Información de precipitación

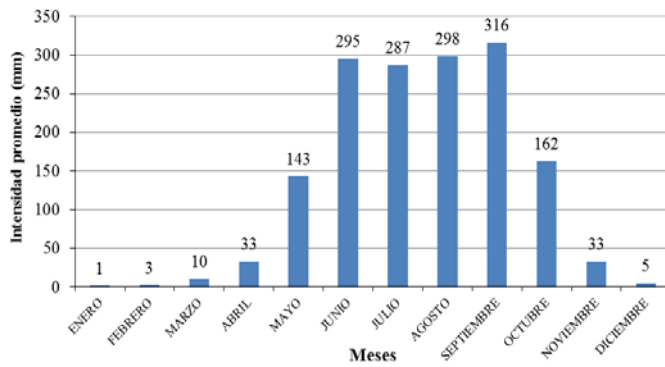
El Cuadro 5 resume la información disponible para el análisis de amenaza de lluvia en cada una de las cuencas de análisis. El cuadro indica para cada una de las estaciones pluviométricas del MARN, los periodos de tiempo en que se cuenta con información.

**Cuadro 5. Características de las estaciones y periodos de tiempo con información disponible**

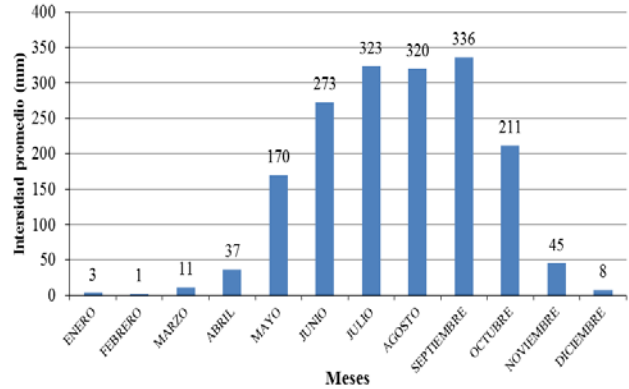
Cód.	Nombre	Depto.	Cuenca	Longitud (°)	Latitud (°)	Elev. (msnm)	Info. desde	Info. hasta
118	Finca Los Andes	Santa Ana	Sensunapán	-89.628306	13.874750	1752	01/01/1970	17/12/2012
808	Ahuachapán	Ahuachapán	Sensunapán	-89.860083	13.943111	732	01/01/1970	30/12/2012
2103	Izalco	Sonsonate	Sensunapán	-89.705000	13.761667	390	01/01/1970	04/10/2012
2106	Acajutla Puerto Nuevo	Sonsonate	Sensunapán	-89.833556	13.576444	32	01/01/1970	17/12/2012
2108	Finca El Triunfo	Sonsonate	Sensunapán	-89.548333	13.688333	560	01/01/1970	23/10/2012
2109	Hacienda El Jobo	Sonsonate	Sensunapán	-89.753333	13.671667	180	01/05/1973	08/10/2012
2121	Salcoatitan	Sonsonate	Sensunapán	-89.760000	13.830000	1045	01/05/1973	29/10/2012
2124	Los Naranjos	Sonsonate	Sensunapán	-89.674111	13.874944	1450	01/01/1974	17/12/2012
1208	Sta Tecla PROCAFE	La Libertad	Arenal Monserrat	-89.288333	13.686667	965	01/01/1970	17/12/2012
1218	El Boqueron	La Libertad	Arenal Monserrat	-89.281667	13.735000	1800	01/01/1970	31/05/1993
1904	San Salvador ITIC	San Salvador	Arenal Monserrat	-89.206667	13.721667	710	01/01/1970	30/11/1990
1908	San Salvador FICA	San Salvador	Arenal Monserrat	-89.178333	13.703333	635	01/01/1970	31/08/2002
1910	Ilopango	San Salvador	Arenal Monserrat	-89.118333	13.698333	615	01/04/1970	17/12/2012
1916	Casa de Piedra	San Salvador	Arenal Monserrat	-89.216667	13.633333	840	01/04/1970	21/09/2012

Por otro lado, el Gráfico 21 resume los registros de intensidad promedio mensual multianual de lluvia en estaciones pluviométricas del MARN, representativas en cada una de las cuencas de análisis. Para la cuenca del Sensunapán se ha seleccionado la Estación Ahuachapán mientras que para la cuenca de Arenal Monserrat se seleccionó la Estación Ilopango.

**Gráfico 21. Precipitación media mensual multianual en estaciones representativas**



**Estación Ahuachapán. Cuenca Sensunapán.**

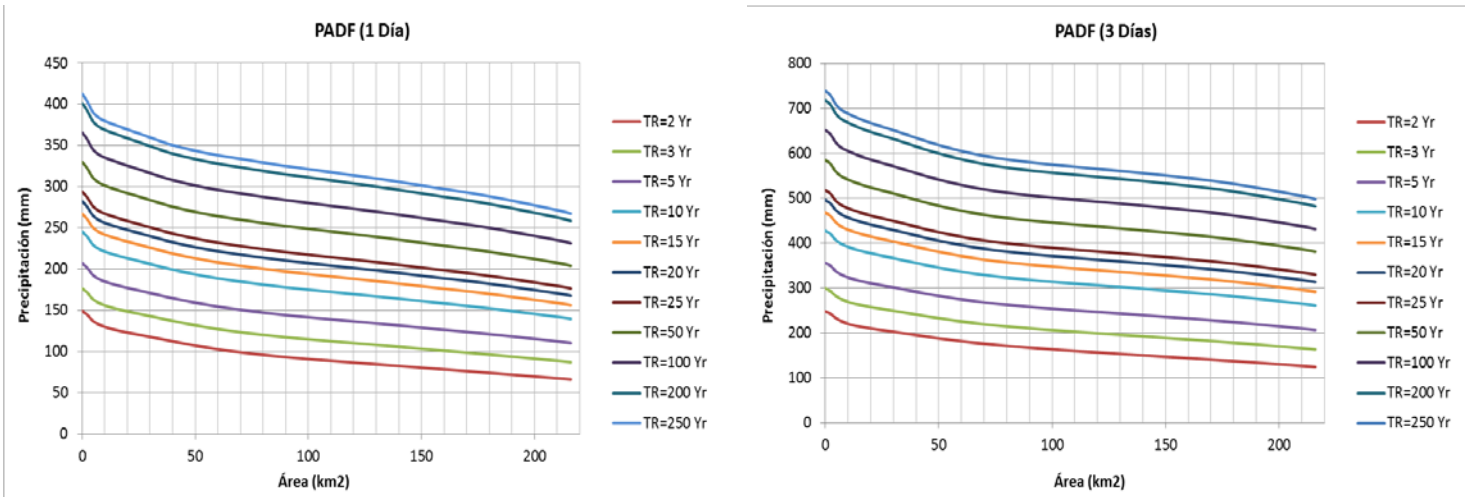


**Estación Ilopango. Cuenca Arenal Monserrat.**

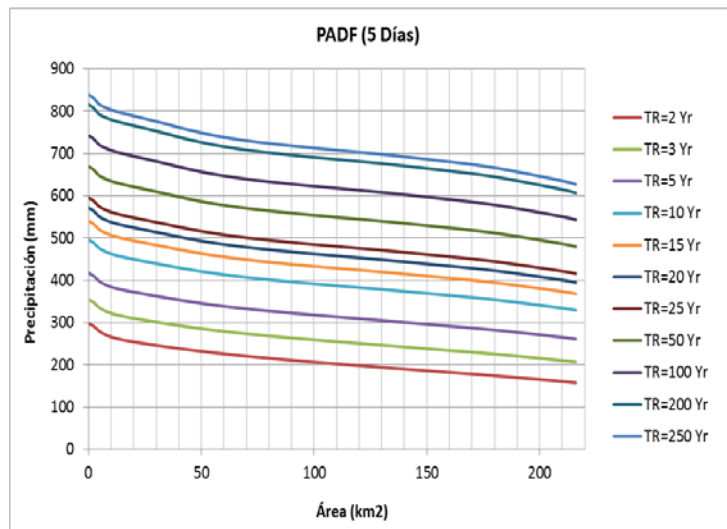
4.3.2 Curvas PADF representativas en las cuencas

En el Gráfico 22 y Gráfico 23 se presentan las curvas PADF para 1, 3 y 5 días que resultan del análisis para cada una de las cuencas de estudio.

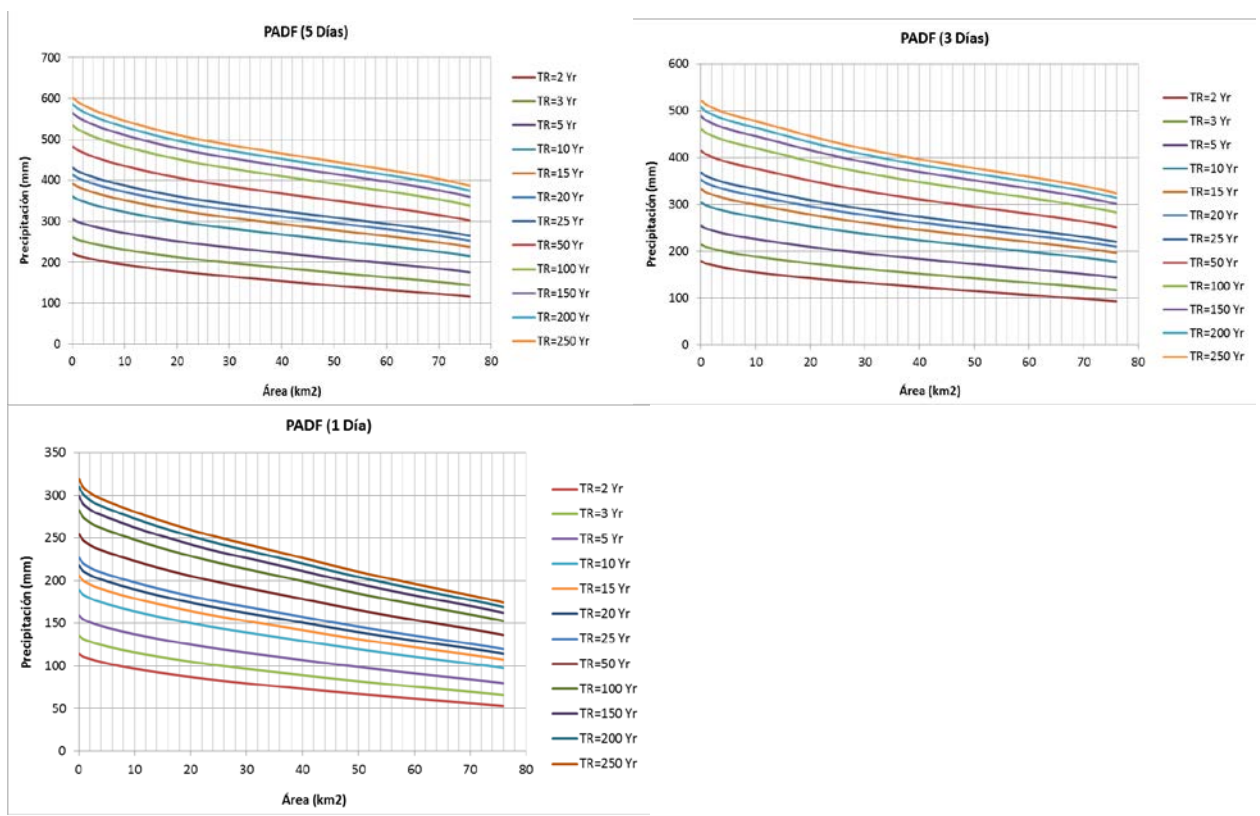
**Gráfico 22. Curvas PADF para diferentes duraciones - cuenca Sensunapán**







**Gráfico 23. Curvas PADF para diferentes duraciones - cuenca Arenal Monserrat**

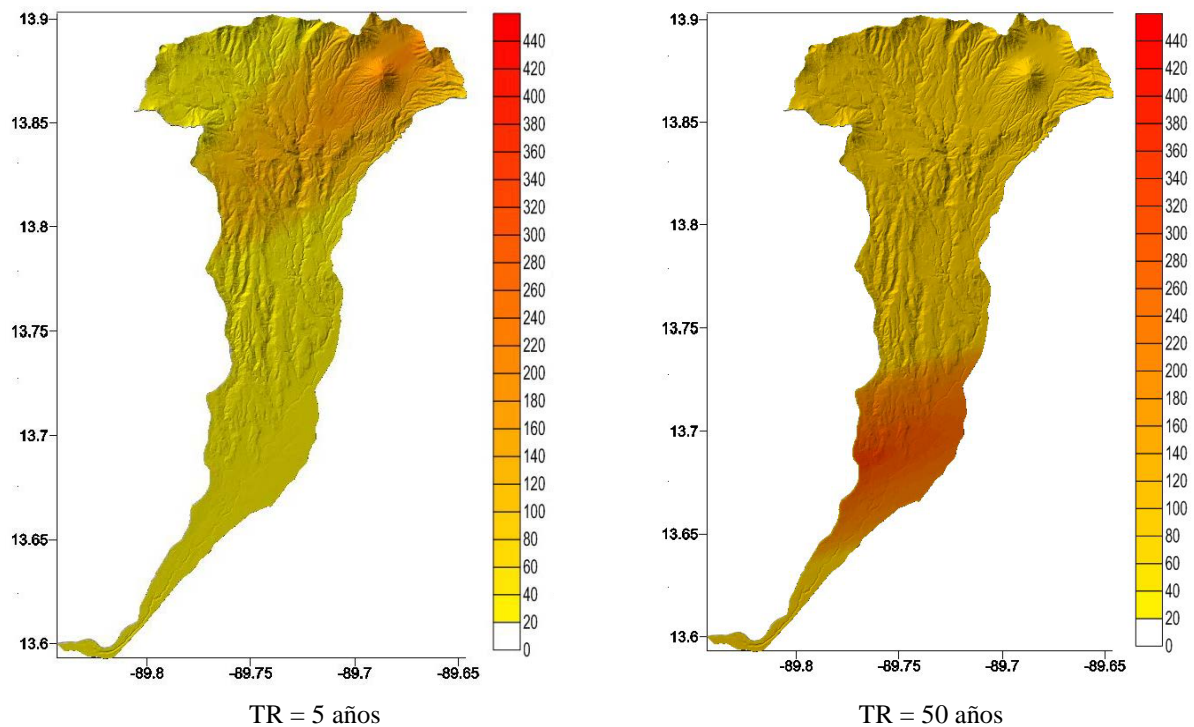


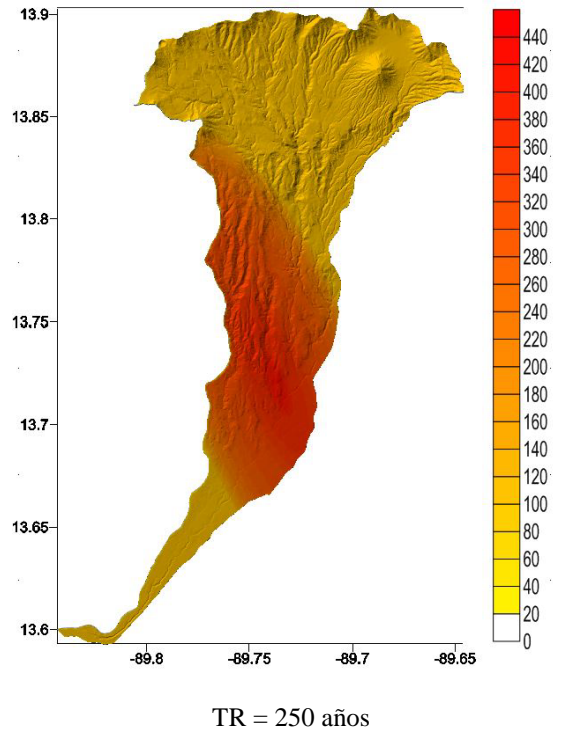
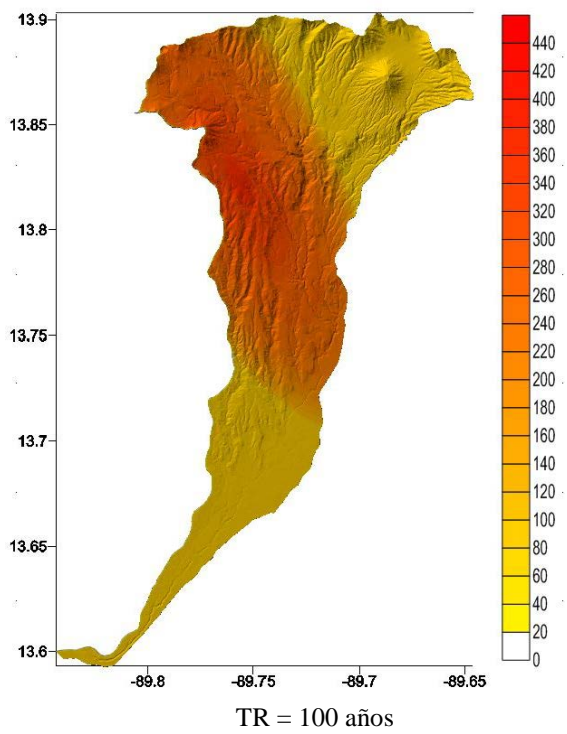
### 4.3.3 Escenarios estocásticos que representan la amenaza de lluvia

El análisis de la amenaza de lluvia se lleva a cabo utilizando el software *ERN-LluviaNoHuracanada-V1.0*, el cual permite obtener una serie de eventos estocásticos que en conjunto representan la amenaza de lluvia en cada una de las cuencas de análisis. En el Gráfico 24 y Gráfico 25 se presentan algunos escenarios representativos en cada una de las cuencas de análisis. El conjunto completo de escenarios se almacena en los siguientes archivos, compatibles con el software CAPRA por lo cual para su visualización debe utilizarse el software *CAPRA-GIS-V2.0*:

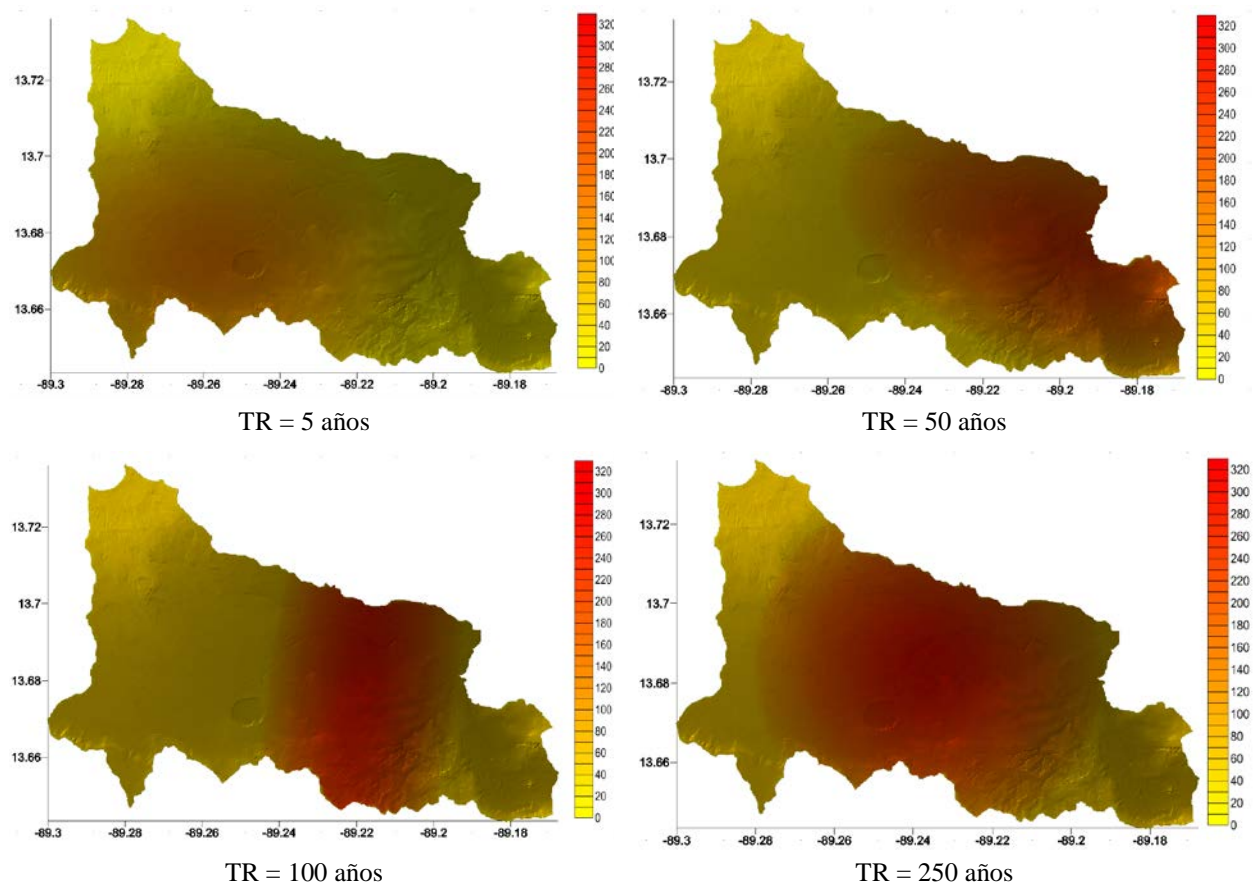
- AMELluvia\_amss\_1dia.ame
- AMELluvia\_amss\_3dias.ame
- AMELluvia\_amss\_5dias.ame
- AMELluvia\_sensu\_1dia.ame
- AMELluvia\_sensu\_3dias.ame
- AMELluvia\_sensu\_5dias.ame

**Gráfico 24. Escenarios de lluvia no-huracanada para diferentes periodos de retorno - cuenca Sensunapán. Profundidad de precipitación en [mm]**



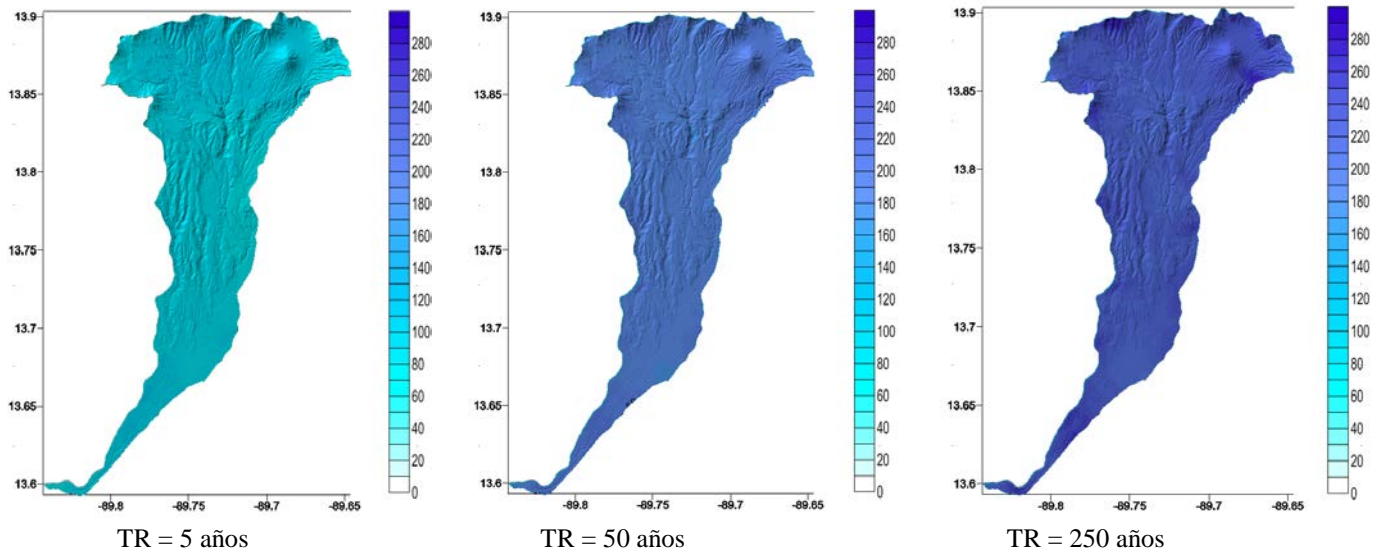


**Gráfico 25. Escenarios de lluvia no-huracanada para diferentes periodos de retorno - cuenca Arenal Monserrat. Profundidad de precipitación en [mm]**

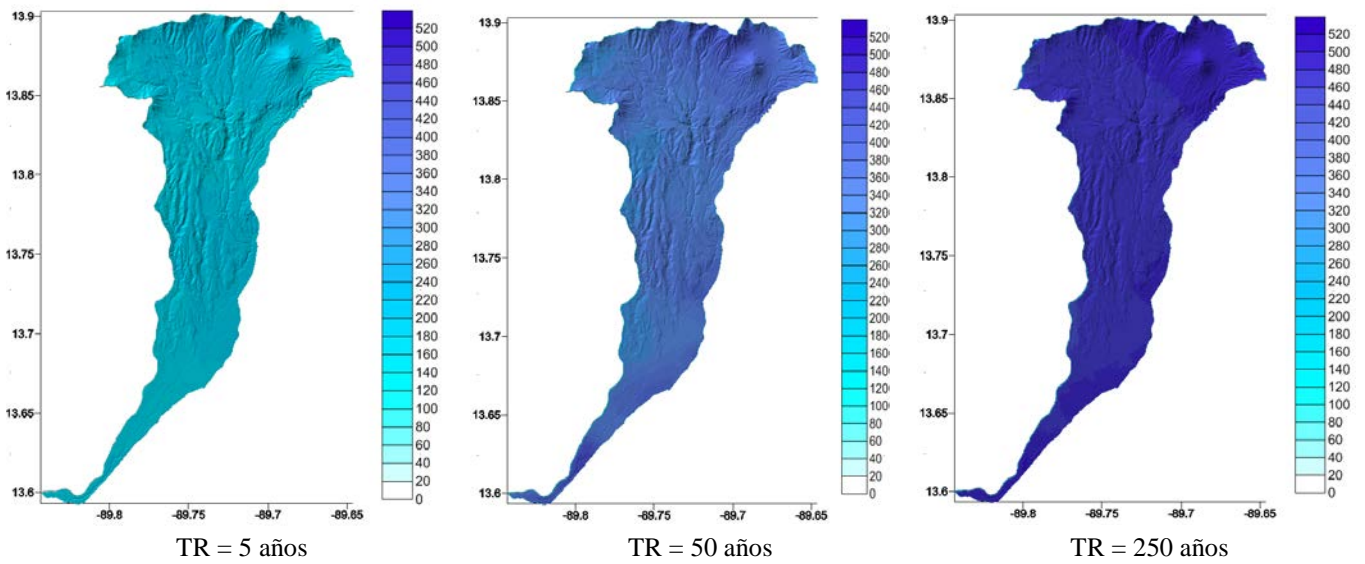


También se presentan mapas de amenaza de lluvia probabilistas del Gráfico 26 al Gráfico 31, los cuales representan la distribución geográfica de intensidades de lluvias para diferentes periodos de retorno (PR= 5, 50 y 250 años) y para diferentes duraciones (1, 3 y 5 días), en cada una de las cuencas de análisis.

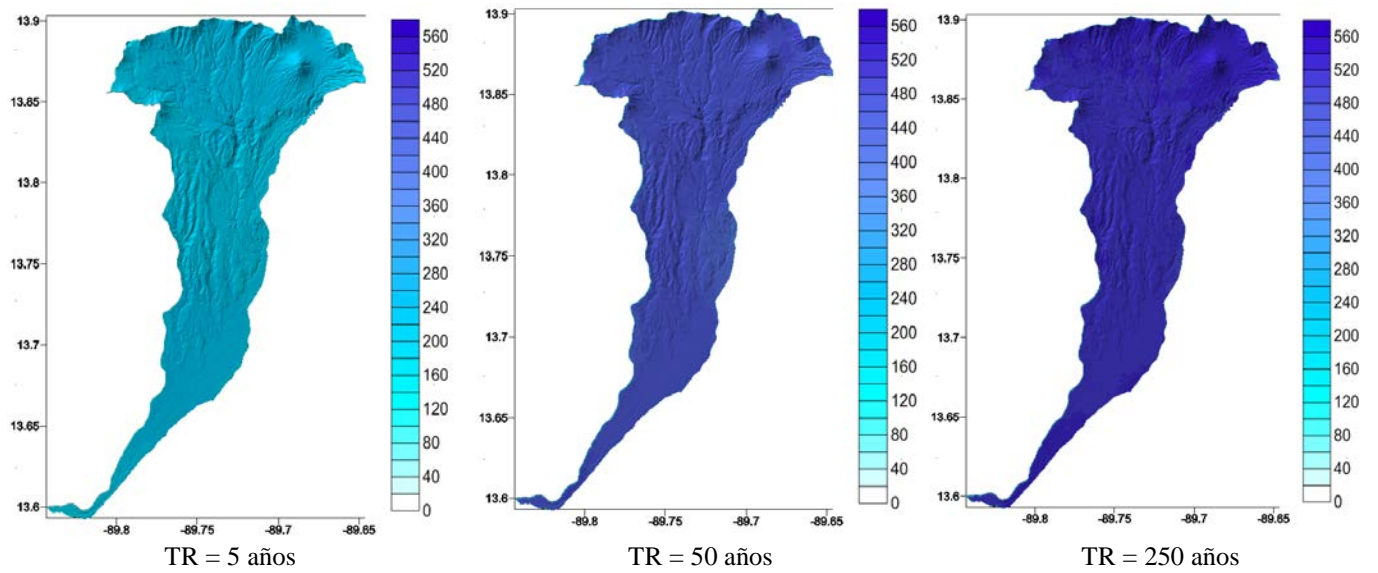
**Gráfico 26. Mapas probabilistas de amenaza de lluvias – Duración: 1 día - Cuenca Sensunapán. Profundidad de precipitación en [mm]**

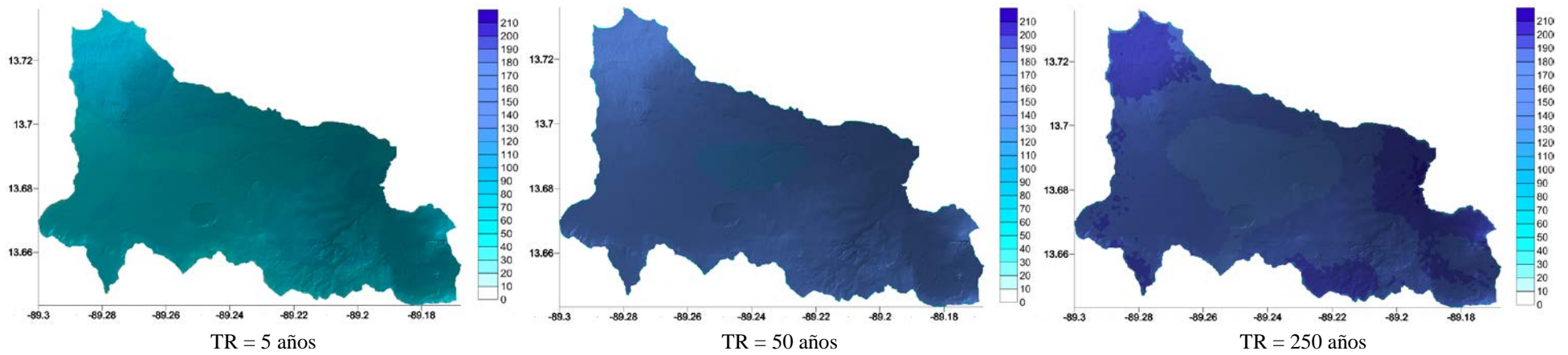


**Gráfico 27. Mapas probabilistas de amenaza de lluvia – Duración: 3 días - Cuenca Sensunapán. Profundidad de precipitación en [mm]**

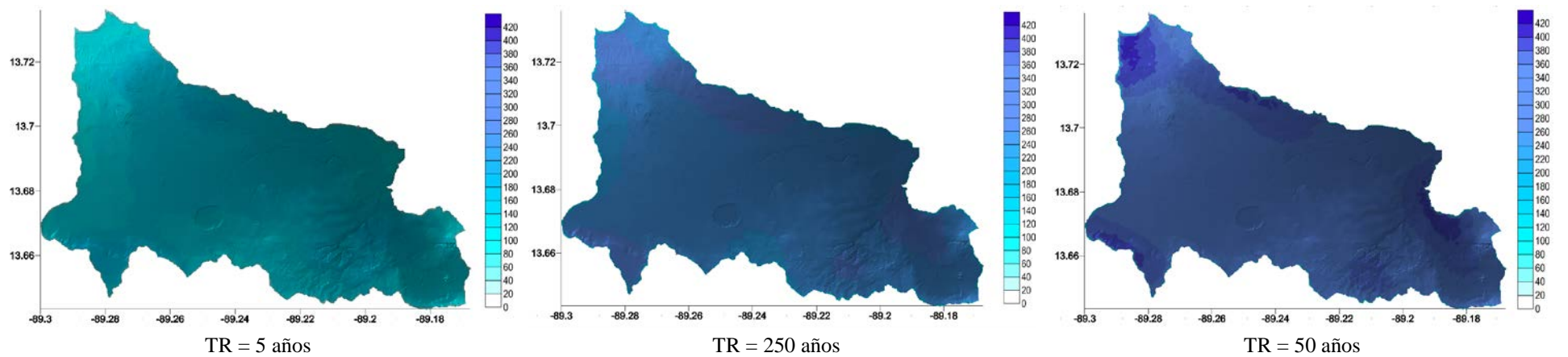


**Gráfico 28. Mapas probabilistas de amenaza de lluvia – Duración: 5 días - Cuenca Sensunapán.  
Profundidad de precipitación en [mm]**

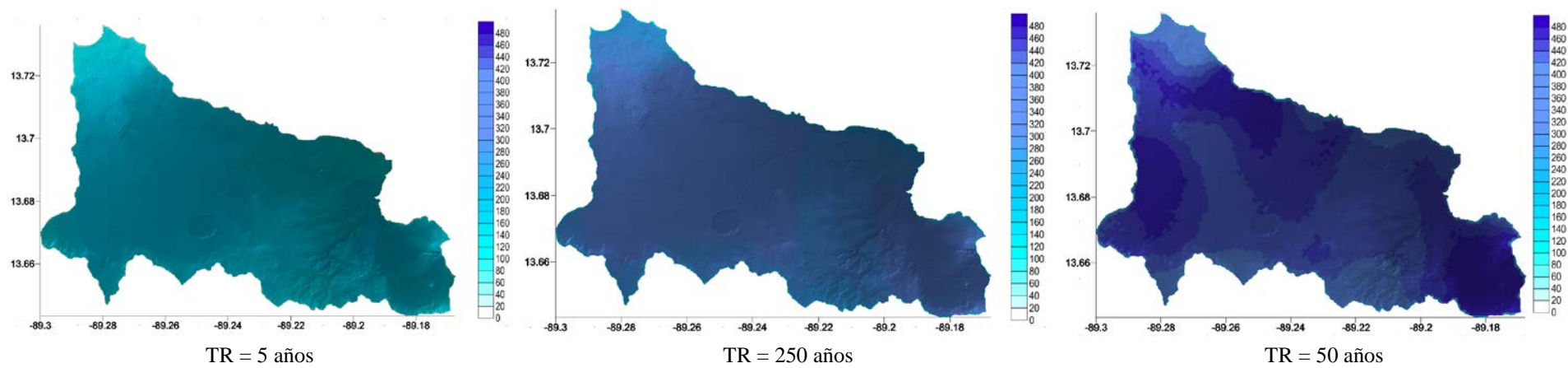




**Gráfico 29. Mapas probabilistas de amenaza de lluvia – Duración: 1 día - Cuenca Arenal Monserrat. Profundidad de precipitación en [mm]**



**Gráfico 30. Mapas probabilistas de amenaza de lluvia – Duración: 3 días - Cuenca Arenal Monserrat. Profundidad de precipitación en [mm]**



**Gráfico 31. Mapas probabilistas de amenaza de lluvias – Duración: 5 días - Cuenca Arenal Monserrat. Profundidad de precipitación en [mm]**



#### 4.4 Amenaza por inundación

##### 4.4.1 Información para el análisis de amenaza por inundación

Para el análisis de amenaza por inundación se requiere la información de amenaza de lluvia, la cual está contenida en los archivos “.AME” de lluvia tal como se explicó anteriormente. Simultáneamente se requiere la identificación de los tramos o zonas críticas de inundación con el fin de evaluar las condiciones hidrológicas en las cuencas aferentes a cada uno de estos tramos. Una vez identificados los tramos críticos y con el fin de realizar el análisis hidrológico se hace necesario contar con la siguiente información:

- Mapas de Factores de Esguerrimiento o Número de Curva (CN) (el CN corresponde a un parámetro empírico utilizado en hidrología para la estimación de la escorrentía directa y la infiltración producida por el exceso de lluvia).
- Modelo de elevación digital o información topográfica.
- Delimitación de cauces y cuencas específicos de cada zona crítica.

Por otro lado se hace necesario generar un proyecto HEC-RAS para cada uno de los tramos críticos de análisis. Para cada uno de éstos se requiere:

- Geometría detallada del cauce y secciones transversales.
- Geometría de estructuras hidráulicas y otras interferencias en el cauce.
- Valor de n de Manning (corresponde a un coeficiente empírico que depende de la rugosidad del canal y la sinuosidad del mismo).
- Coeficiente de contracción y expansión

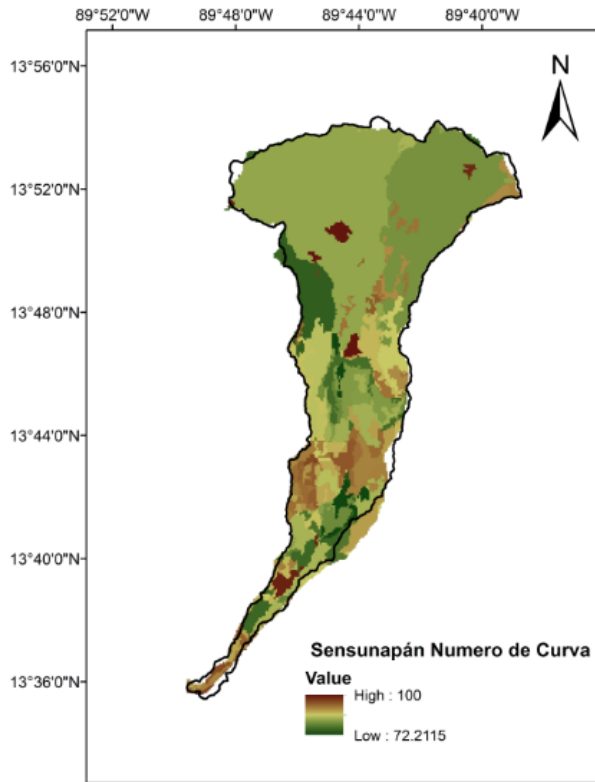
Para el presente caso se identifican un total de 8 tramos críticos de análisis. Cinco (5) en la cuenca Sensunapán y tres (3) tramos en la cuenca del Arenal Monserrat, los cuales se describen en detalle en el numeral 3.3.

Toda la información utilizada para el análisis de amenaza por inundación de las zonas críticas requerida para los análisis se presenta en anexo digital.

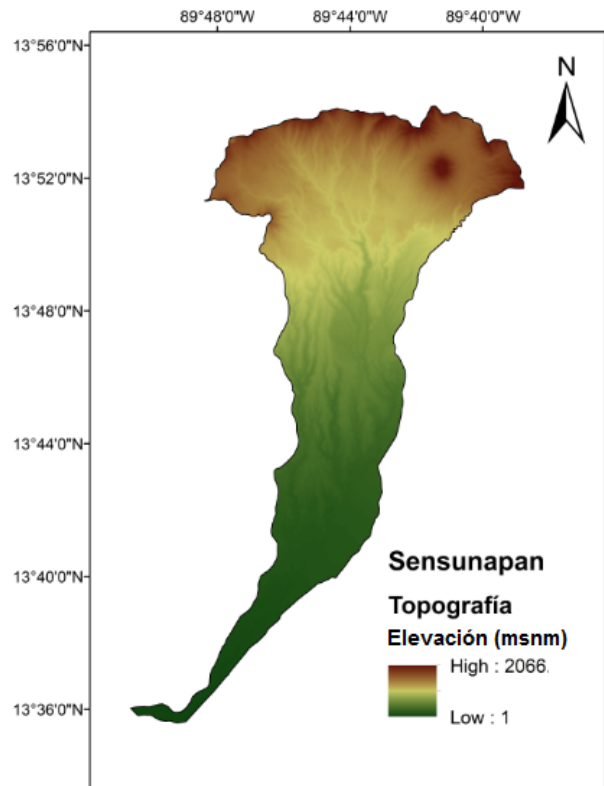
#### 4.4.2 Información complementaria para la cuenca Sensunapán

El Gráfico 32 y Gráfico 33 presentan la información del número de curva (índice de escurrimiento) y topográfica, respectivamente. El Gráfico 34 delimita las cuencas para conformar el modelo hidrológico en cada uno de los tramos críticos de inundación de la cuenca.

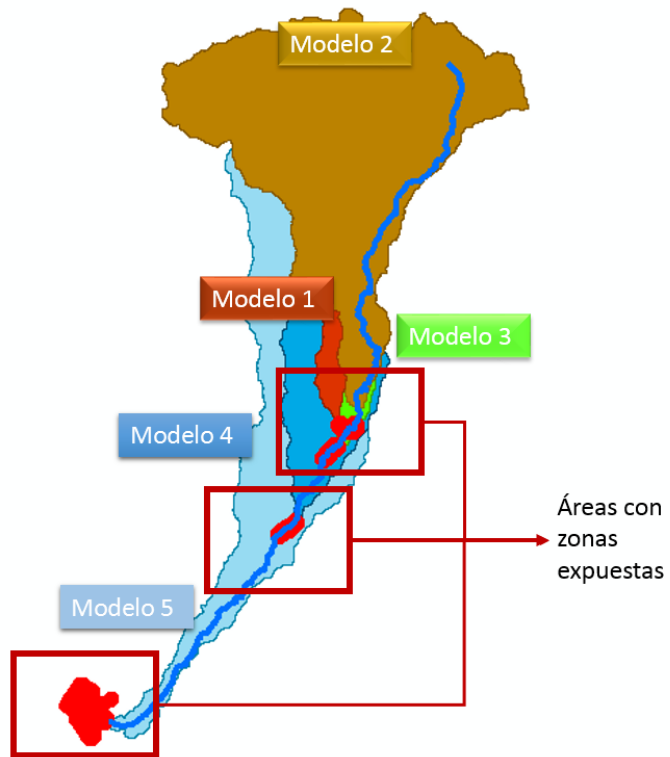
**Gráfico 32. Mapa de Número de Curva - Sensunapán**



**Gráfico 33. Topografía - Sensunapán**

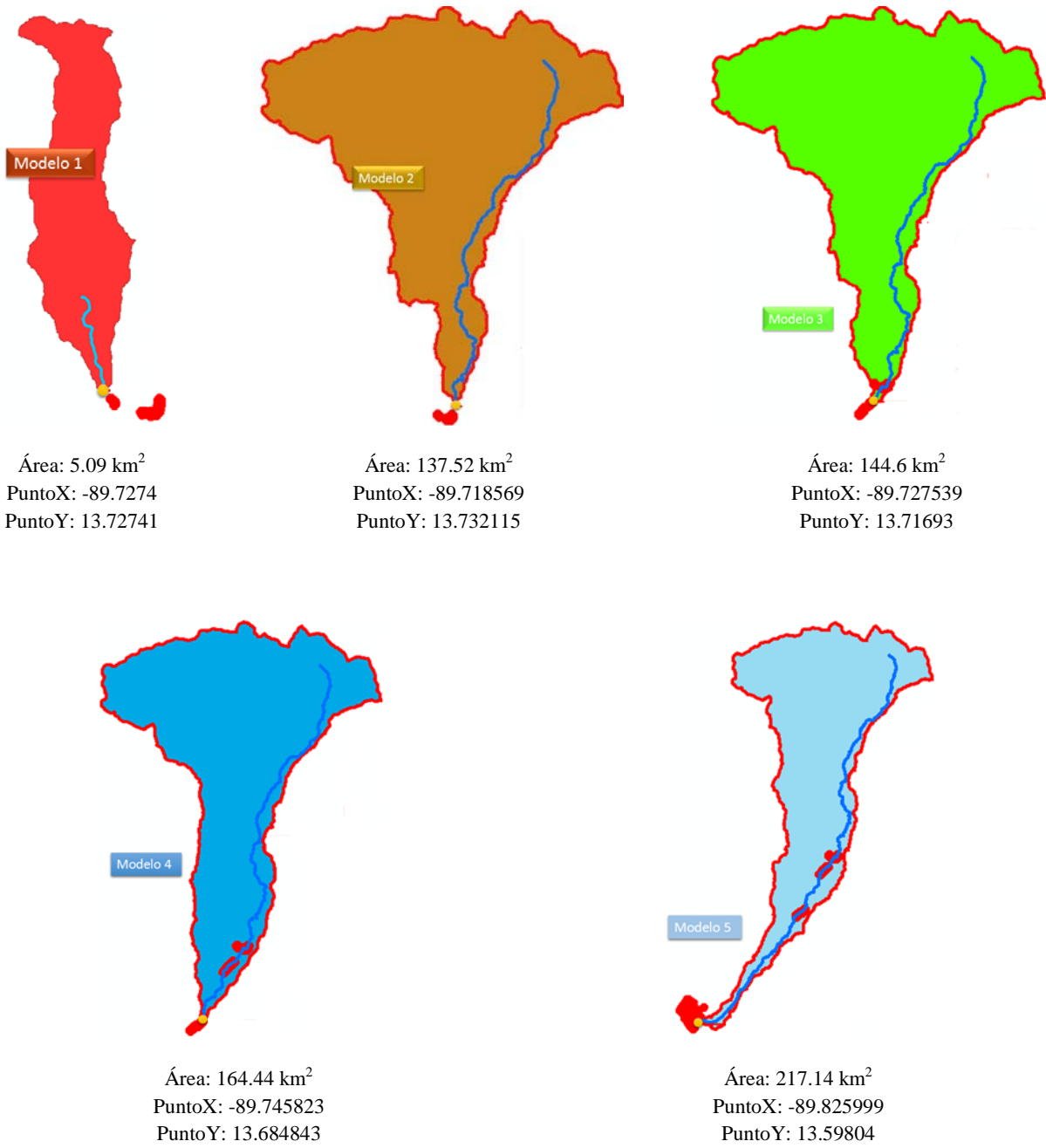


**Gráfico 34. Modelos hidrológicos correspondientes a cada una de las zonas críticas – Sensunapán**



En el Gráfico 35 se presenta en detalle la cuenca y cauce principal de drenaje correspondientes a cada una de las 5 zonas críticas identificadas en la cuenca Sensunapán. Adicionalmente, se especifica el área de drenaje y las coordenadas (Punto X y Punto Y) correspondientes al punto de descarga, es decir, el punto de obtención de hidrograma.

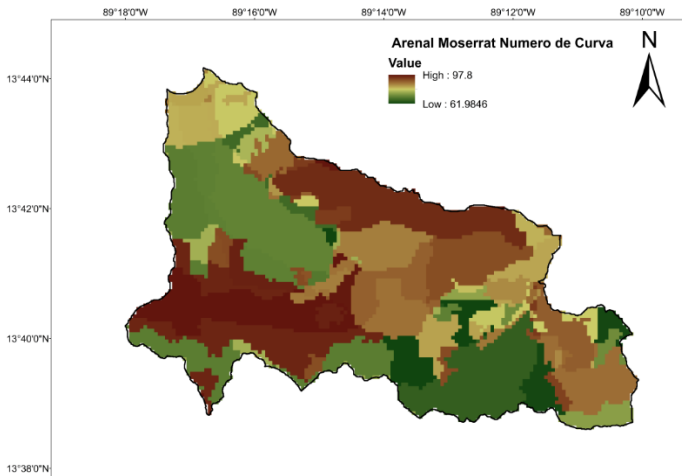
**Gráfico 35. Cuenca y cauce de drenaje para cada uno de las 5 zonas críticas – Sensunapán**



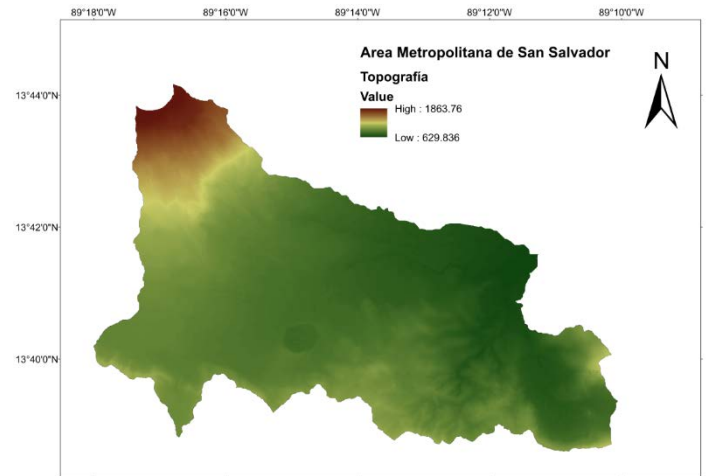
#### 4.4.3 Información complementaria para la cuenca Arenal Monserrat

El Gráfico 36 y Gráfico37 presentan la información del número de curva y topográfica. El Gráfico 38 delimita las cuencas para conformar el modelo hidrológico en cada uno de los tramos críticos de inundación de la cuenca.

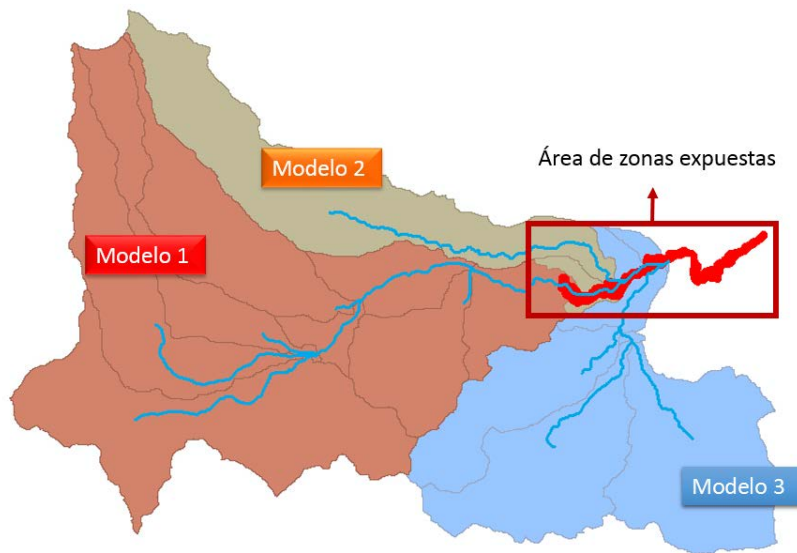
**Gráfico 36. Mapa de Número de Curva – Arenal Monserrat**



**Gráfico 37. Topografía – Arenal Monserrat**

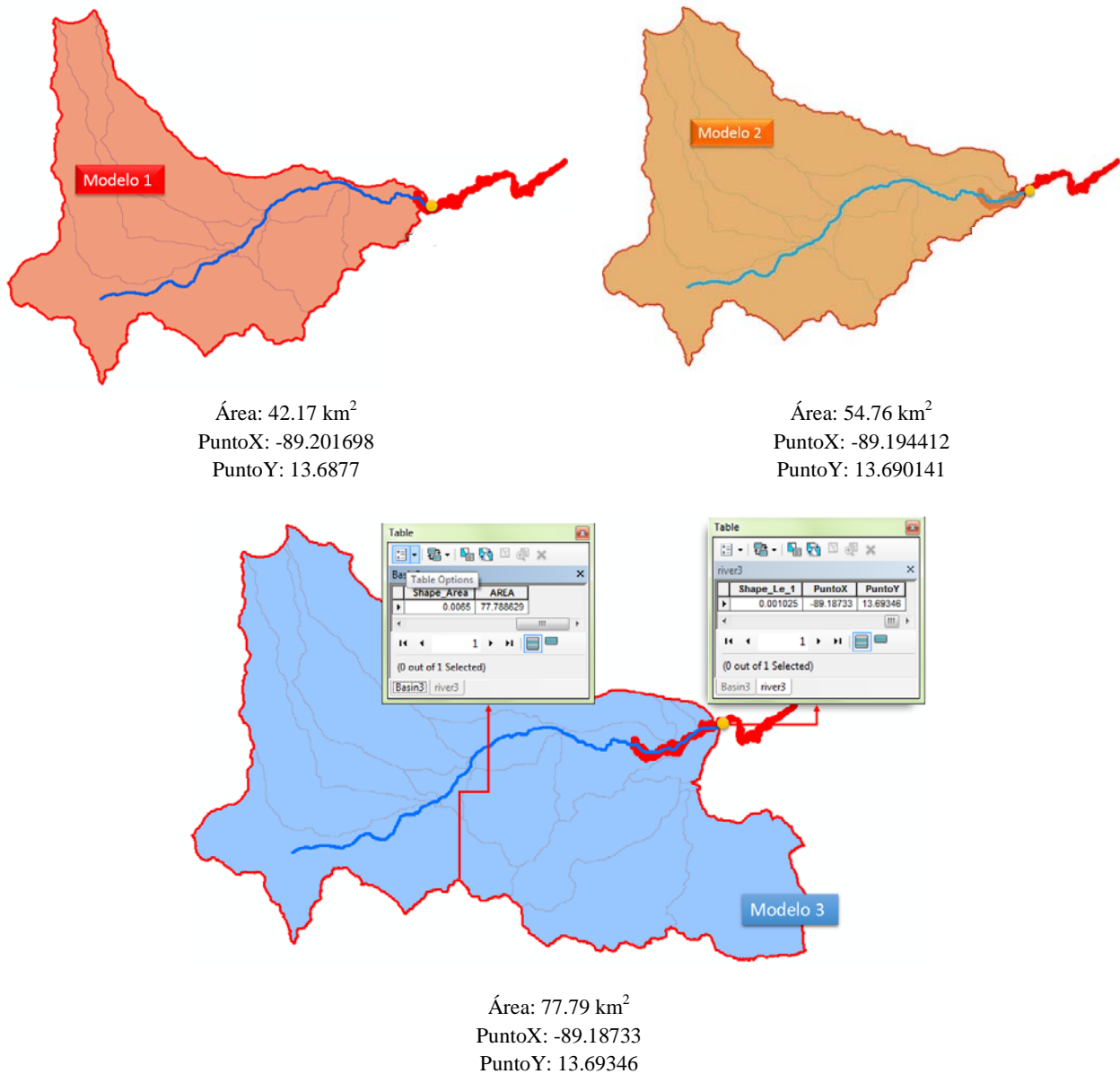


**Gráfico 38. Modelos hidrológicos correspondientes a cada una de las zonas críticas – Arenal Monserrat**



En la Gráfico 39 se presenta en detalle la cuenca y cauce principal de drenaje correspondientes a cada una de las 3 zonas críticas identificadas en la cuenca Arenal Monserrat. Adicionalmente, se especifica el área de drenaje y las coordenadas (PuntoX y PuntoY) correspondientes al punto de descarga, es decir, el punto de obtención de hidrograma.

**Gráfico 39. Cuenca y cauce de drenaje para cada uno de las 3 zonas críticas – Arenal Monserrat**



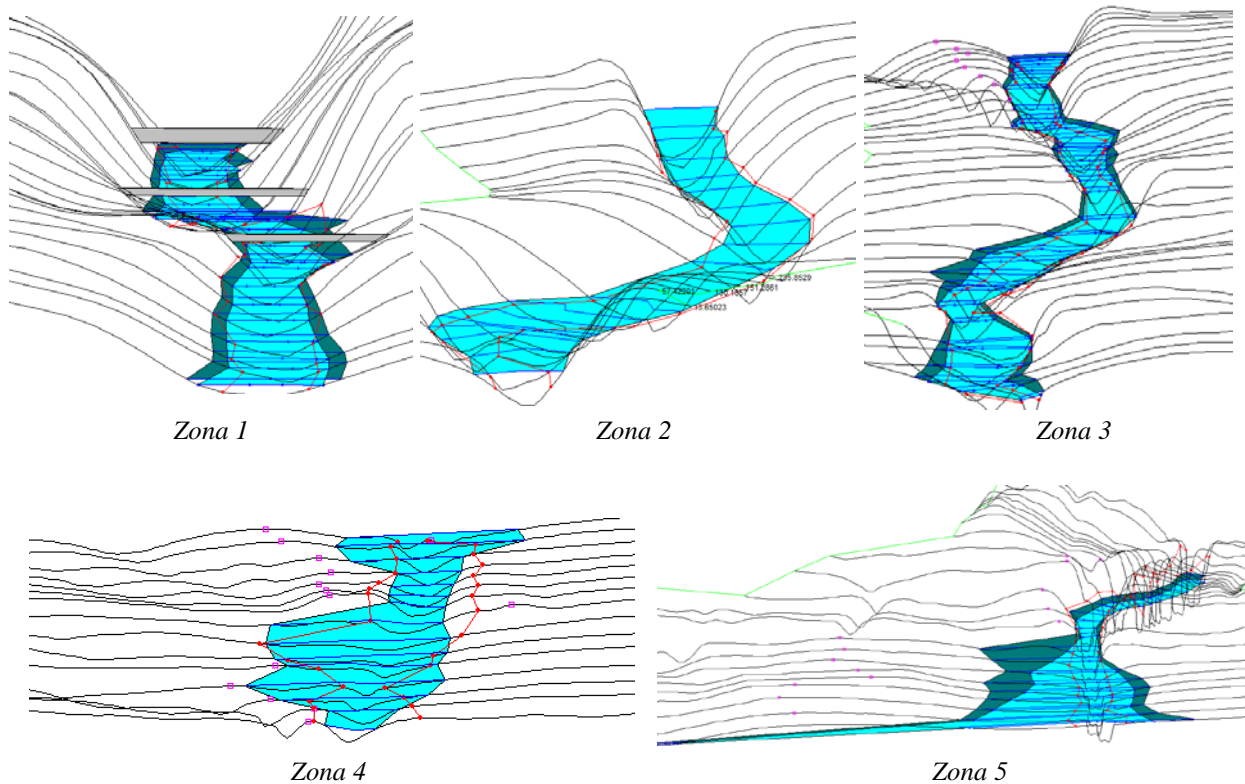
La información que se presenta para el análisis ya ha sido verificada y ajustada para efectos de lograr que los resultados del modelo se ajusten de manera aceptable a la información disponible para validación (ver numeral 0).

#### 4.4.4 Información detallada de secciones transversales en tramos críticos

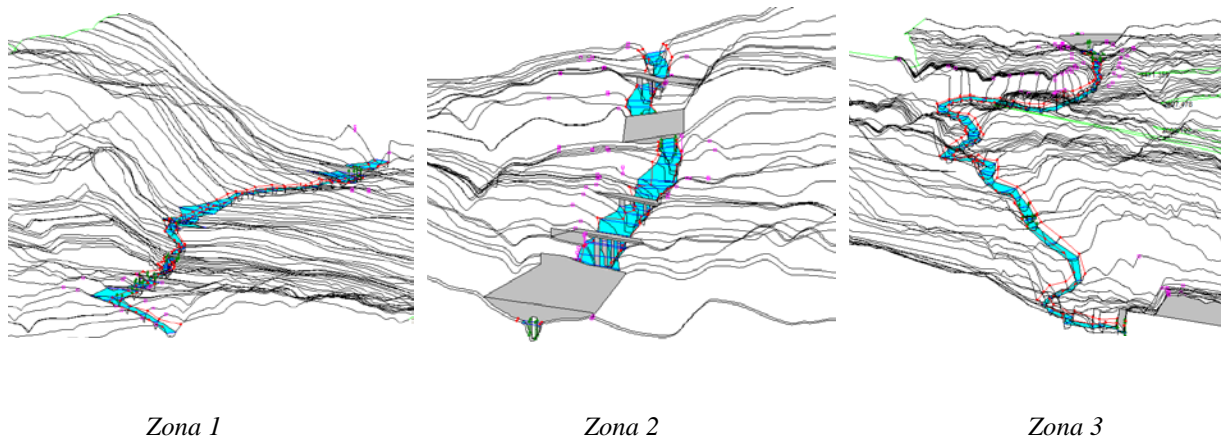
El modelo geométrico de los tramos de análisis para cada una de las cuencas se determinó mediante interpretación directa de los modelos de elevación digital disponibles y mediante el levantamiento de información topográfica llevada a cabo directamente por personal especializado del MARN. Todo el trabajo de campo al igual que el levantamiento de la información geométrica estuvo a cargo del personal del MARN. Tal como se explicó anteriormente, la cuenca Sensunapán se dividió en 5 zonas independientes para la modelación hidráulica, de las cuales 3 se encuentran en la Zona Alta, una en la Zona Media, y otra en la Zona Baja. Por su parte la cuenca Arenal Monserrat se dividió en 3 zonas independientes.

En el Gráfico 40 y Gráfico 41 se presenta de manera esquemática la información disponible para el análisis hidrodinámico que permite establecer las huellas de inundación para cada uno de los escenarios estocásticos de lluvias. La información se presenta para cada una de las zonas críticas en las cuencas de análisis, Sensunapán y Arenal Monserrat.

**Gráfico 40. Información ilustrativa disponible para el análisis de inundación- cuenca Sensunapán**



**Gráfico 41. Información ilustrativa disponible para el análisis de inundación- cuenca Arenal Monserrat**



#### 4.5 Calibración y validación de modelos hidrológicos e hidráulicos

##### 4.5.1 Proceso general de calibración

Existen diversos métodos para realizar el proceso de calibración o validación en los modelos hidrológicos e hidráulicos. La selección de dichos métodos se basa en la información que se tiene disponible en la cuenca de estudio y el nivel de precisión que se desea obtener.

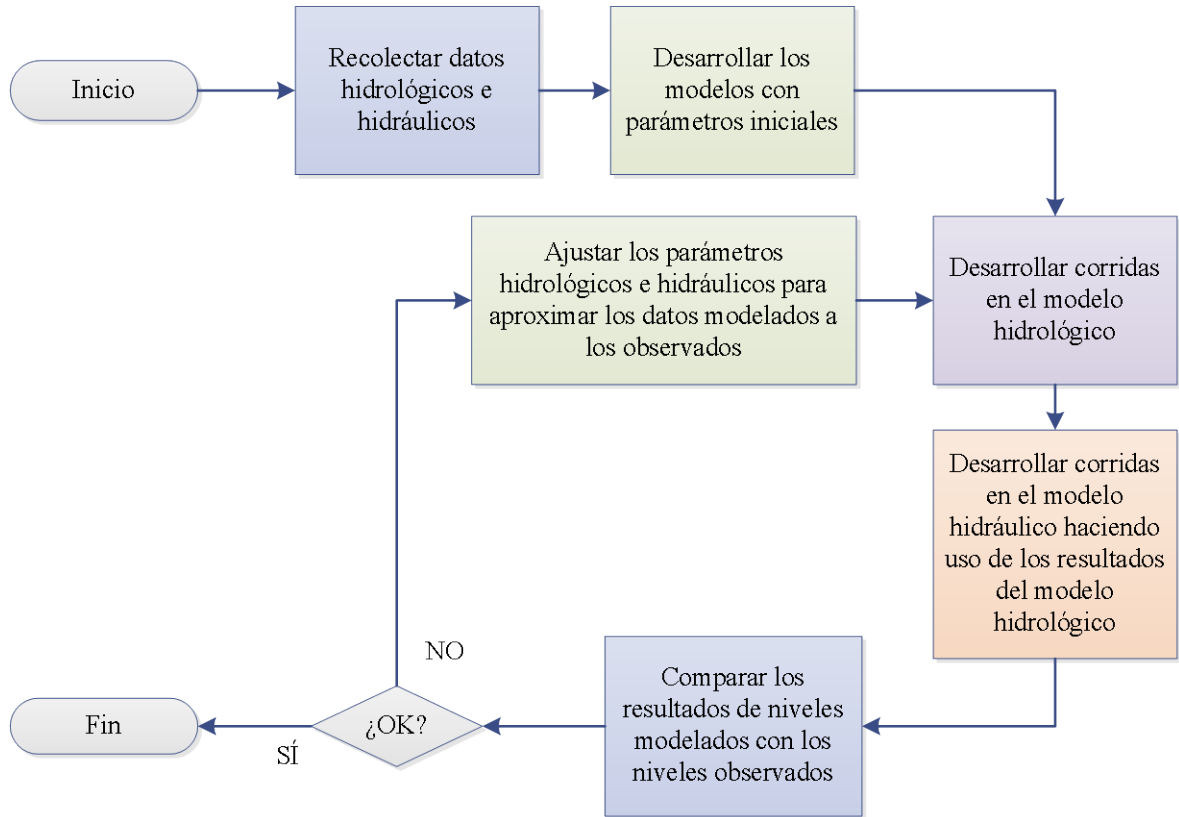
Los dos métodos de calibración más utilizados involucran los siguientes tipos de información, a fin de realizar la comparación con los resultados obtenidos por medio de los modelos:

- a) Datos obtenidos de estaciones hidrométricas, las cuales registran las variaciones de nivel o caudal generado por el río en un punto específico.
- b) Datos recolectados en campo, por medio de entrevistas a la población o evidencia física, en donde se detalla la altura de inundación alcanzada o tirante registrado en un evento hidrometeorológico. Esta información permite identificar la huella de inundación generada por el evento.

Para el caso de las cuencas Arenal Monserrat y Río Sensunapán, se seleccionó el método de la huella de inundación identificada en campo. Posteriormente, se siguió un procedimiento de prueba y error, en el cual se modifican, de manera progresiva, los parámetros hidrológicos e hidráulicos que están contemplados en los modelos. Este procedimiento de prueba y error, se hace conforme a las siguientes rutinas:



**Gráfico 42. Proceso de calibración utilizado en los modelos hidrológicos e hidráulicos**



Fuente: MARN

Entre los parámetros hidrológicos e hidráulicos que se modifican para ajustar los datos obtenidos por los programas de modelación, se puede mencionar: número de curva (CN), tiempo de concentración (Tc), tiempo de retardo, constante de recesión de caudal base, coeficiente de rugosidad de Manning, áreas inefectivas en entrada y salida en estructuras hidráulicas, entre otras variables.

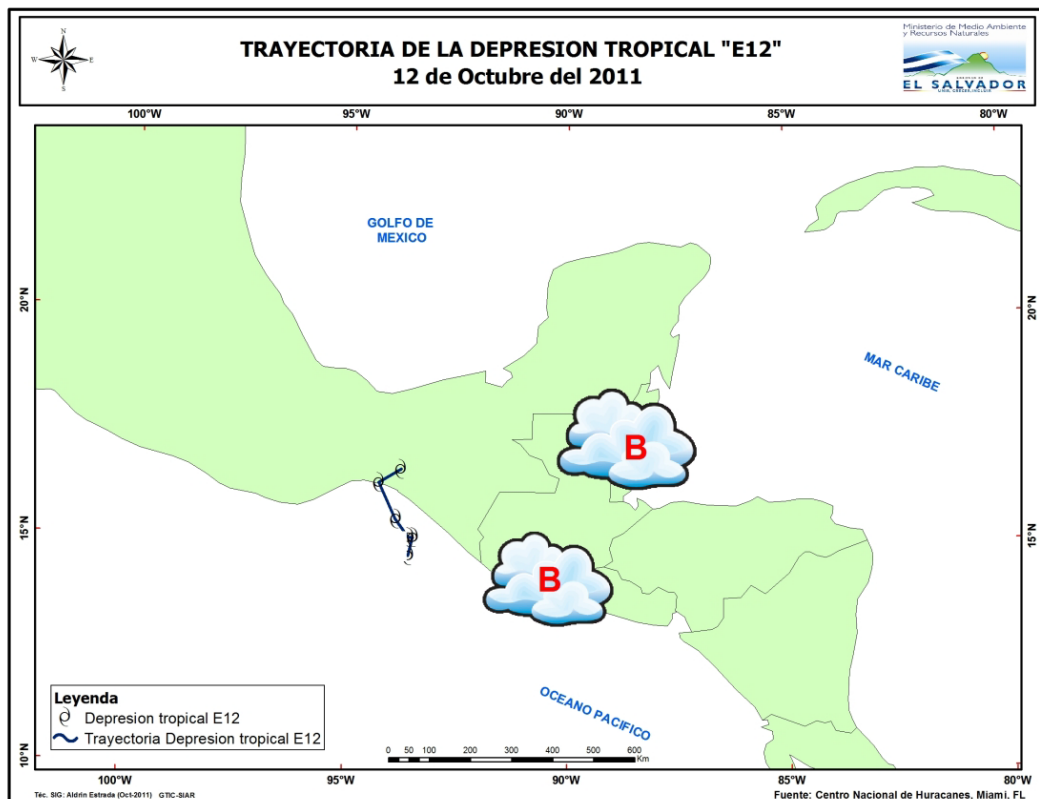
Entre la información disponible referente a las cuencas Arenal Monserrat y Sensunapán se tiene: modelos hidrológicos elaborados como parte de estudios previos, mapas de inundación para diferentes periodos de retorno elaborados en el año 2011, mapa de lluvia registrada para diferentes eventos hidrometeorológicos y fichas de inspecciones de campo en donde se obtuvieron alturas y extensión de inundación para diferentes eventos históricos. Toda esta información fue utilizada para la calibración de los modelos hidrológicos e hidráulicos contemplados en este proyecto.

#### 4.5.2 Evento hidrometeorológico: Depresión Tropical 12E

Una vez desarrollados y estructurados los modelos hidrológicos e hidráulicos, se procedió a generar corridas con un evento hidrometeorológico específico, el cual fue seleccionado bajo los siguientes criterios: reciente en el tiempo, que haya generado problemas de inundación, y del cual se tuviera la suficiente cantidad de información, tal como altura y extensión de la inundación. A partir de esto, se decidió utilizar la Depresión Tropical 12E (DT12E) como evento de calibración. Dicho evento afectó a los países de Guatemala, México, Belice y El Salvador entre el 10 y 20 de octubre del año 2011.

##### 4.5.2.1 *Sinopsis Meteorológica del evento DT12E*

**Gráfico 43. Trayectoria de la Depresión Tropical 12E y los sistemas de baja presión estacionarios**



Fuente: MARN, 2011a

El domingo 9 de octubre se formó un sistema de Baja Presión sobre las costas del pacifico. Este sistema, cuyo desplazamiento fue lento, se declaró Depresión Tropical No. 12 en la madrugada del miércoles 12 de octubre. En la tarde de este mismo día, la Depresión Tropical tocó tierra en las cercanías de Tehuantepec, debilitándose gradualmente. Posteriormente, el sistema ciclónico tropical dejó dos remanentes dispersos, los cuales formaron dos bajas presiones: una en las



#### 4.5.2.3 Comportamiento hidrológico observado en las cuencas Arenal Monserrat y Sensunapán.

Durante el evento DT12E, se registraron desbordamiento en los ríos Sensunapán y Arenal Monserrat. Como consecuencia de los desbordamientos de los ríos, se registraron inundaciones muy focalizadas en las zonas o comunidades mostradas en el Cuadro 6.

**Cuadro 6. Algunas comunidades afectadas por el desbordamiento de los ríos Sensunapán y Arenal Monserrat**

Cuenca Río Sensunapán	Cuenca Arenal Monserrat
Comunidad Río Julupe	Colonia La Málaga
Comunidad Río Bonito	Comunidad La Chacra
Comunidad Vega Sensunapán	
Comunidad Vega de la Pradera	

Si bien es cierto que el desbordamiento de los ríos Sensunapán y Arenal Monserrat afectó a comunidades muy puntuales que están ubicadas en sus riberas, dichas comunidades se encuentran con problemas recurrentes de inundación. Cabe mencionar, que posterior al paso de la DT12E, se desarrolló una campaña de inspección de campo en zonas de inundación de estos ríos, para levantar información de altura/extensión de inundación, daños en vivienda y contactos para conformar la red de observadores locales (MARN, 2011b; MARN, 2012a). Estos informes de inspecciones de campo, pertenecen a la base de datos del MARN y se utilizaron para el proceso de calibración de los modelos hidrológico e hidráulico en los ríos Sensunapán y Arenal Monserrat.

#### 4.5.3 Descripción de los tipos de calibración utilizados

Con base en la calidad y cantidad de información que se tiene en las cuencas de estudio, se decidió ocupar el método de comparar alturas/extensión de inundación histórica contra las brindadas por el modelo hidráulico HEC-RAS.

Cabe mencionar que el procedimiento empleado sigue los lineamientos mostrados en el Gráfico 42 en donde se realizó un procedimiento de prueba y error para ajustar parámetros hidrológicos e hidráulicos de dichas cuencas hidrográficas.

Dentro del método seleccionado en el proyecto, se definieron dos criterios de análisis de resultados:

- a) **“Se inunda o no se inunda”**. Se hizo uso de las bases de datos de información recolectada en campo de las zonas donde se generó inundación por el evento DT12E. Esta información se comparó con las extensiones de inundación obtenidas con el modelo hidráulico HEC-RAS y, si se observaba la inundación, se consideraba calibrado.
- b) **“Niveles levantados en campo”**. Consiste en una comparación entre las alturas de inundación obtenidas con el modelo versus las alturas obtenidas en inspecciones de campo. Este criterio es el de mayor uso y también el que requiere mayor información. El procedimiento realizado fue comparar los tirantes o alturas de inundación para el evento DT12E obtenidos en inspecciones de campo, con los tirantes o alturas de inundación brindados por el modelo. Una vez el porcentaje de diferencia entre la altura observada versus la computada fuera menor o igual al 20%, se detiene el proceso de prueba y error y se consideraba el modelo calibrado.

En el Cuadro 7, se muestran los criterios usados para los 8 modelos distintos generados en el proyecto (uno para cada zona crítica). Cabe mencionar que la selección de criterio se realizó con base en la información disponible y en la calidad de información que se tiene en cada una de las zonas analizadas.

**Cuadro 7. Criterio de calibración usada en las cuencas de los ríos Sensunapán y Arenal Monserrat**

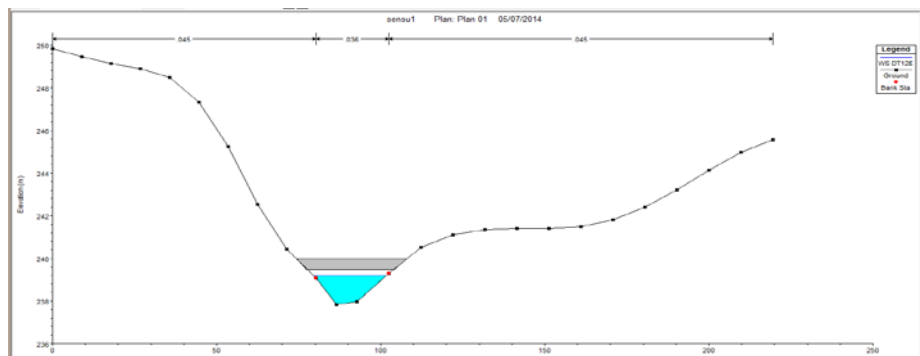
Cuenca Hidrográfica	Modelo HEC-RAS	Criterio “Se inunda o no se inunda”	Criterio “Niveles en campo”
<b>Sensunapán</b>	Sensunapán 1	x	
	Sensunapán 2	x	
	Sensunapán 3	x	
	Sensunapán 4	x	
	Sensunapán 5		x
<b>Arenal Monserrat</b>	Arenal Monserrat 1		x
	Arenal Monserrat 2		x
	Arenal Monserrat 3		x

#### 4.5.4 Resultados del proceso de calibración

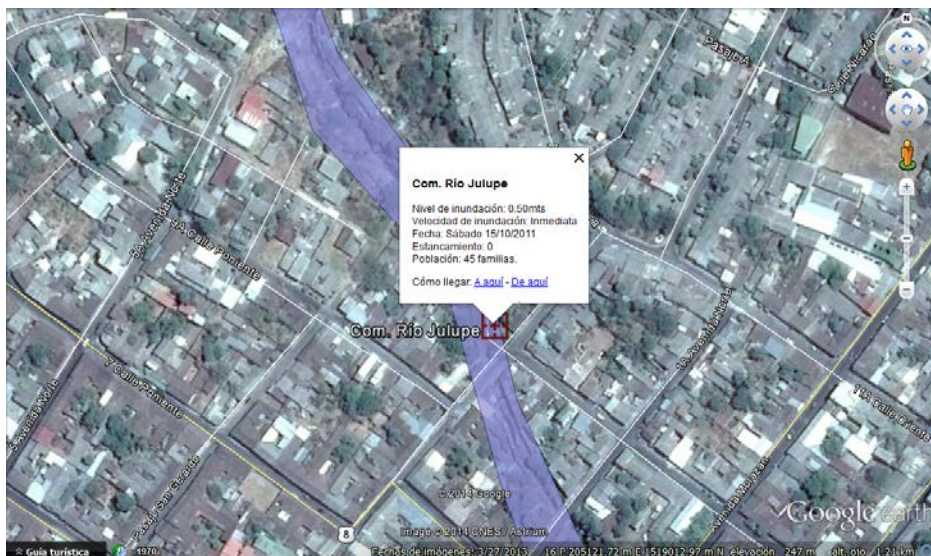
##### Modelo Sensunapán – Zona 1

Durante la visita de campo post DT12E, se realizaron inspecciones en la Comunidad Río Julupe, la cual se encuentra ubicada al margen derecho del río Julupe. Según datos del informe de visita de campo (MARN, 2011b), el nivel del río alcanza la altura del puente. En la siguiente imagen, se puede observar que los resultados del modelo validan esta información, además de generar inundación en dicha comunidad.

**Gráfico 45. Altura de inundación alcanzada en el Puente Río Julupe, cercano a comunidad del mismo nombre**



**Gráfico 46. Extensión de inundación brindada por el modelo HEC-RAS en donde se valida la información de inundación por el desbordamiento del río Julupe durante el paso de la DT12E (2011) en la Zona 1**



## Modelo Sensunapán – Zona 2

Según la base de datos de inundación generada a partir del desbordamiento del río Sensunapán en el año 2011, se generó inundación en la comunidad Río Bonito. Esta comunidad está ubicada en el margen izquierdo del cauce. Además, se tiene el conocimiento que la DT12E no generó inundaciones en la comunidad Luces del Río, ubicada también en el margen izquierdo del cauce (MARN, 2011b).

Con base en el criterio de inundación “Se inunda o no se inunda” utilizado para este modelo, se verifica la información que en comunidad Río Bonito, se inunda. Asimismo, la comunidad Luces del Río, no sufrió inundaciones por el paso de la DT12E, lo cual se corroboró con el los datos obtenidos en el modelo HEC-RAS. Por lo tanto, este modelo cumple los criterios de calibración establecidos.

**Gráfico 47. Extensión de inundación dada por el modelo HEC-RAS en donde se valida la información de inundación por el desbordamiento del río Sensunapán durante el paso de la DT12E (2011) en la Zona 2**



### Modelo Sensunapán – Zona 3

Con base en la información recolectada en campo post DT12E, se registró inundación en las comunidades Vega Sensunapán y Vega Veracruz, las cuales, están ubicada en el margen derecho del cauce del río Sensunapán (MARN, 2011b). Al validar los resultados dados por el modelo HEC-RAS, se puede corroborar que efectivamente el modelo brinda esta información. Por lo tanto, el modelo Sensunapán 3 cumple las condiciones hidrológicas e hidráulicas observadas durante el evento de calibración (ver Gráfico 48).

**Gráfico 48. Extensión de inundación brindada por el modelo HEC-RAS en donde se valida la información de inundación por el desbordamiento del río Sensunapán durante el paso de la DT12E (2011) en la Zona 3**

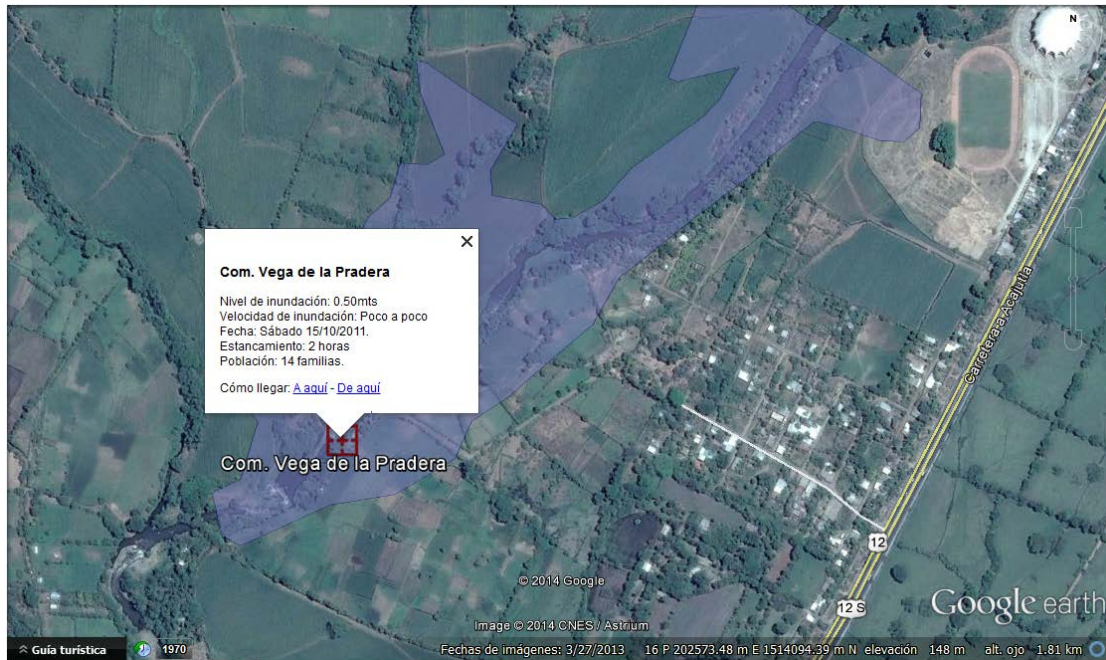


### Modelo Sensunapán – Zona 4

Con base en las fichas de inspección de campo post DT12E en donde se detalla que la Comunidad Vega de La Pradera se vio afectada por el desbordamiento del río Sensunapán como paso de la Depresión Tropical 12E (2011) (MARN, 2011b). Dicha comunidad, se encuentra ubicada en el margen izquierdo del cauce. La anterior información se pudo corroborar a partir de los resultados del modelo hidráulico, ya que éstos se encuentran muy cercanos a la realidad de las condiciones hidráulicas e hidrológicas del río.



**Gráfico 49. Extensión de inundación brindada por el modelo HEC-RAS en donde se valida la información de inundación por el desbordamiento del río Sensunapán durante el paso de la DT12E (2011) en la Zona 4**

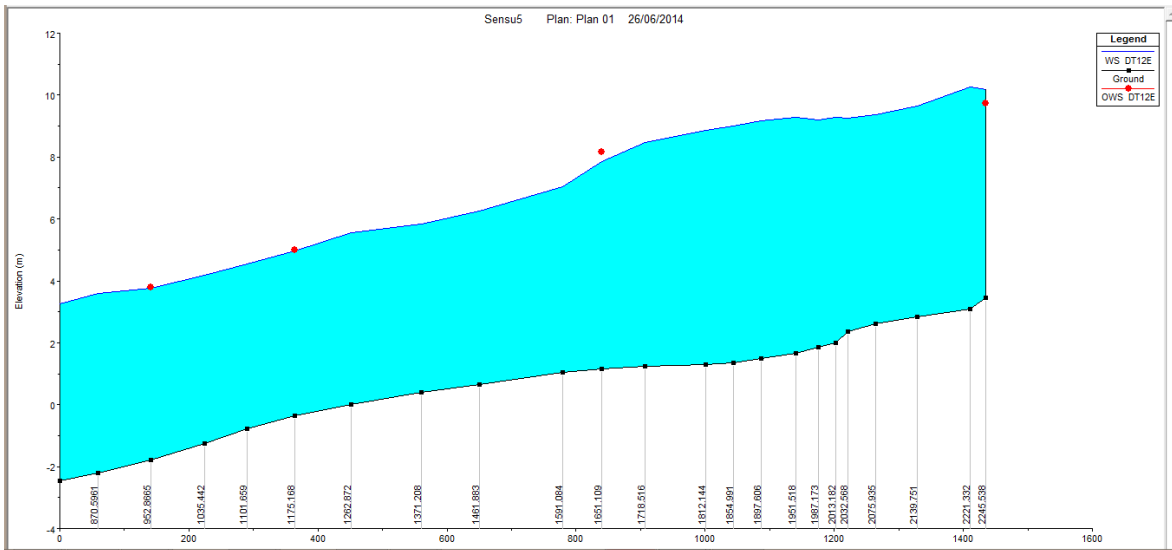


### **Modelo Sensunapán – Zona 5**

Con base en la información recolectada en campo en donde se detalla la altura de inundación alcanzada por el nivel del río Sensunapán por el paso de la DT12E (2011) (MARN, 2011b), se comparó dicha altura de inundación contra las obtenidas por el modelo hidráulico HEC-RAS. Una vez el porcentaje de diferencia relativa entre las dos medidas fuera menor al 20%, se consideró que el modelo estaba calibrado.

En el siguiente perfil longitudinal del cauce, se puede observar dichas alturas de calibración (alturas de inundación obtenidas en campo) y las alturas calculadas por el modelo hidráulico. En el Cuadro 8, se presentan los porcentajes de diferencia entre las alturas de inundación.

**Gráfico 50. Perfil longitudinal del modelo Sensunapán – Zona 5. Los puntos rojos representan niveles de calibración obtenidos de inspecciones de campo post DT12E**



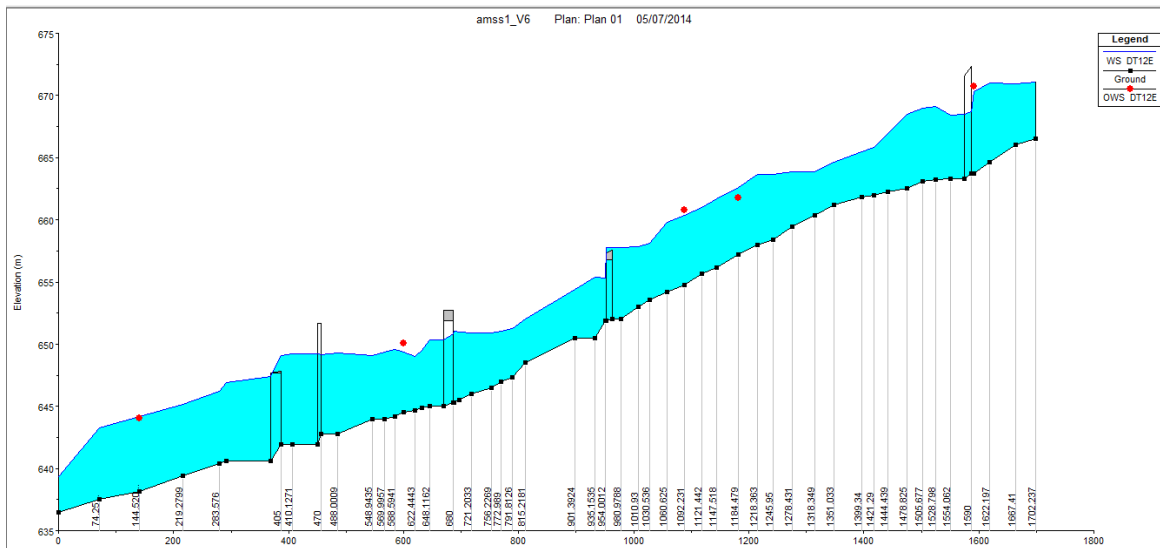
**Cuadro 8. Diferencia relativa entre la altura de calibración (observada) versus la altura computada por el modelo hidráulico HEC-RAS – Sensunapán Zona 5**

Abscisa (m)	Altura Observada (m)	Altura Computada (m)	Diferencia relativa
2245.538	6.31	6.77	7.29%
1651.109	7.00	6.70	4.29%
1175.168	5.34	5.28	1.12%
952.866	5.59	5.53	1.07%

### Modelo Arenal Monserrat – Zona 1

El criterio de análisis de resultados fue el mismo que en el modelo anteriormente descrito, es decir, “Niveles levantados en campo”. En dicho proceso se compararon las alturas de inundación observadas o recolectadas en campo (MARN, 2012a) versus las obtenidas a través el modelo hidráulico. En el Gráfico 51 se presenta el perfil longitudinal del modelo Arenal Monserrat 1 y las alturas de inundación observadas para el evento DT12E. Adicionalmente, en el Cuadro 9 se encuentran las diferencias relativas entre las profundidades observadas y las computadas, lo cual demuestra que se ha cumplido el criterio de calibración.

**Gráfico 51. Perfil longitudinal del modelo Arenal Monserrat – Zona 1. Los puntos rojos representan niveles de calibración obtenidos de inspecciones de campo post DT12E**



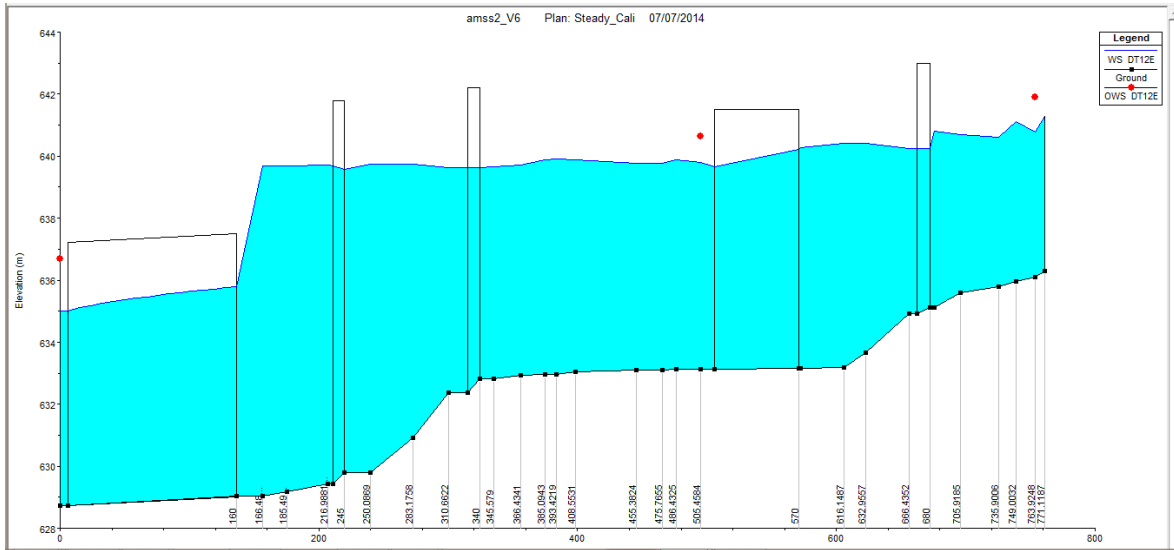
**Cuadro 9. Diferencia relativa entre la altura de calibración (observada) versus la altura computada por el modelo hidráulico HEC-RAS – Arenal Monserrat Zona 1**

Abscisa (m)	Altura Observada (m)	Altura Computada (m)	Diferencia Relativa
1594.687	7.05	6.59	6.52%
1184.479	4.60	5.43	18.04%
1092.231	6.00	5.56	7.33%
603.4404	5.55	4.89	11.89%
144.5208	5.90	5.99	1.53%

### Modelo Arenal Monserrat – Zona 2

Las alturas de inundación registradas en las inspecciones de campo post DT12E (2011) (MARN, 2012a), fueron comparadas con las obtenidas por medio del modelo hidráulico HEC-RAS. El resultado se muestra en el Gráfico 52. Adicionalmente, en el Cuadro 10 se presentan las diferencias relativas entre las dos alturas o tirantes de inundación, las cuales confirman el cumplimiento de los criterios de calibración.

**Gráfico 52. Perfil longitudinal del modelo Arenal Monserrat – Zona 2. Los puntos rojos representan niveles de calibración obtenidos de inspecciones de campo post DT12E**



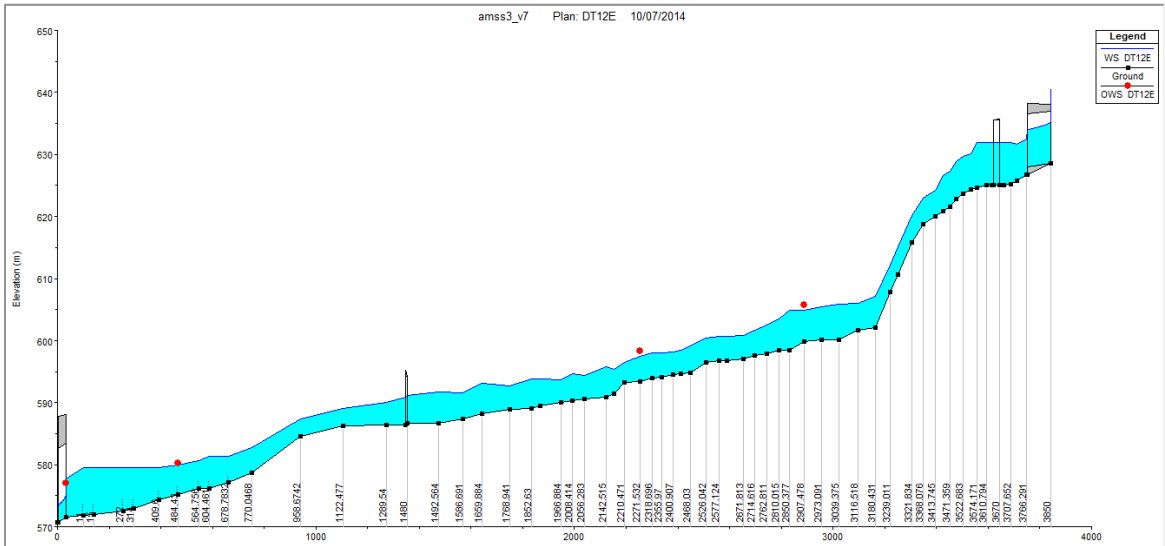
**Cuadro 10. Diferencia relativa entre la altura de calibración (observada) versus la altura computada por el modelo hidráulico HEC-RAS – Arenal Monserrat Zona 2**

Abcisa (m)	Altura Observada (m)	Altura Computada (m)	Diferencia relativa
763.9248	5.41	4.69	13.31%
505.4584	7.50	6.68	10.93%
10.20855	7.50	6.63	11.60%

### Modelo Arenal Monserrat – Zona 3

Se realizó la comparación de los tirantes observados recopilados en inspecciones de campo post DT12E (2011) (MARN, 2012a) y los obtenidos por el modelo hidráulico HEC-RAS. En el Gráfico 53 se puede observar el perfil longitudinal del cauce del río Arenal Monserrat a lo largo de la Zona 3 y los puntos de calibración obtenidos en campo. Una vez los valores observados y los computados se ajustaban con un porcentaje de diferencia menor a 20%, se concluyó que el modelo estaba calibrado. Dichos resultados se encuentran en la Cuadro 11.

**Gráfico 53. Perfil longitudinal del modelo Arenal Monserrat – Zona 3. Los puntos rojos representan niveles de calibración obtenidos de inspecciones de campo post DT12E.**



**Cuadro 11. Diferencia relativa entre la altura de calibración (observada) versus la altura computada por el modelo hidráulico HEC-RAS – Arenal Monserrat Zona 3.**

Abscisa (m)	Altura Observada (m)	Altura Computada (m)	Diferencia relativa
2907.478	5.90	4.98	15.59%
2271.532	5.00	4.03	19.40%
484.4318	4.90	4.71	3.88%
51.30564	5.55	6.12	10.27%

#### 4.6 Resultados de la amenaza por inundación en los tramos críticos

##### 4.6.1 Archivos .AME de inundación

Utilizando como base la información de amenaza de lluvias, sumado a la información de los modelos hidrológicos e hidráulicos ya calibrados de acuerdo con el numeral anterior, se genera la información de amenaza por inundación en cada uno de los tramos críticos de análisis. Los análisis se realizan utilizando el software *ERN-Inundación-V2.2* el cual genera los archivos “.AME” de inundación. Adicionalmente y con el software *CAPRA-GIS-V2.0* se pueden obtener los mapas de amenaza probabilistas de inundación en los cuales se presenta la distribución geográfica de las profundidades de inundación para varios periodos de retorno de análisis en cada una de las zonas consideradas. Los archivos de amenaza de inundación generados son los indicados en el Cuadro 12.

**Cuadro 12. Archivos de amenaza de inundación generados para cada una de las cuencas analizadas**

CUENCA	Tramo Crítico	Amenazas de lluvia utilizada para el análisis	Nombre del archivo “.AME” de inundación	Número de eventos estocásticos de inundación
<b>SENSUNAPÁN</b>	1	Análisis estocástico de lluvias no-huracanadas	Sensu1_AMEInundación_Xdías*	2,200
	2		Sensu2_AMEInundación_Xdías*	2,200
	3		Sensu3_AMEInundación_Xdías*	2,200
	4		Sensu4_AMEInundación_Xdías*	2,200
	5		Sensu5_AMEInundación_Xdías*	2,200
<b>ARENAL MONSERRAT</b>	1		Amss1_AMEInundación_Xdías*	2,400
	2		Amss2_AMEInundación_Xdías*	2,400
	3		Amss3_AMEInundación_Xdías*	2,400

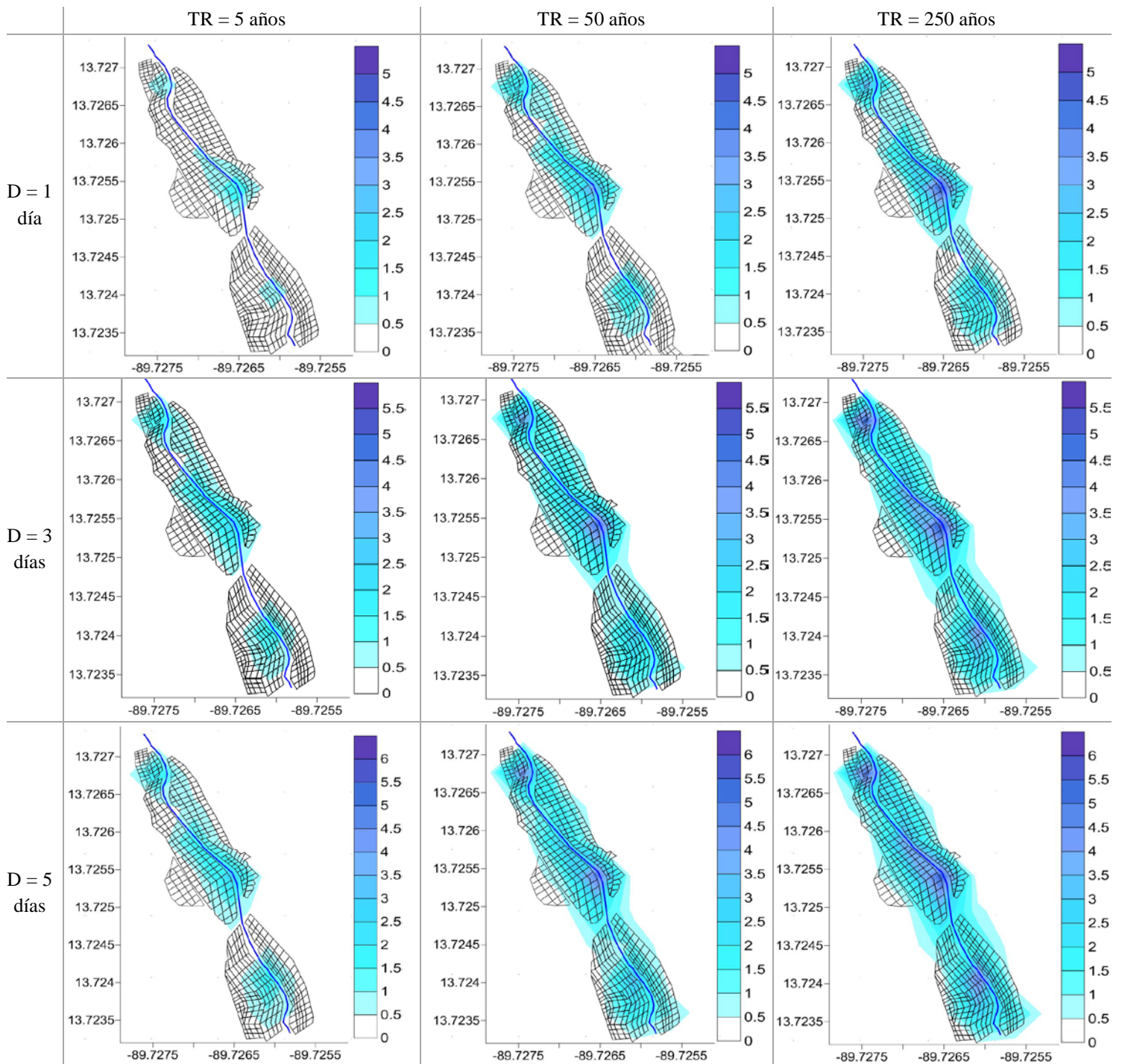
\*Para cada tramo crítico de las cuencas, se tienen tres archivos “.AME” con el nombre TRAMO\_AMEInundación\_Xdías donde la X representa el número de días correspondiente a cada archivo “.AME” de Lluvia utilizado, específicamente, las lluvias correspondientes a una duración de 1, 3 y 5 días.

Estos archivos se utilizan directamente para el análisis del riesgo tal como se explica más adelante en el informe.

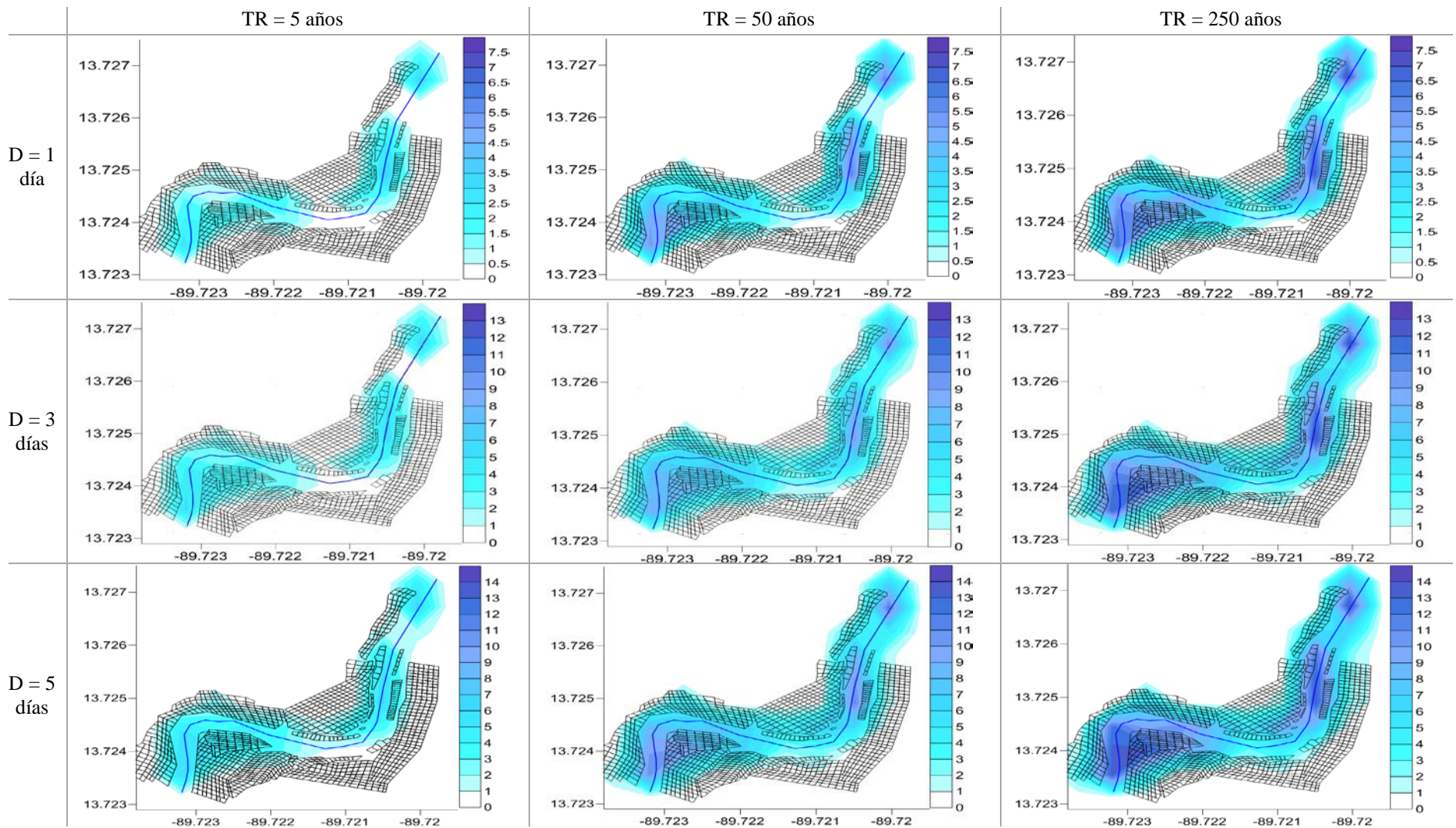
#### 4.6.2 Mapas de amenaza probabilistas de inundación

En los siguientes Gráficos se presentan los mapas de amenaza por inundación para cada uno de los tramos críticos en las dos cuencas analizadas, considerando duraciones (D) de 1, 3 y 5 días y periodos de retorno (TR) de 5, 50 y 250 años.

**Gráfico 54. Mapas probabilistas de inundación en la cuenca Sensunapán - Zona 1. Profundidad de inundación en [m]**



**Gráfico 55. Mapas probabilistas de inundación en la cuenca Sensunapán - Zona 2. Profundidad de inundación en [m]**





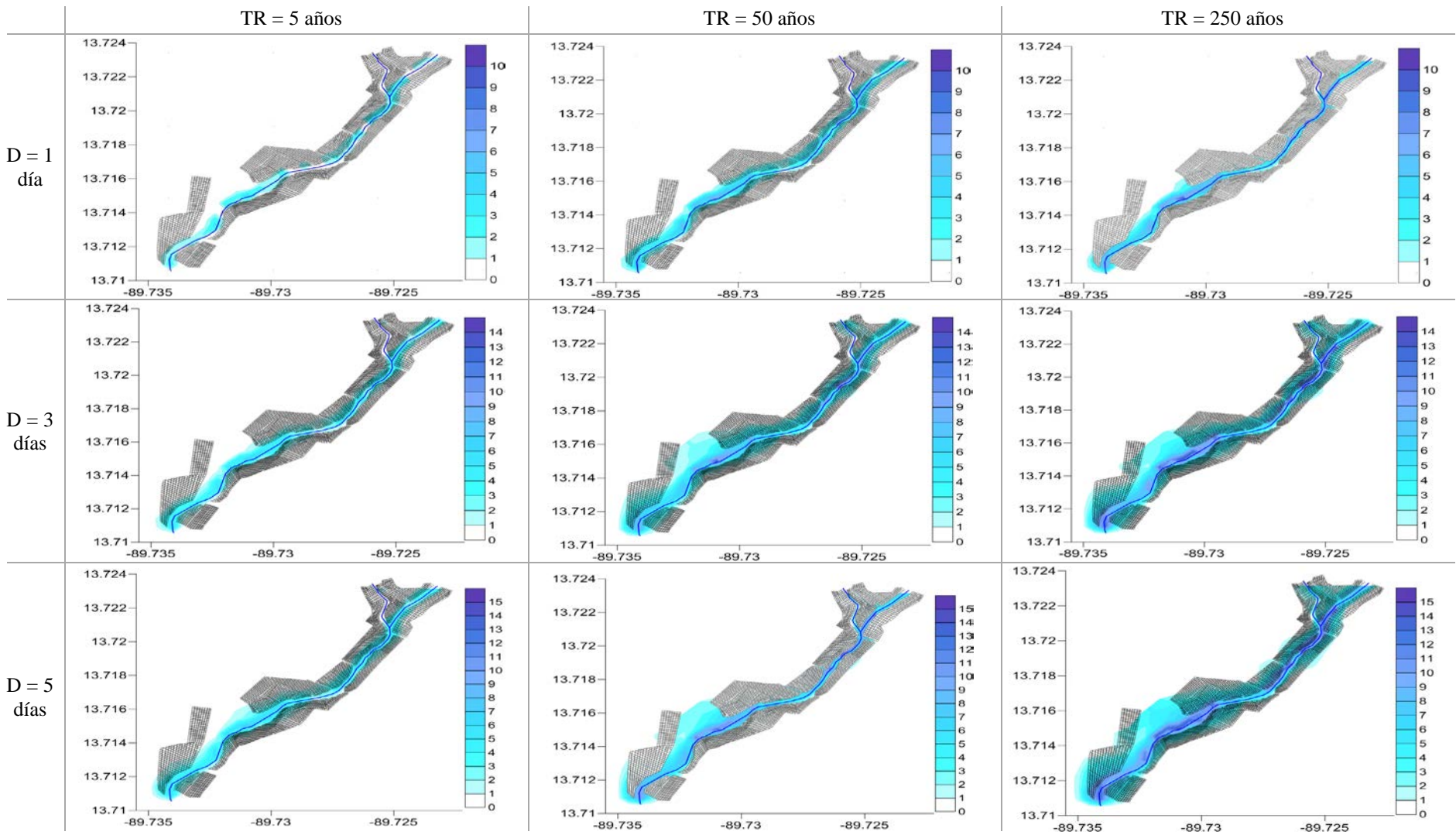
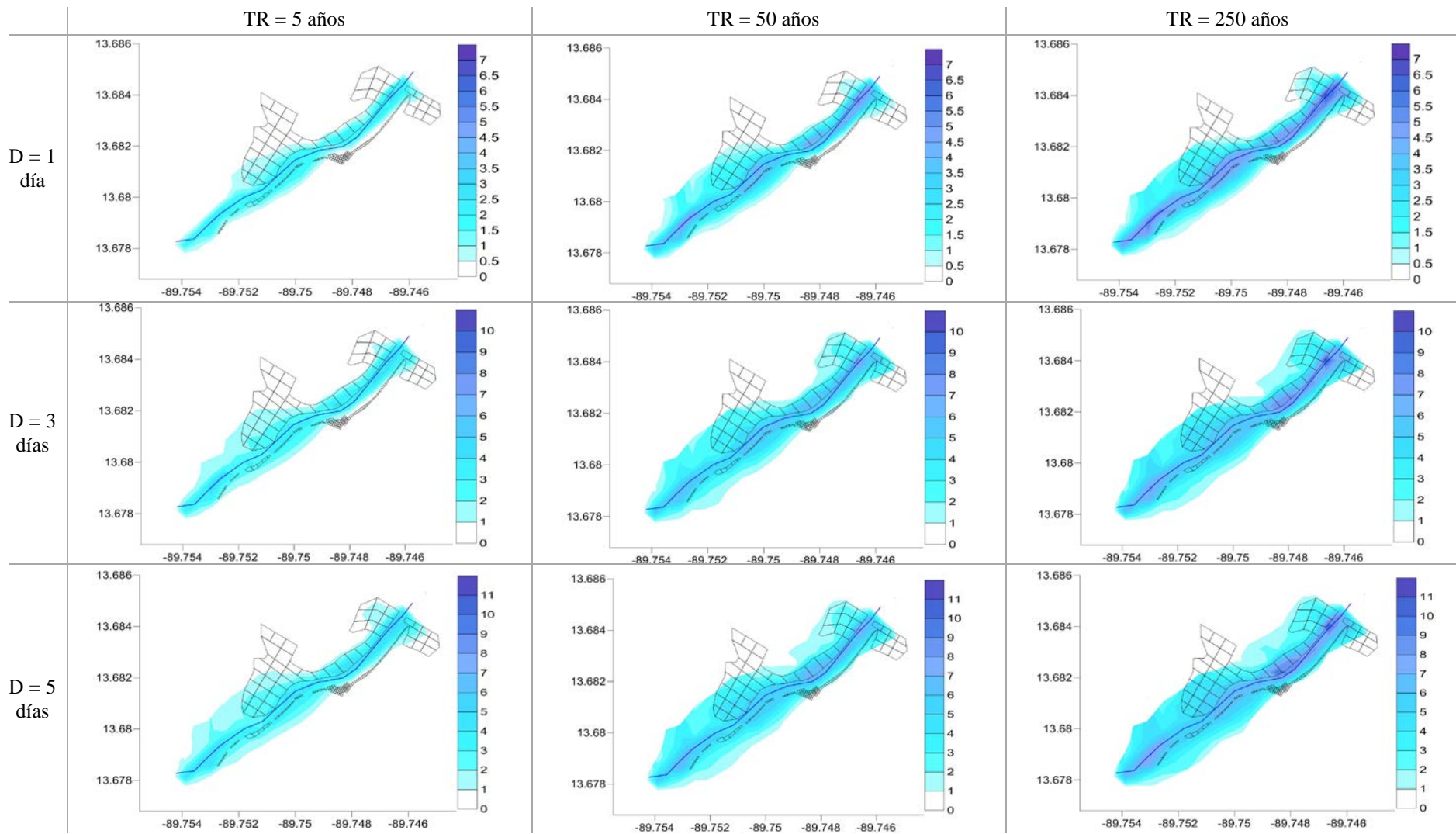
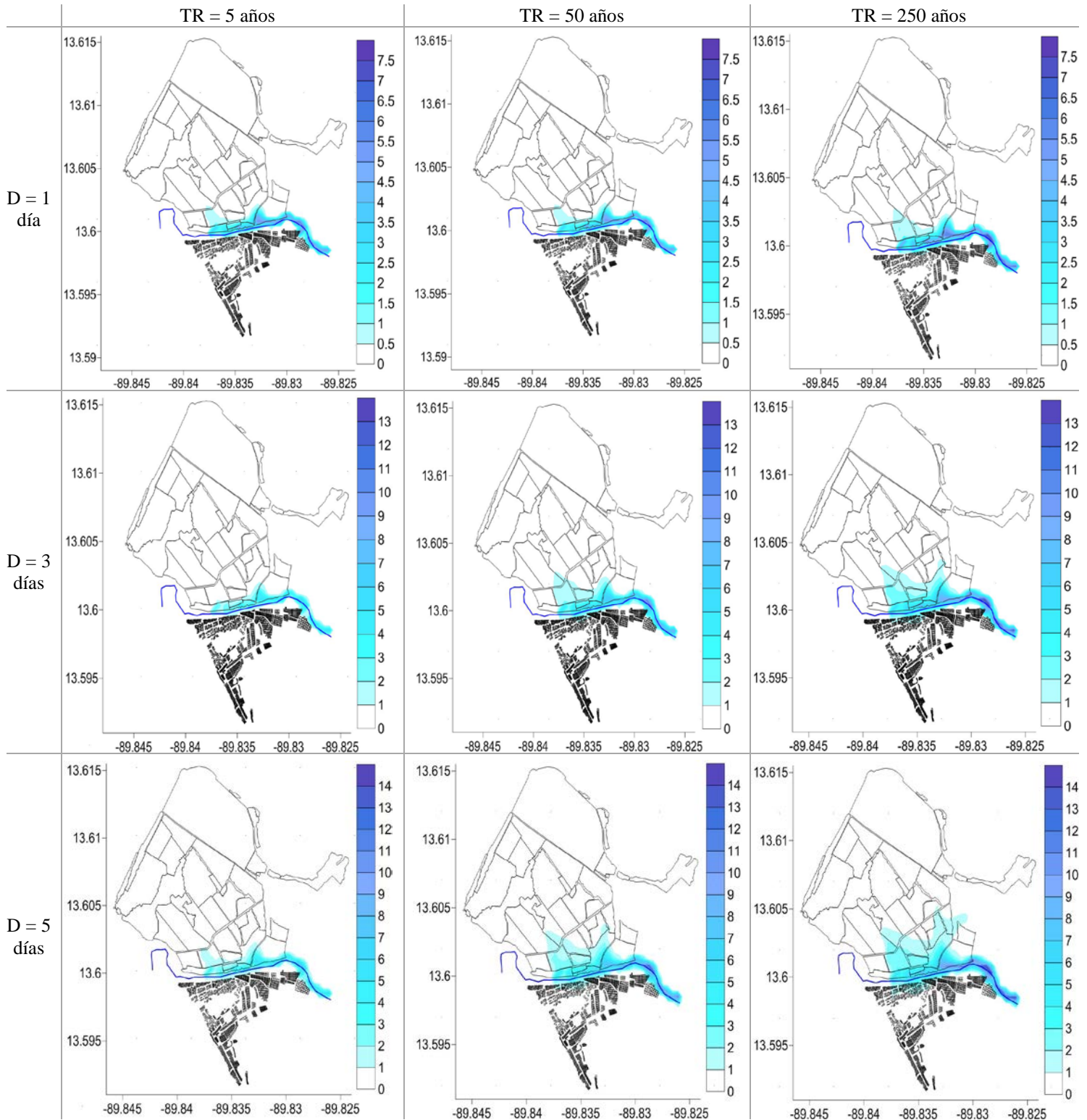


Gráfico 56. Mapas probabilistas de inundación en la cuenca Sensunapán - Zona 3. Profundidad de inundación en [m]



**Gráfico 57. Mapas probabilistas de inundación en la cuenca Sensunapán - Zona 4. Profundidad de inundación en [m]**



**Gráfico 58. Mapas probabilistas de inundación en la cuenca Sensunapán - Zona 5. Profundidad de inundación en [m]**

**Gráfico 59. Mapas probabilistas de inundación en la cuenca Arenal Monserrat - Zona 1. Profundidad de inundación en [m]**

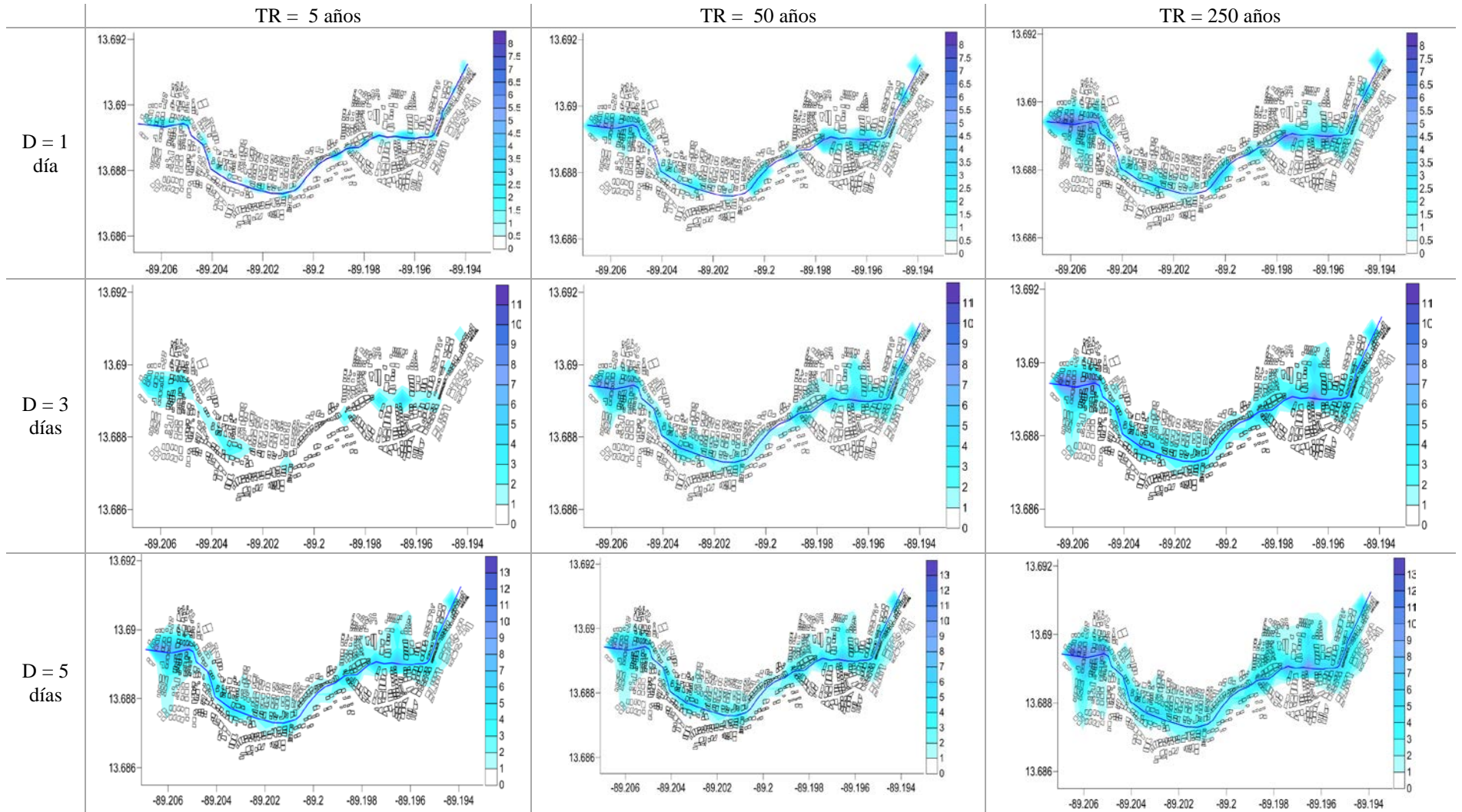
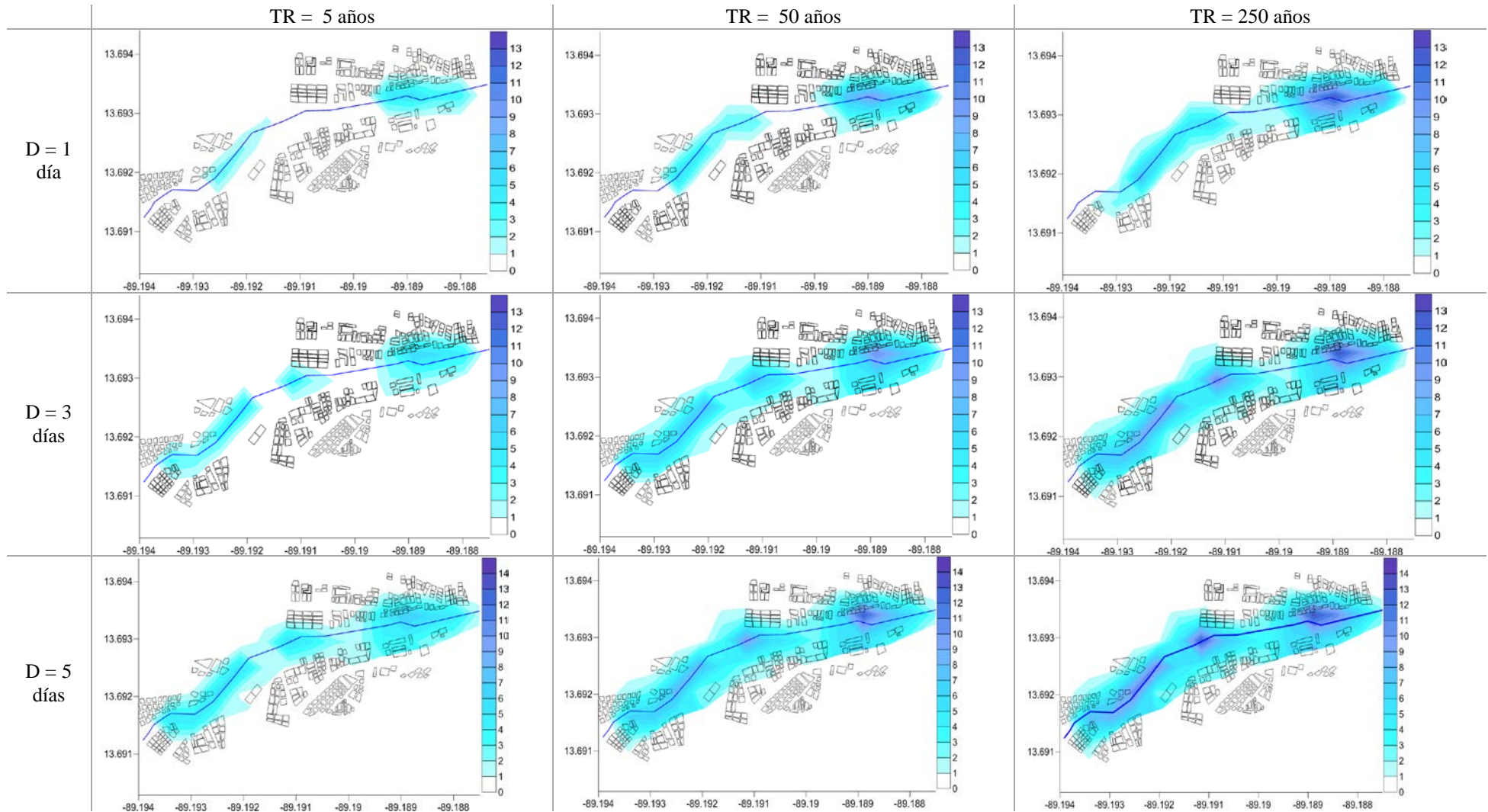
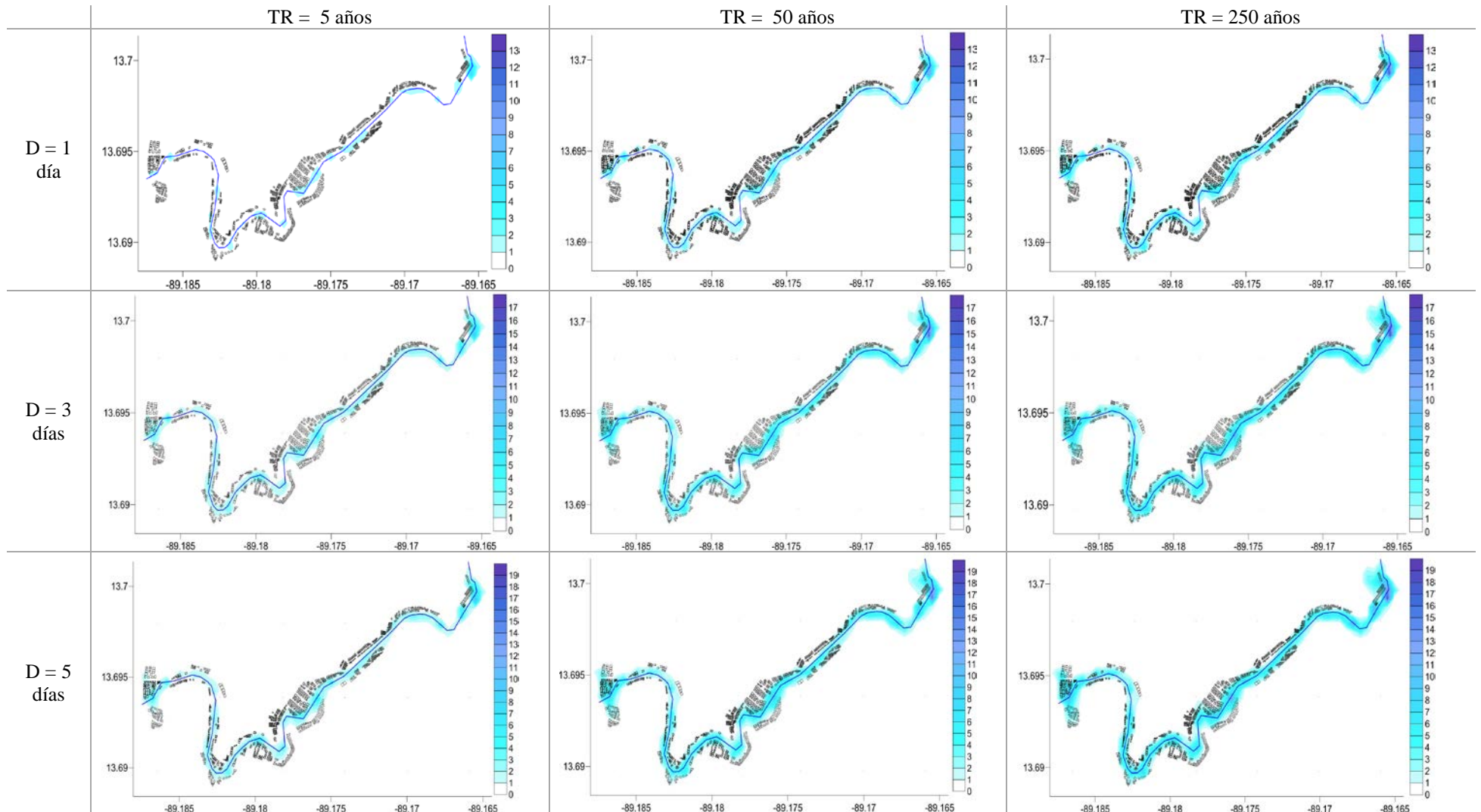


Gráfico 60. Mapas probabilistas de inundación en la cuenca Arenal Monserrat - Zona 2. Profundidad de inundación en [m]



**Gráfico 61. Mapas probabilistas de inundación en la cuenca Arenal Monserrat - Zona 3. Profundidad de inundación en [m]**



## 4.7 Validación de resultados

La validación de resultados consiste en comparar los resultados obtenidos mediante la modelación matemática, con la información recopilada en visitas de campo a los tramos críticos.

### 4.7.1 Río Sensunapán o Grande de Sonsonate

La cuenca hidrográfica del río Sensunapán o Grande de Sonsonate ubicada en la zona occidental del país, ha experimentado inundaciones recurrentes en especial durante la década del 2010. Esta problemática se debe a una serie de factores adicional a las condiciones hidroclimáticas o de cambio climático que incrementan la escorrentía, factores fisiográficos, morfométricos y de cobertura terrestre –uso de suelo– que en conjunto propician condiciones de vulnerabilidad a los efectos de las crecidas de los ríos, más cuando las viviendas y emplazamiento de explotaciones agropecuarias están expuestos a los desbordamientos de los ríos.

El río Grande de Sonsonate posee una extensión superficial de 221.17 kilómetros cuadrados; la longitud del cauce principal se ha calculado en 46.3 kilómetros, siendo su pendiente media del 4.6%.

Basados en los registros históricos de inundación en la cuenca y para efectos de análisis de la amenaza de inundación y determinación del riesgo, el perfil del río se dividió en 5 tramos considerados los tramos críticos, el análisis de validación se hará en los tramos inicial o Tramo 1 correspondiente al río Julupe en la ciudad de Sonsonate y el tramo 5, correspondiente a la desembocadura del río Sensunapán en la ciudad de Acajutla:

#### a) **Tramo 1**

- Comunidad Bendición de Dios

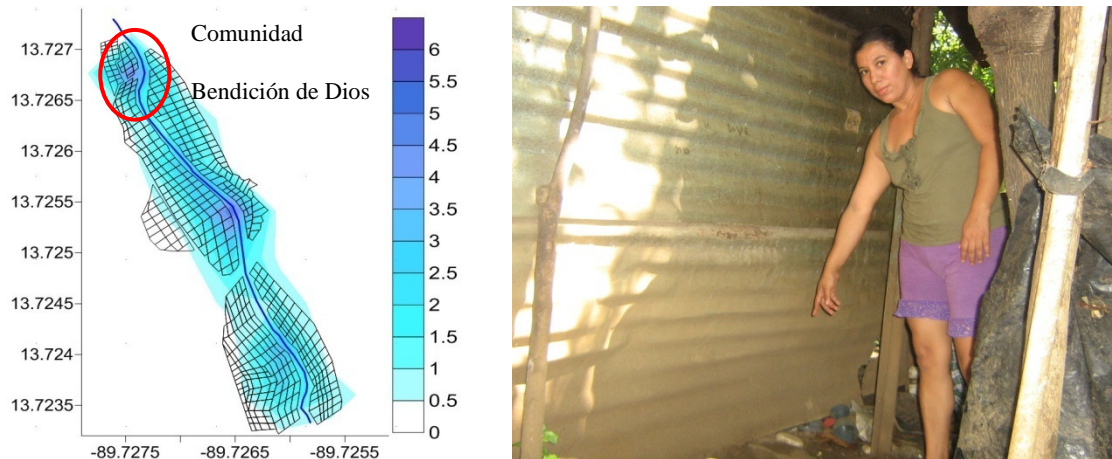
La zona donde se ubica esta comunidad, en el inicio del tramo en análisis se ve afectada por inundaciones, en especial la margen derecha del río, donde en eventos registrados, la extensión de la inundación se prolonga por más de 12 metros y la profundidad de inundación alcanza entre 0.6 y 2.5 metros.

La comunidad Bendición de Dios se ha visto afectada por eventos extremos como el huracán Mitch (1-6 de octubre de 1998) y la Depresión tropical 12E (10-20 de octubre de 2011), es decir, la mayor afectación se registra con períodos de retorno altos y duraciones mayores a 5 días.

Los resultados de amenaza de inundación obtenidos, con la plataforma CAPRA son congruentes con las observaciones del terreno. De acuerdo con la modelación, para periodos de retorno de 50 años o superiores y duraciones mayores de 3 días, la zona donde se ubica la comunidad se ve afectada por inundaciones que pueden ser del orden de los 2.5 metros, lo cual valida los

resultados obtenidos de la simulación, con la recopilada en campo, tal como se muestra en el Gráfico siguiente.

**Gráfico 62. Tramo 1 río Sensunapán período de retorno 50 años y duración 5 días y afectaciones registradas durante la Depresión Tropical 12E en la comunidad Bendición de Dios**



Fuente: MARN

- Comunidad Río Julupe

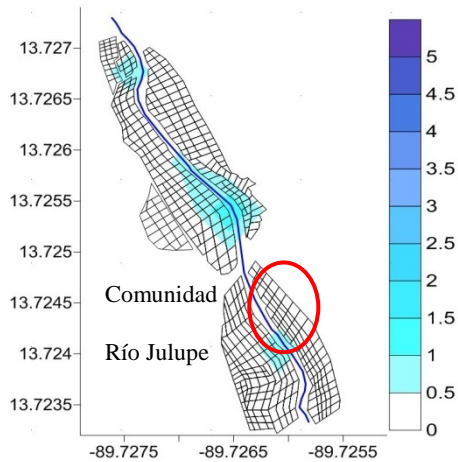
Esta comunidad se localiza en ambas márgenes del río Julupe, al final del tramo en análisis se ve afectada por inundaciones al menos cada año, ya que muchas viviendas están ubicadas en el cauce del río. Las inundaciones en la zona abarcan extensiones que superan los 4 metros con profundidades de inundación entre 0.5 y 1 metro.

La comunidad se ha visto afectada tanto por lluvias extremas de duración menor de un día, así como por eventos extremos como el huracán Mitch en octubre de 1998, la Tormenta Tropical Agatha en mayo de 2010 y la Depresión tropical 12E en octubre de 2011.

Los resultados de amenaza de inundación obtenidos, con la plataforma CAPRA son congruentes con las observaciones del terreno. De acuerdo con la modelación, para periodos de retorno bajos (5 años) y duración de 1 día, la zona donde se ubica la comunidad se ve afectada por profundidades de inundación que pueden ser del orden de 1 metro, lo cual valida los resultados obtenidos de la simulación, con la recopilada en campo, tal como se muestra en el gráfico siguiente.



**Gráfico 63. Tramo 1 río Sensunapán período de retorno 5 años y duración 1 día y vista de la ubicación de las casas en la comunidad Río Julupe, margen izquierdo**

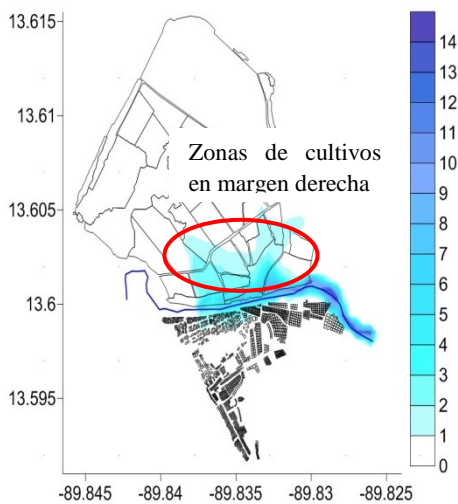


Fuente: MARN

b) **Tramo 5**

En las inspecciones realizadas no se reportaron eventos de afectación en comunidades, las cuales se localizan principalmente en la margen izquierda del río. Si se reportan afectaciones en cultivos aledaños al cauce del río en la margen derecha durante eventos extraordinarios.

**Gráfico 64. Tramo 5: desembocadura río Sensunapán para período de retorno 250 años y duración 5 días, en la fotografía se muestra cultivo de caña de azúcar en la margen derecha del río**



Fuente: MARN

#### 4.7.2 Arenal Monserrat

San Salvador es una ciudad con más de 200 años de historia, que empezó su desarrollo a inmediaciones del río Acelhuate, el cual servía como fuente de abastecimiento de agua y de igual forma como lugar de desecho para aguas servidas. Este desarrollo trajo consigo un incremento en la problemática de inundaciones como consecuencia del desbordamiento del río y sus afluentes.

En los últimos años, el incremento de la intensidad y recurrencia de eventos meteorológicos han ocasionado la pérdida de vidas humanas y materiales en la ciudad, lo cual ha generado un interés apremiante por dar soluciones a la problemática en cuestión. Entre estos eventos se encuentra la lluvia del 3 de julio del año 2008 que generó una crecida del río, la cual desafortunadamente arrastró a un bus con 32 personas hacia el cauce en la colonia La Málaga. Posterior a este evento dramático, han sucedido desbordamientos en diferentes sectores de la ciudad con los eventos de la baja presión asociada a la huracán Ida (7 de noviembre 2009), tormenta tropical Agatha (29 – 30 mayo de 2010), depresión tropical 12 E (10 al 20 de octubre de 2011)

El Arenal Monserrat, es un afluente del río Acelhuate, al cual se une en la zona del Barrio La Vega, donde el río Acelhuate ya se ha unido a tres afluentes más: Ilohuapa, Matalapa y El Garrobo. El río Arenal Monserrat – Acelhuate hasta el sitio de análisis en el puente conocido como “Puente Eureka” en el boulevard del Ejército, posee una extensión superficial de 67.5 km<sup>2</sup>; la longitud del cauce principal hasta ese punto se ha calculado en 20 kilómetros, siendo su pendiente media del 3.2%.

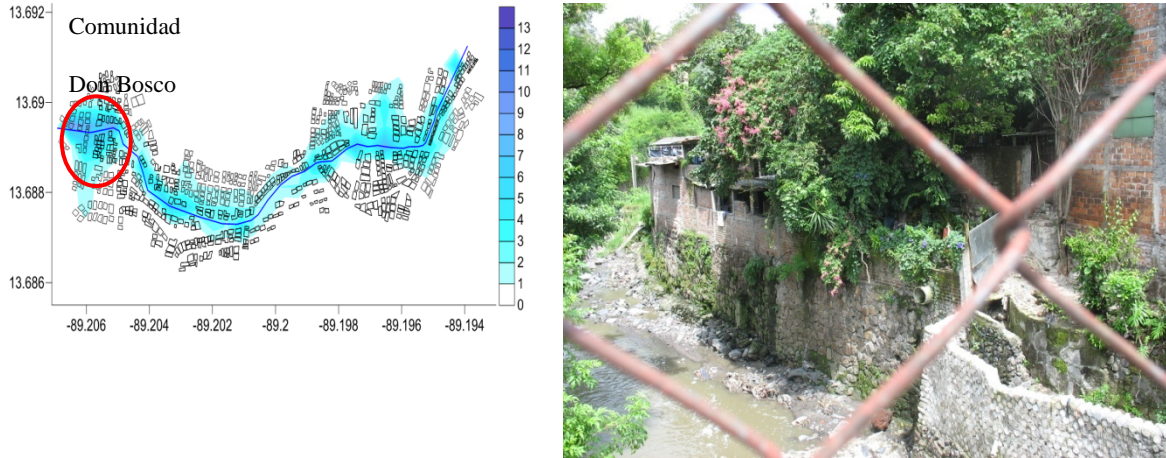
Basados en los registros históricos de inundación en la cuenca y para efectos de análisis de la amenaza de inundación y determinación del riesgo, el perfil del río se dividió en 3 tramos considerados los tramos críticos, el análisis de validación se hará en los todos los tramos considerados:

##### a) **Tramo 1**

- Comunidad Don Bosco

Esta comunidad se ve afectada al menos cada 3 años con inundaciones en las casas localizadas en ambos márgenes del río. El problema principal es ocasionado por el estrechamiento del cauce del río (reducción de la capacidad hidráulica) en dicho punto, específicamente en el puente que forma parte de la 25 avenida sur. Estas observaciones en el terreo son congruentes con los resultados obtenidos con la modelación, específicamente para períodos de retorno mayores de 5 años.

**Gráfico 65. Tramo 1 río Arenal Monserrat período de retorno 5 años y duración 3 días**

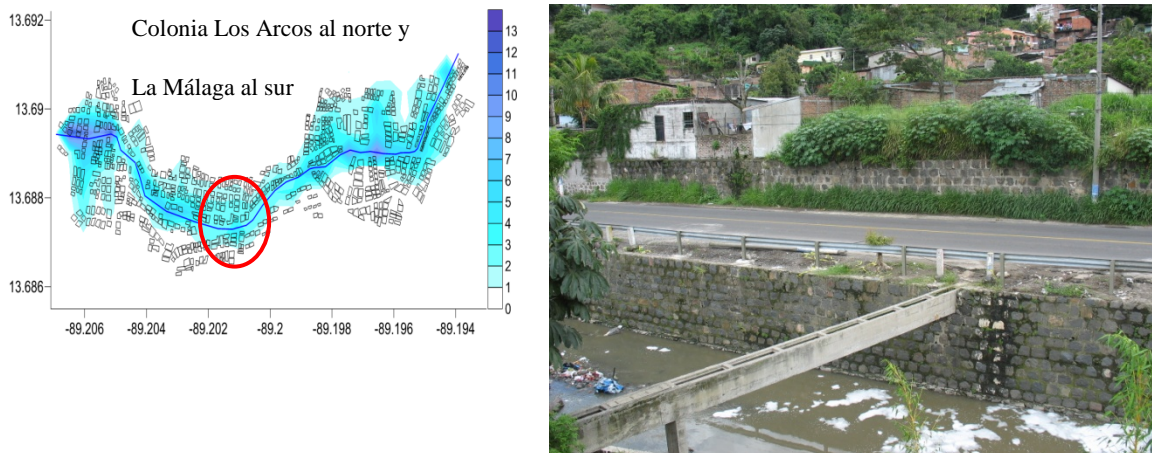


Fuente: MARN

- Colonia La Málaga-Colonia Los Arcos

La colonia Málaga localizada a la margen derecha y Los Arcos en la margen izquierda, han sido comunidades emblemáticas en el caso de inundaciones en San Salvador, por lo que se han erigido muros de retención de las aguas del cauce para proteger las comunidades y adicionalmente se ha incrementado la capacidad del mismo. Inicialmente estas comunidades se veían afectadas al menos cada año; sin embargo con las obras de protección se ha minimizado este impacto. Estas observaciones en el terreo son congruentes con los resultados obtenidos con la modelación, solamente para períodos de retorno altos, de 250 años y duraciones de 3 y 5 días, las comunidades se ven afectadas.

**Gráfico 66. Tramo 1 río Arenal Monserrat período de retorno 250 años y duración 5 días**

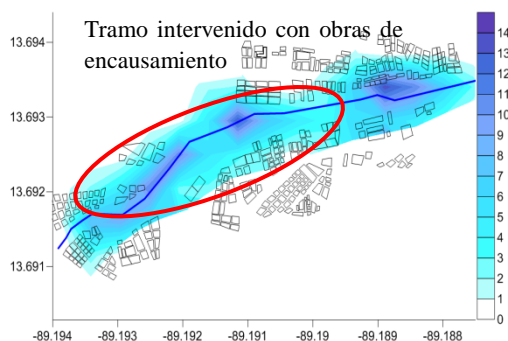


Fuente: MARN

**b) Tramo 2**

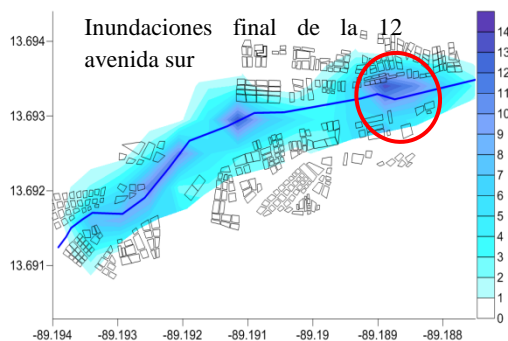
Este tramo fue intervenido en el año 2007, incrementando la capacidad hidráulica del mismo, reduciendo significativamente el impacto de las inundaciones en el tramo. Asimismo, se presentan inundaciones al final del tramo, específicamente al final de la 12 avenida sur del barrio La Vega. Existen algunos tramos donde el cauce se estrecha y conlleva riesgo de desbordamiento, específicamente donde existen obras de paso.

**Gráfico 67. Tramo 2 río Arenal Monserrat período de retorno 250 años y duración 5 días**



Fuente: MARN

**Gráfico 68. Tramo 2 río Arenal Monserrat período de retorno 250 años y duración 5 días**

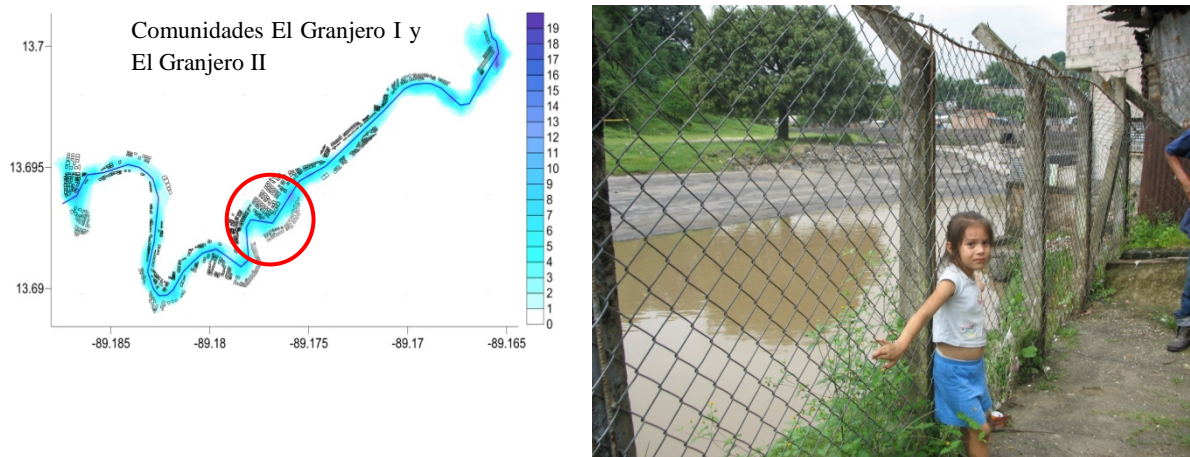


Fuente: MARN

**c) Tramo 3**

Producto de las obras de intervención en el tramo aguas arriba, el nivel de riesgo se ha elevado en las comunidades localizadas en este tramo, viéndose afectadas comunidades como Los Granjeros, Gallegos, Fenadesal Sur y San Luis Portales. Aunado a la conformación de obras en el tramo 2, estas comunidades se han visto afectadas durante eventos extraordinarios como la tormenta del 3 de julio de 2008, IDA en el 2009, Agatha en el 2010 y la DT12E en el 2011. Se verifica esta información para la modelación de la amenaza con período de retorno mayores de 50 años y duraciones de 3 y 5 días.

**Gráfico 69. Tramo 3 río Arenal Monserrat período de retorno 250 años y duración 5 días**



*Fuente:* MARN

## **5. Inventario de componentes expuestos en zonas susceptibles**

### **5.1 Generalidades**

#### **5.1.1 Introducción**

La valoración del riesgo de infraestructura expuesta exige la conformación de una adecuada base de datos geo-referenciada de componentes en las zonas identificadas como de mayor susceptibilidad y en la cual se cuente con información de amenaza de uno o varios de los fenómenos naturales que puedan producir daño o afectación. La calidad, extensión, completitud y resolución de la información de exposición requerida depende del tipo de resultados de riesgo que se desee obtener y de las aplicaciones específicas en temas de gestión del riesgo.

En particular, el inventario de componentes expuestos debe incluir información referente a los siguientes temas específicos:

- Ubicación en términos de coordenadas geográficas.
- Caracterización geométrica en planta del bien mediante un archivo en formato Shape (puntos, polilíneas, polígonos). Esta información se utiliza principalmente para visualización de datos y resultados y para definición de la intensidad del fenómeno amenazante.
- Valoración económica del bien (valor de reposición).
- Ocupación humana. (pueden considerarse diferentes escenarios).
- Tipificación del elemento por medio de parámetros que permiten la posterior caracterización de la vulnerabilidad del bien.

En primera instancia se conforman bases de datos de los componentes expuestos con ciertos parámetros generales que permiten caracterizar su geometría y su vulnerabilidad y posteriormente se asignan una serie de parámetros complementarios que permiten caracterizar las variables de medición del riesgo.

La información disponible debe permitir la caracterización del riesgo en términos de afectación económica directa y en los contenidos, posible cálculo de pérdidas asociadas a la interrupción del funcionamiento y la estimación de la afectación de los ocupantes en términos de fatalidades, personas heridas que requieren servicios médicos especializados y personas afectadas (por ejemplo en términos de personas sin vivienda o sin lugar de trabajo).

#### **5.1.2 Información básica requerida**

La plataforma CAPRA está diseñada de manera que el nivel de resolución del análisis de riesgo depende de la resolución de la información disponible, específicamente en relación a la

exposición. En caso de adoptar un análisis que se basa en elementos individuales que representan la exposición, se debe definir una información mínima para cada uno de estos elementos. Los requerimientos mínimos de información en este caso son los siguientes:

- Número de referencia (ID)
- Ubicación geográfica en coordenadas (Sistema de proyección WGS-84)
- Tipo constructivo para asignación de función de vulnerabilidad
- Referencia de la función de vulnerabilidad humana
- Valoración económica (Valor de reposición)
- Ocupación humana

Con estos datos y con la información correspondiente a las amenazas y la información asociada a una función de vulnerabilidad determinada de daño físico y una función de vulnerabilidad de afectación humana, quedan definidos de manera integral los parámetros para la evaluación del riesgo.

Dentro de los activos expuestos pueden incluirse diversos componentes de infraestructura incluyendo cualquier tipo de edificación y componentes tales como tramos viales, puentes, túneles, componentes del sistema eléctrico, componentes de sistema de comunicaciones, tramos de sistemas de tuberías de acueductos o alcantarillados, presas, diques, muros o cualquier componente de estructuras de contención, y en general cualquier otro componente que pueda presentar daño ante la acción del fenómeno amenazante. En el presente caso y de acuerdo con el alcance establecido para el presente proyecto se considera únicamente edificaciones ubicadas en las zonas de alta susceptibilidad de inundación. También se definen como elementos de posible afectación las zonas de cultivo en las planicies de inundación de los ríos. Estas zonas se definen mediante áreas con un tamaño y resolución definidas de acuerdo con la calidad de la información básica disponible.

### 5.1.3 Información integral en centros poblados

Para construir la base de datos de edificaciones en centros poblados se utiliza principalmente la información disponible a nivel local, la información de censos recientes y un levantamiento con base en fotografías aéreas e imágenes de satélite disponibles. Considerando que la información disponible rara vez incluye todos los datos relevantes requeridos, es necesario aplicar unos algoritmos de complementación y ajuste de información que permitan contar con una base de datos completa y consistente. La información normalmente utilizada para la base de datos de edificaciones es la siguiente:

- Número de sistema
- Nombre del sistema
- Número del componente
- Nombre
- Descripción
- Ubicación geográfica, a través de mapas en formato Shape (puntos, poli-líneas o polígonos).

- Tipo de suelo
- Número de pisos
- Área de construcción
- Uso predominante
- Tipo constructivo
- Fecha de construcción
- Muros divisorios
- Material y tipo de fachada
- Material en primer piso
- Material en pisos superiores
- Tipo y materiales de cubierta
- Tipo y clasificación de contenidos
- Edad
- Estado actual de la construcción
- Estrato socioeconómico
- Irregularidades y defectos
- Valoración económica de la estructura, elementos no estructurales y contenidos
- Ocupación máxima de la construcción en número de personas
- Costo unitario rehabilitación sísmica
- Información de funciones de vulnerabilidad por tipo de amenaza

Con respecto a la valoración de cada componente se debe tener en cuenta que se trata del valor de reposición y se debe en general tener información sobre:

- Valor de la estructura misma (columnas, vigas, placas, muros estructurales)
- Valor de acabados internos (muros divisorios, fachadas, cielos rasos, pisos, etc.)
- Valor de cubierta
- Valor de fachadas
- Valor de contenidos

Finalmente la ocupación a cada componente del análisis se asigna para un escenario definido por el usuario. Debe ser compatible con los índices regionales de densidad de población. Normalmente se consideran escenarios diurnos y nocturnos aunque esto es a elección del usuario. En el caso que se requiera identificar únicamente escenarios críticos se utiliza la ocupación máxima en cada componente.

## **5.2 Información de componentes expuestos en zonas urbanas**

### **5.2.1 Levantamiento de información para conformar la base de datos**

Para conformar la base de datos de componentes expuestos se realizaron una serie de trabajos con participación local, los cuales incluyeron las siguientes actividades:

- Recopilación de información en cada uno de los sectores seleccionados, principalmente en cada una de las alcaldías locales.



- Levantamiento de información de campo: a partir de la digitación de zonas uniformes de viviendas en zonas de interés mediante herramienta en Google Earth.
- Validación de la información: mediante visitas de campo y validación de información en el sitio.
- Complementación y validación de la información: mediante el análisis por parte de especialistas en trabajo de oficina y de acuerdo con los resultados iniciales de amenaza por inundación.

En el Anexo 3 se presentan los informes finales de campo en los cual se describen en detalle las actividades realizadas por los consultores locales.

### 5.2.2 Criterios de clasificación de los tipos de viviendas

Luego de las visitas de inspección se realizó una clasificación de los tipos constructivos de viviendas y edificaciones principales. El Cuadro 13 resume los tipos constructivos principales que resultan del análisis de la información de campo.

**Cuadro 13. Tipos constructivos principales para edificaciones**

Sistema No.	Tipo Constructivo	ID	Descripción
1	Precario Bajo	PB	Viviendas construidas con paredes de paja, desecho, madera, palma y otro vegetal; con techos de paja, desecho, lámina metálica, palma y otro vegetal.
2	Precario Medio	PM	Viviendas construidas con paredes de lámina metálica; con techos de lámina metálica o teja.
3	Mixto Bajo	MB	Viviendas construidas con paredes de ladrillo; con techo de teja o lámina metálica.
4	Mixto Medio	MM	Viviendas construidas con paredes de concreto o sistema mixto; con techo de lámina metálica o duralita.
5	Mixto Alto	MA	Viviendas construidas con paredes de concreto; con techo de lámina de asbesto o fibrocemento o losa de concreto.

En el Gráfico 70 se presentan algunas fotografías representativas de los tipos constructivos definidos.

### Gráfico 70. Fotografías representativas de los diferentes tipos constructivos identificados



Precario Bajo



Precario Medio



Mixto Bajo



Mixto Medio



Mixto Alto

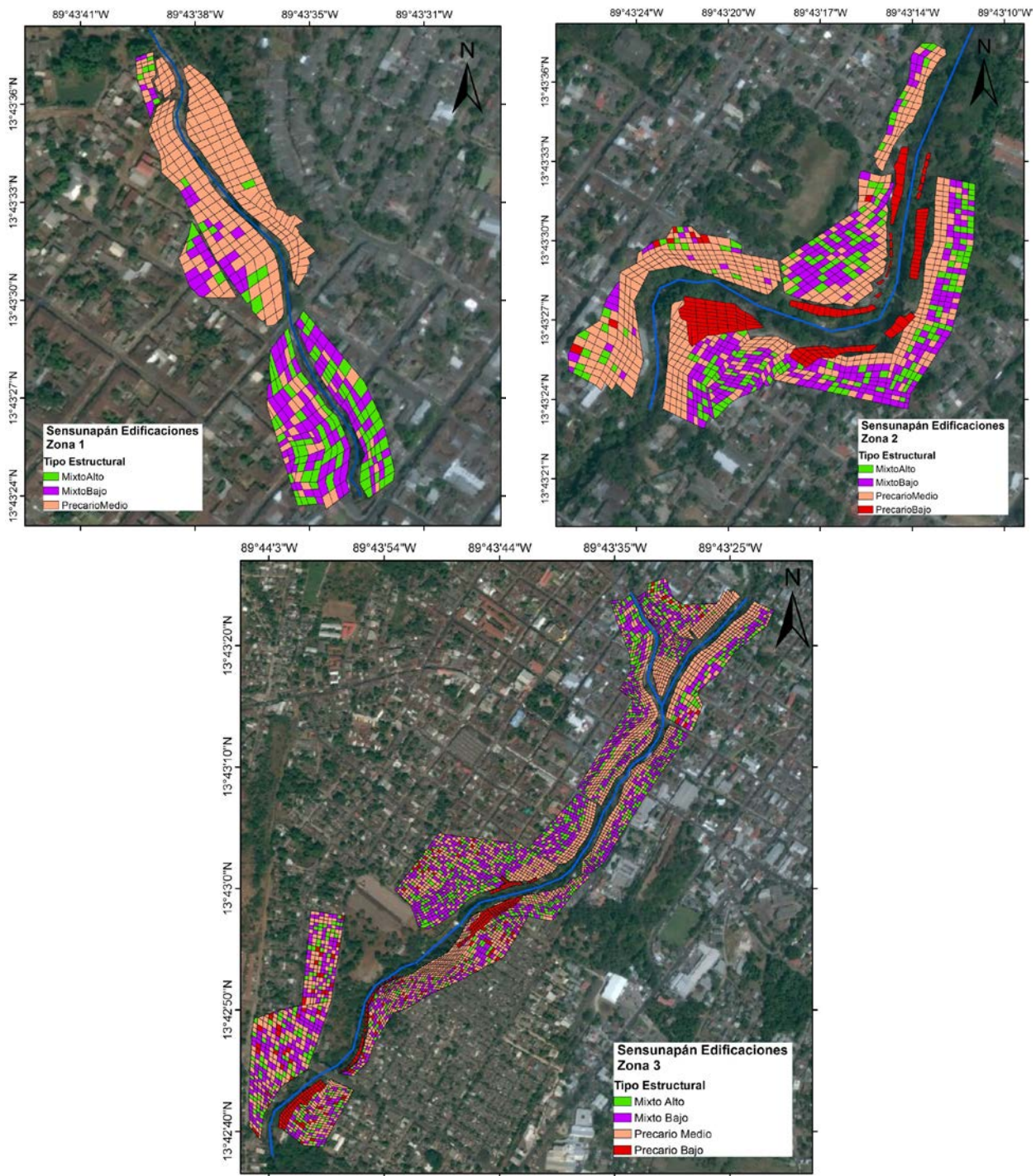
Fuente: MARN

Por otro lado en el Anexo 4 se presentan fichas con la información específica de cada uno de los tipos constructivos identificados.

#### 5.2.3 Conformación de bases de datos de exposición

De los Gráfico 71 al 76 se presentan las diferentes zonas estudiadas en la cuenca del Sensunapán y en la cuenca del Arenal Monserrat, de las cuales la mayor parte fueron levantadas en campo (ver Anexo 3) y las restantes fueron levantadas haciendo uso de imágenes satelitales. Dichas figuras muestran la distribución espacial de los diferentes tipos constructivos que fueron encontrados en las áreas levantadas.

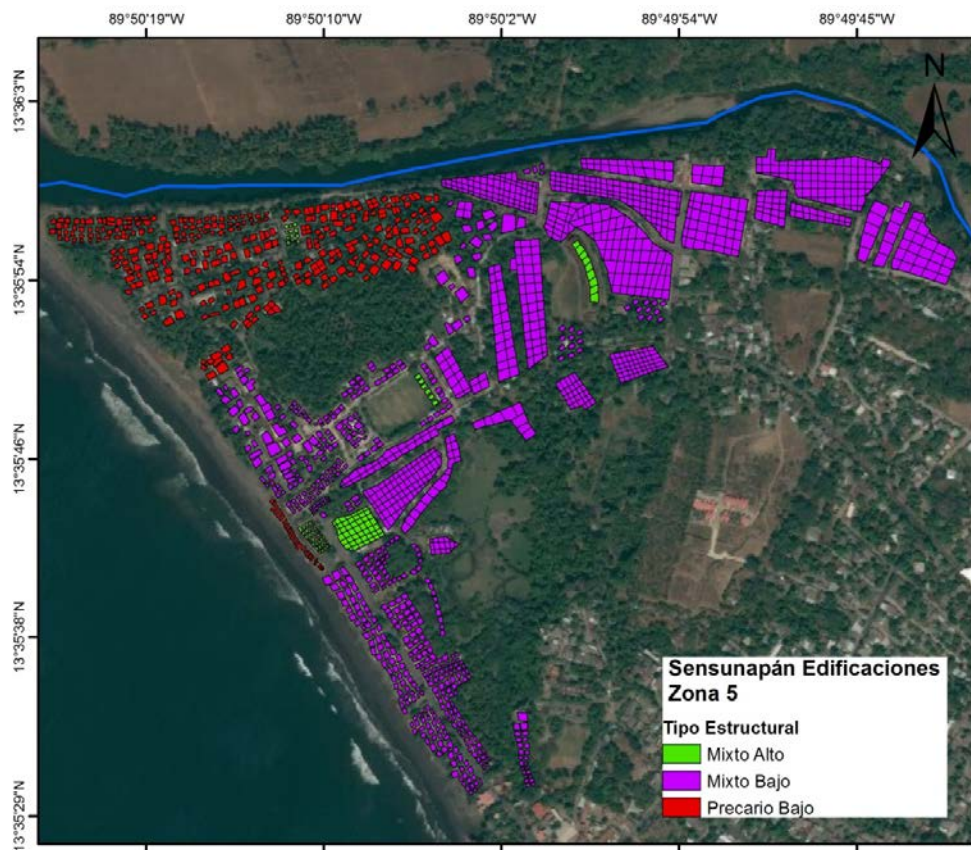
**Gráfico 71. Levantamiento de edificaciones expuestas en la cuenca Sensunapán - Zona Alta**



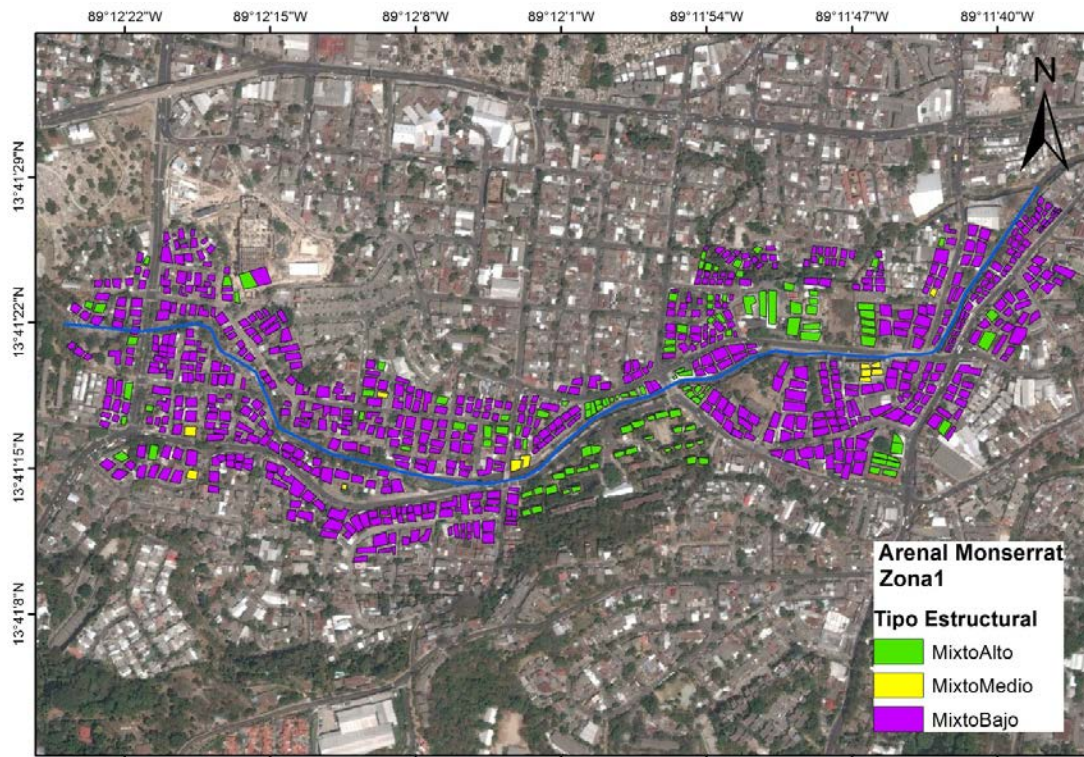
**Gráfico 72. Levantamiento de edificaciones expuestas en la cuenca Sensunapán - Zona Media**



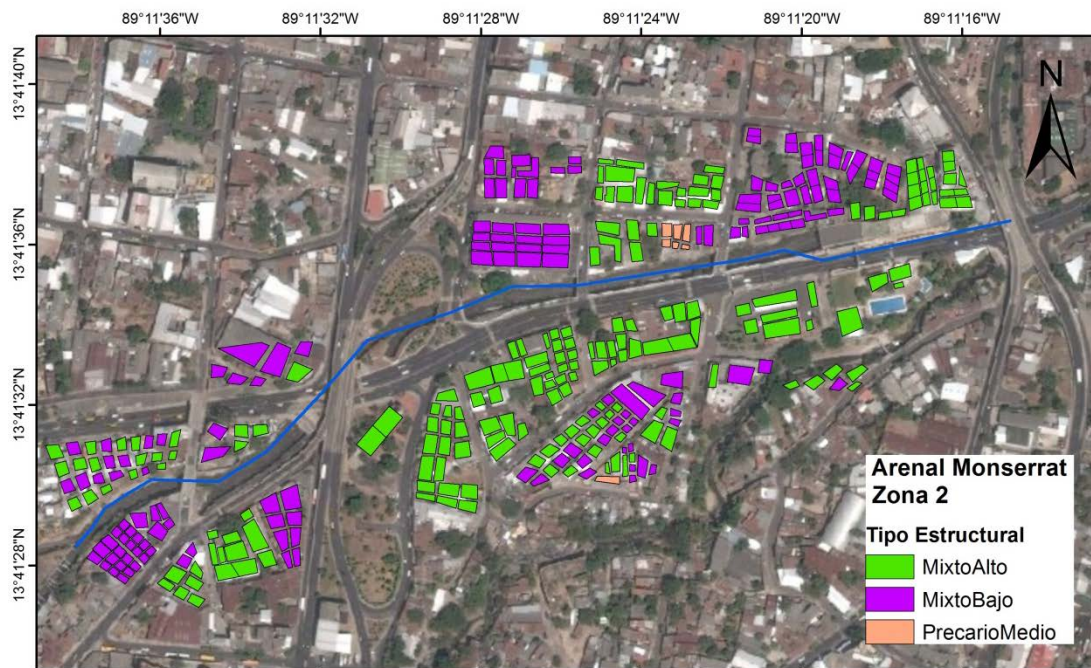
**Gráfico 73. Levantamiento de edificaciones expuestas en la cuenca Sensunapán - Zona Baja**



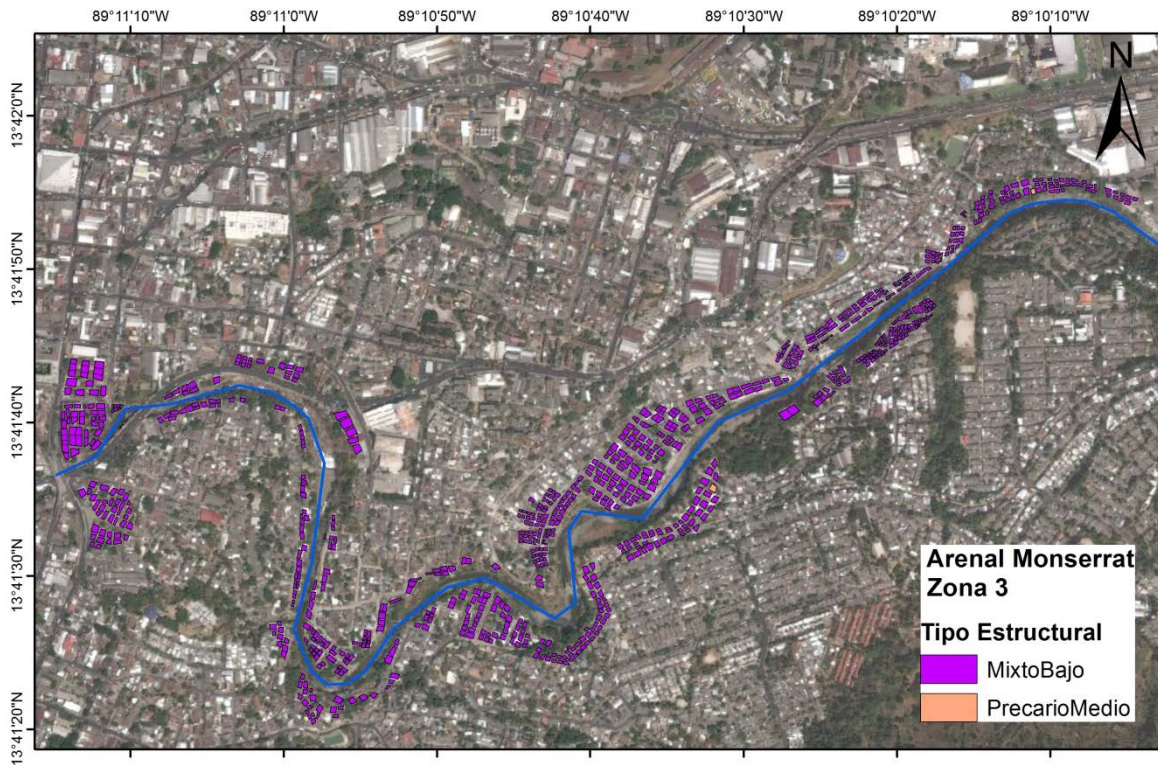
**Gráfico 74. Levantamiento de edificaciones expuestas en la cuenca Arenal Monserrat - Zona 1**



**Gráfico 75. Levantamiento de edificaciones expuestas en la cuenca Arenal Monserrat - Zona 2**



**Gráfico 76. Levantamiento de edificaciones expuestas en la cuenca Arenal Monserrat - Zona 3**



La base de datos conformada en formato tipo Shape se presenta como anexo digital al informe. El Cuadro 14 resume la información contenida en cada uno de los archivos de exposición conformados.

**Cuadro 14. Resumen de la información contenida en los archivos de exposición**

Cuenca	Sector	Archivo	No. predios	Área cubierta (km <sup>2</sup> )	Longitud a lo largo del río (m)
Sensunapán	Zona 1	Sensunapán_Edificaciones_Zona1.shp	495	0.03	503
	Zona 2	Sensunapán_Edificaciones_Zona2.shp	1208	0.06	769
	Zona 3	Sensunapán_Edificaciones_Zona3.shp	5055	0.30	2,131
	Zona 4	Sensunapán_Edificaciones_Zona4.shp	111	0.01	1,203
		Sensunapán_Cultivos_Zona4.shp	50	0.10	1,203
	Zona 5	Sensunapán_Edificaciones_Zona5.shp	1840	0.14	2248
		Sensunapán_Cultivos_Zona5.shp	743	1.83	2,248
Arenal Monserrat	Zona1	Arenal_Edificaciones_Zona1.shp	818	0.11	1,704
	Zona2	Arenal_Edificaciones_Zona2.shp	366	0.03	780
	Zona3	Arenal_Edificaciones_Zona3.shp	963	0.07	3,886

#### 5.2.4 Usos principales

Como parte del levantamiento de información en campo se cuenta con un campo que clasifica el uso de las construcciones incluidas en la base de datos de cada una de las cuencas. El Cuadro 15 y el Cuadro 16 resumen el número de edificaciones en cada una de las categorías de uso definidas, para Sensunapán y Arenal Monserrat, respectivamente.

**Cuadro 15. Categorías de uso en Sensunapán**

Uso	No. de predios	Porcentaje
Cancha de futbol	8	1%
Capitanía de Puerto Acajutla	49	5%
Casa Comunal Las Atarrayas	3	0%
Centro escolar	12	1%
Estación antigua ferrocarril	9	1%
Iglesia	8	1%
Rastro municipal	4	0%
Venta de comida	35	4%
Vivienda	809	86%
<b>Total</b>	<b>937</b>	<b>100%</b>

**Cuadro 16. Categorías de uso en Arenal Monserrat**

Uso	No. de predios	Porcentaje
Bodega	17	2%
Bóveda recreacional	4	1%
Centro escolar	12	2%
Centro Municipal de Convivencia	4	1%
Cuerpo de Bomberos	11	1%
Ex-Administración de Rentas	35	5%
Gasolinera	10	1%
Iglesia	2	0%
Laboratorios PAILL	19	3%
Mercado	22	3%
Taller automotriz	23	3%
Taller servicios varios	12	2%
Venta materiales de construcción	6	1%
Vivienda	569	76%
<b>Total</b>	<b>746</b>	<b>100%</b>

### 5.2.5 Criterios para valoración de tipos constructivos principales

La información recopilada en campo y en registros de información del censo permite establecer una valoración económica de los tipos constructivos principales. La información que se presenta está basada principalmente en la información contenida en el Anexo 3 (informes del levantamiento de información de elementos expuestos y validación en campo).

En el Cuadro 17 se resume la valoración económica para los tipos constructivos principales, encontrados en Sensunapán y Arenal Monserrat. La valoración realizada para cada tipo constructivo aplica a las dos cuencas de estudio. A partir de esta información indicativa se establece la valoración completa del portafolio de análisis con base en las áreas construidas asignadas a cada una de las edificaciones que hacen parte del inventario. Información detalla se incluye en el Anexo 4. En la valoración económica no se incluye el valor del terreno.

**Cuadro 17. Resumen de información de valoración económica disponible para las dos cuencas de estudio**

Tipo Constructivo	Área construida de referencia (m <sup>2</sup> )	Valoración construcción sin el terreno (USD\$)	Valoración contenidos (USD\$)	Valor total (USD\$)	Valor (USD\$/m <sup>2</sup> )
Precario Bajo	30	1,500	256	1,756	58.53
Precario Medio	30	3,750	1,013	4763	158.77
Mixto Bajo	60	12,000	3,600	15,600	260.00
Mixto Medio	90	24,300	16,200	40,500	450.00
Mixto Alto	175	83,125	21,875	105,000	600.00



Por otro lado y con el fin de contar con referencias de las anteriores valoraciones, se presenta a continuación la información de costos de viviendas oficiales que corresponden a las viviendas de emergencia y a las viviendas mínimas, a partir de la información suministrada por el MARN.

De acuerdo con la información disponible en el proyecto Techo para mi país (Techo, 2013; Rivas Gallont, 2011), el precio de la vivienda de emergencia es de USD\$ 1,700. El artículo indica textualmente que “Este año su objetivo es construir 225 viviendas de emergencia de las que todavía les falta construir 150 que a un costo de USD\$ 1,700 cada una, requiere un total de USD\$ 255,000. Las familias beneficiarias deben hacer un aporte de USD\$ 70 cada una, el resto es recaudado por la organización entre generosos contribuyentes corporativos y personales.”

Por otro lado, de acuerdo con el Fondo Social para la Vivienda (<http://www.fsv.gob.sv/>) el precio de una vivienda mínima de bloque de 33 m<sup>2</sup> de construcción es de USD\$ 12,000, sin el valor del lote. Estos valores resultan de gran importancia por cuanto una eventual identificación de una vivienda cualquiera en una zona de alto riesgo de inundación implicará el costo de una vivienda nueva en cuyo caso la valoración a aplicar sería la anterior.

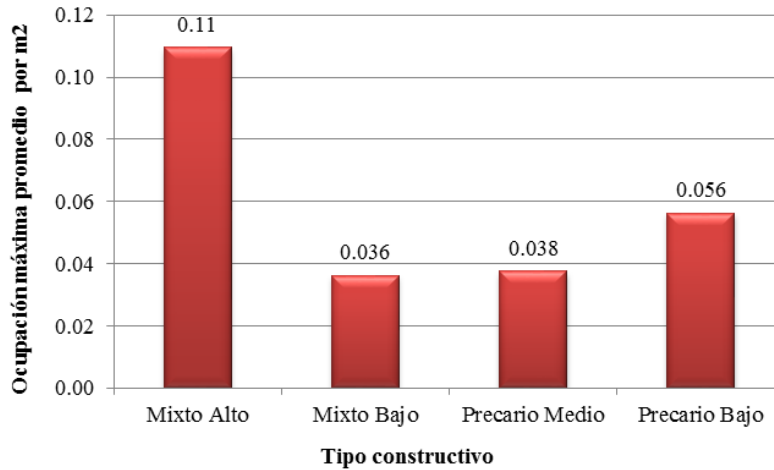
Para efectos del presente estudio se adopta el valor de reposición de viviendas correspondiente al valor dado por el Fondo Social para la Vivienda que corresponde a un valor aproximado de USD\$363 por metro cuadrado construido. En caso de considerarse factible la valoración del costo de reposición de viviendas con el valor establecido de USD\$1,700 por vivienda según el proyecto Techo para mi país, los resultados que se presentan en este informe pueden escalarse de manera uniforme por un factor de 0.14 para considerar dicha cuantificación.

#### 5.2.6 Ocupación

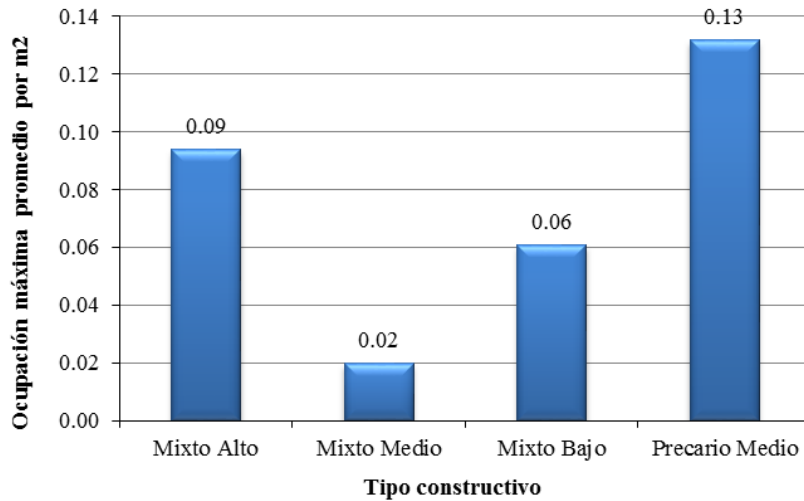
Para evaluar la ocupación aproximada de las construcciones en las zonas estudiadas se recurre a información de censos locales y a la información recopilada en las visitas de inspección (ver Anexo 3).

Los resultados de este análisis indican las ocupaciones promedio de cada tipo constructivo que se presentan en el Gráfico 77 y Gráfico 78, para Sensunapán y Arenal Monserrat, respectivamente mediante el número de ocupantes máximos (valores medios) por m<sup>2</sup> de área construida.

**Gráfico 77. Ocupantes promedio por m<sup>2</sup> en diferentes tipos constructivos – Sensunapán**



**Gráfico 78. Ocupantes promedio por m<sup>2</sup> en diferentes tipos constructivos - Arenal Monserrat**



### 5.2.7 Base de datos de información de exposición

Para cada una de las zonas de análisis se conforman bases de datos de exposición que incluyen los siguientes campos principales:

- ID
- Área construcción
- No de pisos
- Valor Físico (incluye construcción y contenidos)
- Valor humano
- Identificación del tipo constructivo para efectos de vulnerabilidad

El Cuadro 18 presenta una información indicativa de una de las bases de datos conformada para el análisis.

**Cuadro 18. Base de datos de exposición de edificaciones para el análisis (información indicativa)**

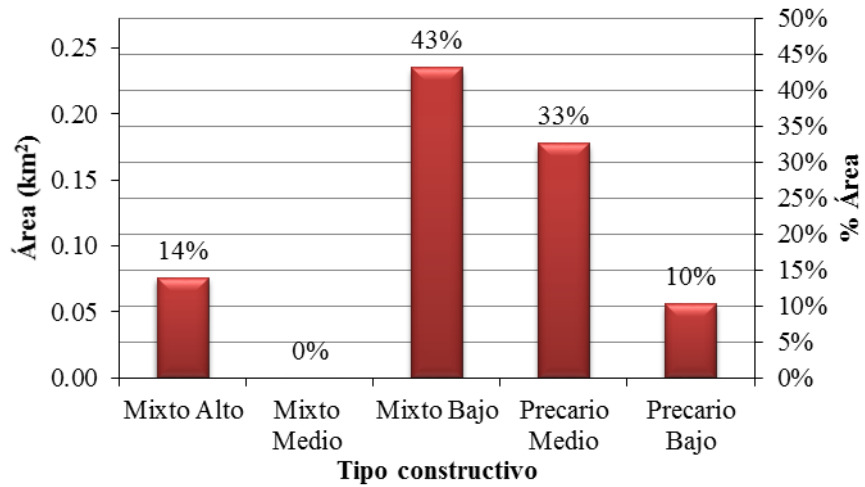
OBJECTID_1	region	tipo_predi	num_pisos	uso_actual	cat_soec	valor_repo_m2	area	observaciones	VALFIS	VALHUM	SE_INUNDA
1	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	21	Ramadas de palma sobre la pl	1243	2	PrecarioBajo
2	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	26	Ramadas de palma sobre la pl	1526	3	PrecarioBajo
3	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	15	Ramadas de palma sobre la pl	865	2	PrecarioBajo
4	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	22	Ramadas de palma sobre la pl	1266	2	PrecarioBajo
5	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	6	Ramadas de palma sobre la pl	352	1	PrecarioBajo
6	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	11	Ramadas de palma sobre la pl	624	1	PrecarioBajo
7	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	13	Ramadas de palma sobre la pl	770	2	PrecarioBajo
8	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	16	Ramadas de palma sobre la pl	912	2	PrecarioBajo
9	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	23	Ramadas de palma sobre la pl	1328	2	PrecarioBajo
10	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	19	Ramadas de palma sobre la pl	1093	2	PrecarioBajo
11	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	41	Ramadas de palma sobre la pl	2393	4	PrecarioBajo
12	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	40	Ramadas de palma sobre la pl	2349	4	PrecarioBajo
13	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	40	Ramadas de palma sobre la pl	2366	4	PrecarioBajo
14	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	33	Ramadas de palma sobre la pl	1935	3	PrecarioBajo
15	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	26	Ramadas de palma sobre la pl	1513	3	PrecarioBajo
16	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	23	Ramadas de palma sobre la pl	1335	2	PrecarioBajo
17	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	26	Ramadas de palma sobre la pl	1524	3	PrecarioBajo
18	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	22	Ramadas de palma sobre la pl	1309	2	PrecarioBajo
19	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	24	Ramadas de palma sobre la pl	1415	3	PrecarioBajo
20	Cuenca Sensunapan	urbano	1	asentamientos ilegales	baja	58.53	27	Ramadas de palma sobre la pl	1565	3	PrecarioBajo
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

Finalmente, el Cuadro 19 y Cuadro 20 presentan un resumen de la información relacionada con área total y número de predios, respecto a cada uno de los tipos constructivos encontrados en las dos cuencas analizadas. Por su parte, el Gráfico 79 y Gráfico 80 presentan gráficamente la información de predios por tipo constructivo, en cada una de las dos cuencas.

**Cuadro 19. Resumen de la información de edificaciones según tipo constructivo - Sensunapán**

Tipo constructivo	Número de predios	% Número de predios	Área (m <sup>2</sup> )	% Área
Mixto Alto	1,308	15%	75,812	14%
Mixto Medio	0	0%	0	0%
Mixto Bajo	3,394	39%	235,306	43%
Precario Medio	3,069	35%	177,797	33%
Precario Bajo	938	11%	56,106	10%
<b>Total</b>	<b>8,709</b>	<b>100%</b>	<b>545,021</b>	<b>100%</b>

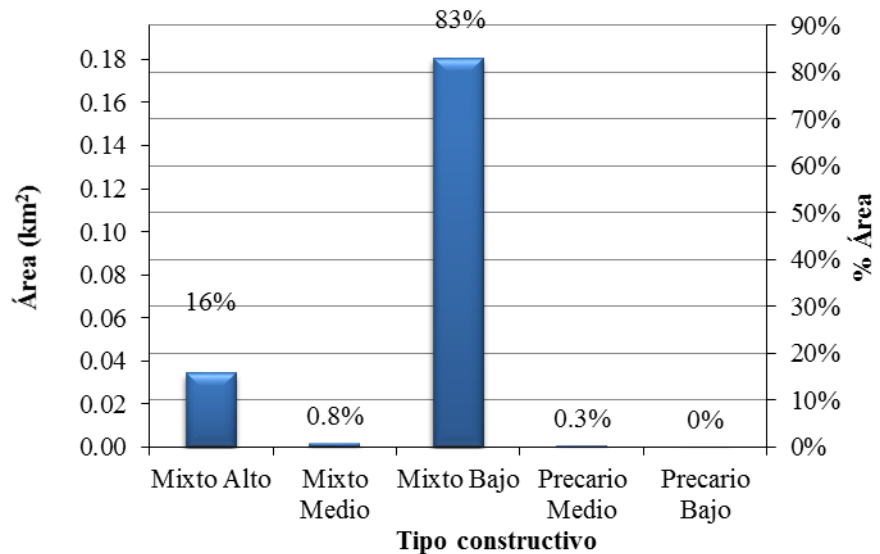
**Gráfico 79. Gráfico de barras de área según tipo constructivo – Sensunapán**



**Cuadro 20. Resumen de la información de edificaciones según tipo constructivo - Arenal Monserrat**

Tipo constructivo	Número de predios	% Número de predios	Área (m <sup>2</sup> )	% Área
Mixto Alto	314	15%	34,530	16%
Mixto Medio	12	0.6%	1,700	0.8%
Mixto Bajo	1,807	84%	180,587	83%
Precario Medio	14	0.7%	725	0.3%
Precario Bajo	0	0%	0	0%
<b>Total</b>	<b>2,147</b>	<b>100%</b>	<b>217,542</b>	<b>100%</b>

**Gráfico 80. Gráfico de barras de área según tipo constructivo – Arenal Monserrat**



### 5.3 Información de zona de cultivos expuestos a inundaciones

Las zonas seleccionadas para el análisis incluyen para la cuenca de Sensunapán dos zonas de posible afectación de cultivos. Una en la cuenca media y la otra en el área de la planicie de inundación cercana a la costa con el Océano Pacífico, ubicada en la cuenca baja. La información en las zonas de cultivos fue levantada principalmente por consultores locales. En el Anexo 3 se presentan los informes correspondientes al levantamiento de información por parte de los consultores locales. En el Anexo 5 se incluyen además las fichas realizadas para reunir toda la información de los diferentes tipos de cultivos.

El Cuadro 21 presenta los tipos de cultivos más relevantes identificados en las zonas cultivadas, respecto a vulnerabilidad frente a las inundaciones, valor, y área cubierta.

**Cuadro 21. Cultivos más relevantes identificados en la zona de estudio (tomado de la información contenida en el Anexo 5)**

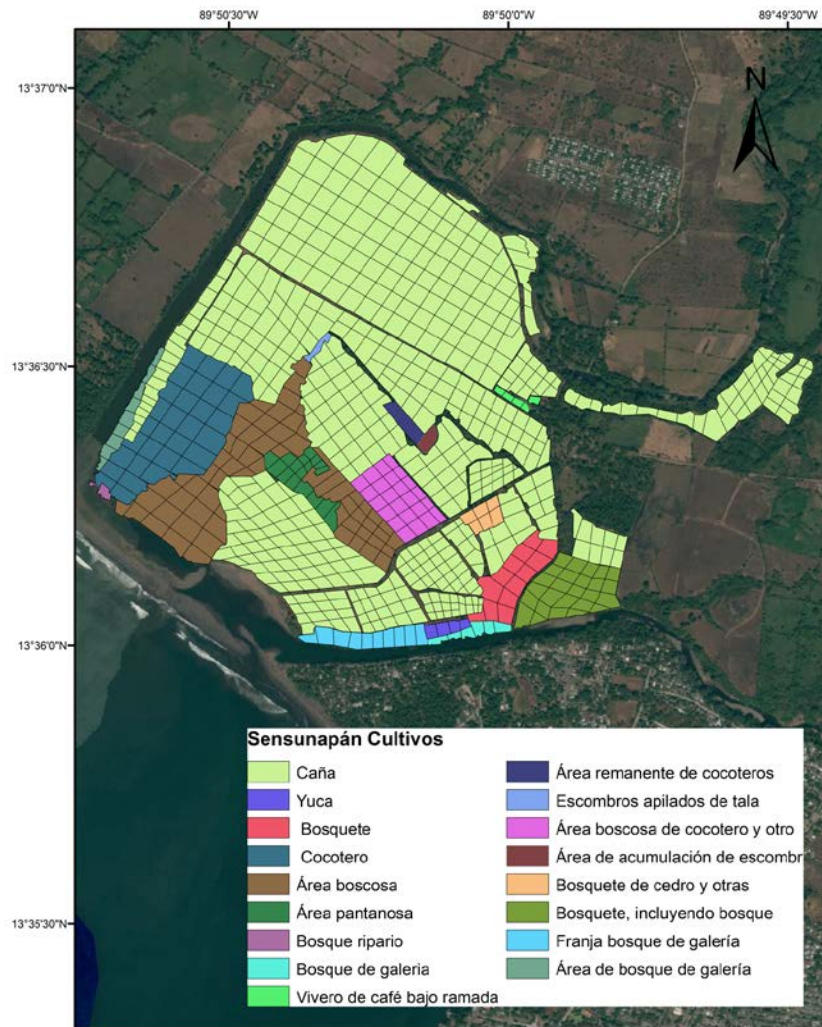
<b>Tipo de Cultivo</b>	<b>Extensión en zona de estudio (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Temporalidades</b>		<b>Resistencia a la inundación</b>
Caña de azúcar	1.30	Siembra	6 meses	Baja
		Desarrollo vegetativo	6 meses	Baja
		Cosecha	6 meses	Baja
Yuca	0.01	Siembra	12 meses	Baja
		Desarrollo vegetativo	12 meses	Media
		Cosecha	12 meses	Media

El Gráfico 81 y Gráfico 82 ilustran la ubicación de los cultivos susceptibles de inundación en la zona media y baja, es decir Zonas 4 y 5 de la cuenca Sensunapán, así como la distribución de los tipos de cultivos ubicados en éstas.

**Gráfico 81. Levantamiento de cultivos expuestos en la cuenca Sensunapán - Zona Media (Zona 4)**



**Gráfico 82. Levantamiento de cultivos expuestos en la cuenca Sensunapán - Zona Baja (Zona 5)**



**Cuadro 22. Resumen de la información de cultivos según tipo de cultivo – Sensunapán Zonas 4 y 5**

Tipo de cultivo	Área (km <sup>2</sup> )	% Área	Valor reposición (USD\$)	% Valor reposición	Valor de reposición por m <sup>2</sup> (USD\$/m <sup>2</sup> )
Caña	1,395,399	72%	297,937	99.3%	0.22
Área Boscosa	176,394	9%	-	-	-
Vivero de café bajo ramada	3,749	0.2%	-	-	-
Área pantanosa	24,607	1.3%	-	-	-
Área remanente de cocoteros	6,765	0.3%	-	-	-
Bosque de galería	8,617	0.4%	-	-	-
Bosque ripario	1,895	0.1%	-	-	-
Bosquete	37,332	1.9%	-	-	-
Bosquete de cedro y otras especies	10,341	0.5%	-	-	-
Bosquete, incluyendo bosque	53,714	2.8%	-	-	-
Área de acumulación de escombros	3,355	0.2%	-	-	-
Cocotero	126,403	6.5%	-	-	-
Escombros apilados de tala	2,234	0.1%	-	-	-
Franja bosque de galería	22,299	1.2%	-	-	-
Área de bosque de galería	13,443	0.7%	-	-	-
Área Boscosa de cocotero	43,693	2.3%	-	-	-
Yuca	6,024	0.3%	1,988	0.7%	0.33
<b>Total</b>	<b>1,936,264</b>	<b>100%</b>	<b>299,925</b>	<b>100%</b>	<b>0.28</b>

## **6. Vulnerabilidad física y humana**

### **6.1 Aspectos generales**

La caracterización de la vulnerabilidad de un componente cualquiera del inventario de activos se hace mediante la asignación directa de la función de vulnerabilidad correspondiente. Para el efecto se asigna una función de vulnerabilidad única para la afectación física y una función de vulnerabilidad única para la afectación humana.

Con respecto a la función de vulnerabilidad física, ésta debe incluir de ser necesario, la ponderación respectiva de los porcentajes de afectación y los valores relativos correspondientes a:

- Pérdidas directas
- Pérdidas en los contenidos

La valoración global del daño se calcula teniendo en cuenta las pérdidas directas y de contenidos sin desagregación de costos.

Para efectos de caracterizar la vulnerabilidad ante eventos sísmicos se requiere la siguiente información:

- Sistema estructural característico.
- Material estructural.
- Características estructurales especiales: normalmente existen características especiales que hacen que una construcción determinada presente un comportamiento diferente al típico observado por lo cual debe registrarse dicha característica. Incluye por ejemplo aspectos de irregularidad en planta o altura, edificación de esquina, defectos especiales como columnas cortas, esbeltez excesiva, daños previos, asentamientos evidentes y otros.
- Edad de la edificación.

Para efectos de caracterizar la vulnerabilidad ante eventos de inundación se requiere la siguiente información:

- Tipo de material de la estructura principal.
- Tipo de material de muros divisorios, fachadas y acabados.
- Tipo de material de pisos.
- Calidad y fragilidad de los contenidos.

Para los cultivos se requiere información relacionada con el tipo de cultivo, la periodicidad de cosechas, la fragilidad del cultivo a la duración y profundidad de inundación y los costos asociados a la producción, la utilidad esperada y demás condiciones económicas.

Con respecto a la vulnerabilidad humana, esta se expresa mediante el número esperado de víctimas (en los términos detallados que el usuario desee, es decir víctimas mortales, heridos, afectados o cualquier otra, según sea la información que tengan a disposición) como porcentaje



del número total de personas expuestas y su varianza. Usualmente se recurre también a estadísticas existentes que correlacionen el número de personas afectadas con el número de heridos o víctimas en fenómenos similares al que se estudia.

Para el caso de inundación usualmente se determina como parámetro de la afectación humana en cada escenario, el número máximo esperado de personas afectadas, que corresponde al número total de ocupantes (valor máximo estimado) en las construcciones que sufren algún tipo de impacto por cualquiera de los eventos de inundación. Para efectos del presente análisis se utiliza esta última metodología para estimar la afectación humana en los análisis de riesgo.

## **6.2 Funciones de vulnerabilidad para construcciones y zonas de cultivos**

Las funciones de vulnerabilidad dentro de la plataforma CAPRA ([www.ecapra.org](http://www.ecapra.org)) relacionan el valor medio del daño medida en porcentaje con respecto al valor de exposición como función de la intensidad que se seleccione para el análisis.

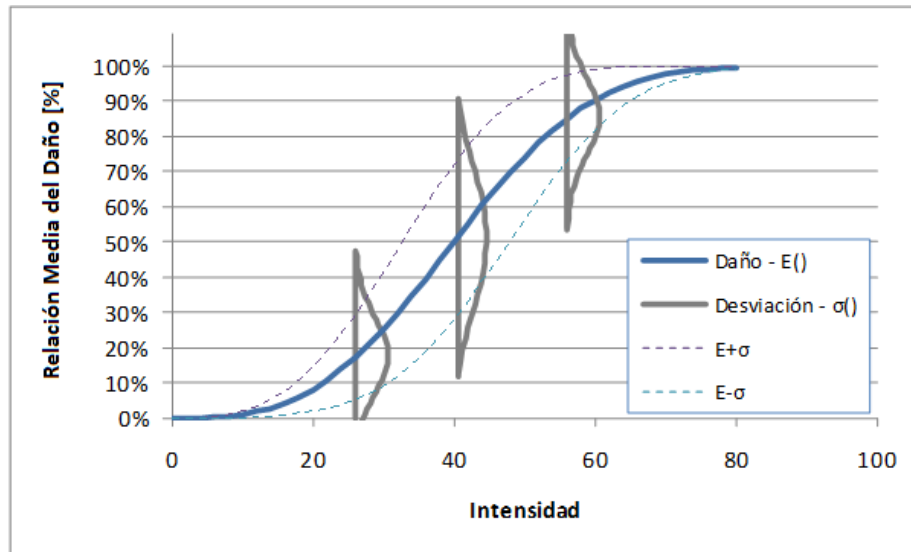
La función de vulnerabilidad ante una inundación se debe desarrollar para los diferentes tipos constructivos característicos, en función de dos parámetros principales: la profundidad de las aguas de inundación y la velocidad máxima del flujo.

En las zonas donde se espera la ocurrencia de inundaciones lentas el parámetro de intensidad que se utiliza normalmente en los análisis es la profundidad máxima de inundación reportada en el modelo de análisis para cada uno de los escenarios considerados. Por otro lado cuando la inundación se produce por efectos de un flujo torrencial de alta velocidad, es evidente que, adicionalmente a los daños asociados al incremento en el nivel del agua, se generan una serie de daños asociados a la velocidad máxima del flujo de agua, lo cual puede generar daño estructural significativo. Estas áreas están clasificadas como áreas de amenaza por tránsito de flujos torrenciales y para su análisis se requiere de información de amenazas relacionada con la profundidad de agua de inundación y con la velocidad máxima del flujo en cada sector. Las observaciones recientes, permiten establecer que, en general, en las áreas de alta velocidad de flujo el daño sobre la infraestructura expuesta es prácticamente total, especialmente para construcciones de tipo informal. También se puede establecer que usualmente para ciertos tipos de componentes el daño se presenta en consideración a la ocurrencia o no de inundación en el sitio y no tanto en relación a la velocidad máxima del flujo alcanzado. Para el presente caso y considerando las condiciones reales de los eventos de inundación que pueden presentarse se utiliza la profundidad de inundación como variable de control para el daño. En esta consideración y para efectos de construir las curvas de vulnerabilidad correspondientes se considera hasta cierto punto que la ocurrencia de una determinada profundidad de inundación está acompañada también por una cierta velocidad del flujo.

Las funciones de vulnerabilidad o daño por inundación se asignan a construcciones con diferentes usos. Estas funciones no consideran los daños provocados por socavación, falta de resistencia por reblandecimiento del suelo o deficiencia de la cimentación que pueden producir el colapso de las estructuras.

El Gráfico 83 presenta la forma indicativa de las funciones de vulnerabilidad. En el presente caso se desarrollan funciones de vulnerabilidad tanto para edificaciones como para cada uno de los tipos de cultivo identificados.

**Gráfico 83. Función de vulnerabilidad típica en la plataforma CAPRA**



### 6.3 Información de vulnerabilidad de edificaciones

En este numeral se presentan los resultados de la aplicación de una metodología desarrollada para obtener funciones de vulnerabilidad por inundación incluyendo las eventuales pérdidas en las construcciones mismas como en los contenidos. Se proponen diferentes configuraciones y valores de los contenidos y elementos no estructurales para diferentes usos de inmuebles identificados que incluyen viviendas de diferentes categorías, escuelas, bodegas, canchas, bóvedas recreacionales, gasolineras, cuerpos de bomberos, talleres automotrices, escuelas, hospitales, iglesias, laboratorios, y mercados. En la calificación de los valores y de los niveles de daño fue necesario recurrir a criterios de expertos y a las observaciones de impactos en eventos pasados en las zonas de estudio ya que no se cuenta con información experimental o de casos históricos debidamente documentada. En el Anexo 4 se presentan las diferentes fichas que resumen la información disponible para cada uno de los tipos de edificaciones evaluados. El Cuadro 23 resume las características de la valoración de daños para cada uno de los sistemas constructivos típicos.

**Cuadro 23. Discriminación de daños por inundación en sistemas constructivos**

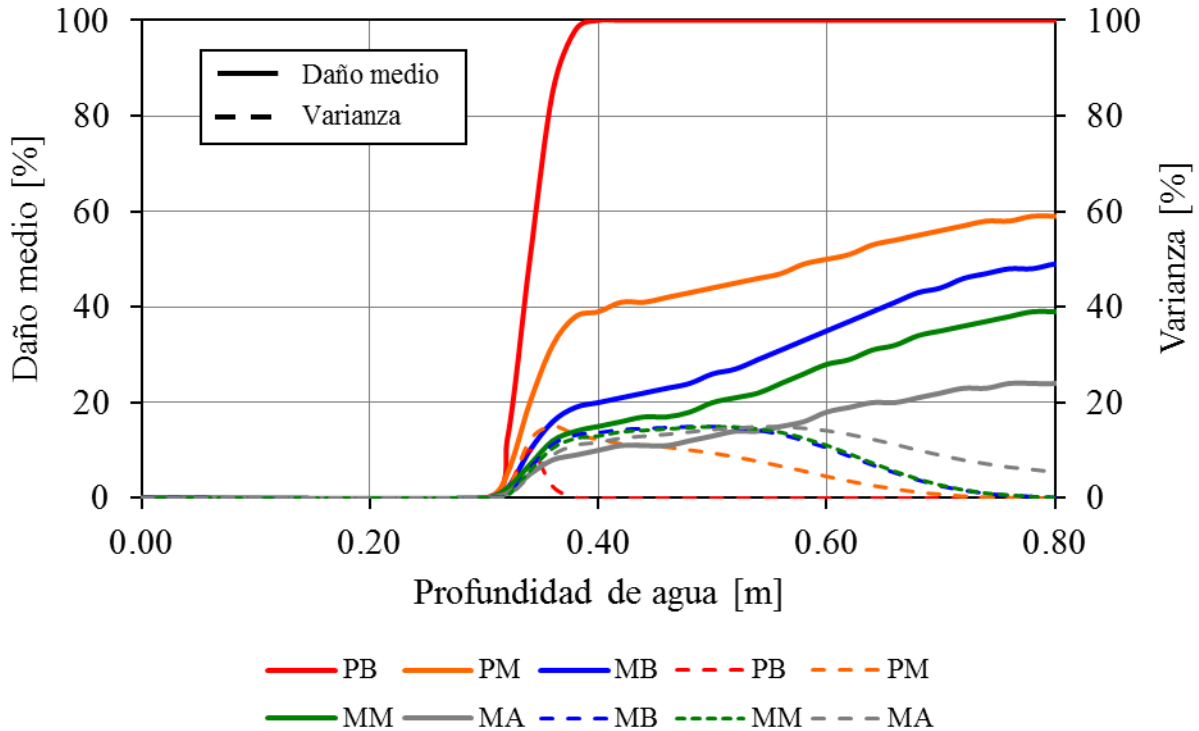
ID	Descripción	Estructura			Contenidos		
		Valor (%)	Daño (%)	Cota (m)	Valor (%)	Daño (%)	Cota (m)
PB	Precario Bajo	85	100	0.10	15	100	0.10
PM	Precario Medio	79	50	0.50	21	100	0.10
MB	Mixto Bajo	77	10	0.60	23	100	0.10
MM	Mixto Medio	60	25	0.60	40	50	0.10
MA	Mixto Alto	79	20	0.60	21	35	0.10

En el Gráfico 84 se presentan las diferentes funciones de vulnerabilidad seleccionadas para los diferentes tipos constructivos identificados. Cada una de las funciones está acompañada por una curva que representa la varianza de la información para niveles crecientes de intensidad. Las funciones de daño tienen en cuenta el tipo de material en que están construidos las edificaciones, el tipo de contenidos representativo, y el número de pisos. Las funciones de daño se expresan en porcentaje medio de daño en función de la intensidad de amenaza seleccionada. Simultáneamente con el valor medio del daño porcentual se presenta la estimación de la incertidumbre en la valoración de la vulnerabilidad, la cual se expresa mediante una curva que representa la varianza en función de la intensidad. Estos valores han sido establecidos mediante criterio de expertos, observaciones de impactos para diferentes intensidades de acuerdo con observaciones en eventos pasados y valoraciones similares en otros proyectos.

El inicio en la ocurrencia en los daños para intensidades crecientes de la amenaza se toma para un valor de profundidad de inundación de 0.3 m. Este valor se ha seleccionado con base en los siguientes criterios:

- Profundidad mínima a la cual se presentan daños estructurales de consideración. En general para zonas con alta frecuencia de ocurrencia de eventos de poca intensidad, si la profundidad de inundación es menor, simplemente se requiere una labor de limpieza ya que las personas ubicadas en estas zonas tienen sus propios planes de contingencia para minimizar los daños en electrodomésticos y enseres (según observaciones realizadas por el MARN en situaciones de emergencia por inundaciones).
- Incertidumbre asociada a la estimación de las profundidades en los análisis de amenaza.
- Variabilidad e incertidumbre en la información topográfica que genera una sobreestimación de la profundidad de inundación al considerar que cualquier elemento que esté en contacto con la huella de inundación ya que da sujeto a una inundación determinada.

**Gráfico 84. Funciones de vulnerabilidad para edificaciones**



#### 6.4 Información de vulnerabilidad de tipos de cultivos

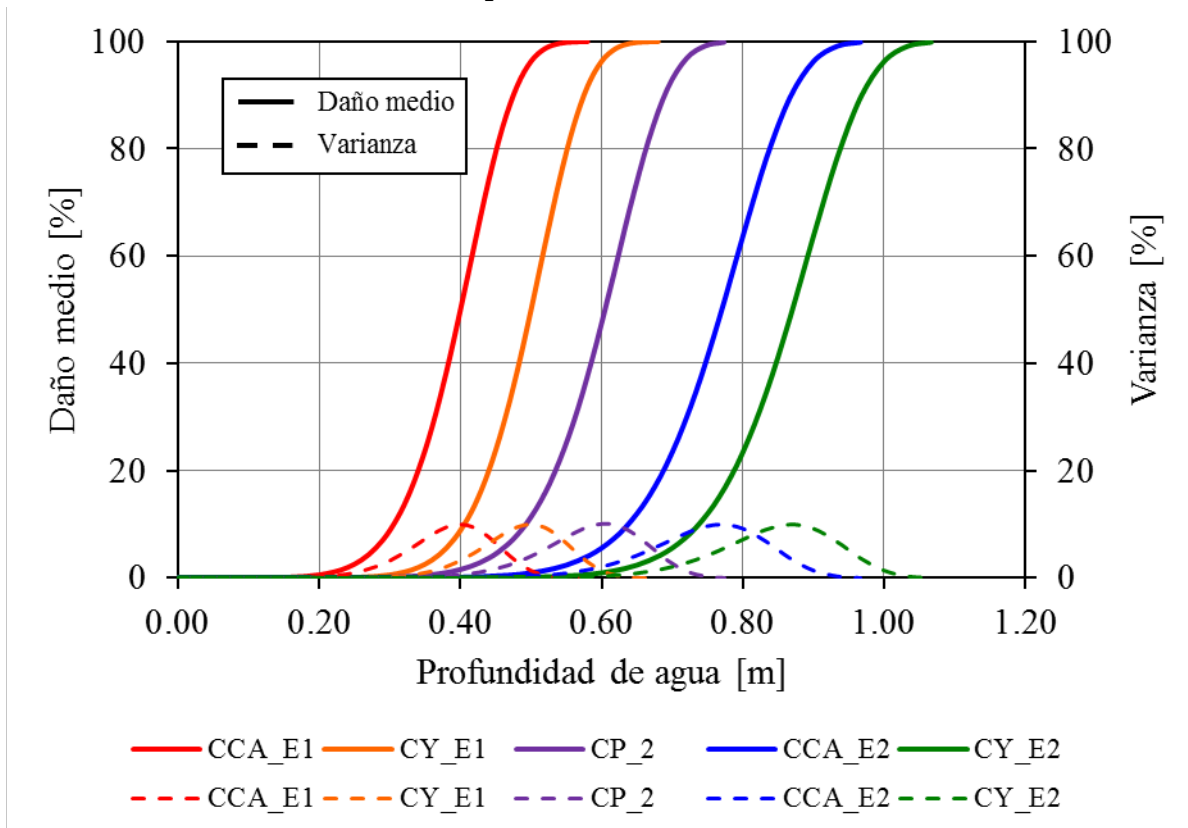
Para determinar las funciones de vulnerabilidad de cultivos se recurre a la información disponible para los diferentes tipos de cultivos y a la opinión de expertos locales consultados quienes juzgan cuales podrían ser los niveles de daño esperados en los diferentes tipos de cultivos en función directa de la altura máxima de las aguas de inundación y para diferentes tiempos de desarrollo de la cosecha. No se ha tenido en cuenta directamente la velocidad del flujo en la determinación de las funciones de vulnerabilidad ya que en el presente caso la mayoría de las inundaciones en zonas de cultivos son lentas. En el Anexo 5 se encuentran las diferentes fichas que resumen la información disponible para cada uno de los tipos de cultivos evaluados.

El Gráfico 85 presenta las funciones de vulnerabilidad resultantes de este análisis.

**Cuadro 24. Asignación de funciones por tipo de cultivo y estacionalidad**

Cultivo	Estacionalidad 1 - ID	Estacionalidad 2 - ID
Caña de azúcar	CCA_E1	CCA_E2
Yuca	CY_E1	CY_E2
Pastos Generales	CCA_E1	CP_2

**Gráfico 85. Funciones de vulnerabilidad para cultivos**



## **7. Análisis de riesgo por inundación en cuencas priorizadas**

### **7.1 Generalidades**

El análisis probabilista del riesgo tiene como objetivo fundamental determinar las distribuciones de probabilidad de las pérdidas que pueden sufrir en lapsos dados los activos expuestos, como consecuencia de la ocurrencia de amenazas naturales, integrando de manera racional las incertidumbres que existen en las diferentes partes del proceso. La pregunta básica que el análisis probabilista de riesgos debe contestar es: dado que se tiene un conjunto de activos expuestos a los efectos de una o varias amenazas naturales, ¿con qué frecuencia se presentarán pérdidas que superen un valor dado?

Puesto que la frecuencia de los eventos catastróficos es particularmente baja, queda descartada la posibilidad de contestar la pregunta anterior formulando modelos puramente empíricos del proceso de ocurrencia de estos eventos. Esto obliga a la construcción de modelos probabilistas como el que aquí se describe.

El procedimiento de cálculo probabilista consiste entonces, en forma resumida, en evaluar las pérdidas en el grupo de activos expuestos durante cada uno de los escenarios que colectivamente describen la amenaza, y luego integrar probabilísticamente los resultados obtenidos utilizando como factores de peso las frecuencias de ocurrencia de cada escenario.

El análisis probabilista de riesgo involucra incertidumbres que no pueden despreciarse y deben propagarse a lo largo del proceso de cálculo. El presente numeral describe las bases generales de cálculo para alcanzar el objetivo planteado.

### **7.2 Metodología de evaluación probabilista de riesgo**

#### **7.2.1 Procedimiento general**

La evaluación de riesgo requiere de tres pasos de análisis, que se describen a continuación:

- Evaluación de la amenaza: Para cada uno de los peligros considerados, se define un conjunto de eventos, con sus respectivas frecuencias de ocurrencia, que representan de manera integral la amenaza correspondiente. Cada escenario contiene la distribución espacial de parámetros que permiten construir la distribución de probabilidad de las intensidades producidas por su ocurrencia.
- Definición del inventario de elementos expuestos: Debe definirse el inventario de elementos expuestos, el cual debe especificar la localización geográfica del bien expuesto más los siguientes parámetros, que califican el elemento:
  - o Valor físico o costo de reposición del bien
  - o Valor humano o número de ocupantes estimado

- Clase estructural a la que pertenece el bien
- Vulnerabilidad de las construcciones: Debe asignarse a cada una de las clases estructurales una función de vulnerabilidad para cada tipo de amenaza. Esta función caracteriza el comportamiento de la construcción durante la ocurrencia de fenómenos amenazantes. Las funciones de vulnerabilidad definen la distribución de probabilidad de las pérdidas como función de la intensidad producida durante un escenario específico. Se definen mediante curvas que relacionan el valor esperado del daño y la desviación estándar del daño con la intensidad del fenómeno.

### 7.2.2 Cálculo numérico básico

Considerando el objetivo básico del análisis probabilista del riesgo expuesto anteriormente, es necesario plantear entonces la metodología específica de cálculo de las frecuencias de ocurrencia de niveles específicos de pérdidas asociados a los activos expuestos en lapsos determinados de tiempo y ante la ocurrencia de amenazas naturales.

El riesgo por amenazas naturales es comúnmente descrito mediante la llamada curva de excedencia de pérdidas (“loss curve”) que especifica las frecuencias, usualmente anuales, con que ocurrirán eventos en que se excedan un valor especificado de pérdidas. Esta frecuencia anual de excedencia se conoce también como tasa de excedencia, y puede calcularse mediante la siguiente ecuación, que es una de las múltiples formas que adopta el teorema de la probabilidad total:

$$v(p) = \sum_{i=1}^{\text{Eventos}} \Pr(P > p | \text{Evento } i) F_A(\text{Evento } i) \quad (\text{Ec. 7-1})$$

En la ecuación anterior  $v(p)$  es la tasa de excedencia de la pérdida  $p$  y  $F_A(\text{Evento } i)$  es la frecuencia anual de ocurrencia del evento  $i$ , mientras que  $\Pr(P > p | \text{Evento } i)$  es la probabilidad de que la pérdida sea superior a  $p$ , dado que ocurrió el  $i$ -ésimo evento. La suma en la ecuación anterior se hace para todos los eventos potencialmente dañinos. El inverso de  $v(p)$  es el periodo de retorno de la pérdida  $p$ , identificado como  $Tr$ .

Como se verá más adelante, la curva de pérdidas contiene toda la información necesaria para describir en términos de probabilidad el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas.

La pérdida  $p$  a que se refiere la Ecuación 7-1 es la suma de las pérdidas que acontecen en todos los elementos expuestos. Conviene hacer notar lo siguiente:

- La pérdida  $p$  es una cantidad incierta, cuyo valor, dada la ocurrencia de un evento, no puede conocerse con precisión. Debe, por tanto, ser vista y tratada como una variable aleatoria y deben preverse mecanismos para conocer su distribución de probabilidad, condicionada a la ocurrencia de cierto evento.

- La pérdida  $p$  se calcula como la suma de las pérdidas que se presentan en cada uno de los bienes expuestos. Cada uno de los sumandos es una variable aleatoria y entre ellos existe cierto nivel de correlación, que debe ser incluido en el análisis.

En vista de la Ecuación 7-1, la secuencia de cálculo probabilista de riesgo es la siguiente:

1. Para un escenario, determinar la distribución de probabilidades de la pérdida en cada uno de los bienes expuestos.
2. A partir de las distribuciones de probabilidad de las pérdidas en cada bien, determinar la distribución de probabilidad de la suma de estas pérdidas, tomando en cuenta la correlación que existe entre ellas.
3. Un vez determinada la distribución de probabilidad de la suma de las pérdidas en este evento, calcular la probabilidad de que esta exceda un valor determinado,  $p$ .
4. La probabilidad determinada en el inciso anterior, multiplicada por la frecuencia anual de ocurrencia del evento, es la contribución de este evento a la tasa de excedencia de la pérdida  $p$ .

El cálculo se repite para todos los eventos, con lo que se obtiene el resultado indicado por la Ecuación 7-1.

Es interesante señalar también que en la Ecuación 7-1 no se hace distinción entre eventos que pertenezcan a diferentes amenazas. En efecto, la suma en esa ecuación podría incluir, por ejemplo, sismos y huracanes o sismos y erupciones volcánicas. Esto puede hacerse porque se ha supuesto que tanto los eventos asociados a una misma amenaza como los eventos asociados a distintas amenazas no ocurren simultáneamente. Sin embargo, algunos fenómenos potencialmente dañinos sí ocurren simultáneamente, por lo que en estos casos hay que tomar previsiones especiales para la determinación de la distribución de probabilidad de  $p$ , tal como se analiza en el siguiente numeral.

### 7.2.3 Incertidumbres

Como se observa en la Ecuación 7-1, y como se planteó anteriormente, la pérdida que se presenta en un grupo de bienes expuestos durante un escenario es una cantidad incierta que debe ser tratada como variable aleatoria.

Generalmente es impráctico determinar de manera directa la distribución de probabilidad de la pérdida en un bien expuesto condicionada a la ocurrencia de un escenario. En otras palabras, por ejemplo, es impráctico determinar la distribución de probabilidad de la pérdida en un edificio, dado que en un sitio localizado a 100 km de distancia ocurrió un sismo con magnitud 6.

Por razones metodológicas, la probabilidad de excedencia de la pérdida  $p$ , dado que ocurrió un evento, suele expresarse de la siguiente manera:

$$\Pr(P > p | Evento) = \int_I \Pr(P > p | I) f(I | Evento) dI \quad (\text{Ec. 7-3})$$



El primer término del integrando,  $Pr(P > p/I)$ , es la probabilidad de que la pérdida exceda el valor  $p$  dado que la intensidad local fue  $I$ ; este término, por tanto, toma en cuenta la incertidumbre que hay en las relaciones de vulnerabilidad. Por otro lado, el término  $f(I/Evento)$  es la densidad de probabilidades de la intensidad, condicionada a la ocurrencia del evento; este término toma en cuenta el hecho de que, dado que ocurrió un evento, la intensidad en el sitio de interés es incierta.

#### 7.2.4 Estimadores puntuales del riesgo

Como se indicó anteriormente, la curva calculada aplicando la Ecuación 7-1 tiene toda la información necesaria para caracterizar el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas. Sin embargo, en ocasiones es impráctico utilizar una curva completa, por lo que conviene utilizar estimadores puntuales del riesgo que permitan expresarlo con un solo número. Se presentan a continuación los dos estimadores puntuales más comúnmente utilizados.

- a) Pérdida anual esperada (PAE): se trata del valor esperado de la pérdida anual. Es una cantidad importante puesto que indica, por ejemplo, que si el proceso de ocurrencia de eventos dañinos fuera estacionario de aquí a la eternidad, su costo equivaldría a haber pagado la PAE cantidad anualmente. Por tanto, en un sistema simple de seguro, la pérdida anual esperada sería la prima pura anual justa. La PAE puede obtenerse por integración de  $v(p)$  o mediante la siguiente expresión:

$$P_{AE} = \sum_{i=1}^{Eventos} E(P|Evento i)F_A(Evento i) \quad \text{(Ec. 7-4)}$$

- b) Pérdida máxima probable (PML por las iniciales en inglés de Probable Maximum Loss): se trata de una pérdida que ocurre con muy poca frecuencia. No existen estándares universalmente aceptados para definir qué quiere decir “muy poca frecuencia”. De hecho, la elección de un periodo de retorno u otro para tomar cierta decisión depende de la aversión al riesgo de quien la está tomando. En la industria aseguradora, por ejemplo, los periodos de retorno utilizados para definir la PML varían entre 200 y al menos 1500 años. Para el caso de análisis de inundaciones no es usual en general realizar análisis para periodos de retorno de más de 200 o 250 años.

#### 7.2.5 Probabilidad de excedencia de valores de pérdida

La curva de pérdidas,  $v(p)$ , calculada con la Ecuación 7-1 indica con qué frecuencia ocurrirán eventos que producirán pérdidas iguales o superiores a una dada,  $p$ . Si suponemos que el proceso de ocurrencia de eventos en el tiempo obedece a un proceso de Poisson, entonces es posible calcular la probabilidad de que la pérdida  $p$  sea excedida en un lapso  $T$ , es decir, en los próximos  $T$  años, con la siguiente expresión:

$$Pe(p, T) = 1 - e^{-v(p)T} \quad \text{(Ec. 7-5)}$$

donde,  $Pe(p,T)$  es la probabilidad de que la pérdida  $p$  sea excedida en los próximos  $T$  años.

### 7.2.6 Análisis para un solo escenario

El análisis probabilista de riesgo se realiza normalmente para el conjunto completo de escenarios especificados en las diferentes amenazas. Sin embargo, si así se desea, el análisis puede realizarse para un solo escenario (uno solo de los sumandos en la Ecuación 7-1). Si se hace que la frecuencia anual de ocurrencia de este escenario sea 1, la aplicación de la Ecuación 7-1 nos conduciría a las probabilidades de excedencia (ya no frecuencias anuales de excedencia) de valores de pérdida  $p$ , dado que el escenario en cuestión ocurrió.

Este caso tiene aplicaciones importantes en el campo de la planeación territorial, ya que sus resultados, mapeados por ejemplo en términos del valor esperado de la pérdida, son fácilmente incorporables en los planes de ordenamiento territorial.

## 7.3 **Resultados del análisis de riesgo**

### 7.3.1 Parámetros para la interpretación de los resultados del riesgo

Los resultados de riesgo se presentan únicamente para una duración de tormentas de 1 día debido a las siguientes consideraciones:

- Corresponden a las tormentas de mayor recurrencia y las más representativas de la zona.
- Los resultados indican que una vez que se sobrepasan los umbrales para que se produzcan inundaciones, las mayores duraciones no generan un aumento significativo en los impactos.

De acuerdo con esto los resultados de la evaluación del riesgo para una duración de tormentas de 1 día se consideran representativos para los propósitos del estudio.

Los resultados del análisis de riesgo se organizan y presentan de acuerdo con lo siguiente:

- Los resultados se presentan agrupados para cada una de las zonas críticas de análisis.
- Cuadro con el valor total expuesto y la pérdida anual esperada en USD.
- Cuadro con los valores de pérdida máxima probable (PML) expresada como pérdida económica absoluta en USD para diferentes periodos de retorno.
- Curva de pérdida máxima probable (PML) para diferentes periodos de retorno.
- Para cada tramo crítico de análisis se indica un escenario crítico de riesgo, correspondiente a un escenario que genera una pérdida con periodo de retorno de 100 años. Para su determinación se utiliza la curva de PML, se registra la pérdida económica para un periodo de retorno de 100 años, y luego se selecciona un escenario representativo que tenga una pérdida económica aproximada a este valor. Para dicho escenario se incluye la siguiente información complementaria:
  - o Pérdida económica esperada en USD.

- Cuadro y gráfico de barras con distribución relativa de pérdidas esperadas para los diferentes tipos constructivos.
- Número de edificaciones afectadas en el escenario
- Número de personas afectadas
- Mapas de riesgo para el escenario crítico.

### 7.3.2 Resultados del análisis de riesgo para cuenca Sensunapán

#### 7.3.2.1 *Riesgo en edificaciones*

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGO SENSUNAPÁN EDIFICACIONES ZONA 1\_1día**

**Información General**

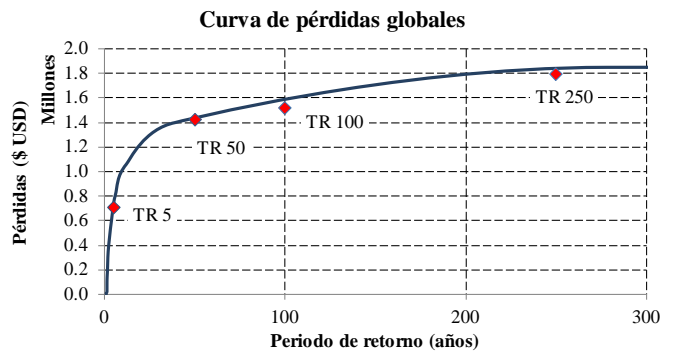
**PORTAFOLIO: Edificaciones Sensunapán**

**Pérdida Anual Esperada y PML**

Sensunapán Zona1_1día		
Valor Expuesto	\$USD	7,025,064
Pérdida anual esperada	\$USD	399,603
PML		
Periodo retorno años	Pérdida \$USD	
5	\$706,550	
50	\$1,420,342	
100	\$1,514,658	
250	\$1,797,603	

**AME Senu1\_1día**

**PML vs. PERIODO DE RETORNO**

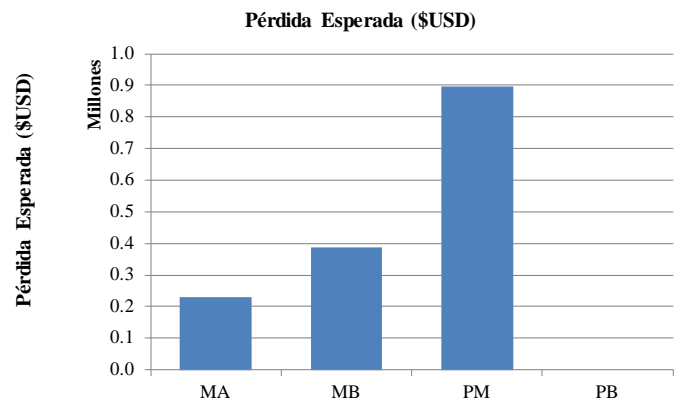


**Escenario de análisis correspondiente a una pérdida con periodo de retorno de 100 años**

**Pérdida Esperada por Sistema Estructural**

Grupo de Uso	Valor Expuesto (\$USD)	Pérdida Esperada (\$USD)
Mixto Alto	2,399,506	230,424
Mixto Bajo	1,979,726	386,910
Precario Medio	2,645,832	897,457
Precario Bajo	-	-
<b>Total</b>	<b>7,025,064</b>	<b>1,514,791</b>

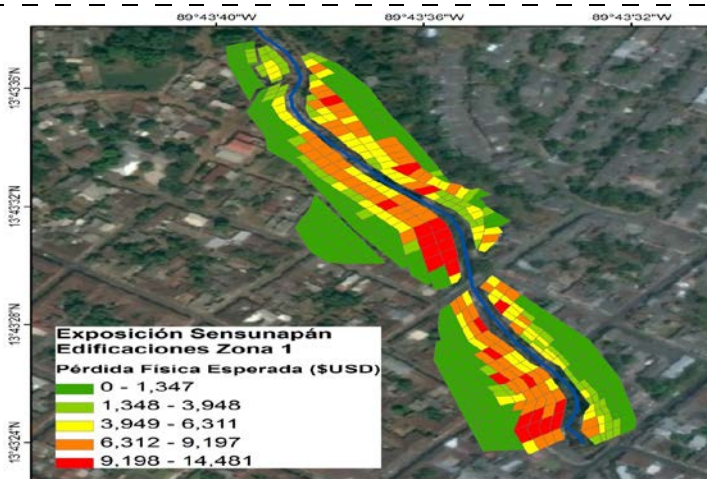
**Diagrama de Pérdida Esperada por Sistema Estructural**



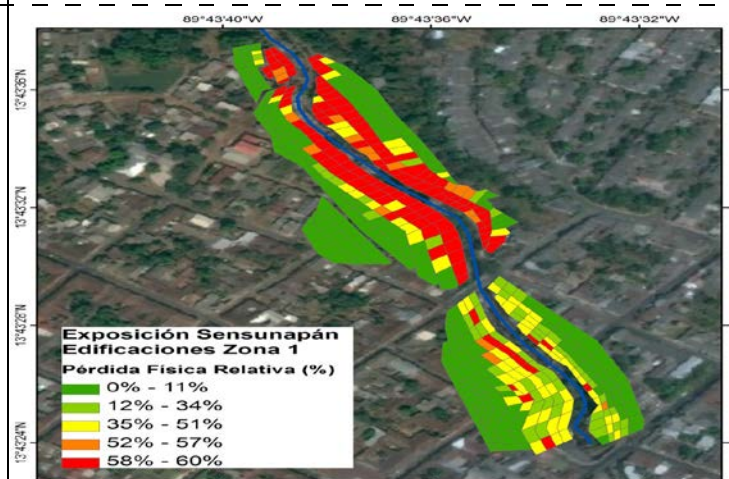
**Edificaciones y personas afectadas en el escenario crítico**

Edificaciones	275
Personas	749

**Mapa de pérdida física esperada**



**Mapa de pérdida física relativa**



**RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGO SENSUNAPÁN EDIFICACIONES ZONA 2\_1día**

**Información General**

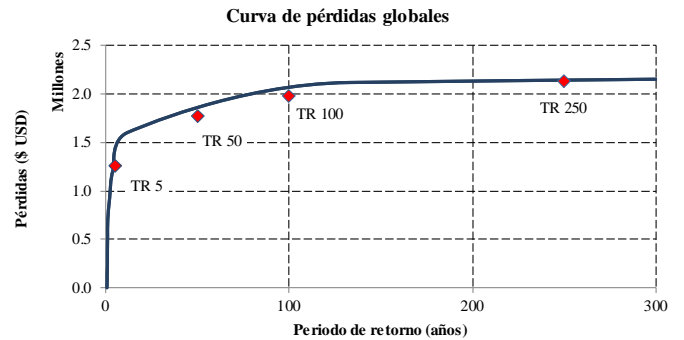
**PORTAFOLIO: Edificaciones Sensunapán**

**AME Sensu2\_1día**

**Pérdida Anual Esperada y PML**

**PML vs. PERIODO DE RETORNO**

Sensunapán Zona2_1día		
Valor Expuesto	\$USD	14,031,035
Pérdida anual esperada	\$USD	1,039,923
PML		
Periodo retorno años	Pérdida \$USD	
5	\$1,259,863	
50	\$1,767,949	
100	\$1,980,082	
250	\$2,135,344	

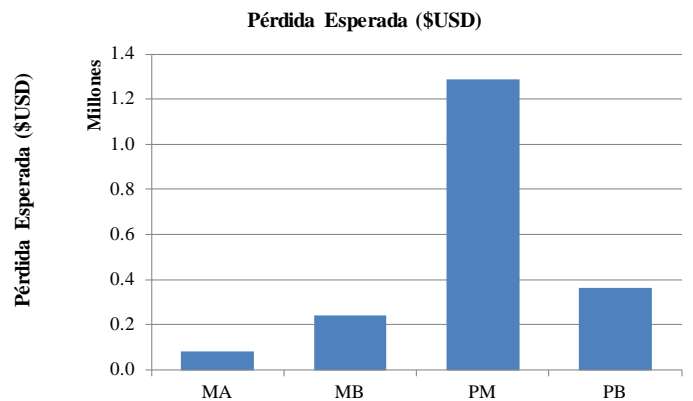


**Escenario de análisis correspondiente a una pérdida con periodo de retorno de 100 años**

**Pérdida Esperada por Sistema Estructural**

**Diagrama de Pérdida Esperada por Sistema Estructural**

Grupo de Uso	Valor Expuesto (\$USD)	Pérdida Esperada (\$USD)
Mixto Alto	4,207,488	84,454
Mixto Bajo	4,368,800	242,301
Precario Medio	4,958,600	1,289,603
Precario Bajo	496,148	363,710
Total	14,031,035	1,980,068

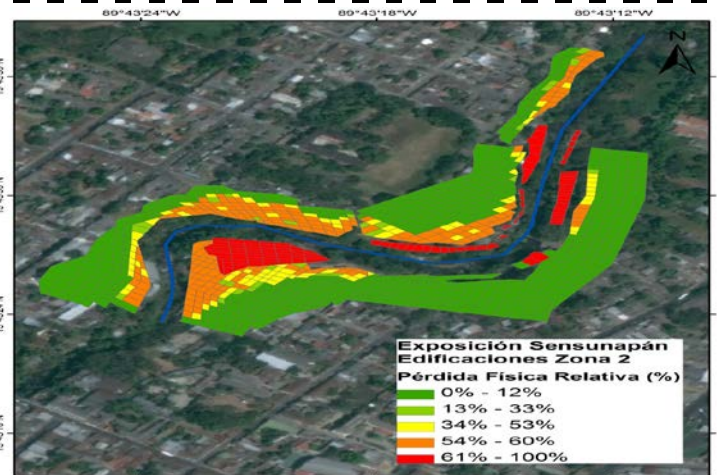
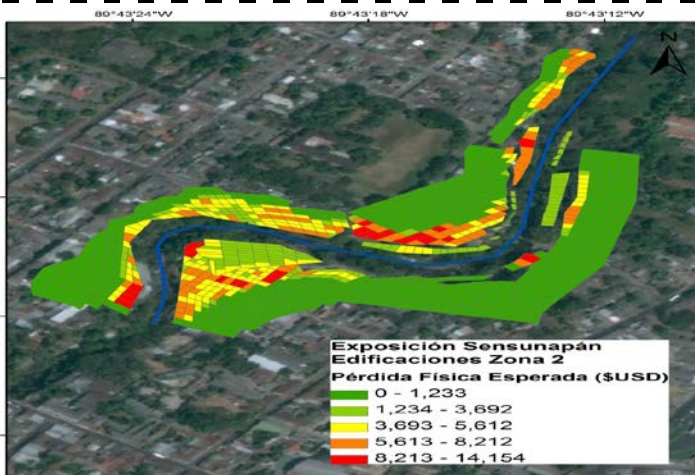


**Edificaciones y personas afectadas en el escenario crítico**

Edificaciones	436
Personas	1,024

**Mapa de pérdida física esperada**

**Mapa de pérdida física relativa**



**RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGO SENSUNAPÁN EDIFICACIONES ZONA 3\_1día**

**Información General**

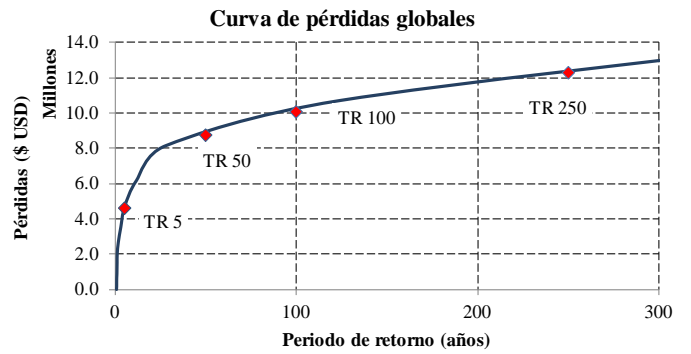
**PORTAFOLIO: Edificaciones Sensunapán**

**AME Senu3\_1día**

**Pérdida Anual Esperada y PML**

**PML vs. PERIODO DE RETORNO**

Sensunapán Zona3_1día		
Valor Expuesto	\$USD	70,969,544
Pérdida anual esperada	\$USD	3,699,992
PML		
Periodo retorno años	Pérdida \$USD	
5	\$4,579,938	
50	\$8,732,688	
100	\$10,066,235	
250	\$12,290,215	

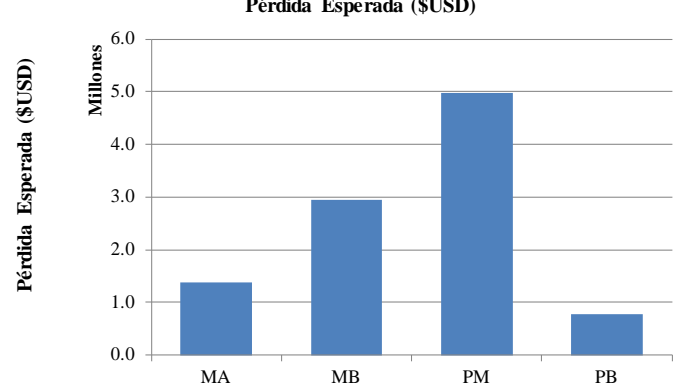


**Escenario de análisis correspondiente a una pérdida con periodo de retorno de 100 años**

**Pérdida Esperada por Sistema Estructural**

**Diagrama de Pérdida Esperada por Sistema Estructural**

Grupo de Uso	Valor Expuesto (\$USD)	Pérdida Esperada (\$USD)
Mixto Alto	22,697,945	1,372,776
Mixto Bajo	25,185,029	2,944,470
Precario Medio	21,554,901	4,974,508
Precario Bajo	1,531,668	776,579
Total	70,969,544	10,068,334

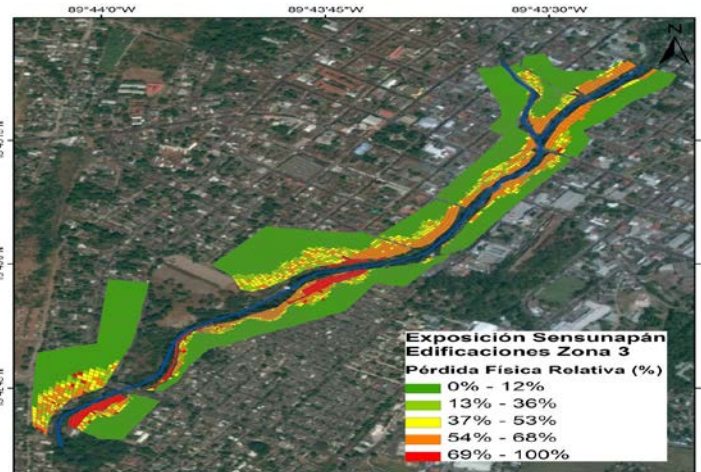
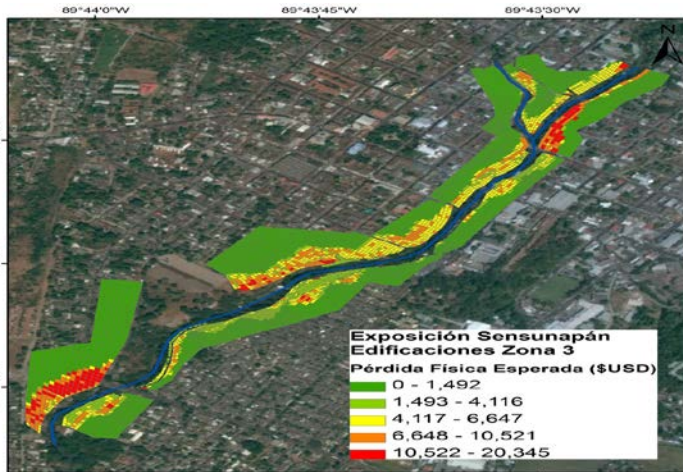


**Edificaciones y personas afectadas en el escenario crítico**

Edificaciones	1,930
Personas	4,848

**Mapa de pérdida física esperada**

**Mapa de pérdida física relativa**



## RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGO SENSUNAPÁN EDIFICACIONES ZONA 4\_1día

### Información General

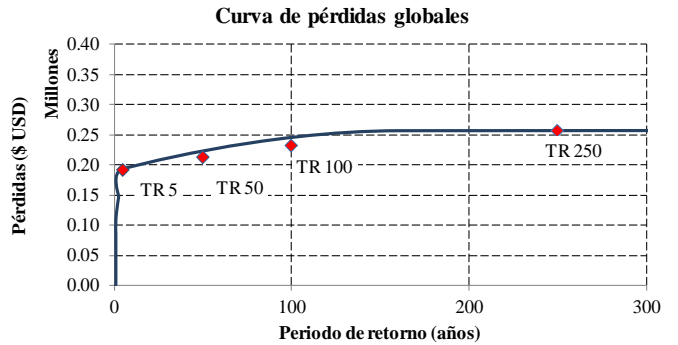
#### PORTAFOLIO: Edificaciones Sensunapán

##### Pérdida Anual Esperada y PML

Sensunapán Zona4_1día		
Valor Expuesto	\$USD	423,177
Pérdida anual esperada	\$USD	186,859
PML		
Periodo retorno años	Pérdida \$USD	
5	\$191,811	
50	\$212,133	
100	\$232,338	
250	\$257,001	

#### AME Senu4\_1día

##### PML vs. PERIODO DE RETORNO

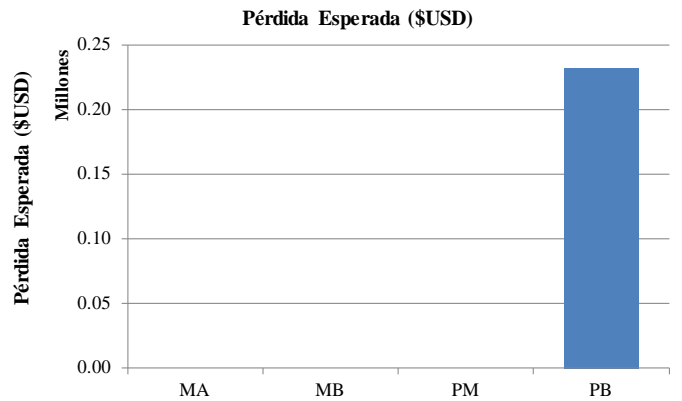


### Escenario de análisis correspondiente a una pérdida con periodo de retorno de 100 años

#### Pérdida Esperada por Sistema Estructural

Grupo de Uso	Valor Expuesto (\$USD)	Pérdida Esperada (\$USD)
MIXTO ALTO	-	-
MIXTO BAJO	-	-
PRECARIO MEDIO	-	-
PRECARIO BAJO	423,177	232,408
TOTAL	423,177	232,408

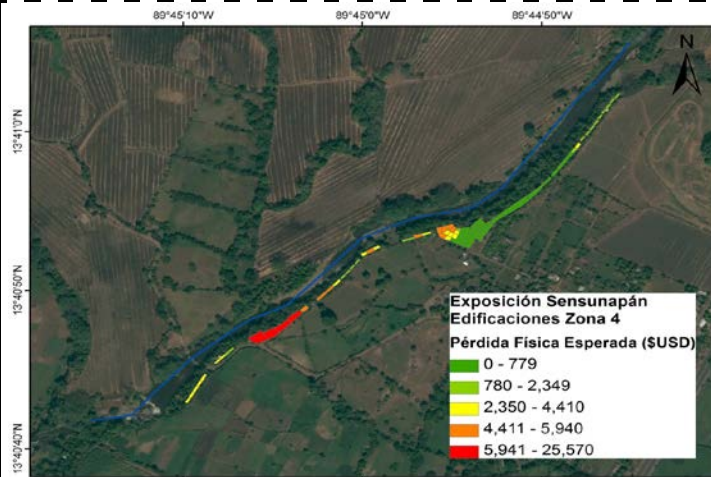
#### Diagrama de Pérdida Esperada por Sistema Estructural



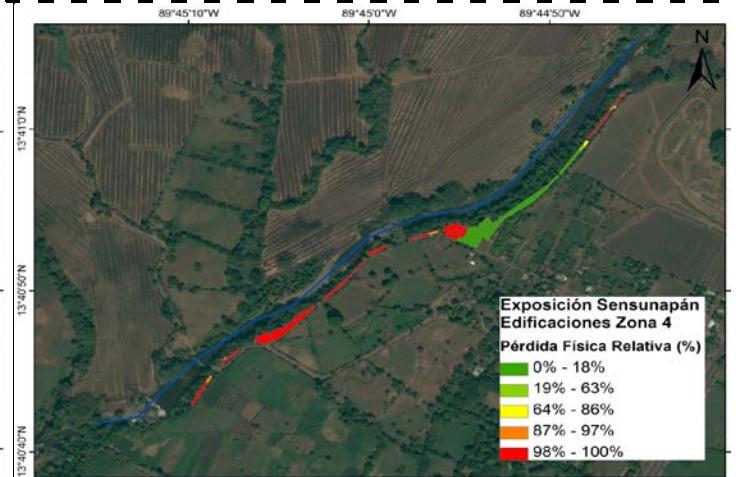
#### Edificaciones y personas afectadas en el escenario crítico

Edificaciones	52
Personas	170

#### Mapa de pérdida física esperada



#### Mapa de pérdida física relativa



**RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGO SENSUNAPÁN EDIFICACIONES ZONA 5\_1día**

**Información General**

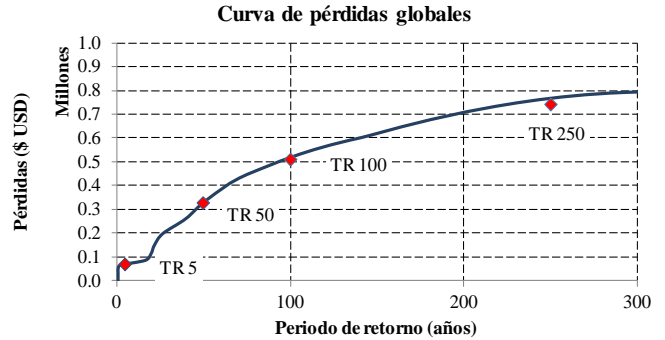
**PORTAFOLIO: Edificaciones Sensunapán**

**Pérdida Anual Esperada y PML**

Sensunapán Zona5_1día		
Valor Expuesto	\$USD	36,430,532
Pérdida anual esperada	\$USD	98,342
PML		
Periodo retorno años	Pérdida \$USD	
5	\$69,622	
50	\$326,924	
100	\$506,484	
250	\$738,619	

**AME Sensus5\_1día**

**PML vs. PERIODO DE RETORNO**

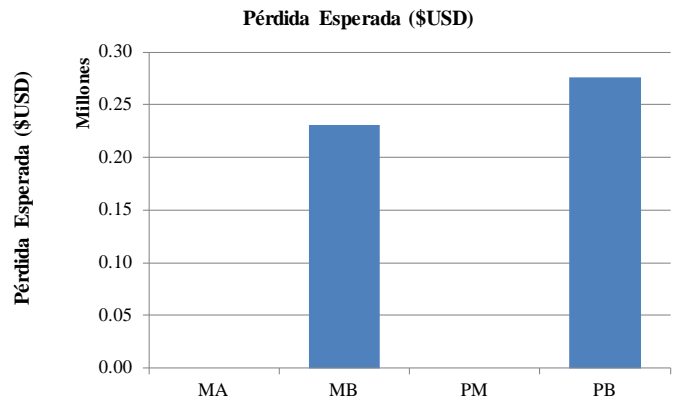


**Escenario de análisis correspondiente a una pérdida con periodo de retorno de 100 años**

**Pérdida Esperada por Sistema Estructural**

Grupo de Uso	Valor Expuesto (\$USD)	Pérdida Esperada (\$USD)
Mixto Alto	2,168,227	0
Mixto Bajo	30,748,279	230,257
Precario Medio	-	-
Precario Bajo	3,514,026	275,474
Total	36,430,532	505,731

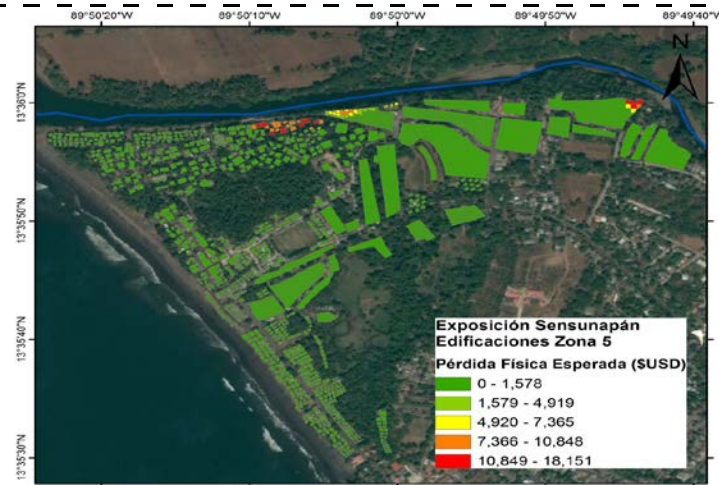
**Diagrama de Pérdida Esperada por Sistema Estructural**



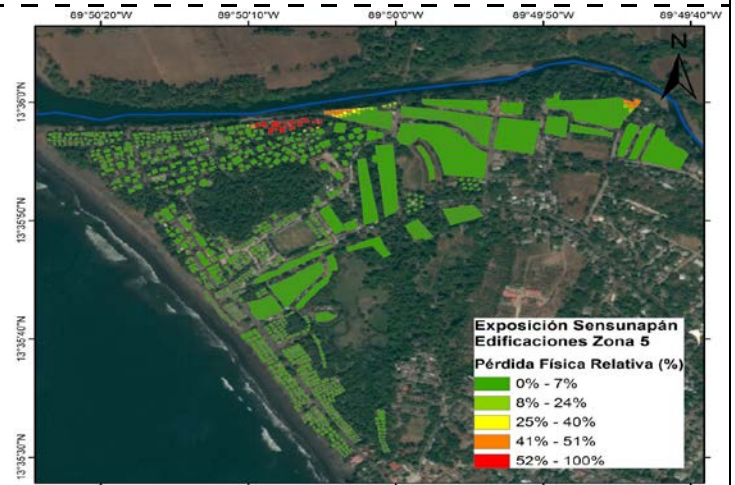
**Edificaciones y personas afectadas en el escenario crítico**

Edificaciones	69
Personas	176

**Mapa de pérdida física esperada**

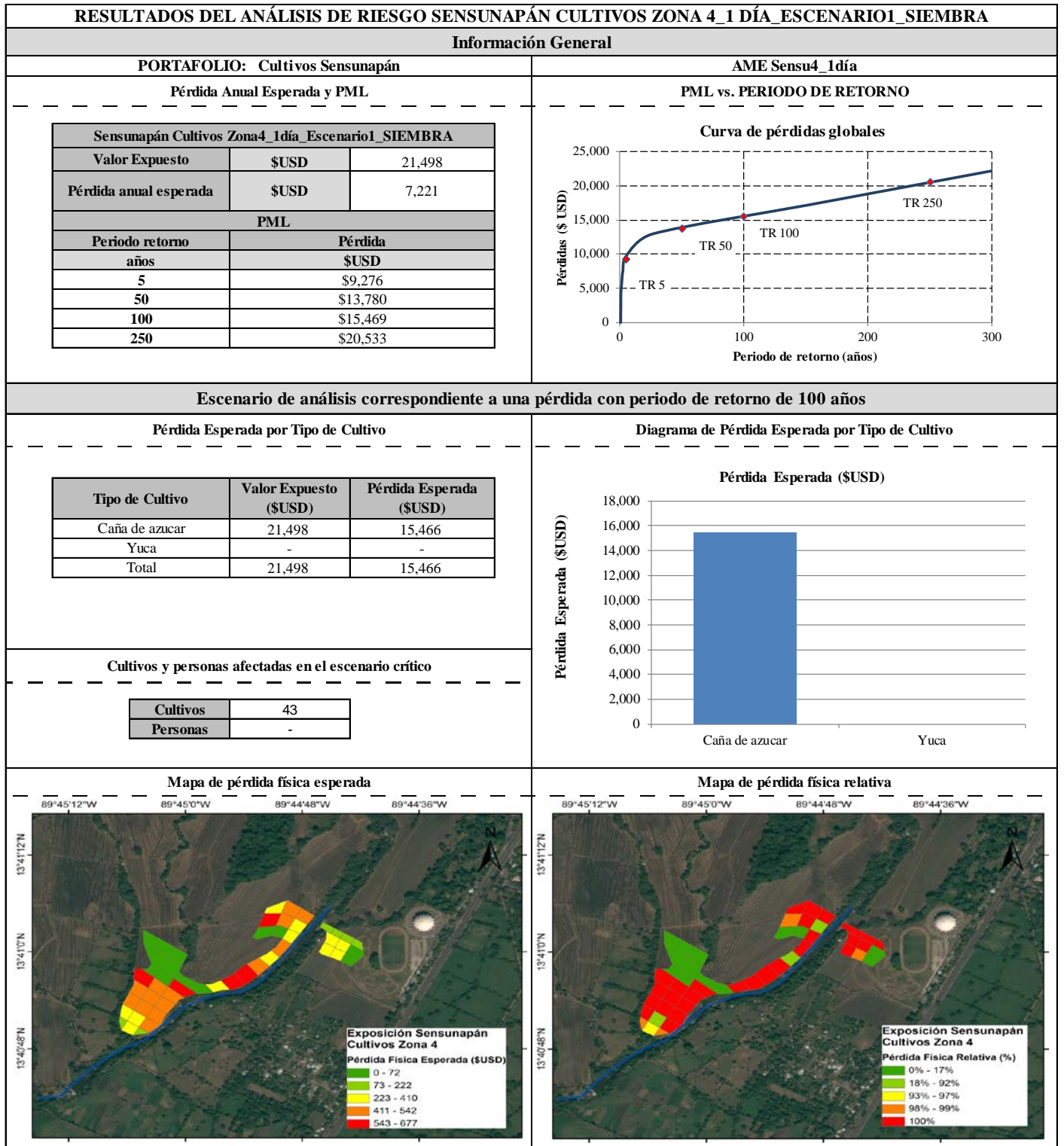


**Mapa de pérdida física relativa**





### 7.3.2.2 Riesgo en cultivos



**RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGO SENSUNAPÁN CULTIVOS ZONA 4\_1 DÍA\_ESCENARIO2\_COSECHA**

**Información General**

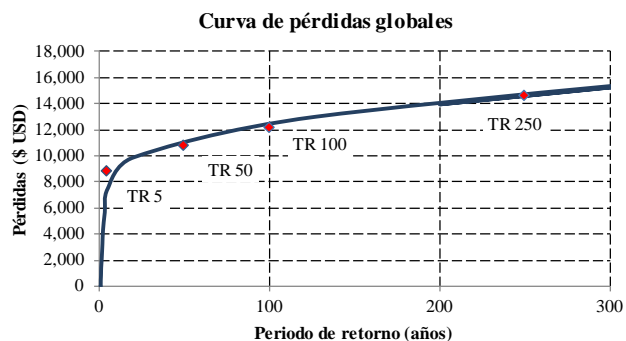
**PORTAFOLIO: Cultivos Sensunapán**

**AME Sensu4\_1día**

**Pérdida Anual Esperada y PML**

Sensunapán Cultivos Zona4_1día_Escenario2_Cosecha		
Valor Expuesto	\$USD	21,498
Pérdida anual esperada	\$USD	4,089
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	\$USD	
5	\$8,828	
50	\$10,747	
100	\$12,206	
250	\$14,595	

**PML vs. PERIODO DE RETORNO**

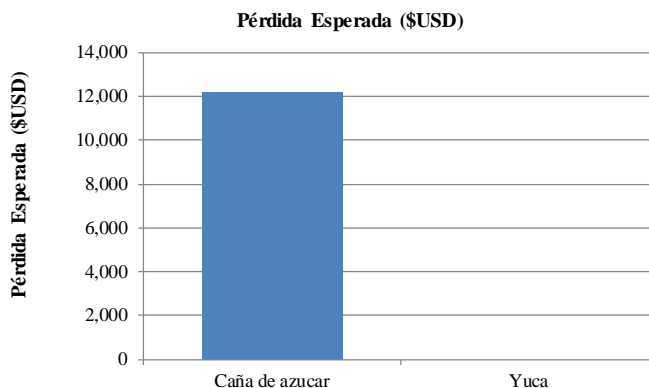


**Escenario de análisis correspondiente a una pérdida con periodo de retorno de 100 años**

**Pérdida Esperada por Tipo de Cultivo**

Tipo de Cultivo	Valor Expuesto (\$USD)	Pérdida Esperada (\$USD)
Caña de azucar	21,498	12,187
Yuca	-	-
Total	21,498	12,187

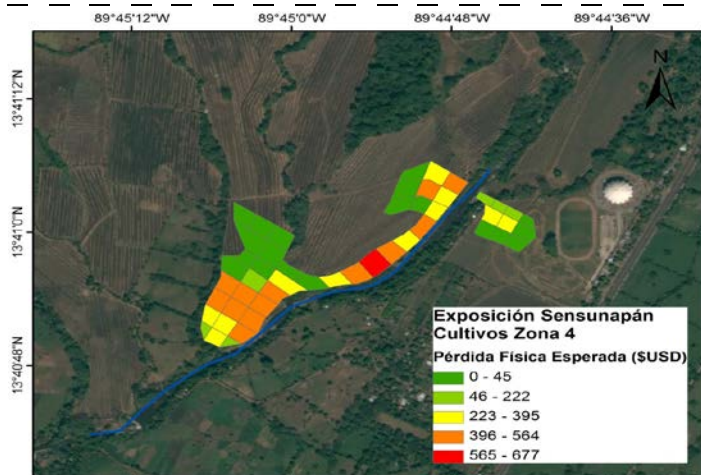
**Diagrama de Pérdida Esperada por Tipo de Cultivo**



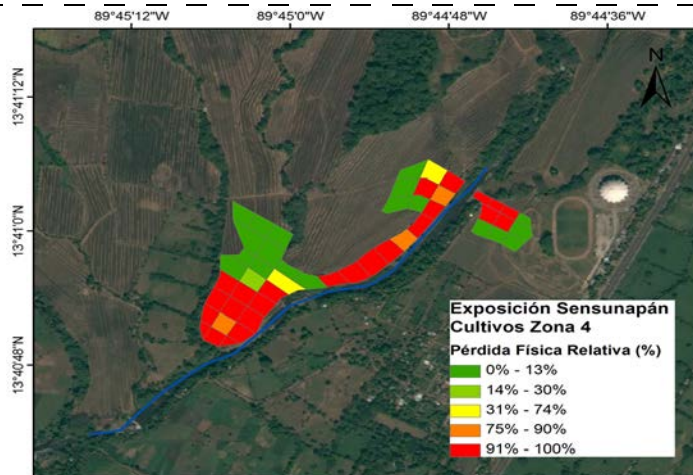
**Cultivos y personas afectadas en el escenario crítico**

Cultivos	37
Personas	-

**Mapa de pérdida física esperada**



**Mapa de pérdida física relativa**



**RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGO SENSUNAPÁN ZONA5 CULTIVOS 1 DÍA\_ESCENARIO1\_SIEMBRA**

**Información General**

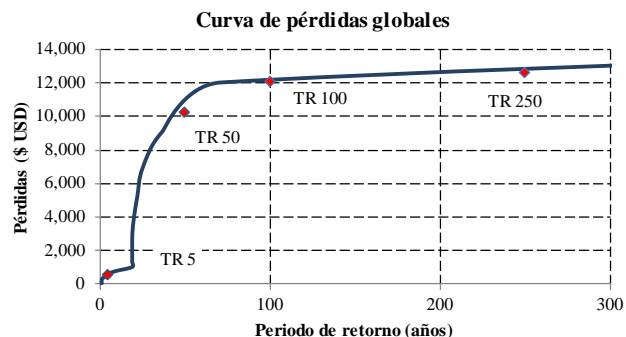
**PORTAFOLIO: Cultivos Sensunapán**

**AME Sensu5\_1día**

**Pérdida Anual Esperada y PML**

**PML vs. PERIODO DE RETORNO**

Sensunapán Zona5 Cultivos_1día_Escenario1_Siembra		
Valor Expuesto	\$USD	285,972
Pérdida anual esperada	\$USD	955
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	\$USD	
5	\$593	
50	\$10,218	
100	\$12,102	
250	\$12,628	

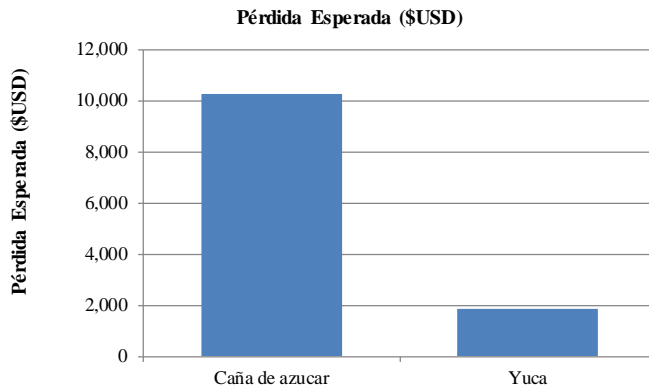


**Escenario de análisis correspondiente a una pérdida con periodo de retorno de 100 años**

**Pérdida Esperada por Tipo de Cultivo**

**Diagrama de Pérdida Esperada por Tipo de Cultivo**

Tipo de Cultivo	Valor Expuesto (\$USD)	Pérdida Esperada (\$USD)
Caña de azúcar	284,112	10,255
Yuca	1,859	1,854
Total	285,972	12,109

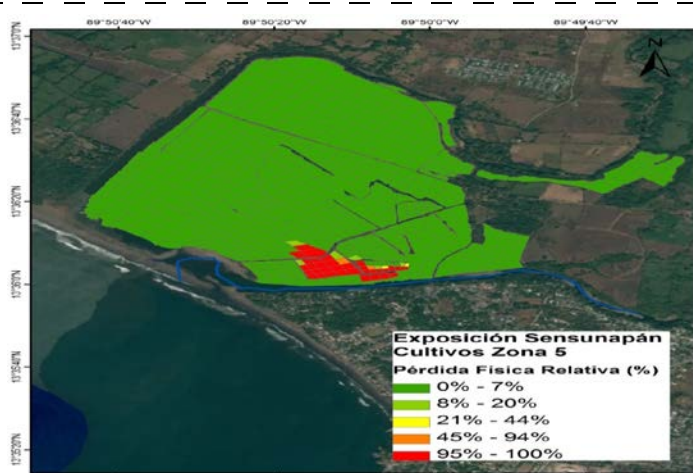
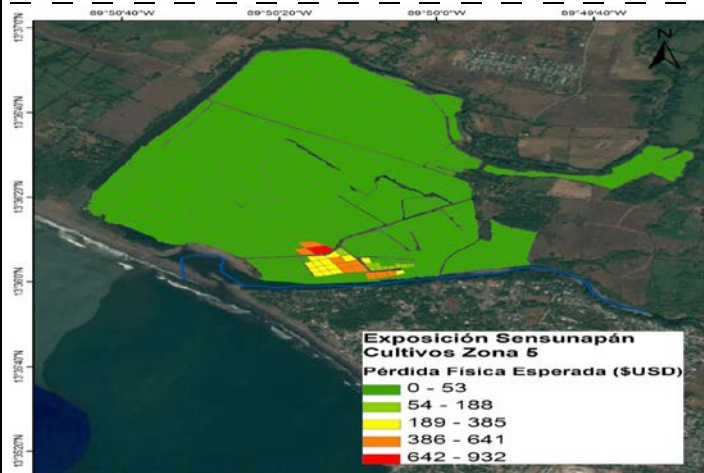


**Cultivos y personas afectadas en el escenario crítico**

Cultivos	48
Personas	-

**Mapa de pérdida física esperada**

**Mapa de pérdida física relativa**



**RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGO SENSUNAPÁN ZONA5 CULTIVOS 1 DÍA\_ESCENARIO2\_COSECHA**

**Información General**

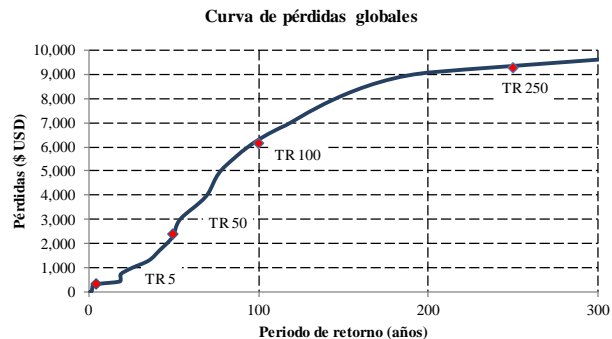
**PORTAFOLIO: Cultivos Sensunapán**

**AME Senu5\_1día**

**Pérdida Anual Esperada y PML**

**PML vs. PERIODO DE RETORNO**

Sensunapán Zona5 Cultivos_1día_Escenario2_Cosecha		
Valor Expuesto	\$USD	285,972
Pérdida anual esperada	\$USD	322
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	\$USD	
5	\$329	
50	\$2,390	
100	\$6,135	
250	\$9,229	

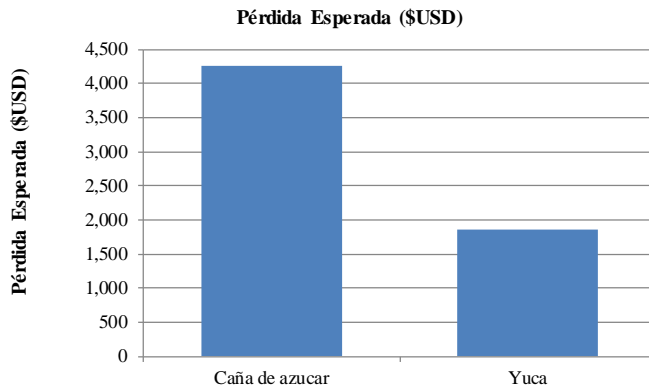


**Escenario de análisis correspondiente a una pérdida con periodo de retorno de 100 años**

**Pérdida Esperada por Tipo de Cultivo**

**Diagrama de Pérdida Esperada por Tipo de Cultivo**

Tipo de Cultivo	Valor Expuesto (\$USD)	Pérdida Esperada (\$USD)
Caña de azucar	284,112	4,251
Yuca	1,859	1,853
Total	285,972	6,104

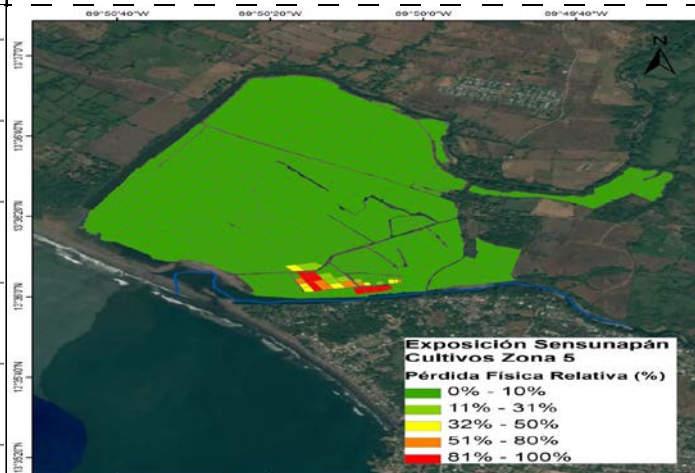
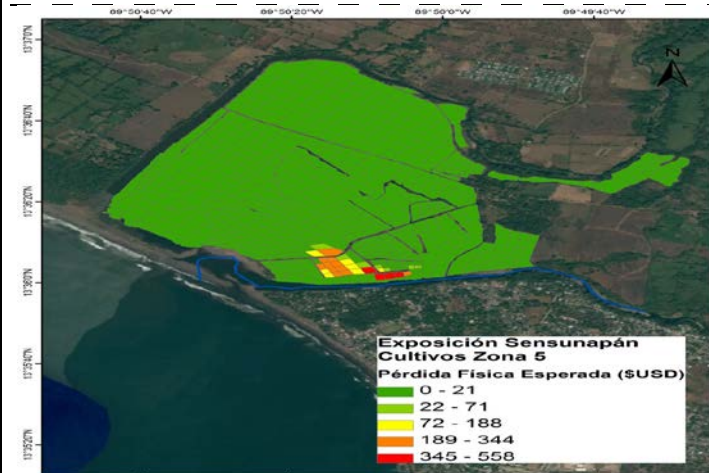


**Cultivos y personas afectadas en el escenario crítico**

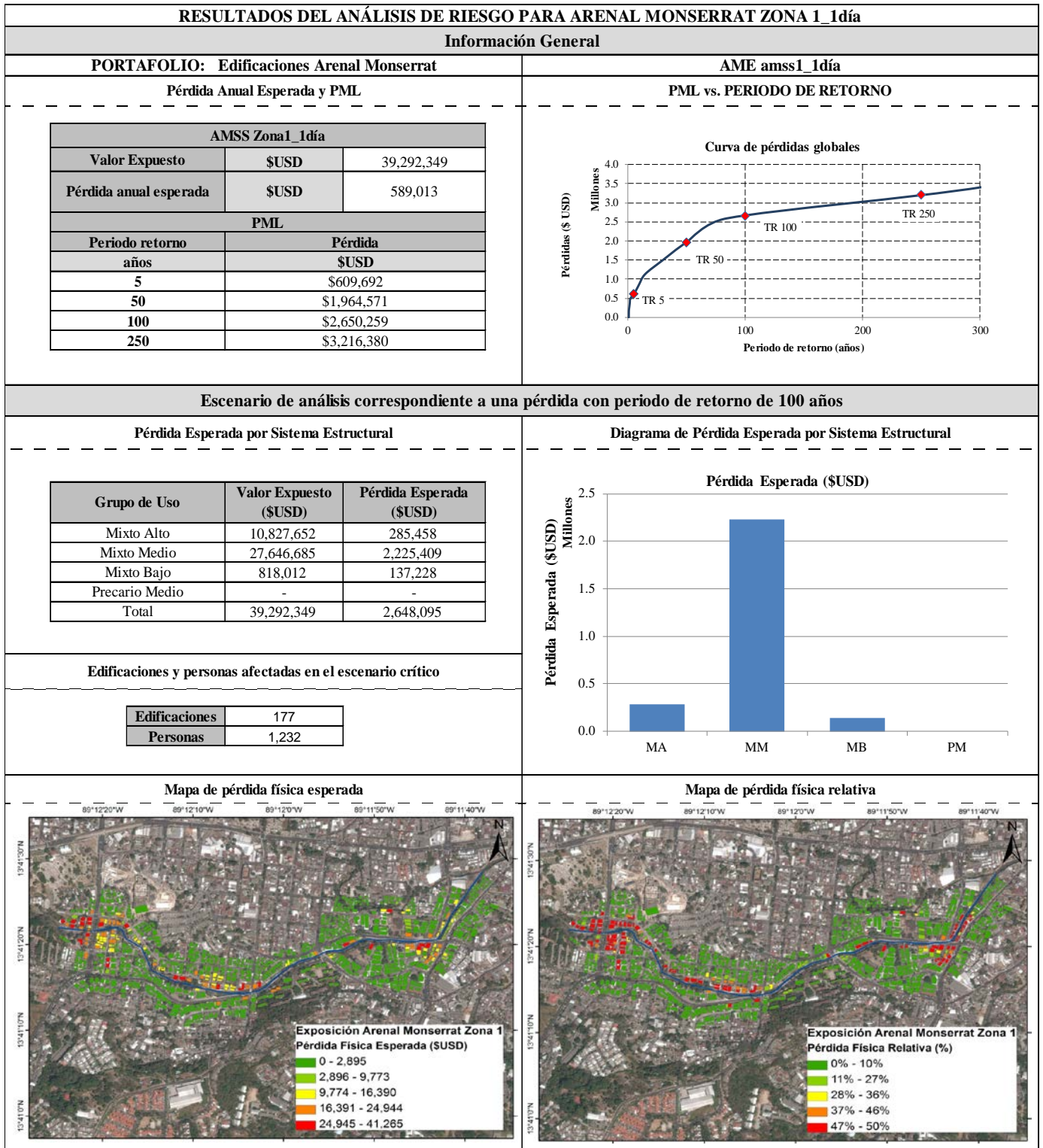
Cultivos	36
Personas	-

**Mapa de pérdida física esperada**

**Mapa de pérdida física relativa**



### 7.3.3 Resultados del análisis de riesgo para cuenca Arenal Monserrat



**RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGO PARA ARENAL MONSERRAT ZONA 2\_1día**

**Información General**

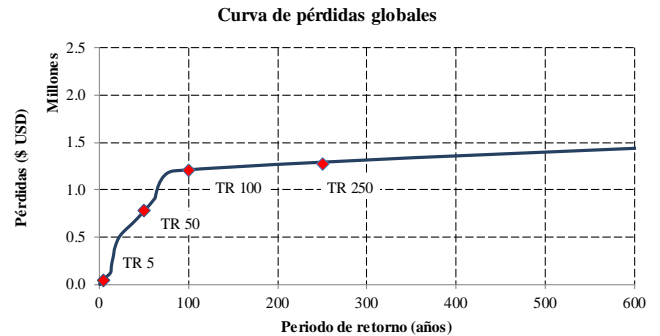
**PORTAFOLIO: Edificaciones Arenal Monserrat**

**AME amss2\_1día**

**Pérdida Anual Esperada y PML**

**PML vs. PERIODO DE RETORNO**

AMSS Zona2_1día		
Valor Expuesto	\$USD	13,847,547
Pérdida anual esperada	\$USD	86,235
PML		
Periodo retorno años	Pérdida \$USD	
5	\$38,865	
50	\$777,133	
100	\$1,207,021	
250	\$1,272,986	

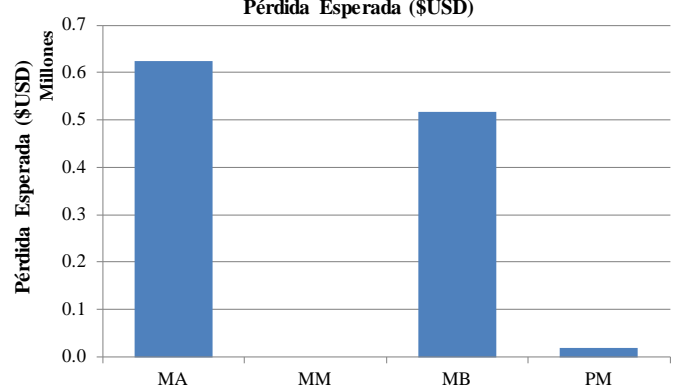


**Escenario de análisis correspondiente a una pérdida con periodo de retorno de 100 años**

**Pérdida Esperada por Sistema Estructural**

**Diagrama de Pérdida Esperada por Sistema Estructural**

Grupo de Uso	Valor Expuesto (\$USD)	Pérdida Esperada (\$USD)
Mixto Alto	9,140,618	625,035
Mixto Medio	-	-
Mixto Bajo	4,648,295	517,683
Precario Medio	58,635	20,074
Total	13,847,547	1,162,792

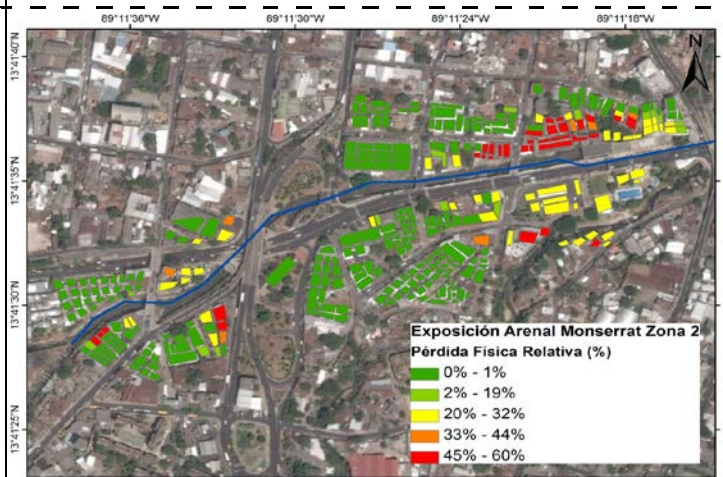
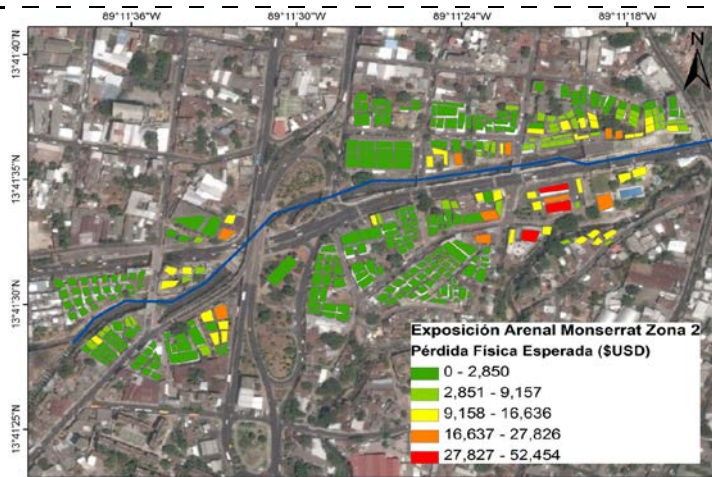


**Edificaciones y personas afectadas en el escenario crítico**

Edificaciones	109
Personas	552

**Mapa de pérdida física esperada**

**Mapa de pérdida física relativa**



**RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE RIESGO PARA ARENAL MONSERRAT ZONA 3\_1día**

**Información General**

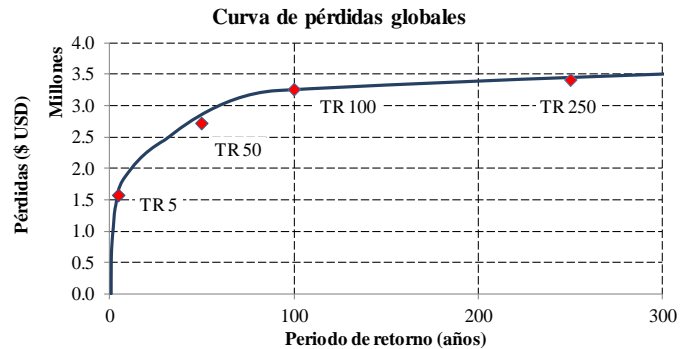
**PORTAFOLIO: Edificaciones Arenal Monserrat**

**AME amss3\_1día**

**Pérdida Anual Esperada y PML**

**PML vs. PERIODO DE RETORNO**

AMSS Zona3_1día		
Valor Expuesto	\$USD	21,391,474
Pérdida anual esperada	\$USD	1,439,453
PML		
Periodo retorno años	Pérdida \$USD	
5	\$1,570,003	
50	\$2,711,469	
100	\$3,249,200	
250	\$3,401,001	

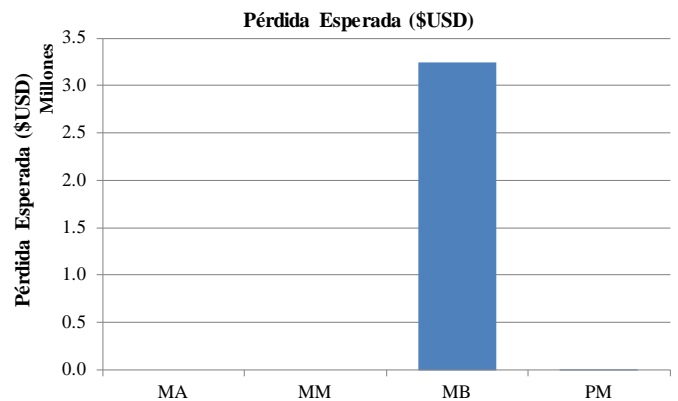


**Escenario de análisis correspondiente a una pérdida con periodo de retorno de 100 años**

**Pérdida Esperada por Sistema Estructural**

**Diagrama de Pérdida Esperada por Sistema Estructural**

Grupo de Uso	Valor Expuesto (\$USD)	Pérdida Esperada (\$USD)
Mixto Alto	-	-
Mixto Medio	-	-
Mixto Bajo	21,370,652	3,241,630
Precario Medio	20,821	4,581
Total	21,391,474	3,246,211

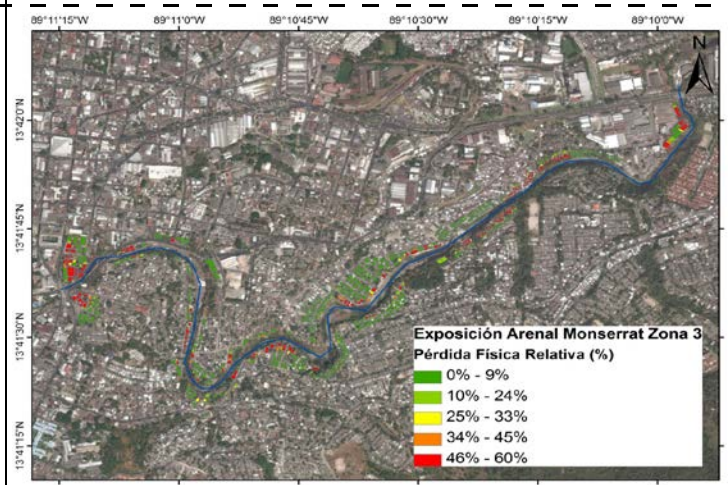
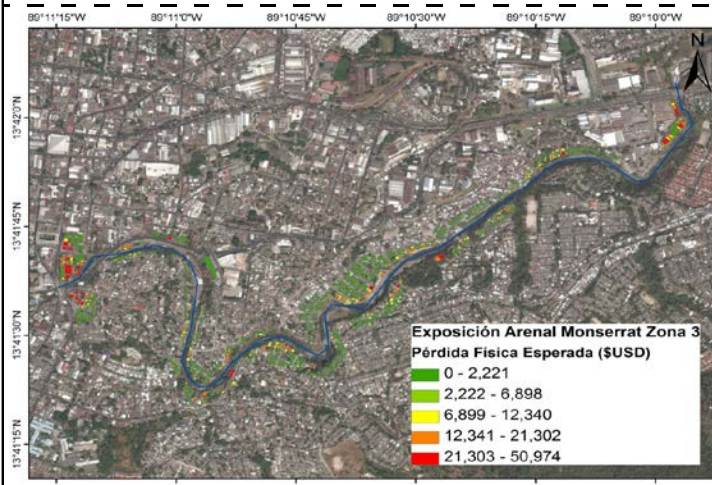


**Edificaciones y personas afectadas en el escenario crítico**

Edificaciones	352
Personas	1,456

**Mapa de pérdida física esperada**

**Mapa de pérdida física relativa**



### 7.3.4 Resumen e integración de resultados del análisis de riesgo

Los resultados anteriores se resumen e integran en el Cuadro 25 para la cuenca del Sensunapán y en el Cuadro 26 para la cuenca del Arenal Monserrat.

**Cuadro 25. Resumen e integración de resultados para las 5 zonas de Sensunapán**

Zona	Valor Expuesto	PAE	PML 250 años	Escenario con una pérdida correspondiente a 100 años de periodo retorno		
	(Miles \$USD)	(Miles \$USD)	(Miles \$USD)	Pérdida Esperada Edif. (Miles \$USD)	Número Edificaciones afectadas	Número de Personas afectadas
1	7,025	400	1,798	1,515	275	749
2	14,031	1,040	2,135	1,980	436	1,024
3	70,969	3,700	12,290	10,068	1,930	4,848
4	423	187	257	232	52	170
5	36,430	98	738	505	69	176
<b>Total</b>	<b>128,878</b>	<b>5,425</b>			<b>2,762</b>	<b>6,967</b>

**Cuadro 26. Resumen y unificación de resultados para las 3 zonas de Arenal Monserrat**

Zona	Valor Expuesto	PAE	PML 250 años	Escenario con una pérdida correspondiente a 100 años de periodo retorno		
	(Miles \$USD)	(Miles \$USD)	(Miles \$USD)	Pérdida Esperada Edif. (Miles \$USD)	Número Edificaciones afectadas	Número de Personas afectadas
1	39,292	589	3,216	2,648	177	1,232
2	13,847	86	1,273	1,162	109	552
3	21,391	1,439	3,401	3,246	352	1,456
<b>Total</b>	<b>74,530</b>	<b>2,114</b>			<b>638</b>	<b>3,240</b>

Con respecto a las zonas de cultivos en la cuenca Sensunapán los valores resultantes son los que se indican en el Cuadro 27.

**Cuadro 27. Resumen y unificación de resultados para las zonas de cultivos en la cuenca Sensunapán**

Zona	Valor Expuesto	PAE	PML 250 años
	(Miles \$USD)	(Miles \$USD)	(Miles \$USD)
4	22	7.2	20.5
5	286	1.0	12.6
<b>Total</b>	<b>308</b>	<b>8.2</b>	



## **8. Curva de excedencia de pérdidas para inundaciones frecuentes**

### **8.1 Marco general y propósito**

La estimación económica del costo de los desastres es una tarea compleja ya que entran en consideración gran cantidad de variables y aspectos a analizar. En términos generales, los costos de los desastres pueden agruparse en costos directos, costos indirectos y efectos macroeconómicos. Los costos directos representan la afectación inmediata y dan cuenta de cambios en el inventario de activos (bienes físicos, inmuebles, edificaciones, materiales y mercancías afectadas). Los costos indirectos representan la afectación económica debido a la imposibilidad de prestar los servicios y beneficios de los bienes afectados. Finalmente los costos macroeconómicos reflejan el cambio en el comportamiento económico de un país o una región luego de la ocurrencia del desastre.

Por otro lado el impacto de desastres frecuentes, tales como las inundaciones periódicas que ocurren en sitios específicos, aunque generan impactos económicos limitados, las pérdidas asociadas son de alta frecuencia y por lo tanto generan afectación importante en el mediano y largo plazo.

Resulta relevante por lo tanto realizar una valoración aproximada de los desastres históricos de los que se tiene conocimiento relacionados con temas de inundación para el Salvador. De acuerdo esto se pretende realizar una evaluación simplificada y práctica de las pérdidas económicas de eventos de inundación menores en el Salvador con base en la cual se puedan generar curvas de excedencia de pérdidas para eventos de inundación frecuentes. En el análisis solo se tienen en cuenta las pérdidas directas las cuales se evalúan mediante interpretación de la información disponible y algoritmos simplificados para la evaluación de las pérdidas económicas. Solo se presenta el análisis a nivel país ya que no hay suficiente información para el nivel regional.

Para el efecto se utiliza la información contenida en la base de datos DesInventar (<http://www.desinventar.org/>), la cual proporciona información de los efectos físicos y pérdidas humanas históricas para los países, en el tiempo y en forma discriminada por tipo de evento tales como sismos, inundaciones, deslizamientos, volcanes, huracanes y otros. Para el presente caso se utiliza únicamente la información relacionada con eventos de inundación.

El Cuadro 28 resume las características de los tipos de eventos más relevantes registrados en la base de datos DesInventar de El Salvador.

**Cuadro 28. Características de los tipos de eventos más relevantes registrados en DesInventar El Salvador**

Evento	Número de eventos	Número de eventos (%)	Periodo de registro	Fuentes relevantes
Sismo	187	11%	1905-2011	Diario Oficial Gobernación, Carlos Cañas estudios sobre terremotos, Diario Oficial ,La Prensa ,Diario del Salvador, El Diario de Hoy, Cañas Dinarte C. Terremotos en El Salv., COEN-Comité de, Colatino Emergencia Nacional, Periódico MAS ,Diario Colatino.
Inundación	852	49%	1900-2012	Diario Oficial Inf. Gobernación, Documentos Goberación, Diario del Salvador, Diario Nuevo, La Prensa,CEPRODE, Web/SNET-Registro Histórico de Inundaciones, La Prensa Gráfica, El Diario de Hoy,Cruz Roja Salvadoreña, COEN-Comité de Emergencia Nacional, MOP-Ministerio de Obras Públicas, Periódico MAS, Web/SNET-Registro Histórico de Inundaciones, MINED-Ministerio de Educación, Vivienda y Desarrollo Urbano/Informe de afectaciones, VMVDU-Vice Ministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano Informe, DGPC-Dirección General de Protección Civil, Web/Ministerio de Gobernación, Web/Diario El Mundo, Diario Co Latino, OIKOS Solidaridad, Asociación de Municipios Los Nonualcos/Informe de afectaciones, Comisión Municipal de Protección Civil de San Pedro Masahuat ,ANTA-Asociación Nacional de Trabajadores Agropecuarios, UNES-Unidad Ecológica Salvadoreña/Consolidado, Geólogos del Mundo El Salvador/Informe de afectaciones, REDES-Fundación Salvadoreña para la Reconstrucción y El Desarrollo/Segundo reporte de monitoreo, Comisión Municipal de Protección Civil de San Pedro Masahuat, ADEMUSAN-Asociación para el Desarrollo de las Mujeres de San Julián, ACUA- Asociación Comunitaria Unidad por el Agua y la Agricultura, FOVIAL-Fondo de conservación Vial/Sexto Informe consolidado de Emergencias, FUNDESA - Fundación para el Desarrollo.
Actividad Volcánica	89	5%	1904-2007	Diario Oficial, La Prensa, Diario del Salvador, Periódicos locales, El Diario De Hoy, Diario El Mundo, Diario Colatino.
Deslizamiento	533	31%	1906-2012	Diario Oficial, La Prensa , Diario el Salvador, Diario Oficial, La Prensa, Diario el Salvador, Diario Nuevo, La Prensa Gráfica, El Diario de Hoy, Fascículo Deslizamientos CEPRODE y otros, COEN-Comité de Emergencia Nacional, SNET-Geólogos del Mundo, Diario el Mundo, Periódico MAS, Municipalidad D.N. de María, DGPC-Dirección General de Protección Civil, MOP-Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano, Comisión Municipal de Protección Civil de Ayutuxtepeque,Ministerio de Gobernación, Web/MOP-Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano/Informe de afectaciones, Web/Ministerio de Gobernación, ASETCA El Salvador.
Huracán	2	0,11%	1974	La Prensa Gráfica.
Sequía	76	4%	1904-2012	Diario Oficial, La Prensa, El Diario de Hoy, La Prensa Gráfica, MAG/CENTA DGSA.
Tsunami	7	0,40%	1902-1964	El Salvador inundaciones e incendios, SNET.
<b>Total</b>	<b>1.746</b>	<b>100%</b>		

Para el caso específico de inundación se presentan las siguientes estadísticas:

**Cuadro 29. Características de los eventos de inundación reportados en DesInventar El Salvador**

<b>Número de eventos reportados</b>	852
<b>Periodo de tiempo</b>	1900 - 2012
<b>Número total de eventos con pérdidas económicas</b>	21
<b>Número total de eventos con información de viviendas afectadas o destruidas</b>	852
<b>Número total de eventos con información de víctimas</b>	852
<b>Pérdidas totales económicas reportadas</b>	9,514,177
<b>Número total de personas afectadas en eventos</b>	664,989
<b>Número medio de eventos por año</b>	2.5

## 8.2 Información para el análisis

El Cuadro 30 presenta la descripción de los principales campos de los registros de las bases de datos DesInventar.

**Cuadro 30. Principales campos en la base de datos DesInventar**

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Fecha inicio	Fecha del evento
Nombre geografía	Localización
Tipo evento	Tipo de Evento
Muertos	Número de personas fallecidas por causas directas. Cuando se dispone de datos oficiales finales se incluye este valor con las observaciones correspondientes, por ejemplo cuando haya diferencias entre las cifras oficialmente aceptadas y las de otras fuentes. Las presunciones sobre muertos, no verificados oficialmente, se registran en el campo -Observaciones de efectos- consignando la fuente de información.
Desaparecidos	Número de personas cuyo paradero a partir del desastre es desconocido. Incluye personas presumiblemente muertas sin evidencias físicas. Los datos de muertos y de desaparecidos son mutuamente excluyentes, por lo tanto no los mezcle.
Heridos, enfermos	Número de personas que resultaron afectadas en su salud o integridad física, sin ser víctimas mortales, por causa directa del desastre. Se deben incluir las personas que sufrieron lesiones y las que quedaron enfermas si se trata de una plaga o epidemia.

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Damnificados	Número de personas que han sufrido grave daño directamente asociado al evento en sus bienes y/o servicios individuales o colectivos. Por ejemplo destrucción parcial o total de su vivienda y sus bienes; pérdidas en cultivos y/o en bodegas, etc. Se deben incluir también personas reubicadas.
Afectados	Número de personas que sufren efectos indirectos o secundarios asociados a un desastre. Corresponde al número de personas, diferentes a damnificados, que sufren el impacto de los efectos secundarios de los desastres por razones como deficiencias en la prestación de servicios públicos, en el comercio, o en el trabajo, o por aislamiento. Si la información aparece por familias, calcular el número de personas según indicadores disponibles.
Evacuados	Número de personas evacuadas temporalmente de sus viviendas, lugares de trabajo, colegios, hospitales, etc.
Reubicados	Número de personas que han sido trasladadas desde sus sitios de vivienda a nuevos emplazamientos permanentes.
Viviendas Destruídas	Número de viviendas arrasadas, sepultadas, colapsadas o deterioradas de tal manera que no son habitables.
Viviendas Afectadas	Número de viviendas con daños menores, no estructurales o arquitectónicos, que pueden seguir siendo habitadas, aun cuando requieran de acciones de reparación o de limpieza.
Valor pérdidas \$	Monto de las pérdidas directas causadas por el desastre en moneda local.
Valor pérdidas USD\$	Equivalente en dólares (USD\$) de las pérdidas en moneda local, según la tasa de cambio de moneda nacional en la fecha de ocurrencia del desastre.
Centros hospitalarios	Número de centros de salud, clínicas, hospitales locales y regionales destruidos y afectados directa o indirectamente por el desastre.
Centros de educación	Número de guarderías, escuelas, colegios, universidades, centros de capacitación, etc. destruidas y afectadas directa o indirectamente por el desastre. Incluye aquellos que han sido utilizados como albergues temporales.
Cultivos y bosques (Ha)	Número de áreas de cultivo, pastizales o bosques destruidas y afectadas. Si la información está en otra medida se deberá convertir a hectáreas.
Ganado	Número de unidades perdidas (bovinos, porcinos, caprinos, avícolas) cualquiera sea el evento (inundación, sequía, epidemia, etc.).
Vías afectadas (m)	Longitud de redes viales destruidas y/o inhabilitadas en metros.

Por otro lado la base de datos incluye una serie de categorías y causas asociadas que se resumen esquemáticamente en el Cuadro 31.

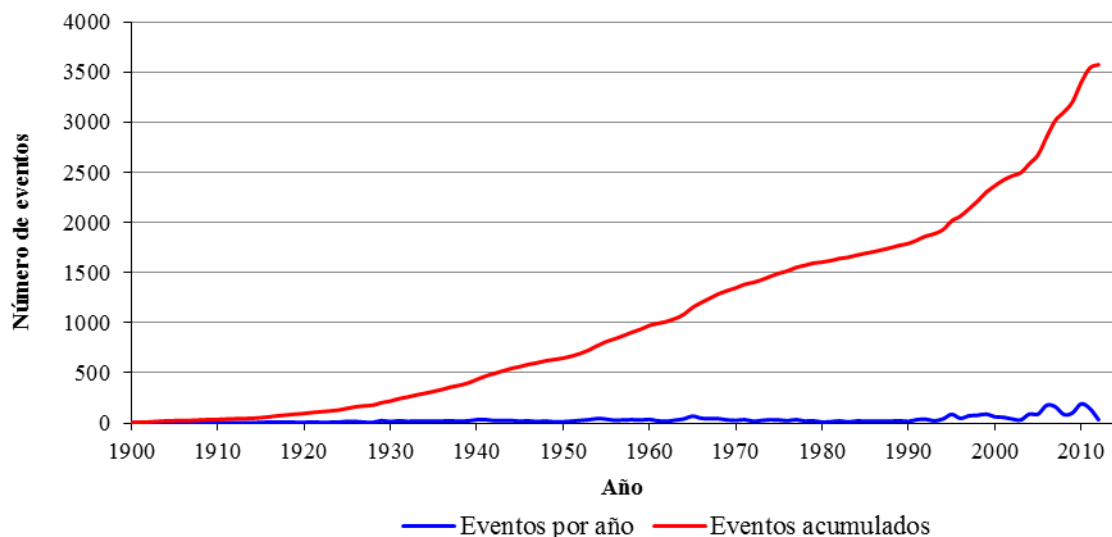
**Cuadro 31. Categorías de eventos y causas asociadas**

Categoría	Eventos incluidos		
Tectónicos	Sismo	Tsunami	
Volcánicos	Actividad Volcánica		
Deslizamientos	Alud	Deslizamiento	
Huracanes	Huracán	Ciclón	
Hidrometeorológicos	Aluvión	Avenida torrencial	Cambio línea de costa
	Granizada	Helada	Inundación
	Lluvias	Marejada	Neblina
	Nevada	Onda fría	Tempestad
	Tormenta eléctrica	Tornado	Vendaval
Sequia	Ola de calor	Sequía	

La base de datos se ha construido con base en la información reportada en eventos históricos y por lo tanto no es completa para todos los periodos de tiempo. En algunos casos se cuenta con eventos desde principios del siglo XX o incluso anteriores. Sin embargo, se generan discontinuidades en los registros, principalmente debidos a la falta de información o al costo de recopilarla. Debido a lo anterior es necesario definir el periodo a procesar, el cual en la mayoría de los casos empieza desde 1980, ya que es a partir de esta fecha que los catálogos comienzan a evidenciar un grado mínimo de completitud. El Gráfico 86, presenta el número de registros por año de la base de datos disponible y el registro de número de eventos acumulado correspondiente.

De acuerdo con esta información el periodo de análisis seleccionado es desde 1970 hasta 2012 para un total de 43 años de registro, dado que desde esta fecha puede considerarse que hay mayor completitud en el registro de información. En este periodo de tiempo la base de datos genera un total de 2,028 eventos individuales a nivel del país con lo cual se obtiene un promedio general de 47 eventos por año.

**Gráfico 86. Número de registros por año para eventos de inundación en El Salvador**



Fuente: DesInventar.net

Del análisis de la información disponible en la base de datos DesInventar se establece que los eventos de inundación de mayor impacto en el país son los que se indican en el Cuadro 32.

**Cuadro 32. Eventos de inundación de mayor impacto registrados entre 1970 y 2012 en DesInventar El Salvador**

Nombre (ID)	Fecha Inicio	Zonas Mayor Impacto	Personas Afectadas	Número Muertos	Viviendas Destruídas	Otros Impactos	Valor Económico Estimado (USD\$)
1992-0063	05/01/1992	Usulután/Usulután	7,000	0	0	875 Viv. afectadas	2,244,375
1999-0110	03/10/1999	San Miguel/ El Transito/ El Borbollón	10,000	0	2,000	Ninguno	20,522,565
2000-0098	09/10/2000	Santa Ana/Metapan	1,750	0	350	Ninguno	3,593,565
2005-0559	13/10/2005	Santa Ana/ Santa Ana	60,000	0	0	1200 Viv. afectadas	3,078,000
2007-0144	21/05/2007	San Miguel/San Miguel/El Brazo	8,000	0	0	1000 Viv. afectadas	2,565,000

### 8.3 Metodología de análisis

#### 8.3.1 Agrupación temporal y espacial

Debido a que los eventos no están agrupados ni espacial, ni temporalmente, se hace necesario establecer unos criterios para agrupar diferentes registros que puedan considerarse como consecuencias de un mismo evento.

Los criterios de agrupación temporal y espacial toman en cuenta que un evento puede ser reportado en diferentes registros separados en el tiempo y el espacio, debido a que se reportan daños en diferentes escalas espaciales (poblaciones, regiones, etc.) y en diferentes fechas. También se debe considerar que una categoría puede desencadenar un evento secundario perteneciente a otra categoría (por ejemplo, un evento sísmico puede ser el detonador de un deslizamiento). Los parámetros espaciales además toman en cuenta el lugar donde ocurrió el evento para agruparlo con registros similares ocurridos en el mismo lugar, o dentro de un radio de acción razonable.

El Cuadro 33 presenta unos criterios de agrupación temporal, que sirven de guía metodológica, la cual debe validarse caso por caso según un análisis riguroso de la base de datos y de las amenazas presentes en cada región. La agrupación espacial se debe establecer en cada caso particular, ya que no hay una metodología única de recopilación de datos. Estos pueden ser obtenidos y almacenados en diversos niveles de administración política. Como criterio general se trata de agrupar los registros en el nivel inmediatamente superior al nivel correspondiente a poblaciones.

**Cuadro 33. Criterios de agrupación temporal**

Causa	Consecuencia	Tiempo transcurrido [días]
Sequia	Sequia	15
Huracanes	Huracanes	5
	Hidrometeorológicos	5
	Deslizamientos	5
Hidrometeorológicos	Hidrometeorológicos	2
	Deslizamientos	2
Deslizamientos	Deslizamientos	1
Tectónicos	Tectónicos	2
	Deslizamientos	3
Volcánicos	Volcánicos	5

La agrupación espacial se da dentro de un nivel de división político-administrativo, en el cual se puedan considerar como consecuencias de un mismo evento diferentes registros. Aunque esta

aproximación tiene sus desventajas, es la forma más sencilla y explícita de realizar la agrupación. Empleando simultáneamente los parámetros de agrupación espacial y temporal se pretende consolidar la información recolectadas en diferentes poblaciones, en un único registro.

En el presente caso se han considerado las causas descritas como Desbordamientos, Inundación, Lluvias y Tempestad en la categoría de inundaciones.

### 8.3.2 Modelo de costos

Para efectos del presente proyecto, la estimación de los costos de los eventos reportados en la base de datos DesInventar incluye únicamente una valoración global indicativa de los efectos directos. No se consideran en el presente análisis los efectos indirectos, ni los efectos macroeconómicos (dado que la correcta evaluación de sus consecuencias, la afectación al flujo de capital o a la economía, requiere un nivel de detalle que escapa del alcance actual y del tipo de información disponible).

El modelo de costos propuesto pretende estimar el mínimo costo del evento o el capital monetario que un gobierno habría requerido para cubrir su responsabilidad fiscal hacia los sectores menos favorecidos de la sociedad (dado que ha permitido la construcción de viviendas en sectores que no son idóneos o mediante el uso de técnicas que no cumplen las reglamentaciones mínimas de seguridad). El modelo planteado no pretende en ningún momento estimar el costo total de los diferentes desastres reportados en la base de datos, ni establecer cifras que puedan compararse con la estimación oficial de costos siguiendo por ejemplo la metodología propuesta por la CEPAL.

Dado que el principal indicador a usar para la valoración económica de los desastres es el número de viviendas (afectadas y destruidas), se propone emplear como valor de reposición, el valor nominal de la vivienda de interés social. No se considera el valor comercial real de los inmuebles impactados, dado que en el concepto empleado de responsabilidad fiscal, consiste en dar solución de vivienda y no reponer lo que existía anteriormente a la ocurrencia del evento (pudiendo ser más o menos costoso). Se supone que otros sectores económicos, dada su mayor capacidad y resiliencia, construyen en lugares más adecuados y menos susceptibles a daños por fenómenos naturales, emplean mejores técnicas, procesos y materiales que cumplen los códigos normativos de construcciones y que adicionalmente tienen acceso al mercado de seguros, por lo que no necesitarían en principio la ayuda del gobierno local.

### 8.3.3 Suposiciones básicas para el análisis

Con el fin de poder plantear un modelo consistente, aunque solamente con carácter indicativo, para la valoración de los eventos contenidos en la base de datos se plantean una serie de supuestos e hipótesis que deben quedar muy claramente establecidas para efectos de la interpretación y aplicación de los resultados del análisis.



Para efectos del presente análisis, la evaluación económica de las pérdidas producidas por cada uno de los eventos se basa en la responsabilidad fiscal del gobierno, en el supuesto caso que el mismo tenga por responsabilidad constitucional o administrativa, el remplazo de las viviendas afectadas de los sectores más vulnerables de la población, con una vivienda básica de interés social.

Por otro lado, considerando que la base de datos DesInventar tiene un extenso registro de eventos, los cuales corresponden en su gran mayoría a eventos menores que se producen por lo general en zonas de alta susceptibilidad y por lo tanto corresponden en general a zonas rurales o periféricas de las ciudades, se presume que dichos eventos afectan principalmente a los sectores más vulnerables de la sociedad, lo cual sería compatible con el tipo de valoración que se pretende realizar.

Se propone por lo tanto realizar una valoración de cada uno de los eventos empleando un valor indicativo de reposición fiscal de cada unidad el cual se aplicaría de manera razonable a la información referente a número de viviendas afectadas. Otras variables como centros de salud, escuelas y vías, aunque no tienen asociada una descripción explícita que permita identificar el tamaño del elemento original, ni el nivel de afectación se emplean en el análisis de manera genérica, de modo que se pueda obtener una mejor estimación de la responsabilidad fiscal.

Las consideraciones y los supuestos básicos del análisis son los siguientes:

- La estimación del impacto económico de los eventos se basa en las variables disponibles en la base de datos. En el presente caso se consideran únicamente viviendas afectadas, las viviendas destruidas, centros de salud y escuelas.
- No se consideran la correlación entre la afectación humana y los daños o afectación a las viviendas.
- Otras variables disponibles en la base de datos, que cuantifican una afectación física no se han utilizado debido a la dificultad para establecer una metodología de evaluación consistente y sustentable. Entre las que se encuentran cultivos, bosques y ganado. Otras variables que solo indican que se presentó una afectación, pero no cuantifican la magnitud de la misma, también se han descartado en la presente evaluación económica. Afectación a acueductos, saneamiento, comunicaciones, vías y otras tampoco han sido tenidas en cuenta en el análisis.
- Se emplea como valor base para el costo de una vivienda un valor de USD\$ 10,260, el cual se obtuvo por medio del promedio ponderado del costo de las viviendas expuestas en las cuencas Sensunapán y Arenal Monserrat, con respecto a la proporción de cada uno de

los tipos de viviendas encontrados en estas cuencas. Dicho valor se considera un estimativo adecuado para la estimación económica del costo de viviendas de interés social.

- Se usó un costo de reposición de cultivos de USD\$850/Ha, aunque la variable da cuenta indiferentemente del tipo de cultivo. Dicho valor fue tomado de los registros de pérdidas de cultivos registrados en el DesInventar.
- El valor de una escuela se obtuvo de los registros de exposición en las cuencas Sensunapán y Arenal Monserrat, teniendo en cuenta un costo de USD\$300/m<sup>2</sup>, y un área promedio de 1500 m<sup>2</sup>.
- Los costos por m<sup>2</sup> de centros de educación y centros hospitalario se suponen iguales. Los centros hospitalarios se suponen de 48 m<sup>2</sup> considerando que para el presente caso las áreas de análisis corresponden principalmente a zonas de estratos socio-económicos bajos (UNISDR. GAR, 2013).
- No se correlaciona la afectación humana con daños en viviendas.
- No se consideró la afectación en vías.
- El porcentaje de daño para viviendas destruidas será del 100% (aunque una vivienda puede presentar un daño un poco inferior después de un desastre, usualmente por condiciones de seguridad y costos de reparación esta se toma por destruida después del 75% de daño).
- El porcentaje de daño para viviendas afectadas se asume en 25%.
- Los costos básicos estimados de viviendas no incluyen el valor del terreno.
- Se excluyen del análisis los costos asociados a efectos indirectos tales como demolición, remoción y limpieza, albergues temporales, reparaciones, servicios y otros.
- Se excluyen del análisis el costo por daños en los contenidos especiales tales como equipos o contenidos con costos representativos.

De acuerdo con lo anterior, el Cuadro 34 resume los principales supuestos para el modelo de estimación del valor fiscal indicativo de los eventos de la base de datos.

**Cuadro 34. Modelo de costos**

	<b>Viv. Afectadas</b>	<b>Viv. Destruídas</b>	<b>Centros Educativos</b>	<b>Centros de Salud</b>	<b>Cultivos (Ha)</b>
Afectación [%]	25%	100%	100%	100%	100%
<b>Costo por unidad [USD\$ /unidad]</b>	<b>2,565</b>	<b>10,260</b>	<b>450,000</b>	<b>14,400</b>	<b>850</b>

#### 8.4 Curva de excedencia de pérdidas por inundaciones

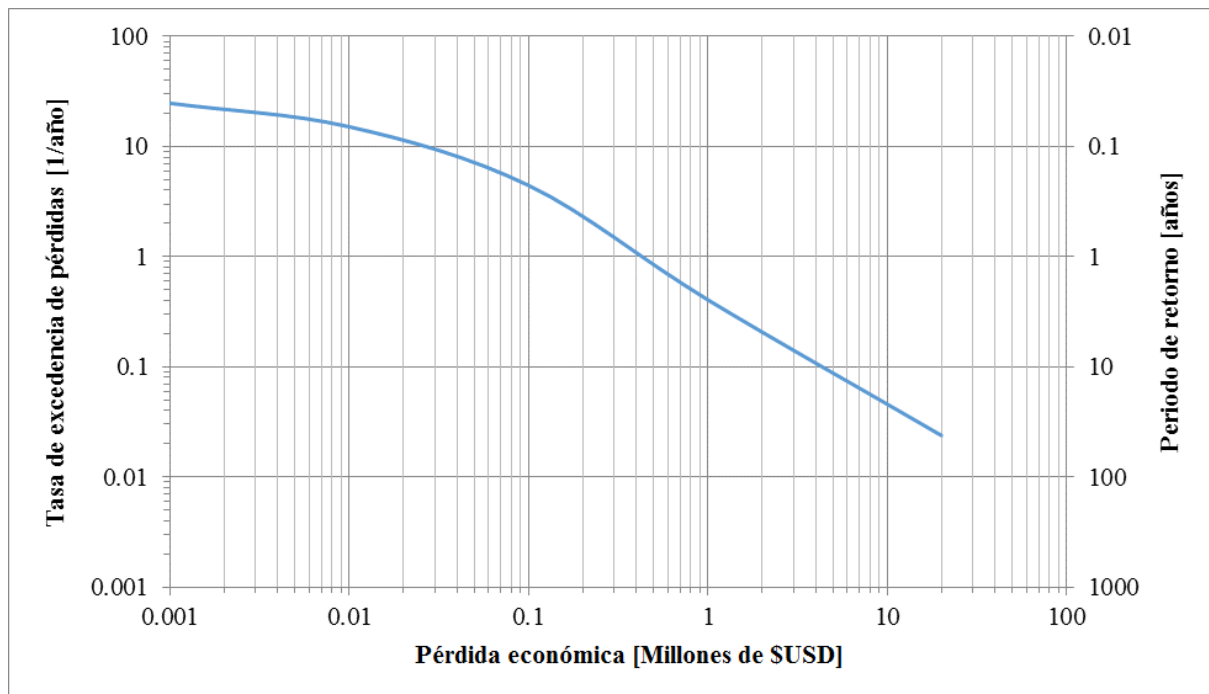
El anterior procedimiento permite construir una base de datos consolidada de eventos de acuerdo con lo siguiente:

- Número total de eventos reportados con información de pérdidas: 2,028
- Periodo de tiempo de análisis: 43 años
- Número medio de eventos por año: 47
- Pérdidas económica totales estimadas: USD\$ 119 millones
- Pérdida media estimada por evento: USD\$ 59 mil

Por otro lado, las estadísticas contenidas en la base de datos luego de la estimación de las pérdidas económicas permiten realizar un análisis de frecuencia de excedencia de diferentes niveles de pérdidas económicas asociadas con la valoración fiscal indicativa realizada a nivel del país. Este análisis permite generar la curva de excedencia de pérdidas para eventos de inundación frecuentes en el Salvador en la cual se puede establecer el número de veces promedio al año con la cual cada nivel de pérdida tiende a superarse, de acuerdo con el registro histórico.

El Gráfico 87 presenta la curva de excedencia de pérdidas por inundación para el Salvador con base en las hipótesis y suposiciones indicadas anteriormente. Esta figura se presenta en escala logarítmica. En el eje horizontal se relaciona el nivel de pérdidas económicas y en el eje vertical se indica la tasa anual de excedencia o sea el número promedio de veces que cada uno de los valores del eje horizontal se excede. El inverso de la tasa anual de excedencia corresponde al periodo de retorno promedio en años, valor que se indica en el eje de la derecha.

**Gráfico 87. Curva empírica de excedencia de pérdidas por eventos frecuentes de inundación en El Salvador**



La información disponible permite por otro lado estimar la pérdida anual promedio para el periodo de observación, la cual se encuentra mediante integración directa de la curva de excedencia de pérdidas. El valor de pérdida anual promedio que resulta del análisis del gráfico anterior es de USD\$ 3 millones de dólares aproximadamente. Este valor no considera las pérdidas asociadas a escenarios catastróficos, que para el presente caso corresponde a eventos con periodos de retorno superiores a unos 50 años.

Con respecto al producto interno bruto anual del país esta pérdida anualizada corresponde el 0.2% (PIB para Salvador año 2011 = USD\$ 45.15 mil millones. Fuente: [www.indexmundi.com](http://www.indexmundi.com)).

## 9. Interpretación de resultados, conclusiones, recomendaciones

### 9.1 Interpretación de resultados y conclusiones

Los análisis realizados y los resultados obtenidos permiten establecer las siguientes conclusiones:

- Las dos cuencas representativas analizadas en el marco del presente estudio abarcan alrededor del 13 % del área del país. La cuenca del río Sensunapán (8% del área total del país) incluye gran cantidad de tierras fértiles y zonas cultivadas expuestas a lo largo de toda la cuenca. Por su parte en la cuenca del río Arenal Monserrat (con un área del orden de 5.1% del área del país) se ubica más del 24 % de la población total del país, atravesando una parte importante de la ciudad de San Salvador, la capital del país y su ciudad más poblada.
- El análisis de zonas potencialmente inundables en cada una de las cuencas indica lo siguiente:
  - o Cuenca Sensunapán: tiene un área del orden de 0.54 km<sup>2</sup> bajo riesgo por inundación, en la que se encuentran del orden de 4,000 edificaciones valoradas en unos USD\$ 128 Millones con cerca de 24,742 personas expuestas y del orden de 194 Hectáreas de cultivos expuestas que se valoran aproximadamente en USD\$ 308,000.
  - o Cuenca de Arenal Monserrat: tiene un área del orden de 0.21 km<sup>2</sup> bajo riesgo por inundación, en la que se encuentran alrededor de 2,147 edificaciones valoradas en unos USD\$ 74.5 Millones y con cerca de 14,000 personas expuestas.
- El análisis de riesgo indica las siguientes cifras aproximadas:
  - o Cuenca Sensunapán: pérdida anual esperada en el orden de USD\$ 5.4 Millones, pérdida máxima probable (PML para 250 años de periodo de retorno) en el orden de los USD\$ 12.3 Millones.
  - o Cuenca Arenal Monserrat: pérdida anual esperada en el orden de USD\$ 2.1 Millones, pérdida máxima probable (PML para 250 años de periodo de retorno) en el orden de los USD\$ 3.4 Millones.
- Los escenarios críticos de inundación analizados corresponden a eventos que generan una pérdida económica con un periodo de retorno de 100 años (de la curva de PML). El análisis de dichos escenarios indica lo siguiente:
  - o Cuenca Sensunapán: escenario crítico de riesgo en la Zona 3, que corresponde a una lluvia concentrada en la cuenca en un lapso de duración

de un (1) día, un periodo de retorno de 50 años y una profundidad de precipitación máxima espacial de 343.92 mm durante el día del evento; pérdidas económicas esperadas del orden de USD\$ 10 Millones en la cuenca; un total esperado de 5,000 persona afectadas, un total de predios afectados del orden de 710 y un total de 450 destruidos.

- Cuenca Arenal Monserrat: escenario crítico de riesgo en la Zona 3, que corresponde a una lluvia concentrada en la cuenca en un lapso de duración de un (1) día, un periodo de retorno de 200 años y una profundidad de precipitación máxima espacial de 308.16 mm durante el día del evento; pérdidas económicas esperadas del orden de USD\$ 3.2 millones en la cuenca; un total esperado de 1,456 personas afectadas, un total de edificaciones afectadas del orden de 352 y un total de 51 edificaciones destruidas.
- Las zonas críticas desde el punto de vista de riesgo por inundaciones son la Zona 3 de la cuenca Sensunapán y la Zona 3 de la cuenca del Arenal Monserrat. Es allí donde se deben concentrar los esfuerzos para la prevención y mitigación en una primera fase de posibles intervenciones para la reducción del riesgo.
- El riesgo por inundación en cultivos para la cuenca Sensunapán es relativamente bajo. Para un valor expuesto aproximado de cultivos en zonas susceptibles a inundación del orden de USD\$ 300,000 se tiene una pérdida anual esperada en el orden de USD\$ 8,200 y una pérdida máxima probable de USD\$ 20,000. No es un riesgo significativo en comparación al riesgo de las viviendas en las zonas críticas.
- El análisis de las pérdidas económicas directas estimadas para los eventos de inundación de alta frecuencia en el país mediante la base de datos DesInventar permite establecer las siguientes conclusiones:
  - En la base de datos DesInventar se han reportado 2,028 eventos de inundación en un periodo de 43 años con un valor total de pérdidas estimadas en USD\$ 119 millones.
  - En el país se han presentado históricamente un promedio de unos 47 eventos al año con pérdidas económicas hasta de unos USD\$ 20.5 millones en los eventos más críticos.
  - El promedio de pérdidas por evento es de USD\$ 59 mil.
  - Las pérdidas económicas se superan aproximadamente con la siguiente frecuencia:
    - Pérdidas de USD\$400,000 cada año en promedio

- Pérdidas de USD\$ 4,000,0000 cada 10 años en promedio
- Pérdidas de USD\$20,000,000 cada 40 años en promedio

## 9.2 Limitaciones en las evaluaciones analíticas

Los análisis y evaluaciones de amenaza, vulnerabilidad y riesgo que se presentan deben utilizarse con cautela ya que presentan limitaciones y restricciones debido al nivel de resolución de la información disponible y a las incertidumbres del análisis, de lo cual debe ser consciente el usuario final para efectos de poder dar un uso adecuado y consistente a los resultados obtenidos teniendo en cuenta el tipo de análisis realizado, el tipo y calidad de datos empleados, el nivel de resolución y precisión utilizado y la interpretación realizada.

En consecuencia es importante señalar lo siguiente:

- Los modelos utilizados en los análisis tienen simplificaciones y supuestos para facilitar el cálculo que el usuario debe conocer debidamente. Éstas están descritas en detalle en los informes técnicos respectivos (ver referencias)
- Los análisis se han desarrollado con la mejor información disponible que presenta limitaciones en su confiabilidad y su grado actualización. Es posible que exista información mejor y más completa a la cual no se tuvo acceso.
- La información utilizada y los resultados de los análisis de amenaza, exposición y riesgo tienen una asociado un nivel de resolución según las unidades de análisis utilizadas, lo que se explica en el documento descriptivo del ejemplo.
- El uso que el usuario final le dé a la información no compromete a los autores de los estudios realizados, quienes presentan los casos de aplicación como ejemplos ilustrativos de lo que es factible hacer si se cuenta con información confiable con la precisión adecuada.
- Es responsabilidad del usuario comprender el tipo de modelo utilizado y sus limitaciones, la resolución y calidad de los datos, las limitaciones y suposiciones de los análisis y la interpretación realizada con el fin de darle a estos resultados un uso adecuado y consistente.

## 9.3 Recomendaciones para la gestión del riesgo por inundación

La gestión del riesgo involucra diferentes elementos entre los cuales pueden mencionarse la identificación y cuantificación del mismo y las diferentes opciones de prevención y

mitigación que incluyen entre otras, medidas estructurales y no estructurales de reducción del riesgo, las medidas de protección financiera y la elaboración de planes de atención de emergencias y contingencias.

Los resultados de la valoración del riesgo que se presentan en el informe son la base para llevar a cabo una serie de acciones tendientes a reducir el impacto de los desastres en las cuencas estudiadas con base en lo cual se puede elaborar un plan integral de reducción del riesgo de la cuenca. En este numeral se dan algunas recomendaciones sobre las medidas de prevención y mitigación más importantes que deben evaluarse para la realización de un plan como el mencionado.

Estas aplicaciones y recomendaciones deben ser evaluadas e interpretadas por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales MARN, con el fin de realizar planes de implementación de las opciones que considere prioritarias y relevantes de acuerdo con su plan de acción en el mediano y largo plazo.

#### 9.3.1 Identificación del riesgo

El proceso de identificación del riesgo debe abarcar la identificación tanto de elementos expuestos, amenazas y vulnerabilidades asociadas a cada una de ellos. Los Capítulos 4 a 7 de este informe ilustran de manera detallada la metodología propuesta para la evaluación de amenazas, exposición, vulnerabilidad y riesgo por inundaciones con aplicación específica a varios casos en cuencas representativas de El Salvador. La plataforma CAPRA se convierte en un elemento fundamental para organizar y avanzar en la identificación del riesgo a nivel país. Los principales productos que deben obtenerse en este proceso son los siguientes:

- Información (formatos .AME) y mapas de amenaza de lluvias y por inundaciones en cada una de las zonas críticas.
- Mapas de amenaza probabilista por inundaciones para diferentes periodos de retorno.
- Bases de datos de elementos y componentes de infraestructura expuestos en las zonas susceptibles de inundación.
- Funciones de vulnerabilidad para los tipos constructivos representativos del país y para los componentes de infraestructura en zonas susceptibles.
- Parámetros que permiten cuantificar el riesgo como los presentados en el este estudio.
- Mapas de riesgo que permiten visualizar la distribución geográfica del riesgo.



### 9.3.2 Zonificación de riesgos por inundación

Uno de los objetivos del análisis de riesgo es la zonificación de los mismos desde el punto de vista geográfico lo cual permite plantear estrategias para la definición del uso del suelo y la reducción de los desastres. Usualmente las zonas de riesgo por inundaciones se pueden clasificar en alguna de las siguientes tres categorías:

- Zonas de riesgo Aceptable
- Zonas de riesgo Mitigable
- Zonas de riesgo No mitigable

En cada una de estas zonas se especifican parámetros de intensidad de la amenaza y valores indicativos del nivel de riesgo. También es común acudir al análisis beneficio-costos de opciones de intervención antes de calificar una zona como riesgo por inundación no mitigable. Usualmente se proponen diferentes tipos de medidas de intervención para la reducción del riesgo dependiendo de la clasificación de cada zona, proponiendo en los casos críticos programas de reubicación y cambio de uso del suelo.

Como resultado de este proceso se generan mapas de zonificación de riesgos que se oficializan en los planes de ordenamiento territorial.

### 9.3.3 Prevención y mitigación del riesgo por inundación

Con base en la información y los resultados obtenidos del análisis de riesgo es posible el planteamiento de programas a corto, mediano y largo plazo para la prevención y mitigación del riesgo por inundaciones. Las medidas de prevención y/o mitigación del riesgo pueden ser estructurales (obras civiles) o no estructurales (normas, programas especiales).

Dentro de las medidas estructurales para la reducción del riesgo pueden considerarse la construcción y operación de presas y reservorios, programas para el desarrollo operación y manejo de cuencas, mejoramiento de cauces, aumento de la capacidad de flujo mediante la construcción de terraplenes o jarillones, planicies de inundación controladas, canales de flujo de exceso y otros.

Las medidas no estructurales (prácticas para el manejo de planicies inundables) incluyen generalmente medidas de regulación y control del uso de la tierra dentro de la planicie de inundación y todos los aspectos relacionados con reubicación de viviendas e infraestructura localizadas en zonas de Alto Riesgo No Mitigable, la regulación de usos del suelo, planes de ordenamiento territorial, el fortalecimiento institucional, programas de mantenimiento y limpieza de los cauces y sistemas de drenaje, planes de monitoreo y sistemas de alerta, planes de emergencia y contingencia, programas educativos y de divulgación y organización comunitaria, entre otras.

#### 9.3.4 Sistemas de monitoreo y alarma en El Salvador

Los sistemas de monitoreo y alarma se convierten en el caso del Salvador en un instrumento clave que permite la disminución del riesgo especialmente relacionado con el impacto social. El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales a través de la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA), durante los últimos años ha dedicado mucho esfuerzo en desarrollar actividades orientadas a reducir las pérdidas y daños a nivel nacional en los sitios de mayor riesgo, fortaleciendo las capacidades técnicas de su personal, invirtiendo en el equipamiento para mejorar el monitoreo de las amenazas y desarrollando Sistemas de Alerta Temprana (SATs) para diferentes amenazas, como deslizamientos, tsunami, inundación, erupción volcánica, etc. En la actualidad El Salvador cuenta con 20 SATs para la amenaza de inundaciones en las cuencas de los principales ríos del país, y está en proceso de actualización y ampliación a otras cuencas.

#### 9.3.5 Protección financiera

El Estado es responsable de la reconstrucción de los inmuebles públicos o bienes de la colectividad y por lo tanto es tomador de riesgo en nombre de la sociedad. Por otro lado también es responsable de las pérdidas e impactos que se pueden presentar en la población de bajos recursos económicos que no cuenta con recursos financieros para enfrentar una eventual situación de desastre. De acuerdo con esto, el estado debe contar con una estrategia de protección financiera que le permita no solo atender las emergencias sino contar con los recursos necesarios para los programas de reubicación y/o reconstrucción. Dentro de las diferentes opciones e instrumentos disponibles para establecer una estrategia óptima de protección financiera se encuentran los siguientes: fondos de reservas para atención de emergencias y/o reconstrucción, transferencia del riesgo, préstamos contingentes, ayudas y donaciones, nuevos impuestos, reasignaciones presupuestales, créditos externos y otros.

#### 9.3.6 Planes de contingencia y atención de emergencias

El desarrollo de los planes de contingencia se basa en los resultados obtenidos del análisis de riesgos a través de las situaciones o eventos que representan los riesgos más relevantes para la seguridad de la población, el ambiente o los elementos expuestos. Por lo tanto, el objetivo general los planes de contingencia es contar con información oportuna y con la formulación de procedimientos o protocolos de reacción o respuesta que cada entidad debe seguir frente a las posibles situaciones críticas o de emergencia que se pueden presentar, de acuerdo con el análisis de riesgos realizado con anterioridad.

Las emergencias relacionadas con inundaciones se caracterizan por la afectación directa a componentes de infraestructura y a la población y son causadas por una situación o evento, usualmente inesperado, interno o externo que requiere de una reacción inmediata con el fin de minimizar el impacto mismo en la población, el número de víctimas, heridos o personas

afectadas, en los componentes de infraestructura, en las zonas productivas o en el medio ambiente. Esto con el fin de restablecer la normalidad en la zona afectada a la mayor brevedad posible actuando en forma conjunta o coordinada con las instituciones gubernamentales, los medios de comunicación y la misma comunidad.

## 10. Referencias

- ASTER GDEM. (2013). *ASTER GDEM - NASA*. Obtenido de <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>
- Cardona, O. D., Ordaz, M. G., Marulanda, M. C., Carreño, M. L., & Barbat, A. H. (2010). Disaster risk from a macroeconomic perspective: a metric for fiscal vulnerability evaluation. *Disasters*, 34(4), 1064-1083.
- CEPAL. (2003). *Manual para la evaluación del impacto socioeconómico y ambiental de los desastres*.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. International Editions: McGraw-Hill.
- CONAGUA. (2011). *Manual para el control de inundaciones. México D.F.* Obtenido de <http://cenca.imta.mx/pdf/manual-para-el-control-de-inundaciones.pdf>
- DesInventar. (2013). *DesInventar Disaster Information Management System, Version 9.15*. Inventario de Desastres El Salvador (1900-2012). Obtenido de <http://online.desinventar.org/desinventar/#SLV-20120604210329>
- Dirección General de Estadística y Censos. (2008). *VI Censo de Población. V Vivienda 2007*. San Salvador: Ministerio de Economía.
- EM\_DAT. (2014). *Disaster, EM\_DAT: The OFDA/CRED International. Brussels, Belgium: Université Catholique de Louvain*. Obtenido de [www.emdat.net](http://www.emdat.net)
- ERN América Latina. (2009a). *CAPRA: Central American Probabilistic Risk Assessment*. WB Group, IADB, UN\_ISDR, CEPREDENAC.
- ERN América Latina. (2009b). *Tomo I. Metodología de Modelación Probabilista de Riesgos Naturales. Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales y Selección*. CEPREDENAC, ISDR, IDB, GFDRR, WB.
- ERN Evaluación de Riesgos Naturales. (2011). *Tutorial ERN-Inundación*. México D.F.: ERN - Ingenieros Consultores S.C.
- IFRCRCS. (2000). *Risk Reduction. Disaster Preparedness Training Programme*. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies.
- Kirpich, Z. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10, 10.

- Michele, F., Aawa, G., Gero, M., Willis, F., Paul, B., Unibristol, N., Ihe, B. T. (2011). Critical review of non structural measures for water related risks. *Kulturisk Project*, 31, 1-42.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2012a). Escenarios de riesgo: Amenaza por inundación. *Cuenca alta del río Acelhuate: Arenal Monserrat, Arenal Mejicanos, Arenal Tutunichapa, Quebrada El Garrobo*. San Salvador, El Salvador: Dirección General del Observatorio Ambiental.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2012b). Escenarios de riesgo: Amenaza por inundación. *Región hidrográfica: Sonsonate - Banderas*. San Salvador, El Salvador: Dirección General del Observatorio Ambiental.
- Mockus, V. (1957). Use of storm and watershed characteristics in syntetic unit hidrograph analysis and application . *U.S Soil Conservation Service*.
- Natural Resources Conservation Service. (2007). Part 630. Hydrology National Engineering Handbook. Chapter 16 Hydrographs. En USDA. USDA.
- Pappenberger, F., & Matgen, P. (2006). Influence of uncertain boundary conditions and model structure on flood inundation predictions. *Advances in Water Resources*, 29(10), 1430-1449.
- Potosme, E. C., Castro, M., Ibarra, J., Blanco, M., Herrera, M., Montes, E., . . . Saavedra, C. (2005). *Inundaciones Fluviales. Mapas de Amenazas. Recomendaciones Técnicas Para su Elaboración (Proyecto MET-ALARN)*. Managua, Nicaragua: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE).
- Rivas Gallont, E. (24 de Julio de 2011). *La Prensa Gráfica*. Obtenido de Ayudemos a Un Techo para mi País: <http://www.laprensagrafica.com/opinion/editorial/207095-ayudemos-a-un-techo-para-mi-pais.html>
- Techo. (2013). *Un Techo para mi País*. Obtenido de El Salvador: <http://www.techo.org/paises/elsalvador/>
- UNISDR. (2011). *2011 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction: Revealing Risk, Redefining Development*. United Nations.
- UNISDR. (2013). *GAR13: Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. Geneva, Switzerland: ISDR, United Nations.
- USDA. (1986). *Urban hydrology for Small Watersheds. TR-55*.