

Análisis hidrológico de la cuenca del río Sensunapán, como alternativa para el fortalecimiento de la gestión de riesgos y reducción de la vulnerabilidad, en el departamento de Sonsonate, El Salvador

Ramos Peñate, JH

Estudiante Tesista

Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador.

Correo electrónico: Heriberto.penhate@gmail.com

Villalta Rodríguez, CA

Docente Director

Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente,

Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador.

Correo electrónico: carlos_villalta@yahoo.com

Hernández Martínez, MA

Docente Director

Escuela de Posgrados y Educación continua

Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador.

Correo electrónico: hernandez_mhm@yahoo.com

Resumen

El presente estudio se realizó en la cuenca del río Sensunapán, ubicada en el departamento de Sonsonate; El Salvador, la fase de campo se ejecutó en noviembre del 2015 y tuvo objeto de estudio analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Sensunapán, utilizando herramientas del Sistema de Información Geográfica (SIG). El proceso metodológico inició con la delimitación de las microcuencas hidrográficas pertenecientes al río Sensunapán, a partir de mapas a escala 1:25,000 del Centro Nacional de Registros (CNR); determinándose además las características morfométricas correspondientes. El análisis biofísico e hidrológico de la cuenca se llevó a cabo por medio de la clasificación hidrológica propuesta por el Servicio de Conservación de Suelos. Se determinó el coeficiente de escorrentía ponderado para toda la cuenca y la parte alta de la misma, posterior a establecer el análisis biofísico. El tiempo de concentración se determinó por medio de la fórmula de Kirpich. Para los caudales de diseño de la cuenca, se establecieron la intensidad media de la lluvia a través del registro histórico de las estaciones hidrométricas de los municipios de Chalchuapa, Juayúa, Apaneca, Izalco y Acajutla; las cuales poseen datos de intensidad, duración y frecuencia; también se tomaron como referencia para el cálculo de los caudales, periodos de retorno de 02, 05, 10, 15 y 25 años, con una duración de 360 minutos para toda la cuenca y 150 minutos para la parte alta de la misma. La modelación hidráulica se realizó con el software HEC – RAS 4.1.0, el cual permitió calcular para las diferentes configuraciones de caudales en cada una de las secciones transversales a lo largo de los dos tramos ubicados en las comunidades Vega del Río y El Palmar; valores simulados de los niveles de agua, profundidades de flujo y velocidades, entre otras variables. La simulación se realizó considerando el “tramoalto” desde la comunidad El Palmar (Cód.: 1269.804), hasta el “tramobajo” ubicada en la comunidad Vega del Río (Cód.: 10.30199).

El régimen del flujo en la sección transversal de la comunidad El Palmar, fue de carácter sub crítico, con una tendencia creciente del número de Froude con valores de 0.32, 0.43, 0.48, 0.51 y 0.55, para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15 y 25 años; indicando de esta manera que las velocidades del flujo son menores, pero su tirante es mayor; es decir, que el flujo viaja por su propio peso; sin embargo, el régimen del flujo en la sección transversal correspondiente a la comunidad Vega del Río, fue de carácter crítico, con un número de Froude de 1.13, el cual fue el mismo para todos los periodos de retorno antes mencionados, de esta manera, que se está ante una situación en donde se generan las condiciones para que se produzca la turbulencia del flujo y con ello, un aumento de la velocidad del caudal provocando mayor erosión del cauce y socavación de las zonas habitadas. Desde el punto de vista hidrológico, la parte alta de la cuenca posee una condición hidrológica buena, conformada por áreas de cultivos de café y bosques, y un tipo de suelo cuyas propiedades físicas con tasas moderadas de infiltración y transmisión de agua, definen una condición de moderado potencial de escorrentía; sin embargo, los caudales de diseño bajo estas características biofísicas, indican una amenaza, debido a las características de los asentamientos humanos en la parte baja de la cuenca. Las características del flujo del cauce del río Sensunapán a la altura de la comunidad Vega del Río, presenta un alto grado de capacidad erosiva, significando susceptibilidad a socavaciones debido a la velocidad que el flujo posee en ese sitio, representado esto en un incremento de la vulnerabilidad de la comunidad.

Palabras clave: Sensunapán, análisis hidrológico, modelación hidráulica.

Abstract

This study was conducted in Sensunapán river basin, located in the department of Sonsonate; the field phase was implemented in November 2015 and was under study to analyze the hydrological behavior of the basin of river Sensunapán using tools Geographic Information System (GIS). The methodological process began with the delimitation of river watersheds belonging to Sensunapán river from maps at 1: 25,000 National Registration Center (CNR); also determined the corresponding morphometric characteristics. The biophysical and hydrological basin analysis was carried out by the hydrological classification proposed by the Soil Conservation Service. weighted runoff coefficient for the entire basin and the upper, back to establish biophysical analysis of it was determined. Time concentration was determined by the formula Kirpich. To design flows of the basin, the average intensity of the rain settled through the historical record of hydrometric stations in the municipalities of Chalchuapa, Juayúa, Apaneca, Izalco, Acajutla; which possess intensity data, duration and frequency; also they were taken as reference for the calculation of the flow, return periods of 02, 05, 10, 15 and 25, with a duration of 360 minutes for the entire basin and 150 minutes to the top of it. Hydraulic modeling was performed using software HEC - RAS 4.1.0, which allowed the calculation for different flow configurations in each of the cross sections along the two sections located in Vega del Rio and El Palmar communities; simulated levels of water depths and flow rates, among other variables values.

The simulation was performed considering the "tramoalto" from the El Palmar (Code: 1269.804) community to the "tramobajo" located in the Vega del Rio (Code : 10.30199) community. The rate of flow in the cross section of the El Palmar community was critical sub character, with an increasing trend in the number of Froude with values of 0.32, 0.43, 0.48, 0.51 and 0.55, for return periods of 2, 5, 10, 15 and 25; thus indicating that the flow rates are lower, but his elevation hydraulic is greater; ie the flow travels by its own weight; however, the rate of flow in the corresponding cross section to the Vega del Rio community was critical, a Froude number of 1.13, which was the same for all periods above mentioned return, in this way, it is in a situation where conditions are generated to flow turbulence occurs and thus an increase in flow velocity resulting in increased channel erosion and undermining of the inhabited areas. From the hydrological point of view, the upper part of the basin has good hydrological condition, consisting of areas of coffee crops and forests, and soil type whose physical properties with moderate infiltration rates and water transmission define a condition moderate runoff potential; however, the design flows under these biophysical characteristics indicate a threat, due to the characteristics of human settlements in the lower part of the basin. The characteristics of the flow channel of Sensunapán river up to the Vega del Rio community, has a high degree of erosive capacity, meaning susceptibility to undercuts due to the speed that the flow has on that site, represented this in an increase community vulnerability.

Key words: Sensunapán River, hydrological analysis, hydraulic modeling

Introducción

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

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

En el departamento de Sonsonate, se presenta la mayor cantidad de precipitaciones en la zona de la cordillera del bálsamo y en la zona noroccidental de dicho departamento, el resto del departamento presenta precipitaciones moderadas de acuerdo a información del Sistema Nacional de Estudios Territoriales (SNET) (MARN,2012). La zona sur del departamento presenta alta susceptibilidad a inundaciones específicamente municipios como Santa Isabel Ishuatán y Acajutla. El municipio de Sonsonate es de susceptibilidad moderada y el resto de baja susceptibilidad en cuanto a inundaciones.

Para determinar el análisis hidrológico de la cuenca y la parte alta de la misma, se llevó a cabo su delimitación a través de las herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG); además se digitalizó el cauce principal del río a través de Arc-SWAT (Winchell, M. 2007). Posteriormente, se realizó el análisis biofísico o clasificación hidrológica, así como la determinación del tiempo de concentración, número de curva y el coeficiente de escurrimiento ponderado (Villón Béjar 2004).

Los caudales máximos o de diseño, se determinaron haciendo uso del historial de precipitaciones máximas registradas en las estaciones climatológicas de Chalchuapa, Juayúa, Apaneca, Izalco y Acajutla, para periodos de retorno de

2, 5, 10, 15 y 25 años, las cuales pertenecen a la cuenca del río Sensunapán; además, se determinaron las áreas de cada una de las estaciones involucradas a través de la metodología de los polígonos de Thiessen, herramienta de ArcGIS.

La modelación hidráulica de las secciones transversales de interés, se efectuó con el software HEC – RAS 4.1.0, el cual permitió conocer la geometría que poseen cada una de éstas, así como la velocidad del flujo, la línea de energía y el perfil longitudinal del flujo en todo el cauce.

La ubicación de las zonas de inundación se desarrolló a través de HEC-GeoRAS 10.2, herramienta de ArcGIS, el cual determino hasta qué punto el nivel del agua podía superar los límites de las secciones hidráulicas presentadas en las zonas habitadas.

Materiales y Métodos

Ubicación y duración de la investigación

La investigación se realizó en la cuenca del río Sensunapán y parte alta de la misma, haciendo uso de la base de datos y cartografía del Centro Nacional de Registro (CNR). Este río fue seleccionado por la ubicación estratégica de su cauce, en el cual existen comunidades como el caso de El Palmar y Vega del Río, las cuales se encuentran vulnerables a inundaciones por encontrarse dentro de los límites del cauce principal. El río Sensunapán se origina en las cercanías del cantón San José La Majada, más o menos sobre la cota de 1000 msnm. En su recorrido forma una serie de meandros, pequeñas terrazas y un valle profundo, cerca de su desembocadura; su pendiente es bastante fuerte y en su gran mayoría corre por un cauce profundo y con un lecho permanente (Geólogos del Mundo, 2005).

La investigación se realizó en el período comprendido del mes de enero de 2014 a marzo del 2016, dentro de este periodo se llevó a cabo la fase de campo y la fase de gabinete y documentación.

En la figura 1 se muestra la cuenca del río Grande o Sensunapán, del departamento de Sonsonate, el cual se encuentra entre las coordenadas 13° 43' 0" Norte y 89° 43' 0" Oeste posee un área de 218.8715 km², con una elevación máxima de 2090 metros sobre el nivel del mar, una elevación media de 1,045.00 msnm y la mínima elevación que está al nivel del mar, por desembocar el río en el Océano Pacífico. En la cuenca, la precipitación media anual es aproximadamente de 2200 mm/año (355 m³/año) (Geólogos del Mundo, 2005).



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

Metodología de campo

Georreferenciación de las comunidades

Se realizaron visitas en la zona de estudio en la parte alta y media de la cuenca del río Sensunapán; se georreferenciación a las 14 comunidades pertenecientes a ésta para poder ubicarlas en el mapa, tal como se puede observar en la figura 2.

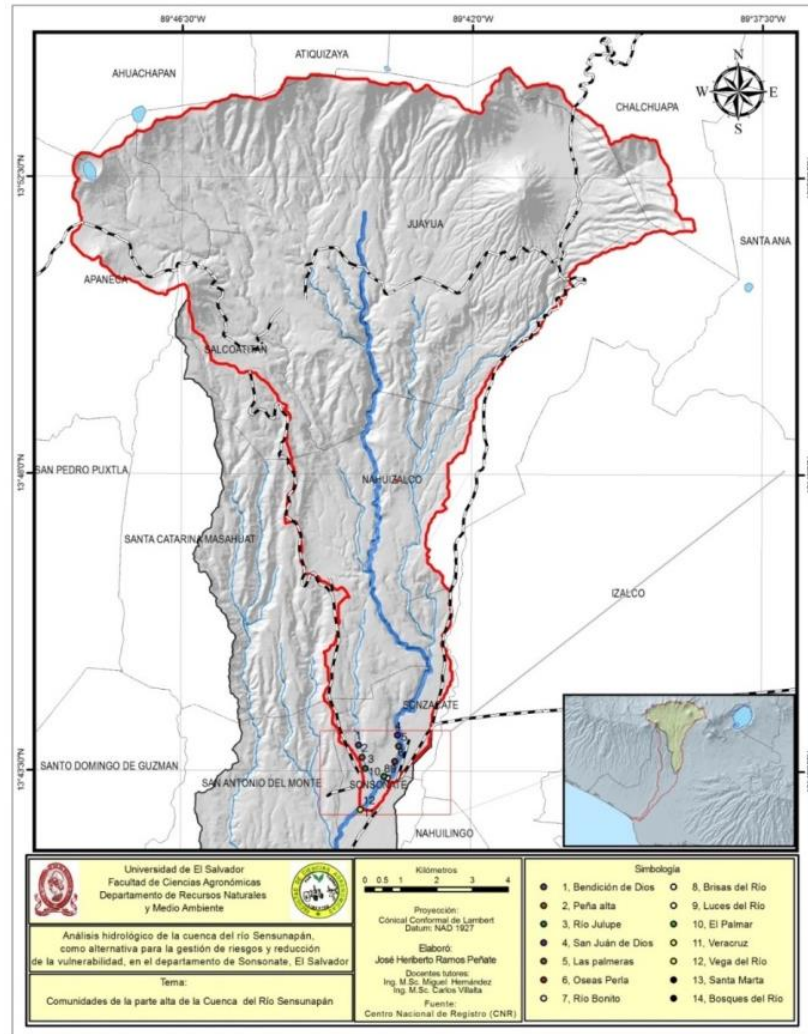


Figura 2. Comunidades pertenecientes a la cuenca del río Sensunapán.

Toma de datos de las secciones transversales del cauce del río

Se identificaron a las comunidades El Palmar y Vega del río como las más vulnerables a inundaciones, ocasionadas por precipitaciones máximas. En ese sentido, se realizaron toma de datos del ancho del cauce en cada una de las comunidades antes mencionadas.

En la figura 3 se puede observar a la comunidad El Palmar y Vega del Río; la primera posee una mayor anchura y varios meandros en el cauce del río comparada con la segunda.

En la figura 3, se puede observar el cauce del río sensunapan y el puente peatonal utilizado en la comunidad Vega del Río. Este puente es de suma importancia dentro del análisis para establecer si la geometría del cauce es capaz de superar o soportar el flujo del río. Se tomaron las elevaciones de las diferentes partes del puente; además, se realizó el mismo procedimiento bajo del mismo.



Figura 3. a) Comunidad El Palmar, b) Comunidad Vega del Río.

Metodología de laboratorio

La metodología consistió en dos procesos fundamentales: un análisis hidrológico y una modelación hidráulica, este último llevado a cabo por las herramientas del Sistema de Información Geográfica (SIG).

Análisis hidrológico

Se seleccionó el mapa de la cuenca del río Sensunapán a través del ArcGIS 10.X; además, se obtuvo el relieve del mismo hasta contar con las características morfométricas, indispensables para determinar el tiempo de concentración de la cuenca.

Se utilizó el mapa del uso actual del suelo del año 2013 (MAG, 2013) y el mapa de texturas del suelo de El Salvador (MAG, 2012), para obtener el mapa de unidades homogéneas, como se puede observar en la figura 4, el cual nos permitiría realizar el análisis biofísico de la cuenca.

El mapa de unidades homogéneas identificó un total de seis tipos o texturas de suelos dentro de la cuenca, las cuales se clasificaron usando la metodología propuesta por Villón Béjar (2004), tal como se muestra en el cuadro 1.

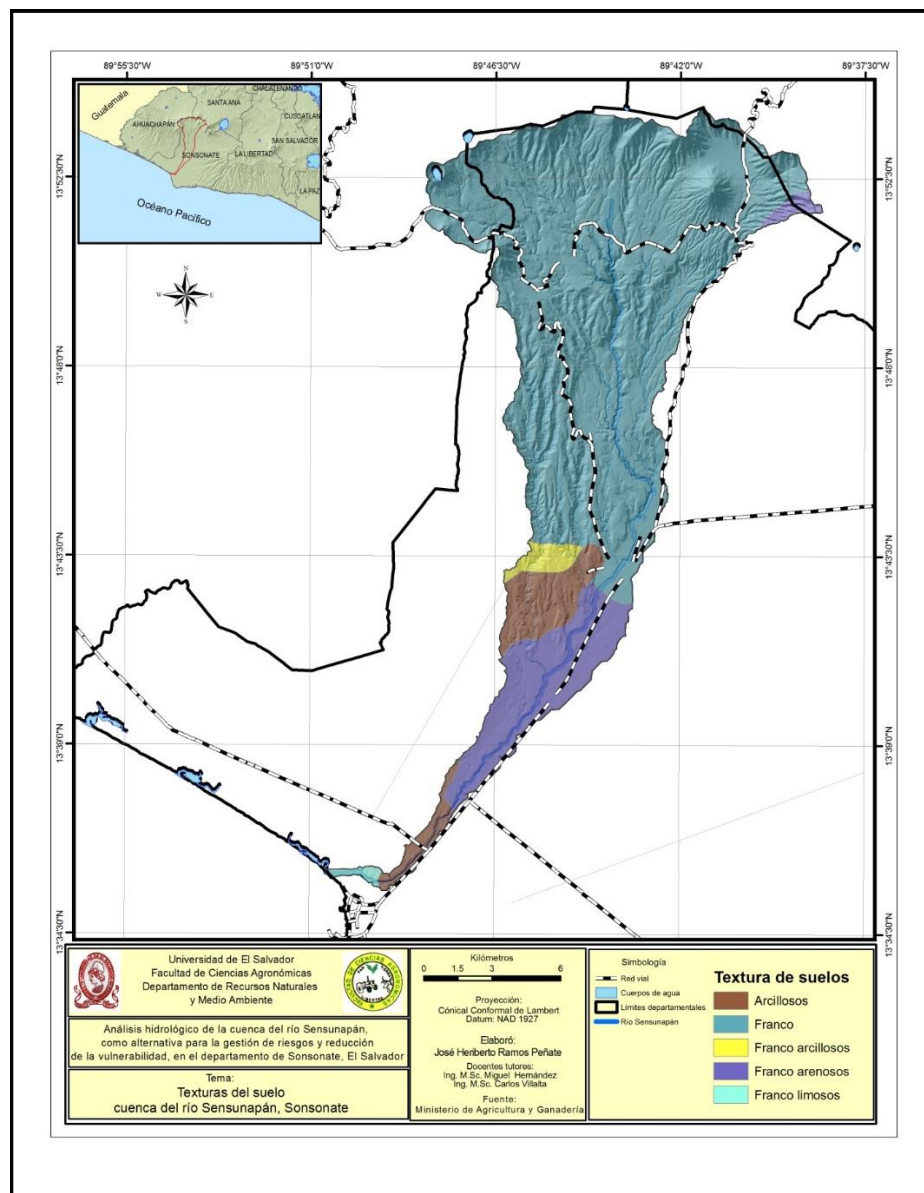


Figura 4. Mapa de unidades homogéneas de la cuenca del río Sensunapán.

Cuadro 1. Clasificación hidrológica de suelos.

Grupo de suelos	Descripción
A	Son suelos que tiene altas tasas de infiltración (bajo potencial de escurrimiento) aunque están enteramente mojados y constituidos mayormente por arenas o gravas profundas, bien y hasta excesivamente drenadas. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.
B	Son suelos que tienen tasas de infiltración moderadas cuando están cuidadosamente mojados y están constituidos mayormente por suelos profundos de texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisión de agua.
C	Son suelos que tienen bajas tasas de infiltración cuando están completamente mojados y están constituidos mayormente por suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo, o suelos con una textura que va de moderadamente fina a fina. Estos suelos tienen una baja tasa de transmisión del agua.
D	Son suelos de alto potencial de escurrimiento, de tasas de infiltración muy bajas cuando están completamente mojados y están conformados mayormente por suelos arcillosos con un alto potencial de esponjamiento, suelos con índice de agua permanentemente alto, suelos con arcilla o capa de arcilla en la superficie o cerca de ella y suelos superficiales sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa muy baja de transmisión del agua.

Fuente: Villón Béjar, M. 2004.

Las texturas de suelos que se hayan van desde franco arenoso, francos, arcillosos, franco arcillosos, franco arenoso hasta franco limosos; de igual manera, el mismo mapa identificó diez usos del suelo, los cuales fueron clasificados igualmente con la metodología propuesta por Villón Béjar (2004) que hace referencia al escurrimiento directo en función de la cobertura vegetal existente, tal como se puede observar en el cuadro 2. El tipo de cobertura vegetal o uso del suelo va desde bosque, café, caña de azúcar, granos básicos, mosaico de cultivos y pastos, pastos cultivados, pastos naturales, sistemas agroforestales, usos y coberturas diversas hasta el tejido urbano; cada uno de ellos distribuidos en diferentes zonas y áreas de la cuenca.

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

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

Fuente: Villón Béjar, M. 2004

El número de curva contiene una serie de factores que varía de 1 a 100, de esta manera, el primer factor indica que toda la lluvia infiltra, mientras que el segundo, indica que toda la lluvia escurre. Estos valores proporcionaron la representación gráfica estandarizada de la información de la precipitación total y la precipitación efectiva para muchas cuencas. Para la obtención de este valor, se fueron designando factores previamente establecidos, según la tabla del Servicio de Conservación de Suelos (1986), presentada por Villón Béjar (2006) en el cuadro 3.

El coeficiente de escorrentía ponderado “C” se determinó, producto de multiplicar el número de curva (CN) por cada área correspondiente, variando según la condición hidrológica, tratamiento agrícola y grupo hidrológico del suelo presente en la cuenca; luego se sumaron los valores de C, dividiéndose entre el área total de la cuenca que representa el drenaje principal obteniéndose el valor de C ponderado (Ven Te Chow, citado por Carías, 2004)

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

Para determinar los caudales máximos o de diseño, se hizo utilizando la metodología del SCS propuesto por Villón Béjar (2004) y los polígonos de Thiessen, herramienta de Arc GIS 10.2, donde se identificaron las estaciones climatológicas de Chalchuapa, Juayúa, Apaneca, Izalco y Acajutla, para determinar la precipitación promedio, para periodos de retorno de 02, 05, 10, 15 y 25 años, una duración de 360 minutos y 150 minutos para la parte alta de la cuenca; estos datos fueron proporcionadas por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), de El Salvador.

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

Número de curva <i>N</i> para complejos hidrológicos de suelo cobertura (para condición de humedad antecedente <i>II</i> e <i>Ia</i> = 0.25)						
Cobertura		Número de curva				
Uso de la tierra	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	Grupo hidrológico			
			A	B	C	D
Descuidado, en descanso sin cultivos	Surcos rectos	----	77	86	91	94
	Surcos rectos	Pobre	72	81	88	91
	Surcos rectos	Buena	67	78	85	89
	Curvas de nivel	Pobre	70	79	84	88
	Curvas de nivel	Buena	65	75	82	86
Cultivos	Curvas de nivel y en terrazas	Pobre	66	74	80	82
	Curvas de nivel y en terrazas	Buena	62	71	78	81
	Surcos rectos	Pobre	65	76	84	88
	Surcos rectos	Buena	63	75	83	87
	Curvas de nivel	Pobre	63	74	82	85
Pequeños granos	Curvas de nivel	Buena	61	73	81	84
	Curvas de nivel y en terrazas	Pobre	61	72	79	82
	Curvas de nivel y en terrazas	Buena	59	70	78	81
	Surcos rectos	Pobre	66	77	85	89
	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85
Sembríos cerrados, legumbres o sembríos en rotación	Curvas de nivel	Pobre	64	75	83	85
	Curvas de nivel	Buena	55	69	78	83
	Curvas de nivel y en terrazas	Pobre	63	73	80	83
	Curvas de nivel y en terrazas	Buena	51	67	76	80
			Pobre	68	79	86
Pastizales o similares		Regular	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
	Curvas de nivel	Pobre	47	67	81	88
	Curvas de nivel	Regular	25	59	75	83
	Curvas de nivel	Buena	6	35	70	79
Patios		----	59	74	82	86
Caminos, incluyendo derecho de vía.	Cieno	----	72	82	87	89
	Superficie firme	----	74	84	90	92

Se determinaron las siguientes características fisiográficas de la cuenca:

A = área de la cuenca, en km²

tc = tiempo de concentración, en horas.

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

Se calcularon las lluvias con cinco horas de duración en toda la cuenca y de 2.47 para la parte alta de la misma, con periodos de retorno 02, 05, 10, 15 y 25 años.

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

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

Dónde: Q = escorrentía, en mm.

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

Una vez determinados estos caudales, mediante el cuadro 4, en función de la magnitud del tiempo de concentración, se determinó el valor del gasto unitario (q).

Por último, se multiplicó el gasto unitario (q), la escorrentía (Q), y el área de la cuenca (A), para obtener el gasto máximo (Qmax) en m³/seg.

Posteriormente, haciendo uso de la herramienta de HEC-RAS 4.0.1, se procesaron los datos de geometría levantadas en campo de las comunidades con los caudales de diseño previamente determinados y finalmente, mediante la herramienta de HEC-GeoRAS, se diseñaron los mapas con las zonas de inundación localizadas.

Resultados y Discusión

Análisis hidrológico

Al haber realizado el análisis biofísico de la parte alta de la cuenca, que es donde se encuentran los habitantes de las comunidades Vega del Río y El Palmar, en el cuadro 5 se puede observar los valores del número de curva correspondientes.

Cuadro 4. Gasto unitario q (m³/s/mm/km²), en función del tiempo de concentración Tc; (horas).

Tc	q	Tc	q	Tc	q
< 0.1	0.337	1.0	0.158	8.0	0.039
0.2	0.300	1.5	0.120	10.0	0.034
0.3	0.271	2.0	0.100	12.0	0.030
0.4	0.246	2.5	0.086	14.0	0.027
0.5	0.226	3.0	0.076	16.0	0.025
0.6	0.208	4.0	0.063	18.0	0.023
0.7	0.195	5.0	0.054	20.0	0.021
0.8	0.190	6.0	0.048	22.0	0.020
0.9	0.168	7.0	0.043	24.0	0.019

Fuente: Villón Béjar, M. 2004

Cuadro 5. Número de curva para diferentes prácticas agrícolas, condiciones hidrológicas y grupos hidrológicos de suelos.

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

Fuente: elaboración propia, 2014.

El cuadro 6 se muestra los valores de C, producto de multiplicar el valor del número de curva por el área correspondiente según el uso actual del suelo y la clasificación de estos.

Estos valores de C se sumaron y se dividieron entre el área total de la parte alta de la cuenca, dando como producto un valor de coeficiente de escorrentía ponderado adimensional de 61.35; este valor, indica que el 61.35% de la precipitación total se convierte en escorrentía superficial por unidad de área o en la parte alta de la cuenca del río Sensunapán. El tiempo de concentración mediante la fórmula empírica de Kirpich, dio un valor de 2.47 horas para la parte alta de la cuenca del río Sensunapán.

El cuadro 7 muestra los caudales máximos determinados en la parte alta de la cuenca, además de la intensidad y precipitación media.

Cuadro 6. Coeficiente de escorrentía ponderado de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán.

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

Fuente: elaboración propia, 2014.

Cuadro 7. Intensidades media, precipitación promedio y caudales máximos de la parte alta de la cuenca del río Sensunapán para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15 y 25 años con una duración de 150 minutos.

Periodo de retorno	Intensidad media	Precipitación promedio	Caudal máximo
02 años	0.38755 mm/min.	23.2534 mm/hora	58.1954 mm
05 años	0.51680 mm/min	31.0080 mm/hora	77.5202 mm
10 años	0.60216 mm/min	36.1297 mm/hora	90.3244 mm
15 años	0.65319 mm/min	39.1914 mm/hora	97.9787 mm
25 años	0.71099 mm/min	42.6596 mm/hora	106.6492 mm

Fuente: elaboración propia, 2014.

Moderación hidráulica

El cuadro 8, haciendo uso del software HEC – RAS 4.0.1 se determinaron los datos geométricos correspondientes a las secciones transversales que caracterizan al cauce del río; mientras que el cuadro 9 hace referencia a las velocidades medias del flujo siempre de cada una de las secciones transversales en estudio. La figura 5 muestra los límites de inundación y profundidades alcanzadas por parte del flujo, a través de la modelación desarrollada con HEC-GeoRAS, herramienta de ArcGIS 10.X.

Cuadro 8. Régimen del flujo y número de Froude, periodos de retorno de 2, 5, 10,15 y 25 años.

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

Fuente: elaboración propia, 2014.

Cuadro 9. Velocidades medias del flujo para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15 y 25 años.

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

Fuente: elaboración propia, 2014.

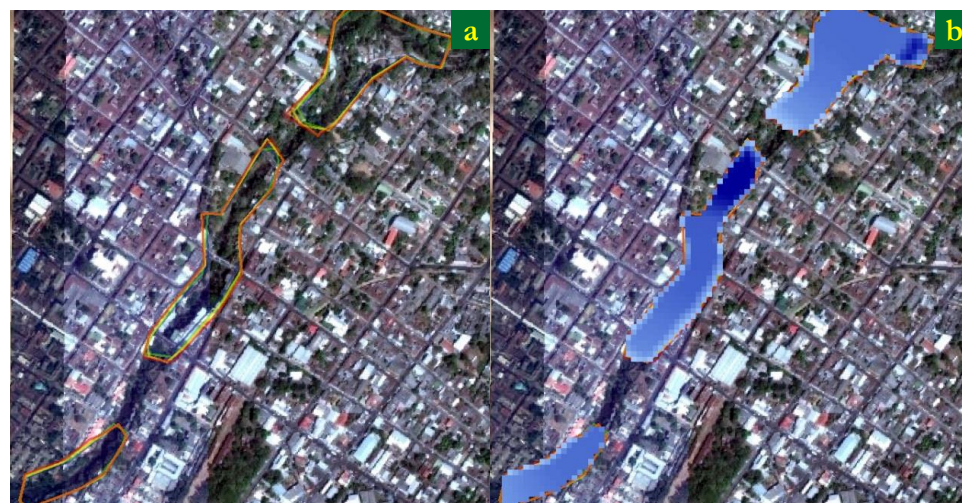


Figura 5. Comunidad El Palmar y Vega del Río. a) Límites de inundación, b) Zonas de inundación.

La cobertura vegetal de la cuenca alta del río Sensunapán, analizada mediante los mapas de uso de la tierra del año 2010, consiste principalmente de zonas cafetaleras hasta los 1,600 msnm y bosques primarios en las partes altas de la sierra Apaneca – Ilamatepec, las que contribuyen a disminuir los efectos ocasionados por tormentas extremas, principalmente porque tienen el efecto de retener la lluvia a través de la infiltración y retardando de la escorrentía; sin embargo, desde el punto de vista hidrológico y la forma de la cuenca, los caudales de diseño para periodos de retorno cortos (2, 5, 10 y 15 años), indican un alto riesgo para las comunidades localizadas en los márgenes del río, principalmente en El Palmar y Vega del Río, también señalado como sitios críticos en el Plan de Mitigación de Riesgos del municipio de Sonsonate, sin contarse a esta fecha con un sistema de alerta temprana (Corena Sánchez, 2012) y es confirmado por los hechos sucedidos en agosto del 2010, donde una lluvia de 30 minutos causó destrozos en la comunidad Vega del Río, haciendo colapsar los muros de contención y evacuar a varias familias del lugar (Salguero, 2010), coincidiendo también con lo expresado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2014), en relación a la parte baja de la cuenca durante la última década, la cual se ha visto frecuentemente afectada por inundaciones que han incrementado las pérdidas y daños en las comunidades asentadas en esta zona, en especial durante eventos extremos, situación confirmada en octubre de 2015 donde una precipitación acumulada de 112 milímetros en la estación Sensunapán de este departamento, provocó incrementos del nivel del flujo del agua en 1.4 metros en el río Sensunapán, las que ocasionaron inundaciones en la cuenca baja, generando situaciones de emergencia (El País, 2015). La situación anterior, amerita el fortalecimiento de la gestión de riesgos de desastres involucrando a todas las instituciones pertinentes desde la creación de los pronósticos meteorológicos por el MARN, donde se monitorea la lluvia y se prevén las probabilidades de desbordamiento del río, incluyendo la integración del gobierno local y la población organizada de las comunidades a lo largo del cauce del río Sensunapán; siendo que en el plan municipal de gestión de riesgos se detalla la población afectada por este problema. La información generada en esta investigación, puede mejorar un sistema de alerta temprana, principalmente con el conocimiento de la precipitación de la parte alta de la cuenca, cuyo tiempo de concentración calculado permite un tiempo estimado de 2.42 horas para poder evacuar, si fuese necesario, a la población más expuesta a crecientes repentinas del río (los habitantes que viven dentro del cauce), aplicables para lluvias con un periodo de retorno a partir de 2 años.

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

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

Conclusiones

Desde el punto de vista hidrológico, la parte alta de la cuenca posee una condición hidrológica buena, conformada por áreas de cultivos de café y bosques, y un tipo de suelo cuyas propiedades físicas con tasas moderadas de infiltración y transmisión de agua, definen una condición de moderado potencial de escorrentía; sin embargo, los caudales de diseño bajo estas características biofísicas, indican una amenaza, debido a las características de los asentamientos humanos en la parte baja de la cuenca.

Los caudales para periodos de retorno cortos (2, 5, 10 y 15 años), representan una amenaza para todas las comunidades localizadas en los márgenes del río Sensunapán, principalmente El Palmar y Vega del Río, por estar localizadas muy cercanas al cauce, condición confirmada por medio de los escenarios de riesgo calculados para estos periodos de retorno, indicando la necesidad de incluir esta información en los planes de municipales de gestión de riesgos.

Las características morfométricas del cauce del río Sensunapán, específicamente en las comunidades Vega del Río y El Palmar, indican su baja capacidad hidráulica en relación a los caudales de diseño, para periodos

de retorno corto, indicando la permanente susceptibilidad a inundaciones durante toda la época lluviosa.

Evidentemente la ubicación de las comunidades Vega del Río y El Palmar, muy cercanas al cauce aumenta la vulnerabilidad a sufrir los efectos de las lluvias caídas en la parte alta de la cuenca; sin embargo, el tiempo de concentración de 2.47 horas indica la posibilidad de crear y/o fortalecer un Sistema de Alerta Temprana, que disminuya el riesgo.

Las características del flujo del cauce del río Sensunapán a la altura de la comunidad Vega del Río, presenta un alto grado de capacidad erosiva, significando susceptibilidad a socavaciones debido a la velocidad que el flujo posee en ese sitio, representado esto en un incremento de la vulnerabilidad de la comunidad.

Recomendaciones

Mantener y mejorar las condiciones biofísicas de la cuenca, a través de un fortalecimiento de las zonas cafetaleras y conservación de las áreas de boscosas en la parte alta de la cuenca promoviendo la conservación de la cobertura vegetal, reduciendo de esta manera la deforestación, degradación de los suelos y disminución de la escorrentía superficial.

Reubicar a los habitantes de las comunidades que se encuentran más vulnerables a inundaciones, en sitios más seguros.

Incluir a toda la comunidad en los planes de gestión de riesgos e incorporar medidas de mitigación en las zonas más vulnerables.

Fortalecer el sistema de alerta temprana de las comunidades, tomando en cuenta que el tiempo de concentración de una precipitación máxima es de 2.42 horas para lluvias que se producen en la parte alta de la cuenca del río Sensunapán, hasta la comunidad Vega del Río.

Crear una articulación intermunicipal, entre las comunidades y representantes de protección civil comunal.

Realizar un censo de la población que podría ser afectada por una inundación máxima, tomando como base las cotas de inundación definidas para todos los períodos de retorno.

Establecer un albergue para los habitantes de las comunidades, en un lugar apropiado y sin riesgos a inundaciones; debido a que en ambas comunidades no se encuentran condiciones o espacios físicos que no sean susceptibles a inundaciones, tomando como referencia la modelación hidráulica.

Bibliografía

Geólogos del mundo. 2005. Caracterización Hidrogeológica de Nacimiento de Agua para el Abastecimiento de San Antonio del Monte. ACASTAM (Asociación Comunal Administradora del Sistema de Abastecimiento de Agua Alcantarillado y Saneamiento Ambiental de las Comunidades del Municipio de San Antonio del Monte). Ayuntamiento de Asturias, España. 19 p.

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

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

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

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

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

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

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